

บทความวิจัย

- ◆ การพัฒนาสูตรแป้งชาลาเปาเสริมผงเนื้อลูกตาลสุก
สุธิดา กิจจาวรสเสถียร
- ◆ การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อเพื่อการขยายพันธุ์และการชักนำเหง้าขนาดเล็กจากอวนชักมดลูกตัวเมีย (*Curcuma comosa* Roxb.)
ศิริรัตน์ พักปากน้ำ ณิชชา ยูนชุม มนัสวี เดชกล้า และ วชิราภรณ์ พิกุลทอง
- ◆ Isolation, Classification and Study of the Influence of Glow Discharge Plasma on Dirty Panicle Rice Fungal Pathogens
Waraporn Sutthisa Perachat Chaidee Supicha Saengkaewsuk and Artit Chingsungnoen
- ◆ กำลังและความต้านทานการกัดกร่อนของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถาถ่านหินแคลเซียมสูง
อภัย เบญจพงศ์ เซาฟิร ดือราแม และ รัตนศักดิ์ หงษ์ทอง
- ◆ The Study of Optimum Factors in Gold Plating Process to Enhance OTOP Knife Products for Ban Mai Knife Forgers Village, Lom Sak District, Phetchabun
Suwimon Thiakthum Tannachart Wantang and Thongchai Khruaphue
- ◆ การหาปริมาณการส่งนํ้ามันเชื้อเพลิงอย่างประหยัด: กรณีศึกษาบริษัทรับขนส่งสินค้า
พัชรา ศรีพระบุญ และ เขมฐา ชำนาญหล่อ
- ◆ การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตร โดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้ง สำหรับครัวเรือนในชุมชนตำบลเกาะจันทร์ จังหวัดนครศรีธรรมราช
พิพัฒน์ จันทร์ประดิษฐ์ อธิราชย์ เจริญรงค์ และ ผจงสุข สุธารัตน์
- ◆ The Design of Power Harvester for Passive RFID Tags
Norrarat Wattanamongkhon and Chaiphan Prakaraphan
- ◆ ค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105
ทินกร เพ็งประโคน กระวี ตรีอานรรค เทวรัตน์ ตรีอานรรค และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช
- ◆ สมบัติกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105
ธรรมรัตน์ แยมสูงเนิน กระวี ตรีอานรรค เทวรัตน์ ตรีอานรรค และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช
- ◆ การศึกษาผลของกระแสฮาร์โมนิกส์ต่อค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟสและการทำให้เป็นจริงด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส 15 องศา
ไพบูลย์ เกียรติสุขตนาธร ภาสวิญญ์ กล้ารักษิ ณรงค์ฤทธิ์ ยินติยม และ นภัทร วัจนเทพินทร
- ◆ ปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง
รัฐวัฒน์ ตรีวงศ์ นิรัตน์ แยมโอษฐ์ และ อติสรณ์ พงษ์สุวรรณ
- ◆ การจำลองและการทดสอบระบบเติมอากาศแบบน้ำไหลเวียนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์
เพ็ญพิชา เนียมสกุล สมร พรชื่นชูวงศ์ และ อาทิตย์ คุณศรีสุข
- ◆ การออกแบบรูปแบบล้อรับแรงกดที่เหมาะสมสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดเกาะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
นุชนาถ ทองใหญ่ และ ประกอบ ชาดิภักดิ์
- ◆ Finite Element Analysis of Armor Piercing Bullet Penetrating Hard Steel Armor Plate
Visa Khramum and Prakorb Chartpuk
- ◆ ผลของสารสกัดหยาบด้วยเอทานอลจากสมุนไพร 7 ชนิดต่อการไล่มด
อิสสริยา เอี่ยมสุวรรณ ศรารุช สุทธิรัตน์ ณัฐริณี หอระตะ และ ทวีพร พันธุ์พาณิชย์

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

RMUTP RESEARCH JOURNAL

ที่ปรึกษา

ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ดร.ปริญญ์ บุญกนิษฐ

รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร วิจัยและพัฒนานวัตกรรม

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี

กองบรรณาธิการ จากหน่วยงานภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์วิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร	เก่งพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.สันติ	แมนศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.ทรงศักดิ์	เพ็ชรมิตร	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สายประสิทธิ์	เกิดนิยม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย	อมรศักดิ์ชัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย	พองสมุทร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กองบรรณาธิการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งอรุณ พรเจริญ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลทิมา เชาวชาญชัยกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนพล มงคลรัตนาสี	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรลักษณ์ ปัญญาธิพิงศ์
ดร.ชลากร อุดมรักษาสกุล	ดร.สิงห์แก้ว ปือกเพ็ง
ดร.วราพร ทองจีน	นางสาวเจนจิรา บ.ป.สูงเนิน
นางสาวพัชรนันท์ ยังวรวิเชียร	นายปิยวัฒน์ เจริญทรัพย์

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)
ประจำปี 16 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2565

ศาสตราจารย์ (เกียรติคุณ) ดร.อรอนงค์ นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กิจพัฒน์ ภูววรรณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงไกร แซ่มสีม่วง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล กลิ่นบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐจริย จิระคกุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พรรณ ปรี่องาม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิษ วรรณไกรโรจน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ซาลี	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.แหลมทอง เหล่าคงถาวร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมพร แผ่จนคร	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนาจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤติกา แก้วจำนง	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสันต์ หงษ์สมบัติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิทธิ์ ทองจู	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐานันท์ พัชวิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดิณกร ภูวดิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัญภัส เมืองปัน	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะวรรณ สุทธิประพันธ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรนิภา บริบูรณ์สุขศรี	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มลิวรรณ นาคขุนทด	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณีย์ ยืนยงพุทธกาล	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ ขวัญอ่อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม อรุณ	มหาวิทยาลัยพะเยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อธิพงศ์ สุริยา	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรวิทย์ อุบลมณานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ฉัตรชัย รากา	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ดร.ถกวรรณ ศิริสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2565 ISSN 2651-1096 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

การพัฒนาสูตรแป้งชาลาเปาเสริมผงเนื้อลูกตาลสุก	1
สุธิดา กิจจาวรเสถียร	
การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อเพื่อการขยายพันธุ์และการชักนำเหง้าขนาดเล็กจากว่านชักมดลูก	13
ตัวเมีย (<i>Curcuma comosa</i> Roxb.)	
ศิริรัตน์ พักปากน้ำ ณิชชา ยูณัฐม มนัสวี เดชกล้า และ วชิราภรณ์ พิกุลทอง	
Isolation, Classification and Study of the Influence of Glow Discharge	24
Plasma on Dirty Panicle Rice Fungal Pathogens	
Waraporn Sutthisa Perachat Chaidee Supicha Saengkaewsuk and Artit Chingsungnoen	
กำลังและความต้านทานการกัดกร่อนของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจาก	33
เถาถ่านหินแคลเซียมสูง	
อภัย เบญจพงศ์ เขาพีร์ ดือราแม และ รัตนศักดิ์ หงษ์ทอง	
The Study of Optimum Factors in Gold Plating Process to Enhance	43
OTOP Knife Products for Ban Mai Knife Forgers Village, Lom Sak District, Phetchabun	
Suwimon Thiakthum Tannachart Wantang and Thongchai Khrueaphue	
การหาปริมาณการส่งซื่อน้ำมันเชื้อเพลิงอย่างประหยัด: กรณีศึกษาบริษัทรับขนส่งสินค้า	54
พัชรา ศรีพระบุ และ เชษฐา ชำนาญหล่อ	
การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตร โดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้ง	65
สำหรับครัวเรือนในชุมชนตำบลเกาะขันธุ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช	
พิพัฒน์ จันทร์ประดิษฐ์ อธิราชย์ เรืองรงค์ และ ผจงสุข สุธารัตน์	

สารบัญ
วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร
ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2565 ISSN 2651-1096 (Online)

	หน้า
The Design of Power Harvester for Passive RFID Tags	74
Norrrat Wattanamongkhon and Chaiphan Prakaraphan	
ค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105	86
ทินกร เพ็งประโคน กระวี ตรีอำรรค เทวรัตน์ ตรีอำรรค และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช	
สมบัติกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105	99
ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน กระวี ตรีอำรรค เทวรัตน์ ตรีอำรรค และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช	
การศึกษาผลของกระแสฮาร์โมนิกส์ต่อค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟสและ การทำให้เป็นจริงด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส 15 องศา	113
ไพบูลย์ เกียรติสุขคนธาธร ภาสวิทย์ กล่ำรักษ์ ณรงค์ฤทธิ์ ยินดียม และ นภัทร วัจนเทพินทร์	
ปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง	127
ฐิติวัฒน์ ตรีวงศ์ นิรัตน์ แยมโอษฐ์ และ อติสรณ์ พงษ์สุวรรณ	
การจำลองและการทดสอบระบบเติมอากาศแบบน้ำไหลเวียนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	141
เพ็ญพิชา เนียมสกุล สมร พรชื่นชูวงศ์ และ อาทิตย์ คุณศรีสุข	
การออกแบบรูปแบบล้อรันแฟลทที่เหมาะสมสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็ก ติดกระดาดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	157
นุชนาถ ทองใหญ่ และ ประกอบ ชาติภักดิ์	
Finite Element Analysis of Armor Piercing Bullet Penetrating Hard Steel Armor Plate	171
Visa Khamum and Prakorb Chartpuk	
ผลของสารสกัดหยาดด้วยเอทานอลจากสมุนไพร 7 ชนิดต่อการไล่แมด	187
อิสสริยา เอี่ยมสุวรรณ ศรารุช สุทธิรัตน์ ณัฐริณี หอระตะ และ ทวีพร พันธุ์พานิชย์	

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การพัฒนาสูตรแป้งชาลาเปาเสริมผงเนื้อลูกตาลสุก

สุธิดา กิจजारเสถียร *

สาขาวิชาอาหารโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
168 ถนนศรีอยุธยา แขวงวรวิหาร เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300

รับบทความ 3 กุมภาพันธ์ 2564 แก้ไขบทความ 25 กรกฎาคม 2564 ตอรับบทความ 16 กันยายน 2564

บทคัดย่อ

จากการตรวจสอบผลของการใช้เนื้อตาลสุกในลักษณะผงเสริมในแป้งชาลาเปาด้วยอัตราส่วนของผงเนื้อตาลสุกร้อยละ 0 10 20 และ 30 พบว่า จากการวัดคุณภาพทางประสาทสัมผัสของแป้งชาลาเปาเสริมผงเนื้อลูกตาลสุก พบว่า สัดส่วนของผงเนื้อตาลสุกที่ดีที่สุกร้อยละ 10 ส่วนผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีในแป้งชาลาเปาเสริมผงเนื้อลูกตาลสุกร้อยละ 10 พบว่า ปริมาณพลังงานทั้งหมด 296.25 แคลอรี/100 กรัม ส่วนความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 39.64 0.69 5.33 5.70 และ 55.38 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพในแป้งชาลาเปาเสริมผงเนื้อลูกตาลสุกร้อยละ 10 พบว่า ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) 77.38 ค่าสว่าง (L^*) 10.27 ค่าความเป็นสีแดง (a^*) 36.25 ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) 3,421.50 ตามลำดับ ค่าความแข็ง 0.85 g force ค่าความยืดหยุ่นร้อยละ 86.25 ค่าการทนต่อการเคี้ยว 1,314 g force และค่าการเกาะติดร้อยละ 46.09 และผลการยอมรับของผู้ทดสอบชิมมีต่อชาลาเปาทำจากแป้งชาลาเปาเสริมผงเนื้อลูกตาลสุกชาลาเปา พบว่า ได้รับความชอบร้อยละ 90

คำสำคัญ : การพัฒนาสูตร; ผงเนื้อลูกตาลสุก; แป้งชาลาเปา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +664 240 9666, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: suthida.k@rmutp.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Formulation Development of Steamed Buns by Supplemented Toddy Palm Pulp Powder

Suthida Kitjavorasatien*

Department of Food and Nutrition's Lecture, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

168 Thanon Sri Ayuthaya, Wachira Phayaban, Dusit District, Bangkok 10300

Received 3 February 2021; Revised 25 July 2021; Accepted 16 September 2021

Abstract

The results of the using of toddy palm pulp powder form added to steamed buns using ratios of 0, 10, 20 and 30 %. It was found that from the sensory quality measurements of steamed buns by supplemented toddy palm pulp powder was 10%. As the results of chemical quality analysis of 10% steamed buns by supplemented toddy palm pulp powder was found that the total energy content was 296.25 calories per100g., the moisture, ash, protein, fat and carbohydrate was 39.64, 0.69, 5.33, 5.70 and 55.38 %, respectively. The results of physical quality analysis of 10% steamed buns by supplemented toddy palm pulp powder showed that water activity (a_w) 77.38, brightness (L^*) 10.27, red (a^*) 36.25, yellow (b^*) 3,421.50 respectively, Hardness 0.85 g force, Springiness 86.25 %, Chewiness 1,314 g force and Cohesiveness 46.09%. From consumer acceptance testing of 40 testers, 90 % of them accepted in this product.

Keywords : Formulation Development; Toddy Palm Pulp Powder; Steamed Buns

* Corresponding Author. Tel.: +664 240 9666, E-mail Address: suthida.k@rmutp.ac.th

1. บทนำ

ต้นตาลโตนดซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญอย่างหนึ่งของจังหวัดเพชรบุรี ในปี 2558 จังหวัดเพชรบุรีมีต้นตาลประมาณ 3.36 แสนต้น โดยอำเภอบ้านลาดมีต้นตาลมากที่สุดกว่า 1.7 แสนต้น รองลงมาคือ อ.เมือง 9.1 หมื่นต้น และ อ.ท่ายาง 3.3 หมื่นต้น [1] ส่วนที่นิยมนำมาประกอบอาหาร คือ ลูกตาลที่แก่จัดมีจาวตาลลักษณะเหนียว แข็ง ใช้ทำจาวตาลเชื่อม ส่วนลูกตาลที่แก่จัดจะมีสีเหลืองสด เนื้อตาลสุกเป็นผลไม้สีเหลืองส้มที่เกิดจากสารแคโรทีนอยด์ นำมาคั้นน้ำ และเอาเส้นใยออกได้น้ำสีเหลือง มีกลิ่นหอม ใช้ดื่มดื่มหรือทำอาหารคาวหวาน เช่น แกงหัวตาล ขนมตาล เป็นต้น ลูกตาลสามารถปลูกได้ในทุกภาคของประเทศไทยโดยเฉพาะจังหวัดเพชรบุรี สงขลา สุพรรณบุรี และอยุธยา เป็นต้น แต่ยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์มากนัก ส่วนใหญ่ปล่อยให้สุกคาต้น และหล่นเน่าเสียไป

อาหารว่างไทยมีมานานตั้งแต่สมัยโบราณแม่บ้านสมัยก่อนใช้เวลาว่างในการทำอาหารว่างเก็บไว้โดยใช้วัตถุดิบที่เหลือจากอาหารมื้อหลักให้เป็นประโยชน์และใช้วัตถุดิบที่มีมาก เมื่อมีการต้อนรับแขกก็จะนำอาหารว่างมารับแขกพร้อมกับเสิร์ฟน้ำผลไม้หรือน้ำลอยดอกมะลิ ต่อมามีการพบปะกับชาวต่างชาติรับเอาวัฒนธรรมต่าง ๆ เข้ามา จีนเป็นชาติที่ใกล้ชิดกับไทยอาหารว่างที่เป็นของชาว ได้แก่ ชาลาเปา เป็นอาหารเข้าของชาวจีนชนิดหนึ่งที่ทำมาจากแป้งสาลีและยีสต์ ซึ่งนิยมรับประทาน ระหว่างอาหารมื้อหลัก เป็นอาหารที่จัดเพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ที่ไม่ทันรับประทานอาหารเช้าหรือภารกิจมาก ทำงานจนล่วงเวลารับประทานอาหาร เพื่อบรรเทาความหิวให้ความอิ่มอร่อย มีหลายประเภทให้เลือก สะดวกในการรับประทานและการจัดเลี้ยง หรือสำหรับผู้เดินทางโดยรถ ทางเรือ หรือสายการบิน ทำรายได้ให้กับอุตสาหกรรมบริการในระดับที่สูงมาก [2]

ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงคุณค่าทางโภชนาการและเพื่อ

สร้างมูลค่าของเนื้อลูกตาลสุก จึงนำเนื้อลูกตาลสุกมาศึกษากรรมวิธีการแปรรูปในผลิตภัณฑ์อาหารว่าง ได้แก่ แป้งชาลาเปา พร้อมบริโภคให้กับกลุ่มคน ทุกเพศ ทุกวัย และเพื่อถ่ายทอดแลกเปลี่ยนความรู้และสร้างรายได้ให้กับชุมชนกลุ่มวิสาหกิจชุมชน กลุ่มอนุรักษ์และสืบสานตาลโตนดจังหวัดเพชรบุรีต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

วัตถุดิบในการทำแป้งชาลาเปา

- 1) แป้งสาลีอเนกประสงค์ (ตรา วัว)
- 2) แป้งเค้ก (ตรา บัวแดง)
- 3) ยีสต์ (ตรา saf-instant)
- 4) น้ำอุ่น
- 5) น้ำตาลทราย (ตรา ลิ้น)
- 6) เกลือปรมัตถ์
- 7) ผงฟู (ตรา Best food)
- 8) เนยขาว (ตรา โอพี)
- 9) สารเสริมคุณภาพ SP

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

การศึกษาดูสูตรพื้นฐานแป้งชาลาเปา ขั้นตอนการทำแป้งชาลาเปาสูตรพื้นฐาน 3 สูตร ดังตารางที่ 1 เพื่อคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดนำมาใช้ในการพัฒนาแป้งชาลาเปาเสริมผงเนื้อลูกตาลสุกต่อไป

ตารางที่ 1 ส่วนผสมที่ใช้ในการทำแป้งชาลาเปาสูตรพื้นฐานจำนวน 3 สูตร

วัตถุดิบ	ปริมาณ (ร้อยละ)		
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3
แป้งเค้ก	55	45	-
แป้งสาลีอเนกประสงค์	-	-	53.50
ยีสต์	1.08	0.14	0.51
น้ำ	24.26	29.40	27.40
น้ำตาลทรายขาว	13.2	14.85	13.5

ตารางที่ 1 ส่วนผสมที่ใช้ในการทำแป้งซาลาเปาสสูตรพื้นฐานจำนวน 3 สูตร (ต่อ)

วัตถุดิบ	ปริมาณ (ร้อยละ)		
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3
เกลือ	0.18	0.07	0.30
ผงฟู	1.08	0.14	1.27
เนยขาว	5.2	8.92	-
สารเสริมคุณภาพ (SP)	-	1.48	3.52

2.1.1 ขั้นตอนการเตรียมแป้งซาลาเปา

1) เตรียมยีสต์ น้ำตาลทรายผสมกับน้ำอุ่น อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

2) นำแป้งสาลีอเนกประสงค์ แป้งเค้ก เกลือและผงฟูมาผสม แล้วร่อนรวมกันผ่านตะแกรงร่อนสแตนเลส ความละเอียด 20 เมช

3) นำส่วนผสมแป้งกับส่วนผสมยีสต์เทลงเครื่องผสมอาหาร KITCHEN AID ไฟขนาด 300 วัตต์ ตีให้เข้ากัน นำเนยขาว สารเสริมคุณภาพ SP ใส่ลงไปตี ต่อจนแป้งมีผิวสัมผัสเนียนนุ่ม นำแป้งออกจากเครื่อง ปั่นเป็นก้อนโดพักไว้ คลุมไว้ด้วยผ้าขาวบาง ชุบน้ำหมาด ปิดไว้เพื่อไม่ให้หน้าโดแห้ง พักโดไว้ให้ขึ้นเป็น 2 เท่า

4) นำโดที่ขึ้นดีแล้ว มากดไล่ฟองอากาศออกให้หมด ตัดแบ่งโดเป็นก้อน แล้วชั่งน้ำหนักก้อนละ 20 กรัม

5) การนึ่ง ต้องให้น้ำเดือดไฟแรง ใส่แป้งในลังถึงประมาณ 2 ใน 3 ส่วนของลังถึง

6) ควรวางซาลาเปาก่อนนึ่งควรวางให้ห่างกัน เพื่อให้มีช่องระบายไอน้ำ ทำให้ซาลาเปาขึ้นรูปได้

2.1.2 ขั้นตอนการเตรียมผงเนื้อตาลสุก

นำเนื้อตาลสุก (พันธุ์หม้อ) มาล้างให้สะอาด ลอกเปลือกดำออก ให้เอาดีตาลออกเพื่อไม่ให้เนื้อตาลมีรสขม ยีลูกตาลกับน้ำที่ละน้อย กรองด้วยกระชอนตาถี่ เพื่อกรองเอาเส้นใยออก เทใส่ผ้าขาวบาง ใช้เชือกผูกให้แน่นไว้ 24 ชั่วโมง เกลี่ยเนื้อตาลในถาด นำเข้าตู้อบลมร้อน โดยใช้

อุณหภูมิในการอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง บดผ่านตะแกรงร่อนความละเอียด 80 เมช [3]

2.1.3 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของเนื้อตาลสุกอบแห้งและผงเนื้อตาลสุก

วิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเนื้อตาลสุกอบแห้งและผงเนื้อตาลสุกตามวิธีการของ AOAC (2019) [4] ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า คาร์โบไฮเดรต และพลังงาน

2.1.4 ทดสอบปริมาณที่เหมาะสมของผงเนื้อตาลสุกที่ใช้เสริมในแป้งซาลาเปา

นำสูตรพื้นฐานที่ได้รับการคัดเลือกมาทดสอบหาความเหมาะสมของผงเนื้อตาลสุกที่ใช้เสริมในแป้งซาลาเปา 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 10 20 และ 30 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด โดยมีสูตรพื้นฐานเป็นสูตรควบคุม จากนั้นนำไปประเมินคุณภาพทางกายภาพ และทางประสาทสัมผัสของซาลาเปาต่อไป

2.1.5 วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของแป้งซาลาเปาสสูตรพื้นฐานที่ได้รับการคัดเลือกจำนวน 1 สูตร มาเป็นสูตรควบคุม และสูตรที่พัฒนาเสริมผงเนื้อตาลสุก 3 ระดับ

1) การวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab color meter (L^* , a^* , และ b^*)

2) วัดเนื้อสัมผัสด้วยวิธีวิเคราะห์เนื้อสัมผัสแบบ Texture Profile Analysis (TPA) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Oration Manual for TAXT plus Texture Analyzer (Stable Micro System Ltd., ประเทศอังกฤษ) ด้วยหัววัดอะลูมิเนียมทรงกระบอก

3) การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยนำสูตรแป้งซาลาเปาที่ได้รับการคัดเลือกเป็นสูตรพื้นฐานมาพัฒนาต่อโดยเสริมผงเนื้อตาลสุกในแป้งซาลาเปาวางแผนการทดลองแบบสุ่มไม่บล็อกสมบูรณ์ Randomized Complete Block Design, RCB ประเมินคุณภาพทาง

ประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีการชิมแบบให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) ใช้ผู้ชิมที่เป็นอาจารย์และนักศึกษาศาสาวิชาอาหารและโภชนาการที่ผ่านการฝึกฝนในการชิม จำนวน 80 คน

2.1.6 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของแป้งข้าลาเปาสูตรควบคุมกับสูตรที่ได้รับการคัดเลือกเสริมผงเนื้อตาลสุก

วิเคราะห์เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแป้งข้าลาเปาสูตรควบคุมกับสูตรที่ได้รับการคัดเลือกเสริมผงเนื้อตาลสุก ตามวิธีการของ AOAC (2019) ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า กากใยคาร์โบไฮเดรต พลังงาน และบีตาแคโรทีน

2.1.7 ทดสอบยอมรับข้าลาเปาของผู้ทดสอบ (Consumer test) ที่มีต่อผงเนื้อตาลสุกในแป้งข้าลาเปาที่ใช้ทำข้าลาเปา

คุณภาพทางประสาทสัมผัสการศึกษารสชาติของตาลสุกในแป้งข้าลาเปา ทำการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสระดับห้องปฏิบัติการที่มีความคุ้นเคยกับตัวอย่างผลิตภัณฑ์จำนวน 40 คน ซึ่งเป็นอาจารย์สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ ด้วยวิธีตอบแบบสอบถาม ซึ่งแบบสอบถามแบบเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลเกี่ยวกับทางประชากรศาสตร์ของกลุ่มตัวอย่าง และข้อมูลเกี่ยวกับการยอมรับ แป้งข้าลาเปาเสริมผงเนื้อตาลสุก ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์เชิงพรรณนา คะแนนค่าความพอใจในแต่ละคุณลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม รายงานในสถิติเชิงพรรณนาในรูปร้อยละ

2.1.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ การทดลองใช้แผนการทดลองแบบ CRD (Completely Randomized Design) และ RCBD

(Randomized Complete Block) วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีทเมนต์โดยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อตาลสุกอบแห้งและผงเนื้อตาลสุก

จากการทดสอบทางเคมี พบว่า เนื้อตาลสุกอบแห้งและผงเนื้อตาลสุก มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อตาลสุกอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ของคุณภาพของผงเนื้อตาลสุก มีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบ คาร์โบไฮเดรตเท่ากับร้อยละ 2.72 15.28 7.03 2.01 34.15 และ 72.33 ตามลำดับ และให้พลังงานต่อ 100 กรัม เท่ากับ 25.03 แคลอรี ในขณะที่ผงเนื้อตาลสุกมีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใยหยาบ และคาร์โบไฮเดรต เท่ากับร้อยละ 2.46 14.85 7.10 2.96 34.93 และ 72.63 ตามลำดับ และให้พลังงานต่อ 100 กรัมเท่ากับ 25.64 แคลอรี จากการนำเนื้อตาลสุกปั่นเอาน้ำออกเตรียมไว้สำหรับอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส แล้วนำมาบดเป็นผง ทำให้ปริมาณความชื้นลดลง ส่งผลถึงปริมาณโปรตีน เถ้า ไขมัน เส้นใยหยาบ คาร์โบไฮเดรต และพลังงานเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเนื้อตาลสุกประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่ โดยเนื้อตาลสุกจัดเป็นอาหารที่มีเส้นใยอาหารสูงเมื่ออยู่ในสภาพของแห้ง [5] และสอดคล้องกับงานวิจัย [6] ที่ศึกษาการทดลองการทำแห้งแครอทผงด้วยวิธีการตากแดด การใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ การใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ทำให้มีใยอาหาร ไขมันและโปรตีนสูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อตาลสุกและผงเนื้อตาลสุก

องค์ประกอบทางเคมี	เนื้อตาลสุก	ผงเนื้อตาลสุก
ความชื้น (ร้อยละ)	2.72±0.03 ^a	2.46±0.05 ^b
โปรตีน (ร้อยละ น้ำหนักแห้ง)	15.28±0.00 ^a	14.85±0.00 ^b
ไขมัน (ร้อยละ น้ำหนักแห้ง)	7.03±0.10 ^b	7.10±0.00 ^a
เถ้า (ร้อยละ น้ำหนักแห้ง)	2.01±0.02 ^b	2.96±0.02 ^a
เส้นใยหยาบ (ร้อยละ น้ำหนักแห้ง)	34.15±0.01 ^b	34.93±0.01 ^a
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ น้ำหนักแห้ง)	72.33±0.05 ^b	72.63±0.02 ^a
พลังงานต่อ 100 กรัม (Kcal)	25.03±0.07 ^b	25.64±0.03 ^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรในแนวนอนที่ต่างกัน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3.2 ผลการทดลองสูตรพื้นฐานซาลาเปาจากแป้งซาลาเปา

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัส (Sensory Test) พบว่า ผู้ชิมให้การยอมรับสูตรที่ 1 ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส ความชอบโดยรวม โดยมีคะแนนเฉลี่ย 8.25 7.95 7.90 8.13 8.45 8.00 ตามลำดับ ความชอบอยู่ในระดับความชอบปานกลางถึงชอบมากที่สุด เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนและความแตกต่างทางสถิติ พบว่าด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูตรที่ 1 สูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 เนื่องจากผู้ชิมให้การยอมรับสูตรที่ 1 มากที่สุด เนื่องจากมีลักษณะปรากฏ (ฟู เนื้อละเอียด) มีสีขาวนวล และมีกลิ่นยีสต์ไม่รุนแรง รสชาติหวานพอดี และเนื้อสัมผัสเนียนนุ่ม ดังนั้นจึงคัดเลือกสูตรที่ 1 เป็นสูตรพื้นฐานในการเสริมผงเนื้อตาลสุกต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัสสูตรพื้นฐานแป้งซาลาเปา 3 สูตร

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	คุณภาพทางประสาทสัมผัส		
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
ลักษณะปรากฏ (ฟู เนื้อละเอียด)	8.25±0.44 ^a	7.33±0.53 ^b	6.50±0.51 ^c
สี	7.95±0.45 ^a	7.80±0.41 ^b	7.73±0.45 ^c
กลิ่น	7.90±0.30 ^a	7.10±0.30 ^b	6.53±0.51 ^c
รสชาติ	8.13±0.34 ^a	7.48±0.51 ^b	6.15±0.36 ^c
เนื้อสัมผัส (นุ่ม)	8.45±0.50 ^a	7.03±0.26 ^b	6.00±0.40 ^c
ความชอบโดยรวม	8.00±0.00 ^a	7.13±0.34 ^b	6.30±0.46 ^c

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันแนวนอน หมายถึงค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3.3 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของซาลาเปาแป้งซาลาเปาเสริมผงเนื้อตาลสุก 4 ระดับ

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่า ผู้ชิมให้การยอมรับแป้งซาลาเปาเสริมผงเนื้อตาลสุกร้อยละ 10 ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส

และความชอบโดยรวม โดยมีค่าเฉลี่ย 8.43 8.78 8.35 8.46 8.00 และ 8.83 ตามลำดับ ความชอบอยู่ในระดับความชอบปานกลางถึงชอบมาก เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนและความแตกต่างทางสถิติ พบว่าด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมระดับ ร้อยละ 0 10 20 และ 30 มี

ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 เนื่องจากปริมาณผงเนื้อตาลสุกที่เพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 10 ขึ้นไปนั้น ส่งผลต่อลักษณะปรากฏ (ฟู เนื้อละเอียด) มีสีเหลืองเข้ม และมีกลิ่นของเนื้อตาลและรสชาติหวานเพิ่มขึ้นและเนื้อสัมผัสมีความแน่นเนื้อสูงขึ้น และหยาบมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัย [7] ของแป้งชาลาเปาที่มีการแทนที่แป้งสาลีด้วยแป้งฟักทองในปริมาณที่สูง ทำให้ตัว

แป้งชาลาเปามีสีเหลืองเข้ม เนื้อสัมผัสของแป้งชาลาเปามีความขรุขระมากขึ้น และการขึ้นฟูลดลง เมื่อปริมาณผงฟักทองเพิ่มขึ้น อาจกล่าวได้ว่า สูตรที่ใกล้เคียงกับสูตรควบคุมมากที่สุดคือร้อยละ 10 ในการเติมผงเนื้อตาลสุกในแป้งชาลาเปาส่งผลทำให้ชาลาเปามีเนื้อสัมผัสที่แห้งเพิ่มขึ้น ชาลาเปาซึ่งกระด้างกว่าชาลาเปาที่ใช้แป้งชาลาเปาขาวล้วนเล็กน้อย

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัสและค่าความแตกต่างของชาลาเปาที่ทำจากแป้งชาลาเปาเสริมเนื้อตาลสุก 4 ระดับ

คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์	คุณภาพทางประสาทสัมผัสและค่าความแตกต่าง(ร้อยละ)			
	สูตรพื้นฐาน (ร้อยละ 0)	สูตรที่1 (ร้อยละ 10)	สูตรที่ 2 (ร้อยละ 20)	สูตรที่ (ร้อยละ 30)
ลักษณะปรากฏ	7.49± 0.76 ^b	8.43±0.50 ^a	7.39±0.50 ^c	6.43±0.50 ^d
สี	8.18± 0.52 ^b	8.78±0.42 ^a	7.86±0.35 ^c	6.21±0.41 ^d
กลิ่น	7.64± 0.64 ^b	8.35±0.48 ^a	7.50±0.50 ^c	6.58±0.50 ^d
รสชาติ	7.78± 0.69 ^c	8.46±0.50 ^a	7.86±0.35 ^b	6.63±0.49 ^d
เนื้อสัมผัส (นุ่ม)	7.74± 0.57 ^d	8.00±0.00 ^a	7.78±0.42 ^b	6.00±0.00 ^c
ความชอบโดยรวม	7.98± 0.71 ^b	8.83±0.38 ^a	7.70±0.46 ^c	6.36±0.48 ^d

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึงค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3.4 ผลตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพของชาลาเปาที่ทำจากแป้งชาลาเปาเสริมผงเนื้อตาลสุก 4 ระดับ

จากการทดสอบคุณภาพทางกายภาพ พบว่าชาลาเปาที่ทำจากแป้งชาลาเปาเสริมเนื้อตาลสุก 4ระดับคือร้อยละ 0 10 20 และ 30 มีความแตกต่างกันโดยเสริมผงเนื้อตาลสุกลงในแป้งมากขึ้นทำให้ปริมาณน้ำอิสระในอาหารเพิ่มขึ้น ค่าสีของชาลาเปาที่ใช้แป้งชาลาเปาเสริมผงเนื้อตาลสุกเพิ่มขึ้นที่ระดับร้อยละ 0 10 20 และ 30 ส่วนค่าสี พบว่า L* a* b* ชาลาเปาที่ทำจากแป้งชาลาเปาเสริมผงเนื้อตาลสุกที่มีการเสริมมากขึ้นค่าความสว่างลดลง ค่าความเป็นสีแดงและสีเหลืองเพิ่มขึ้น เนื่องจากเนื้อตาลสุกมีสีส้มจึงทำให้ค่าความเป็น

สีแดง และสีเหลืองไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งผงเนื้อตาลสุกมีปริมาณแคโททินอยด์ในปริมาณสูงทำให้เห็นลักษณะปรากฏเป็นสีเหลืองส้ม ค่า L* ในระบบ CIE L*a*b* แสดงถึงความสว่างของวัตถุ ยิ่งมีค่ามากแสดงว่าวัตถุมีความสว่างมาก ค่า +a* แสดงความเป็นสีแดงและค่า +b* แสดง ความเป็นสีเหลือง เนื่องจากผงเนื้อตาลสุกมีสีเหลืองส้ม ดังนั้นการใช้สเกลในระบบการวัดสีจึงต้องใช้แสดงเป็นค่าโครมาเพื่อเป็น ตัวแทนในการความแตกต่างได้ดีกว่าการใช้ ค่า a* หรือ b* ตัวใดตัวหนึ่ง ซึ่งพบว่า การลดลงของค่าL* และค่าโครมาแสดงถึง ผงเนื้อตาลสุกที่ผ่านการนึ่งมีสีเหลืองส้มเข้มมากขึ้น [8] ส่วนการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสค่า Hardness Springiness Chewiness และ Cohesiveness พบว่า

ค่าต่าง ๆ ลดลงตามลำดับ เนื่องมาจากการเสริมปริมาณผงเนื้อตาลสุกมากขึ้นส่งผลต่อเนื้อสัมผัสให้มีความเหนียวมากขึ้น ความนุ่มลดลงปริมาณผงเนื้อตาลสุกเพิ่มมากขึ้นมีผลต่อคุณภาพของซาลาเปาเมื่อปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาตรของแป้งลดลง ผิวไม่เรียบเนียน มีโพรงอากาศเล็กลง ทำให้ตัวแป้งซาลาเปามีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้นจากการไปลดปริมาณกลูเตนในแป้งและส่งผลทำให้ความยืดหยุ่นของโดลดลง ทั้งนี้ความยืดหยุ่น

ของโดมีผลต่อขนาดของซาลาเปาในขั้นตอนการหมักโด โดยเมื่อยีสต์สร้างก๊าซโดจะมีการขยายตัวที่ น้อยกว่าซาลาเปาปกติ [9] และซาลาเปาที่ได้มีเซลล์อากาศที่เล็กกว่าซาลาเปาสูตรร้อยละ 0 และเมื่อเปรียบเทียบทั้ง 4 สูตรสูตรที่ดีที่สุดคือ เสริมปริมาณผงเนื้อตาลสุกร้อยละ 10 มีค่าเฉลี่ยแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณภาพทางกายภาพของซาลาเปาทำจากแป้งเสริมผงเนื้อตาลสุก

การทดสอบ คุณภาพทางกายภาพ	ซาลาเปาทำจากแป้งเสริมผงเนื้อตาลสุก			
	สูตรที่ 1 (ร้อยละ 0)	สูตรที่ 2 (ร้อยละ 10)	สูตรที่ 3 (ร้อยละ 20)	สูตรที่ 4 (ร้อยละ 30)
ปริมาณน้ำอิสระ (A_w)	0.84±0.83 ^d	0.85±0.70 ^c	0.87±0.68 ^b	0.89±0.81 ^a
ค่าสี L^*	85.10±0.23 ^a	77.38±0.21 ^b	68.24±1.29 ^c	58.12±0.29 ^d
ค่าสี a^*	0.01±0.75 ^d	10.27±0.67 ^c	12.13±0.45 ^b	14.24±0.63 ^a
ค่าสี b^*	13.85±0.95 ^d	36.25±1.92 ^a	56.25±1.78 ^c	75.16±1.03 ^b
Hardness (g force)	3,669.00±8.49 ^a	3,421.50±19.09 ^b	3,221.50±23.33 ^c	2,266.50±9.19 ^d
Springiness (%)	85.77±0.29 ^d	86.25±0.19 ^c	86.58±0.54 ^b	86.97±0.37 ^a
Chewiness (g force)	1450.50±0.36 ^b	1314.00±0.81 ^a	1232.50±0.53 ^c	1196.00±0.41 ^d
Cohesiveness (%)	48.04±0.42 ^a	46.09±0.50 ^d	46.21±0.41 ^c	46.71±0.46 ^b

หมายเหตุ: ตัวเลขที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลอง 2 ซ้ำ

ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึงค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ค่าความสว่าง L^* ถ้ามีค่ามากขึ้น แสดงว่า มีค่าความสว่างมากขึ้น

ค่า a^* เป็นค่าบวก หมายถึงออกสีแดง และ a^* เป็นค่าลบ หมายถึง สีเขียว

ค่า b^* เป็นค่าบวก หมายถึงออกสีเหลือง และค่า b^* เป็นค่าลบ หมายถึงออกสีน้ำเงิน

3.5 ผลการเปรียบเทียบคุณภาพทางเคมีในแป้งซาลาเปาสูตรควบคุมกับสูตรแป้งซาลาเปาเสริมผงเนื้อตาลสุกร้อยละ 10

จากการทดสอบคุณภาพทางเคมี โดยทำการเปรียบเทียบคุณภาพทางเคมีในแป้งซาลาเปาสูตรควบคุมกับ สูตรแป้งซาลาเปาเสริมผงเนื้อตาลสุกร้อยละ 10 ซึ่งเป็นสูตรที่ดีที่สุด พบว่า แป้งซาลาเปาสูตรควบคุมมีพลังงานทั้งหมด 295.88 แคลอรีต่อ 100 กรัม องค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยความชื้น เถ้า โปรตีน

ไขมัน คาร์โบไฮเดรตรวมร้อยละ 32.28 0.80 5.85 5.18 5.70 55.38 ตามลำดับ และบิตาแคโรทีนตรวจไม่พบ ส่วนสูตรแป้งซาลาเปาเสริมผงเนื้อตาลสุกร้อยละ 10 พบว่า พลังงาน 296.25 ทั้งหมด แคลอรีต่อ 100 กรัม องค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตรวมร้อยละ 39.64 0.69 5.33 5.70 55.38 ตามลำดับ และบิตาแคโรทีน 289.13 mcg จากการทดลองพบว่า สูตรแป้งซาลาเปาเสริมผงเนื้อตาลสุกมีผลให้ปริมาณพลังงาน เถ้า โปรตีน ไขมันและ

คาร์โบไฮเดรตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนความชื้นแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [10] เมื่อเปรียบเทียบของประกอบทางเคมีของขนมปังเสริมผงแคโรทีนและสูตรเติมผงแคโรทีนร้อยละ 5 พบว่า ปริมาณความชื้น โปรตีน ในอาหาร คาร์โบไฮเดรต เบต้าแคโรทีน สารฟีนอล และปริมาณพลังงานในอาหารแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ขนมปังเสริมผงแคโรทีนค่าความชื้นกว่าชุดควบคุมการเติมผงแคโรทีนช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและที่โดดเด่น คือปริมาณใยอาหารที่เพิ่มขึ้นในขนมปังผสมแคโรทีนจากชุดควบคุมเพิ่มขึ้นเป็น 3 เทา

ของสูตรควบคุม ปริมาณบีตาแคโรทีนจาก 0.18 เป็น 0.45 mg/g db คิดเป็น 2.5 เทา และค่าพลังงานในการบริโภคลดลงจาก 261.40 แคลอรีต่อ 100 กรัม เป็น 189.32 แคลอรีต่อ 100 กรัม คิดเป็นพลังงานที่ลดลง 1.3 เทา จึงอาจกล่าวได้ว่า การเสริมผงเนื้อตาลสุกในแป้งซาลาเปาทำให้พลังงาน เถ้า ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ลดลง และบีตาแคโรทีนเพิ่มขึ้น ซาลาเปาสูตรเสริมผงเนื้อตาลสุกจึงมีประโยชน์ต่อสุขภาพมากขึ้น เพราะมีบีตาแคโรทีนเป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอที่ช่วยในการมองเห็นและบำรุงสายตา [11] แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบคุณภาพเคมีของแป้งซาลาเปาสูตรควบคุมและแป้งซาลาเปาสูตรเสริมผงเนื้อตาล

คุณภาพทางเคมี	สูตรควบคุม (ร้อยละ 0)	สูตรแป้งซาลาเปาที่เสริมผงเนื้อตาลสุก (ร้อยละ 10)
พลังงาน (Kcal/100g)	295.88±0.58 ^a	266.60±0.92 ^b
ความชื้น (ร้อยละ)	32.28±0.88 ^b	39.14±0.65 ^a
เถ้า (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)	0.80±0.63 ^a	0.68±0.97 ^b
โปรตีน (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)	5.85±0.78 ^a	5.33±0.85 ^b
ไขมัน (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)	5.70±0.82 ^a	5.18±0.73 ^b
คาร์โบไฮเดรตรวม (ร้อยละน้ำหนักแห้ง)	55.38±0.95 ^a	49.68±0.78 ^b
บีตาแคโรทีน (mcg/100g)	-	289.13±0.10

หมายเหตุ: ตัวเลขที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลอง 2 ซ้ำ

ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึงค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

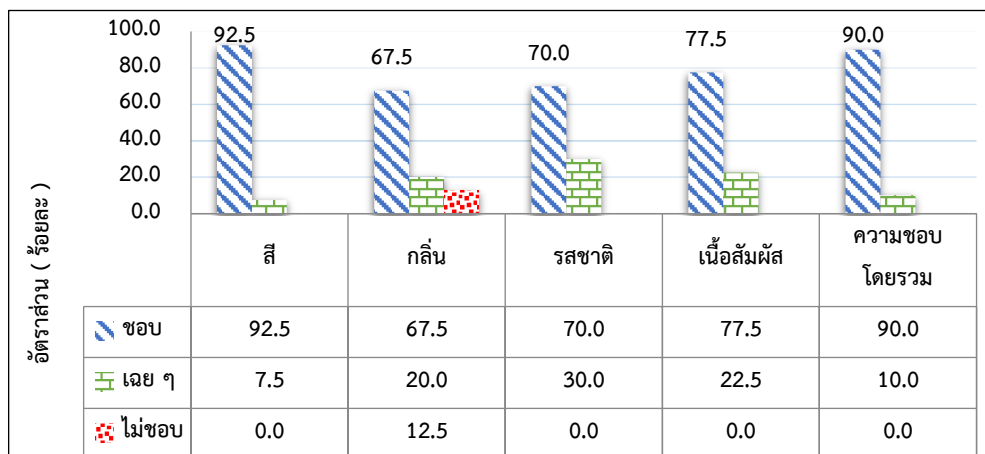
3.6 ผลการยอมรับของผู้ทดสอบชิมมีต่อซาลาเปาทำจากแป้งซาลาเปาเสริมผงเนื้อตาลสุก

จากคุณภาพทางประสาทสัมผัสการยอมรับของผู้ทดสอบที่มีต่อซาลาเปาทำจากแป้งเสริมผงเนื้อตาลสุกจากกลุ่มผู้ทดสอบระดับนักศึกษาและอาจารย์ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ด้วยวิธีการสุ่มโดยบังเอิญ ซึ่งได้กลุ่มเป้าหมายจำนวน 40 คน พบว่า

ผู้ทดสอบเพศหญิงมีมากกว่าเพศชาย โดยเพศหญิงร้อยละ 55 และเพศชายร้อยละ 45 อายุส่วนใหญ่มากกว่า 18-25 ปี คิดเป็นร้อยละ 50 รองลงมาอยู่ในช่วง 42-49 ปี คิดเป็นร้อยละ 20 และช่วง 34-41 ปี คิดเป็นร้อยละ 12.5 ตามลำดับ ระดับการศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรีและปริญญาโทคิดเป็นร้อยละ 20 ส่วนการประกอบอาชีพนักศึกษาและอาจารย์คิดเป็นร้อยละ 20 ตามลำดับดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงข้อมูลทางประชากรศาสตร์

หัวข้อ	จำนวนคน	ค่าร้อยละ
1. เพศ		
เพศชาย	18	45.0
เพศหญิง	22	55.0
2. อายุ (ปี)		
18-25	20	50.0
26-33	2	5.0
34-41	5	12.5
42-49	8	20.0
มากกว่า 49	5	12.5
3. ระดับการศึกษา		
อนุปริญญา	-	-
ปริญญาตรี	20	50.0
มากกว่าปริญญาตรี	20	50.0
4. อาชีพ		
นักศึกษา	20	50.0
อาจารย์	20	50.0



รูปที่ 1 กราฟเปรียบเทียบคุณภาพทางประสาทสัมผัสการยอมรับของผู้ทดสอบที่มีต่อชาลาเปาทำจากแป้งชาลาเปาเสริมผงเนื้อตาลสุกร้อยละ 10

จากตารางที่ 7 การวิเคราะห์ข้อมูลการยอมรับของผู้ทดสอบที่มีต่อชาลาเปาทำจากแป้งชาลาเปาเสริม

ผงเนื้อลูกตาลสุก โดยการใช้แบบสอบถามเกี่ยวกับความชอบในการรับประทานผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย

ด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม พบว่า ความชอบด้านสีชาลาเปาคิดเป็นร้อยละ 92.0 และเฉยๆ คิดเป็นร้อยละ 7.5 ด้านกลิ่นมีความชอบคิดเป็นร้อยละ 67.5 เฉย ๆ คิดเป็นร้อยละ 20.0 และไม่ชอบ คิดเป็นร้อยละ 12.5 ตามลำดับ ด้านรสชาติมีความชอบคิดเป็นร้อยละ 70.0 เฉย ๆ คิดเป็นร้อยละ 30.0 ตามลำดับ ด้านเนื้อสัมผัส มีความชอบคิดเป็นร้อยละ 77.5 และเฉยๆ คิดเป็นร้อยละ 22.5 ตามลำดับ และในด้านความชอบโดยรวม มีความชอบคิดเป็นร้อยละ 90.0 และเฉย ๆ คิดเป็นร้อยละ 10.0 ตามลำดับ ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 1

4. สรุปผล

4.1 ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อตาลสุกอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ของคุณภาพของผงเนื้อตาลสุกซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบ คาร์โบไฮเดรตเท่ากับร้อยละ 2.46 14.85 7.10 2.96 34.93 และ 72.63 ตามลำดับ และให้พลังงานต่อ 100 กรัม เท่ากับ 25.64 แคลอรี

4.2 ชาลาเปาที่ทำจากแป้งชาลาเปาเสริมผงเนื้อตาลสุกที่ร้อยละ 10 พบว่า ผลทางประสาทสัมผัสผู้ทดสอบให้การยอมรับมากที่สุด ในด้านลักษณะที่ปรากฏ กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ค่าความสว่าง (L^*) ลดลง ส่วนค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ค่าความแข็ง (g force) ค่าการทนต่อการเคี้ยว (g force) ค่าความสามารถเกาะรวมตัวกัน (%) และค่าความยืดหยุ่น (%) มีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของผงเนื้อตาลสุกในแป้งชาลาเปาส่งผลให้เนื้อชาลาเปามีลักษณะแข็งและไม่ขึ้นฟู ส่วนด้านองค์ประกอบทางเคมีเมื่อเปรียบเทียบคุณภาพทางเคมีในแป้งชาลาเปาสูตรควบคุมกับแป้งชาลาเปาสูตรเสริมผงเนื้อตาลสุกร้อยละ 10 พบว่า พลังงาน 296.25 ทั้งหมด แคลอรีต่อ 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตรวมร้อยละ 39.64 0.69 5.33 5.70 55.38 ตามลำดับ และบีตาแคโรทีน 289.13 mcg/100 g

4.3 การศึกษาการยอมรับของผู้ทดสอบชิมมีต่อชาลาเปาที่ทำจากแป้งชาลาเปาเสริมผงเนื้อตาลสุกร้อยละ 10 ในผลิตภัณฑ์อาหารว่าง (Consumer Test) พบว่า ผลิตภัณฑ์แป้งชาลาเปาได้รับความชอบร้อยละ 90

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่ายประจำปี พ.ศ. 2563 คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Sunee, "An In-depth Study of Phetchaburi People's Local Knowledge of Palmyra Palm through Terminology," Research report. Faculty of Management Science, Silpakorn University. Thailand, 2018.
- [2] S. Saengkhae, "Development of Spicy Palmyra Palm Candy," *Journal of Kanchanaburi Rajabhat University*, vol. 8, no. 2, Jul.-Dec. 2019.
- [3] K. Wandee, "The Development of fried dough Salapoa," Science and Technology, Nakhorn Si Thammarat Rajabhat University, Thailand, 2015.
- [4] The Association of Official Analytical Chemists, 17th ed., Official Method of Analysis of AOAC International, 2019.
- [5] W. Jintana and Ch. Pronchanok, "Quality of Palmyra Palm Pulp After Heat Treatment,"

- The 3rd National Graduate Research Conference RMU GRC, vol. 13, no. 4, pp. 1818-1822, 2018.
- [6] S. Porarath, "Drying of carrot pomace and utilization in the bread for improving nutrition values," *KKU Sci. J.*, vol. 46, no. 1, pp. 93-102, 2018.
- [7] S. Piyawan, "Effect of Pumpkin Flour on Quality of Salapao Flour," Research report. Food science and Technology, Rajabhat Institute Pibulsongkram, Thailand, 2001.
- [8] R. Aumpanthong, "Sweet Bread Supplemented with Ripe Palm Fruit Pulp," *RMUTP Research Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 99-113, 2015.
- [9] S. Artnarong, P. Masniyom and J. Maneesri "Preparation the Substrate from Palmyra Palm Fruit by *Candida stellimalicola* Fermentation for Acetic Acid Production," *KU Res journal*, vol. 21, no. 2, pp. 397-403, 2016.
- [10] Y. Y. Tai et al., "Improvement of Physico-Chemical Properties, Antioxidant Capacity and Acceptability of Carrot Cake by Partially Substituting Sugar with Concentrated *Nypa fruticans* Sap," *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, vol. 42, no. 3, pp. 883-902, Aug. 2019.
- [11] O. Lasekan and K.A. Abbas, "Flavor chemistry of palm toddy and palm juice: a review," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 21, no. 10, pp. 494-501, Oct. 2010.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อเพื่อการขยายพันธุ์และการชักนำเหง้าขนาดเล็ก จากวุ้นชกมดลูกตัวเมีย (*Curcuma comosa* Roxb.)

ศิริรัตน์ พักปากน้ำ* ณัฏชา ญนชุ่ม มนต์วี เดชกล้า และ วชิราภรณ์ พิกุลทอง

สาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

1 ถนนอุทัยนอก แขวงดุสิต เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร

รับบทความ 20 มกราคม 2564 แก้ไขบทความ 27 กรกฎาคม 2564 ตอรับบทความ 16 กันยายน 2564

บทคัดย่อ

การศึกษาลงของสารควบคุมการเจริญเติบโตที่เหมาะสมต่อการชักนำหน่อของวุ้นชกมดลูกตัวเมีย (*Curcuma comosa* Roxb.) โดยนำหน่ออ่อนปลอดเชื้อความยาว 2 เซนติเมตร ฝักรังตามยาว แล้วเพาะเลี้ยงบนอาหาร MS (Murashige and Skoog) ที่เติมสารควบคุมการเจริญเติบโต BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อเพิ่มจำนวนหน่ออ่อน จากนั้นทำการแยกหน่ออ่อนออกเป็นต้นเดี่ยว เพาะเลี้ยงบนอาหาร MS เพื่อให้อยู่ในสภาวะปราศจากสารควบคุมการเจริญเติบโต เพาะเลี้ยงเป็นเวลา 2 สัปดาห์ จากนั้นย้ายขึ้นส่วนพืชลงในอาหารที่เติมสารควบคุมการเจริญเติบโตต่างๆ 1) อาหาร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร 2) อาหาร MS ที่เติม kinetin ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 3) อาหาร MS ที่เติม TDZ ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เพาะเลี้ยงเป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า อาหาร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถชักนำให้วุ้นชกมดลูกตัวเมียเกิดหน่อมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เฉลี่ย 2.11 หน่อต่อชิ้นส่วนพืช อาหาร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ความยาวหน่อเฉลี่ยสูงสุด 12.99 เซนติเมตร และอาหาร MS ที่ปราศจากสารควบคุมการเจริญเติบโตให้ความยาวรากมากที่สุดเฉลี่ย 6.63 เซนติเมตร เช่นเดียวกับอาหาร MS ที่เติม kinetin ความเข้มข้น 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ความยาวรากเฉลี่ย 6.16 และ 6.47 เซนติเมตร ตามลำดับ จากนั้นนำพืชไปศึกษาการเกิดเหง้าขนาดเล็ก โดยเพาะเลี้ยงบนอาหาร MS ที่เติมสารควบคุมการเจริญเติบโต BA ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับชูโครส ความเข้มข้น 30, 60 และ 90 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า วุ้นชกมดลูกตัวเมียที่เพาะเลี้ยงบนอาหาร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำตาลชูโครส 30 กรัมต่อลิตร สามารถชักนำให้เกิดต้นที่มีความยาวลำต้นและความยาวรากมากที่สุด โดยทุกสูตรอาหารไม่สามารถชักนำให้เกิดเหง้าขนาดเล็กในหลอดทดลองได้ แต่พบการสะสมแป้งที่บริเวณส่วนโคนลำต้นในสูตรอาหารที่เติมชูโครส 60 และ 90 กรัมต่อลิตร หลังจากนั้นนำต้นวุ้นชกมดลูกตัวเมียย้ายปลูกลงในโรงเรือน เป็นเวลา 4 สัปดาห์ เพื่อศึกษาอัตราการรอดชีวิต พบว่า ต้นวุ้นชกมดลูกตัวเมียมีอัตราการรอดชีวิตถึง 66 - 100 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : วุ้นชกมดลูกตัวเมีย ; การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ ; สารควบคุมการเจริญเติบโต ; เหง้าขนาดเล็ก

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1553 3069, อีเมล: sirirat.ph@ssru.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

In vitro Micropropagation and Microrhizome Induction of *Curcuma comosa* Roxb.

Sirirat Phakpaknam* Natcha Yunchum Manusawee Dechkla and
Vachiraporn Pikunthong

Department of Biology, Faculty of Science and Technology, Suan Sunandha Rajabhat University
1 U-Thong nok Road, Dusit, Bangkok 10300

Received 20 January 2021; Revised 27 July 2021; Accepted 16 September 2021

Abstract

This study was conducted to determine the effects of plant growth regulators on *in vitro* propagated plantlets and microrhizome inductions of *Curcuma comosa* Roxb. for an efficient development of plant regeneration. *In vitro* sprouted shoots (2 cm length) of *C. comosa* were incised in longitudinal section and subcultured on MS media supplemented with 3 mg/L BA for shoot multiplication and plant regeneration. Subsequently, the regenerated plants were transferred to MS medium with various concentrations of plant growth regulators; BA (1, 3, 5 mg/L), kinetin (1, 3, 5 mg/L) and TDZ (0.5, 1, 1.5 mg/L). The result showed that MS medium supplemented with 3 mg/L BA was the most effective in shoot induction with the significantly maximum average number of 2.11 shoot buds per responding explant. Moreover, MS medium supplemented with 1 mg/L BA produced the longest average of shoot bud explants (12.99 cm), while the basal MS medium induced the longest average of root multiplication (6.63 cm). Furthermore, microrhizome induction was produced under *in vitro* conditions derived young shoot buds upon transfer to MS medium containing various combinations of 1, 3 and 5 mg/L BA and 30, 60 and 90 g/L sucrose concentrations. The optimum combination in the induction of significantly highest average length of both stem (18.32 cm) and root (7.52 cm) multiplication was obtained on MS basal medium supplemented with 1 mg/L BA and 30 g/L sucrose for 4 weeks. Although microrhizome formation was not produced by the different amount of BA and sucrose in induction medium, starch accumulation was found at the base of the stem explants cultured on MS medium containing 60 and 90 g/L sucrose concentrations. Additionally, *in vitro* propagated *C. comosa* plantlets through microrhizome induction were grown under greenhouse conditions for 4 weeks and further developed into normal plants, resulting in successfully high survival rates of 66 – 100% in the cultivated *C. comosa*.

Keywords : *Curcuma comosa* Roxb ; Plant Tissue Culture; Plant Growth Regulator; Microrhizome

* Corresponding Author. Tel.: +668 1553 3069, E-mail Address: sirirat.ph@ssru.ac.th

1. บทนำ

ว่านชักมดลูก เป็นพืชวงศ์ขิง (Zingiberaceae) มีความสำคัญในอุตสาหกรรมการเกษตร มีถิ่นกำเนิดอยู่ในอินโดนีเซีย แถบบริเวณเกาะบาหลี เกาะชวา แหลมมลายู และมีการแพร่กระจายพันธุ์มาจนถึงมาเลเซีย ไทย และอินเดีย [1] จากข้อมูลทางสถิติของระบบสารสนเทศการผลิตทางการเกษตร ในปี พ.ศ. 2560 รายงานว่าประเทศไทยมีเนื้อที่เพาะปลูกว่านชักมดลูกรวมทั่วประเทศ 568 ไร่ มีการเพาะปลูกใน 5 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดสุราษฎร์ธานี, จังหวัดราชบุรี, จังหวัดลำปาง, จังหวัดสระบุรี และจังหวัดอุดรธานี โดยให้ผลผลิต เฉลี่ย 196 กิโลกรัมต่อไร่ ราคาที่เกษตรกรขายได้เฉลี่ย 51 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งจากการศึกษาและสำรวจว่านชักมดลูกที่ขายทั่วประเทศไทย [2] พบว่าว่านชักมดลูกตัวเมียเท่านั้น (*Curcuma comosa* Roxb.) ที่ให้ฤทธิ์เกี่ยวข้องกับสตรี โดยพบสารกลุ่มไฟโตเอสโตรเจน ซึ่งเป็นสารจากพืชที่ออกฤทธิ์คล้ายฮอร์โมนเอสโตรเจนที่พบในเพศหญิง โดยปัจจุบันมีการนำสารไฟโตเอสโตรเจนมาใช้เพื่อทดแทนเอสโตรเจนในหญิงวัยหมดประจำเดือน (Menopause) ทำให้ว่านชักมดลูกตัวเมียถูกนำมาใช้เป็นสมุนไพรสำหรับสตรี [3] ซึ่งส่วนของเหง้านั้นเป็นชิ้นส่วนสำคัญ เนื่องจากมีสารสำหรับเป็นตัวยาแผนโบราณตามภูมิปัญญาแพทย์แผนไทย การขยายพันธุ์โดยใช้ส่วนเหง้าทำให้ได้จำนวนต้นต่อปีค่อนข้างน้อย และยังถูกคุกคามจากโรคพืช ศัตรูพืช เช่น เชื้อรา *Fusarium oxysporum* ที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเน่าของเหง้า เชื้อแบคทีเรีย *Pseudomonas solanacearum* ทำให้เกิดโรคเหี่ยว ไส้เดือนฝอย (*Meloidogyne* spp.) ทำให้เกิดการเน่าของเหง้าในบริเวณที่เพาะปลูกได้ [4]

การใช้ต้นพันธุ์ที่ได้จากวิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อเป็นเทคนิคที่มีข้อดีคือสามารถเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของต้นว่านชักมดลูกตัวเมื่อก่อนออกปลูกในสภาพธรรมชาติได้ จะทำให้ได้ต้นพันธุ์ที่มีปริมาณมากตาม

ความต้องการในระยะเวลาอันรวดเร็ว ปลอดโรคสามารถย่นระยะเวลาในการเพาะปลูก และลดพื้นที่ในการเพาะปลูกได้ [5] โดย R. Watcharin [6] ได้ศึกษาการเพาะเลี้ยงยอดของขมิ้นดำ และขมิ้นขาว พบว่าสูตรอาหารที่เหมาะสมในการเพิ่มปริมาณยอด คือ สูตร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร มีจำนวนยอดเฉลี่ย 2.54 และ 2.56 ยอด และเหง้าที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อให้ผลผลิตที่มากกว่าต้นที่ปลูกจากธรรมชาติ [7]

จากการรายงานกรมวิชาการเกษตร ได้มีการผลักดันให้เกษตรกรปลูกพืชสมุนไพร โดยว่านชักมดลูกเป็นหนึ่งในสมุนไพร 18 ชนิด ที่มีมูลค่าการส่งออกสูง และการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อมีบทบาทสำคัญในการขยายพันธุ์ หากสามารถชักนำให้เกิดเหง้าขนาดเล็กในขวดทดลองได้ จะทำให้ขยายพันธุ์พืชได้จำนวนมาก ไม่ขึ้นกับฤดูกาลเพาะปลูก ได้พืชที่ปราศจากโรค [8] และยกระดับคุณภาพของสมุนไพรไทยให้เป็นที่ยอมรับในระดับสากล [9]

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ตัวอย่างว่านชักมดลูกตัวเมีย (*C. comosa*) จากโรงเรียนอนุบาลต้นพืช ศูนย์พันธุศาสตร์และเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

2.1 ศึกษาการทำให้ต้นว่านชักมดลูกตัวเมียปลอดเชื้อ

นำหน่ออ่อนของต้นว่านชักมดลูกตัวเมีย แช่วลงในเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol) ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ (v/v) เป็นเวลา 30 วินาที ก่อนนำไปแช่ต่อในสารละลายคลอริกซ์® ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ (v/v) ร่วมกับ Tween® 20 หยดต่อน้ำกลั่น 100 มิลลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นใส่สารละลายคลอริกซ์® ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์ (v/v) เขย่าที่ความเร็วรอบ

150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่นที่นิ่งฆ่าเชื้อ 3 ครั้ง ผ่าหัวว่านชักมดลูกตัวเมีย ตามยาวเป็น 2 ส่วน แล้วนำไปเพาะเลี้ยงบนอาหาร MS [10] ที่เติม BA ที่ระดับความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร เพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ให้แสงด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ (PHILIP TLD 36W/54-756 cool Daylight) เป็นเวลา 16 ชั่วโมง/วัน ความเข้มแสง $54 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ เพาะเลี้ยงเป็นเวลา 12 สัปดาห์

2.2 ศึกษาสูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการชักนำ

หน่อของต้นว่านชักมดลูกตัวเมีย

นำหน่ออ่อนของว่านชักมดลูกที่ได้จากการเพิ่มปริมาณหน่ออ่อน มาทำการแยกออกเป็นต้นเดี่ยว แล้วนำไปเพาะเลี้ยงบนอาหาร MS เพื่อให้อยู่ในสภาวะปราศจากสารควบคุมการเจริญเติบโต เพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ให้แสงเป็นเวลา 16 ชั่วโมงต่อวัน ความเข้มแสง $54 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ เพาะเลี้ยงเป็นเวลา 2 สัปดาห์ จากนั้นย้ายชิ้นส่วนพืชลงในอาหารที่เติมสารควบคุมการเจริญเติบโตดังนี้

1. อาหาร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. อาหาร MS ที่เติม kinetin ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. อาหาร MS ที่เติม TDZ ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

เพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ให้แสงเป็นเวลา 16 ชั่วโมงต่อวัน ความเข้มแสง $54 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ เป็นเวลา 4 สัปดาห์

2.3 ศึกษาสูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการชักนำ เหง้าขนาดเล็ก (Microrhizome) ของต้น ว่านชักมดลูกตัวเมีย

นำหน่ออ่อนของว่านชักมดลูกตัวเมีย ที่ได้จากการเพิ่มปริมาณ มาเพาะเลี้ยงบนอาหาร MS ที่เติม BA

ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับชูโครส (Ajax®) ความเข้มข้น 30, 60 และ 90 กรัมต่อลิตร เพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ให้แสงเป็นเวลา 16 ชั่วโมงต่อวัน ความเข้มแสง $54 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ เพาะเลี้ยงเป็นเวลา 4 สัปดาห์

2.4 ศึกษาอัตราการรอดชีวิตของต้นว่านชัก

มดลูกตัวเมียหลังออกปลูก

นำต้นว่านชักมดลูกตัวเมียที่ผ่านการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อและการชักนำเหง้าขนาดเล็ก ออกปลูกลงบนวัสดุปลูกที่ผสมด้วย ทราย แกลบ และขุยมะพร้าว ผสมกันในอัตราส่วน 1 : 1 : 1 ออกปลูกในโรงเรือนเป็นเวลา 4 สัปดาห์

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One Way ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยโปรแกรม Statistical Package for the Social Sciences (SPSS, Version 23.0) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ทำซ้ำละ 3 ชิ้นส่วนพืช

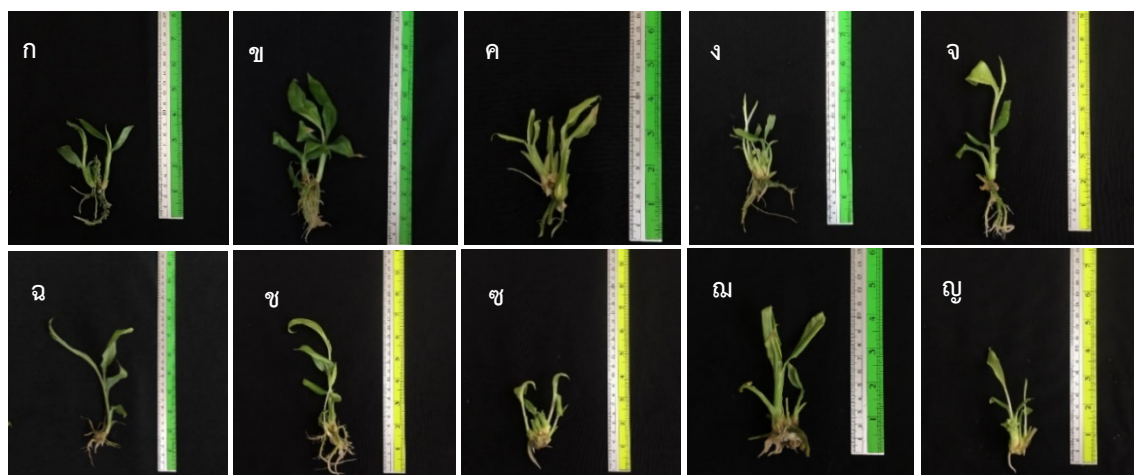
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 สูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการชักนำหน่อ ของต้นว่านชักมดลูกตัวเมีย

จากการชักนำหน่อว่านชักมดลูกตัวเมียบนอาหาร MS เพื่อศึกษาผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตต่างๆ คือ 1) อาหาร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร 2) อาหาร MS ที่เติม kinetin ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 3) อาหาร MS ที่เติม TDZ ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า

ตาข้างของวุ้นชั้กมดลูกตัวเมียมีการเจริญแตกหน่อใหม่จำนวนมากที่สุดบนอาหาร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจำนวนหน่อเฉลี่ยเท่ากับ 2.11 หน่อต่อชิ้นส่วนพืช แตกต่างจากอาหารสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 1, รูปที่ 1,ค) จากการรายงานของ R. Khwanduean et al. [11] และ B. Phopgao et al. [12] ได้กล่าวว่า BA จัดเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตในกลุ่มไซโทไคนิน ที่มีผลต่อการกระตุ้นการแตกยอดใหม่ และการแบ่งเซลล์ในส่วนต่างๆ ของพืชได้ดี เช่น ลำต้น และราก รวมถึงเซลล์เพาะเลี้ยง ซึ่งการเติมสารควบคุมการเจริญเติบโตในกลุ่มไซโทไคนินในระดับความเข้มข้นสูงจะกระตุ้นให้เนื้อเยื่อพัฒนาเป็นยอดได้ นอกจากนี้ P. Kanika et al. [13] ได้กล่าวว่า มีรายงานจำนวนมากที่พบว่า BA สามารถชักนำให้เกิดต้นได้ดีกว่า kinetin ทั้งนี้เนื่องจาก BA มีฤทธิ์ (active) สูงกว่า Kinetin และโมเลกุลขนาดเล็กกว่าอาจทำให้พืชสามารถดูดซึมได้ง่าย สอดคล้องกับ R. Watcharin [6] ที่เพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อขมิ้นชันและขมิ้นอ้อยบนอาหาร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้เกิดยอดสูงสุดโดยมีจำนวนยอดเฉลี่ย 2.54 และ 2.56 ยอด สำหรับการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อวุ้น

ชั้กมดลูกตัวเมียในการศึกษาค้นคว้า พบว่ากรรมวิธีที่เพาะเลี้ยงบนอาหาร MS ที่เติม Kinetin ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความยาวหน่อสูงที่สุดเฉลี่ย 15.99 เซนติเมตร ซึ่งแตกต่างจาก L.H. Nguyen et al. [14] ที่ได้ทำการชักนำให้เกิดยอดของ *C. zedoaria* ในอาหารสูตร MS ที่เติม BA, Kinetin, IBA หรือ NAA พบว่าอาหารสูตร MS ที่เติม BA 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้พืชที่เพาะเลี้ยงมีความยาวยอดได้ดีที่สุด 6.84 เซนติเมตร เช่นเดียวกับ N. Sanghamitra [7] ที่เพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ *C. aromatica* พบว่าอาหารสูตร MS ที่เติม BA 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ความยาวยอดสูงกว่าอาหาร MS ที่เติม KN ส่วนความยาวรากกว่าวุ้นชั้กมดลูกตัวเมียบนอาหาร MS ที่ปราศจากสารควบคุมการเจริญเติบโต ให้ความยาวรากเฉลี่ยสูงสุด 6.63 เซนติเมตร แต่ไม่แตกต่างจากอาหาร MS ที่เติม kinetin ความเข้มข้น 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งให้ความยาวรากเฉลี่ย 6.16 และ 6.47 เซนติเมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 1, รูปที่ 1, ก, ฉ และ ช) เช่นเดียวกับ C. Aphichat et al. [15] กล่าวว่า ชิ้นส่วนของเนื้อเยื่อกระชายดำ ที่เพาะเลี้ยงในอาหารสูตร MS ที่ไม่เติมสารควบคุมการเจริญเติบโต สามารถชักนำให้เกิดรากที่มีความยาวมากที่สุด



รูปที่ 1 วุ้นชั้กมดลูกตัวเมียหลังจากเพาะเลี้ยงบนอาหาร MS ที่เติม BA, kinetin และ TDZ ความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 4 สัปดาห์

(ก) MS (ข) BA 1 มก/ล (ค) BA 3 มก/ล (ง) BA 5 มก/ล (จ) kinetin 1 มก/ล (ฉ) kinetin 3 มก/ล
(ช) kinetin 5 มก/ล (ซ) TDZ 0.5 มก/ล (ฌ) TDZ 1 มก/ล (ญ) TDZ 1.5 มก/ล

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยความยาวหน่อ จำนวนหน่อ และความยาวรากของต้นว่านชักมดลูกตัวเมียบนอาหาร MS ที่เติม BA, kinetin และ TDZ ความเข้มข้นต่างๆ เพาะเลี้ยงเป็นเวลา 4 สัปดาห์

สูตรอาหาร	จำนวนหน่อ	ความยาวหน่อ (ซม.)	ความยาวราก (ซม.)
	(หน่อต่อชิ้นส่วนพืช) Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD
MS	0.88 $\pm$ 0.19 ^{ab}	12.05 $\pm$ 0.90 ^e	6.63 $\pm$ 0.11 ^e
MS + BA 1 mg/L	1.22 $\pm$ 0.19 ^{bc}	12.99 $\pm$ 1.16 ^e	4.57 $\pm$ 0.25 ^{cd}
MS + BA 3 mg/L	2.11 $\pm$ 0.19 ^e	7.94 $\pm$ 0.82 ^{bc}	4.49 $\pm$ 0.43 ^{cd}
MS + BA 5 mg/L	1.44 $\pm$ 0.19 ^{cd}	8.88 $\pm$ 0.49 ^{cd}	5.05 $\pm$ 0.78 ^d
MS + kinetin 1 mg/L	1.00 $\pm$ 0.00 ^{ab}	6.61 $\pm$ 1.31 ^b	1.37 $\pm$ 0.18 ^a
MS + kinetin 3 mg/L	1.66 $\pm$ 0.33 ^d	15.99 $\pm$ 0.87 ^f	6.16 $\pm$ 0.16 ^e
MS + kinetin 5 mg/L	0.66 $\pm$ 0.00 ^a	12.56 $\pm$ 0.97 ^e	6.47 $\pm$ 0.35 ^e
MS + TDZ 0.5 mg/L	0.88 $\pm$ 0.19 ^{ad}	9.88 $\pm$ 1.02 ^d	3.94 $\pm$ 0.15 ^c
MS + TDZ 1 mg/L	1.22 $\pm$ 0.19 ^{bc}	9.10 $\pm$ 0.50 ^{cd}	1.49 $\pm$ 0.43 ^a
MS + TDZ 1.5 mg/L	1.22 $\pm$ 0.19 ^{bc}	4.81 $\pm$ 0.81 ^a	2.65 $\pm$ 0.42 ^b

หมายเหตุ - ตัวอักษรพิมพ์เล็กใช้สำหรับเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายในสดมภ์เดียวกัน
 - อักษรที่ต่างกันภายในสดมภ์แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์
 - วิเคราะห์ความแตกต่างค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยความยาวลำต้น และความยาวรากของต้นว่านชักมดลูกตัวเมียบนอาหาร MS ที่เติม BA ความเข้มข้นต่างๆ ร่วมกับซูโครส 30, 60 และ 90 กรัมต่อลิตร เพาะเลี้ยงเป็นเวลา 4 สัปดาห์

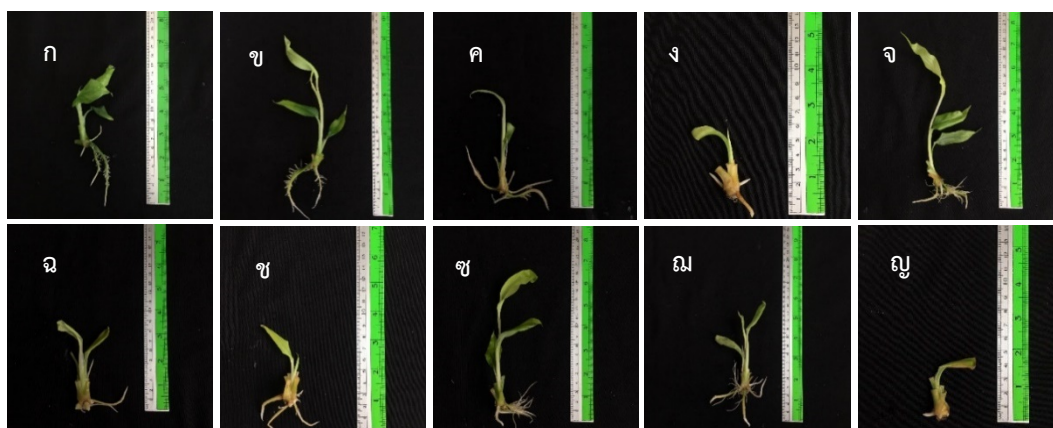
สูตรอาหาร	ความยาวลำต้น (ซม.)	ความยาวราก (ซม.)
	Mean $\pm$ SD	Mean $\pm$ SD
MS	12.35 $\pm$ 0.53 ^{cd}	6.83 $\pm$ 0.36 ^{ef}
MS + BA 1 mg/L + sucrose 30 g/L	18.32 $\pm$ 0.61 ^e	7.52 $\pm$ 0.65 ^f
MS + BA 1 mg/L + sucrose 60 g/L	11.80 $\pm$ 0.50 ^c	6.98 $\pm$ 0.78 ^{ef}
MS + BA 1 mg/L + sucrose 90 g/L	5.02 $\pm$ 0.24 ^a	1.80 $\pm$ 0.79 ^b
MS + BA 3 mg/L + sucrose 30 g/L	13.56 $\pm$ 1.89 ^d	6.51 $\pm$ 0.66 ^d
MS + BA 3 mg/L + sucrose 60 g/L	8.29 $\pm$ 0.46 ^b	4.57 $\pm$ 0.42 ^{cd}
MS + BA 3 mg/L + sucrose 90 g/L	5.83 $\pm$ 0.20 ^a	3.74 $\pm$ 0.19 ^c
MS + BA 5 mg/L + sucrose 30 g/L	17.04 $\pm$ 1.10 ^e	4.50 $\pm$ 0.25 ^{cd}
MS + BA 5 mg/L + sucrose 60 g/L	11.07 $\pm$ 0.34 ^c	5.26 $\pm$ 0.25 ^d
MS + BA 5 mg/L + sucrose 90 g/L	4.60 $\pm$ 0.34 ^a	0.68 $\pm$ 0.40 ^a

หมายเหตุ - ตัวอักษรพิมพ์เล็กใช้สำหรับเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยภายในสดมภ์เดียวกัน
 - อักษรที่ต่างกันภายในสดมภ์แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์
 - วิเคราะห์ความแตกต่างค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test

3.2 สูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการชักนำเหง้าขนาดเล็ก (Microrhizome) ของต้นว่านชักมดลูกตัวเมีย

หลังจากการชักนำเหง้าขนาดเล็กของว่านชักมดลูกตัวเมียบนอาหาร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับชูโครส 30, 60 และ 90 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า ทุกสูตรอาหารของการทดลองไม่พบการสร้างเหง้าขนาดเล็กในขวดทดลองได้ เมื่อนำชิ้นส่วนโคนลำต้นมาผ่าออก ย้อมด้วยสารละลายไอโอดีน ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ พบการสะสมแป้งที่บริเวณส่วนโคนลำต้นของต้นว่านชักมดลูกตัวเมีย ในสูตรอาหาร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับชูโครส 60 และ 90 กรัมต่อลิตร โดยบริเวณโคนลำต้นมีลักษณะอวบอ้วน โดยเฉพาะในอาหารที่เติมชูโครส 60 (รูปที่ 2, ค, ฉ, ณ) และ 90 กรัมต่อลิตร (รูปที่ 2, ง, ข, ญ) และไม่พบการสะสมแป้งในสูตรอาหารที่เติมชูโครส 30 กรัมต่อลิตร และอาหาร MS ที่ไม่เติมสารควบคุมการเจริญเติบโต (รูปที่ 3) ซึ่งการสะสมแป้งที่บริเวณที่ส่วนโคนลำต้นนั้นจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณชูโครสในสูตรอาหารเพิ่มมากขึ้น

สอดคล้องกับ N. Sanghamitra [7] ที่ไม่พบการเกิดเหง้าขนาดเล็กของ *C. aromatica* ในสูตรอาหาร MS ที่เติมชูโครส 30 กรัมต่อลิตร โดย J. Chonthicha et al. [16] รายงานว่ามีอิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของแสง และชูโครสต่อการสร้างเหง้า ซึ่งการใช้แสงสีแดงจากหลอด LED สามารถชักนำให้เกิดเหง้าได้ถึง 100% และแสงสีแดงอาจมีผลต่อการเข้าสู่ระยะพักตัวของพืช เพื่อกระตุ้นการสะสมอาหารและสร้างเหง้า ซึ่งสูงกว่าการใช้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ จึงเป็นไปได้ว่าการทดลองครั้งนี้มีการให้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ทำให้ปัจจัยของแสงมีผลต่อการทดลอง จึงไม่พบการเกิดเหง้าขนาดเล็กของว่านชักมดลูกตัวเมียในขวดทดลอง และมีรายงานการวิจัยที่กล่าวถึงผลของแสงที่มีผลต่อการงอกเป็นต้นใหม่ รวมถึงผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาให้กลายเป็นอวัยวะที่จำเพาะ เช่น ส่วนสะสมอาหารของพืช (tuber, bulb, corm และ rhizome) [4], [17] จากรายงานของ J. Chonthicha et al. [16] พบพืชสามารถสร้างเหง้าหลังจากเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 3 เดือน แตกต่างจากงานวิจัยนี้ที่ใช้เวลาเพาะเลี้ยงเพียง 4 สัปดาห์ แต่จากรายงานของ K. Chantana [5] ที่ศึกษาการสร้างเหง้าขนาดเล็ก พบว่า เมื่อครบ 12 สัปดาห์แล้ว



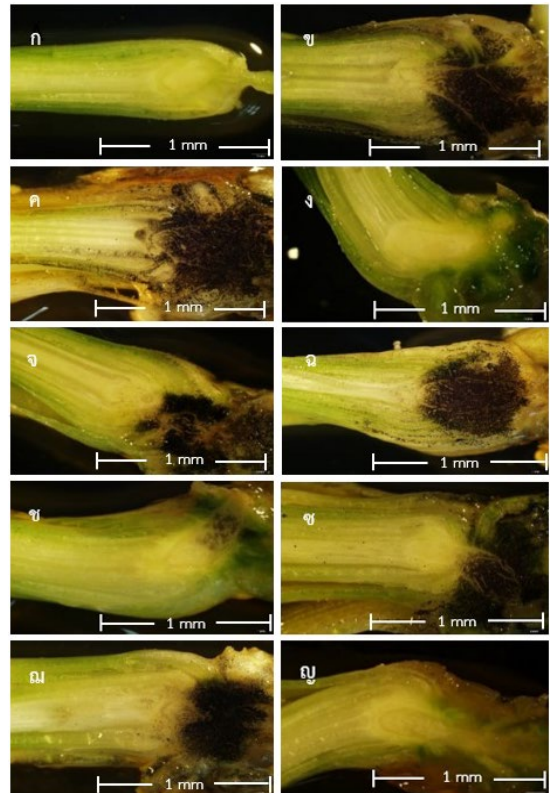
รูปที่ 2 ว่านชักมดลูกตัวเมียเพาะเลี้ยงบนอาหาร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับชูโครส ความเข้มข้น 30, 60 และ 90 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 4 สัปดาห์

(ก) MS (ข) BA 1 มก/ล+ชูโครส 30 ก/ล (ค) BA 1 มก/ล+ชูโครส 60 ก/ล (ง) BA 1 มก/ล+ชูโครส 90 ก/ล (จ) BA 3 มก/ล+ชูโครส 30 ก/ล (ฉ) BA 3 มก/ล+ชูโครส 60 ก/ล (ช) BA 3 มก/ล+ชูโครส 90 ก/ล (ฌ) BA 5 มก/ล+ชูโครส 30 ก/ล (ณ) BA 5 มก/ล+ชูโครส 60 ก/ล (ญ) BA 5 มก/ล+ชูโครส 90 ก/ล

หน่อกล้วยสามารถสร้างเหง้าขนาดเล็ก แต่ยังไม่สามารถสร้างเหง้าขนาดเล็กได้ในทุกช่วงเวลาของการให้แสง ซึ่งอาจเกิดมาจากความแตกต่างของพันธุ์พืชที่ใช้ทดลอง จากการรายงานของ P. Waraporn [18] ได้กล่าวว่ามีปัจจัย ของแสง อาหาร การเติมสารกระตุ้น สภาวะในการเพาะเลี้ยง รวมถึงระยะการเจริญเติบโต มีผลต่อการเจริญเติบโต และการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยา รวมถึงการสร้างสารทุติยภูมิ โดย N. Sanghamitra [7] พบว่าการเกิดของไมโครไรโซม ถูกควบคุมด้วยความเข้มข้นของ BA และซูโครส ตลอดจนช่วงแสงระหว่างการเพาะเลี้ยง

ความยาวลำต้นวุ้นขั้วมดลูกตัวเมียเฉลี่ยสูงที่สุดบนอาหาร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 1 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับซูโครส 30 กรัมต่อลิตร ให้ความยาวลำต้นเฉลี่ย 18.32 และ 17.04 เซนติเมตร แตกต่างจากอาหารสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 2, รูปที่ 2, ข) และมีความยาวรากเฉลี่ยสูงสุด 7.52 เซนติเมตร (ตารางที่ 2, รูปที่ 2, ข) สอดคล้องกับ K. Chantana [5] รายงานว่าอาหารสูตร MS ที่มีปริมาณน้ำตาลซูโครส 30 กรัมต่อลิตร สามารถชักนำให้เกิดการสร้างรากที่มีความยาวมากที่สุด และ C. Rodjanacorn et al. [19] รายงานว่าน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร ที่มีอยู่ในอาหารเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ ช่วยให้พืชทดลองมีการเจริญได้ดีที่สุด โดยให้จำนวนยอด จำนวนราก และความยาวของรากมากที่สุด นอกจากนี้การศึกษาค้นคว้าพบว่าความยาวและจำนวนรากลดลงเมื่อปริมาณซูโครสสูงขึ้น เช่นเดียวกับ K. Anupan and Y. Weerachon [20] ที่รายงานว่าปริมาณซูโครสมีผลต่อการเติบโตในขั้วมดลูกตัวเมียเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่เติมซูโครส 30 กรัมต่อลิตร ทำให้มีรากใหม่เพิ่มมากขึ้น และมีการเจริญเติบโตช้าลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซูโครสเป็น 60 และ 90 กรัมต่อลิตร ซึ่ง Y. Mehwish et al. [21] ให้เหตุผลว่าความเข้มข้นของซูโครสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ยอด และรากเจริญน้อยลงเป็นเพราะปริมาณซูโครสที่สูงเกินไปทำให้

เกิดสภาวะเครียดในต้นพืช มีผลลดหรือยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ตลอดจนทำให้ค่าออสโมลาริตี (Osmolarity) ของอาหารเพาะเลี้ยงเปลี่ยนแปลงไปจึงส่งผลต่อการดูดน้ำ และแร่ธาตุของพืชได้



รูปที่ 3 การสะสมแป้งที่บริเวณส่วนโคนลำต้นของวุ้นขั้วมดลูกตัวเมียในขวดทดลอง

(ก) BA 1 มก/ล+ซูโครส 30 ก/ล (ข) BA 1 มก/ล+ซูโครส 60 ก/ล
(ค) BA 1 มก/ล+ซูโครส 90 ก/ล (ง) BA 3 มก/ล+ซูโครส 30 ก/ล
(จ) BA 3 มก/ล+ซูโครส 60 ก/ล (ฉ) BA 3 มก/ล+ซูโครส 90 ก/ล
(ช) BA 5 มก/ล+ซูโครส 30 ก/ล (ฅ) BA 5 มก/ล+ซูโครส 60 ก/ล
(ณ) BA 5 มก/ล+ ซูโครส 90 ก/ล (ญ) MS

3.3 อัตราการรอดชีวิตของต้นวุ้นขั้วมดลูกตัวเมียหลังออกปลูก

เมื่อนำต้นวุ้นขั้วมดลูกตัวเมีย ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อและผ่านการชักนำเหง้าขนาดเล็ก ย้าย

ปลูกลงบนวัสดุปลูก ที่ผสมด้วย ทราย แกลบ และขุยมะพร้าว ในอัตราส่วน 1 : 1 : 1 อนุบาลต้นพืชเป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่าต้นว่านชักมดลูกตัวเมียที่ผ่านการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ มีอัตราการรอดชีวิต 66 - 100 เปอร์เซ็นต์ ต้นกล้าที่รอดชีวิตทั้งหมดมีลักษณะแข็งแรงสมบูรณ์ มีลักษณะสัณฐานวิทยาเหมือนในสภาพธรรมชาติ การใช้วัสดุปลูกมีความสำคัญต่อการรอดชีวิตของต้นกล้า ทั้งนี้ขุยมะพร้าวมีการอุ้มน้ำ ระบายน้ำ ระบายอากาศได้ดี โดย K. Srisunan and J. Yaowapa [22] กล่าวว่า วัสดุปลูกที่หาได้ง่ายในประเทศไทย ซึ่งได้แก่ ขุยมะพร้าว ถ่าน แกลบ และแกลบนั่น จะมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเมื่อนำมาผสมกับทราย ในอัตราส่วน 1 : 1 โดยปริมาตร

4. สรุป

สารควบคุมการเจริญเติบโตที่มีผลต่อการแตกหน่อของต้นว่านชักมดลูกตัวเมีย (*C. comosa*) ที่ดีที่สุดคือ BA ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชักนำให้เกิดการแตกหน่อได้มากที่สุดเฉลี่ย 2.11 หน่อต่อชิ้นส่วนพืช ส่วนการศึกษาสูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการชักนำให้ขนาดเล็กลงของต้นว่านชักมดลูกตัวเมีย ไม่พบการสร้างเหง้าขนาดเล็กของการเพาะเลี้ยงต้นว่านชักมดลูกตัวเมียจากทุกสูตรอาหารของการทดลอง แต่ต้นว่านชักมดลูกตัวเมียที่เพาะเลี้ยงบนอาหาร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับน้ำตาลซูโครส 30 กรัมต่อลิตร สามารถชักนำให้เกิดต้นที่มีความยาวลำต้น และความยาวรากมากที่สุด แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส ตั้งแต่ 60 และ 90 กรัมต่อลิตร ส่งผลให้ความยาวลำต้น และความยาวรากลดลง ลำต้นมีสีเหลือง ปลายใบเหลือง เมื่อนำต้นว่านชักมดลูกตัวเมียที่ได้ผ่านการชักนำให้ขนาดเล็กลงมาปลูกลงวัสดุ ระยะเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า มีอัตราการรอดชีวิต 66 - 100 เปอร์เซ็นต์ ต้นพืชมีความแข็งแรง สมบูรณ์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาที่ผิดปกติ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ที่ให้การสนับสนุนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Peerasak, *Plant Resources of South-East Asia No.9 : Plant yielding non-seed carbohydrate*, 2nd ed. Bangkok: Thailand Institute of Scientific and Technology Research Press, 2001.
- [2] Department of Agriculture Extension. (2019, September 10). Survey Statistic Transplant of Wan Chak Mood Look. [Online]. Available: <http://www.agriinfo.doae.go.th>
- [3] K. Rawiwan, "Secondary metabolite and biology activity of Wan Chak Mood Look distributed in Thai market," *Journal of Science and Technology Ubon Ratchathani University*, vol. 19, no. 1, 2017.
- [4] T. R. Sharma and B. M. Singh, "In vitro microrhizome induction in *Zingiber officinale* Rosc.," *Plant Cell Rep*, vol. 15, 1995.
- [5] K. Chantana, "Factors affecting invitro microrhizome induction of *Alpinia galanga* Swartz and *Alpinia nigra* Burtt," Research report, Dept. Science. Suan Sunandha Rajabhat Univ., Bangkok, Thailand, 2010.
- [6] R. Watcharin, "Chromosomal Enrichment of *Curcuma longa* L. and *Curcuma zedoaria* (Christm.) Roscoe by Colchicine in aseptic Conditions," M.S. Thesis, Dept. Horticulture. Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2001.

- [7] N. Sanghamitra, "In vitro multiplication and microrhizome induction in *Curcuma aromatica* Salisb.," *Plant Growth Regulation*, vol. 32, no. 1, 2000.
- [8] P. Phattaraporn, S. Piyaporn and S. Surapon, "Vitro Propagation of *Globba marantina* L.," *KKU Research Journal*, vol. 19, no. 4, 2014.
- [9] Department of Agriculture. (2019, September 15). Promote the cultivation of 18 GAP herbs. [Online]. Available: <http://www.kaset1009.com>
- [10] T. Murashige and F. Skoog, "A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue culture," *Physiologia Plantarum*, vol. 15, 1962.
- [11] R. Khwanduean, S. Supavee and M. Phukphon, "Effect of BA and NAA on in Vitro Culture of Young Leaves of *Caladium bicolor* Vent.," *SDU Res. J*, vol. 10, no. 3, 2017.
- [12] B. Phopgao, K. Chintana and U. Warut, "In vitro culture of *Hippeastrum johnsonii* Bury and *Caladium bicolor* Vent.," *Naresuan University Journal*, vol. 19, no. 1, 2011.
- [13] P. Kanika, S. Therapas, C. Sripan, J. Torwut and S. Piti, "Effect of Kinetin on in vitro Growth of Jerusalem artichoke," Research Report, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi., Univ., Nonthaburi, Thailand, 2014.
- [14] L.H. Nguyen, D.T. Doan, K. H. Tae and Y. S. Moon, "Micropropagation of zedoary (*Curcuma zedoaria* Roscoe.) a valuable medicinal plant," *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, vol. 81, 2005.
- [15] C. Aphichat, N. Phongyuth and P. Pitak, "Effects of BA on Micropropagation of *Boesenbergia pandurata* Holtt.," *Journal of Agriculture*, vol 17, no. 2, 2001.
- [16] J. Chonthicha, T. Siwaporn and S. Chamchuree, "Effects of Light Source and Sucrose on in vitro Microrhizome Formation of Ginger," *Agricultural Sci. J*, vol. 49, no. 1 (Suppl.), 2018
- [17] V. Anushri, D. Vibha and P. S. Srivastava, "A protocol for in vitro mass propagation of asiatic hybrids of lily through liquid stationary culture," *In vitro Cell. Dev. Biol*, vol. 36, 2000.
- [18] P. Waraporn, *Plant tissue culture Technology: Foundation to application in pharmacy*, 1st ed. Khonkaen: Khonkaen-pimpattana Press, 2014.
- [19] C. Rodjanacorn, C. Ngarmnij, K. Nutthawut, L. Rawit, N. Nattapon, M. Atchara, J. Thaya and S. Puangpaka, "In Vitro Propagation of *Curcuma candida* (Wall.) Techapr. & Škornick., a Vulnerable Plant of Thailand," *SWU Sci. J*, vol. 35, no. 2, 2019.
- [20] K. Anupan and Y. Weerachon, "Effects of Light, Sucrose and Plant Growth Retardants on in vitro Microrhizome Induction of *Curcuma longa* L.," *NU Science Journal*, vol. 2, no.1, 2005.
- [21] Y. Mehwish, A. Touqeer, S. Gaurav, S. Alvaro and H. A. Ishfaq, "Review: role of carbon sources for in vitro plant growth

and development,” *Molecular Biology Reports*, vol. 40, 2012.

[22] K. Srisunan and J. Yaowapa, “Effect of Substrates on Growth and Yield of Chinese

Kale in Substrate Culture,” *Thai Science and Technology Journal*, vol. 10, no. 2, 2002.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Isolation, Classification and Study of the Influence of Glow Discharge Plasma on Dirty Panicle Rice Fungal Pathogens

Waraporn Sutthisa^{1*}, Perachat Chaidee¹, Supicha Saengkaewsuk¹ and Artit Chingsungnoen²

¹Department of Biology, Faculty of Science, Mahasarakham University, Maha Sarakham, Thailand

²Department of Physic, Faculty of Science, Mahasarakham University, Maha Sarakham, Thailand

^{1,2} Khamriang Sub-District, Kantarawichai District, Maha Sarakham Province, 44150 Thailand

Received 22 April 2021; Revised 22 August 2021; Accepted 16 September 2021

Abstract

This study was conducted to isolate and classify fungal dirty panicle disease pathogens from five rice varieties. Observation of rice seeds under stereo microscope showed that the seeds from all five varieties had 100% lesions of dirty panicle disease. When isolating the fungal pathogen with three methods, i.e. (i) ground rice seeds shaken in dH₂O and then spread on potato dextrose agar (PDA), (ii) rice seeds washed with dH₂O twice, then placed on PDA, and (iii) rice seeds shaken in 5% clorox for 5 min, after that washed with dH₂O twice and then placed on PDA, 57 isolates of fungi were obtained. Morphological characterization classified the fungi into 17 genera, i.e. *Alternaria*, *Arthrinium*, *Aspergillus*, *Biporalis*, *Botryotinia*, *Botrytis*, *Corynespora*, *Curvularia*, *Cylindrocarpon*, *Fusarium*, *Humicola*, *Monilinia*, *Mucor*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Stachybotrys* and *Stemphylium*. Four genera, i.e. *Alternaria*, *Bipolaris*, *Curvularia* and *Fusarium* were reported to cause of dirty panicle disease of rice. The effect of glow discharge plasma on inhibition of fungal pathogen showed that exposed glow discharge plasma for 150s could inhibit mycelium growth of *Curvularia* but did not affect to *Bipolaris* and *Fusarium*.

Keywords : Dirty Panicle Disease; Glow Discharge Plasma; Thai Rice Variety

* Corresponding Author. Tel.: +668 1545 3454, E-mail Address: waraporn.s@msu.ac.th

1. Introduction

One of staple food crops is rice (*Oryza sativa* L.) that is grown in tropical and sub-tropical climate [1]. In Thailand, about three-quarters of all farm households grow rice. The world's second-largest exporter of rice is Thailand [2]. This country has plans to increase the area for rice production to 9.2 million hectares [3,4]. The Thai Ministry of Agriculture expects rice yield to be 25 million tons in 2016-2017. However, many serious problems affect rice quality and yield losses. In Thailand, one of the most important diseases that affect rice grain, seed quality, seed germination, and seed losses is dirty panicle disease [5] that usually infects rice plants before and after harvest [6]. Many fungi including *Alternaria padwickii*, *Cercospora oryzae*, *Curvularia lunata*, *Fusarium semitectum*, *Helminthosporium oryzae* and *Sarocladium oryzae* were reported to be causal agent of dirty panicle disease [7]. Therefore, finding an effective method to solve this problem should be considerably focused. There are many methods to control this disease including using disease-free seeds, mix seeds with fungicides such as carbendazim or mancozeb, monitor the weather conditions to prepare for disease outbreak.

However, we studied a new method as an alternative way to controlling dirty panicle disease which is glow discharge plasma. Glow discharge plasma is an ionized gas comprising the same concentration of positive and negative electric charges and many neutral species. This kind of plasma is applied to analytical chemistry, micro-electronic industry, and also as lasers, light sources,

displays, and many other applications. Plasma is partially ionized gas normally generated by an electrical discharge at near ambient temperatures [8]. Advantages of plasma including low cost, rapid reaction times, high cleaning efficiency, low consumption of gas due to physical effects, and the enclosed and dry nature of process. The One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma (OAUGDP) performs at atmospheric pressure in air and builds anti-microbial activity species at room temperature. OAUGDP can decrease log number of microorganisms including gram-positive, gram-negative, endospore forming bacteria, yeasts and bacterial virus on surfaces. When exposed to plasma within a range 50-90s, bacterial number decreased in 5 log/sub 10/cfu. Bacterial fragmentation and macromolecular leakage were observed after exposure to plasma for 10-25s [9]. Apart from agricultural products, the method of one atmospheric glow discharge plasma can sterilize *Aspergillus flavus* spores that are coated on glass bead with the ability to inoculate approximately 1.8×10^7 cfu/g within less than 30 min [10]. The present work aims to isolate and identify fungi of rice dirty panicle disease and study the effect of glow discharge plasma on these pathogens.

2. Research Methodology

2.1 Isolation of dirty panicle pathogen

Seeds of five rice varieties, i.e. Pounded Red Rice, RD15, Leum Pua, Riceberry and Black Glutinous Rice were collected from Udon Thani province,

Thailand. After that, they were observed under stereo microscope for disease symptoms and isolation of the pathogen was operated with three methods which were (i) 10 g of ground seed sample of each variety was put into a flask containing 90 ml of dH₂O and shaken at 150 rpm for 1 hr then diluted into the concentrations of 10^{-3} , 10^{-4} and 10^{-5} , after that 0.1 ml of each dilution was spread on potato dextrose agar (PDA) added with 100 ppm streptomycin, with triplicates of each concentration, and incubated at 27°C. (ii) a sampling of 15 seeds of each variety was washed with dH₂O twice and placed on PDA added with 100 ppm streptomycin by placing five seeds per petri dishes with triplicates of each variety and then incubated at 27°C and (iii) a sample of 15 seeds each of all five rice varieties was shaken in 5% clorox for 5 min and then washed with dH₂O twice and then five seeds were placed on PDA added with 100 ppm streptomycin, with triplicates of each variety, and incubated at 27 °C. After incubation for 3-5 days, they were observed for mycelium growth followed by purification of the fungal pathogens.

2.2 Morphological characterization

Morphology of the fungal pathogens was observed 7-10 days after inoculation on potato dextrose agar (PDA). The characteristics consist of mycelium growth and colony color. Therefore, wet mount technique was used for the study of mycelium characteristics, arrangement, size and shape of fungal propagation.

2.3 Effect of glow discharge plasma on dirty panicle pathogens

Fungal pathogens isolated from rice seeds including *Biporalis*, *Curvularia* and *Fusarium* were inoculated on PDA for 7 - 10 days. Then exposed to the plasma for 0s, 90s, 120s and 150s. The ambient air with a relative humidity of 40% was used as a precursor gas and fed into the chamber via a top electrode. The sample was held to the bottom electrode which was connected to a radio frequency of 10 kHz. An electrical discharge plasma was produced at a power of 80W. The operating pressure during treatment was kept constant at 260 Pa. All treatments were carried out in triplicates for different exposure times [11]. After that, the effect of the plasma on the fungus was examined by using 0.5 mm diameter cork borer to cut the edges of the fungal colonies that exposed to plasma at various times and then inoculated on PDA, with triplicates for different exposure times and incubated at 27 °C. Then mycelium growth was observed and wet mount technique was used to study the difference of mycelium under a light microscope.

3. Results and Discussion

3.1 Isolation of dirty panicle pathogen

Observation of rice seed samples including Pounded Red Rice, RD15, Leum Pua, Riceberry and Black Glutinous Rice under stereo microscope showed that seeds of all five rice varieties had dirty panicle disease symptom. Isolation of fungi from rice seeds was done with three methods, i.e. (i) shaking the ground seeds in dH₂O and then spreading on PDA. (ii)

washing the seeds with dH₂O and placing the seeds on the PDA and (iii) shaking the seeds with 5% clorox and placing the seeds on the PDA. The fifty-seven isolates of fungi were obtained comprising 17 isolates, 13 isolates, 12 isolates, 11 isolates and 4 isolates from Riceberry, Black Glutinous Rice, RD15, Pounded Red Rice and Leum Pua, respectively. Isolation of fungi with three methods showed that method (iii) obtained the most fungal isolates followed by method (i) and (ii), with 23 isolates, 21 isolates and 13 isolates, respectively (Table 1). The method (iii), when we disinfect the seed surface, only the fungi inside the seed will develop. Whereas methods (i) and (ii) may be contaminated by saprophytes, resulting in less isolation. The results are similar to the study of Seelarak and Thummabenjapone [12] that isolated fungi from rice seeds obtaining 10.5% fungi in rice seeds which were not sterilized and 25.5% fungi in surface sterilized seeds.

Table 1 Number of fungi isolated from three methods from seeds of five rice varieties

Method	No. of isolates	Variety				
		Pounded Red Rice	RD 15	Leum Pua	Rice berry	Black Glutinous Rice
(i)	21	5	6	2	7	1
(ii)	13	3	4	0	0	6
(iii)	23	3	2	2	10	6
Total	57	11	12	4	17	13

3.2 Morphological characterization

Classification of 57 isolates of fungi by studying morphology, growth, mycelium, and conidia [13], [14] can classify all fungi into 17 genera, i.e. *Alternaria*, *Arthrinium*, *Aspergillus*, *Biporalis*, *Botryotinia*, *Botrytis*,

Corynespora, *Curvularia*, *Cylindrocarpon*, *Fusarium*, *Humicola*, *Monilinia*, *Mucor*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Stachybotrys*, *Stemphylium* and unknown (Table 2). Many fungi were reported to be dirty panicle disease pathogens including *Alternaria padwickii*, *Cercospora oryzae*, *Curvularia lunata*, *Fusarium semitectum*, *Helminthosporium oryzae* and *Sarocladium oryzae*. These fungal pathogens usually infect in the rice fields at panicle forming stage and after harvest [7], [15].

Table 2 Classification of fungi isolates obtained from seeds of five rice varieties

Fungi	No. of isolates					Total
	Pounded Red Rice	RD 15	Leum Pua	Rice berry	Black Glutinous Rice	
<i>Alternaria</i>	-	-	1	-	-	1
<i>Arthrinium</i>					1	1
<i>Aspergillus</i>	-	2	1	-	1	4
<i>Biporalis</i>	2	-	-	1	-	3
<i>Botryotinia</i>	1	-	-	-	-	1
<i>Botrytis</i>	-	-	-	1	-	1
<i>Corynespora</i>	1	-	-	-	-	1
<i>Curvularia</i>	1		1	2	2	6
<i>Cylindrocarpon</i>	1	-	-	-	-	1
<i>Fusarium</i>	-	-	-	1	-	1
<i>Humicola</i>	-	1	-		-	1
<i>Monilinia</i>	-	-	1	1	-	2
<i>Mucor</i>	-	3	-	-	2	5
<i>Penicillium</i>	-	-	-	1	1	2
<i>Rhizopus</i>	1	1				2
<i>Stachybotrys</i>	-	1	-	-	-	1
<i>Stemphylium</i>	1	-	-	-	-	1
Unknown	4	3		10	6	23
Total	12	11	4	17	13	57

3.3 Effect of glow discharge plasma on dirty panicle pathogens

The effect of glow discharge plasma on *Curvularia* revealed that exposure to plasma at 150s was able to inhibit

mycelium growth of *Curvularia*, with a colony diameter of 3.65 cm and 6.10 cm at 3 days and 5 days after inoculation, respectively (Table 3). When observing the mycelium growth we found that the treatment not exposed to plasma showed normal mycelium growth, while mycelium exposed to plasma had less growth (Fig. 1). Plasma did not affect mycelium growth and conidia germination of *Curvularia* when observed under a light microscope.

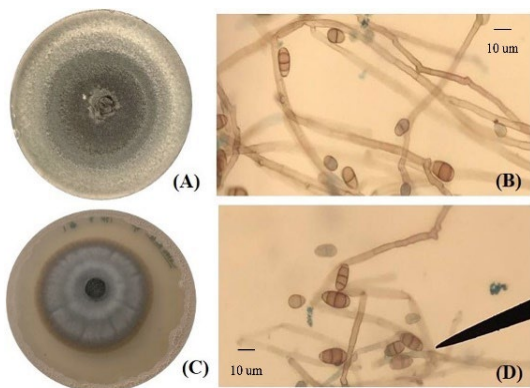


Fig. 1 Colony morphology, mycelium and conidia of *Curvularia*, 5 days after inoculation. (A, B) 0s plasma exposure (C, D) 150s plasma exposure

Results of the effect of glow discharge plasma on *Fusarium* showed that exposure to plasma did not affect the growth of *Fusarium* (Table 3, Fig. 2), but there were various crystal shapes in/and around mycelium and conidia when observed under a light microscope. The crystal number varies due to the duration of the plasma exposure. The longer duration of plasma exposure increased crystal number. However, five days after inoculation no crystal was found in the mycelium.

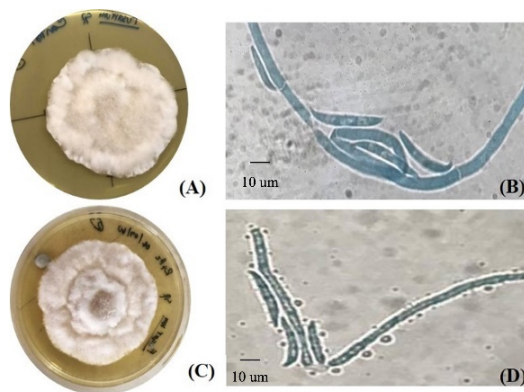


Fig. 2 Colony morphology, mycelium and conidia of *Fusarium*, 5 days after inoculation. (A, B) 0s plasma exposure (C, D) 150s plasma exposure

The effect of glow discharge plasma on *Bipolaris* showed that plasma did not affect mycelium growth and conidia germination of *Bipolaris* (Table 3, Fig. 3).

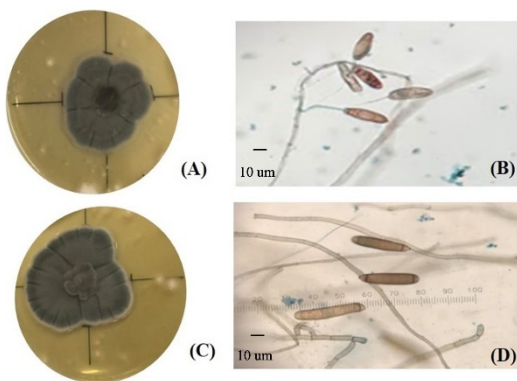


Fig. 3 Colony morphology, mycelium and conidia of *Bipolaris*, 5 days after inoculation. (A, B) 0s plasma exposure (C, D) 150s plasma exposure

Study of the effect of glow discharge plasma on fungal seed pathogens showed that the plasma inhibited *Curvularia* mycelial growth, but did not affect the growth of *Bipolaris* and *Fusarium*. This is because of the effect of plasma on

disintegration and becoming free radical O^- and free radical OH^- and oxidation. It can damage cell wall structure and cell membrane and inhibit cell biochemistry. Each fungus has different cell wall composition then the effects of plasma are also different. A regular method used to clean, arrange and improve biomaterial and implant surfaces is glow discharge plasma treatment. Excellence of such treatment is powerfully based on the process parameters [16]. This is similar to the study of the ability of constructed one-atmospheric glow discharge plasma on a reduced aflatoxin contamination from agricultural products including corn, bean, garlic, and shallot. Total plate count of fungal contamination on seed before treatment was 380 cfu/g, 510 cfu/g, 710 cfu/g and 7×10^4 cfu/g, respectively. After

exposure to plasma, total mold was completely reduced on corn and bean. In the case of garlic and shallot, the number of fungi was reduced but remained at 97 cfu/g and 2×10^4 cfu/g, respectively [10]. Moreover, in the study of the effect of plasma-glow discharge as sterilization of titanium surfaces, *in vitro* osteoblast responses to glow-discharged, commercially pure titanium (Ti) surfaces were investigated. The hypothesis of the glow-discharge treatment would be a practical sterilization system for Ti embedding before implantation. The Ti surfaces were prepared by grinding to 600 grits followed by cleaning. After that, they were divided into two groups, group one being the control and the other group undergoing glow-discharge treatment using oxygen.

Table 3 The effect of glow discharge plasma on mycelium growth of fungal dirty panicle pathogens

Duration of plasma exposure (s)	<i>Curvularia</i>		<i>Fusarium</i>		<i>Biporalis</i>	
	Colony diameter (cm)		Colony diameter (cm)		Colony diameter (cm)	
	3 day *	5 day *	3 day *	5 day *	3 day *	5 day *
0	5.88±0.08 ^a	8.27±0.06 ^a	4.00±0.26 ^a	4.03±0.64 ^a	2.92±0.34 ^b	3.42±0.45 ^b
90	5.08±0.67 ^b	7.90±0.69 ^a	3.25±0.22 ^a	4.57±0.13 ^a	3.02±0.03 ^b	3.72±0.08 ^b
120	5.45±0.17 ^{ab}	8.05±0.43 ^a	4.02±0.49 ^a	5.23±0.58 ^a	2.97±0.13 ^b	3.42±0.44 ^b
150	3.63±0.03 ^c	6.10±0.10 ^b	3.75±0.36 ^a	5.00±0.46 ^a	3.43±0.39 ^b	4.23±0.16 ^a
CV (%)	5.01±0.93	7.58±0.97	3.75±0.44	4.91±0.49	3.08±0.31	3.70±0.16

* Means (n=3) in column followed by the same letters are not significantly different based on $p < 0.05$, LSD.

Human embryonic palatal mesenchyme cells, an osteoblast precursor, were used to assess the cell responses to glow-discharged and control Ti surfaces. Ten days after treatment, the results showed that protein

production and osteocalcin production on both surfaces exhibited no significant differences. Altogether, this study suggested that the use of glow discharge as an alternative sterilization system for medical and dental embed did not

inhibit osteoblast phenotypic expression [17]. Study of antimicrobial activity in herbal tea was done by using a low-pressure capacitively coupled discharge. *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* were isolated from herbal tea, after that they were inoculated on NA petri dishes and exposed to the plasma for 0.5 min, 1.0 min, 1.5 min and 2.0 min [11]. From the results of an interdisciplinary cooperation established to evaluate the sterilizing capabilities of the One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma (OAUGDP), this glow discharge plasma is able to perform at atmospheric pressure in air and other gases and bears antimicrobial active species to surfaces and workpieces at room temperature as decided by viable plate counts. OAUGDP exposures have decreased log numbers of bacteria, *S. aureus* and *E. coli*, *Bacillus stearothermophilus* and *B. subtilis* on seeded solid surfaces, fabrics, filter paper, and powdered culture media at room temperature [18]. Establishment of atmospheric pressure glow discharge was likened to the execution of an equipment used in the first atmospheric pressure glow (APG) experiment, in the matter of sterilization of anew categorized biological indicator such as *Bacillus atrophaeus*, *B. subtilis* var. *niger* and *Geobacillus stearothermophilus*. Stabilization was finished by controlling the experimental conditions at low frequency: 100 kHz and Radio Frequency: 13.56 MHz with water vapor/He dilution. The large volume of meta-stable atomic helium is responsible for the result that aids the generation of hydroxyl radicals [19].

4. Conclusion

In this study we obtained many fungi from seeds. There are four genera which are reported as causes of rice seed diseases including *Alternaria*, *Bipolaris*, *Curvularia* and *Fusarium*. Glow discharge plasma effected to inhibit *Curvularia* mycelium growth, but did not affect the growth of *Bipolaris* and *Fusarium*.

5. Acknowledgement

This work was supported by the Department of Biology, Faculty of Science, Maharakham University.

6. References

- [1] K. Sangwijit, P. Thangsunan, R. Cutler and S. Anuntalabhochai, "Development of SCAR marker for Thai fragrant rice (*Oryza sativa* L. var. *indica* cv. Pathumthani 1) mutants induced by low energy ion beam," *Chiang Mai Journal of Science*, vol. 39, no.4, pp. 545-553, 2012.
- [2] Investvine. (2013, Feb 1). Thailand wants rice top spot back. (Online). Available: <https://www.bangkokpost.com/world/294585/thailand-to-retain-top-spot-in-rice-exports>
- [3] The Nation. (2008, April 16). Rice strain is cause of comparatively low productivity. (Online). Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Rice_production_in_Thailand
- [4] N. Ghosh. (2008, Feb 24). Thailand to set aside more land for farming. Straits Times. (Online). Available: <https://wildsingaporenews.blogspot.c>

- om/2008/04/thailand-to-set-aside-more-land-for.html
- [5] P. Thavong, "Effect of dirty panicle disease on rice seed vigor," *Agricultural Research Journal*, vol. 20, pp. 111-120, 2002.
 - [6] C. Boonreung and S. Boonlertnirun, "Efficiency of chitosan for chitosan for controlling dirty panicle disease in rice plants," *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science*, vol. 8, no. 5, pp. 380-384, 2013.
 - [7] S. Prathuangwong, D. Athinuwat, W. Chuaboon, T. Chatnaparat and N. Buensanteai, "Bioformulation *Pseudomonas fluorescens* SP007s against dirty panicle disease of rice," *African Journal Microbiology Research*, vol. 7, no. 47, pp. 5274-5283, 2013.
 - [8] K. Samanta, M. Jassal and A.K. Agrawal, "Atmospheric pressure glow discharge plasma and its applications in textile," *Indian Journal Fibre and Textile Research*, vol. 31, pp. 83-98, 2006.
 - [9] T.C. Montie, K. Kelly-Wintenberg and J.R. Roth, "An overview of research using the one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAUGDP) for sterilization of surfaces and materials," *IEEE Transactions and Plasma Science*, vol. 28, no. 1, pp. 41-50, 2000.
 - [10] S. Preechayan, K. Tonmitr, A. Suksriand and P. Siriputthaiwan, "Decontamination of aflatoxin producing fungi on agriculture products by atmospheric glow discharge plasma," *KKU Research Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 202-213, 2010.
 - [11] A. Chingsungnoen, S. Maneerat, P. Chunpeng, P. Poolcharuansin and R. Nam-Matra, "Antimicrobial treatment of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* in herbal tea using low-temperature plasma," *Journal of Food Protection*, vol. 81, no. 9, pp. 1503-1507, 2018.
 - [12] P. Seelarak and P. Thummabenjapone, "Seed transmission of *Fusarium* spp. causal agent of bakanae disease in rice and potential of antagonistic *Streptomyces*-PR15 and *Streptomyces*-PR87 for control disease of economic crops caused by *Fusarium* spp.," *Khon Kaen Agricultural Journal*, vol. 44 (suppl.), pp. 238-245, 2016.
 - [13] T. Watanabe, *Soil and Seed Fungi. Pictorial Atlas of Soil and Seed Fungi. Morphologies of Cultured Fungi and Key to Species*. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, 2002.
 - [14] H.L. Barnett and B.B. Hunter, *Illustrated Genera of Imperfect Fungi*. 3rd ed. Burgess Publishing Co., Minneapolis, 1972.
 - [15] S. Saechow, A. Thammasittirong, P. Kittakoo, S. Prachya and S.N. Thammasittirong, "Antagonistic activity against dirty panicle rice fungal pathogens and plant growth-promoting activity of *Bacillus amyloliquefaciens* BAS23," *Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 28, no. 9, pp. 1527-1535, 2018.
 - [16] B.O. Aronsson, J. Lausmaa and B. Kasemo, "Glow discharge plasma

- treatment for surface cleaning and modification of metallic biomaterials,” *Journal of Biomedical Material Research*, vol. 35, no. 1, pp. 49-73, 1997.
- [17] T. Youngblood and J.L. Ong, “Effect of plasma-glow discharge as a sterilization of titanium surfaces,” *Implant Dentistry*, vol. 12, no. 1, pp. 54-60, 2003.
- [18] K. Kelly-Wintenberg, T.C. Montie, C. Brickman, J.R. Roth, A.K. Carr, K. Sorge, L.C. Wadsworth and P.P.Y. Tsai, “Room temperature sterilization of surfaces and fabrics with a one atmosphere uniform glow discharge plasma,” *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, vol. 20, pp. 69–74, 1998.
- [19] T. Akitsua, H. Ohkawaa, M. Tsujib, H. Kimurab and M. Kogomac, “Plasma sterilization using glow discharge at atmospheric pressure,” *Surface and Coating Technology*, vol. 193, pp. 29–34, 2005.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

กำลังและความต้านทานการกัดกร่อนของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสาน กระตุ้นด้วยต่างจากเถาเถาหินแคลเซียมสูง

อภัย เบ็ญจพงศ์ เชาพีร์ ดือราแม* และ รัตนศักดิ์ หงษ์ทอง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

รับบทความ 9 กุมภาพันธ์ 2564 แก้ไขบทความ 26 สิงหาคม 2564 ตอรับบทความ 16 กันยายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างที่ทำจากเถาเถาหินแคลเซียมสูงมาเป็นวัสดุประสานเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ทำจากเถาเถาหินใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการกระตุ้นกำลังที่มีความเข้มข้น 2, 4, 6 และ 8 โมลาร์ โดยใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 105 – 110 ทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน และทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 จากการทดสอบพบว่า มอร์ตาร์ที่ทำจากเถาเถาหินแคลเซียมสูงและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 โมลาร์เป็นวัสดุประสานสามารถรับกำลังอัดได้สูงสุด ซึ่งสามารถพัฒนากำลังอัดได้ถึง 189 กก/ซม² ที่อายุ 60 วัน ส่วนการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟิวริกพบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้เถาเถาหินกระตุ้นด้วยต่างที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกน้อยที่สุด

คำสำคัญ : วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่าง; เถาเถาหินแคลเซียมสูง; กำลังอัด; ความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรด

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 9732 2534, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: saofee.d@mail.rmutk.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Strength and Acid Resistance of Mortar Made from Alkali Activated High Calcium Fly Ash

Apai Benchapong Saofee Dueramae* and Rattanasak Hongthong

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Krungthep

2 Nanglinchee Road, Tungmahamek, Sathorn, Bangkok, 10120

Received 9 February 2021; Revised 26 August 2021; Accepted 16 September 2021

Abstract

The aim of this study is developed of alkali activated high calcium fly ash to use as cementitious material to replace Portland cement. The mixture of mortar made from fly ash and sodium hydroxide solution (NaOH) was used to activate strength at concentrations of 2, 4, 6 and 8 molars. Superplasticizer was used to control the flow of mortar in the range of 105 – 110. The compressive strength of mortar was determined at 7, 28, 45 and 60 days. The acid resistance of mortars due to sulfuric at a concentration of 3% were also investigated. The results showed the mortar made from high calcium fly ash with sodium hydroxide of 6 molar obtained the highest compressive strength, which could be developed compressive strength up to 189 ksc at 60 days. For the acid resistance of mortar, it was found that the use of 6 molar of NaOH activated high calcium fly ash binder had the least weight loss due to sulfuric acid attack.

Keywords : Alkali Activated; High Calcium Fly Ash; Compressive Strength; Acid Resistance

* Corresponding Author. Tel.: +668 9732 2534, E-mail Address: saofee.d@mail.rmutk.ac.th

1. บทนำ

วัสดุประสานที่ทำการกระตุ้นด้วยด่าง (Alkali Activated Binder) คือ วัสดุที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นเพื่อนำมาใช้ทดแทนวัสดุซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้กันในปัจจุบัน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานประกอบไปด้วยสารตั้งต้นหลักคือ ซิลิกา อลูมินาและแคลเซียม โดยมีสารละลายต่าง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) [1], [2] ที่หน้าที่กระตุ้นและชะละลายออกไซด์จากวัสดุตั้งต้น ทำปฏิกิริยากันเป็นโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แคลเซียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) และโซเดียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (NASH) [3] ซึ่งมีหน้าที่ในการเชื่อมประสานคล้าย ๆ ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรตชันของปูนซีเมนต์

เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่งที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายเพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ โดยองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน ประกอบด้วยองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) เฟอริก (Fe_2O_3) และแคลเซียม (CaO) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารตั้งต้นของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง การใช้เถ้าถ่านหินมาผลิตเป็นวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างอาจมีศักยภาพและเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการใช้พลังงานในการเผาและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์การเผาใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 1,400-1,600 องศาเซลเซียส และการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 1 ตันสู่บรรยากาศ [4]

อย่างไรก็ตามการพัฒนาวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์นั้น ขึ้นกับปัจจัยในหลาย ๆ ด้าน หนึ่งในนั้นได้แก่ วัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นที่นำมาใช้ในการผลิต เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของ

วัสดุตั้งต้นที่แตกต่างกันส่งผลต่อโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมประสาน ซึ่งสมบัติในด้านต่าง ๆ ทั้งสมบัติทางกลและด้านความทนทาน เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน พบว่าเถ้าถ่านหินนั้นมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน มีทั้งเถ้าถ่านหินประเภทที่มีแคลเซียมในปริมาณสูงและเถ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมในปริมาณต่ำ ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า ปริมาณขององค์ประกอบของสารตั้งต้นที่นำมาผลิตเป็นวัสดุประสานส่งผลต่อสมบัติในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะด้านกำลังจากการศึกษาและนำเสนอของ A. Fernández-Jiménez and A. Palomo [5] พบว่า ปริมาณแคลเซียมในสารตั้งต้น ส่งผลต่อการก่อตัวและการรับกำลังอัด โดยวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในสารตั้งต้นต่ำนั้น มีระยะเวลาการก่อตัวที่นานและมีการพัฒนากำลังอัดที่ช้าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้อง นอกจากนั้นความทนทานก็เป็นเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญนอกเหนือจากกำลังอัด เพราะในสภาพแวดล้อมทั่วไปพบว่าบ่อยครั้ง มอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ถูกทำลายเนื่องจากสารเคมี โดยเฉพาะกรดซัลฟิวริก เนื่องจากปูนซีเมนต์มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูง [6] ดังนั้นหากสารตั้งต้นที่ใช้ผลิตเป็นวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างนั้นมีปริมาณของแคลเซียมที่สูงอาจส่งผลต่อความทนทานของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์เมื่อสัมผัสกับสารละลายกรด

จากปัญหาดังกล่าวจึงเกิดแนวความคิดที่จะทำการศึกษผลของการใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงมาเป็นวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างโดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นคือ 2, 4, 6 และ 8 โมลาร์เป็นสารละลายต่างในการกระตุ้นกำลัง โดยศึกษาผลของการพัฒนากำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนักอันเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกของมอร์ตาร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างที่ใช้เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษา การพัฒนากำลังอัด และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของ กรดซัลฟิวริกของมอร์ตาร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้น ด้วยต่างที่ใช้เถาถ่านหินแคลเซียมสูงโดยมีสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นกำลังโดยใช้ความ เข้มข้น 2, 4, 6 และ 8 โมลาร์

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

2.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้เถาถ่านหินที่ได้จากโรงงานผลิต กระแสไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง เป็นวัสดุ ประสานเพื่อผลิตวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างโดยไม่ใช้ ปูนซีเมนต์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น สารละลายต่างสำหรับกระตุ้นกำลัง

2.1.2 ส่วนผสมของมอร์ตาร์

สำหรับส่วนผสมของมอร์ตาร์กระตุ้นด้วยต่าง ใช้ วัสดุประสานจากเถาถ่านหินชนิดที่ได้จากโรงงาน โดยตรงและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการกระตุ้นกำลัง โดยมีความเข้มข้น 2, 4, 6 และ 8 โมลาร์ ดังแสดงในตารางที่ 1 มีอัตราส่วนวัสดุประสาน ต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อ วัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.4 และใช้สารลดน้ำพิเศษ ประเภท F (Superplasticizer Type F) เพื่อควบคุม ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ (flow) ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 105 – 115

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของมอร์ตาร์

Sample	Mix Proportion by Weight (g)					W/B	Flow (%)
	Fly ash	Sand	NaOH	water	SP*		
2M-HFA	100	275	3.2	39.5	0.8	0.4	109
4M-HFA	100	275	6.3	39.4	1.1	0.4	108
6M-HFA	100	275	9.5	39.4	1.2	0.4	108
8M-HFA	100	275	12.3	38.5	3.1	0.4	107

หมายเหตุ* SP มีน้ำในส่วนผสมร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

2.1.3 กำลังอัดของมอร์ตาร์

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ ใช้ตัวอย่าง มอร์ตาร์มาตรฐานที่มีขนาด 5x5x5 ซม.³ ตามมาตรฐาน ASTM C109 [7] ทำการถอดแบบภายหลังการหล่อ ตัวอย่าง 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำและนำไป ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 45 และ 60 วัน แต่ละ อายุการทดสอบใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ 3 ตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย

2.1.4 การต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริก

การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน เนื่องจากกรดซัลฟิวริก ทำการทดสอบโดยใช้ตัวอย่าง มอร์ตาร์ที่มีขนาด 5x5x5 ซม.³ โดยในแต่ละส่วนผสมใช้ จำนวน 3 ตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ทดสอบโดยนำ ตัวอย่างไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความ เข้มข้นเท่ากับร้อยละ 3 และทำการวัดค่าการสูญเสีย น้ำหนักของมอร์ตาร์หลังจากแช่ในสารละลายกรดเป็น ระยะเวลา 1, 3, 7, 14, 28, 42 และ 60 วัน โดย คำนวณหาร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักดังแสดงใน สมการที่ (1)

$$W_L = \frac{(W_A - W_B)}{W_A} \times 100 \% \quad (1)$$

โดยที่

W_L = ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ (%)

W_A = น้ำหนักของมอร์ตาร์ก่อนแช่ในสารละลายกรด ซัลฟิวริก (g)

W_B = น้ำหนักของมอร์ตาร์หลังแช่ในสารละลายกรด ซัลฟิวริกในแต่ละอายุการทดสอบ (g)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

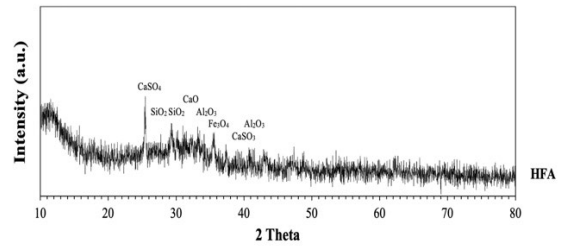
3.1 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสานและสมบัติทางสัณฐานวิทยาของวัสดุประสาน

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) แสดงดังตารางที่ 2 จากการทดสอบ พบว่า เถ้าถ่านหิน (FA) มีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) เหล็ก (Fe_2O_3) และแคลเซียม (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยเถ้าถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณผลรวมของออกไซด์หลัก (SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3) รวมกันเท่ากับร้อยละ 56.01 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [8] นอกจากนี้ยังพบว่า เถ้าถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยมีปริมาณออกไซด์ของแคลเซียมเท่ากับร้อยละ 29.41 ซึ่งมีค่ามากกว่าร้อยละ 10 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง (High-Calcium Fly Ash)

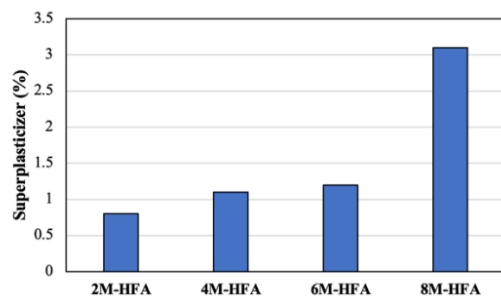
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

Oxide (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	LOI
Fly ash	24.25	13.43	18.34	29.56	6.46	0.6

รูปที่ 1 แสดงสมบัติทางสัณฐานวิทยาของเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction จากผลการวิเคราะห์ พบว่า เถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงที่ใช้เป็นวัสดุประสานในงานวิจัยนี้ โดยสามารถตรวจจับจุดยอด (peak) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งแสดงถึงส่วนประกอบทางแร่ในรูปแบบต่าง ๆ ของเถ้าถ่านหิน ได้แก่ ควอตซ์ (SiO_2), แคลเซียมออกไซด์ (CaO), อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3), เพอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และแอนไฮไดรต์ (CaSO_4) และสามารถพบสารประกอบที่ไม่เป็นผลึกอยู่ในช่วงระหว่าง $20 - 40^\circ 2\theta$



รูปที่ 1 XRD ของเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูง (High Calcium Fly Ash)



รูปที่ 2 ความต้องการสารลดน้ำของส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยต่าง

3.2 ความต้องการสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง

ผลของปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ของส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยต่างซึ่งใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2, 4, 6 และ 8 โมลาร์ แสดงไว้ดังรูปที่ 2 โดยแสดงปริมาณสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมเพื่อควบคุมการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 110 – 115 พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2 – 6 โมลาร์ มีปริมาณการใส่สารลดน้ำที่ใกล้เคียงกันที่ค่าร้อยละ 0.8 – 1.2 ในขณะที่ส่วนผสมที่ 8M-HFA ต้องใช้สารลดน้ำมากกว่าที่ร้อยละ 3.1 เพื่อให้ได้อัตราการไหลแผ่ที่กำหนด จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมของมอร์ตาร์

ที่มีความเข้มข้นมากขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณมากขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นส่งผลการชะละลายของเถาถ่านหินซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการทำปฏิกิริยามากขึ้น โดยมอร์ตาร์ที่ได้จะมีความข้นเหนียวของเนื้อสูงมาก ส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณสารลดน้ำในปริมาณมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อสารตั้งต้นมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่สูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ N. Makul and B. Chatveera [9]

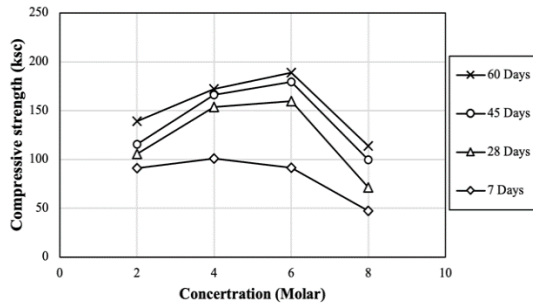
3.3 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทำจากเถาถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยค่าที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2, 4, 6 และ 8 โมลาร์ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทำจากเถาถ่านหินกระตุ้นด้วยค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่มากขึ้นเช่นเดียวกับมอร์ตาร์ที่ใช้นูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผลิตขึ้นจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยค่าเหล่านั้นมีกระบวนการพัฒนากำลังอัดที่แตกต่างจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดจากปูนซีเมนต์ โดย E. Gomaa et al. [10] และ F. Winnefeld et al. [11] ได้อธิบายไว้ว่า ผลผลิตของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยค่า เกิดจากการชะละลายของวัสดุตั้งต้นโดยสารละลายต่าง ทำให้เกิดการละลายของซิลิกอน อลูมินา และแคลเซียมซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุตั้งต้น (เถาถ่านหิน) จากนั้นเกิดการรวมตัวกันกลายเป็นโครงสร้างของแคลเซียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) และ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานและสามารถรับกำลังได้คล้ายกับผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากนี้ ปริมาณของแคลเซียมที่สูงของสารตั้งต้นทำให้เกิดโครงสร้างของแคลเซียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรตที่มากขึ้น [12], [13]

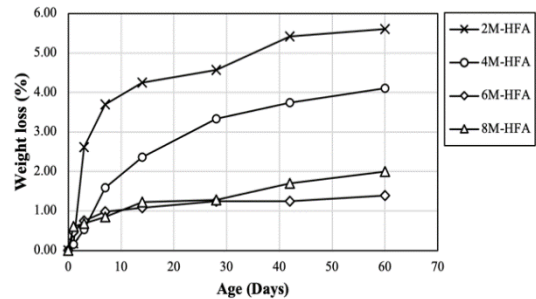
ตารางที่ 3 กำลังอัดของมอร์ตาร์

Sample	Compressive strength (ksc)			
	7 days	28 days	45 days	60 days
2M-HFA	91	106	116	139
4M-HFA	101	154	166	172
6M-HFA	91	160	179	189
8M-HFA	47	71	100	114

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อเถาถ่านหินแคลเซียมสูงพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ต่างกันซึ่งสังเกตได้ชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 3 จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจาก 2 โมลาร์ ถึง 6 โมลาร์ ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทำจากเถาถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยค่าที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะระหว่างอายุ 28 ถึง 60 วัน อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นถึง 8 โมลาร์กลับพบว่ามอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ระหว่าง 2 ถึง 6 โมลาร์ เนื่องจากมอร์ตาร์ 8M-HFA ดังกล่าวอาจมีปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมมากเกินไปทำให้กำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลง โดยปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดสารประกอบอลูมิโนซิลิเกตในรูปที่เป็นผลึกมากกว่าในรูปแบบอสัณฐาน [14], [15] จากการผลศึกษาพบว่า มอร์ตาร์ที่ใช้เถาถ่านหินแคลเซียมสูงที่ได้จากโรงงานโดยตรงเป็นวัสดุประสานและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 โมลาร์ สามารถพัฒนากำลังได้สูงสุด โดยมอร์ตาร์ 6M-HFA สามารถพัฒนากำลังอัดได้ถึง 189 กก/ซม² ที่อายุ 60 วัน โดยสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานได้โดยไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และกำลังอัดมอร์ตาร์



รูปที่ 4 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์จากการกักกร่อนเนื่องจากการดซัลฟิวริก

3.4 การต้านทานการกักกร่อนเนื่องจากการดซัลฟิวริก

ผลการทดสอบการต้านทานการกักกร่อนเนื่องจากการดซัลฟิวริกของมอร์ตาร์ที่ใช้เถาถ่านหินแคลเซียมสูงและกระตุ้นกำลังด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แสดงไว้ในรูปที่ 4 โดยเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ซึ่งแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกจากการทดสอบพบว่า มอร์ตาร์ 2M-HFA และ 4M-HFA มีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกักกร่อนเนื่องจากการดมากกว่า มอร์ตาร์ 6M-HFA และ 8M-HFA โดยมอร์ตาร์ 2M-HFA มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 5.60 หลังจากแช่เป็นเวลา 56 วัน ส่วนมอร์ตาร์ 4M-HFA มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 4.11 หลังจากแช่เป็นเวลา 56 วัน ในขณะที่มอร์ตาร์ที่ใช้เถาถ่านหินที่มีแคลเซียมสูงและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์กระตุ้นกำลังที่มีความเข้มข้น 6 ถึง 8 โมลาร์ มีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการกักกร่อนของกรดซัลฟิวริกลดลงอย่างมาก โดยมอร์ตาร์ 6M-HFA และ 8M-HFA มีค่าการสูญเสียน้ำหนัก หลังจากแช่เป็นเวลา 56 วัน เท่ากับร้อยละ 1.39 และ 0.96 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sindhunata และคณะ [16] พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นส่งผลให้อัตราการชะละลายของซิลิกาและอลูมินาสูงขึ้นและมีแนวโน้มที่จะเกิดเป็นโครงสร้างของ

แคลเซียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) ที่เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลต่อการต้านทานการกักกร่อนที่มากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของกำลังอัดของมอร์ตาร์จากรูปที่ 3 และความต้านทานการกักกร่อนของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ จากรูปที่ 4 ผลการทดสอบพบว่า ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมอร์ตาร์ที่กำลังอัดเพิ่มขึ้น จะมีความแน่นของโครงสร้างของเนื้อซีเมนต์เฟสที่มากขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการต้านทานการกักกร่อนที่สูงขึ้น [17]

เมื่อเปรียบเทียบผลของความต้านทานการกักกร่อนเนื่องจากการดซัลฟิวริกของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างและมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ พบว่ามอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานจากเถาถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยต่างมีค่าการสูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 1.39-5.60 ที่ระยะเวลาการแช่กรดซัลฟิวริก 56 วัน ส่วนซีเมนต์มอร์ตาร์ (OPC) มีค่าการสูญเสีย เท่ากับร้อยละ 46.08 น้ำหนักที่ระยะเวลาการแช่กรดซัลฟิวริก 60 วัน [18] แสดงให้เห็นว่ามอร์ตาร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างมีความสามารถในการต้านทานการกักกร่อนเนื่องจากการดซัลฟิวริกได้ดีกว่า เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทำให้เกิดสารประกอบของ

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ถูกชะละลายได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับสารละลายกรด แตกต่างจากผลผลิตของมอร์ตาร์ที่ทำวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่าง คือ สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) ซึ่งสามารถต้านทานการชะละลายได้ดีกว่า [6], [14], [18]

4. สรุป

จากการศึกษาผลของการพัฒนากำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟิวริกของมอร์ตาร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างที่ใช้เถาถ่านหินแคลเซียมสูงสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 ความต้องการสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมของมอร์ตาร์กระตุ้นด้วยต่างที่ทำจากเถาถ่านหินแคลเซียมสูงมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นสารละลายต่างในการกระตุ้นกำลัง

4.2 จากการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ทำจากเถาถ่านหินแคลเซียมสูงกระตุ้นด้วยต่างพบว่า ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ทำจากเถาถ่านหินแคลเซียมสูงจากโรงงานโดยตรงเป็นวัสดุประสานและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 โมลาร์ สามารถพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ได้ดีที่สุด โดยสามารถรับกำลังอัดได้ถึง 160 กก/ซม² ที่อายุ 28 วัน และสามารถพัฒนากำลังอัดได้ถึง 189 กก/ซม² ที่อายุ 60 วัน

4.3 จากการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์เมื่อนำไปแช่กรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 พบว่าส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 6M มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด โดยมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 1.39 ที่อายุการแช่กรดซัลฟิวริกเป็นเวลา 60 วัน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ภายใต้เงินงบประมาณเงินรายได้ พ.ศ.2563

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. J. Nadoushan and A. A. Ramezaniapour, "The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers," *Construction and Building Materials*, vol. 111, pp. 337–347, May 2016.
- [2] M. Najimi and N. Ghafoori, "Engineering properties of natural pozzolan/slag based alkali-activated concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 208, pp. 46–62, May 2019.
- [3] F. Puertas, S. Martínez-Ramírez, S. Alonso and T. Vazquez, "Alkali-activated flyash/slag cements: Strength behaviour and hydration products," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 10, pp. 1625–1632, Oct. 2000.
- [4] P.K. Mehta, "Global concrete industry sustainability," *Concrete International*, vol. 31, no. 2 pp. 45–48, 2009.
- [5] A. Fernández-Jiménez and A. Palomo, "Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements," *Fuel*, vol. 82, no. 18, pp. 2259–2265, Dec. 2003.
- [6] T. Bakharev, "Resistance of geopolymer materials to acid attack," *Cement*

- and concrete research, vol. 35, no. 4, pp. 658–670, Apr. 2005.
- [7] ASTM C109, “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens),” *American Society for Testing and Materials*, 2017.
- [8] ASTM C618, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,” *American Society for Testing and Materials*, 2017.
- [9] N. Makul and B. Chatveera, “Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar: Influence of Fly Ash Sources and Sodium Silicate (Na_2SiO_3) / Sodium Hydroxide (NaOH) Ratios,” *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 36, no. 1, pp. 99–124, Jan.–Mar. 2013.
- [10] E. Gomaa, S. Sargon, C. Kashosi and M. ElGawady, “Fresh properties and compressive strength of high calcium alkali activated fly ash mortar,” *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 29, no. 4, pp. 356–364, Oct. 2017.
- [11] F. Winnefeld, A. Leemann, M. Lucuk, P. Svoboda and M. Neuroth, “Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials,” *Construction and building materials*, vol. 24, no. 6, pp. 1086–1093, Jun. 2010.
- [12] S. Dueramae, W. Tangchirapat, P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, “Influence of activation methods on strength and chloride resistance of concrete using calcium carbide residue–fly ash mixture as a new binder,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 4, p. 04016265, Apr. 2017.
- [13] S. Hanjitsuwan, B. Injorhor, T. Phoonngernkham, N. Damrongwiriyanupap, L.Y. Li, P. Sukontasukkul and P. Chindaprasirt, “Drying shrinkage, strength and microstructure of alkali-activated high-calcium fly ash using FGD-gypsum and dolomite as expansive additive,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 114, p. 103760, Nov. 2020.
- [14] M. Eiamwijit, K. Pachana, S. Kaewpirom, U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, “Comparative study on morphology of ground sub-bituminous FBC fly ash geopolymeric material,” *Advanced Powder Technology*, vol. 26, pp. 1053–1057, Apr. 2015.
- [15] Y. Rifaai, A. Yahia, A. Mostafa, S. Aggoun and E.H. Kadri, “Rheology of fly ash - based geopolymer: Effect of NaOH concentration,” *Construction and Building Materials*, vol. 223, pp. 583–594, Oct. 2019.
- [16] Sindhunata, J. L. Provis, G.C. Lukey, H. Xu and J.S. van Deventer, “Structural evolution of fly ash based geopolymers in alkaline environments,” *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 47, no. 9, pp. 2991–2999, May 2008.
- [17] S. Sasui, G. Kim, J. Nam, A. van Riessen and M. Hadzima-Nyarko, “Effects of waste glass

as a sand replacement on the strength and durability of fly ash/GGBS based alkali activated mortar,” *Ceramics International*, vol. 47, no. 15, pp. 21175–21196, Aug. 2021.

[18] C. Eakpanich, “A Study of Sulfuric Acid Attack on Mortar Containing Pozzolan,” M.S. thesis, Dept. Civil Eng., King Mongkut’s University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2003.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

The Study of Optimum Factors in Gold Plating Process to Enhance OTOP Knife Products for Ban Mai Knife Forgers Village, Lom Sak District, Phetchabun

Suwimon Thiakthum^{1*} Tannachart Wantang² and Thongchai Khrueaphue³

^{1,2} Program in Production Engineering and Management, Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University

³ Program in Production Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University

¹⁻³ 83 Moo 11, Saraburi-Lom Sak Road, Sadiang Subdistrict, Mueang District, Phetchabun Province, 67000 Thailand

Received 27 April 2021; Revised 29 August 2021; Accepted 16 September 2021

Abstract

This research aimed to study the optimum factors affecting the quality of gold plating process to enhance OTOP knife products of Ban Mai knife forgers village. This study focused on application of AISI 5160 steel and the 24k gold plating process. In the experiment, three samples of plating currents were observed; 10, 12, and 14 volts, each at 30, 60, 90, 120, 150 seconds, and 180 seconds, respectively. The study found that applying the electric currents in gold plating at 12 volts for 120 seconds gave the best results for the gold color and thickness, by giving the thickness of the gold surface at 33.82 micron and the color value between $L^*=88.72$, $a^*=4.45$ and $b^*=78.58$. Moreover, the gold dispersion was consistent throughout the workpiece. From applying the electric currents in gold plating at 10 volts, it lessened the thickness of the gold plating which made the gold plating look uneven. From applying the electric currents in gold plating at 14 volts, it increased the thickness of the gold plating which resulted in a dull or burned finish from over-plating. In comparison, the cost of the knife before plating with gold costs only 30 baht per piece while the cost of the knife after plating with gold costs 99 baht per piece. In conclusion, the daily sales of a product increase from 50-60 items per day to 60-75 items per day, which also resulted in increased revenue and profitability from 1,500-1,800 baht per day to 5,940-7,425 baht per day on average.

Keywords : Gold Plating Process; OTOP Knife Products; Ban Mai Knife Forgers Village

** Corresponding Author. Tel.: +666 2495 1536, E-mail Address: Suwimon.thi@pcru.ac.th*

1. Introduction

Phetchabun province is situated in the lower north of the country. The area is mountainous with cool weather and lowland with slightly hot weather, it is suitable for various forms of cultivation such as field crops, horticulture crops, and also tourism agriculture, which is the main occupation of the population in the province [1]. However, another career that can generate income was natural and cultural tourism which is a learning center and continues to preserve the way of life of the previous generation in which tourists often buy stuff for using or as souvenirs to their home [2].

Ban Mai Knife Forgers Village (Tai Lom Knife), Lom Sak district, Phetchabun province has been the traditional forging knives group since their ancestors, for example, sharp knife, pocket knife, hiking knife, kitchen knife, cleaver knife, machete, pickaxe, hoe or rice sickle and other made to order knife which makes of medium carbon steel. Currently, those knives have been registered as the OTOP knife products of the province. Originally, they did not gather as a group, during an economic depression, they had been recommended by the government sector in gathering a knife forgers group to increase household's income apart from their agriculture time. The current members are around 70 people and the distribution is both in Phetchabun and other tourism sites including other province shops all over the country. The price is from 30 to 300 baht, depending on the type and size

of the knives. However, there are many new knife forgers groups in the current time, the market competition is increasing. From the field trip, it was found that the knife forging group needs to develop new products for creating a distinctive point, expanding marketing channels, increasing the value of the product, and being able to access every group of all ages [3]. Phetchabun is one of the provinces which has various tourist attractions as well as other tourist attractions in Thailand. In these attractions, people of every age group who like traveling for food, atmosphere and shopping for souvenirs [4], [5].

Consequently, the researcher has an idea in developing OTOP knife products of Ban Mai Knife Forgers Village (Tai Lom Knife) by plating with gold to enhance the products to be a souvenir in tourist attractions [3] and add the value of products. The gold plating process is to enhance exquisiteness to various products and to upgrade the quality of products as well since gold is always luster and does not oxidize with oxygen, then it does not tarnish when exposed to air and also does not rust. Gold is therefore popular to be applied to cover materials or plating products that require more attractiveness [2]. This research is plating knives with 24k gold or 99.99% gold to comparative study the suitable factors in gold plating with medium carbon steel material and transfer knowledge including the technique of plating knives with gold to the knife forging group.

2. Research Methodology

2.1 Material and Variable in the Experiment

This study applied hot-rolled steel or spring steel AISI 5160 grade with carbon around 0.55-0.65 %C [6]. The workpiece was prepared by forging a knife length of 60 mm, a width of 10 mm, and a thickness of the edge 3 mm down to the edge of the knife as **Fig. 1**. Hardening for prevents rust and eases to the gold plating process. After that, it was polished with water sandpaper and scrubbed with a flannel cloth, along with 5 micron alumina powder, to get a shiny surface and apply the coating material or plating with 24k gold or 99.99% gold since it was popular in plating that gave a fine-looking surface and was not easily transformed.



Fig. 1. Work-piece preparation of Tai Lom Knife

The variables in this experiment was the amount of electric current used for gold plating (voltage difference) in direct current (DC) at 10, 12, and 14 volts, and the experiment time in the plating was at 30 seconds, 60 seconds, 90 seconds, 120 seconds, 150 seconds and 180 seconds per experiment and repeated each

variable in 3 experiments [7]. After that, the gold surface thickness was examined with an optical microscope (OM) with a workpiece dimensioning program or the built-in Measure with a line command and examined the dispersion and color of gold from experts.

2.2 Methodology

The study of optimum factors in the gold plating process to enhance OTOP knife products for Ban Mai Knife Forgers Village. The researcher has designed an experiment material with safety and advised the gold plating performer to wear personal protective equipment (PPE) every time [7]. The gold plating process was one type of electroplating process in which electrical current was passed onto a workpiece in an electrolyte solution then causes the positive ion (Anode) in which a lure gets oxidation and runs to the cathode charge at the workpiece [8], where the reduction reaction was occurred and caused the thin layer of metal from the lure to be coated on the surface of the workpiece which the gold plating process consisted of the following six steps; [3].

Step 1: electroplating set up, prepare a power transformer with 30 amperes that can adjust the compression of 10, 12, and 14 volts and connect the positive electrode to the lure as well as the negative electrode to the workpiece [8], [9]. This study applied the lure in the alkaline copper pond and copper material with 30x40x10 mm in dimensions was applied and the lure in nickel pond, nickel-type material was applied with

dimensions of 30x40x10 mm and the lure in the gold pond, a stainless steel sheet with dimensions of 30x30x3 mm was applied [10].

Step 2: workpiece surface preparation, the workpiece was washed with chemical sodium cyanide to clean the dirt that adheres on the workpiece such as green rust stains. With these stains, it can be cause the problem of not attaching to the plating.

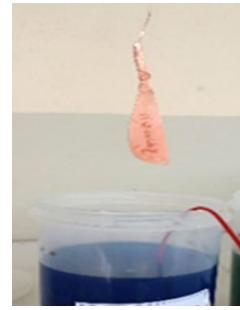
Step 3: alkaline copper plating, the workpiece was plated in an alkaline copper pond. It contains 23 grams of sodium cyanide, 15 grams of copper cyanide, 15 grams of sodium carbonate, mixed with 1 liter of clean water to make the gold plated a thick layer of coating, shiny and long-lasting, does not deteriorate, as shown in **Fig. 2(a)**.

Step 4: acid copper plating, the workpiece was plated in an acid copper pond in which contains 250 grams of copper sulfate mixed with 1 liter of clean water mixed with 98% concentrated sulfuric acid 30 grams and mixed with Copper brighter 3 grams to make the workpiece to be polished. Do not add water to concentrated sulfuric acid as a dangerous splashing of acid will be occur. The color of the acid copper plating solution is blue as shown in **Fig. 2(b)**.

Step 5: nickel plating, the workpiece is plated in a nickel pond. It contains 250 grams of Nickel sulfate, 60 grams of Nickel chloride, 40 grams of Boric acid, 10 grams of Nickel additive, and Nickel brighter 10 grams works to contribute the plated parts a shiny luster. The color of the nickel plating solution is green, as shown in **Fig. 2(c)**.



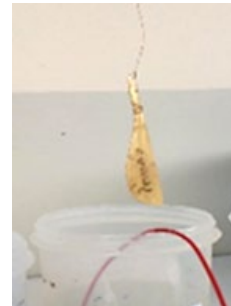
(a) Alkaline copper



(b) Acid copper



(c) Nickel



(d) 24k gold

Fig. 2. Inspection of the microstructure of the gold plating process

Step 6: 24K gold plating, the workpiece is plated in a flash 24k gold pond and 250 grams of clean water to make the plated workpiece become a gold color. The solution has a clear white color as shown in **Fig. 2(d)**, and washed with an anti-tarnishing liquid in which its function was to coat the plating workpiece for long-lasting durability. After finishing the gold plating process, the workpiece was waiting for the knife handle to complete the package.

3. Results and Discussion

3.1 Gold plated knife surface inspection

The Inspection of the knife surface after gold plating is the first process of colorimeter analysis. (CIE L*a*b* system).

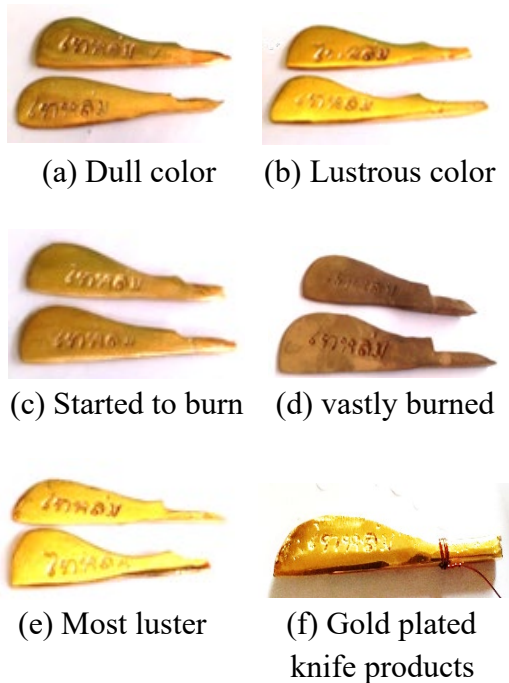


Fig. 3. The characteristics of the knife's surface of the gold plating process

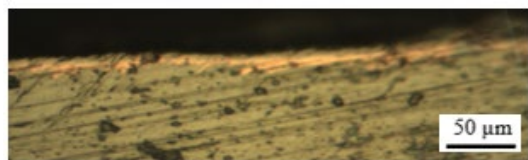
From the examination, it was found that the surface of the knife which was gold plated, as shown in **Fig. 3(a)**, had a faded gold color due to the low electricity consumption and less time for gold plating, the color value is between $L^*=63.58$ $a^*=14.31$ $b^*=61.84$. causing the thickness of the gold to be uneven throughout the workpiece [11]. From the examination, it was found that the knife's back area had a thinner gold coating than the knife's sharp edge area. From **Fig. 3(b)**, a shiny golden surface has appeared but there is no consistency throughout the workpiece since the time for plating gold is quite little [8], the color value is between $L^*=78.95$ $a^*=15.75$ $b^*=75.53$. From **Fig. 3(c)**, a gold color surface has started to burn, the color value is between $L^*=50.82$

$a^*=27.46$ $b^*=56.91$, and **Fig. 3(d)**, a gold color surface was vastly burned due to the excessive electrical current and time in the plating. It caused the gold surface to look tarnished and not shiny [10], [11], the color value is between $L^*=33.76$ $a^*=17.35$ $b^*=28.15$. From **Fig. 3(e)**, a shiny gold which has been the best factor in gold plating since the surface of the knife from the gold plating is consistent, and shines throughout the workpiece, the color value is between $L^*=88.72$ $a^*=4.45$ $b^*=78.58$. From **Fig. 3(f)**, was a ready-to-sell gold-plated knife [3], [9]. However, from the experiment, there was no porosity or other defects found were found in the area of gold.

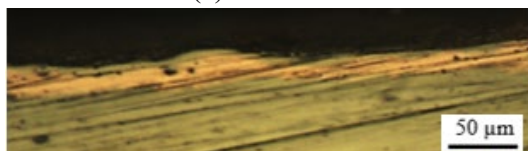
3.2 Microstructure inspection

Microstructure inspection with Optical Microscope (OM) is examined to determine the deep penetration characteristics of the gold plating which affects the color of the gold surface, dispersion, and consistency of the gold skin. The depth of penetration was measured using an ocular micrometer, compared with the stage micrometer scale, which was measured 3 times and averaged.

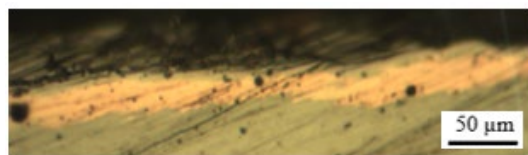
From the examination, it was found that from **Fig. 4(a)**, the deep penetration with faded skin color which was approximately 12.06 microns and **Fig. 4(b)**, a deep penetration with a shiny surface color which has a deep penetration of approximately 22.87 microns due to the use of slightly little electric current and time of plating [10] and from the observation, the deep



(a) Dull color



(b) Lustrous color



(c) Most luster



(d) Started to burn



(e) Extremely burn

Fig. 4. The inspection of the microstructure of the gold plating process

penetration is uneven throughout the workpiece. From **Fig. 4(c)**, the deep penetration characteristics with shiny surface color with approximately 33.82 microns, which is the best variable of the deep penetration from gold plating. The deep penetration was consistent and the color is fine-looking throughout the work.

From **Fig. 4(d)**, the deep penetration with the color of the skin starting to burn which was approximately

39.19 microns and **Fig. 4(e)**, the deep penetration with intense burnt color which was about 44.52 microns, it was found that the penetration of the gold deeper than other experimental factors, but the appearance of the gold was burnt from the use of electricity and time in plating for a long time, causing gold's dull skin and unbeauty [11]. Generally, the thickness of jewelry gold plating is 2.5-5 microns, but the gold plating for this research is about 12.06-44.52 microns because the material is spring steel and has a rougher surface preparation than gold plating decorations. Therefore, it can penetrate more deeply into the material.

3.3 Results from the study of factors from applied electric currents comparing with plating time

The important factors in the gold plating process were electric current and plating time which affected the reduction reaction causing a thin layer of metal from the lure to be coated on the surface of the workpiece. It also affected the thickness of the gold-coated on the surface of the workpiece, the dispersion of gold over the surface, and also the color of the gold. From the results of the experiment, the researcher has separated the color of the gold material into 5 levels, namely, faded color, that is the coating of gold on the surface of the work is less and uneven. Gloss color was a coating of gold on the workpiece surface which was fair and uneven throughout the workpiece. The shiny color was the coating of gold material on

the workpiece surface that is sensible and consistent throughout the workpiece. The starting-to-burn color was the coating of gold material that was consistently distributed throughout the workpiece, but the thickness of the gold is beyond the

standard. The over-burnt color was the coating of gold on the workpiece that was consistent, but the thickness of the gold is extremely high, causing burns [12] since the use of time and electric current in the plating was excessive.

Table 1 Result of the use of electric current for gold plating at 10 volts

Experiment time	Gold surface thickness (Micron)	Uniform distribution of gold (Percent)	Gold luster (Percent)
30 seconds	09.89	29	Dull color
60 seconds	12.06	37	Dull color
90 seconds	16.19	53	Dull color
120 seconds	19.01	68	Dull color
150 seconds	21.33	80	Lustrous color
180 seconds	26.15	92	Lustrous color

From **Table 1**, as a result of the use of electric current for gold plating at 10 volts, it was found that the gold plating time to achieve the most lustrous color and thickness was 180 seconds, the thickness of gold is 26.15 microns. Due to its low electricity consumption, the gold plating process takes much time for gold plating as well [11]. From experimental

factors, it was found that the dispersion of gold was not consistent throughout the workpiece, which is 92 percent. However, the experiment showed that less plating time will affect the thickness of the gold surface and the dispersion of gold material as well [12], which affected the dull color of the gold.

Table 2 Result of the use of the electric current in gold plating at 12 volts

Experiment time	Gold surface thickness (Micron)	Uniform distribution of gold (Percent)	Gold luster (Percent)
30 seconds	17.51	59	Dull color
60 seconds	22.87	84	Lustrous color
90 seconds	26.96	93	Lustrous color
120 seconds	33.82	100	Most luster
150 seconds	39.61	100	Started to burn
180 seconds	43.31	100	Extremely burn

From **Table 2**, as a result of the use of the electric current in gold plating at

12 volts in gold plating, it was found that the proper gold plating time for luster and

thickness was 120 seconds and the thickness of the gold surface is 33.82 microns. From the experimental factors, it was found that the dispersion of gold was evenly over the workpiece at 100 percent, which was considered as the best result of the experimental factor and also found that at the time of plating in more than 120 seconds the appearance of

gold began to burn and it will be burnt intensely at 43.31 microns due to the excessive reduction reacting time [7], [9]. Besides, from the experiment, it can be seen that the less amount of time the gold plate is on, the more it affects the thickness of the gold surface, the dispersion, the skin penetration of gold [11], [12] and the dull color of the gold.

Table 3 Result of the use of the electric current in gold plating at 14 volts

Experiment time	Gold surface thickness (Micron)	Uniform distribution of gold (Percent)	Gold luster (Percent)
30 seconds	35.63	100	Started to burn
60 seconds	39.19	100	Started to burn
90 seconds	44.52	100	Extremely burn
120 seconds	49.14	100	Extremely burn

From **Table 3**, as a result of the use of the electric current in gold plating at 14 volts, it was found that the gold surface in plating in all experimental factors started to burn and extremely burn and this factor had the maximum experiment time by taking 120 seconds due to the longer time would cause more burns to the gold surface. It was found that the gold surface from plating began to burn at the thickness of the gold surface at 35.63 microns onwards [11], [12] which the burnt surface makes it look dull and cannot be sold [7].

3.4 Results from transferring knowledge in plating technique with gold

The knowledge transfer and knife plating technique with gold to the Ban Mai Knife Forgers Village of Lom Sak district, Phetchabun province had 25

participants with experiences in Tai Lom knife plating from 5-8 years. The evaluation was focused on 2 aspects of satisfaction evaluation [3] shown in **Table 4**, it found that overall satisfaction was at 4.39, the standard deviation was 0.66 which was at a high level. When analyzed in each aspect, it was found that the highest average score was satisfaction which was 4.46, the standard deviation was 0.64, which was in the high level. When assessed in each question, it was found that the item with the highest average was the researcher having easy-to-understand techniques and methods for transferring knowledge that mean was 4.61, the standard deviation of 0.65 which was in the highest level. However, when summarizing the overall assessment of knowledge transfer and gold knife plating techniques, it was

found that no item was lower than the specified Key Results (KRs) criteria of the project [1] and shows that OTOP knife plating products with gold for Ban

Mai Knife Forgers Village can significantly meet the needs of the target audience.

Table 4 Satisfaction results from knowledge transfer in the gold plating process

Assessment details	($\bar{x}$)	(S.D.)	Results
The process of knowledge transfer			
Researchers have easy-to-understand techniques and methods for transferring knowledge.	4.61	0.65	Very good
The researcher can ask and answer questions.	4.11	0.66	High level
Researchers use a variety of media to transfer knowledge.	4.32	0.76	High level
The researcher used the time for training and demonstration appropriately.	4.25	0.62	High level
Average	4.32	0.68	High level
Satisfaction			
Satisfaction with the shape of the product.	4.42	0.5	High level
Used a product of gold plated knives to be used to increase productivity.	4.46	0.61	High level
Used a knife product with gold plating to add value.	4.36	0.83	High level
The product has a beautiful golden color.	4.52	0.61	Very good
The product is durable and can be used for a long time. (Gold does not peel off)	4.4	0.61	High level
The product price is reasonable.	4.5	0.65	High level
It is modern, novel, different from the original product.	4.58	0.67	Very good
Average	4.46	0.64	High level
Total average	4.39	0.66	High level

4. Conclusion

The objective of this research is to increase productivity and create product value from the gold plating process to enhance the OTOP knife products for Ban Mai Knife Forgers Village. The best experiment factor was the electric current in gold plating at 12 volts and the plating time in making shiny color and proper thickness was 120 seconds, the thickness of the gold surface was at 33.82 microns and the dispersion of gold was consistent

at 100%. However, when transferring gold plating knowledge to the knife forging group and conducting products to increase productivity and add value to the products, it was found that from the original product of Tai Lom knife before plating, the selling price is 30 baht per piece, after the product is developed, it can be sold for 99 baht per piece. Moreover, tourists have tended to buy souvenirs in a large amount per time, causing to increase the production

capacity in both the tourist season and the normal season from about 50-60 pieces per day on average to about 60-75 pieces per day on average and also gain the average income from 1,500-1,800 baht per day to 5,940-7,425 baht per day on average. The results from knowledge transfer in gold plating techniques showed that the average satisfaction was 4.39 and the standard deviation was 0.66, the score was at a high level. In general, there are no items that fall below the criteria from the project key results indicators.

5. Acknowledgement

This research was funded by a research grant from the Institute of Research and Development, Phetchabun Rajabhat University, and support for tools and equipment in research from the Department of Production Engineering and Management, Department of Production Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology. I would like to thank the Ban Mai Knife Forgers Village, Lom Sak District, Phetchabun Province for providing information to complete this research and applying knife plating with gold as a souvenir for economic value enhancement. Finally, the research team would like to thank everyone for giving advice and support until this research was accomplished.

6. References

[1] S. Srisawad, T. Khrueaphue and S. Theakthum, "Design and Fabrication of Tobacco Leaf-stripping Machine

to Enhance Economic Production of Farmers in Phetchabun Province," *SNRU Journal of Science and Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 198-206, 2016.

- [2] N. Prayalaw and L. Manmart, "Factors affecting consumers' purchasing decision in food product of one Tambon one Product project produced in Khon Kaen province," *KKU Research Journal (Graduate Studies) Humanities and Social Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 38-51, 2015.
- [3] S. Theakthum and T. Wantang, "Value Added OTOP Products of Tamarind Metal Souvenir Keychains with Anodizing," in *Proceeding of 55th Kasetsart University Annual Conference, Bangkok: Kasetsart University*, 2017.
- [4] P. Inkong, "Development of the northern souvenir product in promoting creative economic tourism: A case study of Yao tribal group," *Journal of fine arts research and applied arts*, vol. 1, no. 2, pp. 21-41, 2014.
- [5] U. Inprasit, "Tourist Satisfaction of the Development of Antique Silver Jewelry Styles," *Si Satchanalai District, Sukhothai. Parichart Journal*, vol. 31, no. 3, pp. 225-236, 2018.
- [6] P. Pitsuwan, P. Suwan, Y. Sengty and P. Kongsong, "Influence of Catalyst on Surface Hardening of Low Carbon Steel by Pack Carburizing with Mangrove Charcoal Powder," *Journal of Industrial Technology Ubon*

- Ratchathani Rajabhat University*, vol. 8, no. 2, pp. 1-12, 2017.
- [7] O. Tetsuya, O. Yutaka, S. Junji and K. Masaru, "Development of new electrolytic and electroless gold plating processes for electronics applications," *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 7, no. 5, pp. 425-437, 2006.
- [8] V. Vaghela, N.K. Shah and V.V. Limaye, "Optimization of various parameters in gold electrodeposition for microelectronics," *International Journal of Technical Research and Applications*, vol. 5, no. 3, pp. 129-131, 2017.
- [9] G.K. Mishra and K.G. Paramguru, "Surface modification with copper by electroless deposition technique: An overview," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 4, no. 6, pp. 87-99, 2010.
- [10] F. Hanna, Z.A. Hamid and A.A. Aal, "Controlling Factors Affecting the Stability and Rate of Electroless Copper Plating," *Materials Letters*, vol. 58, no. 1-2, pp. 104-109, 2003.
- [11] M. Sun, P. Michael, A. Marjorie and E. Natishan, "A comparative assessment of gold plating thickness required for stationary electrical contacts," *Microelectronics Journal*, vol. 30, no. 1999, pp. 217-222, 2000.
- [12] S. Malanusorn, "Determination of gold selective plating thickness effecting factor for high speed plating productivity improvement," Master of engineering thesis Faculty of engineering, Thammasat University, Thailand, 2004.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การหาปริมาณการสั่งซื้อน้ำมันเชื้อเพลิงอย่างประหยัด: กรณีศึกษาบริษัท รับขนส่งสินค้า

พัชรา ศรีพระบุ¹ และ เชษฐา ชำนาญหล่อ^{2*}

¹ ภาควิชาวิทยาการเดินเรือและโลจิสติกส์ทางทะเล คณะพาณิชยศาสตร์บริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

^{1, 2} 199 หมู่ 6 ถนนสุขุมวิท ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20230

รับบทความ 10 พฤษภาคม 2564 แก้ไขบทความ 30 สิงหาคม 2564 ตอรับบทความ 20 กันยายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการบริหารวัตถุดิบประเภทน้ำมันเชื้อเพลิงคงคลังของบริษัทกรณีศึกษาซึ่งเป็นผู้รับขนส่งสินค้ารายหนึ่งในจังหวัดชลบุรี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด (EOQ) และการกำหนดจุดสั่งซื้อใหม่ (ROP) ที่ทำให้ต้นทุนรวมการจัดการต่ำที่สุด เทคนิคการพยากรณ์ 5 วิธี ได้รับการพิจารณาเพื่อทำนายความต้องการในอนาคต ซึ่งพบว่า วิธีแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลาเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดโดยให้ค่าผิดพลาดน้อยที่สุด ผลที่ได้จากการทำการพยากรณ์ความต้องการ การสั่งซื้ออย่างประหยัดได้เท่ากับ 16,308.89 ลิตรต่อครั้ง ต้นทุนรวมของการจัดการถึงเก็บน้ำมันเท่ากับ 17,287.43 บาท และมีจำนวนการสั่งซื้อประมาณ 19 ครั้งต่อปี นอกจากนี้ การศึกษาความไวของปัจจัยด้านปริมาณความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ส่งผลต่อต้นทุนการจัดการถึงน้ำมันเชื้อเพลิง ได้รับการพิจารณาในบทความนี้ ซึ่งพบว่า ปริมาณความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 21 มีผลต่อทำให้ต้นทุนรวมในการบริหารจัดการเพิ่มขึ้น 1,728.74 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 10 ดังนั้นการสั่งซื้ออย่างประหยัดสามารถลดต้นทุนรวมได้ 1,295.97 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 6.85 หากบริษัทนำผลการศึกษาไปปรับปรุงกระบวนการสั่งซื้อ จะทำให้สามารถคาดการณ์ปริมาณการสั่งซื้อได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

คำสำคัญ : การพยากรณ์; ความไว; น้ำมันเชื้อเพลิง; การสั่งซื้ออย่างประหยัด

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1061 1748, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: chettha@eng.src.ku.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Economic Order-quantity Determination for Fuel Demand: a Case Study of a Freight Forwarder

Phatchara Sriphrabu¹ and Chettha Chamnanlor^{2*}

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

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

^{1,2} 199 Moo 6, Sukhumvit Road, Tung Sukla, Sri Racha, Chon Buri 20230

Received 10 May 2021; Revised 30 August 2021; Accepted 20 September 2021

Abstract

This research focuses on the raw-material management such as fuel of a case study company being a freight forwarder in Chonburi province. The objective is to determine the economic order quantity (EOQ) and the reorder point (ROP) that minimize the total cost of handling. Five forecasting techniques are investigated to predict the future demand, and it was found that the time series decomposition was the most suitable method with the least error. At the result of demand forecasting, the economic order quantity is 16,308.89 liters per time, the total cost of handling the fuel tank is 17,287.43 baht, and there are ordering around 19 times per year. In addition, the sensitivity study on demand factors affecting the cost of fuel tank management are also considered in this paper. It was found that 21% of the increased fuel demand brings the total handling cost is 1728.74 baht or increasing 10%. Therefore, ordering economically can reduce the total cost of 1,295.97 baht, or 6.85%. If the company brings the studied results to improve the ordering process, it will be able to forecast the order quantity more appropriately and effectively.

Keywords : Forecasting; Sensitivity; Fuel Oil; Economic Order Quantity

** Corresponding Author. Tel.: +668 1061 1748, E-mail Address: chettha@eng.src.ku.ac.th*

1. บทนำ

ธุรกิจรับขนส่งสินค้า เป็นการให้บริการขนส่งสินค้าตั้งแต่พัสดุขนาดเล็กจนถึงแบบเหมาคันหรือเหมาเที่ยว โดยการขนส่งสินค้าภายในประเทศร้อยละ 78.3 เป็นการขนส่งทางถนน [1] ดังนั้นการขนส่งทางถนนจึงเป็นการขนส่งสินค้าหลักภายในประเทศ โดยยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งทางถนนได้แก่ รถบรรทุก 4 ล้อ 6 ล้อ 10 ล้อ หรือมากกว่า 10 ล้อ ซึ่งการเลือกพาหนะที่ใช้ขนส่งนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสินค้าส่งผลให้เป็นที่ยอมรับในการเลือกใช้บริการจากลูกค้า เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง มีความสะดวก สบาย สามารถเข้าถึงการบริการได้ง่าย อีกทั้งมีถนนที่ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศ สามารถตอบสนองความต้องการขนส่งแบบถึงมือผู้รับ (Door-to -Door)

อย่างไรก็ตาม จากสภาวะการแข่งขันที่รุนแรงทางธุรกิจในปัจจุบัน ส่งผลให้ผู้ประกอบการต้องพยายามปรับตัวเพื่อความอยู่รอด โดยพัฒนาและปรับปรุงการดำเนินงานในทุก ๆ ด้านให้มีประสิทธิภาพ และหาแนวทางในการลดต้นทุน แต่ยังคงสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้ ซึ่งในแต่ละธุรกิจจะมีการตัดสินใจเลือกกลยุทธ์ที่แตกต่างกันไป [2] สำหรับธุรกิจรับขนส่งสินค้าต้นทุนค่าน้ำมันเชื้อเพลิงมีอัตราที่สูงเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายด้านอื่น ๆ ดังนั้นถ้าสามารถบริหารจัดการต้นทุนค่าน้ำมันเชื้อเพลิงได้จะทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายลงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริษัทผู้ให้บริการขนส่งสินค้าที่ใช้รถขนส่งสินค้าของตนเอง

บริษัทกรณีศึกษาเป็นผู้ให้บริการขนส่งสินค้าแบบครบวงจร ตั้งอยู่ในเขตอำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี โดยกิจกรรมหลักของบริษัทคือการให้บริการรับขนส่งสินค้าตามความต้องการของลูกค้าทั้งสินค้านำเข้าและส่งออก รวมทั้งบริการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง บริษัทมีรถหัวลากที่ใช้เพื่อการขนส่งเป็นของบริษัทเอง และมีถังจัดเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงขนาด 18,000 ลิตร เพื่อใช้สำหรับ

เติมน้ำมันให้รถหัวลากของบริษัท โดยบริษัทเริ่มใช้ถังเก็บน้ำมันในเดือนสิงหาคม 2561 เนื่องจากบริษัทคาดหวังว่าการเติมน้ำมันจากถังภายในบริษัทจะสามารถควบคุมปริมาณการเติมน้ำมันได้ตามระยะทางที่ใช้จริง และลดค่าน้ำมันเชื้อเพลิงจากการนำรถหัวลากไปเติมน้ำมันที่สถานีบริการภายนอก ที่ผ่านมาบริษัทกรณีศึกษายังไม่ได้มีการคำนวณต้นทุนการบริหารจัดการถังจัดเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงดังกล่าว ทำให้บริษัทไม่ทราบต้นทุนที่แท้จริง อีกทั้งบริษัทยังไม่มีจุดสั่งซื้อน้ำมันเชื้อเพลิงที่แน่นอน โดยปัจจุบันบริษัทจะใช้วิธีทำการสั่งซื้อน้ำมันเมื่อปริมาณน้ำมันใกล้จะหมดถัง หรือใช้วิธีการกะประมาณช่วงเวลาที่จะสั่งซื้อ โดยไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอนในการสั่งซื้อว่าจะสั่งซื้อเมื่อไรหรือปริมาณน้ำมันคงเหลือเท่าใด และควรสั่งซื้อในปริมาณเท่าใด ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ จึงศึกษาต้นทุนรวมของการบริหารจัดการถังจัดเก็บน้ำมันเชื้อเพลิง และวิเคราะห์หาปริมาณการสั่งซื้อน้ำมันเชื้อเพลิงอย่างประหยัด โดยเลือกใช้ทฤษฎีการสั่งซื้ออย่างประหยัด (EOQ) เนื่องจากเป็นวิธีเบื้องต้นที่ค่อนข้างง่ายต่อการคำนวณ และเหมาะกับกิจการในระบบปิดหรือกิจการที่มีความต้องการและราคาคงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อีกทั้งการสั่งซื้อด้วยวิธีการนี้จะไม่ทำให้เกิดการขาดสินค้าหรือการหยุดชะงักในระหว่างการค้าและการดำเนินการ และช่วยประหยัดต้นทุนในการสั่งซื้อ ดังนั้นจึงนำทฤษฎีการสั่งซื้ออย่างประหยัดมาประยุกต์ใช้กับบริษัทกรณีศึกษาที่มีความต้องการน้ำมันเชื้อเพลิงและราคาน้ำมันเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เพื่อประกอบการวางแผนในการสั่งซื้อน้ำมันเชื้อเพลิงของบริษัทกรณีศึกษาให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสั่งซื้ออย่างประหยัด พบว่าแนวคิด EOQ มีสูตรการคำนวณที่ง่ายไม่ซับซ้อน และใช้ข้อมูลไม่มากในการคำนวณได้แก่

ต้นทุนในการสั่งซื้อ ต้นทุนในการเก็บรักษาและระยะเวลาการรอคอย แนวคิด EOQ ช่วยลดต้นทุนสินค้าประหยัดต้นทุนการสั่งซื้อ กระบวนการผลิตดำเนินไปอย่างสม่ำเสมอไม่หยุดชะงัก จึงมีการศึกษาและนำแนวคิดนี้ไปใช้อย่างกว้างขวาง ซึ่งผู้วิจัยส่วนใหญ่ [3-8] จะทำการวิเคราะห์หาระดับความสำคัญของวัตถุดิบหรือสินค้าแต่ละชนิดด้วยวิธีการแบ่งกลุ่มสินค้าแบบ ABC (ABC Classification System) เพื่อคัดเลือกวัตถุดิบกลุ่ม A ซึ่งมีมูลค่าความต้องการต่อปีสูงที่สุดก่อน จากนั้นตรวจสอบรูปแบบความต้องการวัตถุดิบด้วยทฤษฎี Peterson-Silver Rule เพื่อวัดความแปรปรวนของความต้องการสินค้า [9-12] แล้วจึงคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้ออย่างประหยัด จุดสั่งซื้อใหม่ และต้นทุนรวมสินค้าคงคลังที่ต่ำสุด อย่างไรก็ตาม มีนักวิจัยบางท่านได้นำเทคนิคการพยากรณ์ [13-14] เช่น วิธี Weight Moving Average หรือ วิธี Regression Analysis มาใช้เพื่อคาดการณ์ปริมาณความต้องการวัตถุดิบหรือสินค้าต่อปีด้วยข้อมูลการสั่งซื้อย้อนหลัง ซึ่งการเลือกวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมนั้น มีนักวิจัยที่เลือกจากค่าดัชนีการพยากรณ์ที่มีค่าต่ำสุด หรือพิจารณาค่าพยากรณ์เทียบกับข้อมูลจริงในอดีตโดยเลือกวิธีการพยากรณ์ที่ค่าใกล้เคียงกับข้อมูลจริงในอดีตมากที่สุด จากนั้นจึงทำการคำนวณหาการสั่งซื้ออย่างประหยัด ซึ่งผลการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การสั่งซื้ออย่างประหยัดสามารถลดค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อสินค้าได้จริง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงนำส่วนที่คล้ายคลึงและหรือเหมือนกันมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาครั้งนี้ โดยมุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับการสั่งซื้อน้ำมันเชื้อเพลิงอย่างประหยัด ที่มีลักษณะการสั่งซื้อที่เน้นในเรื่องการลดต้นทุนรวมของการบริหารจัดการ เช่นเดียวกับการสั่งซื้อวัตถุดิบสำหรับการผลิตยางผสมวัสดุก่อสร้าง อะไหล่และอุปกรณ์ไฟฟ้า ลูกกรีด วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตวัสดุซีเมนต์ทดแทนไม้ วัตถุดิบผลิตเครื่องถ่ายเอกสาร และวัสดุคงคลังต่าง ๆ ดังนั้นจึงสามารถนำ

งานวิจัยเหล่านี้มาประยุกต์ใช้กับการศึกษาครั้งนี้ได้ รวมทั้งได้นำเทคนิคการพยากรณ์มาใช้เพื่อดูแนวโน้มความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของบริษัทกรณีศึกษาในอนาคตด้วย นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของการสั่งซื้ออย่างประหยัด ถ้าหากในอนาคตปริมาณความต้องการมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งยังไม่พบว่ามีการวิจัยที่มุ่งเน้นเกี่ยวกับการสั่งซื้ออย่างประหยัดนำวิธีการนี้ไปใช้

3. วิธีการดำเนินการศึกษา

รายละเอียดในการศึกษาครั้งนี้ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ (1) ศึกษาการดำเนินงานของบริษัทกรณีศึกษาในส่วนของการใช้งานถังจัดเก็บน้ำมัน (2) ศึกษาต้นทุนการบริหารจัดการถังจัดเก็บน้ำมัน (3) เปรียบเทียบต้นทุนค่าน้ำมันกรณีเติมน้ำมันที่สถานีบริการกับกรณีเติมจากถังจัดเก็บน้ำมันของบริษัท (4) ตรวจสอบรูปแบบความต้องการด้วยทฤษฎี Peterson-Silver Rule (5) คำนวณหาปริมาณการสั่งซื้ออย่างประหยัด (6) พยากรณ์ปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในอนาคตด้วยเทคนิคการพยากรณ์ 5 วิธี และเลือกวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุด (7) คำนวณหาปริมาณการสั่งซื้ออย่างประหยัดในอนาคต (8) วิเคราะห์ความไวของปริมาณการใช้น้ำมันที่ส่งผลต่อต้นทุนบริหารจัดการ และ (9) เปรียบเทียบการบริหารจัดการแบบเดิมและหลังการบริหารจัดการด้วยการสั่งซื้ออย่างประหยัด

4. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 ลักษณะการสั่งซื้อน้ำมัน

จากการรวบรวมข้อมูลการใช้น้ำมันของบริษัทกรณีศึกษาตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2561 ถึงพฤศจิกายน 2562 พบว่ามีความต้องการใช้น้ำมันรวมทั้งสิ้น 319,086.97 ลิตร โดยมีการสั่งซื้อน้ำมันทั้งหมดจำนวน 22 ครั้ง การสั่งซื้อน้ำมันส่วนใหญ่ร้อยละ 81.82

จะสั่งซื้อจำนวน 16,000 ลิตร และมีบางครั้งที่มีการสั่งซื้อมากที่สุดจำนวน 18,000 ลิตร คิดเป็นร้อยละ 13.64 หรืออาจมีการสั่งซื้อต่ำสุดจำนวน 10,000 ลิตร คิดเป็นร้อยละ 4.55 โดยปริมาณน้ำมันคงเหลือในถังจัดเก็บก่อนการสั่งซื้อแต่ละครั้งจะมีปริมาณไม่เท่ากัน บางครั้งมีปริมาณน้ำมันในถังจัดเก็บมากถึง 2,531.30 ลิตร หรือบางครั้งมีปริมาณต่ำสุด 98.00 ลิตร แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณน้ำมันคงเหลือก่อนสั่งซื้อและปริมาณน้ำมันที่สั่งซื้อแต่ละครั้ง

ครั้งที่	วันที่สั่งซื้อน้ำมัน	ปริมาณคงเหลือก่อนสั่ง (ลิตร)	ปริมาณการสั่ง (ลิตร)
1	13 พ.ย. 61	98.00	16,000.00
2	9 ธ.ค. 61	330.30	12,000.00
3	21 ธ.ค. 61	312.30	12,000.00
4	5 ม.ค. 62	196.30	18,000.00
5	23 ม.ค. 62	1,150.30	16,000.00
6	7 ก.พ. 62	785.30	16,000.00
7	25 ก.พ. 62	450.30	16,000.00
8	11 มี.ค. 62	843.30	16,000.00
9	23 มี.ค. 62	476.30	16,000.00
10	5 เม.ย. 62	2,333.30	10,000.00
11	25 เม.ย. 62	873.30	16,000.00
12	11 พ.ค. 62	581.30	16,000.00
13	4 มิ.ย. 62	1,167.30	16,000.00
14	25 มิ.ย. 62	1,890.30	16,000.00
15	18 ก.ค. 62	967.30	16,000.00
16	5 ส.ค. 62	2,283.30	16,000.00
17	22 ส.ค. 62	917.30	16,000.00
18	4 ก.ย. 62	813.30	16,000.00
19	17 ก.ย. 62	2,513.30	16,000.00
20	8 ต.ค. 62	690.00	16,000.00
21	31 ต.ค. 62	666.00	16,000.00
22	15 พ.ย. 62	1,036.00	16,000.00

ที่มา: จากการรวบรวมข้อมูลของบริษัทการศึกษา

4.2 ต้นทุนบริหารจัดการถังจัดเก็บน้ำมัน

ต้นทุนการบริหารจัดการถังน้ำมันเชื้อเพลิงแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ต้นทุนการสั่งซื้อและต้นทุนการเก็บรักษา

4.2.1 ต้นทุนการสั่งซื้อ ประกอบด้วย ค่าแรงงานฝ่ายจัดซื้อ ค่าแรงงานฝ่ายบัญชี ค่าแรงงานฝ่ายควบคุมการนำน้ำมันมาเติมลงถัง ค่าใช้จ่ายของใบสั่งซื้อ ค่าใช้จ่ายในการสื่อสาร และค่าใช้จ่ายอุปกรณ์เครื่องเขียน ซึ่งเป็นการศึกษากิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการสั่งซื้อและพิจารณาต้นทุนต่อหน่วยกิจกรรม โดยผลการศึกษาดำเนินการสั่งซื้อเท่ากับ 459.68 บาทต่อครั้ง แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าใช้จ่ายการสั่งซื้อต่อครั้ง

รายการ	จำนวน (บาท)
ค่าแรงงานฝ่ายจัดซื้อ	291.67
ค่าแรงงานฝ่ายบัญชี	54.69
ค่าแรงงานฝ่ายควบคุมเติม น้ำมัน	98.96
ค่าใช้จ่ายของใบสั่งซื้อ	2.58
ค่าใช้จ่ายในการติดต่อสื่อสาร	5.78
ค่าใช้จ่ายอุปกรณ์เครื่องเขียน	6.00

ที่มา: คำนวณจากการเก็บข้อมูลบริษัทการศึกษา

4.2.2 ต้นทุนการเก็บรักษา คือค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการมีสินค้าคงคลังและการรักษาสภาพให้สินค้าคงคลังนั้นอยู่ในรูปที่ใช้งานได้ ซึ่งจะแปรผันตามปริมาณสินค้าและระยะเวลาที่เก็บสินค้าคงคลังนั้นไว้ โดยผลจากการศึกษาสามารถจำแนกต้นทุนการเก็บรักษาน้ำมันของบริษัทการศึกษาได้ดังนี้ ค่าแรงงานฝ่ายบริหาร และควบคุมถังน้ำมันค่าบำรุงรักษาน้ำมัน ค่าเสื่อมเสีย ถ้ามียของถังน้ำมัน ค่าไฟฟ้าและค่าน้ำประปา (บริเวณมิเตอร์ถึงน้ำมัน) โดยมีต้นทุนการเก็บรักษาเท่ากับ 27,962.02 บาทต่อเดือน หรือคิดเป็น 335,544.28 บาทต่อปี แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าใช้จ่ายจากการเก็บรักษาสินค้าคงคลัง

รายการ	จำนวน (บาท/เดือน)
ค่าแรงงานฝ่ายบริหารและควบคุม	22,000.00
ค่าบำรุงรักษาถังน้ำมัน	2,000.00
ค่าเสื่อม เสีย ถ้ำสมัย ของถังน้ำมัน	2,333.33
ค่าน้ำประปา	345.00
ค่าไฟฟ้า	1,283.69

ที่มา: คำนวณจากการเก็บข้อมูลบริษัทกรณีศึกษา

4.3 การเปรียบเทียบต้นทุนค่าน้ำมัน

ในอดีตบริษัทกรณีศึกษาจะให้รถหัวลากเติมน้ำมันจากสถานีบริการภายนอก ซึ่งตั้งอยู่ห่างจากบริษัท ส่งผลให้เกิดความไม่สะดวกและเสียค่าใช้จ่ายในการเดินทาง ต่อมาบริษัทจึงได้ดำเนินการติดตั้งถังจัดเก็บน้ำมันขึ้นภายในบริษัทเพื่อให้บริการเติมน้ำมันแก่รถหัวลากของบริษัท โดยบริษัทคาดว่าจะการติดตั้งถังจัดเก็บน้ำมันจะช่วยลดต้นทุนค่าน้ำมันเชื้อเพลิงให้กับบริษัทได้ อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันบริษัทยังไม่ได้มีการคำนวณต้นทุนเพื่อการเปรียบเทียบ ดังนั้นบทความนี้จึงได้คำนวณต้นทุนค่าน้ำมันเชื้อเพลิงโดยแบ่งเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 การเติมน้ำมันที่สถานีให้บริการ กรณีที่ 2 การเติมน้ำมันจากถังจัดเก็บน้ำมัน และกรณีที่ 3 การเติมน้ำมันจากถังจัดเก็บน้ำมันและพิจารณาต้นทุนการบริหารจัดการ โดยการเปรียบเทียบต้นทุนทั้ง 3 กรณี แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 พบว่ากรณีที่ 1 การเติมน้ำมันที่สถานีบริการมีต้นทุนเท่ากับ 8,482,954.88 บาท โดยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 ซึ่งเป็นการเติมน้ำมันจากถังจัดเก็บน้ำมัน พบว่ากรณีที่ 1 มีต้นทุนรวมสูงกว่า ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งถังจัดเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงของบริษัทกรณีศึกษาสามารถลดต้นทุนรวมลงได้จริง โดยเมื่อพิจารณากรณีที่ 3 ซึ่งเป็นการคำนวณต้นทุนรวมที่มีค่าบริหารจัดการที่ประกอบด้วยต้นทุนสั่งซื้อและต้นทุนเก็บรักษา พบว่ามีต้นทุนรวมเท่ากับ

ตารางที่ 4 ต้นทุนค่าน้ำมันเชื้อเพลิง

รายการ (บาท/ปี)	กรณีที่		
	1	2	3
ปริมาณการใช้	319,086.97	319,086.97	319,086.97
ราคาต่อลิตร*	ราคาปลีก	ราคาส่ง	ราคาส่ง
ค่าน้ำมัน	8,482,954.88	7,699,892.79	7,699,892.79
จำนวนการสั่งซื้อ	0.00	22.00	22.00
ต้นทุนสั่งซื้อ/ครั้ง	0.00	0.00	459.68
ค่าเก็บรักษา/ลิตร	0.00	0.00	1.06
รวม	8,482,954.88	7,699,892.79	8,048,237.93

*ราคาน้ำมัน ณ วันที่สั่งซื้อ ช่วงเดือนธันวาคม 2561-พฤศจิกายน 2562

ที่มา: จากการคำนวณ

8,048,237.93 บาท ซึ่งมีต้นทุนต่ำกว่ากรณีที่ 1 จำนวน 434,716.95.73 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 5.12 อย่างไรก็ตาม แม้ว่ากรณีที่ 2 จะมีต้นทุนรวมต่ำที่สุด แต่ในความจริงการเติมน้ำมันจากถังจัดเก็บต้องพิจารณาต้นทุนการบริหารจัดการด้วย

4.4 การตรวจสอบระดับความต้องการ

การวัดความแปรปรวนของความต้องการสินค้า (น้ำมัน) ด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Variability Coefficient, VC) โดยใช้ทฤษฎี Peterson-Silver Rule [15] เป็นวิธีการตรวจสอบลักษณะของระดับความต้องการสินค้าว่าเป็นแบบคงที่หรือไม่ โดยหากมีค่าน้อยกว่า 0.25 แสดงว่า ระดับความต้องการสินค้ามีลักษณะคงที่ หรือมีความแปรปรวนน้อย แต่ถ้าหากมีค่ามากกว่า 0.25 แสดงว่า ระดับความต้องการสินค้ามีลักษณะไม่คงที่ หรือมีความแปรปรวนมาก โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1-2) ดังนี้

$$VC = \frac{\text{Est. var } D}{\bar{d}^2} \quad (1)$$

$$\text{Est. var } D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 - \bar{d}^2 \quad (2)$$

เมื่อ d_i = ปริมาณความต้องการในแต่ละช่วง

n = ช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษา

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง พบว่ามีค่าน้อยกว่า 0.25 แสดงว่าระดับความต้องการน้ำมันเชื้อเพลิงมีลักษณะคงที่ ดังนั้นสามารถใช้วิธีการหาปริมาณการสั่งซื้อแบบประหยัด (EOQ) ในการคำนวณปริมาณสั่งซื้อได้ แสดงการคำนวณในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (VC) ของปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง

เดือน	ปริมาณการใช้ (d_i)	d_i^2
ธ.ค. 61	23,720.00	562,638,400.00
ม.ค. 62	33,319.00	1,110,155,761.00
ก.พ. 62	26,355.00	694,586,025.00
มี.ค. 62	39,902.00	1,592,169,604.00
เม.ย. 62	20,167.00	406,707,889.00
พ.ค. 62	24,903.00	620,159,409.00
มิ.ย. 62	20,114.00	404,572,996.00
ก.ค. 62	23,696.00	561,500,416.00
ส.ค. 62	33,930.97	1,151,310,725.14
ก.ย. 62	31,079.00	965,904,241.00
ต.ค. 62	21,724.00	471,932,176.00
พ.ย. 62	20,177.00	407,111,329.00
รวม	319,086.97	8,948,748,971.14
เฉลี่ย ($\bar{d}$)	26,590.58	
$\bar{d}^2$	707,058,989.05	
Est. Var D	38,670,091.87	
VC	0.0547	

ที่มา: จากการคำนวณ

4.5 การสั่งซื้ออย่างประหยัด

การคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อน้ำมันเชื้อเพลิงอย่างประหยัดในบทความนี้ ใช้ข้อมูลปริมาณการใช้น้ำมันของบริษัทกรณีศึกษาจำนวน 12 เดือน ตั้งแต่เดือนธันวาคม 2561 – พฤศจิกายน 2562 เพื่อกำหนดเป็นความต้องการสินค้าต่อปี (D) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 319,086.97 ลิตร ดังแสดงในตารางที่ 5 สำหรับต้นทุนในการสั่งซื้อ (C_o) เท่ากับ 459.68 บาทต่อครั้ง ซึ่งได้จากการศึกษาต้นทุนการบริหารจัดการถึงน้ำมัน

เชื้อเพลิง และต้นทุนการเก็บรักษาต่อหน่วยต่อปี (C_c) มีค่า 1.06 บาทต่อลิตรต่อปี ได้จากการคำนวณหาร้อยละของค่าใช้จ่ายในการเก็บรักษาทั้งปีต่อต้นทุนน้ำมันเชื้อเพลิงทั้งปีคือ $335,544.28/7,699,892.79 = 0.0436$ และนำมาคูณราคาน้ำมันเฉลี่ยที่สั่งซื้อทั้งปี คือ 24.28 บาทต่อลิตร โดยคำนวณหาการสั่งซื้อนี้อยู่ภายใต้สมมติฐานของรูปแบบขนาดการสั่งซื้ออย่างประหยัดที่อุปสงค์คงที่และสินค้าคงคลังไม่ขาดมือ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) ดังนี้

$$EOQ = \sqrt{\frac{2C_oD}{C_c}} \quad (3)$$

เมื่อ

EOQ = ขนาดการสั่งซื้อต่อครั้งที่ประหยัด

D = ความต้องการสินค้าต่อปี (หน่วย)

C_o = ต้นทุนการสั่งซื้อ (บาท)

C_c = ต้นทุนการเก็บรักษาต่อหน่วยต่อปี (บาท)

Q = ปริมาณการสั่งซื้อต่อครั้ง (หน่วย)

TC = ต้นทุนรวมการบริหารจัดการ (บาท/ปี)

แทนค่าในสมการที่ (3) ได้ดังนี้

$$EOQ = \sqrt{\frac{2(459.68)(319,086.97)}{1.06}} = 16,635.83 \text{ ลิตร/ครั้ง}$$

ต้นทุนรวมต่ำสุดของการบริหารจัดการ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) ดังนี้

$$TC_{\min} = \left[\frac{C_oD}{Q} \right] + \left[\frac{QC_c}{2} \right] \quad (4)$$

แทนค่าในสมการที่ (4) ได้ดังนี้

$$TC_{\min} = \left[\frac{(459.68)(319,086.97)}{16,635.83} \right] + \left[\frac{(16,635.83)(1.06)}{2} \right]$$

$$= 17,633.98 \text{ บาท/ปี}$$

จำนวนครั้งในการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) ดังนี้

$$\text{จำนวนครั้งในการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด} = \frac{D}{Q} \quad (5)$$

แทนค่าในสมการที่ (5) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนครั้งในการสั่งซื้อที่ประหยัดที่สุด} &= \frac{319,086.97}{16,635.83} \\ &= 19.18 \text{ ครั้ง} \end{aligned}$$

จุดสั่งซื้อใหม่ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) ดังนี้

$$ROP = \frac{D}{W} \times LT \quad (6)$$

เมื่อ

D = ปริมาณความต้องการต่อปี

W = จำนวนวันทำงานต่อปี

LT = เวลาจากจุดสั่งซื้อจนกระทั่งได้รับสินค้า

แทนค่าในสมการที่ (6) ได้ดังนี้

$$ROP = \frac{319,086.97}{352} \times 1 = 906.50 \text{ ลิตร}$$

สรุปผลการคำนวณ ปริมาณการสั่งซื้ออย่างประหยัด 16,635.83 ลิตรต่อครั้ง ต้นทุนรวมการบริหารจัดการ 17,633.98 บาท จำนวนครั้งในการสั่งซื้อประมาณ 19 ครั้งต่อปี และต้องสั่งน้ำมันเชื้อเพลิงเมื่อมีน้ำมันคงเหลือ 906.50 ลิตร

4.6 ปริมาณการใช้น้ำมันในอนาคต

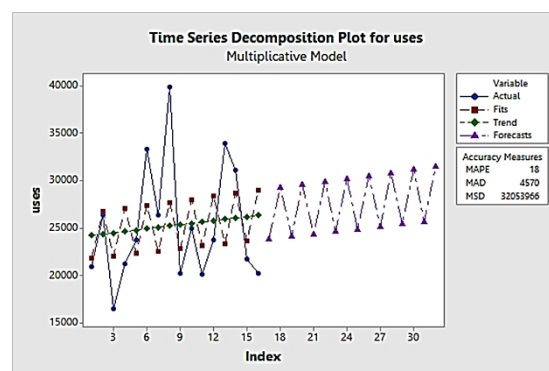
บทความนี้ได้พยากรณ์ปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในอนาคตของบริษัทกรณีศึกษา เพื่อนำค่าพยากรณ์มาหาปริมาณการสั่งซื้ออย่างประหยัดของน้ำมันเชื้อเพลิงในอนาคต โดยทำการพยากรณ์ด้วย

โปรแกรมสำเร็จรูปทั้งหมด 5 วิธี ได้แก่ วิธีการพยากรณ์แนวโน้ม (Trend Analysis) วิธีแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลา (Time Series Decomposition) วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบถ่วงน้ำหนัก (Moving Average) วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบง่าย (Single Exponential Smoothing) และวิธีการพยากรณ์ฤดูกาล (Winters Method) ผลการพยากรณ์พบว่าการพยากรณ์ด้วยวิธีแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลา ให้ค่าความผิดพลาดของการพยากรณ์ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการพยากรณ์ทั้ง 5 วิธี แสดงดังตารางที่ 6 และผลการพยากรณ์ด้วยวิธีแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลาแสดงดังรูปที่ 1

ตารางที่ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าดัชนีการประเมินความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์

วิธีการพยากรณ์	ค่าดัชนีประเมินความคลาดเคลื่อน		
	MAPE	MAD	MSE
Trend Analysis	20	4,953	36,887,553
<i>Time Series</i>			
<i>Decomposition</i>	18	4,570	32,053,966
Moving Average	25	6,311	57,566,733
Single Exponential			
Smoothing	21	5,360	43,629,233
Winters Method	22	5,729	49,308,220

ที่มา: จากการคำนวณ



ที่มา: จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

รูปที่ 1 กราฟผลการพยากรณ์วิธีแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลา

4.7 การสั่งซื้ออย่างประหยัด โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการพยากรณ์

การพยากรณ์ปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงด้วยวิธีแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลาได้ปริมาณความต้องการใช้น้ำมันรวม 306,668.51 ลิตร เมื่อคำนวณการสั่งซื้ออย่างประหยัดจะได้เท่ากับ 16,308.89 ลิตรต่อครั้ง มีต้นทุนรวมการบริหารจัดการเท่ากับ 17,287.43 บาท มีจำนวนครั้งในการสั่งซื้อประมาณ 19 ครั้ง และต้องส่งน้ำมันเชื้อเพลิงทันทีเมื่อมีน้ำมันคงเหลือในถังประมาณ 871.22 ลิตร

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณความต้องการใช้น้ำมันพบว่า ความต้องการใช้น้ำมันในอนาคตที่ได้จากการพยากรณ์มีปริมาณที่ลดลงประมาณร้อยละ 4 เมื่อเทียบกับปีก่อน ดังนั้นบทความนี้จึงวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยด้านปริมาณความต้องการใช้น้ำมันที่ส่งผลต่อต้นทุนบริหารจัดการ เมื่อปริมาณความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงตั้งแต่ร้อยละ 3 จนถึงร้อยละ 21 (การเปลี่ยนแปลงที่สูงกว่าร้อยละ 21 จะส่งผลให้ปริมาณการส่งน้ำมันมากกว่า 18,000 ลิตร ซึ่งเกินความสามารถในการจัดเก็บของถังน้ำมัน) ผลที่ได้จากการทดสอบคือเมื่อปริมาณความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงลดลงร้อยละ 21 จะทำให้ต้นทุนบริหารจัดการลดลง 1,922.03 หรือคิดเป็นร้อยละ 11.12 โดยมีปริมาณการสั่งซื้ออย่างประหยัดเท่ากับ 14,495.66 ลิตร ในทางตรงกันข้ามโดยเมื่อมีปริมาณความต้องการใช้น้ำมันเพิ่มขึ้นร้อยละ 21 จะทำให้ต้นทุนบริหารจัดการเพิ่มขึ้น 1,728.74 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 10.00 โดยมีปริมาณการสั่งซื้ออย่างประหยัดเท่ากับ 17,939.78 ลิตร แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 7

5. สรุป

จากข้อมูลปริมาณการใช้น้ำมันของบริษัท ภูมิศึกษาปัจจุบัน สามารถคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อ

อย่างประหยัดได้เท่ากับ 16,635.83 ลิตร โดยมีต้นทุนรวมการบริหารจัดการเท่ากับ 17,633.98 บาท และมีจำนวนครั้งในการสั่งซื้อ 19 ครั้ง โดยเมื่อวิเคราะห์ต้นทุนรวมการบริหารด้วยปริมาณการสั่งซื้ออย่างประหยัดเปรียบเทียบกับต้นทุนรวมการบริหารในปัจจุบัน พบว่าการสั่งซื้อรูปแบบปัจจุบันมีจำนวนทั้งหมด 22 ครั้ง โดยมีต้นทุนรวมการบริหารจัดการเท่ากับ 18,929.95 บาท ซึ่งมากกว่าต้นทุนรวมที่ใช้การสั่งซื้ออย่างประหยัด ที่มีการสั่งซื้อทั้งหมด 19 ครั้ง ดังนั้นการสั่งซื้ออย่างประหยัดสามารถลดต้นทุนรวมได้ 1,295.97 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 6.85

เมื่อพยากรณ์ความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในอนาคต พบว่าการพยากรณ์ด้วยวิธีแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลา ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ต่ำที่สุดทั้ง 3 ค่า ได้แก่ ค่า MAD เท่ากับ 4,570 ค่า MSE เท่ากับ 32,053,966 และค่า MAPE เท่ากับ 18% โดยปริมาณความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากการพยากรณ์เท่ากับ 306,668.51 ลิตร เมื่อหาปริมาณการสั่งซื้ออย่างประหยัดได้เท่ากับ 16,308.89 ลิตรต่อครั้ง มีต้นทุนรวมของการบริหารจัดการถึงจัดเก็บน้ำมัน 17,287.43 บาท มีจำนวนครั้งในการสั่งซื้อ 19 ครั้งต่อปี และต้องส่งน้ำมันเชื้อเพลิงทันทีเมื่อมีน้ำมันคงเหลือในถังประมาณ 871.22 ลิตร

อย่างไรก็ตาม ในอนาคตปริมาณความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงอาจมีการเปลี่ยนแปลง บทความนี้จึงทำการศึกษาความไวของต้นทุนรวมที่เกิดจากปัจจัยด้านปริมาณความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลง ผลที่ได้คือต้นทุนรวมการบริหารจัดการจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 245.38 บาทต่อปริมาณความต้องการใช้น้ำมันที่เพิ่มร้อยละ 3 ต่อครั้ง โดยความต้องการใช้น้ำมันสามารถเพิ่มได้สูงสุดร้อยละ 21 เนื่องจากปริมาณการสั่งซื้ออย่างประหยัดสูงสุดจะเกินจากปริมาณของถังจัดเก็บ และต้นทุนรวมการบริหารจัดการจะลดขึ้นเฉลี่ย 272.43 บาทต่อปริมาณความ

ต้องการใช้น้ำมันที่ลดลงร้อยละ 3 ต่อครั้ง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าปริมาณความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเหมาะสมสำหรับกรณีที่ปริมาณความต้องการคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษานี้ อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากการศึกษานี้ สามารถนำไปช่วยในการตัดสินใจสั่งซื้อน้ำมันได้ แต่เพื่อให้การสั่งซื้อมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับความเป็นจริง การปรับตัวเลขการสั่งซื้อให้เป็นตัวเลขจำนวนเต็มสามารถทำได้ ซึ่งอาจจะทำให้ปริมาณการสั่งซื้อน้ำมันมีความแตกต่างจากการคำนวณเล็กน้อย ทั้งนี้ข้อมูลปริมาณน้ำมันที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ เป็นข้อมูลจริงที่ได้จากการบันทึกจากบริษัทกรณีศึกษา ดังนั้นหากบริษัทกรณีศึกษานำการศึกษานี้มาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการสั่งซื้อก็จะทำให้สามารถคาดการณ์ปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น มากกว่านี้ บริษัทกรณีศึกษาควรศึกษาต้นทุนในส่วนของการจัดการการขนส่งสินค้า เช่น เส้นทางขนส่งระยะเวลาที่ใช้ในการขนถ่ายสินค้า ปริมาณหรือน้ำหนักของสินค้าที่ขนส่งต่อเที่ยว เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางเพิ่มเติมในการลดต้นทุน หรือเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ซึ่งจะเป็นการเพิ่มโอกาสและศักยภาพในการแข่งขันทางธุรกิจให้มากยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทกรณีศึกษาที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นในการศึกษาครั้งนี้ และขอขอบคุณคุณกรรณิกา แก่นไทย คุณณัฐยา ใหญ่บัก และคุณณัฐธิดา ทองกุลที่ช่วยสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลในการศึกษานี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Thailand's logistics report 2019. (5 Nov 2563). Office of the National Economic and

social development council, [Online] . Available: <https://www.nesdc.go.th/>

- [2] W. Jarassirarat, "Economic order quantity determination for raw material: a case study of photocopier and spare parts manufacuter," M. Sc. thesis, Burapha University, Ckon Buri, Thailand, 2015.
- [3] N. Siangprasert, "The analysis of optimal order quantity of domestic raw materials: a case study of rubber compound industry," M.Sc. thesis, Burapha University, Ckon Buri, Thailand, 2015.
- [4] S. Panyorattaroj, "Economic order quantity determination for raw material: A case study of electrical spare parts and electrical equipment product company," Research Report, Rajapruk University, 2017.
- [5] S. Permsin and P. Phrikthim, "The inventory control of printing ink: a case study of the corrugated paper production company," *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 29, no. 4, pp. 89-100, 2018.
- [6] J. Chujai, "The improvement for inventory management system for case study resistor," M.S. thesis, Bangkok, Thammasat University, 2016.
- [7] J. Rittisang and P. Kongchan, "The Flexibility in Applying the Economic Order Quantity and Reorder Point: A Case Study of a Medium Construction Materials Distribution Business," *KKU Research Journal (Graduate Studies) Humanities and Social Sciences*, vol. 5, no. 1, pp. 92-104, 2017.

- [8] N. Kumklong and C. Hotrawaisaya, "Warehouse management using Economic Order Quantity," *Journal of Innovation and Management*, vol. 4, pp. 40-46, 2019.
- [9] P. Todsaporn, "Inventory Management Improvement in Bearing Component Manufacturer," M. Eng., Dept. Indus. Eng., Thammasat University, Bangkok, Thailand, 2016.
- [10] K. Phalika and N. Suwannasap, "Inventory Management by Applying the Theory of ABC Classification Analysis, EOQ Model Techniques and Silver- Method: a Case Study of XYZ," *Phranakhon Rajabhat Research Journal (Humanities and Social Sciences)*, vol. 11, no. 1, pp. 102-114, 2016.
- [11] W. Wongthatsaneorn and C. Charoensiriwath, "Applying Inventory Management Systems for Perishable Goods: Case Study of Canned Fish Factory," *Thai Science and Technology Journal*, vol. 19, no. 4, pp. 15-29, 2011.
- [12] J. Soda, "Analysis of Appropriate Order Quantities for a Construction Materials Retailer: Case Study ABC Company Limited," M. Eng thesis, Dept. Eng. Manag., Dhurakij Pundit University, Bangkok, Thailand, 2019.
- [13] C. Chuchottaworn, "The forecasting and economic ordering quantity for package demand: a case study of agricultural products processing company in phatthalung province," *Humanities and Social Science Research Promotion Network Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 92-108, 2020.
- [14] P. Pumkesorn and P. Uraichot, "The Study of Forecasting Models and Appropriate Inventory Management Case Study: Carton Packaging," *Thai Industrial Engineering Network Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 14-22, 2015.
- [15] R. Peterson and E. Silver, *A Decision Systems for Inventory Management and Production Planning*, New York: John Wiley & Sons, 1979.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตร โดยระบบหมัก ไร้อากาศแบบแห้ง สำหรับครัวเรือนในชุมชนตำบลเกาะขันธุ์ จังหวัด นครศรีธรรมราช

พิพัฒน์ จันทรประดิษฐ์^{1*} อธิราชย์ เรืองรงค์² และ ผจงสุข สุธารัตน์³

¹ คณะวิทยาศาสตร์การกีฬาและสุขภาพ มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตกระบี่

² อุทยานวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

³ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

¹ 111 ถนนศรีตรัง ตำบลกระบี่ใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่ 81000

² 15 ถนนกาญจนวนิชย์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

³ 160 หมู่ 4 ถนนกาญจนวนิช ตำบลเขารูปช้าง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

รับบทความ 1 เมษายน 2564 แก้ไขบทความ 1 กันยายน 2564 ตอรับบทความ 20 กันยายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาและถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยเทคโนโลยีการหมักไร้อากาศแบบแห้งจากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรแบบชุมชนมีส่วนร่วม และเพื่อการผลิตพลังงานทดแทนก๊าซหุงต้ม LPG สำหรับใช้ในการประกอบอาหารในครัวเรือน แก่ชุมชนตำบลเกาะขันธุ์ อำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุหมักร่วมกับมูลวัวสด 2 ชุดการทดลอง เป็นเวลา 45 วัน ชุดการทดลองที่ 1 กลัวยและมะละกอ และชุดการทดลองที่ 2 พางข้าวและกากมะพร้าว พบว่า พางข้าวและกากมะพร้าวเป็นวัสดุหมักที่มีศักยภาพสูงกว่ากลัวยและมะละกอ ระบบผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 150 ลิตรต่อวัน และมีองค์ประกอบก๊าซมีเทนเฉลี่ยร้อยละ 67.68 ตามลำดับ หลังเริ่มต้นระบบเพียง 15 วัน ขณะที่การใช้กลัวยและมะละกอเป็นวัสดุหมัก ต้องใช้เวลาเริ่มต้นระบบนานกว่าถึง 30 วัน ระบบผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 120 ลิตรต่อวัน และมีองค์ประกอบก๊าซมีเทนเฉลี่ยร้อยละ 64.64 จากการทดสอบใช้งาน พบว่า ก๊าซชีวภาพ 150 ลิตร สามารถใช้ประกอบอาหารอย่างต่อเนื่องได้ 45-60 นาที โดยผู้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีมีความพึงพอใจมากที่สุดร้อยละ 85 มีความเห็นว่าความรู้ที่ได้รับสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงและช่วยลดรายจ่ายภาคครัวเรือนได้ ยิ่งไปกว่านั้นระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้นานโดยไม่ต้องเติมวัสดุหมักใหม่เพิ่มเติม ดังนั้น ชุดผลิตก๊าซชีวภาพสามารถประยุกต์ใช้กับวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรในท้องถิ่นเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพได้จริง และสามารถขยายผลสู่พื้นที่อื่นได้

คำสำคัญ : ก๊าซชีวภาพ; วัสดุเศษเหลือทางการเกษตร; การหมักไร้อากาศแบบแห้ง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1959 2614, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: p.j-kow@hotmail.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Biogas Production from Agricultural Residues Using Anaerobic Dry Fermentation System for Households in the Community of Koh Khan Sub-district, Nakhon Si Thammarat Province

Pipat Junpadit^{1*} Athirat Rerngnarong² and Pajongsuk Sutarut³

¹ Faculty of Sports and Health Science, Thailand National Sports University Krabi Campus, Thailand

² Prince of Songkla University Science Park, Prince of Songkla University

³ Faculty of Science and Technology, Songkhla Rajabhat University

¹ 111 Sri Trang Road, Krabi Yai Subdistrict, Mueang, Krabi Province, 81000

² 15 Karnjanavanich Road, Hat Yai, Songkhla Province, 90110

³ 160, Moo 4, Tambon Khoa-Roob-Chang, Mueang, Songkhla Province, 90000

Received 1 April 2021; Revised 1 September 2021; Accepted 20 September 2021

Abstract

This research was studied and transferred the biogas production technology with the community participation using anaerobic dry fermentation system from agricultural residues. The production of renewable energy for replacing LPG in household cooking of Koh Khan Sub-district community, Cha-Uat District, Nakhon Si Thammarat Province was carried out. The efficiency of the biogas production from different co-digestion material with fresh cow manure was studied for 45 days. The experiment 1, bananas and papaya and the experiment 2, rice straw and coconut meal were used for fermented materials. It was found that the system using rice straw and coconut meal as a fermented material had a higher potential than using bananas and papaya. The system produced averaged biogas of 150 L/d and an average methane content of 67.68% respectively, within just 15 days after start-up. While bananas and papaya as fermented materials took more time with more than 30 days after start-up the system. The system produced averaged biogas of 120 L/d and an average methane content of 64.64%. For usability test, It was found that 150 L of biogas could continuously cook for 45-60 minutes. The 85% of the technology transfer recipients regarded that the knowledge gained as practical and reduced household expenditures. Additionally, the system can produce biogas for a long time without adding new fermented materials. Therefore, this biogas system could be applied to local agricultural waste for biogas production which can be expanded to other areas.

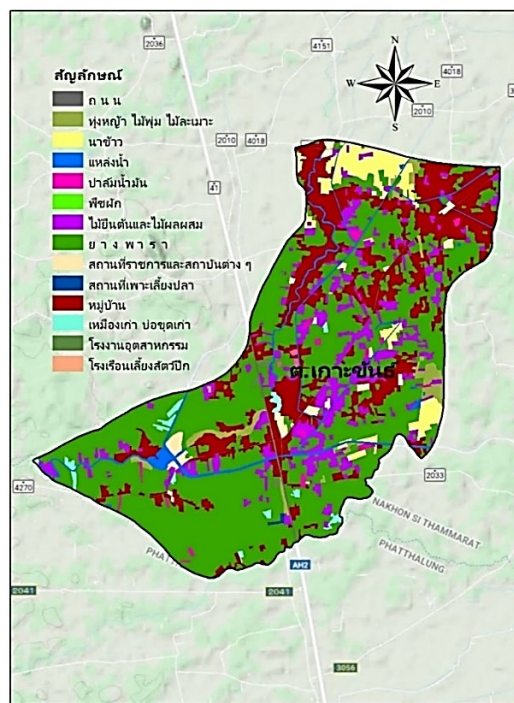
Keywords : Biogas; Agricultural Waste; Anaerobic Dry Fermentation

** Corresponding Author. Tel.: +668 1959 2614, E-mail Address: p.j-kow@hotmail.com*

1. บทนำ

การจัดการวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรร่วมกับการสร้างมูลค่าเพิ่ม พร้อมกับการแก้ไขปัญหาเรื่องการใช้พลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด ด้วยการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตร เทคโนโลยีการหมักแบบเปียกทั่วไปที่กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้มีการส่งเสริมเทคโนโลยีแก่ผู้ที่สนใจและต้องการลดรายจ่ายด้านพลังงาน การผลิตก๊าซชีวภาพถูกจำกัดจำนวนผู้ใช้ที่เป็นกลุ่มคนสังคมชนบท โดยเฉพาะคนที่ทำฟาร์มเลี้ยงสัตว์มีจำนวนน้อย เมื่อเทียบกับประชากรทั่วราชอาณาจักรไทยที่มีจำนวน 21,884,396 ครอบครัว ก่อปรายได้เฉลี่ยต่อหัวประชากรลดลง 1,680 บาทต่อปี [1] ภาครัฐจึงมีมาตรการที่จะช่วยลดรายจ่ายแก่ภาคครัวเรือน หนึ่งในวิธีการคือ การตรึงราคากลางค่าก๊าซหุงต้ม ถึงก๊าซ LPG ขนาด 15 กิโลกรัม ที่ราคา 318 บาท จนถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2564 และราคาก๊าซหุงต้มจะกลับมาปกติตามกลไกตลาด ซึ่งราคาก๊าซหุงต้มภาคใต้ เท่ากับ 520-550 บาท สูงกว่าภาคอื่น ๆ [2] หากครัวเรือนสนใจจะลดรายจ่ายและหันมาพึ่งพาตัวเองด้วยการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ประกอบอาหาร จะช่วยลดค่าใช้จ่ายครัวเรือนได้ แต่อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพเดิม ยังไม่ตอบโจทย์ผู้ใช้งานมากนัก จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีการหมักโดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้ง ข้อดีของการผลิตก๊าซชีวภาพแบบแห้งจากชีวมวลที่เป็นของแข็ง คือ ไม่ต้องการน้ำปริมาณมาก [3] จึงไม่ต้องใช้ถังหมักขนาดใหญ่ สามารถลดพื้นที่ติดตั้งระบบ ไม่ต้องมีการกวนผสม และยังเป็นอีกหนึ่งวิธีในการจัดการวัสดุหมัก (วัสดุเศษเหลือทางการเกษตร) ชนิดของแข็งย่อยยากมากกว่าร้อยละ 20 [4] เปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ ที่มีการเติมวัสดุหมักเพียงครั้งเดียว เพื่อลดความยุ่งยากและตอบโต้ผู้สนใจใช้งานเพิ่มมากขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องเติมวัสดุหมักตลอดเวลา การสำรวจวัสดุเศษเหลือทางการเกษตร ของตำบลเกาะขันธุ์

อำเภอ ชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช ข้อมูลจำแนกการใช้ที่ดินของตำบลเกาะขันธุ์ เมื่อปี พ.ศ. 2555 ภาพถ่ายดาวเทียมของกรมพัฒนาที่ดิน (รูปที่ 1) ประชาชนส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ประมง ค้าขาย รับจ้าง และอื่น ๆ ซึ่งอาชีพเกษตรกรรมถือเป็นอาชีพหลักของชุมชน และมีการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ได้แก่ ยางพารา ข้าว และการทำสวนผลไม้ต่าง ๆ เช่น เงาะ มังคุดทุเรียน ลองกอง ถั่วลิสง มะละกอ เป็นต้น หลังจากการเก็บเกี่ยวจะมีวัสดุเศษเหลือ เช่น ฟางข้าว เหลือทิ้งปริมาณมาก หนึ่งในวิธีการกำจัดที่ง่าย คือ การเผาทำลาย ทำให้เกิดปัญหาค่ามลพิษทางอากาศมีฝุ่นละอองขนาดเล็ก หรือ PM 2.5 ที่สูงเกินค่ามาตรฐานส่งผลกระทบต่อสุขภาพ



รูปที่ 1 การจำแนกลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินของตำบลเกาะขันธุ์ อำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรโดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้ง เพื่อช่วยลดการใช้

พลังงานในรูปแบบเดิมได้มาก ได้แก่ ลดการใช้ก๊าซหุงต้ม และลดการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในการขนส่งก๊าซหุงต้ม ถือเป็นการสร้างตัวอย่างความสำเร็จในการจัดการสิ่งแวดล้อมและพลังงานด้วยระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และเป็นแนวทางที่ดีในการแก้ไขปัญหาการจัดการวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรเพื่อลดการเผากำจัด สร้างความมั่นคงในการใช้พลังงานให้เกิดการเรียนรู้เทคโนโลยีหรือเป็นแหล่งเรียนรู้ของชุมชน และยังสามารถสร้างครัวเรือนนาร่องเพื่อเป็นตัวอย่างของการสร้างต้นทุนพลังงานชุมชนได้อย่างยั่งยืน

1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อการถ่ายทอดเทคโนโลยีชุดผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรแบบชุมชนมีส่วนร่วม
2. เพื่อการผลิตพลังงานทดแทนก๊าซหุงต้ม LPG สำหรับใช้ในการประกอบอาหารในครัวเรือน

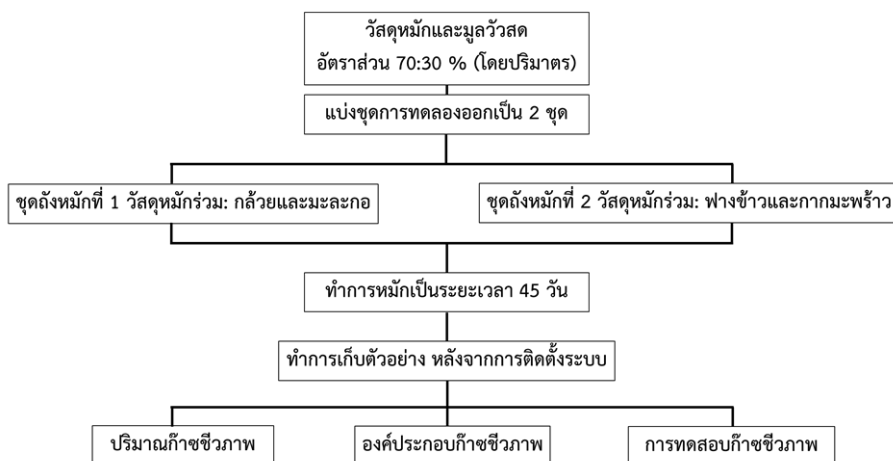
1.2 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดการวิจัย

ก๊าซชีวภาพ คือ ก๊าซที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะการหมักแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) ด้วยกลุ่มแบคทีเรียที่เรียกว่าแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิต (Anaerobic

Bacteria) แบคทีเรียดังกล่าวจะทำกราย่อยสลายสารอินทรีย์ตั้งต้นในระบบและผลิตก๊าซชีวภาพออกมามีสององค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน (CH_4) ร้อยละ 60-70 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 28-38 ที่เหลือเป็นก๊าซอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน (H_2) และไนโตรเจน (N_2) [5] ก๊าซชีวภาพมีองค์ประกอบหลัก คือ ก๊าซมีเทนปริมาณร้อยละ 60-70 ซึ่งเป็นก๊าซที่ติดไฟสามารถนำไปใช้ในการประกอบอาหารได้ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณร้อยละ 28-38 ซึ่งเป็นก๊าซไม่ติดไฟ ตามลำดับ โดยคุณสมบัติของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซมีเทนดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพ [6]

คุณสมบัติ	ปริมาณ
ค่าความร้อน	21 MJ/m ³ หรือ 5.96 kWh/m ³ (60% CH ₄)
ความเร็วเปลวไฟ	25 cm/s
อุณหภูมิเผาไหม้	650°C
อุณหภูมิจุดติดไฟ	600°C
ความจุความร้อน	16 kJ/m ³ °C
ความหนาแน่น	1.15 kg/m ³



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดการวิจัยโครงการผลิตก๊าซชีวภาพ

กรอบแนวคิดการวิจัย คือการสร้างชุดผลิตก๊าซชีวภาพด้วยเทคโนโลยีการหมักไร้อากาศแบบแห้ง แก่ชุมชนตำบลเกาะขันธุ์ อำเภอยะบะ จังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อการจัดการและการใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตร ซึ่งวัสดุเศษเหลือทั้งในท้องถิ่น ได้แก่ ฟางข้าว กากมะพร้าว กากกล้วย และมะละกอ นำมาหมักร่วมกับมูลวัวสด จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบวัสดุหมักที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและการประยุกต์ใช้ เพื่อการขยายผลสู่พื้นที่อื่น ๆ ดังรูปที่ 2

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุอุปกรณ์

2.1.1 ชุดผลิตก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วย ถังหมักก๊าซชีวภาพ เป็นถังซ้อนกัน 2 ใบ โดยถังขนาด 120 ลิตร วางซ้อนในถังขนาด 200 ลิตร และถังเก็บก๊าซชีวภาพ เป็นถัง 2 ใบขนาดต่างกัน โดยถังขนาด 160 ลิตร ใช้เก็บก๊าซที่ผลิตได้จากถังหมักก๊าซชีวภาพ ถูกรวบรวมอยู่บนถังขนาด 300 ลิตร ที่บรรจุน้ำเต็มถึง เพื่อดักก๊าซชีวภาพไม่ให้ไหลออก

2.1.2 ก๊าซโครมาโตกราฟี Shimadzu รุ่น 8A (Gas Chromatography - Thermal Conductivity Detector: GC-TCD) สำหรับวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทน

2.1.3 ถังเก็บตัวอย่างก๊าซ

2.2 การดำเนินโครงการวิจัย

การประชุมร่วมระหว่างมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช อุทยานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ตัวแทนจากชุมชนตำบลเกาะขันธุ์ อำเภอยะบะ จังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อชี้แจงการดำเนินโครงการวิจัย การสำรวจเชิงพื้นที่ และเตรียมการถ่ายทอดเทคโนโลยีชุดผลิตก๊าซชีวภาพ แบบชุมชนมีส่วนร่วม (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 กิจกรรมการประชุมระหว่างคณะผู้วิจัย อุทยานวิทยาศาสตร์ ฯ และชุมชนตำบลเกาะขันธุ์



รูปที่ 4 การฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการแบบชุมชนมีส่วนร่วม

2.3 การฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการ

การสร้างชุดผลิตก๊าซชีวภาพ ระดับครัวเรือน โดยดำเนินการจัดอบรมเชิงปฏิบัติการ รายละเอียดดังนี้

2.3.1 การอบรมให้ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพ ขยะมูลฝอยที่สามารถใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ กระบวนการหมักในสภาวะไร้อากาศแบบแห้ง

2.3.2 การลงมือปฏิบัติสร้างชุดผลิตก๊าซชีวภาพ แบบชุมชนมีส่วนร่วม การดัดแปลงหัวเตาแก๊สเพื่อใช้งานกับก๊าซชีวภาพ การสาธิตการหมักวัสดุเศษเหลือร่วมกับมูลสัตว์ (รูปที่ 4) เพื่อเปรียบเทียบศักยภาพของการใช้

ประโยชน์จากวัสดุหมักรวม โดยมีอัตราส่วนของวัสดุหมักแตกต่างกันในแต่ละชุดการทดลอง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนของวัสดุหมักในการผลิตก๊าซชีวภาพ ปริมาตร 100 ลิตร ระยะเวลาเก็บเก็บ 45 วัน

รายการ	วัสดุหมัก	อัตราส่วน (%)
ชุดการทดลองที่ 1	กล้วย	35
	มะละกอ	35
	มูลวัวสด	30
	รวม	100
ชุดการทดลองที่ 2	ฟางข้าว	35
	กากมะพร้าว	35
	มูลวัวสด	30
	รวม	100

2.4 การติดตามและประเมินผลโครงการวิจัย

การติดตามการผลิตก๊าซชีวภาพแบบชุมชนมีส่วนร่วม ในช่วง 2 สัปดาห์แรก คณะผู้วิจัยลงพื้นที่ทุกวัน เพื่อเก็บข้อมูลการวิจัยเชิงพื้นที่ ทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม และเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซมีเทนด้วย GC-TCD และการทดสอบใช้งานก๊าซชีวภาพ (การจุดติดไฟ) หากจุดไม่ติดจะทำการปล่อยทิ้ง ในสัปดาห์ถัดไป คณะผู้วิจัยลงพื้นที่เพื่อติดตามการทำงานทุก ๆ 3 วัน จนครบระยะเวลา 45 วัน เพื่อเก็บข้อมูลการวิจัยเชิงพื้นที่ เช่นเดียวกับการดำเนินการช่วง 2 สัปดาห์แรก (รูปที่ 5)

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

2.5.1 ข้อมูลพื้นฐานทั่วไปและสถานะผู้เข้าร่วมการฝึกอบรมใช้สถิติค่าร้อยละ

2.5.2 ผลการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการ ประเมินผลโดยใช้มาตราส่วนประมาณค่า แบบมาตราส่วนประมาณค่า 3 ระดับ

2.5.3 สถิติค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และประมาณผลสำเร็จของโครงการโดยใช้สถิติร้อยละ



รูปที่ 5 (ก) ก๊าซชีวภาพวันที่ 15 (ข) เก็บตัวอย่างก๊าซวิเคราะห์ด้วย GC-TCD (ค) การทดสอบก๊าซจุดติดไฟ

2.6 การคำนวณปริมาตรก๊าซชีวภาพ

การวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวัน โดยการแทนที่น้ำ (Fluid Displacement Method) และคำนวณปริมาตรก๊าซชีวภาพ จากสูตร $\pi r^2 h$ เมื่อ r คือ รัศมีของถังเก็บก๊าซชีวภาพ และ h คือ ความสูงของก๊าซชีวภาพที่แทนที่ด้วยน้ำ

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการประเมินและฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการ

3.1.1 ผลการประเมินสภาพพื้นที่ศึกษา

คณะผู้วิจัยทำการศึกษาข้อมูลเชิงพื้นที่ เพื่อประเมินศักยภาพพื้นที่ทำการวิจัย ตำบลเกาะขันธ อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดนครราชสีมา มีพื้นที่ทั้งตำบลประมาณ 41.99 ตารางกิโลเมตร (คำนวณโดยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์) แบ่งเขตการปกครอง เป็น 10 หมู่บ้าน จำนวน 2,098 ครัวเรือน จำนวนประชากร 10,327 คน [7] จากการประเมินการใช้ที่ดินชุมชนตำบลเกาะขันธ เมื่อปี พ.ศ. 2555 ของกรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (รูปที่ 1) พบว่า พื้นที่ตำบลเกาะขันธมีแหล่งวัสดุเศษเหลือที่นำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะฟางข้าววัสดุ

เศษเหลือหลังจากการทำนา นอกจากนี้ในพื้นที่ของตำบลยังมีวัสดุเศษเหลืออื่น ๆ เช่น กล้วย และมะละกอ เป็นต้น นอกจากนี้เกษตรกรมีการเลี้ยงสัตว์ ได้แก่ วัว สุกร และไก่ มีมูลสัตว์เหลือทิ้ง สามารถนำมาหมักรวมได้เป็นอย่างดี ชุมชนตำบลเกาะขันธมีผู้นำที่เข้มแข็ง มีการจัดตั้งเกาะขันธโมเดลเพื่อเป็นแหล่งเรียนรู้หลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง สอดคล้องกับแผนแม่บทชุมชน ในการพัฒนาพลังงานทดแทนภายใต้โครงการ “การเพิ่มพื้นที่สีเขียวของชุมชนตำบลเกาะขันธ”

3.1.2 ผลการประเมินการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการ

การดำเนินโครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีชุดผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตร มีผู้เข้ารับการถ่ายทอด ๓ จำนวนทั้งสิ้น 44 คน (รูปที่ 6) จากการสอบถามตัวแทนผู้เข้ารับการถ่ายทอด ๓ จำนวน 20 คน ส่วนใหญ่มีช่วงอายุ 51-60 ปี คิดเป็นร้อยละ 40 รองลงมาคืออายุมากกว่า 60 ปี และ 41-50 ปี คิดเป็นร้อยละ 35 และ 25 ตามลำดับ ระดับการศึกษาของผู้ทำแบบสอบถาม พบว่า ส่วนใหญ่มีการศึกษาระดับประถมศึกษา คิดเป็นร้อยละ 65 รองลงมาคือมีการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายและตอนต้น คิดเป็นร้อยละ 25 และ 10 ตามลำดับ โดยประกอบอาชีพเกษตรกรร้อยละ 100



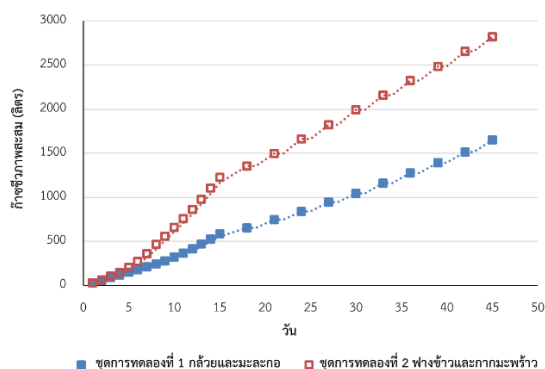
รูปที่ 6 การฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการและการทดสอบก๊าซชีวภาพในการประกอบอาหาร

ผลการดำเนินโครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีชุดผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่า ความพึงพอใจของผู้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีร้อยละ 85 ผู้เข้ารับการถ่ายทอด ๓

มีความเห็นว่าความรู้ที่ได้รับสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงร้อยละ 100 ช่วยลดรายจ่ายได้ 301-500 บาท/เดือน และน้อยกว่า 300 บาท/เดือน คิดเป็นร้อยละ 52.17 และ 47.83 ตามลำดับ

3.2 ผลการศึกษาศักยภาพของการใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือในการผลิตก๊าซชีวภาพ

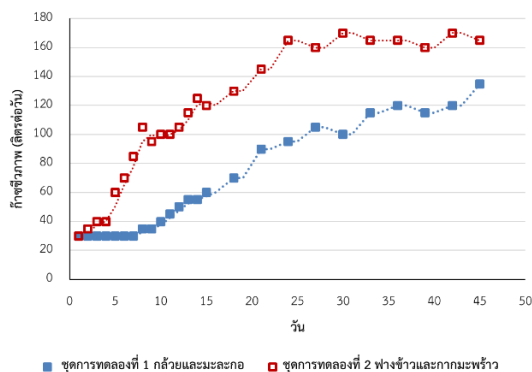
จากการดำเนินโครงการวิจัยถ่ายทอดเทคโนโลยีชุดผลิตก๊าซชีวภาพแบบชุมชนมีส่วนร่วม เป็นระยะเวลา 45 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่ 2 ใช้เวลาเริ่มต้นระบบเร็วกว่าชุดการทดลองที่ 1 โดยในช่วง 2 สัปดาห์แรก (วันที่ 15) ชุดการทดลองที่ 2 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงกว่าชุดการทดลองที่ 1 ถึง 2 เท่า และในวันที่ 45 ชุดการทดลองที่ 2 มีก๊าซชีวภาพสะสมมากกว่าชุดการทดลองที่ 1 ถึง 1.5 เท่า จากผลดังกล่าวแสดงถึงศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวและกากมะพร้าวที่ใช้เวลาเริ่มต้นระบบน้อยกว่า และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กล้วยและมะละกอเป็นวัสดุหมัก (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตร) ที่ปริมาตรหมัก 100 ลิตร ระยะเวลาเก็บ 45 วัน

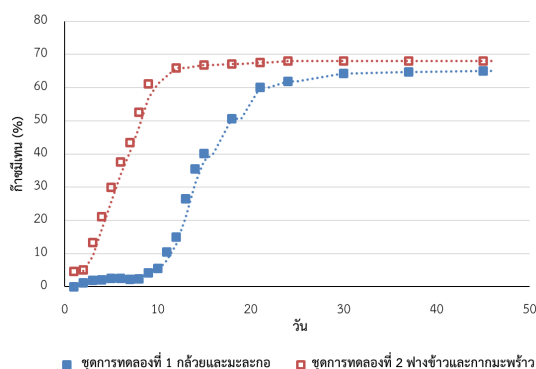
ยิ่งไปกว่านั้น การผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวและกากมะพร้าวร่วมกับมูลวัว หลังจากวันที่ 9 มีปริมาณก๊าซชีวภาพมากกว่า 100 ลิตรต่อวัน สามารถจุดติดไฟเห็นเป็นเปลวไฟสีน้ำเงิน มีองค์ประกอบก๊าซมีเทน

มากกว่าร้อยละ 60 และหลังจากวันที่ 15 ระบบมีปริมาณก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบก๊าซมีเทนคงที่ มีค่าเฉลี่ย 150 ลิตรต่อวัน และร้อยละ 67.68 ตามลำดับ ขณะที่การใช้กล้วยและมะละกอบริโภคเป็นวัสดุหมัก ต้องใช้เวลานานกว่า 21 วัน จึงจะมีองค์ประกอบก๊าซมีเทนมากกว่าร้อยละ 60 ที่ปริมาณก๊าซชีวภาพเพียง 90 ลิตรต่อวัน และจะเริ่มคงที่หลังจากวันที่ 30 ก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 120 ลิตรต่อวัน และองค์ประกอบก๊าซมีเทนเฉลี่ยร้อยละ 64.64 (รูปที่ 8-9) นอกจากนี้ จากการทดสอบการใช้งาน พบว่า ก๊าซชีวภาพ 150 ลิตร สามารถใช้ประกอบอาหารทดแทนก๊าซหุงต้ม LPG ได้ 45-60 นาที ต่อเนื่องทุกวัน เป็นเวลานานกว่า 45 วัน โดยไม่ต้องเติมวัสดุหมักใหม่เพิ่มเติม



รูปที่ 8 ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อวัน)

ที่ปริมาตรหมัก 100 ลิตร ระยะเวลาเก็บ 45 วัน



รูปที่ 9 องค์ประกอบก๊าซมีเทน (%)

ที่ปริมาตรหมัก 100 ลิตร ระยะเวลาเก็บ 45 วัน

ดังนั้น การผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวและกากมะพร้าว เป็นวัสดุหมักที่มีศักยภาพสูงกว่าเมื่อเทียบกับกล้วยและมะละกอ ในการนำประยุกต์ใช้แก่ชุมชนตำบลเกาะจันทร์ อำเภอลำลูกเกด จังหวัดนครศรีธรรมราช เนื่องจาก วัสดุหมักที่มีไขมันเป็นส่วนประกอบ จะทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซมีเทนปริมาณมากกว่าสารชีวโมเลกุลชนิดอื่น ๆ [5] การใช้กล้วยและมะละกอบริโภคเป็นวัสดุหมัก พบว่า เปลือกกล้วยมีสารฟีนอลิกที่มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ [8] ทำให้จุลินทรีย์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวเพื่อเริ่มต้นระบบที่ยาวนานกว่าปกติ ยังคงสามารถผลิตก๊าซชีวภาพที่มีคุณภาพ โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนมากกว่าร้อยละ 60 หลังจากวันที่ 21 เป็นต้นไป ในขณะที่วัสดุหมักที่เป็นฟางข้าวมีปริมาณสารยับยั้งที่น้อยกว่า จึงใช้เวลาในการเริ่มต้นระบบที่สั้นกว่า โดยวัสดุหมักที่ใช้ในทั้ง 2 ชุด เป็นวัสดุหมักที่มีโครงสร้างเชิงซ้อน จุลินทรีย์จึงสามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนได้ยาวนานกว่าระบบการหมักแบบเปียกโดยทั่วไปมาก ดังจะสังเกตได้จากการที่ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ยาวนานกว่าระบบหมักแบบเปียกโดยทั่วไป กับทั้งไม่ต้องมีการเติมวัสดุหมักใหม่เพิ่มเติม และไม่ต้องมีการกวนผสม ระบบผลิตก๊าซชีวภาพนี้จึงเป็นต้นแบบที่สามารถสร้างความยั่งยืนด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมแก่ชุมชนได้อย่างแท้จริง และยังสามารถลดภาระค่าใช้จ่ายด้านก๊าซหุงต้มแก่ชุมชนได้ร้อยละ 100

4. สรุป

การฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการถ่ายทอดชุดผลิตก๊าซชีวภาพ แก่ชุมชนตำบลเกาะจันทร์ อำเภอลำลูกเกด จังหวัดนครศรีธรรมราช มีผู้เข้ารับการถ่ายทอดเทคโนโลยี 44 ท่าน จากการอบรมทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ พบว่า ผู้เข้ารับการถ่ายทอด ๓ มีความพึงพอใจร้อยละ 85 การสร้างชุดผลิตก๊าซชีวภาพจำนวน 2 ชุด จากวัสดุหมักที่แตกต่างกัน ชุดการทดลองที่ 1 กล้วยและมะละกอ และชุดการทดลองที่ 2 ฟางข้าวและกากมะพร้าว พบว่า

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพสามารถใช้วัสดุหมักในชุมชนในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ พางข้าวและกากมะพร้าว เป็นวัสดุหมักที่มีศักยภาพสูงกว่าเมื่อเทียบกับกล้วยและมะละกอ ผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 150 ลิตรต่อวัน และมีองค์ประกอบก๊าซมีเทนร้อยละ 67.68 ตามลำดับ หลังเริ่มต้นระบบเพียง 15 วัน ขณะที่การใช้กล้วยและมะละกอเป็นวัสดุหมัก ต้องใช้เวลานานกว่า โดยก๊าซชีวภาพ 150 ลิตร สามารถใช้ประกอบอาหารได้ 45-60 นาทีต่อเนื่อง อีกทั้งระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้นาน โดยไม่ต้องเติมวัสดุหมักใหม่เพิ่มเติม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ขอขอบคุณอุทยานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ภายใต้โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน (Tech Transfer to Community) ประจำปี พ.ศ. 2563 ที่ให้การสนับสนุนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] National Statistical Office, *Thailand Annual Statistical Report: 2020*. Bangkok: National Statistical Office, Ministry of Digital Economy and Society, 2020.
- [2] Department of Internal Trade, *Thailand LPG Price: Apr. 2021*. Bangkok: Department of Internal Trade, Ministry of Commerce, 2021.
- [3] I.I.I. Ghanem, G. Gu and J. Zhu, "Leachate production and disposal of kitchen food solid waste by dry fermentation for biogas generation," *Renew. Energ.*, vol. 23, no. 3-4, pp. 673-684, Jul. 2001.
- [4] S. Kusch, H. Oechsner and T. Jungbluth, "Biogas production with horse dung in solid- phase digestion systems," *Biores. Technol.*, vol. 99, no. 5, pp. 1280-1292, Mar. 2008.
- [5] S. Laowansiri, S. Vetayasuporn, P. Kullavanijaya, R. Anuwattana and A. Kanchak, "Biogas Production from Animal Manure and Organic Waste in Community," *Clinic Technology Project Report.*, Mahasarakham, Mahasarakham University, 2011.
- [6] S.K.S. Patel, P. Kumar, S. Mehariya, H.J. Purohit, J. K. Lee and V. C. Kalia, "Enhancement in hydrogen production by co-cultures of *Bacillus* and *Enterobacter*," *Int. J. Hydrogen Energ.*, vol. 39, no. 27, pp. 14663-14668, Sep. 2014.
- [7] Community Development Department, *Koh Khan Sub-district, Cha-Uat District, Nakhon Si Thammarat Province Information: 2021*, Nakhon Si Thammarat: Community Development Department, Ministry of Interior, 2021.
- [8] W. Makkapan and P. Narkthewan, "Antibacterial activity of *Musa* (AA group) 'Kluai Leb Mu Nang' and *Musa* (ABB group) 'Kluai Hin' peel extracts against foodborne pathogens," *Khon Kaen Agr. J.*, vol. 46 Suppl. 1, pp. 1236-1241, 2018.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

The Design of Power Harvester for Passive RFID Tags

Norrarat Wattanamongkhol¹ and Chaiphan Prakaraphan^{2*}

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

² Department of Mechatronics and Robotics Engineering, Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University

¹ 169, Longhad Bangsaen Road, Saensook, Mueang, ChonBuri, Thailand 20131

² 64, Thaharn Road, Mak Khaeng, Mueang, Udon Thani, Thailand 41000

Received 29 September 2020; Revised 7 September 2021; Accepted 20 September 2021

Abstract

This paper presents the design of a power harvester for passive RFID Tags. An impedance matching circuit chooses a high-pass L network inserted between the antenna and rectifier circuit to maximize the power transferred to Tags, using an impedance transformation technique. A simple circuit including only a shunt inductance was selected as a matching. The rectifier utilizes a Self-Vth-Cancellation (SVC) circuit is an archived self-threshold voltage cancellation and self-power regulation function with a simple circuit design. An antenna is modeled as an RF source with a series impedance Z_s of 50Ω while the rectifier is modeled as a load impedance Z_L , which is estimated from the process and design parameters of the NMOS and PMOS transistors used in the SVC rectifier. As the combined circuit was simulated using input in the UHF band of 953 MHz and the devices' model of the $0.35\mu\text{m}$ CMOS technology. The simulation results were compared with the single-stage rectifier of the SVC technique in the issue of the Power Conversion Efficiency (PCE). The achieved DC output of the rectifier yields the power conversion efficiency of 43.7% at input RF power -10.22dBm while a DC output voltage of around 643.8mV and a current load of $64.4\mu\text{A}$.

Keywords: Power Harvester; Passive RFID Tag; Power Conversion Efficiency; Matching Circuit

* Corresponding Author. Tel.: +660 9566 92469, E-mail Address: chaiphan.pr@udru.ac.th

1. Introduction

Energy harvesting is the process in which energy is derived from a system's environment and converted into usable electric power. Energy harvesting allows electronics to operate where conventional power sources are not available without the need for frequent wiring or battery replacement. Energy storage from the environment is an attractive alternative to battery-operated systems. Especially for long-life electronic systems, low-power consumption, and can be self-sustaining.

An energy harvesting systems generally consist of circuits to charge the energy storage cells and manage the energy by providing control and protection. The efficiency and potential of energy storage devices are highly dependent on the efficiency and specific properties of the material. Examples of energy sources are radio energy, light, temperature differences, vibration or pressure, and even biochemically produced energy.

Nowadays, the development of power harvesting in the technology of Radio Frequency Identification (RFID) has been increasingly applied in various application domains such as security, robot, warehouse, transportation management, IT asset tracking, animal management, medical management, and others [1], [2].

The RFID technology can be seen that these devices have played a very important role in the development of economy and human.

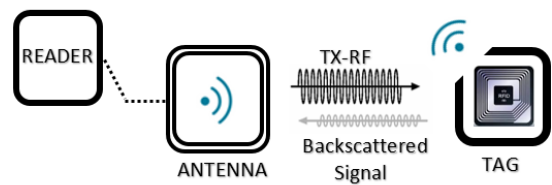


Fig. 1 RFID Systems

An RFID system consists of a reader unit and RFID tags, also called transponders, as shown in **Fig. 1**. The RFID systems use the principle of communication with the transfer of data between the reader unit and moveable objects or tags, via propagation of electromagnetic waves between a reader and tags. Tags can be divided into three type's active, semi-passive, and passive tags depending on the power for RF transmission and signal processing. Active tags need a battery to supply power for RF transmission and signal processing unit. Active tags are appropriate for applications that need to transmit data in a long-range transmission such as wireless sensor networks. However, active tag costs are high and complexly fabricated. On the other hand, an advantage of a passive tag does not need a battery. As a result, passive tags can be produced at low cost, small size, low maintenance, and high volume [3]. In between these two types, semi-passive tags need a small battery for signal processing while using the induced RF power for the transmission. **Table 1** concludes with a comparison of the RFID types [4].

Table 1 Comparison of active, semi-passive, and passive RFID tags

Limitations	Tag type		
	Active	Semi-passive	Passive
Distance of communication	Long	Moderate	Short
Incorporation of sensor	Easy	Possible	Difficult
Necessity of Battery	Require	Require	Not require
Volume	Large	Moderate	Small
Cost	High	Moderate	Low
Maintenance	Require	Require	Not require

In this paper, the passive tag was selected for implementation because of its advantages such as can be produced at low cost, small size, low maintenance, and high volume. An experiment design was used to apply and discover the main factors affecting the RFID interrogation range. The anti-collision mechanisms are applied for avoiding or solving collisions due to interference that might occur among readers and tags [5], [6].

This paper can be classified as follows: Section 2 introduces the research methodology. In Section 3, the circuit design and analysis are described by reference to the analysis of conventional NMOS-based rectifier circuits, and the conceptual design of the research. The circuit design and simulation results are proposed. Finally, Section 4 concludes the paper.

2. Research Methodology

This section explains the research methodology which can be divided into four sub-sections including a basic

theorem on communication range, motivation, a general problem in power harvester, and a problem statement, which are introduced as follows:

2.1 Communication Theorem

In general, an RFID system uses an operating frequency in the Industrial Science and Medical (ISM) band. The RFIDs can be categorized from a range of RF frequencies. HF band (13.56MHz) is coupled for power and data transfer utilizes near-field magnetic, but still has communicated distance of short-range. Therefore, a high-frequency range, such as far-field electromagnetic wave transmission, Ultra-High Frequency (UHF) band (860-960MHz) has been used more because it needs smaller antenna and can communicate in a longer range [7]. The theoretical communication range R is determined from the Friis transmission equation (1) [8]:

$$R \leq \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{EIRP_{reader} G_{tag} \eta_{rectifier}}{P_{tag}}} \quad (1)$$

Where R is the communication distance, $EIRP_{reader}$ is the “Effective Isotropic Radiated Power” of a reader unit, G_{tag} is the tag antenna gain, P_{tag} is the power required for the tag operation, and $\eta_{rectifier}$ is the Power Conversion Efficiency (PCE) of the “Radio Frequency to Direct Current” called RF-DC rectifier. From equation (1), it is obvious that they are many ways to increase the communication distance between a reader and tags.

Firstly, equation (1) can increase the reader's power which in turn increases an $EIRP_{reader}$. Secondly, can increase the antenna gain (G_{tag}). Next, attempt to reduce the power consumption of tag operations and finally, can increase the PCE of the rectifier circuit or using the impedance matching network. The power harvester unit consists of a matching network and rectifier circuit shown in **Fig. 2**.

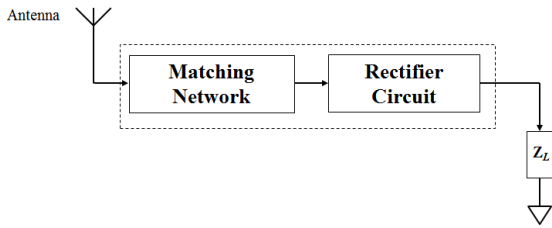


Fig. 2 Block diagram of power harvester unit

2.2 Motivation

Improving the PCE is the most important technique to increase the communication distance, refer to equation (1). Firstly, because an $EIRP_{reader}$ is usually limited by regional regulations, such as not over $4W_{EIRP}$ for the US and Japan, is the maximum transmitted power, as G_{tag} is almost determined by the allowable antenna area, such as about 1.64 for $\lambda/2$ dipole antenna [8], and P_{tag} is also determined by the functions implemented in the tag. In general, it varies from 10 to $100\mu W$, an internal block diagram of the RFID tag is shown in **Fig. 3**. The best PCE from the previous works is about 38% at a practical $EIRP_{reader}$ [9]. Moreover, the

PCE is less than 30% for most conditions. Therefore, there is room for improvement. Based on these reasons, this research is interested in improving the PCE on the power harvester units when there is a weak RF input signal.

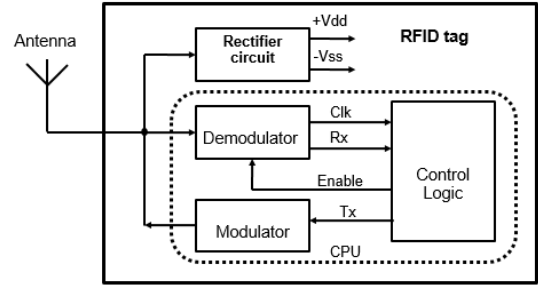


Fig. 3 Block diagram of the RFID tag

2.3 General Problem in Power Harvester Unit

As shown in **Fig. 2** and **Fig. 3**, a power harvester unit consists of a dipole antenna, matching network, and rectifier circuit. Given an antenna, designing a power harvester involves characterizing both the impedance network and the rectifier circuit in order to choose optimal parameters which lead to achieving maximum sensitivity of the circuit. Since the output impedance of the antenna is not usually match well with the input impedance of the rectifier, the matching circuit is used to maximize the power transfer from the antenna to the rectifier. The fundamental problem regarding the design of a matching circuit is the change of rectifier's input impedance due to variation of active devices' operating points. This variation is because of the changes in the RF signal level at its input and the DC load.

The rectifier's circuits convert an AC signal to a DC signal. For the rectifier in an RFID tags, the fundamental problem is two folds. Firstly, the frequency of the AC signal is very or ultrahigh. This leads to the difficulty of designing or choosing active switching devices. Secondly, the level of the input RF signal is very low. This leads to the problem of turning on the active switches and increasing the DC voltage level.

Traditionally, a voltage multiplier circuit based on multiple-stage voltage doublers [10], as shown in **Fig 4** is applied to increase the DC voltage level.

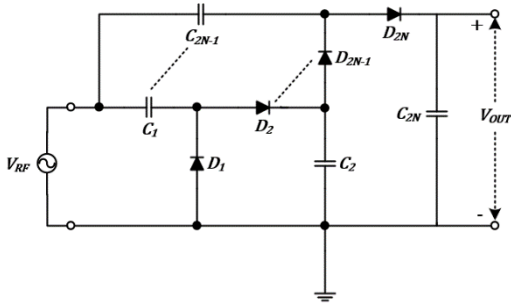


Fig. 4 An N-stage voltage doublers

For, N-stage voltage doublers, the output DC voltage is approximately obtained by equation (2) [11].

$$V_{out} = N(V_{RF} - V_{th}) \quad (2)$$

Where V_{RF} is a peak of the input RF signal and V_{th} is a threshold or turn-on voltage of the chosen switching devices. Most of the previous work has focused on designing multistage multiplier circuits. The first technique is to improve the PCE value by reducing the threshold voltage (V_{th}) of the switching devices, of

which Schottky diodes were shown to be the best choice. The other techniques used so-called V_{th} -cancellation techniques in which MOS transistors are used as switching devices. The MOS-based rectifiers are more attractive because the fabrication process is the same as that of the processing unit.

2.4 Problem Statement

The main problems of power harvester design using a V_{th} -cancellation based rectifier are (1) how to design a V_{th} -cancellation technique, and (2) how to design a maximal-power-transfer by using impedance matching. In this research, the V_{th} -cancellation based CMOS rectifier proposed by K. Kotani, et al. [8] and [9] is adopted as the rectifier part because of its strength of threshold voltage cancellation and simple design. Then, the research problem is how to design a matching circuit inserted between an antenna and the rectifier circuit.

This paper proposed a design of a power harvester for the passive RFID tags. When, an external matching unit is put on the first stage of the rectifier circuit to maximize the power delivered to a tag, as block diagram shown in **Fig. 2**. From the previous works, the focus of power harvester design for increasing PCE has been on either rectifier or matching circuits. For a rectifier, the main problem is the turn-on or threshold voltage of the diodes used in the rectifier. The differential-drive technique, called “cross-coupled bridge configuration” is proposed [9]. This circuit has completely

the largest efficiency as the differential-drive technique needs no additional diodes and external battery. However, the reported differential-drive technique is just assumed for the analysis of rectifier circuits under the condition of perfect impedance matching. With reconsider to the impedance matching with an antenna, a matching circuit needs to design so as to match this impedance to complete the largest total efficiency [10]. Therefore, in this research two interesting techniques are the Self-Vth-Cancelation (SVC) technique [8], [9] and the L-Matching technique [11], because the SVC technique is simple design when compared with the differential-drive technique, As a result, the SVC is the most advanced conventional voltage booster. The SVC, on the other hand, maintains a reverse leakage current at the high RF signal voltage range, which still affects the low voltage across the low input signal range. Therefore, this research attempts to combine the two techniques, SVC and L-Matching, due to their simplicity and optimal design with passive tags.

The challenges of this problem are two folds. Firstly, the rectifier's input impedance, which acts as the load of the matching circuit, changes due to both RF input and load impedance changes. Secondly, the designed matching circuit must be able to maximize the power transfer to the rectifier and minimize reflections from the antenna input port. In other words, the matching circuit's area can be automatic tuning, which is a challenge because it is utilized to analyze

the influence of the dynamic load on the performance of the power harvesting circuit.

3. Circuit Design and Analysis

3.1 Matching Network

The matching network functions impedance transformation to convince maximum power transfer [11] and [12]. **Fig. 5** shows the part of the impedance transformer where V_{in} and Z_{in} are the induce voltage and input impedance of the impedance transformer respectively. The part of the output side consists of the input voltage and input admittance defined by V_{IC} and Y_{IC} of the rectifier respectively.

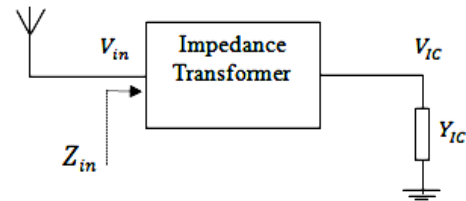


Fig. 5 The picture does not need frame

Assume the impedance transform is comprised of reactive component and lossless.

$$V_{IC} = (\sqrt{Re\{Y_{in}\}/Re\{Y_{IC}\}/2})V_{IN} \quad (3)$$

$$Re\{Y_{in}\} = (1 + Q^2)Re\{Y_{IC}\} \quad (4)$$

A quality factor of the matching network at resonating frequency is the Q variable. For a matching network used L-type topology to consider, that when a lossless network consisted of L and C , $Q = \omega_0 C / Re\{Y_{IC}\}$ was defined. Where

ω_0 is the resonate frequency. Therefore, the input of the rectifier is determined as

$$V_{IC} = (\sqrt{1 + Q^2/2})V_{IN} \quad (5)$$

A high Q is required in order to achieve a high voltage gain. Nevertheless, Q is realistically determined by the compromises between several design parameters such as characteristics of the antenna, the system bandwidth, and the input impedance of the rectifier.

3.2 Analysis of Conventional NMOS-based Rectifier Circuit

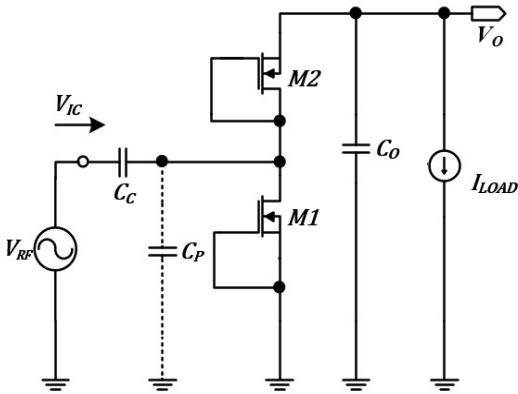


Fig. 6 Simplified model of a single-stage NMOS-Based rectifier

Fig. 6 shows the simplified model of a single-stage NMOS-Based rectifier [13]. The DC output equation of an ideal one-stage circuit for conventional NMOS rectifier is $2(V_{IC} - V_D)$, where the gate-source voltage V_D is not constant but, in actuality, determined by the drain current, the reverse bias leakage current, the parasitic components, and the body effect. Hence, the DC output voltage of

the one-stage rectifier can be expressed as

$$V_O = 2(\beta V_{IC} - V_{in} - V_{loss}) \quad (6)$$

When the value of

$$\beta = C_C / (C_P + C_C) \quad (7)$$

When C_C is the plate capacitance and C_P is the sum of parasitic capacitance at the source. The value of V_{loss} is voltage loss resulting from the current loss which is dependent on I_{LOAD} as well as the transistor reverse-biased leakage current. In consequence, for an n -stage rectifier, the output voltage can be expressed as

$$V_{O,N} = 2N(\beta V_{IC} - V_{in} - V_{loss}) \quad (8)$$

As a result, find the integrated relationship between the input power at the antenna and the output voltage of the rectifier as equation (9).

$$V_{O,N} = 2N(\beta \sqrt{2P_{\gamma} \text{Re}\{Z_{IC}\}} - V_{in} - V_{loss}) \quad (9)$$

Note that V_{loss} will increase followed by N because, with larger N , the parasitic components would cause extra losses. Thus, as N increases, the growth rate of $V_{O,N}$ drops; as a result, $V_{O,N}$ will not always increase along with N . In the other word, the resistance of the input impedance $\text{Re}\{Z_{IC}\}$ of the rectifier decreases with increasing N due to the parallel structure of the rectifier.

3.3 Conceptual Design of the Research

The concept and design of the research are arranged as follows. The act

of the SVC is described in section 3.3.1, the L-Matching selected as a matching circuit design, presented in section 3.3.2, starts with a brief on the SVC-Based CMOS rectifier circuit combined with the matching unit and continues with the design of the proposed rectifier in section 3.3.3. Simulation and results are presented and discussed in section 3.3.4, followed by conclusions in section 4.

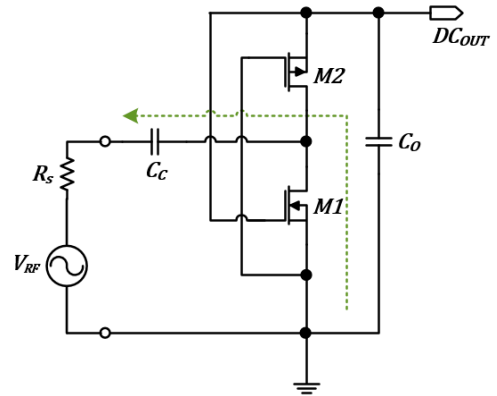
3.3.1 The SVC Rectifier Circuit

K. Kotani and T. Ito proposed [8] adapted a CMOS rectifier stage to achieve Self-V_{th}-Cancellation (SVC). The schematic shown in **Fig. 7** has an adapted rectifier circuit with SVC technique. RF input signal can model each stage of the CMOS rectifier as NMOS and PMOS transistors in parallel, of which one is in the turn-on stage for the saturation region and the other is in the turn-off stage for the cutoff region, as shown above, **Fig. 7**. A diode-connected NMOS is in the saturation region when V_{GS} , which is equal to V_{DS} , is greater than V_{th} ; else, it is cut off. Therefore, in the negative half of the signal, the transistor NMOS is in the saturation region and the transistor PMOS is cut off as shown in **Fig. 7(a)**. The opposite is true for the positive half of the signal as shown in **Fig. 7(b)**.

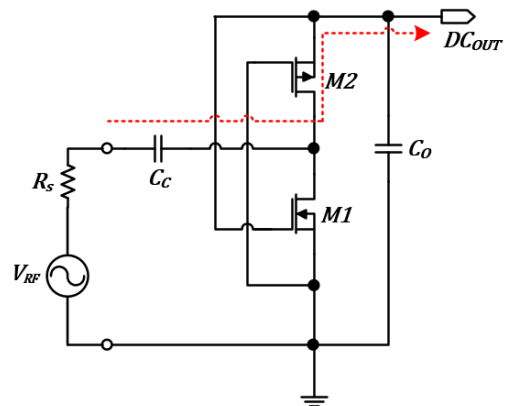
3.3.2 The Design of Matching network

The matching network functions impedance transformation to convince maximum power transfer. A very simple circuit including only a shunt inductance was selected as a matching circuit. Then,

the SVC rectifier was characterized to get all parasitic capacitances and resistances all parts as shown in **Fig 8**.



(a) Negative phase, NMOS turning on



(b) Positive phase, PMOS turning on

Fig. 7 Diode connected NMOS and PMOS (a) Negative phase (b) Positive phase

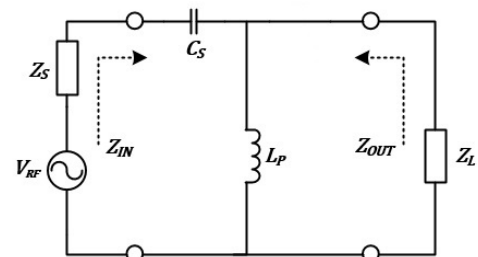


Fig. 8 Schematic of the L-Matching circuit

Fig. 8 shows the schematic of the L-Matching circuit. The aim of designing an L matching network is to deliver maximum power transfer at 953 MHz. In this design, the antenna is modeled as an RF source with internal series impedance Z_S of 50Ω . On the output side of the matching circuit, the input impedance of the rectifier is considered as the complex impedance Z_L . The lossless network with only reactive components is achieved by setting the complex output impedance of the network Z_{OUT} to be equal to the complex conjugate of the load impedance Z_L and the input impedance of the network Z_{IN} to be the complex conjugate of the source impedance Z_S calculates from equation (10), and (11).

$$Z_{IN} = Z_S^* \quad (10)$$

$$Z_{OUT} = Z_L^* \quad (11)$$

To obtain equation (10) and (11), we ignore the series resistance of the inductors and the capacitors [8], [9]. While the value of Z_{IN} , and Z_{OUT} is shown in the following equation.

$$Z_{IN} = \left((Z_L \parallel j\omega L_P) + \frac{1}{j\omega C_S} \right) \quad (12)$$

$$Z_{OUT} = \left(\left(Z_S + \frac{1}{j\omega C_S} \right) \parallel j\omega L_P \right) \quad (13)$$

For, the requirement of high Q in order to achieve a high voltage gain. However, Q is realistically determined by

the compromises between several design parameters such as characteristics of the antenna, the system bandwidth, and the input impedance of the rectifier.

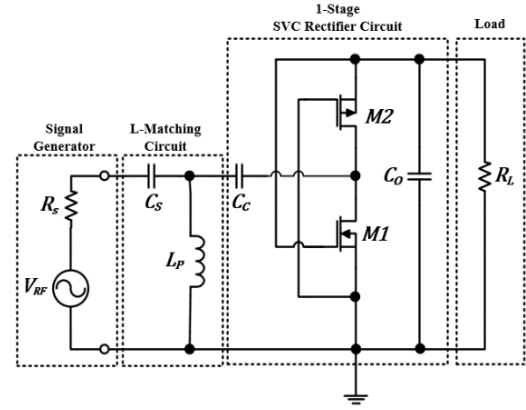


Fig. 9 Schematic of the 1-stage SVC Rectifier with L-Matching circuit

3.3.3 Proposed Circuit Design

This paper proposes a design of a power harvester for passive RFID Tags. Then, the matching unit is put on the first stage of the SVC rectifier circuit to maximize the power delivered to a tag, as the schematic shown in **Fig. 9**. From the previous works, the focus of power harvester design for increasing PCE has been on either rectifiers or matching circuits. Therefore, this research work tried to combine the two techniques, SVC rectifier, and L-Matching circuits, because of their simplicity and suitable design with passive tag.

In the first step, the value of Z_L in the matching circuit is calculated using the RF Impedance Matching Network Designer Tool to determine the matching circuit parameters [14]. An antenna is modeled as an RF source with a series

impedance Z_S of 50Ω while the rectifier has modeled as a load impedance Z_L , which is approximated from the process and design parameters of the NMOS and PMOS transistors used in the SVC rectifier. Both of these impedances are used to find optimal matching parameters of the chosen L matching circuit.

In the second step, the parameters of the rectifier circuit is taken from [8], and [9], presented by the design and fabrication of an SVC CMOS rectifier using $0.35\mu\text{m}$ CMOS 2P3M technology. Where the parameters of the SVC circuit used in the design are obtained from actual measurements of the impedance of the input rectifier's Z_{RECT} , including the coupling capacitor C_C of 4pF and the filter capacitor C_O of 7.8pF while the parameters of the L-Matching circuit can be calculated as a capacitor C_S of 0.82pF and an inductor L_P of 35.72nH .

3.3.4 Simulation Result

To estimate the proposed design, the circuit simulations using the LTspice of the Linear Technology Corporation and the Electric VLSI Design System are supported using the proposed circuit [15], [16], and [17]. The RF input voltage is set V_{IN} as the various around $380\text{mV}_{\text{rms}}$ until to $770\text{mV}_{\text{rms}}$ for the testing power delivery to load, as a summary of the power conversion efficiency (PCE %) displayed in **Table 2**.

From **Table 2**, PCE is the power conversion efficiency proposed in SVC with an L-matching circuit. Therefore,

the percentage of PCE [%] can be calculated as follows in equation (14).

Table 2 Summary of the power conversion efficiency (PCE %)

V_{IN} (mV)	P_{IN} (μW)	V_{OUT} (mV)	I_{OUT} (μA)	P_{OUT} (μW)	PCE %
380.4	6.8	31.4	3.1	0.1	1.4
484.8	34.0	236.9	23.7	5.6	16.5
581.1	94.9	643.8	64.4	41.4	43.7
611.1	250.0	783.8	78.4	61.4	24.6
648.0	463.4	862.5	86.3	74.4	16.1
690.6	697.0	918.7	91.9	84.4	12.1
737.4	976.7	963.8	96.4	92.9	9.5
769.3	1230	1000	100.4	100.9	8.2

$$\text{PCE}[\%] = \left[\frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{V_{OUT}I_{OUT}}{P_{IN}} \right] \times 100 \quad (14)$$

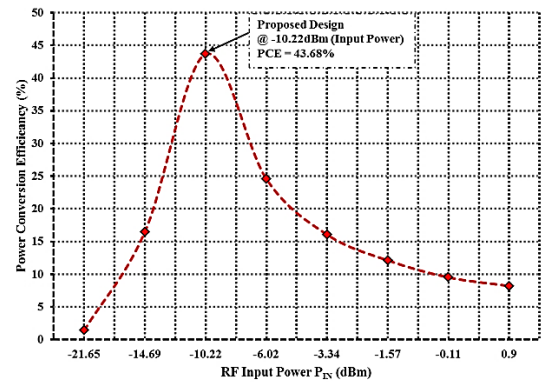


Fig. 10 Measured PCE (%) as a various RF input power

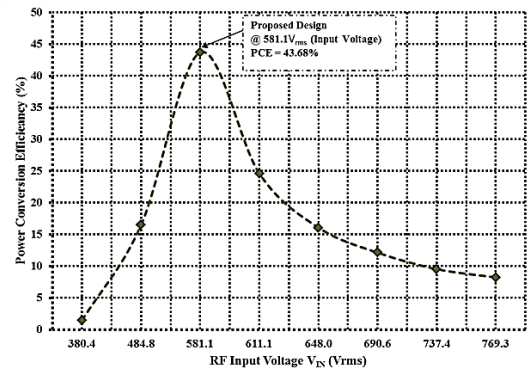


Fig. 11 Measured PCE (%) as a various RF input voltage

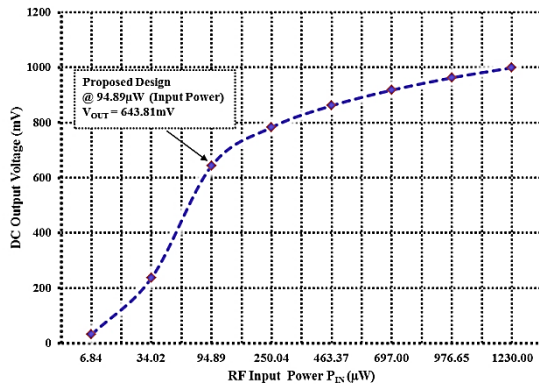


Fig. 12 Measured DC output voltage as a various RF input power

4. Conclusion

Results of the simulations are provided in **Fig. 10**, **Fig.11**, and **Fig 12**. This proposes a design procedure of a power harvester for a passive tag. The idea proposed in this research is to insert an effective L matching circuit type given that an antenna and rectifier are chosen. **Table 2** concludes the results in terms of power conversion efficiencies. The results show that DC load change has smaller effects than does the input RF power, by comparing the simulation results with the conventional SVC technique on the PCE issue. In **Table 2** and graph **Fig. 10-12**, the DC output of the rectifier yields the power conversion efficiency of 43.7% for the input RF power -10.22dBm at the output voltage of 643.8mV and the output current 64.4 μ A which corresponds to the output power of 41.4 μ W, as the load resistance connected with a 10 k Ω resistor.

5. Acknowledgement

In acknowledgment, the work has been supported by the faculty

of engineering, Burapha University Research Fund, and Grant No. 6/2560.

6. References

- [1] Finkenzeller. K, RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification, 2nd ed, New York: Wiley, 2003.
- [2] H. Wu, B. Tao, Z. Gong, Z. Yin and H. Ding, "A Standalone RFID-Based Mobile Robot Navigation Method Using Single Passive Tag," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 18, no. 4, pp. 1529–1537, Oct. 2021.
- [3] T. A. Scharfeld, "An Analysis of the Fundamental Constrains on Low Cost Passive Radio-Frequency Identification System Design," Cambridge, MA: MIT Press, 2001.
- [4] T. Umeda, H. Yoshida, S. Sekine, Y. Fujita, T. Suzuki, and S. Otaka, "A 950-MHz rectifier circuit for sensor network tags with 10-m distance," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 1, pp. 35–41, Jan. 2006.
- [5] Z. Li, "Application of Improved Anti-collision Algorithm of RFID in Warehouse Management System," in *2015 Third International Conference on Robot, Vision and Signal Processing (RVSP)*, Nov. 2015, pp. 264–267.
- [6] S. Roy, J. Bag, and S. K. Sarkar, "Design and VLSI implementation of a robot navigation processor deploying CORDIC based anti-collision algorithm with RFID technology," in *2014 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, Dec. 2014, pp. 1–6.

- [7] Mandal. S, Far Field RF Power Extraction Circuits and Systems, Cambridge, MA: MIT Press, 2004.
- [8] K. Kotani and T. Ito, "High efficiency CMOS rectifier circuit with self-V_{th}-cancellation and power regulation functions for UHF RFIDs," in *2007 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference*, Nov. 2007, pp. 119–122.
- [9] K. Kotani, A. Sasaki, and T. Ito, "High-Efficiency Differential-Drive CMOS Rectifier for UHF RFIDs," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 44, no. 11, pp. 3011–3018, Nov. 2009
- [10] U. Karthaus and M. Fischer, "Fully integrated passive UHF RFID transponder IC with 16.7- μ W minimum RF input power," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 38, no. 10, pp. 1602–1608, Oct. 2003.
- [11] A. Shameli, A. Safarian, A. Rofougaran, M. Rofougaran, and F. De Flaviis, "Power Harvester Design for Passive UHF RFID Tag Using a Voltage Boosting Technique," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 55, no. 6, pp. 1089–1097, Jun. 2007
- [12] T. H. Lee. The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits. 2nd ed. Cambridge, 2004.
- [13] S.-M. Wu, C.-Y. Lin, and I.-C. Pai, "Analysis and design of an efficient RF/DC rectifier for UHF power harvester," in *2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems*, Aug. 2010, pp. 1–4.
- [14] Analog Devices. (2021, April 20). L/C RF Impedance Matching Calculator. [Online]. Available: <https://www.analog.com>
- [15] R. J. Baker, *CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation, Second Edition*, 2nd edition. New York: Wiley-IEEE Press, 2004.
- [16] Linear Technology Corporation. (2021, April 20). Software LT SPICE IV. [Online]. Available: <https://www.analog.com>
- [17] Mosis Service. (2021, April 20). Wafer Electrical Test Data and SPICE Model Parameters. [Online]. Available: <https://cmosedu.com>

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

ทินกร เพ็งประโคน¹ กระวี ตรีอำนรรค^{1*} เทวรัตน์ ตรีอำนรรค² และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

^{1,2} 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

³ 17/1 หมู่ 6 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

รับบทความ 24 กรกฎาคม 2564 แก้ไขบทความ 7 กันยายน 2564 ตอรับบทความ 29 พฤศจิกายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการหาไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และเปรียบเทียบเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ตัวอย่างข้าวถูกบรรจุในกล่องปิดผนึกที่เติมสารละลายเกลืออิ่มตัวเพื่อใช้ควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศให้อยู่ในช่วงร้อยละ 5.32 – 84.34 โดยประมาณใช้ตู้อบลมร้อนจำลองสภาวะอุณหภูมิ 2 ค่า คือ 25 และ 70 องศาเซลเซียส ปล่อยให้ข้าวตัวอย่างเข้าสู่สมดุลความชื้นกับอากาศในกล่องจนคงที่ บันทึกค่าน้ำหนักเพื่อคำนวณเป็นความชื้นของข้าว ผลการทดลองพบว่า ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลของข้าวลดลง ซึ่งแตกต่างกับที่สภาวะอุณหภูมิเดียวกันเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลข้าวเพิ่มขึ้น การเปรียบเทียบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าการลดลงไคกำลังสอง (χ^2) ในแต่ละสภาวะอุณหภูมิพบว่า ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุด และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แบบจำลองของ Chung & Pfof มีความเหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ : ไอโซเทอมความชื้น; ข้าวขาวดอกมะลิ 105; ความชื้นสมดุล; สารละลายเกลืออิ่มตัว

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Moisture Sorption Isotherms of Khao Dawk Mali 105 Paddy

Tinnakorn Pengprakhon¹ Krawee Treeamnu^{1*} Tawarat Treeamnu²
and Nuttapong Ruttanadech³

¹ School of Mechanical engineering, Suranaree University of Technology

² School of Agricultural engineering, Suranaree University of Technology

³ Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus

^{1,2} 111 University Avenue, Muang District Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

³ 17/1 Moo 6 Chumko Pathio Chumphon, 86160, Thailand

Received 24 July 2021; Revised 7 September 2021; Accepted 29 November 2021

Abstract

The objectives of this research were the determination of sorption isotherms and the comparison of mathematical models to determine a suitable model in different temperature ranges for Khao Dawk Mali 105. This experiment was made by placing samples in containers which were contained saturated salt solutions to control the humidity in the ranges of 5.32 – 84.34 %RH and the hot air oven was used to provide temperature conditions at 25 and 70 °C. The samples were in containers until the mass of samples was constant so the equilibrium between the samples and the surrounding was reached and then the equilibrium moisture content was determined. The experiment found that for the same relative humidity in the air when the temperature increased, the equilibrium moisture content would decrease and for the same temperature in the air when the relative humidity increased, the equilibrium moisture content would increase. Furthermore, the comparison of models by analysis from R-Squared (R^2) and Chi-Square (χ^2) in each temperature found that Henderson model was a suitable model at 25 °C and Chung & Pfoest was a suitable model at 70 °C.

Keywords : Moisture Sorption Isotherms; Khao Dawk Mali 105; Equilibrium Moisture Content; Saturated Salt Solution

** Corresponding Author. Tel.: +664 224 766, E-mail Address: krawee@sut.ac.th*

1. บทนำ

ข้าว ถือเป็นธัญพืชอาหารหลักของมนุษย์มาช้านาน ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีที่ตั้งทางภูมิศาสตร์เหมาะสมต่อการเพาะปลูกข้าวทำให้สามารถผลิตข้าวไม่เพียงแต่เฉพาะเพื่อบริโภคภายในประเทศเท่านั้น แต่ยังสามารถส่งออกข้าวเพื่อไปจำหน่ายยังต่างประเทศได้อีกด้วย โดยพันธุ์ข้าวที่มีชื่อเสียงและเป็นอาหารหลักของคนไทยมาอย่างยาวนานคือข้าวหอมมะลิไทย (Khao Dawk Mali 105) ซึ่งเป็นข้าวที่มีเมล็ดมีลักษณะรูปร่างเรียวยาว เมล็ดใส มีกลิ่นหอมตามธรรมชาติ และข้าวที่หุงสุกแล้วจะมีความอ่อนนุ่มมีรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์ ทำให้เป็นที่นิยมไม่เพียงแต่เฉพาะคนไทยเท่านั้นแต่ยังรวมถึงชาวต่างชาติอีกด้วย โดยในปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกข้าวสูงถึง 1.19 ล้านตัน ซึ่งมีมูลค่ากว่า 40,999 ล้านบาท [1] ซึ่งสามารถสร้างรายได้มากมายให้แก่เกษตรกรไทยและประเทศไทย ดังนั้น ข้าวจึงเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญต่อประเทศไทยอย่างยิ่ง โดยทั่วไปแล้วผลผลิตข้าวหลังการเก็บเกี่ยวนั้นจะมีค่าความชื้นที่สูง ซึ่งความชื้นนี้ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของข้าวที่เร็วขึ้น อันเป็นสาเหตุให้ราคาจำหน่ายข้าวลดลงอีกด้วย ดังนั้นข้าวภายหลังจากการเก็บเกี่ยวจะต้องถูกนำมาลดความชื้นลงก่อนทำการเก็บรักษา โดยความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษามีค่าประมาณร้อยละ 13-14 มาตรฐานเปียก [2] การลดความชื้นในข้าวที่สำคัญและได้รับความนิยมนามากที่สุดในระดับอุตสาหกรรมคือกระบวนการอบแห้งข้าวด้วยเครื่องอบแห้งเพราะสามารถทำงานได้ทุกสภาวะอากาศและยังสามารถควบคุมความชื้นหลังการอบแห้งให้ได้ค่าตามที่ต้องการได้

กระบวนการอบแห้งข้าวเปลี่ยนนั้นมีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการอยู่หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น อัตราการป้อนข้าว ขนาดของห้องอบแห้ง อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง [4] และค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการ

ประเมินกระบวนการอบแห้งปัจจัยหนึ่ง ค่าความชื้นสมดุล คือปริมาณความชื้นที่ต่ำที่สุดที่สามารถมีอยู่ได้ในวัสดุที่อุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะแวดล้อมขณะนั้น [5] โดยค่าความชื้นสมดุลนี้เป็นส่วนหนึ่งของไอโซเทอมความชื้น (Moisture Sorption Isotherms) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลของวัสดุกับความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศ (Equilibrium Relative Humidity) ที่อุณหภูมินั้น ๆ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของวัสดุที่ลดลงที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศเรียกว่า ไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption Isotherms) และความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของวัสดุที่เพิ่มขึ้นที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศขึ้นเรียกว่า ไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption Isotherms) [6] โดยไอโซเทอมความชื้นนี้ถูกใช้ในการออกแบบกระบวนการอบแห้ง และการเลือกสภาวะที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาข้าวได้อีกด้วย [7] จากการศึกษางานวิจัยไอโซเทอมความชื้นของวัสดุต่าง ๆ เช่น ไอโซเทอมของใบกระวาน [8] การหาไอโซเทอมของใบสะระแหน่ [9] การหาไอโซเทอมของเมล็ดผักโขม [10] และการหาไอโซเทอมของข้าวฟ่างไข่มุก [11] พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวนมากได้ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าและอธิบายไอโซเทอมความชื้นของวัสดุ ซึ่งความแม่นยำในการทำนายค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิและชนิดของวัสดุที่แตกต่างกันออกไป [9] โดยพิจารณาความแม่นยำจากค่าทางสถิติที่สำคัญ ๆ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ ค่าการลดลงโคกำลังสอง งานวิจัยในปัจจุบันนักวิจัยได้ทดลองหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวชนิดต่าง ๆ หลายชนิดด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นการหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวสายพันธุ์ Lido Cultivar [12] หรือจะเป็นการหาไอโซเทอมของข้าวสายพันธุ์ Kaybonnet และ Cypress รวมไปถึงข้าวสายพันธุ์ Bengal [13] และการหาไอโซเทอมของข้าวสายพันธุ์

Baldo [14] ปัจจุบันยังไม่พบรายงานวิจัยการหาค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวเมล็ดยาวสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ของประเทศไทย มีเพียงการหาไอโซเทอมความชื้นของผลิตภัณฑ์จากข้าวหอมมะลิ ได้แก่ ข้าวพอง (Rice Cracker) [15] และ ฟลาวร์ข้าว (Rice Flours) [16] ซึ่งไอโซเทอมความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนากระบวนการผลิตโดยเฉพาะกระบวนการอบแห้งและการเก็บรักษาผลผลิต

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการทดลองหาไอโซเทอมความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้อธิบายและเปรียบเทียบเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สภาวะการเก็บรักษาทั่วไป และ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบเครื่องอบแห้งและสภาวะการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ข้าวต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L.) ซึ่งเป็นข้าวเก่าที่ผ่านการเก็บเกี่ยวมาแล้วเป็นเวลา 8 เดือน จากบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยที่ใช้ในการทดลอง ได้ถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ ข้าวขึ้นสำหรับการหาไอโซเทอมการคายความชื้น ถูกเตรียมโดยนำข้าวเปลือกไปคั้นความชื้นกลับด้วยการสเปรย์น้ำและคลุกเคล้าให้ทั่วกัน ก่อนนำไปบรรจุในถุงทึบแสงปิดสนิท จากนั้นปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ในที่อุณหภูมิต่ำ (ตู้เย็น) เพื่อให้น้ำซึมเข้าไปในเมล็ดข้าวและกลายเป็นข้าวขึ้น [18], [19] และอีกกลุ่มคือ ข้าวแห้งสำหรับการหาไอโซเทอมการดูดความชื้น ซึ่งถูกเตรียมโดยการนำข้าวเปลือกไปอบในเตาอบเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [20]

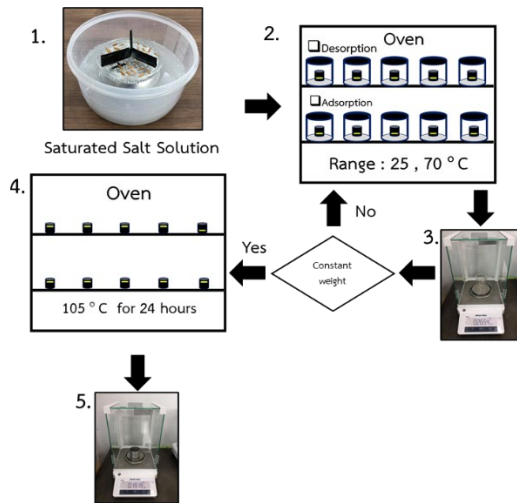
จากนั้น แบ่งข้าวออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 10 เม็ด บรรจุในภาชนะทนความร้อนแบบโปร่งแสงมีฝาปิดสนิท ปริมาตร 1,360 ลูกบาศก์เซนติเมตร [21] ใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว (Saturated Salt Solution) สำหรับควบคุมสภาวะความชื้นภายในกล่อง ซึ่งสารละลายเกลืออิ่มตัวมีคุณสมบัติในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหนือสารละลายได้ โดยสารละลายเกลืออิ่มตัวแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้ไม่เท่ากัน นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิรอบ ๆ สารละลายด้วย สำหรับการทดลองนี้ได้ใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด สำหรับสร้างสภาวะความชื้นดังตารางที่ 1 ดัดแปลงจาก [9], [17]

ตารางที่ 1 ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายในภาชนะที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว [9], [17]

Salt solution	25°C	70°C
KOH	8.23	5.32
MgCl ₂	32.78	27.77
Mg(NO ₃) ₂	52.89	-
NaCl	75.29	75.06
KCl	84.34	79.49

2.2 ขั้นตอนการทดลอง

จากรูปที่ 1 บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว (Saturated Salt Solutions) ปริมาตร 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังหมายเลข 1 ในภาชนะแล้วปิดให้สนิท นำภาชนะดังกล่าวใส่ในตู้อบลมร้อน Universal Oven รุ่น UF160 จากบริษัท Memmert เพื่อจำลองสภาวะอุณหภูมิ 2 สภาวะด้วยกันคือ 25 และ 70 องศาเซลเซียส ดังหมายเลข 2 ตัวอย่างข้าวที่อุณหภูมิและความชื้นต่างๆ จะถูกนำไปชั่งน้ำหนักทุกวัน ด้วยเครื่อง Analytical Balance ME204/M ของบริษัท Mettler Toledo (ความละเอียด 0.0001 กรัม) ดังหมายเลข 3 โดยก่อนชั่งแต่ละครั้งจะรอให้อุณหภูมิของตัวอย่างลดลง



รูปที่ 1 อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

จนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง และจะซึ่งจนกว่าน้ำหนักของข้าวจะคงที่ (มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.001 กรัม ใช้เวลาประมาณ 14-18 วัน) ซึ่งหมายถึงความชื้นในข้าวถึงจุดสมดุลแล้ว หลังจากนั้นข้าวจะถูกนำมาหาค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) โดยการนำไปอบในเตาอบเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ

105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [20] ดังหมายเลข 4 ต่อจากนั้นจึงนำข้าวแห้งมาชั่งน้ำหนัก ดังหมายเลข 5 และนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis) ดังสมการที่ (1) ดัดแปลงจาก [22]

$$M_d = \frac{w-d}{d} \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่

M_d = ค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

w = น้ำหนักเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (กรัม)

d = น้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้ง (กรัม)

สำหรับไอโซเทอมความชื้นในข้าวที่ได้จากการทดลองนั้น จะถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการสำหรับทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลในการศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 6 แบบ สำหรับใช้ทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

Model	Equation	Reference
GAB	$EMC = \frac{A \cdot B \cdot C \cdot RH}{(1 - B \cdot RH)(1 - B \cdot RH + B \cdot C \cdot RH)}$	[23]
Oswin	$EMC = A \left[\frac{RH}{(1 - RH)} \right]^B$	[24]
Henderson	$EMC = \left[\frac{\ln(1 - RH)}{-AT} \right]^{\frac{1}{B}}$	[25]
Henderson & Thompson	$EMC = \left[\frac{\ln(1 - RH)}{-A(T + B)} \right]^{\frac{1}{C}}$	[26]
Chung & Pfof	$EMC = \frac{1}{-A} \ln \left[\frac{(T + B) \ln RH}{-C} \right]$	[26]
Halsey	$EMC = \left[\frac{-A}{T \ln(RH)} \right]^{\frac{1}{B}}$	[27]

โดยที่

EMC = ค่าความชื้นสมดุลของวัสดุแบบมาตรฐาน
แห้ง (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลแห้ง)

A, B, C และ D = ค่าคงที่ของแบบจำลอง

T = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

RH = ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ทศนิยม)

ประเมินค่าความแม่นยำของสมการในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ว่าสมการใดมีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับช่วงอุณหภูมินั้นโดยพิจารณาจากค่าทางสถิติ 2 ค่า คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าการลดลงไคกำลังสอง ซึ่งสมการทางสถิติดังกล่าวมีดังนี้ [28], [29]

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{e,ex} \cdot M_{e,pred})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n M_{e,ex}^2\right) \left(\sum_{i=1}^n M_{e,pred}^2\right)}} \quad (2)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{e,ex} - M_{e,pred})^2}{N - n} \quad (3)$$

โดยที่

$M_{e,ex}$ = ความชื้นสมดุลของวัสดุที่ได้จากการทดลอง (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลแห้ง)

$M_{e,pred}$ = ความชื้นสมดุลของวัสดุที่ได้จากการทำนาย (กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมมวลแห้ง)

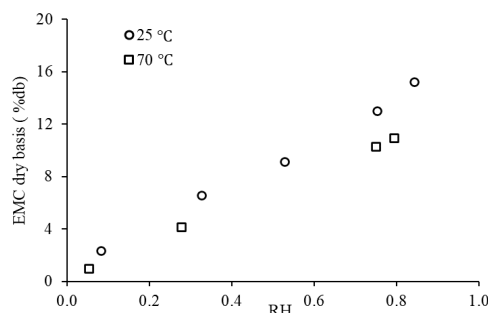
N = จำนวนค่าที่สังเกต

n = จำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง

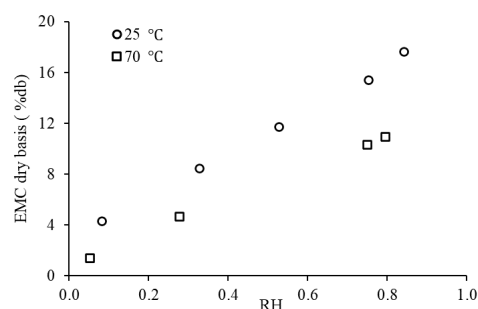
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการทดลองหาไอโซเทอมความชื้น (Moisture Sorption Isotherms) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส ในช่วงค่าความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 5.32 – 84.34 ได้

ความสัมพันธ์ของค่าไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption Isotherms) และไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption Isotherms) ในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 2 ไอโซเทอมการดูดความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 ไอโซเทอมการคายความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองในรูปที่ 2 และ 3 พบว่าที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content) ของข้าวลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลน้ำในข้าวเปลือกได้รับพลังงานเพิ่มมากขึ้นจนสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ทำให้น้ำบางส่วนระเหยออกไปสู่อากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมินั้นมีผลต่อไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือก ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้ดังกล่าว สอดคล้องกับทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ของ

ไอโซเทอมความชื้น (Moisture Sorption Isotherms) [30] และยังพบอีกว่าเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นในกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นเนื่องจากเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้ความดันไอของไอน้ำในอากาศสูงขึ้น ทำให้ไอน้ำในอากาศเกิดการถ่ายโอนเข้าสู่ข้าวเปลือกที่น้ำมีความดันไอน้ำน้อยกว่าเพิ่มมากขึ้น และสำหรับกรณีไอโซเทอมการคายความชื้นเมื่อความดันไอของไอน้ำในอากาศเพิ่มมากขึ้น ทำให้น้ำในข้าวเปลือกที่มีความดันไอน้ำต่ำกว่าถ่ายโอนออก

สู่อากาศรอบนอกได้ลดลง

จากกราฟไอโซเทอมความชื้นที่แสดงในรูปที่ 2 และ 3 จะเห็นว่าลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ได้นั้นเป็นรูปตัวเอส (S-Sigmoid) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของไอโซเทอมความชื้นสำหรับวัสดุทางการเกษตร [31]

จากผลการทดลองที่ได้ตามรูปที่ 2 และ 3 ได้ถูกนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าไอโซเทอมความชื้น โดยใช้แบบจำลองจากตารางที่ 2 ด้วยซอฟต์แวร์ทางสถิติ ได้ค่าคงที่ของแบบจำลอง, ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าการลดลงโคกำลังสอง ในแต่ละแบบจำลองได้ดังตารางที่ 3

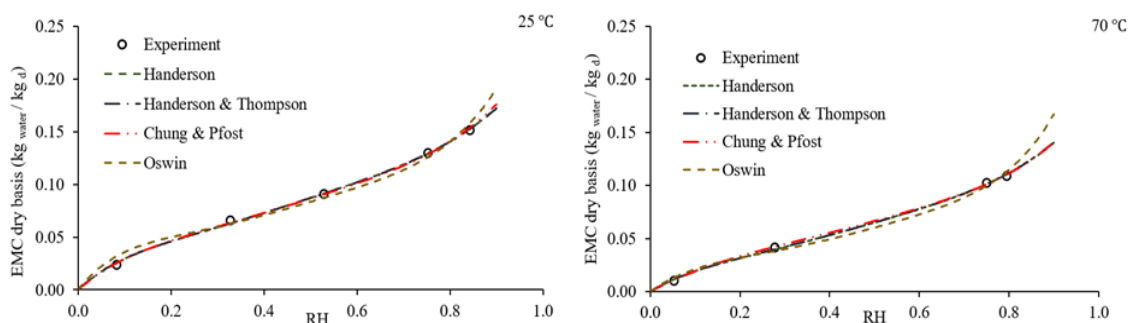
ตารางที่ 3 ค่าคงที่ และค่าทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับไอโซเทอมความชื้นในข้าวขาวดอกมะลิ 105

Model	Adsorption			Desorption		
	Constant	25 °C	70 °C	Constant	25 °C	70 °C
GAB	A	0.027	0.017	A	-0.108	0.017
	B	0.976	1.071	B	-4.359	1.067
	C	-4.073	-4.860	C	1.123	-4.527
	R ²	0.950	0.978	R ²	0.999	0.974
	χ^2	0.00131808	0.00027773	χ^2	0.00005253	0.00033150
Oswin	A	0.083	0.060	A	0.106	0.064
	B	0.379	0.467	B	0.316	0.415
	R ²	0.997	0.998	R ²	0.998	0.998
	χ^2	0.00005227	0.00003019	χ^2	0.00004041	0.00002850
Henderson	A	2.011	0.692	A	3.097	1.108
	B	1.754	1.553	B	2.149	1.766
	R ²	1.000	1.000	R ²	1.000	1.000
	χ^2	0.00000724	0.00000623	χ^2	0.00000267	0.00000546
Henderson & Thompson	A	1.925	0.682	A	2.962	1.093
	B	1.110	0.996	B	1.141	1.000
	C	1.754	1.553	C	2.149	1.766
	R ²	0.997	1.000	R ²	1.000	1.000
	χ^2	0.00001448	0.00000623	χ^2	0.00000534	0.00000546
Chung & Pfoest	A	20.988	25.323	A	20.029	26.559
	B	3.610	-32.943	B	-22.431	-35.495
	C	121.627	138.406	C	15.719	149.478
	R ²	1.000	1.000	R ²	1.000	1.000
	χ^2	0.00001017	0.00000174	χ^2	0.00002739	0.00000205
Halsey	A	0.112	0.676	A	0.081	0.466
	B	1.980	1.458	B	2.343	1.628
	R ²	0.991	0.992	R ²	0.994	0.993
	χ^2	0.00025309	0.00009211	χ^2	0.00024532	0.00009261

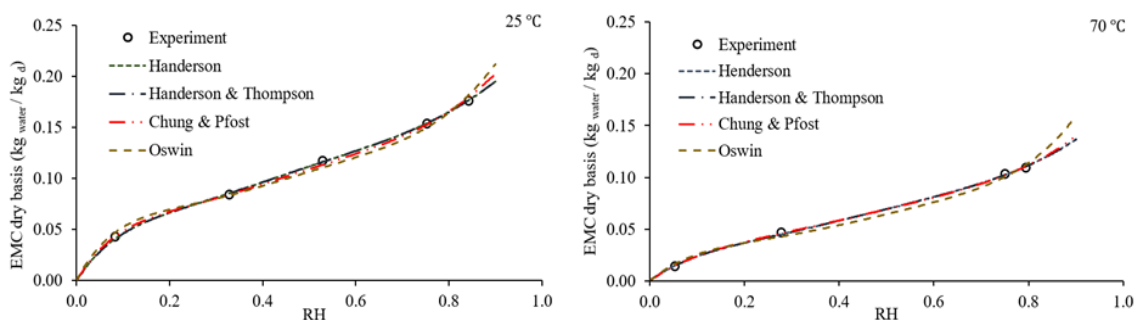
จากการแก้สมการหาค่าคงที่และค่าทางสถิติสำหรับเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นทั้ง 6 แบบคือ GAB, Oswin, Henderson, Henderson & Thompson, Chung & Pfof และ Halsey พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายค่าไอโซเทอมความชื้นได้ใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองจริง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ ค่าการลดลงไคกำลังสอง ในแต่ละแบบจำลอง โดยพบว่า กรณีไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption Isotherms) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 1.000 และ มีค่าการลดลงไคกำลังสองเท่ากับ 0.00000724 และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าแบบจำลองของ Chung & Pfof มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

เท่ากับ 1.000 และมีการลดลงไคกำลังสองเท่ากับ 0.00000174 และที่กรณีไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption Isotherms) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าแบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 1.000 และ มีการลดลงไคกำลังสองเท่ากับ 0.00000267 และ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าแบบจำลองของ Chung & Pfof มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 1.000 และ มีการลดลงไคกำลังสองเท่ากับ 0.00000205

จากตารางที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดทั้ง 4 แบบ ของแต่ละอุณหภูมิได้ถูกนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ เพื่อเทียบกับผลการทดลองจริงทั้งกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption Isotherms) และไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption Isotherms) ได้ดัง รูปที่ 4 - 5



รูปที่ 4 แบบจำลองที่ดีที่สุดของไอโซเทอมการดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส



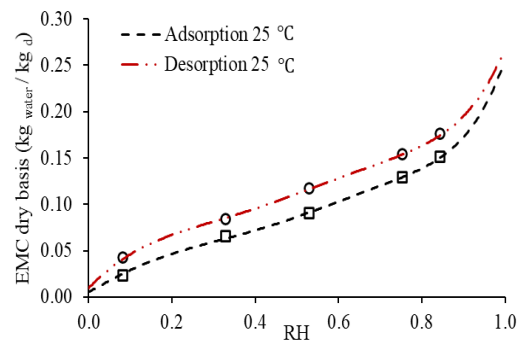
รูปที่ 5 แบบจำลองที่ดีที่สุดของไอโซเทอมการคายความชื้นที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4 - 5 พบว่าเกิดฮิสเทอรีซิส (Sorption Hysteresis) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ความแตกต่างของค่าความชื้นสมดุลระหว่างพฤติกรรมไอโซเทอมการคายความชื้นและไอโซเทอมการดูดความชื้นของวัสดุชนิดเดียวกันที่สภาวะอุณหภูมิเดียวกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เกิดจากผลของแรงแคปิลลารีระหว่างน้ำกับวัสดุที่มีรูพรุน โดยที่ไอโซเทอมการคายความชื้นมีค่าความชื้นสมดุลที่สูงกว่าไอโซเทอมการดูดความชื้นที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่สภาวะเริ่มต้นของไอโซเทอมการคายความชื้น รูพรุนในวัสดุจะเต็มไปด้วยน้ำที่ถูกดึงดูดด้วยแรงแคปิลลารีระหว่างน้ำกับวัสดุ ซึ่งการที่น้ำในรูพรุนจะระเหยออกไปได้ก็ต่อเมื่อความดันไอของน้ำในรูพรุนสูงกว่าความดันไอของอากาศรอบ ๆ วัสดุ ซึ่งแตกต่างจากกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นที่ในสภาวะเริ่มต้นรูพรุนในวัสดุนั้นว่างเปล่า ไอโซเทอมการคายความชื้นนั้นน้ำในรูพรุนของวัสดุจะระเหยออกมาได้ยากกว่ามาก เนื่องจากมีแรงแคปิลลารีดึงดูดเอาไว้จึงทำให้ในสภาวะสมดุลค่าความชื้นสมดุลของวัสดุในไอโซเทอมการคายความชื้นจึงสูงกว่าไอโซเทอมการดูดความชื้น [9]

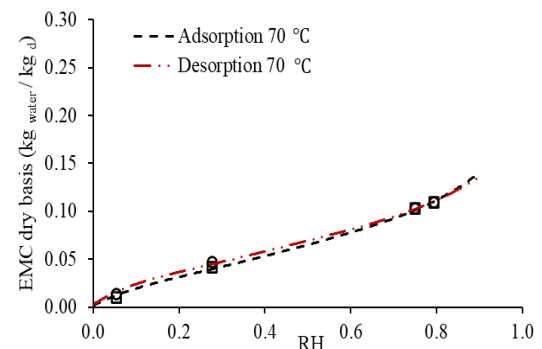
จากการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson ที่ได้จากตารางที่ 3 มาใช้ในการหาค่าไอโซเทอมความชื้นทั้งกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นและไอโซเทอมการคายความชื้นในแต่ละอุณหภูมิ เพื่อทำการศึกษาปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิส ของแต่ละอุณหภูมิพร้อมกับแสดงผลการทดลองจริงประกอบ ทั้งกรณีไอโซเทอมการดูดความชื้นและไอโซเทอมการคายความชื้นได้ผลดังรูปที่ 6 และ 7

จากรูปที่ 6 และ 7 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดฮิสเทอรีซิสลดลง สังเกตได้จากช่องว่างระหว่างไอโซเทอมการคายความชื้นและไอโซเทอมการดูดความชื้นของวัสดุที่ลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำภายในรูพรุนของวัสดุที่ถูกดึงดูดไว้ด้วยแรงแคปิลลารี

ได้รับพลังงานเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความดันไอของน้ำในรูพรุนเพิ่มขึ้นจนมากกว่าความดันของอากาศรอบ ๆ ทำให้น้ำในรูพรุนระเหยออกมาจากวัสดุเพิ่มมากขึ้นจนทำให้ค่าความชื้นสมดุลของวัสดุลดลง จากผลการทดลองที่ได้นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ [11], [32]-[35] ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวนี้ จะเห็นว่าอุณหภูมินั้นมีผลต่อปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิสอย่างชัดเจน



รูปที่ 6 การเกิดฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7 การเกิดฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

4. สรุป

จากการหาไอโซเทอมความชื้นของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 25 และ 70 องศาเซลเซียส ในช่วงค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับร้อยละ 5.32 – 84.34 พบว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อค่าไอโซเทอมความชื้น โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้

ค่าความชื้นสมดุลลดลงที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกัน และ จากการแก้สมการหาค่าคงที่ และ หาค่าทางสถิติ 2 ค่า คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าการลดลงไคกำลังสอง สำหรับเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายค่าไอโซเทอมความชื้น พบว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสแบบจำลองของ Henderson มีความเหมาะสมที่สุด และ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แบบจำลองของ Chung & Pfof มีความเหมาะสมที่สุด นอกจากนั้นยังพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดฮีสเทอรีซิส โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดฮีสเทอรีซิสลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Thai Rice Exporters Association. "Rice Export Quantity and Value : 2020." http://www.thairiceexporters.or.th/statistic_2020.html (accessed 20 May 2021)
- [2] D. W. Hall, *Handling and storage of food grains in tropical and subtropical areas* (no. 90). Food & Agriculture Org., 1970.
- [3] Department of International Trade Promotion. "12th The Rice Trader World Rice Conference." https://www.ditp.go.th/korea/ewt_news.php?nid=762&filename=foreignbuyer (accessed 20 May 2021).
- [4] C. Nimmol and S. Devahastin, "Evaluation of performance and energy consumption of an impinging stream dryer for paddy," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 14-15, pp. 2204-2212, 2010.
- [5] U. Shivhare, S. Arora, J. Ahmed, and G. Raghavan, "Moisture adsorption isotherms for mushroom," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 37, no. 1, pp. 133-137, 2004.
- [6] A. Al-Muhtaseb, W. McMinn, and T. Magee, "Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review," *Food and bioproducts processing*, vol. 80, no. 2, pp. 118-128, 2002.
- [7] O. Oyelade, T. Tunde-Akintunde, J. Igbeke, M. Oke, and O. Raji, "Modelling moisture sorption isotherms for maize flour," *Journal of Stored Products Research*, vol. 44, no. 2, pp. 179-185, 2008.
- [8] N. Ouafi, H. Moghrani, N. Benaouada, N. Yassaa, R. Maachi, and R. Younsi, "Moisture sorption isotherms and heat of sorption of Algerian bay leaves (*Laurus nobilis*)," *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 17, no. 4, pp. 759-772, 2015.
- [9] S. P. C. Andrade and O. Hensel, "Experimental determination and mathematical fitting of sorption isotherms for Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.)," *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 139-145, 2013.
- [10] A. M. Pagano and R. H. Mascheroni, "Sorption isotherms for amaranth grains," *Journal of Food Engineering*, vol. 67, no. 4, pp. 441-450, 2005.

- [11] A. L. D. Goneli, P. C. Corrêa, G. H. H. De Oliveira, C. F. Gomes, and F. M. Botelho, "Water sorption isotherms and thermodynamic properties of pearl millet grain," *International journal of food science & technology*, vol. 45, no. 4, pp. 828-838, 2010.
- [12] A. Iguaz and P. Virseda, "Moisture desorption isotherms of rough rice at high temperatures," *Journal of Food Engineering*, vol. 79, no. 3, pp. 794-802, 2007.
- [13] J. Fan, T. Siebenmorgen, and B. Marks, "Effects of variety and harvest moisture content on equilibrium moisture contents of rice," *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 16, no. 3, p. 245, 2000.
- [14] H. Toğrul and N. Arslan, "Moisture sorption behaviour and thermodynamic characteristics of rice stored in a chamber under controlled humidity," *Biosystems Engineering*, vol. 95, no. 2, pp. 181-195, 2006.
- [15] U. Siripatrawan and P. Jantawat, "Determination of moisture sorption isotherms of jasmine rice crackers using BET and GAB models," *Food Science and Technology International*, vol. 12, no. 6, pp. 459-465, 2006.
- [16] T. Suwonsichon, P. Pongpangan, P. Chompreeda, and V. Haruthaithanasan, "Application of mathematical models to predict moisture sorption isotherm of rice flours," in *Proceedings of the 39th Kasetsart University Annual Conference: Fisheries, Agro-Industry*, Bangkok (Thailand), 2001, Bangkok (Thailand): Ministry of University Affairs.
- [17] L. Greenspan, "Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions," *Journal of research of the national bureau of standards*, vol. 81, no. 1, pp. 89-96, 1977.
- [18] T. Abe and T. Afzal, "Thin-layer infrared radiation drying of rough rice," *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 67, no. 4, pp. 289-297, 1997.
- [19] N. Saelim, "Continuous flow paddy drying with infrared radial radiation technique," Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 2017.
- [20] O. AOAC, "Official Methods of Analysis," *Association of Official Analytical Chemists*, Arlington, VA, 1990.
- [21] G. Bingol, B. Prakash, and Z. Pan, "Dynamic vapor sorption isotherms of medium grain rice varieties," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 48, no. 2, pp. 156-163, 2012.
- [22] A. K. Bejar, N. B. Mihoubi, and N. Kechaou, "Moisture sorption isotherms—Experimental and mathematical investigations of orange (*Citrus sinensis*) peel and leaves," *Food Chemistry*, vol. 132, no. 4, pp. 1728-1735, 2012.

- [23] S. Lahsasni, M. Kouhila, and M. Mahrouz, "Adsorption-desorption isotherms and heat of sorption of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*)," *Energy Conversion and Management*, vol. 45, no. 2, pp. 249-261, 2004.
- [24] F. Román and O. Hensel, "Sorption isotherms of celery leaves (*Apium graveolens* var. *secalinum*)," *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 12, no. 3-4, pp. 137-141, 2010.
- [25] M. Barrozo, A. Silva, and D. Oliveira, "The use of curvature and bias measures to discriminate among equilibrium moisture equations for mustard seed," *Journal of Stored Products Research*, vol. 44, no. 1, pp. 65-70, 2008.
- [26] D. Cordeiro, G. Raghavan, and W. Oliveira, "Equilibrium moisture content models for *Maytenus ilicifolia* leaves," *Biosystems Engineering*, vol. 94, no. 2, pp. 221-228, 2006.
- [27] A. M. Goula, T. D. Karapantsios, D. S. Achilias, and K. G. Adamopoulos, "Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp," *Journal of Food Engineering*, vol. 85, no. 1, pp. 73-83, 2008.
- [28] D. Jain and P. B. Pathare, "Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices," *Biosystems Engineering*, vol. 89, no. 3, pp. 289-296, 2004.
- [29] G. Sharma, R. Verma, and P. Pathare, "Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices," *Journal of food engineering*, vol. 71, no. 3, pp. 282-286, 2005.
- [30] M. Hossain, B. Bala, M. Hossain, and M. Mondol, "Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple," *Journal of Food Engineering*, vol. 48, no. 2, pp. 103-107, 2001.
- [31] S. Brunauer, L. S. Deming, W. E. Deming, and E. Teller, "On a theory of the van der Waals adsorption of gases," *Journal of the American Chemical society*, vol. 62, no. 7, pp. 1723-1732, 1940.
- [32] N. Aviara, O. Ajibola, O. Aregbesola, and M. Adediji, "Moisture sorption isotherms of sorghum malt at 40 and 50 C," *Journal of stored products research*, vol. 42, no. 3, pp. 290-301, 2006.
- [33] R. C. Campos, P. C. Corrêa, L. S. Fernandes, F. M. Baptestini, C. F. Costa, and J. D. Bustos-Vanegas, "Bean grain hysteresis with induced mechanical damage," *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 20, no. 10, pp. 930-935, 2016.
- [34] A. L. Goneli, P. C. Corrêa, G. H. de Oliveira, O. Resende, and M. Mauad, "Moisture sorption isotherms of castor beans. Part 1: Mathematical modeling and hysteresis," *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 20, no. 8, pp. 751-756, 2016.

- [35] S. J. F. d. Souza, A. I. Alves, É. N. R. Vieira, J. A. G. Vieira, A. M. Ramos, and J. Telis-Romero, "Study of thermodynamic water properties and moisture sorption hysteresis of mango skin," *Food Science and Technology*, vol. 35, no. 1, pp. 157-166, 2015.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

สมบัติกายภาพและอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน¹ กระวี ตรีอำรรค^{1*} เทวรัตน์ ตรีอำรรค² และ ณัฐพงศ์ รัตนเดช³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

^{1,2} 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

³ 17/1 หมู่ 6 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

รับบทความ 26 กรกฎาคม 2564 แก้ไขบทความ 22 กันยายน 2564 ตอรับบทความ 29 พฤศจิกายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาค่าสมบัติกายภาพและสมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นต่างกัน ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดสอบถูกเตรียมให้มีค่าความชื้นแตกต่างกันในช่วง 10 – 26 %WB (ฐานเปียก) และแปรค่าอุณหภูมิของอากาศในช่วง 50 ถึง 100 องศาเซลเซียส สำหรับการทดสอบหาค่าสมบัติอากาศพลศาสตร์ วิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติด้วยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าความชื้นข้าวเปลือกมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยความยาว ความกว้างและความหนาของเมล็ดข้าวเปลือกมีความแตกต่างกัน และเป็นผลให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลมมีความแตกต่าง การเพิ่มขึ้นของระดับความชื้นข้าวเปลือกส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเชิงกลุ่มและเชิงเมล็ดเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ความพรุนลดลง ระดับความชื้นของข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วสุดท้าย ระดับความชื้นข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก

คำสำคัญ : ความชื้น; สมบัติอากาศพลศาสตร์; สมบัติกายภาพ; ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Physical and Aerodynamics Properties of Khao Dawk Mali 105 Paddy Rice

Thamarat Yabsungnoen¹ Krawee Treeamnuk^{1*} Tawarat Treeamnuk²
and Nuttapong Ruttanadech³

¹ School of Mechanical engineering, Suranaree University of Technology

² School of Agricultural engineering, Suranaree University of Technology

³ Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus

^{1,2} 111 University Avenue, Muang District Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

³ 17/1 Moo 6 Chumko Pathio Chumphon, 86160, Thailand

Received 26 July 2021; Revised 22 September 2021; Accepted 29 November 2021

Abstract

This research objective was to determine physical and aerodynamics properties of Khao Dawk Mali 105 paddy (Thai Jasmine paddy rice). The paddy sample in this test was prepared with different moisture contents in the range of 10-26 %WB and air temperature in aerodynamics properties test was varied in the range of 50–100 °C. Test results were analyzed to determine the statistical mean difference by DMRT method (at $P < 0.05$). It found that moisture content in paddy affects the difference of average length, width, and thickness of grain and results the difference of geometric mean diameter and degree of sphericity of paddy. An increase in paddy moisture results the increase of average bulk density and kernel density but it reduces the porosity of paddy. Moisture content in paddy affects the difference of terminal velocity. Moisture content in paddy and air temperature influenced the difference of average drag coefficient of paddy.

Keywords : Moisture Content; Aerodynamics Properties; Physical Properties; Khao Dawk Mali 105 Paddy Rice

** Corresponding Author. Tel.: +664 4224 766, E-mail Address: krawee@sut.ac.th*

1. บทนำ

ข้าว (*Oryza sativa*) เป็นพืชอาหารที่นิยมปลูกมากในทวีปเอเชียและอาจมีการเพาะปลูกบางส่วนในทวีปอื่น ข้าวถือเป็นอาหารหลักของคนเอเชียในหลายประเทศ สำหรับประเทศไทยข้าวเป็นอาหารหลักที่มีพื้นที่เพาะปลูกมากที่สุด ในปี 2563 ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกข้าวเป็นอันดับที่ 1 ในภูมิภาคอาเซียนปริมาณ 7.5 ล้านตัน [1] ดังนั้นแล้วข้าวจึงถือเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยโดยเฉพาะข้าวหอมมะลิถือเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคต่างชาติภายหลังการเก็บเกี่ยว ผลผลิตเกษตรกรจำเป็นต้องผ่านกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยว (Post-Harvest Processing) กระบวนการนี้ประกอบไปด้วยวิธีการและเครื่องจักรกลเกษตรโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะเวลาการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพื่อการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งการออกแบบเครื่องจักรกลเหล่านี้จำเป็นต้องทราบข้อมูลสมบัติกายภาพและสมบัติอากาศพลศาสตร์ของผลผลิตเกษตร สมบัติดังกล่าวนี้สำหรับข้าวเปลือกประกอบไปด้วย รูปร่าง ขนาด มวล ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (Bulk Density) ความหนาแน่นเชิงเมล็ด (Kernel Density) ความพรุน (Porosity) ค่าความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) และค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล (Drag Coefficient) ค่าเหล่านี้ล้วนเป็นข้อมูลที่สำคัญในการพัฒนากระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือก เช่น รูปร่างและขนาดของเมล็ดถูกใช้ในการออกแบบเครื่องคัดแยกสิ่งเจือปน ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ดและค่าความพรุนของเมล็ดเป็นข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบระบบเติมและระบายอากาศ (Aeration System) ในขณะเก็บรักษา [7], [13] ค่าความเร็วสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลถูกใช้ในการออกแบบระบบการไหลของอากาศและระบบคัดแยกซึ่งรวมถึงการเลือกขนาดเครื่องเป่าลม [4] ซึ่งค่าทั้งหมดดังกล่าวนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อ

อุตสาหกรรมการผลิตข้าว ปัจจัยประการสำคัญที่ส่งผลต่อค่าสมบัติกายภาพและอากาศพลศาสตร์คือความชื้นในผลผลิต [9] สำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นผลผลิตข้าวที่สำคัญของไทย การศึกษาสมบัติกายภาพดังกล่าวนี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

จากความสำคัญดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาสมบัติกายภาพและสมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นแตกต่างกัน โดยทำการทดสอบหาสมบัติกายภาพได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต ค่าความกลม ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ด ความพรุนของเมล็ด และทดสอบหาสมบัติอากาศพลศาสตร์ได้แก่ ค่าความเร็วสุดท้ายและค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของข้าวเปลือกในอากาศที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน

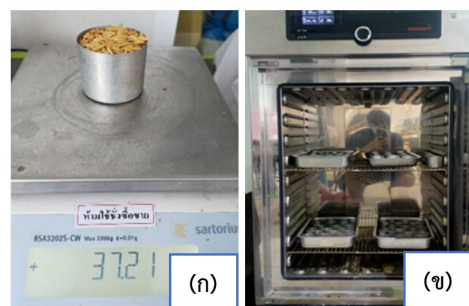
2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างข้าว

ในการทดลองนี้ใช้ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 จากจังหวัดนครราชสีมา ฤดูกาลเพาะปลูก 2562 โดยทำการแยกวัสดุเจือปนรวมถึงเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์ด้วยเครื่องทำความสะอาดเมล็ดพันธุ์ ยี่ห้อ LA-LS รุ่น SEEDB-RO

2.1.1 การหาความชื้นเริ่มต้นในข้าว

หาความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกด้วยวิธี Oven Drying Method [2]



รูปที่ 1 ก) การชั่งน้ำหนักเพื่อหามวลเริ่มต้น ข) การอบตัวอย่างด้วยเครื่องอบแห้งมาตรฐาน

โดยชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกด้วยตาชั่ง (ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น ME204 ความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม รูปที่ 1ก) ก่อนและหลังทำการอบแห้ง ด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยตู้อบลมร้อน (รูปที่ 1ข ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ MEMMERT รุ่น UF160 ความจุ 160 ลิตร) คำนวณค่าความชื้นฐานเปียก (Wet Basis, %WB) จากสมการที่ (1)

$$M_w = \frac{(w-d)}{w} \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่

M_w = เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก

w = มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น (กรัม)

d = มวลแห้งเมล็ดข้าวเปลือกหลังอบ (กรัม)

2.1.2 การกำหนดความชื้นในข้าวเปลือก

แปรค่าความชื้นของข้าวเปลือกออกเป็น 5 ระดับ คือ 10 14 18 22 และ 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ด้วยการเติมน้ำกลับสู่ข้าวเปลือก (Rewet) โดยปริมาณน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) [2] ด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำที่คำนวณได้ลงบนกองข้าวเปลือก จากนั้นคลุกเคล้าข้าวเปลือกให้ทั่วกัน บรรจุในภาชนะที่บดแสงแล้วเก็บรักษาในห้องเย็นอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [15] เป็นอย่างน้อยก่อนทำการทดสอบ

$$W_2 = W_1 \times \frac{[M_1 - M_2]}{[100 - M_1]} \quad (2)$$

โดยที่

W_2 = ปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไป (กรัม)

W_1 = มวลของข้าวเปลือกที่ต้องการกำหนดความชื้นใหม่ (กรัม)

M_1 = เปอร์เซ็นต์ความชื้นสุดท้ายฐานเปียกที่ต้องการ

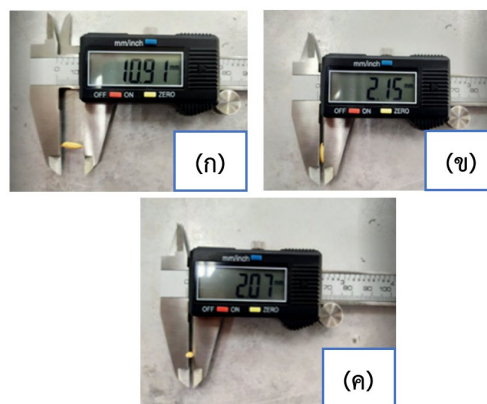
M_2 = เปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้นฐานเปียก

ก่อนทำการทดสอบจะต้องนำข้าวเปลือกมาทิ้งไว้ให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องก่อนโดยยังไม่เปิดฉีกถุง [8] แล้วจึงทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของข้าวเปลือกที่แต่ละความชื้นดังนี้

2.2 การทดสอบเพื่อหาค่าสมบัติกายภาพของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

2.2.1 การหาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต และระดับความกลม (Geometric Mean Diameter, Degree of Sphericity)

ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (D) และค่าระดับความกลม (ϕ) คำนวณด้วยสมการที่ (3) และ 4 ตามลำดับ [9] โดยทำการสุ่มตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกจำนวน 50 เมล็ด จากข้าวเปลือกแต่ละระดับความชื้นทั้ง 5 ระดับความชื้นที่เตรียมไว้ นำมาวัดความกว้าง ความยาว และความหนาของเมล็ดด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ (Digital Caliper Vernier Gauge 0-150 มิลลิเมตร) ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 การวัดขนาด ก) ความยาว ข) ความกว้าง และ ค) ความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก

$$D = (LWT)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{(LWT)^{\frac{1}{3}}}{L} \times 100\% \quad (4)$$

โดยที่

L = ความยาวของเมล็ด (มิลลิเมตร)

W = ความกว้างของเมล็ด (มิลลิเมตร)

T = ความหนาเมล็ด (มิลลิเมตร)

ϕ = ระดับความกลม (ร้อยละ)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (มิลลิเมตร)

2.2.2 ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความพรุน และความหนาแน่นเชิงเมล็ด (Bulk Density, Porosity and Kernel Density)

ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม หาได้จากการชั่งน้ำหนักของเมล็ดข้าวเปลือกที่บรรจุในภาชนะที่ทราบปริมาตรแน่นอน (รูปที่ 3) คำนวณค่าตามสมการที่ (5) ทำการทดสอบซ้ำ 5 ซ้ำ ทุกระดับความชื้นจนครบทั้ง 5 ระดับ



รูปที่ 3 การหาความหนาแน่นเชิงกลุ่ม

$$\rho_b = \frac{M_p}{V} \quad (5)$$

โดยที่

ρ_b = ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

M_p = มวลของข้าวเปลือก (กิโลกรัม)

V = ปริมาตรของภาชนะบรรจุ (ลูกบาศก์เมตร)

ค่าความพรุน หาค่าได้จากการแทนที่อากาศด้วยอุปกรณ์ดังรูปที่ 4 โดยบรรจุเมล็ดข้าวเปลือกลงในโหลแก้วจนเต็ม จากนั้นนำไปต่อเข้ากับอุปกรณ์โดยขวดที่ 1 เป็นขวดเปล่า เริ่มการทดสอบโดยเปิดปั๊มสูบน้ำอากาศ

ในระบบออกจนขวดที่ 1 และ 2 มีความดันเป็นสุญญากาศ จากนั้นปิดวาล์ว 1 และวาล์ว 2 แล้วจึงเปิดวาล์ว 3 เพื่อให้อากาศภายนอกไหลเข้าสู่ขวดที่ 1 ทำการปิดวาล์ว 3 อ่านค่าความดัน P_1 แล้วจึงเปิดวาล์ว 2 เพื่ออ่านค่าความดัน P_2 ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้งในแต่ละความชื้นแล้วคำนวณค่าความพรุนด้วยสมการที่ (6) [6]



รูปที่ 4 การทดสอบค่าความพรุน

$$\varepsilon = \frac{(P_1 - P_2)}{P_2} \times 100\% \quad (6)$$

โดยที่

P_1 = ความดันของอากาศก่อนการถ่ายเทไปยังขวดบรรจุเมล็ด (ปาสคาล)

P_2 = ความดันของอากาศหลังการถ่ายเทไปยังขวดบรรจุเมล็ด (ปาสคาล)

ความหนาแน่นเชิงเมล็ด คำนวณได้จากสมการที่ (7) [9]

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_k} \right) \times 100\% \quad (7)$$

โดยที่

ε = เปอร์เซนต์ความพรุนของเมล็ด

ρ_b = ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ_k = ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ด (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

2.2.3 การทดสอบหาค่าสมบัติอากาศพลศาสตร์ของ ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

ค่าความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) คือค่าความเร็วลมในท่อที่สามารถทำให้วัตถุเกิดการลอยตัวแบบ Suspension ได้ หาได้จากการทดสอบการลอยตัวของเมล็ด [9], [16] ดังรูปที่ 5 ใช้ตัวอย่างข้าวเปลือกจำนวน 10 เมล็ด [17] ในการทดสอบ เนื่องจากท่อชุดทดสอบที่ใช้มีขนาดเล็กและหากใช้ข้าวปริมาณมากเมล็ดข้าวจะเคลื่อนไปชิดผนังท่อและไม่สามารถลอยตัวขึ้นได้ ทำให้สังเกตการทดสอบได้ยาก นำเมล็ดข้าวตัวอย่างมาบรรจุไว้ในท่ออะคริลิก จากนั้นบ่อนอากาศร้อนจากฮีตเตอร์ด้วยพัดลมเข้าสู่ท่อแนวตั้งจากด้านล่าง โดยควบคุมอุณหภูมิอากาศด้วย PID Electronic Temperature Controller (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.073 เมตร ความยาว 0.410 เมตร) ปรับเพิ่มความเร็วลมจนสังเกตเห็นเมล็ดข้าวเปลือกเริ่มลอยตัวขึ้น วัดความเร็วลมขณะนั้นด้วย Anemometer ความละเอียด 0.1 เมตรต่อวินาที ทำการทดสอบกับข้าวทั้ง 5 ระดับความชื้น (10 14 18 22 และ 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก) และที่แต่ละความชื้นทำการแปรค่าอุณหภูมิอากาศออกเป็น 4 ระดับ คือ 70 80 90 และ 100 องศาเซลเซียส และทำการทดสอบซ้ำ 3 ซ้ำต่อ 1 สภาวะการทดลอง

ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล (Drag Coefficient) หาได้จากค่าความเร็วลมสุดท้าย โดยการคำนวณจากสมการที่ (8) [9], [11]

$$C_d = \frac{2Mg}{\rho_A A_f V_t^2} \quad (8)$$

โดยที่

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล

M = มวลของเมล็ดข้าวเปลือก (กิโลกรัม)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับ 9.81 (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

V_t = ค่าความเร็วสุดท้าย (เมตรต่อวินาที)

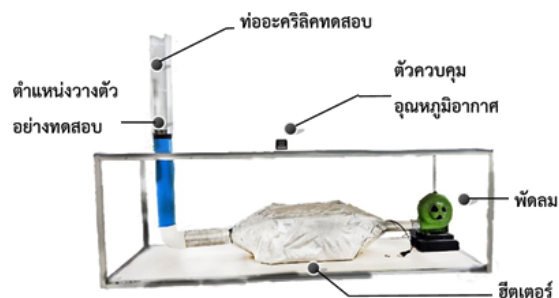
ρ_A = ความหนาแน่นอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

A_f = พื้นที่หน้าตัดของเมล็ด (Frontal Area) (ตารางเมตร) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (9)

$$A_f = \frac{\pi}{4} L_1 L_2 \quad (9)$$

โดยที่ L_1 และ L_2 คือ ความยาวที่มากที่สุดสองอันดับแรกของเมล็ดข้าวเปลือก (เมตร)

วิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยสถิติเพื่อหาค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



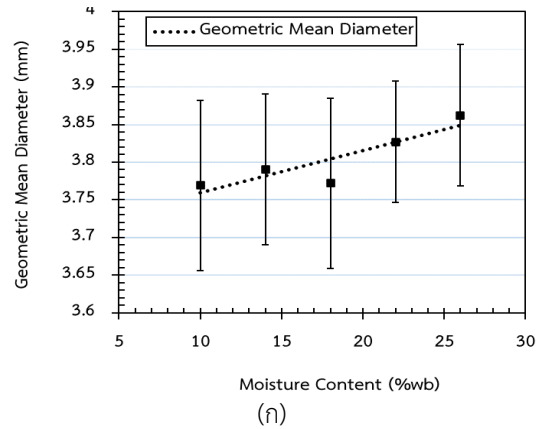
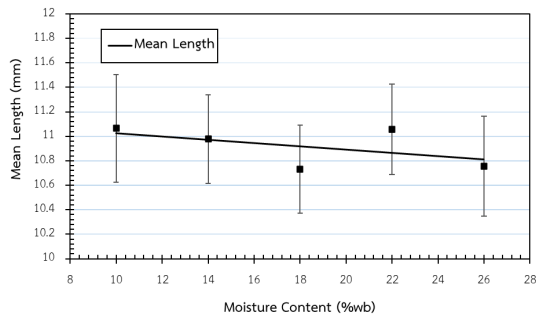
รูปที่ 5 การทดสอบหาค่าความเร็วสุดท้ายและสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

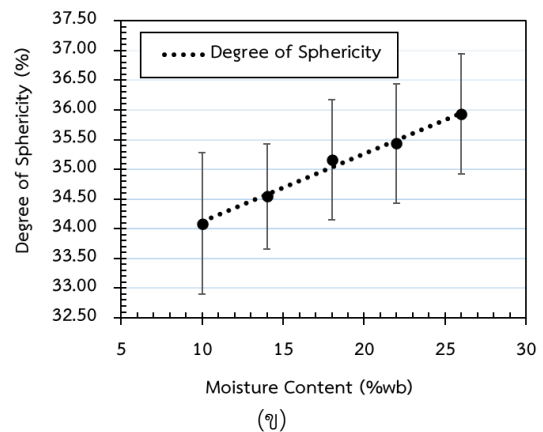
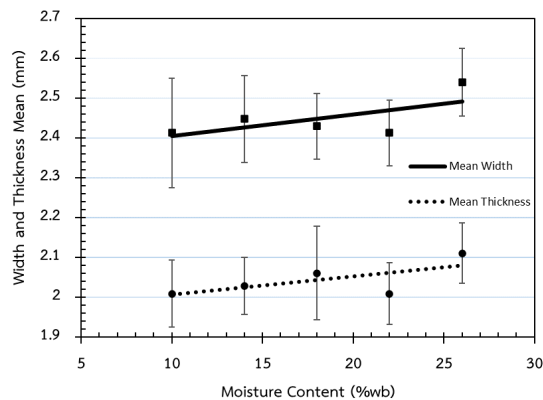
3.1 สมบัติกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

3.1.1 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อมิติของเมล็ดข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ในช่วง 10 - 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก กับค่าเฉลี่ยความยาว ความกว้างและความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก แสดงดังรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อความชื้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความยาวของข้าวเปลือกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย



รูปที่ 6 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความยาวของเมล็ดข้าวเปลือก



รูปที่ 7 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความกว้างและความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก

รูปที่ 8 (ก) อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและ (ข) ค่าระดับความกลม

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของความยาว ความกว้าง ความหนา เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลม

Moisture Content %WB	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Geometric Mean Diameter (mm)	Degree of Sphericity (%)
10	11.07 ± 0.44 ^b	2.41 ± 0.14 ^a	2.00 ± 0.08 ^a	3.77 ± 0.11 ^a	34.09 ± 1.189 ^a
14	10.98 ± 0.36 ^b	2.44 ± 0.11 ^{ab}	2.02 ± 0.07 ^{ab}	3.79 ± 0.10 ^{ab}	34.55 ± 0.88 ^b
18	10.73 ± 0.36 ^a	2.42 ± 0.08 ^a	2.06 ± 0.12 ^{bc}	3.77 ± 0.11 ^a	35.16 ± 1.01 ^c
22	10.8 ± 0.37 ^a	2.48 ± 0.08 ^b	2.09 ± 0.08 ^{cd}	3.82 ± 0.08 ^{bc}	35.44 ± 1.00 ^c
26	10.75 ± 0.41 ^a	2.54 ± 0.08 ^c	2.11 ± 0.08 ^d	3.86 ± 0.09 ^c	35.93 ± 1.01 ^d
Average	10.86 ± 0.41	2.46 ± 0.11	2.06 ± 0.09	3.80 ± 0.03	35.03 ± 0.72

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมาย ± คือค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และตัวอักษรกำกับค่าในตารางที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตรงข้ามกับความหนาและความกว้างเฉลี่ยของข้าวเปลือกที่มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในถั่วพีชตาซีโอด [8] ถั่วเหลือง [7] เมล็ดข้าวบาร์เลย์ [10] เมล็ดข้าวเปลือกและข้าวขาวพันธุ์ Fajr และ Tarom [5] การวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า อิทธิพลของความชื้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความยาว ความกว้างและความหนา (ตารางที่ 1) โดยค่าเฉลี่ยความยาวของเมล็ดกลุ่มระดับความชื้น 10-14 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก และกลุ่มระดับความชื้น 18-26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียกมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ค่าเฉลี่ยความยาวของทั้งสองกลุ่มนี้แตกต่างกัน ($p < 0.05$) ซึ่งข้าวเปลือกที่มีความชื้นตั้งแต่ 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ขึ้นไปมีค่าเฉลี่ยความยาวของเมล็ดข้าวเปลือกลดลง

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าความกว้างเฉลี่ยของเมล็ดที่ระดับความชื้น 10-22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียกมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่แตกต่างกับค่าความกว้างเฉลี่ยของเมล็ดที่ระดับความชื้น 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ($p < 0.05$) และสังเกตเห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นได้จากรูปที่ 7 ส่วนความหนาเฉลี่ยของข้าวเปลือกพบว่าที่ระดับความชื้น 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีความแตกต่างกับที่ระดับความชื้น 10 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แนวโน้มการเพิ่มเป็นไปดังรูปที่ 7 และมีค่าเฉลี่ยจากทุกความชื้นเท่ากับ 2.06 ± 0.09 มิลลิเมตร

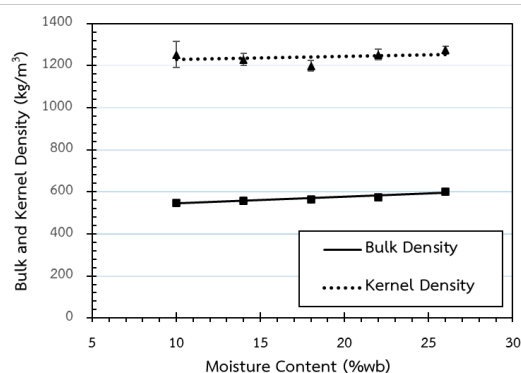
การเพิ่มระดับความชื้นข้าวเปลือกทำให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) และ (ข) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความกว้างและความหนา ประกอบกับความยาวที่ลดลงเนื่องจากความชื้นที่เพิ่มขึ้นทำให้รูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือกเข้าใกล้ทรงกลมมากขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 3 และ 4 ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดสอบในถั่วเหลือง (ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 6.7 ถึง 7.1 มิลลิเมตร) [7] เมล็ดข้าวเปลือก Tarom (ระดับค่าความกลมเพิ่มขึ้น 40 ถึง 42 เปอร์เซ็นต์) [5] การ

วิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าที่ระดับความชื้น 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตมีความแตกต่างกับที่ระดับความชื้น 10 14 และ 18 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ($p < 0.05$) และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 3.80 ± 0.03 มิลลิเมตร

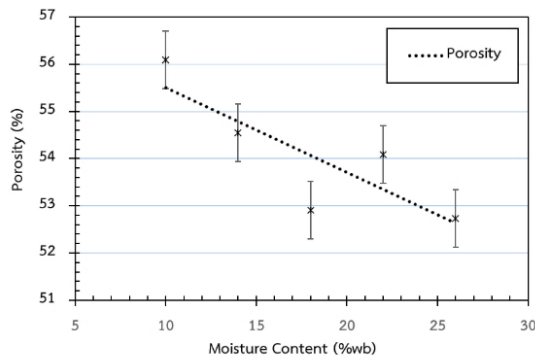
ระดับความชื้นข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าระดับความกลมเฉลี่ยมีความแตกต่างกันออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่ม 10 กลุ่ม 14 กลุ่ม 16 กับ 18 และ กลุ่ม 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก ($p < 0.05$) ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของความชื้นนี้มีอิทธิพลต่อการเพิ่มค่าระดับความกลมเฉลี่ยอย่างค่อนข้างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 8

3.1.2 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความพรุน และความหนาแน่นเชิงเมล็ด

จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าเมื่อระดับความชื้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้แม้ว่าปริมาณของข้าวเปลือกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความกว้างและความหนาของเมล็ดเนื่องจากความชื้น แต่การเพิ่มขึ้นของมวลข้าวเปลือกเนื่องจากความชื้นมีอิทธิพลสูงกว่า จึงทำให้ความหนาแน่นเชิงกลุ่มมีค่าเพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (5)



รูปที่ 9 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความหนาแน่นเชิงกลุ่มและความหนาแน่นเชิงเมล็ด



รูปที่ 10 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความพรุนของเมล็ด

สำหรับค่าความพรุนพบว่ามีความหนาแน่นลดลง (รูปที่ 10) เมื่อความชื้นข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาและความกว้างร่วมกับการลดลงของความยาวเมล็ดทำให้รูปทรงของเมล็ดข้าวเปลือกเป็นทรงกลมมากขึ้นและส่งผลให้ช่องว่างระหว่างเมล็ดมีค่าลดลง เมื่อนำค่าความพรุนและค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มไปคำนวณตามสมการที่ (7) จะ

ได้ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ดดังรูปที่ 9 ซึ่งค่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องความชื้นจะถูกกักเก็บไว้ในรูขนาดเล็กในเมล็ดและทำให้มวลของเมล็ดเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเชิงมวลและการลดลงของค่าความพรุนของเมล็ดข้าวเปลือก และแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเชิงกลุ่ม ความหนาแน่นเชิงเมล็ดของข้าวเปลือกนี้สอดคล้องกับผลการทดลองในเมล็ดยี่ห่วย (Cumin Seeds) [12] (ความหนาแน่นเชิงกลุ่มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 410 ถึง 502 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นเชิงเมล็ดเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1,047 ถึง 1,134 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และการลดลงของค่าความพรุนคล้ายกับการลดลงของค่าความพรุนในข้าวเปลือกและข้าวขาวพันธุ์ Fajr และ Tarom [5] (ข้าวเปลือก Fajr มีค่าลดลงตั้งแต่ 76.33 ถึง 67.56 เปอร์เซ็นต์ และสำหรับพันธุ์ข้าวเปลือก Tarom มีค่าลดลง 80.22 ถึง 67.55 เปอร์เซ็นต์)

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่ม เชิงเมล็ด และค่าความพรุน

Moisture Content %WB	Bulk Density (kg/m ³)	Kernel Density (kg/m ³)	Porosity (%)
10	548.97 ± 9.41 ^a	1,252.44 ± 62.87 ^{bc}	56.09 ± 1.77 ^c
14	558.91 ± 14.14 ^{ab}	1,229.65 ± 29.55 ^{ab}	54.54 ± 0.61 ^b
18	564.46 ± 11.97 ^b	1,198.66 ± 24.53 ^a	52.90 ± 0.38 ^a
22	574.87 ± 11.30 ^c	1,252.31 ± 25.61 ^{bc}	54.09 ± 0.64 ^b
26	602.40 ± 8.58 ^d	1,274.3 ± 18.16 ^c	52.72 ± 0.00 ^a
Average	569.92 ± 20.43	1,241.47 ± 28.67	54.07 ± 1.36

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมาย ± คือค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และตัวอักษรกำกับกับค่าในตารางที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

การวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าระดับความชื้นตั้งแต่ 22 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียกขึ้นไปส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของ

ความหนาแน่นเชิงกลุ่มและความหนาแน่นเชิงเมล็ดอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความชื้น

มีผลให้มวลของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ความชื้นนี้ยังส่งผลต่อการลดลงของค่าความพรุน ($P < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการเมื่อเมล็ดมีความชื้นสูงขึ้นย่อมทำให้ปริมาตรของเมล็ดเพิ่มขึ้นตามไปด้วยสอดคล้องกับผลการศึกษาค่าเฉลี่ยของความยาว ความกว้าง ความหนา เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลม ในหัวข้อ 3.1 ที่ผ่านมา ค่าความหนาแน่นเชิงเมล็ดเฉลี่ยจากการทดลองมีค่าเท่ากับ $1,241.47 \pm 28.67$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

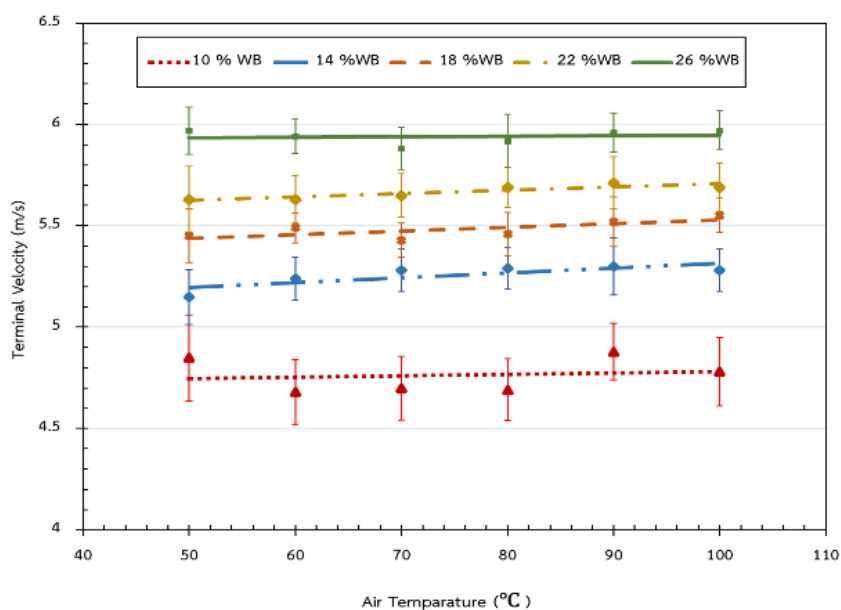
3.2 สมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือก

ขาวดอกมะลิ 105

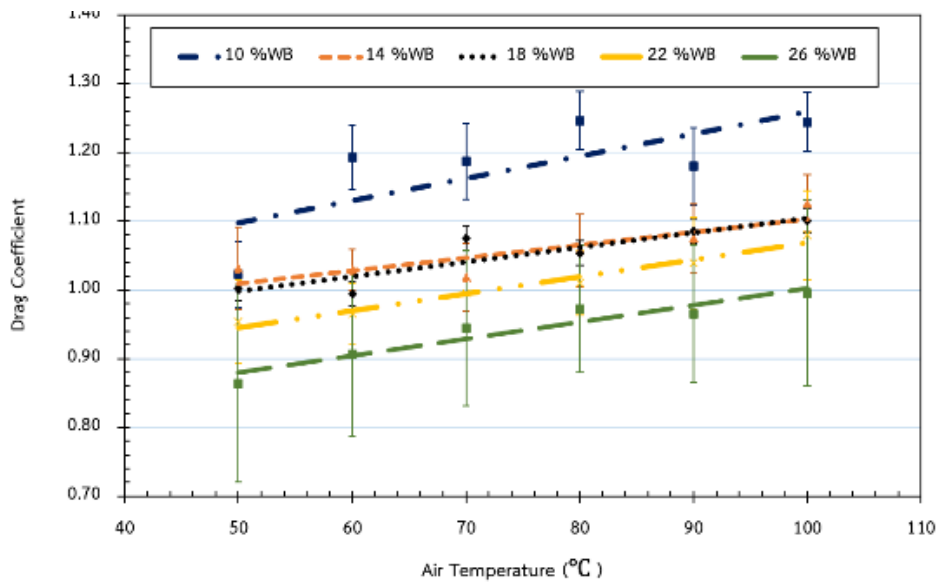
3.2.1 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อค่าความเร็วสุดท้าย

จากรูปที่ 10 เมื่อระดับความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเร็วสุดท้ายเพิ่มขึ้น เนื่องจากข้าวเปลือกมีมวลเพิ่มขึ้นจากความชื้น ทำให้ต้องใช้ความเร็วลมมากขึ้นในการทำให้เมล็ดข้าวเปลือกเริ่มลอยตัว ผลของอุณหภูมิอากาศที่มีต่อค่าความเร็วลม

สุดท้ายพบว่ามีเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิอากาศมีผลทำให้ความหนาแน่นอากาศลดลงเพียงเล็กน้อย ค่าความเร็วสุดท้ายและสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลสอดคล้องกับผลการทดลองในเมล็ดข้าวเทพี [14] (ความชื้น 6.5 ถึง 30.1 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีค่าความเร็วสุดท้ายเพิ่มขึ้นจาก 3.32 ถึง 5.4 เมตรต่อวินาที) และเมล็ดข้าวเปลือกและข้าวขาวพันธุ์ Fajr และ Tarom [5] (ความชื้น 5 ถึง 37 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีค่าความเร็วสุดท้ายของ Fajr และ Tarom เพิ่มขึ้นจาก 6.15 ถึง 6.65 และ 6.35 ถึง 6.77 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ) การวิเคราะห์ทางสถิติ (ตารางที่ 3) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งให้เห็นว่าความชื้นของข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นมีอิทธิพลต่อค่าความเร็วสุดท้าย โดยที่ระดับความชื้นข้าวเปลือก 24 และ 26 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีค่าเฉลี่ยความเร็วสุดท้ายแตกต่างจากระดับความชื้นอื่นๆ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศจาก 50 – 100 องศาเซลเซียส ไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเร็วลอยตัวที่แต่ละระดับความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 10 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความเร็วสุดท้ายของข้าวเปลือก



รูปที่ 11 อิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการไหล

ตารางที่ 3 ค่าความเร็วสุดท้ายและสัมประสิทธิ์ต้านทานการ

Air Temperature (°C)	Moisture Content (%WB)	Terminal Velocity (m/s)	Drag Coefficient
50	10	4.85±0.21 ^b	1.02±0.143 ^{cdef}
	14	4.68±0.16 ^c	1.18±0.119 ^{cdef}
	18	4.70±0.16 ^e	1.19±0.114 ^{efg}
	22	4.69±0.15 ^{fgh}	1.25±0.091 ^{bc}
	26	4.88±0.14 ⁱ	1.18±0.099 ^a
60	10	4.78±0.17 ^a	1.24±0.136 ^{hi}
	14	5.15±0.14 ^{cd}	1.03±0.061 ^{cdef}
	18	5.24±0.11 ^e	1.03±0.044 ^{bcde}
	22	5.28±0.10 ^{fgh}	1.02±0.051 ^{bcd}
	26	5.29±0.10 ⁱ	1.06±0.047 ^{ab}
70	10	5.30±0.14 ^a	1.08±0.066 ^{hi}
	14	5.28±0.10 ^d	1.13±0.066 ^{cdef}
	18	5.45±0.14 ^e	1.09±0.307 ^{efg}
	22	5.49±0.07 ^{fgh}	0.99±0.030 ^{bcde}
	26	5.43±0.08 ⁱ	1.08±0.049 ^{abc}
80	10	5.46±0.11 ^a	1.05±0.052 ⁱ
	14	5.52±0.12 ^d	1.09±0.049 ^{defg}
	18	5.55±0.08 ^e	1.10±0.043 ^{defg}
	22	5.63±0.16 ^h	0.95±0.054 ^{cdf}
	26	5.63±0.12 ⁱ	0.97±0.067 ^{bcd}

Air Temperature (°C)	Moisture Content (%WB)	Terminal Velocity (m/s)	Drag Coefficient
90	10	5.65±0.11 ^b	1.00±0.036 ^{hi}
	14	5.69±0.10 ^d	1.01±0.052 ^{efg}
	18	5.71±0.13 ^{ef}	1.04±0.056 ^{efg}
	22	5.69±0.12 ^h	1.08±0.077 ^{cdefg}
	26	5.97±0.12 ⁱ	0.86±0.050 ^{bcd}
100	10	5.94±0.08 ^{ab}	0.91±0.048 ⁱ
	14	5.88±0.10 ^d	0.95±0.055 ^{gh}
	18	5.92±0.13 ^{ef}	0.97±0.043 ^{fgh}
	22	5.96±0.10 ^h	0.96±0.057 ^{efg}
	26	5.97±0.09 ⁱ	1.00±0.043 ^{bcde}

หมายเหตุ ตัวเลขหลังเครื่องหมาย $\pm$ คือค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และตัวอักษรกำกับค่าในตารางที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3.2.2 อิทธิพลของความชื้นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์

ด้านทานการไหล

จากรูปที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลเฉลี่ยมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความชื้นข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์นี้อยู่ในช่วง 0.80 – 1.95 การวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าที่ระดับความชื้น 10 เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก มีค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลแตกต่างกับระดับความชื้นอื่นๆ ตั้งแต่อุณหภูมิอากาศ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป และค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลที่ระดับอุณหภูมิอากาศ 50 องศาเซลเซียส แตกต่างกับที่ระดับ 100 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพราะการเพิ่มขึ้นของมวลเมล็ดข้าวเปลือกเนื่องจากความชื้นมีค่าค่อนข้างสูง ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของมิติเมล็ดข้าวเปลือกเนื่องจากความชื้นมีค่าต่ำมาก (ดังผลจากหัวข้อ 3.1.1) เมื่อคำนวณเป็นพื้นที่หน้าตัดของเมล็ดตามสมการที่ 9 จะได้ค่า A_f ที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก หากพิจารณารูปแบบความสัมพันธ์ตามสมการที่ 8 อากาศที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่น (ρ_a) มีค่าลดลง ในขณะที่มวลข้าวเปลือก (M) เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเร็วสุดท้าย (V_t) เพิ่มขึ้นไปด้วย (ดังผลตามหัวข้อ 3.2.1) เป็นผลให้

อัตราส่วนของมัน (คือค่า C_d) มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ค่าเฉลี่ยโดยรวมของสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีค่าเท่ากับ 1.05 ± 0.1254

4.สรุป

การทดสอบหาสมบัติกายภาพและสมบัติอากาศพลศาสตร์ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 พบว่าการเพิ่มขึ้นของระดับความชื้นข้าวเปลือกมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยความยาว ความกว้างและความหนาของเมล็ดข้าวเปลือกมีความแตกต่างกัน และเป็นผลให้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิตและค่าระดับความกลมมีความแตกต่าง การเพิ่มขึ้นของระดับความชื้นข้าวเปลือกส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเชิงกลุ่มและเชิงเมล็ดเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ความพรุนลดลง ระดับความชื้นของข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วสุดท้ายและอุณหภูมิอากาศไม่มีผลต่อค่าดังกล่าวและค่าระดับของความชื้นของข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศมีอิทธิพลต่อค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ด้านทานการไหลของเมล็ดข้าวเปลือก

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of International Trade Ministry of Commerce. (2021, May 25). The overall situation of the rice market in ASEAN, September 2019. [Online]. Available: https://www.ditp.go.th/ditp_web61/article_sub_view.php?filename=contents_attach/564288/564288.pdf&title=564288&cate=455&d=0
- [2] Moisture measurement—unground grain and seeds, ASAE standards, vol. 555, ASABE, 1997.
- [3] C. Aydin and M. Ozcan, “Some physico-mechanic properties of terebinth (*Pistacia terebinthus* L.) fruits,” *Journal of Food Engineering*, vol. 53, pp. 97-101, 2002.
- [4] R. K. Gupta, G. Arora and R. Sharma, “Aerodynamical properties of sunflower seed (*Helianthus annuus* L.),” *Journal of Food Engineering*, vol. 79, pp. 899-904, 2007.
- [5] M. Gharekhani, M. Kashaninejad, A. Daraei Garmkhany and A. Ranjari, “Physical and aerodynamic properties of paddy and white rice as a function of moisture content,” *Quality Assurance and Safety of Crops and Foods*, pp. 187-197, 2013.
- [6] Habib Kocabiyik, Tükan Aktaş and Birol Kayışğlu, “Porosity Rate of Some Kernel Crops,” *Journal of Agronomy*, vol. 3, no. 2, pp. 76-80, 2004.
- [7] M. Kashaninejad, M. Ahmadi, A. Daraei and D. Chabra, “Handling and frictional characteristics of oybean as a function of moisture content and variety,” *Powder Technology*, vol. 188, pp. 1-8, 2008.
- [8] M. Kashaninejad, A. Mortazavi, A. Safekordi and L. G. Tabil, “Some physical properties of pistachio (*Pistacia vera* L.) nut and its kernel,” *Journal of Food Engineering*, vol. 72, pp. 30-38, 2006.
- [9] N. N. Mohsenin, Physical properties of plants and animal materials, New York: Gordon and Breach Science Publisher, 1980.
- [10] J. Sánchez-Mendoza, A. Domínguez-López, S. Navarro-Galindo and J. A. López-Sandoval, “Some physical properties of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) seeds as a function of moisture content,” *Journal of Food Engineering*, vol. 87, pp. 391-397, 2008.
- [11] J. E. Shellard and R. H. Macmillan, “Aerodynamic properties of threshed wheat materials,” *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 23, pp. 273-281. 1978.
- [12] K. K. Singh and T. K. Goswami, “Physical properties of cumin seed,” *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 64, pp. 93-98, 1996.
- [13] White, N.D.G. and Jayas, D.S., “Physical properties of canola and sunflower meal pellets,” *Canadian Biosystems Engineering*, vol. 43, pp. 49-52, 2001.

- [14] A. D. Zewdu, "Aerodynamic properties of tef grain and straw material," *Biosystem Engineering*, vol. 98, pp. 304-309, 2007.
- [15] N. Saelim, "Continuous flow paddy drying with infrared radial radiation technique," M.S. thesis, Dept. MEP. Eng., Suranaree Univ., Nakhon Ratchasima, Thailand, 2017.
- [16] National aeronautics and space administration. (2021, September 19). Terminal Velocity: gravity and drag. [Online]. Available: https://www.ditp.go.th/ditp_web 61/article_sub_view.php?filename=contents_attach/564288/564288.pdf&title=564288&cate=455&d=0
- [17] T. Yabsungnoen, K. Treeamnuk and T. Treeamnuk, "Influence of Moisture Content on Physical and Aerodynamic Properties of Paddy," in *Proceeding of the 22nd Thai Society of Agricultural Engineering (TSAE) National Conference*, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand, 2021, pp. 168-175.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การศึกษาผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ต่อค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า เลือนเฟสและการทำให้เป็นจริงด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าเลือนเฟส 15 องศา

ไพบุณย์ เกียรติสุขคนธา^{1*} ภาสวิชัย กล่ำรักษ์¹ ณรงค์ฤทธิ์ ยินดียม¹
และ นภัทร วัจนเทพินทร์²

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

² ศูนย์วิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

¹ 450 หมู่ 6 ตำบลยานยาว อำเภอสามชูก จังหวัดสุพรรณบุรี 72140

² 217 ตำบลส่วนใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000

รับบทความ 22 ธันวาคม 2563 แก้ไขบทความ 30 กันยายน 2564 ตอรับบทความ 29 พฤศจิกายน 2564

บทคัดย่อ

แนวโน้มการอนุรักษ์พลังงานที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายและการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเลือนเฟสเพิ่มขึ้นอย่างกว้างขวาง บทความนี้นำเสนอการศึกษาผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ต่อค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลือนเฟส ในบทความได้นำหม้อแปลงไฟฟ้าเลือนเฟสที่มีขดลวดทุติยภูมิจำนวน 4 ชุดโดยในแต่ละชุดมีมุมเลือนเฟสต่างกัน 15 องศา มาประยุกต์ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฮาร์มอนิกส์และค่าสูญเสียของการทดสอบหา กำลังไฟฟ้าในขณะจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น 3 เฟส 3 สาย พร้อมกัน 2 ชุด และ 4 ชุด ทั้งกรณี 25%, 50%, 75% และ 100% ของกระแสพิกัดที่แตกต่างกัน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ากระแสฮาร์มอนิกส์มีผลต่อค่าสูญเสียจากกระแสไหลวน ที่ขดลวดอย่างมีนัยสำคัญ การจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นพร้อมกัน 2 ชุดพบว่าทั้งกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกัน และจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกัน จะมีค่าสูญเสียที่ใกล้เคียงกัน แม้ %THDi จะแตกต่างกัน แต่กรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกัน %THDi จะมีค่าสูงกว่า 15% จึงไม่เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 519 ในขณะที่การจ่ายโหลดไม่เชิงเส้น พร้อมกัน 4 ชุดจะเป็นไปตามมาตรฐานและยังให้ค่าสูญเสียน้อยกว่า 57% ของการจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นแบบชุดเดียว ลักษณะดังกล่าวหากนำมาประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์จะไม่เพียงแค่ลดกระแสฮาร์มอนิกส์เท่านั้นแต่ยังลดการใช้พลังงานได้ด้วย

คำสำคัญ : หม้อแปลงไฟฟ้าเลือนเฟส; คุณภาพไฟฟ้า; ฮาร์มอนิกส์; ค่าสูญเสีย; การประหยัดพลังงาน

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Investigation of the Effect of Harmonic Currents on Losses of Phase Shifting Transformers and Its Realization using a 15-Degree Phase shifting Transformer

Paiboon Kiatsookkanatorn^{1*} Passawit Klamrak¹ Narongrit Yindeeyom¹
and Napat Watjanatepin²

¹ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Suphanburi Campus.

² SERTTC, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi Campus.

¹ 450 Moo 6, T. Yanyaw, A. Samchuk, Suphanburi, 72130, Thailand.

² 7/1 Nonthaburi-1, Nonthaburi, 11000, Thailand.

Received 22 December 2020; Revised 30 September 2021; Accepted 29 November 2021

Abstract

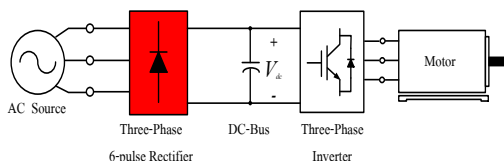
The trend of energy savings has been widely interested and phase shift transformers (HMT) have been extensively used. This paper presents the investigation of the effect of harmonic currents on losses of the HMT. In this paper, a 15-degree HMT with quad secondary winding is applied to find the relationship between harmonic currents and losses of the HMT. This relation can be met by testing the active power of primary and secondary sides while the HMT supplies for two and four non-linear loads at 25%, 50%, 75%, and 100% rated currents, respectively. The results reveal that harmonic currents affect winding eddy current losses significantly and the losses for loading the two secondaries 1 and 2 are the same as loading the two secondaries 1 and 3 while both %THDi are different. However, for loading the secondaries 1 and 2, the %THDi is more than 15% so it is not met IEEE 519 Std. while the HMT is supplied with four loads, the %THDi has met IEEE 519 Std. and the losses are less than 57% compared to one load. As a result of these, if the HMT is applied to an adjustable speed drive system, it is not only reduced the harmonics but also saved the energies.

Keywords : Phase Shifting Transformers; Power Quality; Harmonics; Losses; Energy Savings

** Corresponding Author. Tel.: +668 6789 1138, E-mail Address: Paiboon.k@rmutsb.ac.th*

1. บทนำ

ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ (Adjustable Speed Drive, ASD) ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นโพลดิเล็กทรอนิกส์กำลังชนิดหนึ่งที่ได้รับนิยามแพร่หลายในอุตสาหกรรม[1] โพลดิชนิดนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงกระแสในเชิงพลวัตซึ่งมีวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบ 6 พัลส์ทำหน้าที่เป็นวงจรส่วนหน้า(Front-End) ลักษณะดังกล่าวทำให้เป็นเหมือนโพลดิไม่เชิงเส้นแบบ 3 เฟส 3 สายที่สร้างกระแสฮาร์มอนิกส์เชิงพลวัตอันดับที่ $6m \pm 1$ เมื่อ $m = 1, 2, 3, \dots$ โดยค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส(THDi) จะมีค่าประมาณ 30% ทำให้มีค่าสูงเกินกว่ามาตรฐาน[2], [3] และส่งผลให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าต่อระบบไฟฟ้าได้ นอกจากนั้นหากกระแสฮาร์มอนิกส์ดังกล่าวไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้มีค่าสูญเสียเพิ่มขึ้น[4]



รูปที่ 1 ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ในอุตสาหกรรม

จากปัญหาดังกล่าวจึงมีงานวิจัยมากมายได้นำเสนอวิธีการลดกระแสฮาร์มอนิกส์[5] การใช้รีแอคเตอร์สามารถลดฮาร์มอนิกส์ได้แต่ระดับฮาร์มอนิกยังมีค่าสูง ในขณะที่การใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟสามารถลดฮาร์มอนิกให้มีค่าต่ำได้ แต่จะมีข้อจำกัดเรื่องโพลดิที่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงพลวัต การใช้วงจรกรองแบบแอคทีฟก็เป็นแนวทางหนึ่งที่ดีซึ่งรองรับกับโพลดิที่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงพลวัตได้ และสามารถเลือกลดอันดับฮาร์มอนิกได้ตามต้องการแต่วงจรกรองแบบนี้มีราคาสูงมาก การใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส (Phase shifting Transformers) จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย[6]-[17] เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกส์ของวงจร

เรียงกระแสแบบหลายพัลส์ ซึ่งมีลักษณะการใช้งานที่นำขดลวดด้านทุติยภูมิแต่ละชุดมาจ่ายโพลดิร่วมกัน อย่างไรก็ตามหม้อแปลงแบบนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการลดกระแสฮาร์มอนิกส์สำหรับการจ่ายโพลดิแต่ละชุดอย่างอิสระได้ด้วย[18] ลักษณะดังกล่าวจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกส์ของเครื่องจักรที่มีระบบควบคุมมอเตอร์ในงานอุตสาหกรรมได้

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นหากใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟสมาลดกระแสฮาร์มอนิกส์นอกจากจะทำให้เป็นไปตามมาตรฐานและระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพแล้ว ยังทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถจ่ายโพลดิเพิ่มขึ้น[19] อายุการใช้งานยาวนานขึ้น[20] และที่สำคัญยังทำให้ค่าสูญเสียที่เกิดจากผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ลดลงอีกด้วย ซึ่งค่าสูญเสียที่ลดลงดังกล่าวจะส่งผลให้ผู้ใช้ไฟมีต้นทุนรายจ่ายลดลง อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยใดนำเสนอให้เห็นว่าเมื่อนำหม้อแปลงเลื่อนเฟสมาจ่ายโพลดิไม่เชิงเส้นแต่ละชุดอย่างอิสระค่าสูญเสียที่หม้อแปลงจะลดลงอย่างไร ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่สำคัญต่อภาคอุตสาหกรรมที่สนใจด้านการอนุรักษ์พลังงาน

บทความนี้นำเสนอการศึกษาผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ต่อค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟสแบบขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุด ซึ่งมีประเด็นที่จะนำเสนอ ดังนี้

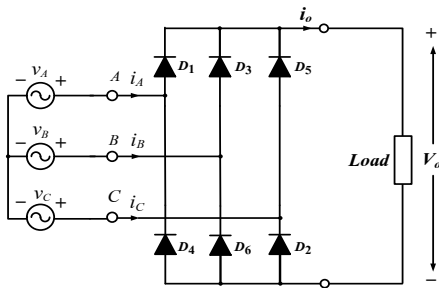
- ประยุกต์ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส 15 องศาแบบขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุด ในการจ่ายโพลดิไม่เชิงเส้น 3 เฟส 3 สายแต่ละชุดอย่างอิสระที่เป็นเหมือนระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์
- แสดงผลการทดสอบค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟสเมื่อจ่ายโพลดิ 2 ชุด และ 4 ชุดพร้อมกัน รวมทั้งค่าร้อยละ(%)ของการจ่ายโพลดิที่แตกต่างกันด้วย
- หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อกระแสฮาร์มอนิกส์ที่มีปริมาณและอันดับแตกต่างกัน
- แสดงการประหยัดพลังงานจากผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ลดลงและค่าตอบแทนคืนกลับ

2. เปรียบวิธีวิจัย

2.1 โหลดไม่เชิงเส้น 3 เฟส 3 สาย โดยอาศัยวงจร

เรียงกระแส 6 พัลส์ (B6)

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์จะมีวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบ 6 พัลส์ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นโหลดไม่เชิงเส้นเชื่อมต่อโดยตรงเข้ากับระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2 วงจรนี้จะประกอบด้วยไดโอด 6 ตัว ทำหน้าที่แปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2 วงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบ 6 พัลส์

จากรูปที่ 2 แรงดันด้านเข้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีเฉพาะความถี่หลักมูลสามารถเขียนแทนได้ตามสมการที่ (1) และเมื่อนำมาเป็นแหล่งจ่ายป้อนให้กับวงจรเรียงกระแส 3 เฟสแบบบริดจ์ 6 พัลส์จะทำให้กระแสมีองค์ประกอบของฮาร์โมนิกส์ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยอนุกรมฟูเรียร์[21] ตามสมการที่ (2)

$$v(t) = V_{1,m} \sin(\omega_1 t + \theta_1) \quad (1)$$

$$i(t) = I_{1,m} \sin(\omega_1 t - \phi_1) + \sum_{n=6k \pm 1}^{\infty} (-1)^k I_{n,m} \sin n(\omega_1 t - \phi_n) \quad (2)$$

โดยที่

$V_{1,m}$ = แรงดันค่ายอดที่ความถี่หลักมูล

$I_{1,m}$ = กระแสค่ายอดที่ความถี่หลักมูล

$I_{n,m}$ = กระแสค่ายอดในแต่ละอันดับฮาร์โมนิก

n = อันดับฮาร์โมนิก

ω_1 = ความถี่หลักมูล

ϕ_n = มุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแส

จากสมการที่ (1) และ (2) ค่ากำลังไฟฟ้าจริงสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3)

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P_n = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V_{n,m} I_{n,m}}{2} \right) \cos(\theta_n - \phi_n) \quad (3)$$

$$= \left(\frac{V_{1,m} I_{1,m}}{2} \right) \cos(\theta_1 - \phi_1) = V_{1,rms} I_{1,rms} \cos(\theta_1 - \phi_1)$$

และค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมกระแส(Total Harmonic Distortion : THD) สามารถนิยามได้จาก

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{1,rms}^2}}{I_{1,rms}} \quad (4)$$

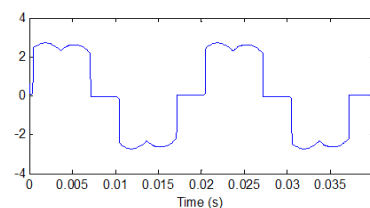
โดยที่ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสคือ

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{n,rms}^2} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_{n,m}}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (5)$$

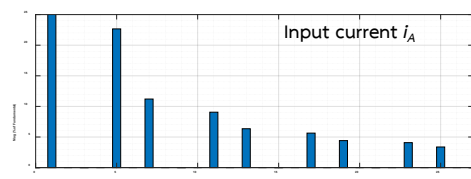
และในกรณีนี้จะได้ตัวประกอบกำลัง(Power factor)

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} = \left(\frac{I_{1,rms}}{I_{rms}} \right) \frac{\cos(\theta_1 - \phi_1)}{DPF} \quad (6)$$

จากรูปที่ 2 สามารถแสดงกระแสด้านเข้าได้ดังรูปที่ 3(ก) และสามารถแสดงสเปกตรัมของกระแสด้านเข้าได้ดังรูปที่ 3(ข)



(ก)



(ข)

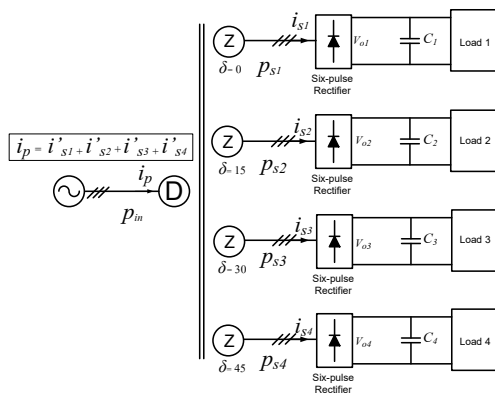
รูปที่ 3 กระแสของวงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์และสเปกตรัม

2.2 กระแสฮาร์โมนิกส์ต่อค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส

หม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟสเป็นหม้อแปลงที่มีลักษณะแตกต่างจากหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสทั่วไป ตรงที่ขดลวดด้านทุติยภูมิจะมีอย่างน้อย 2 ชุด [22] โดยแต่ละชุดจะมีมุมเลื่อนเฟสที่แตกต่างกันอาทิเช่น 15, 20 หรือ 30 องศา เป็นต้น ซึ่งมุมเลื่อนเฟสที่แตกต่างกันของขดลวดทั้งสองชุดนี้จะทำให้สามารถลดกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงมีชื่อที่นิยมเรียกกันอีกอย่างหนึ่งว่า “หม้อแปลงไฟฟ้าลดฮาร์โมนิกส์” (Harmonic Mitigating Transformers, HMT) โดยในที่นี้จะเรียกสั้นๆว่า HMT ซึ่งปัจจุบันมีบริษัทต่างประเทศที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ [23]

2.2.1 HMT แบบขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุด

ตระกูลของ HMT จะมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับจำนวนชุดของขดลวดด้านทุติยภูมิ อาทิเช่น 2, 3 และ 4 ชุด โดยส่วนมากจะถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับวงจรเรียงกระแส 12 พัลส์ 18 พัลส์ และ 24 พัลส์ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในบทความนี้จะใช้ HMT ที่มีขดลวดด้านปฐมภูมิ 1 ชุด และด้านทุติยภูมิจำนวน 4 ชุด (Quad Secondary Winding) ที่มีมุมเลื่อนเฟสในแต่ละชุด 15 องศา มาประยุกต์ใช้จ่ายโหลดไม่เชิงเส้นที่แยกอิสระต่อกันดังแสดงในรูปที่ 4

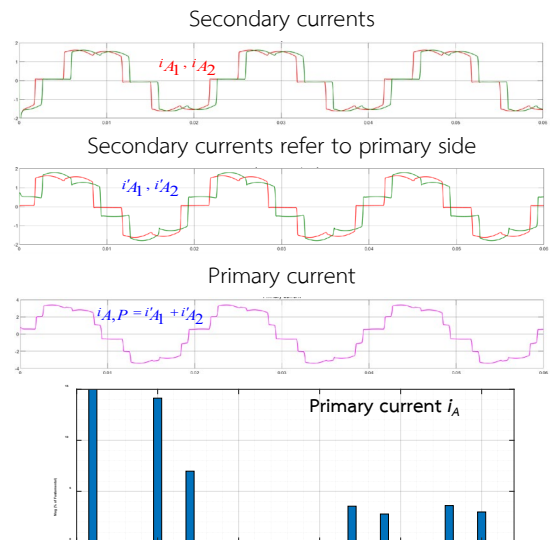


รูปที่ 4 HMT แบบขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุด

รูปที่ 4 แสดง HMT แบบขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุดที่ใช้วงจรเรียงแส 3 เฟส 6 พัลส์ (B6) เป็นตัวแทนของโหลดไม่เชิงเส้นในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สาย และการจ่ายโหลดในแต่ละชุดจะแยกอิสระต่อกันจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือกรณีจ่ายโหลด 2 ชุดพร้อมกัน และกรณีจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกัน

ก) กรณีจ่ายโหลด 2 ชุดพร้อมกัน

กรณีจ่ายโหลดสองชุดยังสามารถแบ่งออกเป็นแบบจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันซึ่งแบบนี้จะมีมุมเลื่อนเฟส 15 องศาและแบบจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกันแบบนี้จะมีมุมเลื่อนเฟส 30 องศา ทั้งสองแบบให้ผลของการลดกระแสฮาร์โมนิกส์ในแต่ละอันดับที่แตกต่างกันดังแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 5 กระแสและสเปกตรัมของ HMT เมื่อจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกัน (เลื่อนเฟส 15 องศา)

รูปที่ 5 แสดงผลการจำลองเมื่อใช้ชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกัน ด้านบนคือกระแสเฟส A ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเลื่อนเฟสชุดที่ 1 และ 2 โดยทั้งคู่จะมีเฟสต่างกัน 15 องศา ถัดมาคือกระแสด้านทุติยภูมิที่แปลงเข้ามาทางด้านปฐมภูมิ ถัดมาคือกระแสเฟส A ด้านปฐม-

Secondary currents

Secondary currents refer to primary side

Primary current

Primary current i_A

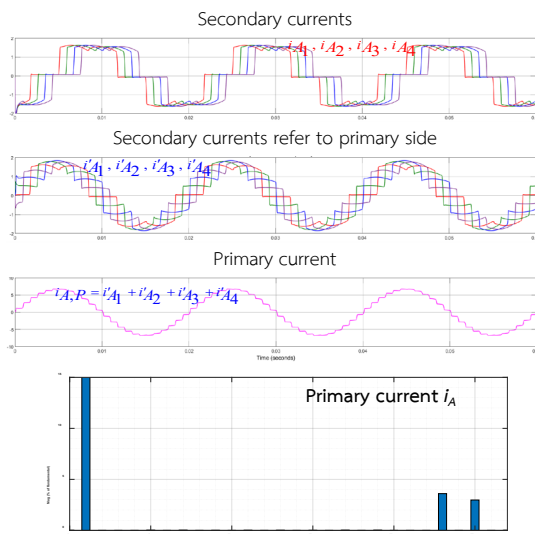
RMS value of i_A

รูปที่ 6 กระแสและสเปกตรัมของ HMT เมื่อจ่ายโหลด
ชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกัน (เลื่อนเฟส 30 องศา)

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นได้ว่าการใช้ HMT ชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกัน ซึ่งเป็นกรณีที่ตั้งคู่จะมีผลต่างกัน 30 องศา สามารถลดกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5, 7, 17 และ 19 อันดับฮาร์โมนิกส์ที่ลดลงจะแตกต่างจากกรณีการใช้ HMT ชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันจึงสามารถนำมาวิเคราะห์ผลของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่แตกต่างกันได้ ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมของกระแสกรณีนี้จะลดลงจาก 30.32% เหลือ 11.99%

ข) กรณีจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกัน

HMT แบบขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุด เมื่อจ่ายโหลด
พร้อมกันสามารถลดกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5, 7,
11, 13, 17 และ 19 ได้ ทำให้กระแสฮาร์โมนิกส์เหลื
น้อยมากโดยอันดับแรกจะอยู่ที่ 23 ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 กระแสและสเปกตรัมของ HMT เมื่อจ่ายโหลด
พร้อมกันทั้ง 4 ชุด

เมื่อพิจารณาารูปีที่ 7 จะเห็นว่ากระแสต้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเลื่อนเฟสจะมีลักษณะใกล้เคียงไซน์ เมื่อนำกระแสมาแตกสเปกตรัมจะได้ดังรูปด้านล่าง และเมื่อนำไปเชื่อมโยงกับผลการจำลองในรูปที่ 5 และ 6 จะสามารถอธิบายได้ว่าชุดที่ 1 และ 3 จะหักล้างกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5, 7, 17 และ 19 ส่วนชุดที่ 1 และ 2 จะหักล้างกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 และ 13 ในทำนองเดียวกันกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5, 7, 17 และ 19 ของชุดที่ 2 และ 4 จะหักล้างกัน ในขณะที่กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 และ 13 ของชุดที่ 3 และ 4 จะหักล้างเช่นเดียวกันทำให้กระแสฮาร์โมนิกส์เริ่มต้นอยู่อันดับที่ 23 และค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมของกระแสลดลงเหลือเพียง 5.65% เท่านั้นและจากผลการจำลองในแต่ละกรณีจะได้ค่ากระแสที่ความถี่หลักมูล 1.175, 2.38, 2.38 และ 4.76 A ตามลำดับและค่าร้อยละกระแสฮาร์โมนิกส์ในแต่ละอันดับแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่ากระแสฮาร์โมนิกเมื่อจ่ายโหลดทั้ง 4 กรณี

Loads of Sec.	Current harmonics in each order (%)								THDI (%)
	5	7	11	13	17	19	23	25	
1	22.69	11.26	9.06	6.38	5.62	4.39	4.03	3.29	30.32
1+2	15.78	7.81	-	-	3.98	3.21	3.98	3.26	17.85
1+3	-	-	8.94	6.3	-	-	3.98	3.26	11.99
1+2+3+4	-	-	-	-	-	-	3.98	3.25	5.65

2.2.2 ค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าจากผลของกระแสฮาร์มอนิกส์

ค่าสูญเสียหม้อแปลงไฟฟ้าตอนไร้โหลดคือค่าสูญเสียที่แกนเหล็กส่วนมากจะเชื่อมโยงกับฮาร์มอนิกส์เฉพาะแรงดันเท่านั้นโดยไม่ขึ้นกับกระแสฮาร์มอนิกส์ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าสูญเสียตอนจ่ายโหลดอันมีสาเหตุมาจากกระแสฮาร์มอนิกส์จึงสามารถละเลยค่าสูญเสียที่แกนเหล็กได้ จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าในขณะจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นจะได้จากผลรวมของค่าสูญเสียที่ขดลวดที่เกิดจากผลของกระแสฮาร์โมนิคและค่าสูญเสียจากกระแสไหลวนที่ขดลวดซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (7)

$$P_w = P_{DC} + P_{EC} \quad (7)$$

- การเพิ่มขึ้นของกระแสที่โหลดอันเนื่องมาจากร่องประกอบฮาร์มอนิก จะส่งผลให้ค่าสูญเสียในเทอมกระแสฮาร์โมนิคของหม้อแปลงไฟฟ้ามีการเพิ่มขึ้นตามกระแสยกกำลังสอง ซึ่งค่าสูญเสียนี้หาได้จาก

$$P_{DC} = R_{DC} I_{rms}^2 = R_{DC} \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{n,rms}^2} \quad (8)$$

เมื่อ R_{DC} คือความต้านทานไฟตรงของขดลวดที่ไม่มีผลมาจากปรากฏการณ์ทางผิวหาได้ด้วยเครื่องวัดความต้านทานไฟตรง

- ค่าสูญเสียจากกระแสไหลวนที่ขดลวด(Winding eddy current losses) [24] จะเป็นสัดส่วนกับกระแยกกำลังสองและความถี่ยกกำลังสองหากหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายกระแสที่พิกัด I_R ค่าสูญเสียจากกระแสไหลวนที่ขดลวดจะสอดคล้องตามสมการที่ (9)

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{n=1}^{n=n_{max}} \underbrace{n^2 \left(\frac{I_n}{I_R} \right)^2}_{K \text{ factor}} \quad (9)$$

โดยที่

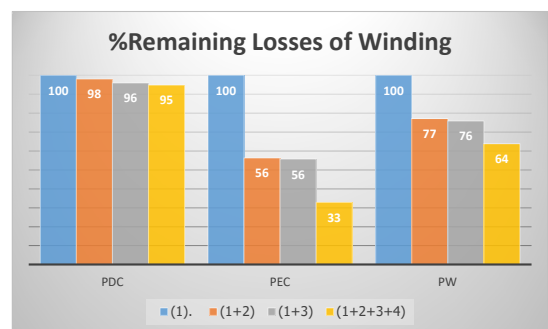
I_n = ขนาดของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่อันดับต่างๆ

I_R = กระแสพิกัดที่ความถี่หลักมูลของหม้อแปลง

n = อันดับฮาร์โมนิกส์

P_{EC-R} = ค่าสูญเสียจากกระแสไหลวนที่ขดลวดจากความถี่หลักมูล

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าสูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อต้องจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นที่มีองค์ประกอบของฮาร์โมนิก ดังนั้นเพื่อหาความสัมพันธ์ว่ากระแสฮาร์โมนิกส์มีผลต่อค่าสูญเสียอย่างไร เราจึงสามารถนำกระแสฮาร์โมนิกส์ของหม้อแปลงเลื่อนเฟสในแต่ละกรณีตามตารางที่ 1 มาใช้ร่วมกับสมการที่ (7)-(9) หาความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 8



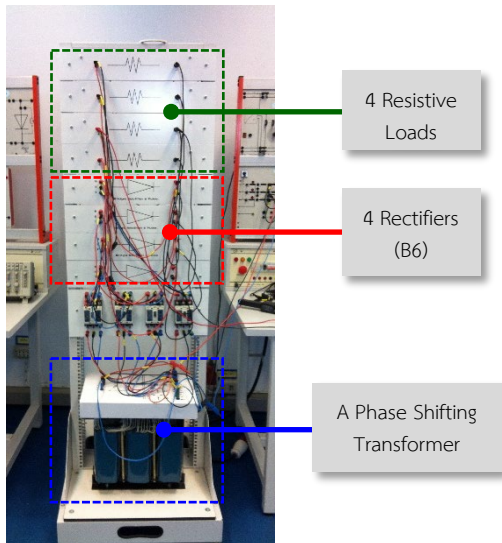
รูปที่ 8 ค่าร้อยละการสูญเสียของขดลวดในแต่ละกรณีเมื่อเทียบกับกรณีจ่ายโหลดชุดเดียว

จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าเมื่อกระแสฮาร์โมนิกส์ลดลงค่าสูญเสียรวมของขดลวดจะลดลงอย่างมากโดยจะลดลงมากที่สุดเมื่อจ่ายโหลดพร้อมกันทั้ง 4 ชุด เหลือเพียง 64% และหากพิจารณาค่าสูญเสียกรณีจ่ายโหลด 2 ชุดพร้อมกัน พบว่าในกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันจะลดลงเหลือ 77% และกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกันจะลดลงเหลือ 76% ซึ่งค่าสูญเสียทั้งสองกรณีจะลดลงใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาค่าสูญเสียในแต่ละกรณีพบว่าค่าสูญเสียในเทอมของกระแสฮาร์โมนิค P_{DC} จะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ค่าสูญเสียในเทอมที่เกิดจากกระแสไหลวนที่ขดลวด P_{EC} จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

รูปที่ 9 คือฮาร์ดแวร์ต้นแบบระดับสเกลห้องปฏิบัติการที่ใช้ในการทดสอบจริงประกอบด้วย

- HMT ที่มีขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุด มุมเลื่อนเฟสในแต่ละชุด 15 องศา ขนาด 4kVA, 400V/400V
- วงจรเรียงกระแส 6 พัลส์ 4 ชุดซึ่งเป็นตัวแทนของโหลดไม่เชิงเส้นในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์
- โหลดความต้านทานปรับค่าได้ 4 ชุด สำหรับปรับกระแสให้ได้ %โหลดที่ต้องการ ซึ่งในกรณีนี้การใช้โหลดความต้านทานที่ไม่มีตัวเก็บประจุแต่ก็สามารถสร้างกระแสฮาร์มอนิกส์ได้
- การวัดกำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิกส์จะใช้เครื่องวัดและวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า (Power Quality and Energy Analyzer) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 435 ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน IEC61000-4-30 คลาส A

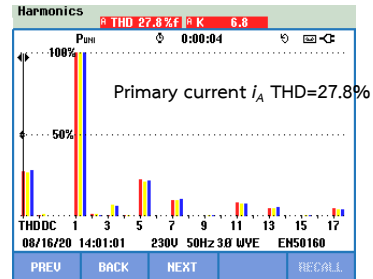


รูปที่ 9 ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบกระแสฮาร์มอนิกส์ต่อค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟส

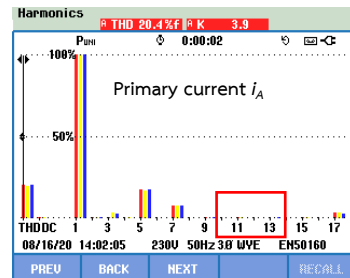
เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของ HMT เมื่อจ่ายโหลดไม่เชิงเส้นที่มีกระแสฮาร์มอนิกส์แตกต่างกันจะให้ผลต่อค่าสูญเสียแตกต่างกันอย่างไร ดังนั้นจะแสดงผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าของ HMT ดังนี้

3.1 การทดสอบจ่ายโหลดแต่ละชุดที่แตกต่างกันต่ออันดับและปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์

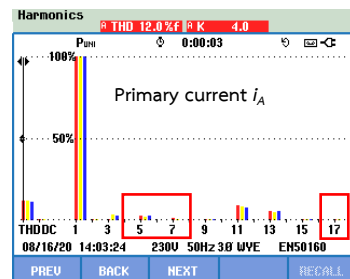
เพื่อยืนยันแนวคิดที่นำเสนอตั้งนั้นจะทดสอบการจ่ายโหลดที่แตกต่างกันต่อค่ากระแสฮาร์มอนิกส์แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองซึ่งจะได้ดังรูปที่ 10



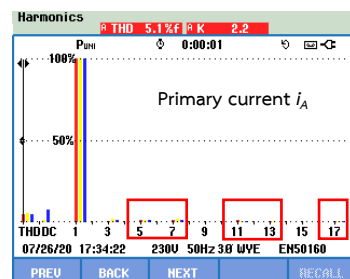
ก) การจ่ายโหลดเพียงชุดเดียว



ข) การจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกัน



ค) การจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกัน



ง) การจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกัน

รูปที่ 10 สเปกตรัมและ %THDi กระแสด้านปฐมภูมิ

รูปที่ 10 แสดงสเปกตรัมกระแสด้านปฐมภูมิของการจ่ายโหลดในแต่ละกรณี จากรูปจะเห็นว่าฮาร์มอนิกส์จะมีค่าสูงสุดเมื่อจ่ายโหลดชุดเดียวเนื่องจากเป็นกรณีที่ยังไม่ได้ลดฮาร์มอนิกส์เลย ถัดมาเป็นการจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันกรณีนี้ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 11 และ 13 จะหายไป ในขณะที่การจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกันฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5, 7 และ 17 จะหายไป และฮาร์มอนิกส์จะมีค่าต่ำสุดเมื่อจ่ายโหลดพร้อมกัน 4 ชุด สอดคล้องตามผลการจำลองในรูป 5-7 ค่าฮาร์มอนิกส์ในแต่ละกรณีแสดงได้ดังตารางที่ 2

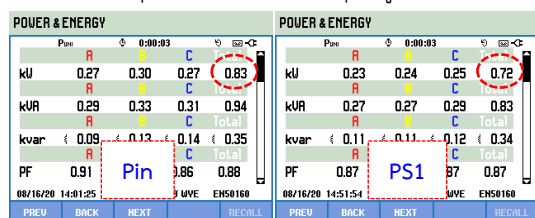
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบค่าฮาร์มอนิกทั้ง 4 กรณี

Loads of Sec.	1	1+2	1+3	1+2+3+4
%THDi	27.8	20.4	12.0	5.1
IEEE 519($\leq 15\%$)	x	x	✓	✓

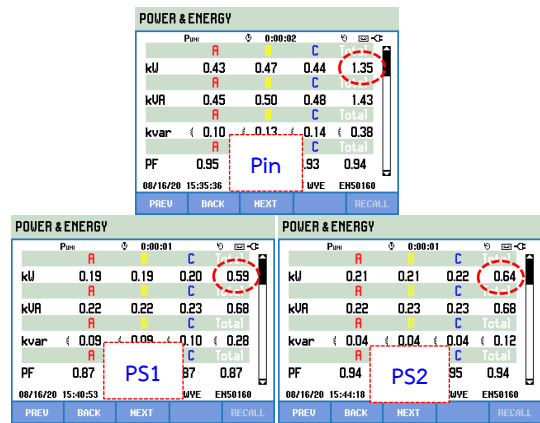
จากตารางที่ 2 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 1 พบว่าผลการทดสอบจะให้ %THDi ที่ใกล้เคียงกับผลการจำลอง เมื่อนำค่าดังกล่าวมาอ้างอิงกับมาตรฐาน IEEE 519 พบว่ากรณีจ่ายโหลดชุดเดียวและจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันจะไม่เป็นไปตามมาตรฐานเนื่องจากมี %THDi มากกว่า 15% ในขณะที่จ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกันและจ่ายโหลด 4 ชุด จะผ่านมาตรฐาน

3.2 การทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อกระแสฮาร์มอนิกส์ที่มีปริมาณและอันดับแตกต่างกัน

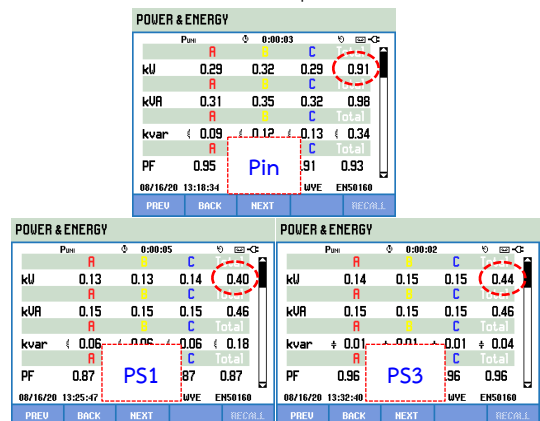
การทดสอบจ่ายโหลดที่ค่าร้อยละของกระแสพิกัด 25%, 50%, 75% และ 100% จะใช้ค่าความต้านทาน 1,225, 612, 410 และ 340 โอห์ม ตามลำดับ โดยมีจำนวนชุดการจ่ายโหลดด้านทุติยภูมิ 4 กรณี



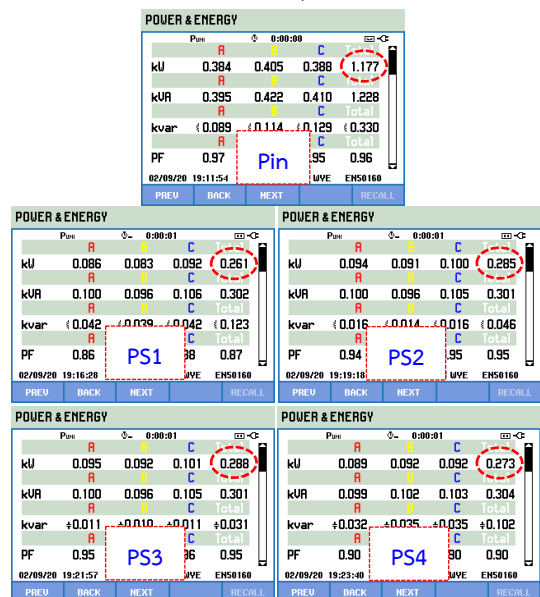
ก) กำลังไฟฟ้ากรณีจ่ายโหลดชุดเดียว(100%load)



ข) กำลังไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดชุด 1 และ 2 (75%load)



ค) กำลังไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลดชุด 1 และ 3 (50%load)



ง) กำลังไฟฟ้ากรณีจ่ายโหลด 4 ชุด (25%load)

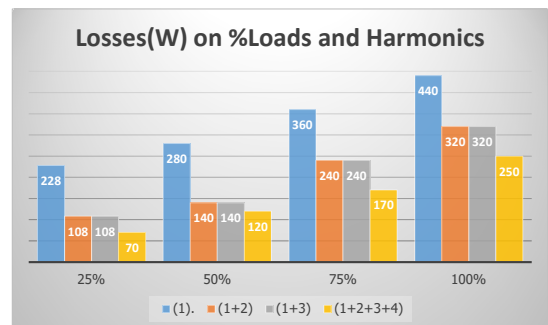
รูปที่ 11 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกเมื่อจ่ายโหลดตามเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

รูปที่ 11 คือผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิบางส่วน รูปที่ 11ก) แสดงกำลังไฟฟ้าของกรณีจ่ายโหลดเพียงชุดเดียวเมื่อจ่ายโหลด 100% ส่วนรูปที่ 11ข) คือกำลังไฟฟ้าของกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันเมื่อจ่ายโหลด 75% ถัดมารูปที่ 11ค) คือกำลังไฟฟ้าของกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกันเมื่อจ่ายโหลด 50% และสุดท้ายรูปที่ 11ง) แสดงกำลังไฟฟ้าของกรณีจ่ายโหลดทั้ง 4 ชุดพร้อมกันเมื่อจ่ายโหลด 25% เมื่อนำกำลังไฟฟ้าจริง(W) ทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบในขณะที่จ่ายโหลด 25% 50% 75% และ 100% ตามลำดับทั้ง 4 กรณีจะแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเมื่อจ่ายโหลด 25%, 50%, 75% และ 100% ที่กระแสฟลักซ์ทั้ง 4 กรณี

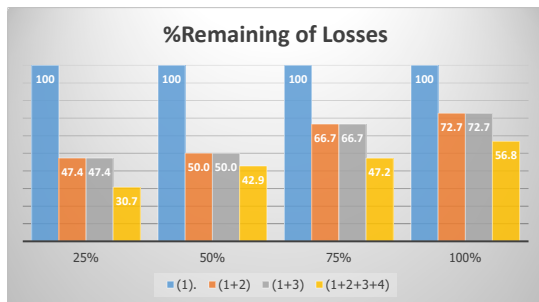
Loads of Sec.	Secondary Power (W)				Pout (W)	Pin (W)
	PS1	PS2	PS3	PS4		
25% Rated Trans.						
1	262	-	-	-	262	319
1+2	261	287	-	-	548	602
1+3	262	-	289	-	551	605
1+2+3+4	261	285	288	273	1107	1177
50% Rated Trans.						
1	400	-	-	-	400	470
1+2	400	430	-	-	830	900
1+3	400	-	440	-	840	910
1+2+3+4	380	410	420	390	1600	1720
75% Rated Trans.						
1	600	-	-	-	600	690
1+2	590	640	-	-	1230	1350
1+3	580	-	640	-	1220	1340
1+2+3+4	460	500	510	490	1960	2130
100% Rated Trans.						
1	720	-	-	-	720	830
1+2	700	750	-	-	1450	1610
1+3	700	-	750	-	1450	1610
1+2+3+4	600	650	650	620	2520	2770

จากตารางที่ 3 ค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้า(Pin)คือ กำลังไฟฟ้าด้านปฐมภูมิส่วนค่ากำลังไฟฟ้าด้านออก (Pout) ในแต่ละเงื่อนไขจะได้ออกมาจากการนำกำลังไฟฟ้าด้านทุติยภูมิในแต่ละชุดมารวมกันยกตัวอย่างเช่นกำลังไฟฟ้าด้านออกของกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันเมื่อจ่ายโหลด 75% จะได้กำลังไฟฟ้าด้านออกคือ ผลรวมของกำลัง PS1+PS2 =590W+640W=1230W เป็นต้น กรณีอื่นก็คิดได้ในการทำงานเดียวกันและเมื่อนำกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกในแต่ละเงื่อนไขมาหาผลต่างจะได้ความสัมพันธ์ของค่าสูญเสียดังในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสูญเสียต่อกระแสฮาร์มอนิกสในแต่ละกรณีและค่าร้อยละของกระแสฟลักซ์

จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าการจ่ายโหลดชุดเดียวจะมีค่าสูญเสียค่อนข้างสูงแต่เมื่อจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 2 ชุดค่าสูญเสียจะลดลง ทั้งกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกัน และกรณีจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกัน แม้ว่าการลดอันดับและปริมาณกระแสฮาร์มอนิกทั้งสองกรณีจะแตกต่างกันดังในรูปที่ 10 แต่ค่าสูญเสียจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากปัจจัยหลักเกิดค่าสูญเสียของกระแสไหลวนที่ขดลวดที่มีผลมาจากอันดับฮาร์มอนิกด้วยไม่ใช่เพียงแค่นาตกระแสฮาร์มอนิกเท่านั้น ซึ่งจะสอดคล้องตามผลการจำลองในรูปที่ 8 ในขณะที่การจ่ายโหลดพร้อมกัน 4 ชุด จะให้ค่าสูญเสียลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถแสดงการลดลงของค่าสูญเสียเมื่อเทียบกับกรณีจ่ายโหลดชุดเดียวในแต่ละกรณีได้ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ค่าร้อยละการสูญเสียที่เหลืออยู่ในแต่ละเงื่อนไขเมื่อเทียบกับการกระจายโหลดชุดเดียว

เมื่อพิจารณารูปที่ 13 พบว่าการลดลงของค่าสูญเสียสำหรับการจ่ายโหลด 2 ชุดจะเหลือน้อยกว่า 73% ในขณะที่การจ่ายโหลด 4 ชุดจะลดลงได้มากกว่าเหลืออยู่ไม่เกิน 57% เนื่องจากการนี้กระแสฮาร์โมนิกส์จึงลดลงอย่างมากฮาร์โมนิกส์อันดับแรกจะอยู่ที่ 23 ทำให้กระแสส่วนใหญ่จะมีแต่ความถี่หลักมูล นอกจากนั้นหากพิจารณาค่าร้อยละของกระแสพิคัดในการจ่ายโหลดพบว่าที่ค่าต่ำการลดลงของค่าสูญเสียจะลดลงมากกว่าเนื่องจากเป็นจุดทำงานที่ค่าสูญเสียของขดลวดจะเข้าใกล้กับค่าสูญเสียของแกนเหล็กซึ่งหม้อแปลงจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อค่าสูญเสียของทั้งคู่เท่ากัน[25] และที่สำคัญผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าการใช้หม้อแปลงเลื่อนเฟสจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกันจะสามารถลดค่าสูญเสียได้เกือบครึ่งเมื่อเทียบกับการจ่ายโหลดชุดเดียวที่ยังไม่ลดกระแสฮาร์โมนิกส์

3.3 การเปรียบเทียบการประหยัดพลังงาน

เพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานของกรณีจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกันกับกรณีจ่ายโหลดชุดเดียว โดยในที่นี้จะใช้ผลการทดสอบในตารางที่ 3 เมื่อจ่ายโหลด 75% ของกระแสพิคัดซึ่งจะเป็นกรณีทั่วไปในการจ่ายโหลดของหม้อแปลง เมื่อทราบแล้วว่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าและด้านออกกรณีจ่ายโหลดชุดเดียวเป็นเท่าไรเราจึงหาค่าสูญเสียขณะจ่ายโหลด(On load losses)ได้ และหากเราทราบค่าสูญเสียของแกนเหล็ก(Core losses) ดัง

แสดงในรูปที่ 14 เป็นเท่าไร เราจึงทราบค่าสูญเสียที่ขดลวด(Copper losses) ได้เช่นเดียวกัน และเพื่อให้ค่าสูญเสียดังกล่าวสามารถนำมาเปรียบเทียบกับกรณีจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกันได้ เราจะต้องนำค่าสูญเสียดังกล่าวคูณด้วย 4 เท่า สุดท้ายจึงได้ค่าสูญเสียที่ขดลวดที่จะนำมาใช้หาค่าพลังงานเพื่อเปรียบเทียบกันดังตารางที่ 4

Parameter	Value
P _{in}	0.00-002
P _{out}	0.03
kW	0.01
kVA	0.08
kvar	0.08
PF	0.12

รูปที่ 14 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงขณะไร้อุปกรณ์ที่แรงดันพิกัด

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าสูญเสียของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด 75%

No.of Loads	Pin (W)	Pout (W)	On load losses(W)	Core Losses(W)	Copper Losses(W)
①	690	600	90	30	60*4=240
④	1,350	1,230	120	30	90

หมายเหตุ ①คือการจ่ายโหลดชุดเดียว ④คือการจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกัน

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าสูญเสียของหม้อแปลงเลื่อนเฟสขนาด 4 kVA ระหว่างกรณีจ่ายโหลด 1 ชุด และ 4 ชุด เมื่อจ่ายโหลด 75% จากตารางแสดงให้เห็นว่าค่าสูญเสียกรณีจ่ายโหลด 1 ชุดคิดเป็น 4 ชุดจะมีค่าสูงกว่ากรณีจ่ายโหลด 4 ชุดประมาณ 150 W ดังนั้นหากคิดว่าหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานวันละ 8 ชั่วโมง เดือนละ 26 วัน การลดกระแสฮาร์โมนิกส์จะสามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ประมาณ 374.4 หน่วย/ปี (150W*8ชม*26วัน*12เดือน/1000) คิดเป็นเงินประมาณ 1,621.04 บาท/ปี (4.3297 บาท/หน่วย, PEA) และหากคิดตามอายุใช้งานของหม้อแปลง 25 ปี จะได้ประมาณ 40,526 บาท นอกจากนั้นหากพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังทั้งสองกรณีด้วยจะได้ดังรูปที่ 15

POWER & ENERGY					POWER & ENERGY				
P _{WH}	A	0.22	C	0.25	P _{WH}	A	0.72	C	0.74
kW	A	0.22	C	0.25	kW	A	0.67	C	0.67
kVA	A	0.25	C	0.27	kVA	A	0.72	C	0.72
kvar	A	0.09	C	0.13	kvar	A	0.10	C	0.09
PF	A	0.90	C	0.82	PF	A	0.99	C	0.98
08/16/20 15:34:38	230V	50Hz	30 WVE	EN50160	07/26/20 18:38:12	230V	50Hz	30 WVE	EN50160
PREV	BACK	NEXT	RECALL		PREV	BACK	NEXT	RECALL	

รูปที่ 15 ผลการทดสอบตัวประกอบกำลังกรณีจ่ายโหลด
ชุดเดียวและจ่ายโหลด 4 ชุดสำหรับโหลด 75%

จากรูปที่ 15 จะเห็นว่าค่าตัวประกอบกำลังของการจ่ายโหลด 4 ชุดจะมีค่าสูงถึง 0.96 แต่กรณีจ่ายโหลดชุดเดียวจะมีค่าต่ำเพียง 0.86 เท่านั้นซึ่งเกิดจากกระแสฮาร์โมนิกที่สูงดังแสดงความสัมพันธ์ตามสมการที่(6) หากค่าตัวประกอบกำลังดังกล่าวต่ำกว่า 0.85 ซึ่งเกินจากข้อกำหนดของการไฟฟ้าจะถูกปรับค่าวาร์ (Var charge) เพิ่มเติมได้ด้วย ดังนั้นการลดกระแสฮาร์โมนิกจึงช่วยให้ไม่ต้องเสียค่าวาร์ได้อีกทางหนึ่ง

4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการศึกษาผลของกระแสฮาร์โมนิกจากวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 6 พัลส์ที่เป็นตัวแทนของโหลดไม่เชิงเส้น 3 เฟส 3 สายในระบบควบคุมมอเตอร์ต่อค่าสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า ในบทความได้ประยุกต์ใช้หม้อแปลงเลื่อนเฟสแบบขดลวดทุติยภูมิ 4 ชุดมาจ่ายโหลดอย่างอิสระ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ากระแสฮาร์โมนิกจะทำให้ค่าสูญเสียจากกระแสไหลวนที่ขดลวดเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทำให้การจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกันและชุดที่ 1 และ 3 พร้อมกันมีค่าสูญเสียใกล้เคียงกันแม้ว่าค่า %THDi จะแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามกรณีการจ่ายโหลดชุดที่ 1 และ 2 พร้อมกัน %THDi จะมีค่าประมาณ 20% จึงไม่เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 519 ในขณะที่การจ่ายโหลด 4 ชุดพร้อมกัน %THDi จะเป็นไปตามมาตรฐานและยังลดค่าสูญเสียได้ต่ำกว่า 57% เมื่อเทียบกับการจ่ายโหลดชุดเดียวจึงทำให้สามารถลดการใช้พลังงานได้มาก ดังนั้น

หากนำหม้อแปลงไฟฟ้าเลื่อนเฟสมาประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์จะสามารถลดกระแสฮาร์โมนิกได้ตามมาตรฐานและลดการใช้พลังงานได้ด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิในการสนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*, Pearson Education, New Delhi, 2001.
- [2] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE std. 519-1992, 1992.
- [3] *Limits of Harmonics in Electricity for Business and Industry*, PRC-PQG-01-1998, 1998.
- [4] E.F.Fuchs, D.Yildirim and W.M.Grady, "Measurement of eddy-current loss coefficient PEC-R, derating of single-phase transformers, and comparison with K-factor approach," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, pp. 148–154, Jan. 2000.
- [5] T.C. Sekar, B.J. Rabi, "A Review and Study of Harmonic Mitigation Techniques," in *Proc. of ICETEEM-2012*, IEEE, 2012, pp. 93–97.
- [6] B. Singh, S. Gairola, B. N. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad, "Multipulse AC–DC converters for improving power quality: A review," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 3, pp. 260–281, Jan. 2008.

- [7] J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F. Z. Peng, "Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, Aug. 2002.
- [8] B. Singh, G. Bhuvaneswari, and V. Garg, "A novel polygon based 18-pulse AC–DC converter for vector controlled induction motor drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 488–497, Feb. 2007.
- [9] B. S. Lee, P. N. Enjeti, and I. J. Pitel, "A new 24-pulse diode rectifier system for ac motor drives provides clean power utility interface with low kVA components," in *Proc. IEEE IAS'96*, 1996, pp. 1024–1031.
- [10] S. Choi, B. S. Lee, and P. N. Enjeti, "New 24-pulse diode rectifier systems for utility interface of high power AC motor drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 33, no. 2, pp. 531–541, Mar./Apr. 1997.
- [11] F. J. Chivite-Zabalza, A. J. Forsyth, and D. R. Trainer, "A simple passive 24-pulse ac–dc converter with inherent load balancing," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 2, pp. 430–439, Mar. 2006.
- [12] B. Singh, G. Bhuvaneswari, and V. Garg, "T-connected autotransformer-based 24-pulse ac–dc converter for variable frequency induction motor drives," *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 21, no. 3, pp. 663–672, Sep. 2006.
- [13] B. Singh, G. Bhuvaneswari, and V. Garg, "24-pulse ac–dc converter for power quality improvement in vector controlled induction B motor drives," *Int. J. Elect. Power Compon. Syst.*, vol. 34, no. 10, Oct. 2006, pp. 1077–1098.
- [14] B. Singh, V. Garg, and G. Bhuvaneswari, "Polygon connected autotransformer based 24-pulse ac–dc converter for power quality improvement," in *Proc. India Int. Conf. Power Electron. IICPE'06*, Chennai, India, Dec. 19–21, 2006, pp. 125–130.
- [15] B. Singh and S. Gairola, "A fork connected auto-transformer based 24-pulse ac–dc converter," in *Proc. India Int. Conf. Power Electron. IICPE, Chennai*, India, Dec. 19–21, 2006, pp. 183–187.
- [16] B. Singh, V. Garg, and G. Bhuvaneswari, "Polygon-connected autotransformer-based 24-pulse AC–DC converter for vector controlled induction-motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 1, pp. 197–208, Jan. 2008.
- [17] P. Kiatsookkanatorn, N. Watjanatepin, "Power Quality Improvement by Using a 15-Degree Phase Shifting Transformer for 24-Pulse Rectifiers," *LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL.*, vol. 34, no. 1, PP 9–16, March. 2017.
- [18] B. Wu, *High-Power Converters and AC Drives*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006, pp. 68–76.
- [19] D. Yildirim and E. F. Fuchs, "Measured transformer derating and comparison with harmonic loss factor (FHL) approach," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, pp. 186 – 191, Jan. 2000.

- [20] A. Elmoudi, M. Lehtonen and H. Nordman, "Effect of harmonics on transformers loss of life," in *IEEE Int 'l Sympos. Elec. Insulation*, 2006, pp. 408-411.
- [21] N. Mohan, T. Undeland and W.P. Bobbins, *Power Electronics - Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons, 3rd Edition, 2003. pp.103 – 106.
- [22] L. W. Pierce, "Transformer design and application considerations for nonsinusoidal load currents," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 32, no. 3, pp. 633–645, May/June 1996.
- [23] MIRUS international Inc. (2021, September 27). Harmonic Mitigating Transformers. [Online]. Available: <http://www.mirusinternational.com>.
- [24] *IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry- Type Power and Distribution Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents*, IEEE C57.110-2008, August 2008.
- [25] B.L.Theraja, A.K. Theraja, "Transformers," in *A Text Book of Electrical Technology S.I units*, vol. 2: AC and DC machines, 23rd ed. India, S Chand & Co Ltd., 2006, pp. 1169.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง

จิตติวัฒน์ ตริวงศ์* นริตน์ แยมโอษฐ์ และ อติสรณ์ พงษ์สุวรรณ

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

รับบทความ 5 เมษายน 2564 แก้ไขบทความ 15 กันยายน 2564 ตอรับบทความ 27 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาระดับและลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้างอาคาร และ 2) เสนอแนะแนวทางในการป้องกันความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง โดยกลุ่มตัวอย่างเป็นบุคลากรในโครงการก่อสร้าง ซึ่งประกอบด้วย ผู้จัดการโครงการ วิศวกรโครงการ วิศวกรสนาม และช่างควบคุมงาน จำนวน 520 คน โดยใช้แบบสอบถามออนไลน์เป็นเครื่องมือในการรวบรวมข้อมูล สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน การแจกแจงความถี่ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน ผลการวิจัยพบว่า 1) บุคลากรในโครงการก่อสร้าง ให้ความสำคัญกับปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้างในระดับมาก โดยปัจจัยด้านการออกแบบมีระดับความสำคัญสูงสุด รองลงมา คือ ปัจจัยด้านทรัพยากร ด้านปัจจัยภายนอกและอื่น ๆ และด้านการปฏิบัติงาน ตามลำดับ และปัจจัยด้านการปฏิบัติงาน จะส่งผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้างมากที่สุด รองลงมา คือ ด้านการออกแบบ ด้านปัจจัยภายนอกและอื่น ๆ และด้านทรัพยากร ตามลำดับ และ 2) การป้องกันความล่าช้าของโครงการก่อสร้างนั้น ควรมุ่งเน้นปัจจัยด้านการปฏิบัติงานนั้น โดยการศึกษาแบบ วิธีการก่อสร้าง และการวางแผนโครงการ อย่างละเอียดรอบคอบ ร่วมกับการมุ่งเน้นด้านการออกแบบ โดยการตรวจสอบสถานที่ก่อสร้างให้ถูกต้องตรงตามแบบก่อสร้าง และมุ่งเน้นด้านปัจจัยภายนอกและอื่น ๆ โดยรับฟังความคิดเห็นจากประชาชนในพื้นที่ อีกทั้งยังมุ่งเน้นด้านทรัพยากร โดยการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการก่อสร้างให้เพียงพอ เพื่อให้เกิดผลลัพธ์สูงสุดตามทัศนยะบุคลากรในโครงการก่อสร้าง

คำสำคัญ : ปัจจัยที่ส่งผล; ความล่าช้า; โครงการก่อสร้าง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6979 7594, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: titiawat.t@cit.kmutnb.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Factors Affecting Delay of Construction Projects

Titiwat Triwong* Nirat Yamoat and Adisorn Pongsuwan

College of Industry Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

Received 5 April 2021; Revised 15 September 2021; Accepted 27 December 2021

Abstract

The research is aimed to 1) study the level and priority of the factors affecting the delay of construction projects and 2) provide suggestions in relation to the prevention of such delay. The sample is 520 people who were working for different construction projects. They were project managers, project engineers, field engineers, and foremen. The data were collected by using online questionnaires and analyzed to find out mean, standard deviation (SD), frequency, correlation coefficient, and confirmatory factor analysis. The findings reveal two significant aspects. First, those who were working in the construction projects concerned about the factors affecting the delay of the projects at high level. Respectively, the factors related to design, resource, external factors and others were taken into consideration. The factor regarding to work performance is regarded affecting the project delay at the highest level. Other factors, i.e., the design, external factors and others, and resource have the affects at the lower level. Second, the work-related factors can help prevent the project delay. In other words, the construction plan and methods as well as the project management should be well-implemented in accordance with the design. The construction site should be on inspection considering its drawing. Regarding the external factors and others, the public voices of those living around the construction site should be taken into consideration. Furthermore, the effective use of the resources can be carried out by sufficiently preparing all materials, tools, and equipment for constructing any project effectively as a consequence.

Keywords : Affecting Factors; Delay; Construction Project

* Corresponding Author. Tel.: +668 6979 7594, E-mail Address: titiwat.t@cit.kmutnb.ac.th

1. บทนำ

ปัจจุบันงานก่อสร้างมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศไทย ไม่ว่าจะเป็นงานโครงสร้างพื้นฐาน งานอาคารสูง งานอาคาร และงานบ้านพักอาศัย ซึ่งกำลังเกิดขึ้นมากมาย แต่ปัญหาสำคัญประการหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่ออย่างมากต่อการก่อสร้าง คือ ความล่าช้าในการก่อสร้าง ซึ่งอาจเป็นช่วงระยะเวลาที่ขยายออกไปเนื่องจากงานบางส่วนที่ยังไม่ได้ทำ จากการที่มีสิ่งที่ไม่คาดคิดเกิดขึ้น สิ่งที่ไม่คาดคิดในงานก่อสร้างอาจเกิดขึ้นได้จากปัจจัยจากตัวผู้รับเหมาเอง หรือเกิดจากปัจจัยภายนอกที่มากกระทบกับโครงการก่อสร้างได้ [1]

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นที่ทราบว่ามีชื่อเสียงด้านลบในเรื่องความล่าช้ามานานแล้ว การวิเคราะห์เรื่องความล่าช้าอาจถูกละเอียดหรือไม่ก็ปฏิบัติกับมันเหมือนเป็นเรื่องปกติที่เกิดขึ้นในโครงการก่อสร้าง M. Gunduz et al. [2] ได้ศึกษาความล่าช้าของงานก่อสร้างในประเทศตุรกีว่ามีหลายสาเหตุ โดยใช้การระบุปัจจัยล่าช้าด้วยวิธีดัชนีความสำคัญสัมพัทธ์ (RII) ซึ่งสามารถระบุปัจจัยล่าช้าได้ 83 ปัจจัย 9 กลุ่ม ได้แก่กลุ่มที่ปรึกษา กลุ่มผู้รับเหมา กลุ่มผู้ออกแบบ กลุ่มอุปกรณ์กลุ่มปัจจัยภายนอก กลุ่มแรงงาน กลุ่มวัสดุ กลุ่มเจ้าของ และกลุ่มโครงการ โดยใช้แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) ในการแสดงรายละเอียดที่ได้จากผู้ถูกสัมภาษณ์เพื่อการวิเคราะห์ เช่นเดียวกับในงานวิจัยของ R. F. Aziz [3] ใช้วิธีดัชนีความสำคัญสัมพัทธ์ (RII) ระบุปัจจัยล่าช้าโครงการก่อสร้างในประเทศอียิปต์ได้ 99 ปัจจัย เป็น 9 กลุ่มเช่นกัน ในประเทศเดนมาร์ก J. K. Larsen et al. [4] ได้นำวิธีดัชนีความสำคัญสัมพัทธ์ (RII) มาช่วยระบุปัจจัยล่าช้าโครงการก่อสร้างในประเทศเดนมาร์ก โดยใช้ร่วมกับ Friedman's Test เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยล่าช้าในโครงการก่อสร้างว่ามีผลต่อเวลา ต้นทุน และคุณภาพ พบว่า 26 ปัจจัยใน 5 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มปัจจัยภายนอก กลุ่มความสัมพันธ์ของสัญญา กลุ่มการจัดการโครงการ กลุ่มการเปลี่ยนแปลงโครงการ และ

กลุ่มการเงินและการจัดตาราง พบว่า การจัดการโครงการเป็นปัจจัยแห่งความล่าช้าที่ส่งผลกระทบต่อเวลาต้นทุนและคุณภาพงานโครงการก่อสร้างมากที่สุด

จากนั้น O. Abbasi et al. [5] ได้นำวิธีดัชนีความสำคัญสัมพัทธ์ (RII) มาใช้ร่วมกับแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) เพื่อระบุปัจจัยล่าช้าที่เกิดขึ้นในโครงการก่อสร้างของประเทศอิหร่าน พบว่าปัจจัยที่เป็นสาเหตุแห่งความล่าช้าในโครงการก่อสร้างทั้งหมด 127 ปัจจัย จาก 8 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มเจ้าของ กลุ่มผู้รับเหมา กลุ่มที่ปรึกษา กลุ่มจัดซื้อ กลุ่มอุปกรณ์ กลุ่มแรงงาน กลุ่มผู้ออกแบบ และกลุ่มอื่น นอกจากนั้นพบว่ากลุ่มผู้รับเหมาเป็นกลุ่มที่เป็นสาเหตุของความล่าช้ามากที่สุด อันเนื่องมาจากปัญหาการเงินของผู้รับเหมาเอง

การศึกษาจากรายงานการจัดการโครงการเพื่อระบุปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรม Y. C. Kog [6] พบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างบ้านพักอาศัยในประเทศสิงคโปร์ที่ส่งผลให้ต้องขยายสัญญา ได้แก่ ปัจจัยการส่งมอบของที่หน้างานล่าช้า ปัจจัยคำสั่งที่ไม่แน่นอน ปัจจัยจากผู้รับเหมา เป็นสำคัญ ซึ่งสามารถปรับปรุงได้ด้วยการจัดการสื่อสารในโครงการให้ดีขึ้น Y. C. Kog [7] ศึกษาเปรียบเทียบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างทั้ง 3 ประเทศ ได้แก่ ประเทศมาเลเซีย ประเทศไทย และประเทศเวียดนาม พบว่า ทั้งสามประเทศมีสาเหตุมาจากปัจจัยผู้รับเหมาเป็นหลัก ส่วนประเทศไทยและเวียดนามจะมีปัจจัยจากเจ้าของที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในโครงการ

ความไม่เข้าใจในข้อกำหนดและสัญญาส่งผลให้เกิดข้อพิพาทที่อาจเกิดขึ้นได้เสมอในระหว่างโครงการก่อสร้างซึ่งเป็นความเสี่ยงที่ส่งผลให้โครงการก่อสร้างล่าช้าตามมา ดังเช่น M. Kadry et al. [8] พบว่าในกลุ่มประเทศที่กำลังพัฒนา ส่วนใหญ่โครงการก่อสร้างระดับชาติใช้บริการบริษัทรับเหมาข้ามชาติ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง

ดังกล่าว อีกทั้งการได้มาซึ่งข้อมูลสารสนเทศที่แน่และมีข้อจำกัดจะส่งผลให้การประมาณการหรือการวางแผนใดใดเป็นไปได้ยาก M. Magdy et al. [9] กล่าวว่าการบริหารสัญญาในโครงการก่อสร้างในประเทศอียิปต์จำเป็นมากเพื่อป้องกันไม่เกิดข้อพิพาท ผู้ดูแลโครงการโดยเฉพาะผู้รับเหมาและที่ปรึกษาจำเป็นต้องเข้าใจและประชุมบ่อยครั้งเพื่อหาข้อสรุปเป็นเอกฉันท์ในการทำงาน เนื่องจากความล่าช้าในโครงการก่อสร้างมีลักษณะเฉพาะตัว อยู่รอบโครงการ ไม่มีสัญญาณให้คาดเดาได้และไม่เกิดขึ้น

Y. C. Liu et al. [10] ได้ศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการรับรู้ถึงสาเหตุจากความล่าช้าอันเนื่องมาจากการก่อสร้าง (Construction Task) ทั้งจากประเทศจีนและสหรัฐอเมริกา ด้วยวิธีสัมพัทธ์เชิงลึกใช้ร่วมกับวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis) เพื่อจัดกลุ่มความสัมพันธ์ของปัจจัย ได้แก่ กลุ่มที่หนึ่งความร่วมมือกันในเรื่องผู้นำและการสื่อสาร กลุ่มที่สองความชัดเจนในเรื่องงานออกแบบและข้อกำหนด กลุ่มที่สามในเรื่องการขนส่งและเครื่องมือ กลุ่มที่สี่เรื่องความสามารถในการหาวัสดุและแรงงาน กลุ่มที่ห้าในเรื่องที่ตั้งสถานที่ก่อสร้างและการได้มาซึ่งพื้นที่ สุดท้ายกลุ่มที่หกในเรื่องคุณภาพของวัสดุ

ในประเทศไทย C. Sinsawat [11] ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความล่าช้าของงานก่อสร้างอาคารที่ทำการศาลยุติธรรม โดยวิธีสัมพัทธ์เชิงลึกจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 28 คน จาก 4 กลุ่ม คือ กลุ่มเจ้าของโครงการ กลุ่มผู้ออกแบบ กลุ่มผู้ควบคุมงาน และกลุ่มผู้รับเหมางานก่อสร้าง ผลการศึกษาพบว่า สาเหตุที่ส่งผลให้เกิดความล่าช้าของงานก่อสร้างที่ทำการศาลยุติธรรม 4 อันดับแรก คือ ปัญหาการเปลี่ยนแปลงแก้ไขแบบก่อสร้างจากเจ้าของโครงการ ปัญหาการส่งมอบพื้นที่ล่าช้า ปัญหาแบบแปลนรายการประกอบแบบมีความขัดแย้ง และปัญหาสภาพคล่องทางการเงิน ควรสำรวจปัญหาในพื้นที่ก่อสร้างจริงก่อนทำการวางแผน

C. Kongpreechakul [12] ศึกษาผลกระทบในการก่อสร้างโครงการบ้านพักอาศัย กรณีศึกษาบริษัทเจ้าของโครงการ โดยวิเคราะห์ความเสี่ยงของระดับโอกาสที่จะเกิดขึ้นและระดับความรุนแรงของแต่ละปัจจัยความเสี่ยง ในการก่อสร้างที่ทำให้เจ้าของโครงการได้รับผลกระทบในหลากหลายด้าน จากความเสี่ยงที่เกิดขึ้น โดยรวบรวมข้อมูลโดยการสอบถามผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์การก่อสร้างโครงการบ้านพักอาศัยจำนวน 20 ท่าน และมีคุณวุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรีขึ้นไป จากผลการศึกษาพบว่า มี 10 อันดับความรุนแรงของปัจจัยความเสี่ยงสูงสุดที่มีโอกาสเกิดความเสี่ยงและระดับผลกระทบ จากทั้งหมดจำนวน 41 ปัจจัย

W. Kongsong and C. Pooworulchai [13] ศึกษาสาเหตุของความล่าช้าในโครงการก่อสร้างโดยวิเคราะห์ดัชนีความสำคัญสัมพันธ์ร่วมกับการทบทวนวรรณกรรม พบว่าสาเหตุของความล่าช้าโดยรวมอันดับหนึ่งคือ ปัญหาการขาดแคลนแรงงาน อันดับสองคือการตัดสินใจที่ล่าช้า ทั้งนี้ผลจากการวิเคราะห์สาเหตุแบบตัดกลุ่ม มูลเหตุจากกลุ่มผู้ว่าจ้างคือ การกำหนดขอบเขตและวัตถุประสงค์ของงานก่อสร้างไม่ชัดเจน อีกทั้งการส่งมอบพื้นที่ในการทำงาน มูลเหตุจากกลุ่มผู้ออกแบบและควบคุมงานคือ กระบวนการตัดสินใจที่ล่าช้า มูลเหตุจากกลุ่มผู้รับจ้างคือ ความผิดพลาดจากการทำงานและปัญหาการขาดแคลนแรงงาน

R. Seubsamut [14] ศึกษาถึงสาเหตุที่มีผลต่อความล่าช้าโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานกรุงเทพมหานคร โดยวิเคราะห์ดัชนีความสำคัญสัมพันธ์เพื่อระบุสาเหตุของความล่าช้าที่มีผลให้งานก่อสร้างไม่แล้วเสร็จตามสัญญา พบว่า 1) สาเหตุที่มีความสำคัญของความล่าช้าโดยรวมอันดับหนึ่ง คือ ปัจจัยด้านข้อจำกัดเรื่องสภาพการจราจรและการจัดการปิดพื้นที่เพื่อทำงาน อันดับสอง คือปัจจัยการแก้ไขเปลี่ยนแปลงแบบและรายการประกอบแบบระหว่างการก่อสร้าง 2) ผลจากการวิเคราะห์แบบแบ่งกลุ่มสาเหตุ โดยกลุ่มผู้

ควบคุมงานก่อสร้างส่วนราชการให้ความสำคัญกับปัจจัยภายนอกมากที่สุด

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าส่วนใหญ่เป็นวิธีวิจัยเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพโดยผ่านเครื่องมือวิธีดัชนีความสำคัญสัมพัทธ์ (RII) ร่วมกับวิธีการสถิติ หรือเครื่องมือควบคุมคุณภาพทั้ง 7 หรือเชิงวรรณกรรมในการระบุปัจจัยแห่งความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง ยังมีงานวิจัยน้อยมากเพื่อหากลุ่มมูลเหตุแห่งความล่าช้าในโครงการก่อสร้างจากการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis) มีเพียงจากงานวิจัยของ [10] ได้นำวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันมาใช้รวมกับการสัมภาษณ์เชิงลึกเพื่อแบ่งกลุ่มปัจจัยจากความล่าช้าของลักษณะงานก่อสร้างที่ทำ (Construction Task Attributes) เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยดังกล่าว แต่ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง ในทัศนะของบุคลากรในโครงการก่อสร้าง จากทั้งฝ่ายเจ้าของโครงการ ฝ่ายผู้รับจ้าง และฝ่ายที่ปรึกษา ในกลุ่มโครงสร้างพื้นฐาน กลุ่มงานอาคาร กลุ่มบ้านพักอาศัย และกลุ่มงานอาคารสูง เพื่อจัดกลุ่มความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องที่ทำให้กลุ่มผู้เกี่ยวข้องได้เข้าใจถึงสาเหตุของปัจจัยแห่งความล่าช้าในโครงการงานก่อสร้างนี้มากขึ้น จนสามารถนำมาวางแผนและการจัดการความสำคัญในการป้องกันความล่าช้าของโครงการก่อสร้างต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาเรื่องปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) การรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัย และบทความ ในประเด็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง เพื่อนำมากำหนดตัวแปรในการสร้างแบบสอบถาม (Questionnaire) โดยเก็บข้อมูลจากผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง 3 กลุ่มแบบเจาะจง ได้แก่ กลุ่มผู้ว่าจ้างหรือเจ้าของโครงการ กลุ่มผู้รับจ้างหรือ

ผู้รับเหมาโครงการ และกลุ่มที่ปรึกษาโครงการ การวัดระดับความคิดเห็นมูลเหตุของความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง แบ่งเกณฑ์การวัดเป็น 5 ระดับ ดังนี้ มากที่สุด = 5 มาก = 4 ปานกลาง = 3 น้อย = 2 ไม่มี = 1

การกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่าง โดยขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องจากสามส่วนจากกลุ่มตัวอย่างบุคลากรในโครงการก่อสร้าง โดยใช้วิธีการคำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่าง [15] จำนวน 520 คน คิดเป็น 20 เท่าของจำนวนตัวแปรสังเกตได้ (26 ตัว) ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยตัวแปร 4 ด้าน ได้แก่ ด้านการออกแบบ 4 ตัวแปร ด้านทรัพยากร 6 ตัวแปร ด้านการปฏิบัติการ 6 ตัวแปร และด้านปัจจัยภายนอก 8 ตัวแปร เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นแบบสอบถามออนไลน์ เป็นคำถามเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างใน 4 ด้าน แบบสอบถามแบ่งเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 ข้อมูลเกี่ยวกับสถานภาพของผู้ตอบแบบสอบถาม และตอนที่ 2 ข้อมูลระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง

การตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือดำเนินการดังนี้ (1) ตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา การพิจารณาด้านเนื้อหา ความหมาย และการใช้ภาษาโดยผู้ทรงคุณวุฒิด้านนวัตกรรม ซึ่งข้อคำถามมีค่า IOC อยู่ระหว่าง 0.8-1.00 ถ้ามีค่าไม่น้อยกว่า 0.50 ถือว่าเป็นค่าความเที่ยงตรงที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ได้ (2) ตรวจสอบความเชื่อมั่น (Cronbach's Alpha) ก่อนนำไปใช้เก็บข้อมูลจริงกับกลุ่มตัวอย่าง โดยนำแบบสอบถามที่ผ่านการตรวจแล้วไปทดลองกับกลุ่มประชากรที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 30 ชุด ด้วยวิธีสถิติการวิเคราะห์องค์ประกอบ พบว่า ผลการวิเคราะห์ข้อคำถามกับตัวแปรแต่ละด้าน ทั้ง 26 ตัวแปร เป็นเนื้อหาที่สอดคล้องกัน พบว่า ค่าความเชื่อมั่นของชุดแบบสอบถามมีค่าเฉลี่ยทั้งหมด 0.931 จึงมีความน่าเชื่อถือ

การเก็บรวบรวมข้อมูล ขั้นตอนมีดังนี้ (1) เตรียมแบบสอบถามที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ซึ่งประกอบด้วย เพศ อายุ ระดับการศึกษา ฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ประเภทโครงการก่อสร้าง ตำแหน่งงาน และประสบการณ์ทำงาน โดยผู้วิจัยได้ค้นหารายชื่อเจ้าของโครงการ บริษัทรับเหมาและบริษัทที่ปรึกษาด้านวิศวกรรมโยธาจากสภาวิศวกร สมาคมวิศวกรที่ปรึกษาแห่งประเทศไทย และบริษัท อินฟอร์เมชั่น คอนสตรัคชั่น จำกัด โดยมีเจ้าของโครงการกว่า 1,500 โครงการ บริษัทรับเหมากว่า 2,400 บริษัท และบริษัทที่ปรึกษากว่า 900 บริษัท โดยการโทรศัพท์เพื่อระบุตัวตนและนำมาคัดกรองรายชื่อผู้ที่ให้ความยินยอมในการสัมภาษณ์ (2) ขออนุญาตและขอข้อมูลจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือเพื่อขอความร่วมมือและส่งด้วยจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ (Google Form) จำนวน 530 ฉบับ (3) ผลการตอบกลับคืนของโครงการที่เป็นกลุ่มตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 520 คน เพื่อนำมาใช้เป็นตัวแทนของผู้เชี่ยวชาญในแต่ละสถานประกอบการ

การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามโดยแบ่งเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 ข้อมูล เกี่ยวกับสถานภาพของผู้ตอบแบบสอบถาม เป็นการตรวจสอบลักษณะการแจกแจงของตัวแปรที่เกี่ยวกับสถานภาพ โดยวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐาน เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่า ตัวแปรสถานภาพทั้ง 7 ตัวแปร โดยคุณลักษณะของตัวแปรสถานภาพทั้ง 7 สามารถนำมาพิจารณาความสัมพันธ์เชิงลักษณะไปกับตัวแปรทั้ง 26 ปัจจัย และตอนที่ 2 ข้อมูลระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง ซึ่งเป็นมาตรวัดประมาณค่า 5 ระดับ เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาค่าระดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้างด้วยวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐาน เช่น ค่าเฉลี่ย การนำมาตรประมาณค่าอันดับแรกขึ้นมาใช้ระบุลำดับที่ตั้งเช่นงานวิจัยของ L. Silanoi and K. Chindaprasert [16]

พบว่าในการใช้มาตรประมาณค่าประเภทอันดับที่เพื่อแสดงถึงลำดับที่นั้นสามารถนำเอาตัวเลขดังกล่าวมาดำเนินการทางคณิตศาสตร์ได้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 มาตรลำดับความสำคัญปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง

มาตรลำดับความสำคัญ	คำอธิบาย
4.51 - 5.00	มากที่สุด
3.51 - 4.50	มาก
2.51 - 3.50	ปานกลาง
1.51 - 2.50	น้อย
1.00 - 1.50	น้อยที่สุด

จากตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยที่มากกว่า 4.51 ถึง 5.00 ถือว่ามีระดับความสำคัญมากที่สุด ค่าเฉลี่ยที่มากกว่า 3.51 ถึง 4.50 ถือว่ามีระดับความสำคัญมาก จากนั้นค่าเฉลี่ยที่มากกว่า 2.51 ถึง 3.50 ถือว่ามีระดับความสำคัญปานกลาง ค่าเฉลี่ยที่มากกว่า 1.51 ถึง 2.50 ถือว่ามีระดับความสำคัญที่น้อย และสุดท้ายค่าเฉลี่ยที่มากกว่า 1.00 ถึง 1.50 มีระดับความสำคัญที่น้อยที่สุด การส่งผลต่อโครงการน้อยจนแทบไม่มีผล

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับสถานภาพของกลุ่มตัวอย่าง

ตารางที่ 2 ข้อมูลสถานภาพของผู้เข้าร่วม

ผลการวิเคราะห์ลักษณะของผู้เข้าร่วม	ร้อยละ
1. เพศ	ชาย 83.1 หญิง 16.9
2. อายุ	30.4 ปี
3. ประสบการณ์ทำงาน	6.68 ปี
4. ระดับการศึกษา	ต่ำกว่าปริญญาตรี 1.2 ปริญญาตรี 85.0 สูงกว่าปริญญาตรี 13.8

ตารางที่ 2 ข้อมูลสถานภาพของผู้เข้าร่วม (ต่อ)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะของผู้เข้าร่วม	ร้อยละ
5. ฝ่าย	
เจ้าของโครงการ	23.3
ผู้รับจ้าง	75.0
ที่ปรึกษาโครงการ	2.7
6. ตำแหน่งงาน	
วิศวกรโครงการ	30.4
วิศวกรสำนักงาน	28.1
วิศวกรสนาม	26.9
ผู้จัดการโครงการ	10.8
ช่างควบคุมงาน	3.8
7. ประเภทโครงการ	
ก่อสร้าง	
งานโครงสร้างพื้นฐาน	34.4
งานอาคาร	24.6
งานบ้านพักอาศัย	22.3
งานอาคารสูง	18.5

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลสถานภาพของกลุ่มตัวอย่างในงานวิจัยนี้ พบว่า ผู้ให้ข้อมูลส่วนใหญ่เป็นเพศชายคิดเป็นร้อยละ 83.1 มีอายุเฉลี่ย 30.40 ปี (SD = 5.004) โดยมีประสบการณ์การทำงานเฉลี่ย 6.68 ปี (SD = 4.960) มีการศึกษาระดับปริญญาตรีคิดเป็นร้อยละ 85.0 และมีตำแหน่งหน้าที่เป็นวิศวกรโครงการมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 30.4 โดยมีรายละเอียดผลการวิเคราะห์ข้อมูลสถานภาพของกลุ่มตัวอย่างดังตารางที่ 2

3.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้างเพื่อจัดกลุ่มความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องและเป็นการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัย หลังจากนั้น

นำมาหาความสัมพันธ์ของปัจจัยเชิงสาเหตุของความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง

3.2.1 ระดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง

ผลการวิเคราะห์ระดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง โดยเรียงลำดับจากค่าเฉลี่ย พบว่า กลุ่มตัวอย่างให้ความสำคัญกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้างอยู่ในระดับมาก (Mean = 3.55, SD = 0.615) โดยปัจจัยด้านการออกแบบ (Mean = 3.71, SD = 0.640) มีระดับความสำคัญสูงสุด รองลงมา คือ ปัจจัยด้านทรัพยากร (Mean = 3.58, SD = 0.741) ด้านปัจจัยภายนอกและอื่นๆ (Mean = 3.46, SD = 0.796) และด้านการปฏิบัติงาน (Mean = 3.45, SD = 0.784) ตามลำดับ ดังตารางที่ 3

3.2.2 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง

เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์สหสัมพันธ์ พบว่า ตัวบ่งชี้ส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .01 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r) มีค่า -.018 ถึง .830 จากนั้นตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลโดยค่า Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy (KMO) เท่ากับ .915 (> .5) ซึ่งค่า KMO ควรมีค่าเข้าใกล้ 1 และใช้ค่า Bartlett's Test of Sphericity เท่ากับ 8202.082 (p < .01) ซึ่งสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบและวิเคราะห์เส้นทางความสัมพันธ์ได้ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง

ปัจจัย	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับ	ลำดับ*
1) ด้านการออกแบบ (DES)	3.71	0.640	มาก	1
- สถานที่ก่อสร้างไม่ถูกต้องตรงตามแบบก่อสร้าง เนื่องจากในขั้นตอนการสำรวจเก็บข้อมูลรายละเอียดเพื่อใช้ในการออกแบบ มีระยะเวลาจำกัด (DES1)	3.53	1.066	มาก	6
- แบบก่อสร้างตามสัญญาไม่สอดคล้องกับสถานที่ก่อสร้างจริง เนื่องจากผู้ออกแบบขาดทักษะและประสบการณ์ในการออกแบบ (DES2)	3.62	1.004	มาก	5

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง (ต่อ)

ปัจจัย	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับ	ลำดับ*
- แบบก่อสร้างตามสัญญาทำการก่อสร้างยาก เนื่องจากการออกแบบไม่ตระหนักถึงขั้นตอนและวิธีการก่อสร้าง (DES3)	3.67	0.956	มาก	3
- แบบก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคและโครงสร้างพื้นฐานร่วมอื่น ๆ ขัดแย้งกันหรือขัดกับแบบก่อสร้างตามสัญญา (DES4)	3.65	0.948	มาก	4
- มีการแก้ไขเปลี่ยนแปลงแบบและรายการประกอบแบบระหว่างการก่อสร้างเนื่องจากเกิดความผิดพลาดคลาดเคลื่อน หรือ ติดปัญหาอุปสรรคหน้างาน (DES5)	4.00	0.853	มาก	1
- การพิจารณาอนุมัติแบบและวัสดุล่าช้า (DES6)	3.80	0.903	มาก	2
2) ด้านทรัพยากร (RES)	3.58	0.741	มาก	2
- ขาดแคลนวิศวกร/ช่างควบคุมงาน ที่มีทักษะและประสบการณ์ (RES1)	3.72	0.821	มาก	2
- ขาดแคลนช่างฝีมือและแรงงานก่อสร้าง (RES2)	3.97	0.882	มาก	1
- ขาดแคลนเครื่องจักรและเครื่องมือ หรือเครื่องจักรและเครื่องมือชำรุดบ่อย (RES3)	3.52	1.091	มาก	4
- ขาดแคลนวัสดุและอุปกรณ์ในการก่อสร้าง (RES4)	3.33	1.161	ปานกลาง	5
- แรงงานหยุดงานในช่วงเทศกาล (RES5)	3.28	1.095	ปานกลาง	6
- ผู้รับจ้างขาดสภาพคล่องทางการเงิน (RES6)	3.69	1.187	มาก	3
3) ด้านการปฏิบัติงาน (PRC)	3.45	0.784	ปานกลาง	4
- การส่งมอบพื้นที่ก่อสร้างล่าช้าจากผู้ว่าจ้าง (PRC1)	3.53	0.975	มาก	2
- ขาดการศึกษาแบบ วิธีการก่อสร้างและการวางแผนโครงการ อย่างละเอียดรอบคอบ (PRC2)	3.52	1.044	มาก	3
- ผู้ควบคุมงานขาดความเอาใจใส่ ความกระตือรือร้น ในการปฏิบัติหน้าที่ที่ได้รับมอบหมาย (PRC3)	3.53	0.959	มาก	1
- การจัดผังบริเวณและสภาพแวดล้อมในการทำงาน ของสถานที่ก่อสร้างไม่เหมาะสม (PRC4)	3.21	0.877	ปานกลาง	6
- ผู้รับจ้างวางแผนการทำงานไม่สอดคล้อง กับงานก่อสร้างและการเบิกงวด (PRC5)	3.43	1.144	ปานกลาง	5
- ผู้รับจ้างส่งขออนุมัติแบบและวัสดุก่อสร้างล่าช้า (PRC6)	3.50	0.964	ปานกลาง	4
4) ด้านปัจจัยภายนอกและอื่น ๆ (OTF)	3.46	0.796	ปานกลาง	3
- ข้อจำกัดเรื่องสภาพการจราจร และการจัดการที่ดินเพื่อทำงาน (OTF1)	3.55	0.982	มาก	2
- การรื้อล้างพื้นที่สาธารณะ หรือการรื้อการจราจรที่ติดขัด (OTF2)	3.43	1.114	ปานกลาง	4
- ขาดข้อมูลที่ชัดเจนของสาธารณูปโภคที่อยู่ใต้ดิน (OTF3)	3.56	1.057	มาก	1
- การต่อต้านของประชาชนในพื้นที่ (OTF4)	3.43	1.200	ปานกลาง	5
- ขาดการประสานงานที่ดีกับหน่วยงานสาธารณูปโภค ทำให้หน่วยงานสาธารณูปโภคไม่ปฏิบัติงานตามที่ตกลงกันได้ (OTF5)	3.42	1.030	ปานกลาง	6
- สภาพอากาศที่แปรปรวน เกิดภัยธรรมชาติ (OTF6)	3.40	1.055	ปานกลาง	7
- ปัญหาสภาวะเศรษฐกิจ สังคม การเมือง เกิดความผันผวนของราคาค่าแรงและค่าวัสดุ (OTF7)	3.50	1.029	ปานกลาง	3
- ข้อจำกัดเกี่ยวกับระเบียบข้อบังคับและกฎหมาย (OTF8)	3.36	0.937	ปานกลาง	8
ภาพรวม	3.55	0.615	มาก	

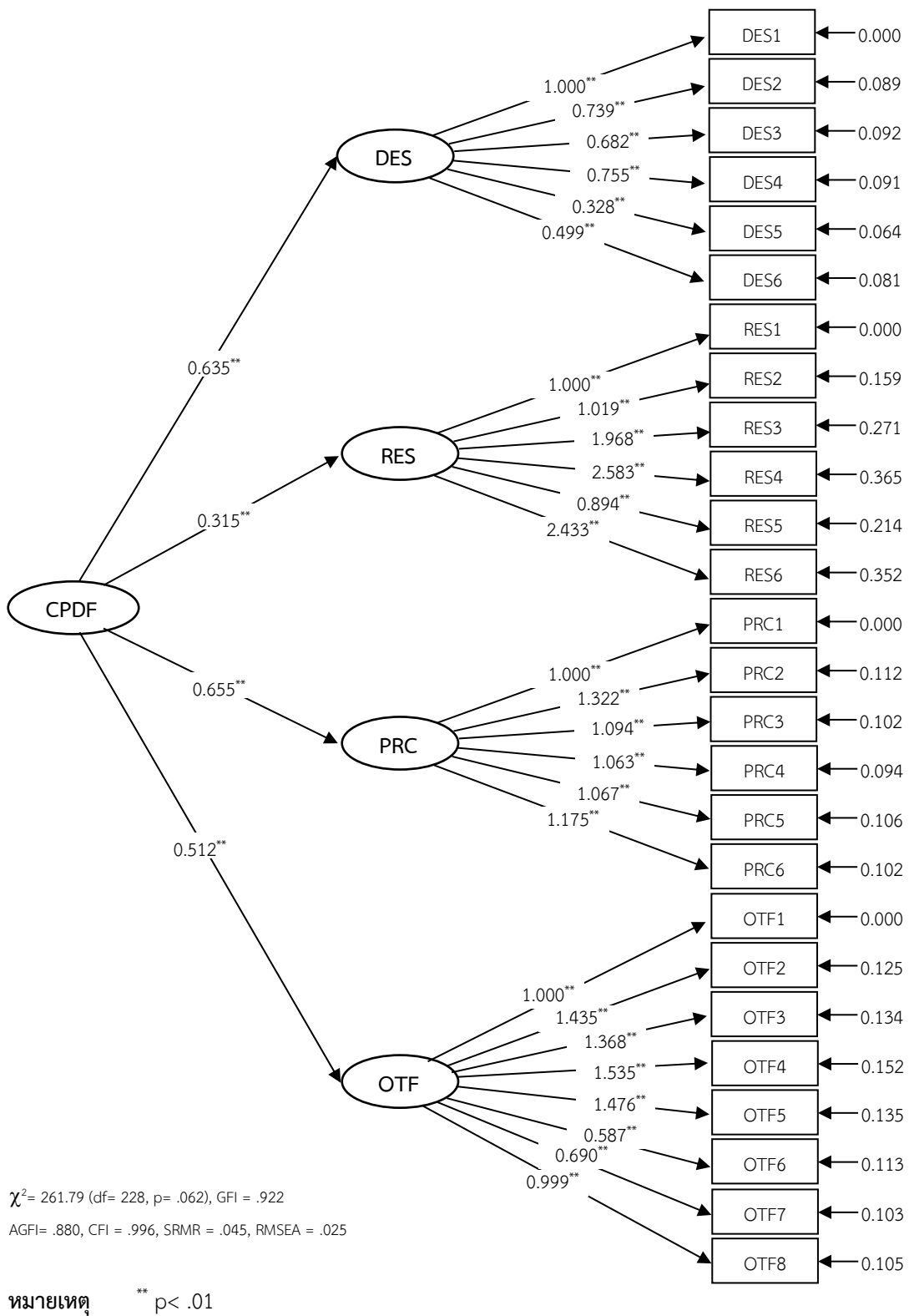
หมายเหตุ * เรียงลำดับจากค่าเฉลี่ยมากไปหาน้อย

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวบ่งชี้

	DES1	DES2	DES3	DES4	DES5	DES6	RES1	RES2	RES3	RES4	RES5	RES6	PRC1
DES1	1												
DES2	.562**	1											
DES3	.284**	.527**	1										
DES4	.367**	.425**	.426**	1									
DES5	.244**	.291**	.268**	.279**	1								
DES6	.211**	.289**	.268**	.301**	.244**	1							
RES1	.287**	.391**	.284**	.352**	.070	.245**	1						
RES2	.222**	.135**	.111*	.268**	.031	.147**	.467**	1					
RES3	.348**	.276**	.291**	.313**	-.060	.242**	.461**	.473**	1				
RES4	.431**	.344**	.327**	.330**	-.018	.277**	.402**	.375**	.830**	1			
RES5	.029	.075	.045	.133**	.129**	.104*	.159**	.193**	.200**	.244**	1		
RES6	.285**	.357**	.329**	.254**	.102*	.237**	.424**	.337**	.572**	.592**	.281**	1	
PRC1	.427**	.435**	.291**	.315**	.174**	.314**	.234**	.198**	.331**	.433**	.175**	.412**	1
PRC2	.498**	.457**	.442**	.462**	.180**	.287**	.345**	.306**	.588**	.677**	.210**	.556**	.561**
PRC3	.435**	.503**	.411**	.483**	.224**	.300**	.303**	.274**	.521**	.528**	.187**	.518**	.506**
PRC4	.350**	.434**	.428**	.312**	.161**	.282**	.298**	.303**	.442**	.514**	.266**	.518**	.553**
PRC5	.429**	.336**	.283**	.206**	.111*	.195**	.301**	.343**	.455**	.542**	.186**	.563**	.438**
PRC6	.362**	.353**	.352**	.317**	.138**	.345**	.286**	.331**	.478**	.590**	.176**	.545**	.529**
OTF1	.449**	.309**	.262**	.335**	.191**	.276**	.151**	.247**	.163**	.269**	.234**	.265**	.449**
OTF2	.496**	.368**	.142**	.376**	.144**	.195**	.171**	.204**	.302**	.352**	.149**	.310**	.500**
OTF3	.498**	.364**	.220**	.393**	.143**	.195**	.198**	.234**	.333**	.379**	.151**	.408**	.534**
OTF4	.451**	.326**	.217**	.295**	.096*	.236**	.199**	.289**	.448**	.492**	.185**	.440**	.508**
OTF5	.564**	.456**	.219**	.389**	.146**	.331**	.257**	.324**	.416**	.492**	.156**	.422**	.622**
OTF6	.220**	.183**	.158**	.041	.186**	.142**	.031	.034	.057	.139**	.161**	.207**	.281**
OTF7	.256**	.336**	.292**	.156**	.213**	.158**	.150**	.170**	.110*	.177**	.246**	.325**	.378**
OTF8	.351**	.377**	.339**	.273**	.214**	.263**	.194**	.186**	.236**	.333**	.294**	.426**	.349**
	PRC2	PRC3	PRC4	PRC5	PRC6	OTF1	OTF2	OTF3	OTF4	OTF5	OTF6	OTF7	OTF8
PRC2	1												
PRC3	.732**	1											
PRC4	.654**	.660**	1										
PRC5	.616**	.525**	.590**	1									
PRC6	.672**	.609**	.683**	.634**	1								
OTF1	.388**	.391**	.473**	.324**	.391**	1							
OTF2	.458**	.490**	.432**	.430**	.335**	.645**	1						
OTF3	.536**	.498**	.450**	.434**	.414**	.559**	.757**	1					
OTF4	.558**	.499**	.507**	.490**	.425**	.528**	.691**	.644**	1				
OTF5	.586**	.550**	.575**	.515**	.537**	.569**	.706**	.719**	.706**	1			
OTF6	.161**	.151**	.216**	.134**	.125**	.373**	.317**	.273**	.374**	.332**	1		
OTF7	.330**	.271**	.340**	.205**	.282**	.486**	.293**	.365**	.349**	.385**	.495**	1	
OTF8	.476**	.461**	.502**	.388**	.488**	.545**	.481**	.502**	.488**	.508**	.476**	.631**	1

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy (KMO) = .915, Bartlett's Test of Sphericity = 8202.082, $p < .001$

หมายเหตุ * $p < .05$, ** $p < .01$



รูปที่ 1 โมเดลการวัดปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง (CPDF)

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ในโมเดลการวัดปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง

ปัจจัย/ตัวบ่งชี้	รหัส	พารามิเตอร์				ลำดับ*
		b	SE	t	R ²	
1) ด้านการออกแบบ	DES	0.635	.061	10.39**	.54	2
- สถานที่ก่อสร้างไม่ถูกต้องตรงตามแบบก่อสร้าง	DES1	1.000	-	-	.66	1
- แบบก่อสร้างตามสัญญาไม่สอดคล้องกับสถานที่ก่อสร้างจริง	DES2	0.793	.089	8.90**	.47	2
- แบบก่อสร้างตามสัญญาทำการก่อสร้างยาก	DES3	0.682	.092	7.39**	.37	4
- แบบก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคและโครงสร้างพื้นฐานร่วมอื่น ๆ	DES4	0.755	.091	8.23**	.47	3
ขัดแย้งกัน						
- มีการแก้ไขเปลี่ยนแปลงแบบและรายการประกอบแบบระหว่างการก่อสร้าง	DES5	0.328	.064	5.11**	.11	6
- การพิจารณาอนุมัติแบบและวัสดุล่าช้า	DES6	0.499	.081	6.13**	.22	5
2) ด้านทรัพยากร	RES	0.315	.047	6.64**	.68	4
- ขาดแคลนวิศวกร/ช่างควบคุมงาน ที่มีทักษะและประสบการณ์	RES1	1.000	-	-	.22	5
- ขาดแคลนช่างฝีมือและแรงงานก่อสร้าง	RES2	1.019	.159	6.39**	.19	4
- ขาดแคลนเครื่องจักรและเครื่องมือ	RES3	1.968	.271	7.27**	.50	3
- ขาดแคลนวัสดุและอุปกรณ์ในการก่อสร้าง	RES4	2.583	.365	7.08**	.74	1
- แรงงานหยุดงานในช่วงเทศกาล	RES5	0.894	.214	4.18**	.10	6
- ผู้รับจ้างขาดสภาพคล่องทางการเงิน	DES6	2.433	.352	6.92**	.63	2
3) ด้านการปฏิบัติงาน	PRC	0.655	.057	11.53**	.99	1
- การส่งมอบพื้นที่ก่อสร้างล่าช้าจากผู้ว่าจ้าง	PRC1	1.000	-	-	.46	6
- ขาดการศึกษาแบบ วิธีการก่อสร้าง และการวางแผนโครงการ	PRC2	1.322	.112	11.92**	.70	1
- ผู้ควบคุมงานขาดความเอาใจใส่ ความกระตือรือร้น	PRC3	1.094	.102	10.75**	.56	3
- การจัดตั้งบริเวณและสภาพแวดล้อมในการทำงาน	PRC4	1.063	.094	11.30**	.63	5
ไม่เหมาะสม						
- ผู้รับจ้างวางแผนการทำงานไม่สอดคล้อง	PRC5	1.067	.106	10.02**	.55	4
- ผู้รับจ้างส่งขออนุมัติแบบและวัสดุก่อสร้างล่าช้า	PRC6	1.175	.102	11.52**	.65	2
4) ด้านปัจจัยภายนอกและอื่น ๆ	OTF	0.512	.055	9.34**	.70	3
- ข้อจำกัดเรื่องสภาพการจราจร และการจัดการปิดพื้นที่เพื่อทำงาน	OTF1	1.000	-	-	.40	5
- การรื้อถอนพื้นที่สาธารณะ หรือการรื้อถอนอาคารที่ติด	OTF2	1.435	.125	11.50**	.61	3
- ขาดข้อมูลที่ชัดเจนของสาธารณูปโภคที่อยู่ใต้ดิน	OTF3	1.368	.134	10.22**	.64	4
- การต่อต้านของประชาชนในพื้นที่	OTF4	1.535	.152	10.09**	.61	1
- ขาดการประสานงานที่ดีกับหน่วยงานสาธารณูปโภค	OTF5	1.476	.135	10.92**	.78	2
- สภาพอากาศที่แปรปรวน เกิดภัยธรรมชาติ	OTF6	0.587	.113	5.21**	.12	8
- ปัญหาสถานะเศรษฐกิจ สังคม การเมือง	OTF7	0.690	.103	6.69**	.17	7
- ข้อจำกัดเกี่ยวกับระเบียบข้อบังคับและกฎหมาย	OTF8	0.999	.105	9.56**	.41	6

หมายเหตุ * เรียงลำดับจากค่าน้ำหนักองค์ประกอบมากไปหาน้อย, ** p< .01

จากโมเดลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้างสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบและวิเคราะห์เส้นทางความสัมพันธ์ได้ในตารางที่ 5 และรูปที่ 1 เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์องค์ประกอบยืนยันอันดับสองพบว่า น้ำหนักองค์ประกอบแต่ละด้านทั้ง 4 ด้าน มีค่าเป็นบวกมีขนาดตั้งแต่ .315 ถึง .655 และมีนัยสำคัญที่ระดับ .01 ทุกค่า เรียงลำดับจากค่าน้ำหนักองค์ประกอบมากไปน้อย ได้แก่ .655, .635, .512 และ .315 ตามลำดับ ค่าน้ำหนักองค์ประกอบของตัวแปรแต่ละด้าน มีขนาดต่ำถึงสูง ตั้งแต่ .325 ถึง 2.583 เมื่อพิจารณาถึงความสอดคล้องกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์จาก ($\chi^2 = 61.79$, $df = 228$, $p = .062$) นั่นคือค่าไคสแควร์แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าโมเดลการวิจัยสอดคล้องกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์เป็นอย่างดี ที่ระดับความกลมกลืน (GFI) เท่ากับ .922 ค่าดัชนีวัดระดับความกลมกลืนที่ปรับแล้ว (AGFI) เท่ากับ .880 ค่าดัชนีรากของค่าเฉลี่ยกำลังสองของเศษที่เหลือ (SRMR) เท่ากับ .045 และค่ารากของค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนโดยประมาณ (RMSEA) เท่ากับ .025

เมื่อพิจารณาตามค่าน้ำหนักปัจจัย พบว่า ปัจจัยด้านการปฏิบัติงาน มีค่าน้ำหนักปัจจัยสูงสุด (0.655) รองลงมา คือ ด้านการออกแบบ (0.635) ด้านปัจจัยภายนอกและอื่น ๆ (0.512) และด้านทรัพยากร (0.315) ตามลำดับ และหากพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่า ด้านการปฏิบัติงาน ตัวบ่งชี้การขาดการศึกษาแบบ วิธีการก่อสร้างและการวางแผนโครงการ อย่างละเอียดรอบคอบ มีค่าน้ำหนักปัจจัยมาตรฐานสูงสุด (1.322) ด้านการออกแบบ ตัวบ่งชี้สถานที่ก่อสร้างไม่ถูกต้องตรงตามแบบก่อสร้าง มีค่าน้ำหนักปัจจัยมาตรฐานสูงสุด (1.000) ด้านปัจจัยภายนอกและอื่น ๆ ตัวบ่งชี้การต่อต้านของประชาชนในพื้นที่ มีค่าน้ำหนักปัจจัยมาตรฐานสูงสุด (1.535) และด้านทรัพยากร ตัวบ่งชี้การขาดแคลนวัสดุและอุปกรณ์ในการก่อสร้าง มีค่าน้ำหนักปัจจัยมาตรฐานสูงสุด (2.583)

4. สรุป

4.1 องค์ประกอบปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง สอดคล้องกับแนวคิดของ [10] โดยน้ำหนักองค์ประกอบแต่ละด้านทั้ง 5 ได้แก่ ด้านสื่อสาร ด้านเครื่องมือและการขนส่ง ด้านข้อกำหนดและการออกแบบ ด้านคุณภาพและการได้มาซึ่งวัสดุ สดท้ายด้านสถานที่และพื้นที่ก่อสร้าง มีขนาดตั้งแต่ .52 ถึง .903

4.2 บุคลากรในโครงการก่อสร้าง ให้ความสำคัญกับปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้างในระดับมาก โดยปัจจัยด้านการออกแบบมีระดับความสำคัญสูงสุด รองลงมา คือ ปัจจัยด้านทรัพยากร ด้านปัจจัยภายนอกและอื่น ๆ และด้านการปฏิบัติงานตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ [11] ซึ่งพบว่าสาเหตุที่มีความรุนแรงมากที่สุด คือ ปัญหาการเปลี่ยนแปลงแก้ไขแบบก่อสร้างจากเจ้าของโครงการ

4.3 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้าในโครงการก่อสร้าง พบว่า ปัจจัยด้านการปฏิบัติงานส่งผลต่อความล่าช้าของโครงการก่อสร้างมากที่สุดเนื่องจากขาดการศึกษาแบบ วิธีการก่อสร้าง และวางแผนโครงการ อันเนื่องมาจาก 3 ส่วนที่เกี่ยวข้องขาดการประชุมและการประสานงานที่ดี ส่วนการวางตำแหน่งหรือเลือกที่ตั้งสถานที่ก่อสร้างที่ไม่เหมาะสมมีผลตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ เนื่องจากผู้ออกแบบไม่ลงพื้นที่ หรือผู้ออกแบบขาดประสบการณ์ ถัดไปความสัมพันธ์ของปัจจัยภายนอกและอื่น ๆ เป็นผลจากการต่อต้านของประชาชนในพื้นที่เป็นเรื่องสำคัญ แต่เนื่องจากเป็นปัจจัยภายนอกที่ควบคุมไม่ได้ ดังนั้นผู้เกี่ยวข้องทั้งสามจะต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก

สุดท้ายการขาดการวางแผนการจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ในการก่อสร้างที่ตึงจะส่งผลกระทบต่อความล่าช้าไม่น้อย ถึงแม้ว่าออกแบบ วางแผนโครงการและจัดการกับชุมชนรอบข้างเป็นอย่างดี แต่ถ้าหากขาดปัจจัยตัวนี้ทุกอย่างที่เตรียมการไว้อาจไม่ประสบความสำเร็จ ดังนั้นมีข้อสังเกตจากความสัมพันธ์ทั้ง 4 ด้าน อาจกล่าวได้ว่า

ทุกด้านมีความเกี่ยวเนื่องกัน การออกแบบและวางแผนดีมีประสิทธิภาพจะส่งผลต่อการจัดการและการปฏิบัติงานก่อสร้าง รวมถึงการดูแลชุมชนรอบงานก่อสร้างอย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องในงานวิจัย [10] ที่พบว่า พบว่าปัจจัยแห่งความล่าช้าโดยมากเป็นปัจจัยที่คล้ายคลึงกันมากที่สุด ดังนั้น เจ้าของ ผู้รับจ้าง และที่ปรึกษาจะต้องเข้าใจความแตกต่างและสาเหตุแห่งปัญหาในแต่ละโครงการก่อสร้างตามบริบทของโครงการ

4.4 แนวทางการป้องกันความล่าช้าของโครงการก่อสร้าง ผลวิจัยพบว่า ในทัศนะของบุคลากรในโครงการก่อสร้างนั้น ควรมุ่งเน้นปัจจัยด้านการปฏิบัติงาน ด้วยการศึกษารูปแบบ วิธีการก่อสร้าง และการวางแผนโครงการ ให้ละเอียดรอบคอบ ร่วมกับการเร่งให้ผู้รับจ้างส่งขออนุมัติแบบและวัสดุก่อสร้างทันเวลา การกระตุ้นให้ผู้ควบคุมงานมีความเอาใจใส่และความกระตือรือร้นในการปฏิบัติหน้าที่ที่ได้รับมอบหมาย การควบคุมให้ผู้รับจ้างวางแผนการทำงานให้เป็นไปตามแผนงานและการเบิกงวดงาน การจัดผังบริเวณและสภาพแวดล้อมในการทำงานให้เหมาะสม และการเร่งให้ผู้ว่าจ้างส่งมอบพื้นที่ก่อสร้างทันเวลา จะช่วยป้องกันความล่าช้าของโครงการก่อสร้างมากที่สุด

4.5 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย บุคลากรในโครงการก่อสร้างควรตระหนักถึงความล่าช้าของโครงการก่อสร้างให้มากยิ่งขึ้น โดยมุ่งเน้นให้ทุกคนเข้าใจและทุกคนมีส่วนร่วม ทุกคนและทุกฝ่ายที่มีส่วนเกี่ยวข้องจะต้องมีการประชุมหารืออย่างสม่ำเสมอทั้งก่อน ระหว่าง และหลังปฏิบัติงาน ควรให้ความสำคัญกับทุกคนในโครงการและให้ทุกคนที่เกี่ยวข้องรับรู้ข้อมูลและความเป็นไปของโครงการผ่านช่องทางสื่อสารออนไลน์ได้ สุดท้ายการให้ความสำคัญกับชุมชนรอบโครงการจำเป็นมาก ผู้เกี่ยวข้องทั้ง 3 ฝ่ายต้องให้ความสำคัญกับหน่วยงาน CSR (Corporate Social Responsibility) และนำกลยุทธ์นี้มาใช้กับสังคมมากยิ่งขึ้น ปัจจุบันเพื่อให้ประชาชนได้เข้าใจและรับรู้ถึง

ความรับผิดชอบต่อสังคมที่โครงการก่อสร้างของเรามีให้กับพวกเขาอย่างจริงจังและจริงจัง

4.6 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป การวิจัยครั้งต่อไป อาจนำแนวทางการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างในลักษณะเฉพาะแต่ละประเภท เช่น งานโครงสร้างพื้นฐาน งานอาคารสูง งานอาคาร และงานบ้านพักอาศัย เป็นต้น โดยอาจวิเคราะห์เป็นแบบพหุกลุ่มร่วมด้วย อีกทั้งจำนวนกลุ่มตัวอย่างทั้งสามฝ่ายทั้งจากฝ่ายเจ้าของโครงการ ฝ่ายผู้รับจ้างและฝ่ายที่ปรึกษาโครงการควรมีจำนวนที่ใกล้เคียงกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีจากผู้ประกอบการก่อสร้างทุกท่าน ดังนั้น ทางผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณที่ให้ความเมตตาและเอื้อเฟื้อสถานที่ในงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. B. Bramble and M. T. Callahan, *Construction Delay Claims*, USA: John Wiley & Sons, 1987.
- [2] M. Gunduz, Y. Nielsen and M. Ozdemir, "Quantification of delay factors using the relative importance index method for construction projects in Turkey," *Journal of Management in Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 133-139, Apr. 2013.
- [3] R. F. Aziz, "Ranking of delay factors in construction projects after Egyptian revolution," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 52, pp. 387-406, Apr. 2013.
- [4] J. K. Larsen, G. Q. Shen, S. M. Lindhard and T. D. Brunoe, "Factors affecting schedule delay, cost overrun, and quality level in

- public construction projects,” *Journal of Management in Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 04015032: 1-10, Nov. 2016.
- [5] O. Abbasi, E. Noorzai, K. G. Jafari and M. Golabchi, “Exploring the causes of delays in construction industry using a cause-and-effect diagram: case study for Iran,” *Journal of Architectural Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 05020008: 1-10, Dec. 2020.
- [6] Y. C. Kog, “Project management and delay factors of public housing construction,” *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 23, no. 1, pp. 04017028: 1-8, Apr. 2018.
- [7] Y. C. Kog, “Construction delays in Indonesia, Malaysia, Thailand, and Vietnam,” *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 24, no. 3, pp. 04019013: 1-12, Sep. 2019.
- [8] M. Kadry, H. Osman and M. Georgy, “Causes of construction delays in countries with high geopolitical risks,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 143, no. 2, pp. 04016095: 1-11, Jan. 2017.
- [9] M. Magdy, M. Georgy, H. Osman and M. Elsaid, “Delay analysis methodologies used by engineering and construction firms in Egypt,” *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, vol. 11, no. 3, pp. 04519006: 1-11, Aug. 2019.
- [10] Y. C. Liu, A. Jarvamardi, Y. X. Zhang, M. Liu, S. M. Hsiang, S. J. Yang, X. X. Yu and Z. H. Jiang, “Comparative study on perception of causes for construction task delay in China and the United States,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 147, no. 3, pp. 040201176: 1-10, May 2021.
- [11] C. Sinsawat, “Factors causing delays in court of justice office,” M.S. thesis, Dept. CVET, KMUTNB, Bangkok, Thailand, 2017.
- [12] C. Kongpreechakul, “The study of risks affecting for the housing construction project: a case study of project owners,” M.S. thesis, Dept. CVET, KMUTNB, Bangkok, Thailand, 2019.
- [13] W. Kongsong and C. Pooworarluchai, “Cause of delay in the construction project by relative importance index method,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 2, pp. 270-281, Apr-Jun. 2019.
- [14] R. Seubsamut, “Study of delay causes in infrastructure construction projects in Bangkok,” I.S. thesis, Dept. CVET, KMUTNB, Bangkok, Thailand, 2019.
- [15] S. Tirakanun, *Multivariate Analysis for Social Sciences*, Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2010.
- [16] L. Silanoi and K. Chindaprasert, “The use of rating scale in quantitative research on social sciences, humanities, hotel and tourism study,” *Journal of Management Science, Ubon Ratchathani University*, vol. 9, no. 15, pp. 112-126, Jan-Jun. 2019.
- [17] K. Vanichbuncha, *Using SPSS for Windows in Data Analysis*, Bangkok: Dharmasarn Printing House, 2017.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การจำลองและการทดสอบระบบเติมอากาศแบบน้ำไหลเวียนด้วย พลังงานแสงอาทิตย์

เพ็ญพิชา เนียมสกุล¹ สมร พรชื่นชูวงศ์² และ อาทิตย์ คุณศรีสุข^{1*}

¹ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² สาขาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ สำนักเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 10 ธันวาคม 2563 แก้ไขบทความ 29 พฤศจิกายน 2564 ตอรับบทความ 27 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) ถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ในระหว่างวันน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงถูกแบ่งชั้นทำให้ DO แตกต่างกัน ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และความแตกต่างของอุณหภูมินี้เกิดขึ้นเมื่อ ผิวน้ำชั้นบนถูกทำให้ร้อนด้วยแสงแดดจึงทำให้น้ำชั้นบนร้อนกว่าน้ำชั้นล่าง ด้วยเหตุผลนี้ น้ำชั้นบนที่สัมผัสกับอากาศจึงเป็นบริเวณที่มีปริมาณ DO มากที่สุด ในทางตรงกันข้ามน้ำในชั้นลึกสุดถูกแยกจากอากาศจึงเป็นบริเวณที่มีปริมาณ DO น้อยที่สุด การศึกษานี้ นำเสนอระบบเติมอากาศที่เรียกว่า ระบบเติมอากาศแบบน้ำไหลเวียนพลังงานแสงอาทิตย์ (SCWAS) โดยระบบ SCWAS นี้ใช้พลังงานความร้อนจากแสงแดดเพื่อสร้างการไหลเวียนธรรมชาติ กล่าวอีกในหนึ่งคือการไหลเวียนนี้ทำให้น้ำจากด้านล่างไหลขึ้นด้านบนและน้ำจากด้านบนไหลลงด้านล่างบ่อ ซึ่งการไหลเวียนในลักษณะนี้ทำให้น้ำเกิดการเคลื่อนที่และเพิ่มปริมาณ DO ได้ การไหลเวียนของน้ำจะย้ายออกซิเจนที่มีอยู่มากที่ผิวน้ำชั้นบนลงมายังน้ำชั้นล่าง และขับให้น้ำชั้นล่างที่มีออกซิเจนต่ำขึ้นไปดูดซับออกซิเจนที่มีอยู่มากที่ผิวน้ำชั้นบน เพื่อประเมินแนวคิดในการออกแบบ ได้ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ดำเนินการในโปรแกรม ANSYS Fluent ตามผลการจำลองระบบ SCWAS สามารถให้การไหลเวียนตามธรรมชาติได้ ซึ่งพบว่าอัตราการไหลเวียนที่ได้รับเท่ากับ 2.24 ลิตรต่อวินาที เมื่อสัดส่วนระหว่าง ทางเข้าปล่อง (r), ทางออกปล่อง (R) และฐาน (L) มีค่าเป็น 1: 2: 3 นอกจากนี้ระบบ SCWAS ต้นแบบได้ถูกสร้างและติดตั้งในบ่อเพาะเลี้ยงปลาไนล์ และชุดบันทึกข้อมูลที่ทำ การสอบเทียบแล้วได้ทำการติดตั้งเพื่อตรวจสอบสมรรถนะของชุดต้นแบบ ผลการทดลองระบุว่า ค่า DO โดยเฉลี่ยที่ผิว น้ำชั้นบนและน้ำชั้นล่างเพิ่มขึ้น 1.45 และ 1.40 เท่าตามลำดับเมื่อเทียบกับบ่อที่ไม่ติดตั้งระบบ SCWAS การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาคืนทุนของระบบ SCWAS คือ 4.58 ปี และงบลงทุนต่ำกว่า เครื่องเติมอากาศชนิด Paddle Wheel คิดเป็นร้อยละ 17.49

คำสำคัญ: เครื่องเติมออกซิเจน; ระบบเติมอากาศ; การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ; ออกซิเจนละลายในน้ำ; พลังงานแสงอาทิตย์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 0168 5996, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: atit@sut.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Simulation and Experiment of a Solar-Circulating Aeration System

Phenphicha Niamsakul¹ Samorn Ponchunchoovong² and Atit Koonsrisuk^{1*}

¹ School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

² School of Animal Production Technology, Institute of Agricultural Technology, Suranaree University of Technology

111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000

Received 10 December 2020; Revised 29 November 2021; Accepted 27 December 2021

Abstract

The amount of dissolved oxygen (DO) in aquaculture ponds is considered to be one of the most important aspects for the survival of fishes. The water in aquaculture ponds is stratified into distinct layers with different DO caused by differences in temperature. This temperature difference occurs when the surface layer of water, heated by the sun, becomes hotter than the lower water layer. Since the top layer is in contact with the air, it contains the most DO. On the other hand, the deepest layer is isolated from the air, it contains the lowest amount of DO. This study proposed an aeration system called a Solar Circulating-Water Aeration System (SCWAS). The SCWAS uses solar thermal energy to create a natural water circulation. In other words, it provides an upward current of water from the bottom to the pond surface and a downward current from the surface to the bottom. This circulation creates the movement of surface water and then increases the DO content of the surface water. This water circulation moves highly oxygenated surface water to the bottom layer, forcing low oxygen water from the bottom up to the surface where it can absorb oxygen. To evaluate this design concept, the numerical simulations of the system were conducted using ANSYS Fluent software. According to the simulation results, the SCWAS can provide the natural water circulation. It was found that a flow rate of 2.24 L/s is obtained when the ratio between the draft tube inlet (r), the draft tube outlet (R), the base (L) is 1: 2: 3. In addition, an SCWAS prototype was built and installed in a tilapia aquaculture system. A calibrated measuring system was installed to investigate the prototype performance. The experimental results indicate that the average DO values at the water surface and at the bottom of the pond increased by 1.45 and 1.40 times, respectively, compared with those of a pond without SCWAS. Economic analysis shows that the payback period of SCWAS is 4.58 years and its investment cost is 17.49% less than that of the paddle-wheel aerator.

Keywords : Aerator; Aeration System; Aquaculture; Dissolved Oxygen; Solar Energy

** Corresponding Author. Tel.: +668 0168 5996, E-mail Address: atit@sut.ac.th*

1. บทนำ

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) ถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากสัตว์น้ำใช้ออกซิเจนในกระบวนการหายใจและย่อยอาหาร และเพื่อการเจริญเติบโตที่ดีของสัตว์น้ำระดับออกซิเจนที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 4–20 มิลลิกรัมต่อลิตร [1]

ในการเติมออกซิเจนเข้าสู่บ่อเพาะเลี้ยงโดยส่วนใหญ่มักใช้เครื่องตีน้ำ (Paddle Wheel) หรือปั๊มลม (Pump) ซึ่งเป็นเครื่องเติมออกซิเจนที่มีขายในท้องตลาด และเครื่องเหล่านี้จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมต่อกับไฟฟ้า นอกจากนี้ ยังพบว่าต้นทุนเครื่องค่อนข้างสูงเมื่อเทียบการต้นทุนการผลิตทั้งหมด โดยคิดเป็นเกือบร้อยละ 15 [2]

โดยทั่วไปบ่อเพาะเลี้ยงส่วนใหญ่ของเกษตรกรมักอยู่ห่างไกลจากแหล่งชุมชนทำให้การเชื่อมต่อไฟฟ้าเข้าไม่ถึง และผลผลิตสัตว์น้ำส่วนใหญ่ก็มาจากเกษตรกรในชนบท ซึ่งกว่าร้อยละ 72 ของผู้ผลิตสัตว์น้ำเป็นเกษตรกรในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก และโดยทั่วไปเกษตรกรเหล่านี้ทำการเพาะเลี้ยงเป็นอาชีพเสริมเพื่อเป็นแหล่งอาหารและนำไปจำหน่ายเป็นรายได้สู่ครัวเรือน [3] ดังนั้น การที่เกษตรกรจะเข้าถึงเครื่องเติมออกซิเจนที่มีขายในท้องตลาดจึงเป็นไปได้ยาก เนื่องจากต้องเพิ่มภาระค่าใช้จ่ายในครัวเรือนทั้งในด้านต้นทุนเครื่องเติมอากาศและการเชื่อมต่อไฟฟ้าไปยังบ่อนอกจากนี้ ยังมีค่าไฟฟ้าแฝงเข้ามาในต้นทุนการผลิตอีกด้วย

สำหรับบ่อเพาะเลี้ยงที่ไม่มีเครื่องเติมออกซิเจนเข้าสู่บ่อ ออกซิเจนส่วนใหญ่จะมาจากธรรมชาติ โดยในช่วงเวลากลางวันออกซิเจนจะเข้าสู่บ่อจากกระแสลมที่พัดผ่านผิวน้ำทำให้น้ำเกิดการกระเพื่อม และจากการสังเคราะห์แสงของพืช ส่วนเวลากลางคืนไม่มีการสังเคราะห์แสงของพืชออกซิเจนที่ได้จะมาจากกระแสลมโดยตรง ซึ่งการเติมออกซิเจนด้วยวิธีธรรมชาตินี้จะทำให้

ดีเฉพาะบริเวณด้านบนของบ่อ เนื่องจากได้รับออกซิเจนจากธรรมชาติโดยตรง แต่ในส่วนลึกของบ่อออกซิเจนมีการลดลง เนื่องมาจากสัตว์น้ำใช้ออกซิเจนในการหายใจและออกซิเจนบางส่วนยังถูกใช้ไปในการย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุที่อยู่ในน้ำ [4] นอกจากนี้ ในบ่อเพาะเลี้ยงระหว่างวันยังเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “การแบ่งชั้นความร้อน” ขึ้น เนื่องจากน้ำภายในบ่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งน้ำด้านล่างที่อยู่ในส่วนลึกของบ่อจะเย็นกว่าน้ำที่อยู่ด้านบนเป็นอย่างมาก เนื่องจากการลดทอนความเข้มแสงแดดเมื่อผ่านชั้นน้ำ [5] ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้น้ำในส่วนลึกของบ่อมีอุณหภูมิต่ำและขาดแคลนออกซิเจน

โดยทั่วไปแล้วมักพบว่าสัตว์น้ำจะอาศัยอยู่บริเวณผิวน้ำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากบริเวณด้านบนบ่อมีออกซิเจนที่เพียงพอต่อการดำรงชีวิต อย่างไรก็ตาม หากสัตว์น้ำอาศัยอยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานอาจเกิดโรคราบาดได้ ซึ่งทำให้เกิดผลเสียต่อผลผลิตของเกษตรกร ดังนั้น เพื่อลดความเสียหายที่อาจตามมาและยังเป็นการกระจายความหนาแน่นต่อพื้นที่ในบ่อเพาะเลี้ยงของเกษตรกรในพื้นที่ชนบท จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการเพิ่มค่าออกซิเจนให้กับน้ำในส่วนลึกของบ่อให้เพียงพอต่อการดำรงชีวิต

ดังนั้น บทความนี้จะได้นำเสนอระบบเติมอากาศที่เกษตรกรสามารถเข้าถึงได้ ซึ่งเป็นระบบที่ไม่ใช้พลังงานไฟฟ้า สามารถทำงานได้โดยธรรมชาติที่เกิดจากการประยุกต์ใช้หลักการของแรงลอยตัว นอกจากนี้ยังเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการบำรุงรักษา ซึ่งเกษตรกรสามารถซ่อมบำรุงได้ด้วยตนเอง อีกทั้งยังเป็นระบบที่สามารถสร้างขึ้นเองใช้งานได้เองอีกด้วย

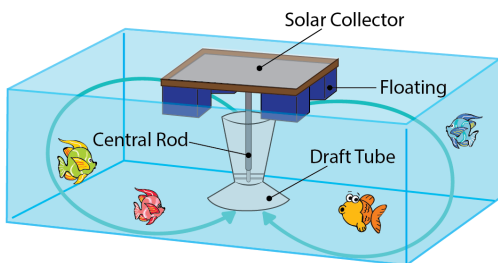
บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการออกแบบระบบเติมอากาศแบบน้ำไหลเวียนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้โปรแกรมจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อหาขนาดที่เหมาะสม และทำการทดสอบระบบกับบ่อเพาะเลี้ยงเพื่อประเมินการทำงานของระบบ

นอกจากนี้ยังทำการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ร่วมด้วย เพื่อเป็นทางเลือกในการลงทุนสำหรับผู้ประกอบการต่อไป

2. หลักการและวิธีดำเนินงาน

2.1 แนวคิดในการออกแบบระบบ

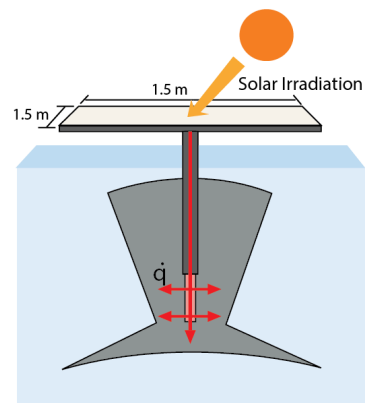
ระบบเติมอากาศที่นำเสนอในบทความนี้มีชื่อเรียกว่า ระบบเติมอากาศแบบน้ำไหลเวียนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Circulating-Water Aeration System, SCWAS) ดังแสดงในรูปที่ 1 มีส่วนประกอบหลักคือ แผงรับแดด (Solar Collector) ที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียม แท่งนำความร้อน (Central Rod) ปล่องบังคับทิศทางการไหล (Draft Tube) และทุ่นลอย (Floating) ซึ่งทำหน้าที่พยุงระบบให้ลอยอยู่ในน้ำได้และยังสะดวกต่อการเคลื่อนย้าย



รูปที่ 1 ระบบเติมอากาศแบบน้ำไหลเวียนพลังงานแสงอาทิตย์ (SCWAS)

ระบบ SCWAS สามารถเติมออกซิเจนได้จากการทำให้น้ำเกิดการไหลเวียน โดยอาศัยหลักการของแรงลอยตัว (Buoyant Force) ที่เกิดจากการพาความร้อนโดยธรรมชาติ ซึ่งการทำงานของระบบเกิดขึ้นเมื่อ Solar Collector ดูดซับพลังงานแสงแดดและสะสมเป็นความร้อนเก็บไว้ในเนื้อวัสดุ จากนั้นความร้อนจะถูกถ่ายเทให้กับ Central Rod ที่ต่ออยู่กับแผ่นของ Solar Collector ซึ่งบน Central Rod บางส่วนถูกหุ้มฉนวนไว้ระยะหนึ่งเพื่อไม่ให้ความร้อนสูญเสียก่อนถึงตำแหน่งที่ต้องการถ่ายเทความร้อน โดยความร้อนจะถูกถ่ายเท

จาก Central Rod สู่น้ำที่ชั้นล่างของบ่อ เมื่อน้ำในบริเวณที่อยู่ใกล้กับ Central Rod ได้รับความร้อนจะมีความหนาแน่นลดลงและต่ำกว่าบริเวณอื่น ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้น้ำเกิดการไหลเวียนตามหลักการของแรงลอยตัว น้ำที่ไหลอยู่ภายในระบบจะไหลตามการบังคับทิศทางของ Draft Tube เพื่อไปรับออกซิเจนที่มีอยู่มากที่ผิวน้ำด้านบนบ่อแล้วเคลื่อนที่ตามการไหลเวียนกลับมายังชั้นล่างของบ่อเพื่อปรับปรุงค่าออกซิเจน ซึ่งน้ำจะเกิดการไหลเวียนในลักษณะนี้เพื่อเติมออกซิเจนให้กับบ่อเพาะเลี้ยง สำหรับภาพประกอบการถ่ายเทความร้อนของระบบแสดงดังรูปที่ 2



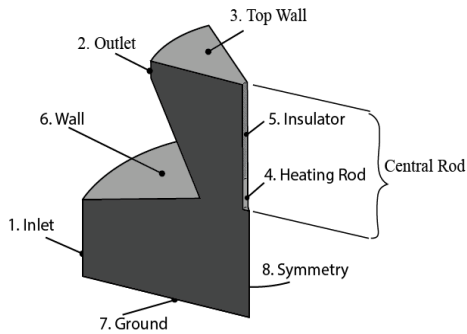
รูปที่ 2 การถ่ายเทความร้อนของระบบ SCWAS

2.2 แบบจำลองเชิงตัวเลข

เพื่อประเมินแนวคิดการออกแบบระบบ SCWAS ได้ใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ดำเนินการในโปรแกรม ANSYS Fluent เวอร์ชัน 18.0 โดยในการจำลองได้ทำการหาขนาดรูปทรงที่เหมาะสมของระบบ ซึ่งได้พิจารณาจากอัตราการไหลเวียนที่เกิดขึ้น

2.2.1 โดเมนการคำนวณและเงื่อนไขขอบเขต

ในการศึกษาได้ใช้แบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งมีโดเมนการคำนวณเพียง 1/8 ของรูปทรงทั้งหมด ทั้งนี้เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณลง สำหรับโดเมนการคำนวณและการตั้งชื่อขอบเขตที่ใช้ในการจำลองแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โดเมนและขอบเขตการจำลอง

ตารางที่ 1 เงื่อนไขขอบเขตในการจำลอง

No.	Boundary	Momentum	Thermal
1	Inlet	Pressure-inlet	30 °C
2	Outlet	Pressure-outlet	30 °C
3	Top Wall	No-slip	30 °C
4	Heating Rod	No-slip	Heat Flux
5	Insulator	No-slip	Adiabatic
6	Wall	No-slip	Adiabatic
7	Ground	No-slip	Adiabatic
8	Symmetry	N/A	N/A

โดเมนที่แสดงในรูปที่ 3 มีเฉพาะส่วนที่เป็นน้ำที่อยู่ภายในระบบเท่านั้น ส่วนอื่นที่นอกเหนือจากนี้ไม่ได้ทำการพิจารณาเนื่องจากต้องการหาเพียงรูปทรงที่เหมาะสมโดยการจำลองนี้มีเงื่อนไขขอบเขตแสดงดังตารางที่ 1

ในการจำลองนี้ได้กำหนดให้ความดันรวม (Total Pressure) เท่ากับศูนย์ที่ขอบเขต 1 และความดันสถิต (Static Pressure) เท่ากับศูนย์ที่ขอบเขต 2 โดยมีอุณหภูมิของน้ำเป็น 30 องศาเซลเซียส ที่ขอบเขต 1-3 ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้น ส่วนขอบเขตที่ 3-7 กำหนดให้ความเร็วในชั้นขีดผิวเท่ากับศูนย์ ในส่วนขอบเขตที่ 4 มีการใส่ฟลักซ์ความร้อนเข้าไปตามการคำนวณในสมการที่ (1) และขอบเขต 5-7 กำหนดให้ความร้อนไม่สามารถถ่ายเทผ่านผนังไปได้ และในการจำลองนี้รูปทรงถูกกำหนดให้มีความสมมาตรตามแนวแกน

2.2.2 สมมติฐานการจำลองและสมการควบคุม

การจำลองนี้สมมติให้คุณสมบัติของน้ำ (ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก และสัมประสิทธิ์การขยายตัว) มีค่าคงที่ตามอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส และเพื่อที่จะออกแบบระบบ SCWAS นี้ได้กำหนดให้ค่าความเข้มแสงแดดคงที่เท่ากับ 728 วัตต์ต่อตารางเมตร แต่ Solar Collector สามารถดูดซับความเข้มแสงแดดได้เพียงร้อยละ 45 [6] และกำหนดให้ฉนวนกันความร้อนได้อย่างสมบูรณ์แบบฉนวนนั้น ฟลักซ์ความร้อนที่จะถูกถ่ายเทจึงมีค่าเท่ากับ 328 วัตต์ต่อตารางเมตร และในการออกแบบกำหนดให้ Solar Collector มีพื้นที่เท่ากับ 1.5×1.5 ตารางเมตร ดังนั้น ความร้อนที่จะถูกถ่ายเทให้กับน้ำจึงมีค่าเป็น 738 วัตต์ และสามารถคำนวณหาฟลักซ์ความร้อน (q) ที่จะถูกถ่ายเทให้กับน้ำได้ดังสมการที่ (1)

$$q = \frac{Q}{A_{hr}} \quad (1)$$

โดยที่

Q = ความร้อนที่ถ่ายเทจาก Solar Collector มายัง Central Rod (วัตต์)

A_{hr} = พื้นที่ของ Central Rod ที่สัมผัสกับน้ำ ในที่นี้คือพื้นที่ของ Heating Rod (ตารางเมตร)

สำหรับสมการควบคุมที่ใช้ในการจำลองนี้ประกอบไปด้วย สมการอนุรักษ์มวล สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน ซึ่งทำงานร่วมกับ Boussinesq Approximation และ ถูกกำหนดโดย Rayleigh Number (Ra_L) เพื่อกำหนดลักษณะการไหลของน้ำที่ใกล้กับขอบเขตของ Heating Rod

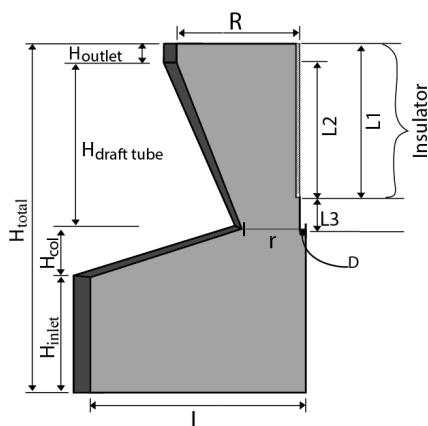
การไหลที่อยู่ใกล้กับขอบเขตของ Heating Rod ถูกสันนิษฐานให้เป็นการไหลแบบปั่นป่วน ($Ra_L > 10^9$) และในการตั้งค่าได้ใช้โมเดลของ SST k-omega เนื่องจากมีการศึกษาที่แสดงให้เห็นความเหมาะสมของ

แบบจำลองกับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหลเวียนแบบปั่นป่วนตามธรรมชาติ [7]

SIMPLE Algorithm ถูกใช้ในการแก้สมการโมเมนตัมและสมการความต่อเนื่อง QUICK Scheme ถูกนำไปใช้ในสมการโมเมนตัมและสมการพลังงาน และเลือกใช้ Second Order Upwind Method สำหรับการแก้ปัญหาลังงานที่เกี่ยวข้องกับการไหลและอัตราการขยายตัวของของไหล และใช้ PRESTO Method สำหรับเทอมของความดัน และมีการกำหนดให้ Under Relaxation Factors สำหรับการคำนวณความดัน (Pressure) ความเร็ว (Velocity) และพลังงาน (Energy) เป็น 0.3, 0.7 และ 0.9 ตามลำดับ [7]

2.2.3 วิธีการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของรูปทรง พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แสดงดังรูปที่ 4 โดยในการศึกษานี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหุ้มฉนวนบน Central Rod และส่วนที่สองเป็นการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับรูปทรง โดยมีวิธีการศึกษาในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้



รูปที่ 4 รูปทรงและพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา

การศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหุ้มฉนวนบน Central Rod มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ L1 : ความยาวของส่วนที่หุ้มฉนวนทั้งหมดบน Central

Rod (เมตร), L2 : ความยาวฉนวนเฉพาะส่วนที่อยู่ใน Draft Tube (เมตร) และ L3 ซึ่งเป็นความยาวของ Heating Rod ที่ความร้อนมีการถ่ายเทให้กับน้ำ (เมตร) สำหรับวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อทำการตรวจสอบระยะการหุ้มฉนวนบน Central Rod ว่าส่งผลอย่างไรต่ออัตราการไหลเวียนที่เกิดขึ้นในระบบหรือไม่ โดยในการจำลองได้กำหนดความยาวของ Central Rod (L1+L3) ให้มีค่าคงที่ เท่ากับ 0.7 เมตร และทำการเปลี่ยนแปลงระยะ L2 ตั้งแต่ 0 จนถึง 0.6 เมตร

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของรูปทรงเพื่อตรวจสอบอัตราการไหลที่เกิดขึ้น มีพารามิเตอร์ 5 ตัวเกี่ยวข้องซึ่งประกอบไปด้วย D : เส้นผ่านศูนย์กลางของ Rod (นิ้ว), R : รัศมีทางออกปล่อง (เมตร), L : ความยาวฐาน (เมตร), H_{col} : ความสูงฐาน (เมตร) และ H_{outlet} : ความสูงทางออกปล่อง (เมตร) โดยในการศึกษาได้ทำการปรับขนาดของพารามิเตอร์ไปทีละตัวตามช่วงที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2 และทำการคงที่ขนาดของพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ ไว้ที่ค่าเริ่มต้น เมื่อได้ขนาดที่ดีที่สุดซึ่งพิจารณาจากอัตราการไหลเวียนสูงสุดที่เกิดขึ้นจึงได้คงที่ขนาดที่ดีที่สุดของพารามิเตอร์ตัวนั้น ๆ ไว้และทำการหาขนาดที่ดีที่สุดของพารามิเตอร์ตัวอื่นถัดไป

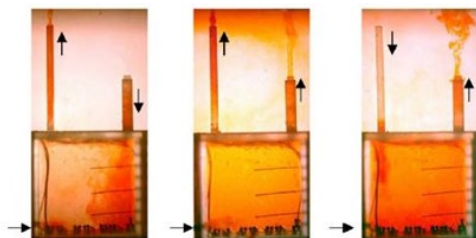
ตารางที่ 2 ขนาดพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา

Parameter	Initial Value	Varied Range
L1 (m)	-	0.05 - 0.65
L2 (m)	-	0 - 0.6
L3 (m)	-	0.65 - 0.05
D (inch)	1	1 - 4
r (m)	0.1	-
R (m)	0.2	0.1 - 0.2
L (m)	0.7	0.2 - 1
H_{col} (m)	0.3	0.05 - 0.4
H_{outlet} (m)	0.05	0.025 - 0.2
H_{inlet} (m)	0.5	-
H_{total} (m)	0.5	-

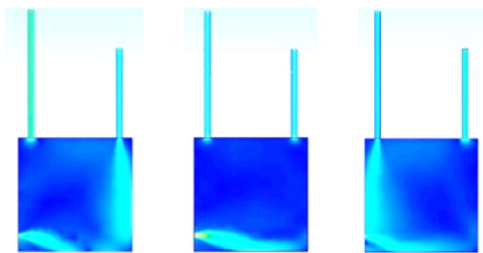
ในทุกการจำลองได้กำหนดให้ r , H_{inlet} และ H_{total} เป็นค่าคงที่ไม่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงขนาด เนื่องจากได้กำหนดให้รัศมีทางเข้าปล่องคงที่ในตอนแรก และค่าของ H_{inlet} และ H_{total} คงที่ตามเงื่อนไขของบ่อที่จะใช้ในการทดสอบระบบ

2.2.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ก่อนทำการจำลองเพื่อหารูปทรงที่เหมาะสมของระบบ SCWAS ได้ทำการตรวจสอบการใช้งานโปรแกรมของผู้วิจัยเองเพื่อให้แน่ใจว่าสามารถจำลองระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลโดยธรรมชาติได้ โดยการเปรียบเทียบนี้ได้นำผลการตรวจสอบกับบทความของ Chenvidyakarn and Woods [8] ซึ่งเป็นบทความที่ศึกษาการระบายความร้อนภายในอาคาร โดยในการทดลองได้นำน้ำแทนอากาศเป็นของไหลและใช้ฮีตเตอร์เป็นแหล่งความร้อนให้กับชุดทดสอบ โดยผลจากการเปรียบเทียบชุดทดสอบกับแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 5



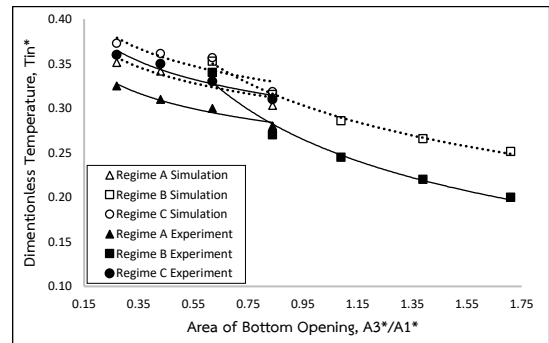
ก) ผลจากชุดทดสอบ [8]



ข) ผลจากแบบจำลอง

รูปที่ 5 การเปรียบเทียบผลเชิงคุณภาพของชุดทดสอบ ก) กับแบบจำลอง ข) โดยรูปจากซ้ายไปขวาคือ Regime A, Regime B และ Regime C ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบผลเชิงคุณภาพของชุดทดสอบ (ก.) กับแบบจำลอง (ข.) ในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นลักษณะการไหลที่คล้ายคลึงกันของทั้ง 3 Regimes ซึ่งสังเกตได้จากสีที่ปรากฏตรงทางเข้าและปล่องทางออกของชุดทดสอบกับแบบจำลอง นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจสอบผลในเชิงปริมาณเพื่อเป็นการยืนยันเชิงตัวเลขร่วมด้วย



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบผลเชิงปริมาณของชุดทดสอบ กับแบบจำลองทั้ง 3 Regimes

จากการเปรียบเทียบผลเชิงปริมาณของชุดทดสอบ (Experiment) กับแบบจำลอง (Simulation) ในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของข้อมูลทั้ง 2 ชุดมีทิศทางเดียวกัน และเป็นเช่นนี้ทั้ง 3 Regimes และผลจากการเปรียบเทียบอุณหภูมิไร้มิติ พบความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 2 – 25% โดยความคลาดเคลื่อนนี้มีส่วนเกิดมาจากการจำลองสมมติให้ความร้อนมีการกระจายอย่างทั่วถึงที่บริเวณพื้น แต่ในชุดทดสอบเป็นการติดตั้งฮีตเตอร์เพื่อให้ความร้อนที่ตำแหน่งตรงกลางของพื้น ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองคลาดเคลื่อนไปจากการวัดจริงของชุดทดสอบ

3. การประเมินผล

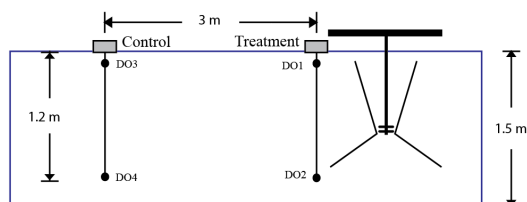
เพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบ SCWAS ได้นำชุดทดสอบ SCWAS ไปทดลองกับบ่อของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยชุดทดสอบที่ทำการติดตั้งภายในบ่อแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ชุดทดสอบ SCWAS ที่ติดตั้งภายในบ่อ

เพื่อประเมินความสามารถในการทำงานของระบบ SCWAS ได้ทำวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) ที่ตำแหน่ง Treatment และ Control ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ได้รับผลกระทบจากชุดทดสอบและจุดที่ควบคุมให้เป็นไปตามธรรมชาติ ซึ่งแต่ละตำแหน่งทำการวัด DO 2 ระดับ คือที่ผิวน้ำชั้นบน (DO1 และ DO3) และน้ำชั้นล่าง (DO2 และ DO4) โดยจุดวัด DO ดังกล่าวแสดงในรูปที่ 8

ในการวัดออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ได้ใช้ DO Analog Dissolved Oxygen Sensor Meter Kit โมเดล SKU:SEN0237 (ที่ทำการต่อสัญญาณเข้ากับบอร์ด Arduino เรียบร้อยแล้ว) จุ่มลงไปใบบ่อ โดยจุดวัด DO1 และ DO3 ห่างจากผิวน้ำเป็นระยะ 10 เซนติเมตร จุดวัด DO2 และ DO4 ห่างจากผิวน้ำเป็นระยะ 120 เซนติเมตร ซึ่งแต่ละจุดทำการบันทึกค่า DO ทุก ๆ 15 นาที และบันทึกข้อมูลไว้ใน Data Logger ที่ตำแหน่ง Treatment และ Control



รูปที่ 8 ตำแหน่งการติดตั้งจุดวัด DO ภายในบ่อทดสอบ

สำหรับการประเมินความสามารถของระบบ SCWAS ได้ทำการเปรียบเทียบค่า DO ของตำแหน่ง

Treatment กับ Control ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบทั้งผิวน้ำชั้นบนและผิวน้ำชั้นล่าง โดยค่าที่ได้จะสามารถบอกได้ว่าระบบมีความสามารถในการเติมออกซิเจนได้มากน้อยแค่ไหนเมื่อเทียบกับบ่อกักตุนที่ไม่ได้ติดระบบเติมอากาศใด ๆ โดยมีสมการที่ใช้ในการเปรียบเทียบเป็นดังนี้

$$\text{Evaluation} = \frac{\text{DO}_{\text{Treatment}}}{\text{DO}_{\text{Control}}} \quad (2)$$

โดยที่

$\text{DO}_{\text{Treatment}}$ = ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่ตำแหน่ง Treatment (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$\text{DO}_{\text{Control}}$ = ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่ตำแหน่ง Treatment (มิลลิกรัมต่อลิตร)

สำหรับการประเมินทางเศรษฐศาสตร์เพื่อประเมินความคุ้มค่าในการเลือกใช้งานระบบ SCWAS ได้ใช้ตัวชี้ 3 วัดประกอบกัน ได้แก่ NPV, PBP และ IRR ซึ่งมีนิยามและสมการดังนี้

NPV (Net Present Value) คือ การประเมินมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการใด ๆ โดย NPV คิดจากผลรวมของมูลค่าปัจจุบันในแต่ละปีตามอัตราส่วนลดที่กำหนด หากมีค่าเป็นบวกหมายความว่าโครงการนั้นมีกำไรจากการประเมินมูลค่า ณ ปัจจุบัน ซึ่งมีสมการคำนวณดังนี้

$$\text{NPV} = \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (3)$$

โดยที่

R_t = กระแสเงินสดสุทธิในแต่ละปี (บาท)

I = อัตราส่วนลด (ร้อยละ)

N = ระยะเวลาในการลงทุนสำหรับโครงการใด ๆ

t = จำนวนงวดที่คิดมูลค่า (งวด)

PBP (Payback Period) คือ ระยะเวลาคืนทุน สำหรับการลงทุนกับโครงการใด ๆ โดยในการคำนวณได้ คัดอัตราส่วนลดรวมด้วย ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณ เป็นดังนี้

$$PBP = y + \text{abs}(n) / p \quad (4)$$

โดยที่

y = จำนวนปีก่อนที่มูลค่าสะสมเป็นบวก (ปี)
 abs(n) = มูลค่าสะสมของปีที่ y โดยใช้ค่าบวก (บาท)
 p = มูลค่าสะสมเริ่มต้นที่มีค่าเป็นบวก (บาท)

IRR (Internal Rate of Return) คือ อัตราผลตอบแทนเฉลี่ยรายปี ซึ่งเป็นตัวชี้วัดผลตอบแทนความคาดหวังที่จะได้รับในแต่ละปีเมื่อทำการลงทุนกับโครงการใด ๆ โดยในการคำนวณคืออยู่บนพื้นฐานของ NPV เท่ากับศูนย์และปราศจากการคิดอัตราส่วนลด และโดยทั่วไปการคำนวณหา IRR มักมีความซับซ้อนจึงนิยมใช้ฟังก์ชันสำเร็จรูปใน Excel เพื่อทำการคำนวณโดยมีวิธีการดังนี้

$$= \text{IRR} (\text{first cell} : \text{last cell}) \times 100\% \quad (5)$$

โดยที่

first cell = ระบุ Cell เริ่มต้นของกระแสเงินสด

last cell = ระบุ Cell สุดท้ายของกระแสเงินสด

ในการประเมินความคุ้มค่าในการเลือกใช้งานระบบ SCWAS ได้ทำการเปรียบเทียบกับ Pump และ Paddle Wheel ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ไฟฟ้าในการเติมอากาศ โดยในการประเมินได้กำหนดให้พารามิเตอร์บางตัวเท่ากันเช่น จำนวนปลาที่เลี้ยง (ตัว/รอบ) สำหรับบ่อที่ติดตั้งระบบ SCWAS และ Pump ส่วน Paddle Wheel ที่กำหนดให้จำนวนปลาที่เลี้ยง (ในตารางที่ 3) มีจำนวนมากกว่าอีก 2 ระบบ เนื่องจาก Paddle Wheel มีความสามารถในการเติมออกซิเจนเข้าสู่บ่อสูงจึง

ประเมินให้จำนวนปลาในบ่อมีความหนาแน่นมากกว่า สำหรับการคิดค่าไฟฟ้าของ Pump และ Paddle Wheel ได้คำนวณจากกำลังวัตต์ของอุปกรณ์ที่เปิดใช้งานในแต่ละเดือน โดยคิดค่าไฟฟ้าตามอัตราการใช้งานที่ กฟน. กำหนด และสำหรับเงื่อนไขการคำนวณเพื่อนำไปหามูลค่าของอุปกรณ์เติมอากาศทั้ง 3 ชนิด แสดงไว้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ของอุปกรณ์เติมอากาศทั้ง 3 ชนิด

รายการ	อุปกรณ์เติมอากาศ		
	SCWAS	Pump	Paddle Wheel
กำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (วัตต์)	-	200	1491
จำนวนปลาที่เลี้ยง (ตัว/รอบ)	312	312	628
ค่าพันธุ์ปลา (บาท/ตัว)	10	10	10
ค่าอาหาร (บาท/กก.)	25	25	25
จำนวนอาหารที่ใช้ (กก./รอบ)	615	615	615
น้ำหนักปลาสุดท้าย (กก./ตัว)	1.23	1.23	1.23
ราคาขายปลา (บาท/กก.)	60	60	60
i (อัตราส่วนลด) (%/ปี)	3	3	3
อายุโครงการ (ปี)	10	10	10
ค่าซาก (%/ปี)	10	10	10

ในการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ได้กำหนดให้การเพาะเลี้ยงในแต่ละรอบใช้เวลา 5 เดือนเพื่อเก็บผลผลิตไปจำหน่าย ดังนั้น i (อัตราส่วนลด) ที่ใช้ในการคำนวณแต่ละรอบจึงมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.25

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ผลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของระบบ ผลที่ได้จากการทดสอบกับบ่อ และผลจากการประเมินทางเศรษฐศาสตร์เพื่อเป็นทางเลือกในการลงทุน ซึ่งผลที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

จากการจำลองระบบ SCWAS ในโปรแกรม Ansys Fluent เพื่อหาขนาดที่ดีที่สุดของระบบ โดยทำการพิจารณาจากอัตราการไหลที่เกิดขึ้น ได้ผลดังนี้

4.1.1 การศึกษาอิทธิพลความยาวฉนวนบนแท่งนำความร้อน

การจำลองนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลความยาวฉนวนบนแท่งนำความร้อน (L2) เพื่อดูว่ามีผลอย่างไรต่ออัตราการไหลเวียนที่เกิดขึ้นในระบบหรือไม่ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 อิทธิพลความยาวฉนวนบนแท่งนำความร้อนที่ส่งผลต่ออัตราการไหลเวียน

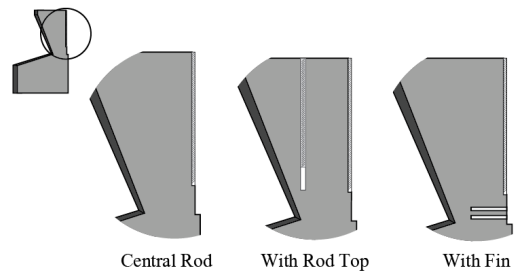
L2 (m)	Flow Rate (L/s)	Ratio
0.00	0.26	1.00
0.10	0.28	1.09
0.20	0.31	1.22
0.30	0.36	1.39
0.35	0.39	1.51
0.40	0.42	1.63
0.45	0.45	1.76
0.55	0.53	2.08
0.60	0.62	2.41

จากตารางที่ 3 พบว่าเมื่อระยะ L2 เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการไหลเวียนเพิ่มขึ้น และเพิ่มมากที่สุดเมื่อ L2 เท่ากับ 0.6 เมตร และจากผลจะเห็นว่าอัตราการไหลเพิ่มสูงถึง 2.41 เท่าเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีฉนวน (L2 = 0 เมตร) ดังนั้นจะเห็นว่าการศึกษาการติดตั้งเข้าไปหุ้มแท่งนำความร้อนด้วยระยะที่เหมาะสมจะทำให้อัตราการไหลเวียนเพิ่มขึ้นได้

4.1.2 การศึกษารูปแบบการติดตั้งแท่งนำความร้อน

การศึกษานี้เป็นการเปรียบเทียบรูปแบบการติดตั้งแท่งนำความร้อน 3 แบบ ได้แก่ Central Rod,

With Rod Top และ With Fin ซึ่งแบบแรกมีเฉพาะแท่งนำความร้อนที่อยู่ตรงกลาง แบบที่สองเป็นแบบที่เพิ่มแท่งนำความร้อนเข้ามาล้อมรอบแบบแรก และแบบสุดท้ายมีการใส่ครีบบำเหนียวที่ส่วนปลายของแท่งนำความร้อน โดยรูปแบบการติดตั้งแท่งนำความร้อนทั้ง 3 แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การติดตั้งแท่งนำความร้อนทั้ง 3 รูปแบบ

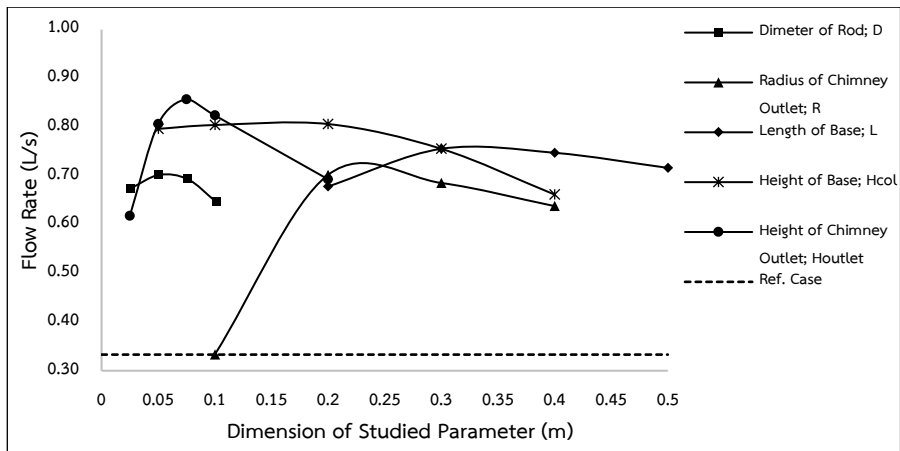
ตารางที่ 5 รูปแบบการติดตั้งแท่งนำความร้อนที่ส่งผลต่ออัตราการไหลเวียน

Model	Flow Rate (L/s)	Ratio
Central Rod	0.6186	1.00
With Rod Top	0.4953	0.80
With Fin	0.7042	1.14

จากตารางที่ 5 พบว่ารูปแบบการติดตั้งแท่งนำความร้อนที่มีครีบบำเหนียว (With Fin) ให้อัตราการไหลเวียนสูงที่สุด และคิดเป็น 1.14 เท่าเมื่อเทียบกับแบบ Central Rod และการติดตั้งแท่งนำความร้อนแบบ With Rod Top ให้อัตราการไหลเวียนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่น ๆ ซึ่งอัตราการไหลที่ลดลงเป็นผลเนื่องมาจากแท่งนำความร้อนที่เพิ่มเข้ามาในรูปแบบของ With Rod Top ขวางการการไหลของน้ำที่ทางออก จึงส่งผลให้อัตราการไหลเวียนที่ผ่านระบบมีค่าลดลง

4.1.3 การศึกษาอิทธิพลของรูปทรง

เพื่อตรวจสอบผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 4 ได้ทำการศึกษารูปร่างมีเตอร์ 5 ตัว ดังต่อไปนี้



รูปที่ 10 อิทธิพลขนาดของรูปทรงที่ส่งผลต่ออัตราการไหลเวียน

D : เส้นผ่านศูนย์กลางของ Rod (นิ้ว)

R : รัศมีทางออกปล่อง (เมตร)

L : ความยาวฐาน (เมตร)

Hcol : ความสูงฐาน (เมตร)

Houtlet : ความสูงทางออกปล่อง (เมตร)

โดยผลที่ได้จากการจำลองแสดงดังรูปที่ 10

รูปที่ 10 เป็นการแสดงอัตราการไหลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของพารามิเตอร์ทั้ง 5 ตัว จากรูปแสดงให้เห็นว่า ขนาดของพารามิเตอร์มีอิทธิพลต่ออัตราการไหลเวียนที่เกิดขึ้นในระบบ และพารามิเตอร์ตัวหนึ่ง ๆ จะมีขนาดที่เหมาะสมของตัวเอง โดยสังเกตจากเส้นกราฟมีการเพิ่มขึ้นในตอนแรกและลดลงในช่วงหลัง สำหรับการลดลงของอัตราการไหลในช่วงหลังที่เกิดจากการเพิ่มขนาดของพารามิเตอร์ เป็นผลมาจากการเจอค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ตัวนั้นร่วมกับพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ แล้ว จึงส่งผลให้อัตราการไหลมีค่าลดลงแม้จะมีการเพิ่มขนาดของพารามิเตอร์ไปอีกก็ตาม ดังนั้น ในวิธีการศึกษาจึงได้คงที่ค่าที่ดีที่สุดของพารามิเตอร์ตัวที่เหมาะสมที่สุดไว้ แล้วทำการศึกษาพารามิเตอร์ตัวถัดไป ซึ่งผลจากการจำลองพบว่าขนาดที่เหมาะสมสำหรับรูปทรงให้ D เท่ากับ 2 นิ้ว, R เท่ากับ 0.2 เมตร, L เท่ากับ 0.3 เมตร, H_{col} เท่ากับ 0.2 เมตร

และ H_{outlet} เท่ากับ 0.075 เมตร โดยมีอัตราการไหลเวียนเท่ากับ 0.86 ลิตรต่อวินาที

นอกจากนี้ยังได้ทำการจำลองขยายรูปทรงในแนวราบด้วยสัดส่วนของ r : R : L เป็น 1 : 2 : 3 เพื่อดูผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนขนาดตามแนวราบ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 อิทธิพลการขยายรูปทรงในแนวราบที่ส่งผลต่ออัตราการไหลเวียน

r (m)	R (m)	L (m)	Flow Rate (L/s)	
			Central Rod	With Fin
0.10	0.20	0.30	0.86	0.92
0.15	0.30	0.45	1.04	1.30
0.20	0.40	0.60	1.20	1.77
0.25	0.50	0.75	1.33	2.24

จากตารางที่ 6 พบว่า เมื่อรูปทรงขยายใหญ่ขึ้น ส่งผลให้อัตราการไหลเวียนเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำไหลเวียนได้สะดวกยิ่งขึ้นเมื่อรูปทรงกว้างขึ้น และจากการเปรียบเทียบรูปแบบการติดตั้งแท่งนำความร้อนพบว่า แบบ With Fin ทำให้อัตราการไหลเวียนที่ดีกว่าแบบ Central Rod ดังนั้น ในการสร้างจริงจึงควรติด

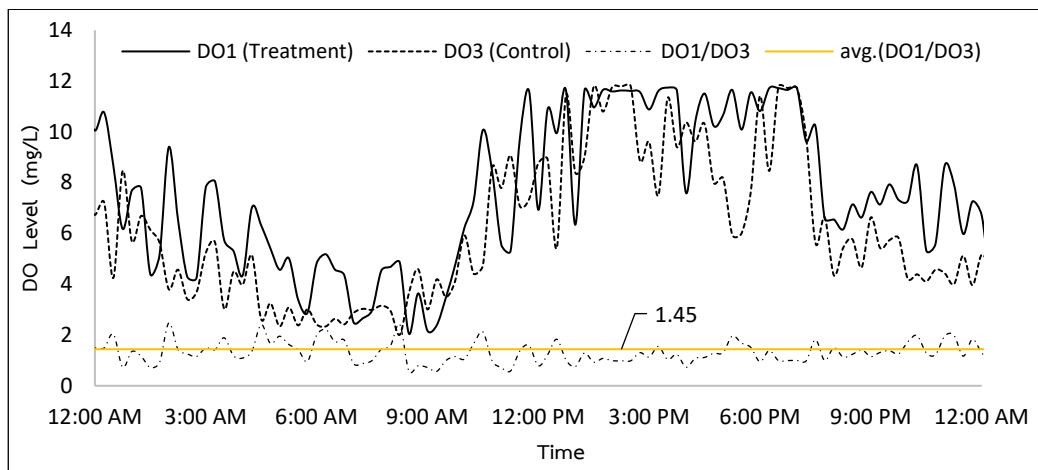
ครึ่งเช้าไปบน Central Rod ด้วยเพื่อทำให้อัตราการไหลเวียนของน้ำเพิ่มขึ้น

4.2 ผลการทดลอง

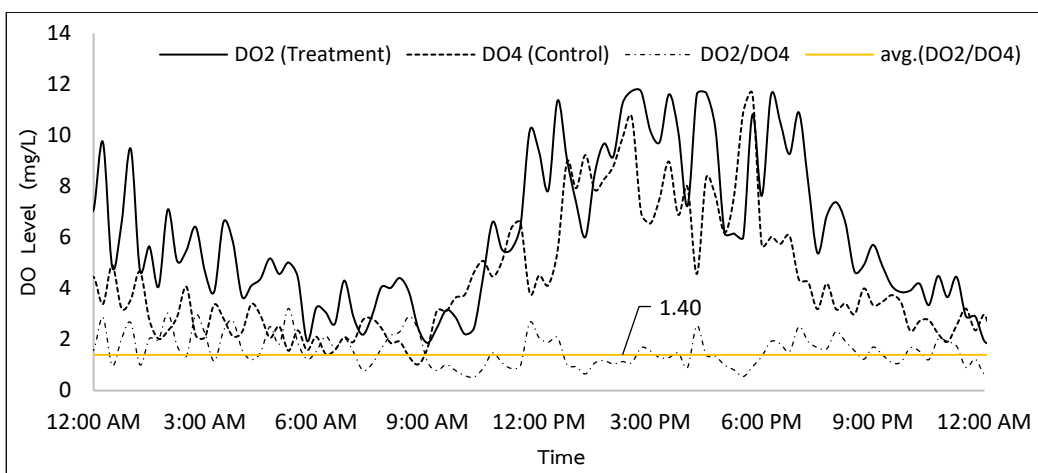
ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอผลจากการทดสอบระบบ SCWAS ที่ติดตั้งภายในบ่อทดลอง โดยผลที่ได้เป็นดังนี้

รูปที่ 11 เป็นการแสดงค่า DO ที่ผิวน้ำชั้นบนที่เกิดขึ้นในรอบวัน จากการทดลองพบว่า ค่า DO ทั้ง 2 ตำแหน่ง (Treatment และ Control) เพิ่มขึ้นในตอน

กลางวันและลดลงหลัง 18.00 น. (6:00 PM) และในตอนเที่ยงคืนมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งจากนั้นจึงลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ในช่วงกลางวันระบบ SCWAS สามารถทำงานได้ดีและเป็นปกติเนื่องจากมีแสงแดดตกกระทบและเมื่อแสงแดดเริ่มหมดลงในช่วงเย็นทำให้ค่า DO เริ่มลดลงไปด้วย และในช่วงกลางคืนจะสังเกตเห็นว่าค่า DO เพิ่มขึ้นอีกครั้ง เนื่องจากในช่วงกลางวัน Solar Collector ดูดซับความร้อนไว้ พลังงานความร้อนจึงถูกสะสมไว้ภายในเนื้อวัสดุ เมื่อตกติอากาศเย็นตัวลง ความร้อนที่สะสมไว้ได้คายออกมาให้กับน้ำที่อยู่ภายใต้



รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลง DO ระหว่างวันที่ผิวน้ำชั้นบน

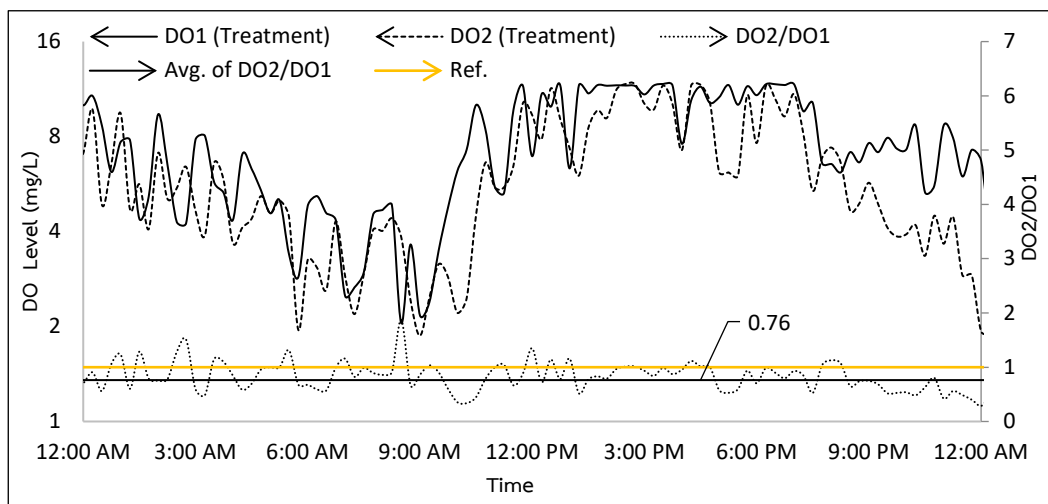


รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลง DO ระหว่างวันที่น้ำชั้นล่าง

ระบบ และเมื่อน้ำได้รับความร้อนจึงอุ่นขึ้นและเกิดการไหลแบบย้อนกลับจากตอนกลางวัน ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ค่า DO เพิ่มขึ้นได้ในช่วงกลางวัน แต่การคายความร้อนนี้จะหยุดลงเมื่ออุณหภูมิของแผ่น Solar Collector เท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม จึงส่งผลให้ค่า DO ในช่วงหลังจากเที่ยงคืนเริ่มลดลงเรื่อย ๆ และค่า DO จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงที่มีแสงแดด จากการเปรียบเทียบค่า DO ที่ตำแหน่ง Treatment และ Control ซึ่งแสดงเป็น DO1 และ DO3 ตามลำดับ พบว่าเกือบทุกช่วงเวลา DO1 สูงกว่า DO3 มีเพียงบางช่วงเวลาที่ DO3 เทียบเท่ากับ DO1 คือช่วงเวลาประมาณ 12.00 น. – 15.00 น. (2:00 PM – 3:00 PM) นั้นหมายความว่ายิ่งความเข้มแสงแดดสูง ระบบยังสามารถสร้างการไหลเวียนน้ำได้ดียิ่งขึ้น จนทำให้จุด Control ได้รับ DO จากจุด Treatment จนมีค่าความเข้มข้นของ DO อยู่ในระดับที่สอดคล้องกัน นอกจากนี้ยังพบว่าค่า DO โดยเฉลี่ยที่ตำแหน่ง Treatment มีค่าเป็น 1.45 เท่าของตำแหน่ง

Control ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าระบบนี้สามารถเพิ่มค่า DO ให้กับบ่อได้ถึง 1.45 เท่าเมื่อเทียบกับบ่อทั่วไปที่ไม่ได้ติดตั้งระบบเติมอากาศ

รูปที่ 12 เป็นการแสดงค่า DO ที่ผิวน้ำชั้นล่างที่เกิดขึ้นในรอบวัน จากรูปจะเห็นว่าแนวโน้มทั้ง 2 จุด (Treatment และ Control) ที่ทำการวัด DO มีลักษณะเช่นเดียวกัน และมีแนวโน้มเช่นเดียวกับ DO ที่ผิวน้ำชั้นบนด้วย ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของบ่อจึงทำให้ค่า DO ทั้ง 4 จุดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และจากการเปรียบเทียบค่า DO ที่ตำแหน่ง Treatment และ Control พบว่า DO2 มีค่ามากกว่า DO4 ตลอดทั้งวัน และมีค่าเป็น 1.40 เท่า นั้นหมายความว่า ระบบ SCWAS นี้สามารถเพิ่มค่า DO ให้กับน้ำชั้นล่างของบ่อได้ และในช่วงเวลากลางคืนระบบ SCWAS ยังสามารถเพิ่มค่า DO ได้ด้วยการช่วยให้น้ำเกิดการแพร่ของ DO จากผิวน้ำชั้นบนลงมาสู่ชั้นล่าง



รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงค่า DO ในรอบวันที่ตำแหน่ง Treatment

รูปที่ 13 เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลง DO ในรอบวันที่ตำแหน่ง Treatment ทั้ง 2 ระดับ (DO1 และ DO2) จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่า DO1 สูงกว่าค่า

DO2 เกือบตลอดเวลาที่ทำการทดลอง อย่างไรก็ตามจากการเปรียบเทียบค่า DO ทั้ง 2 ระดับพบว่า ระบบสามารถเติมออกซิเจนที่ด้านล่างบ่อได้ โดยดูจากสัดส่วน

ของ DO2 เมื่อเทียบกับ DO1 (DO2/DO1) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.76 และหากค่านี้เข้าใกล้ 1 หมายความว่าระบบสามารถเติมออกซิเจนให้กับน้ำที่ชั้นล่างได้ร้อยละ 100 และในอีกทางหนึ่งหมายความว่า ระดับ DO ของน้ำชั้นล่างเข้าใกล้กับระดับ DO ของน้ำที่ผิวบ่อด้วย และสามารถกล่าวได้ว่า ระบบ SCWAS สามารถปรับปรุงค่า DO ภายในบ่อให้สูงขึ้นได้

4.3 ผลการประเมินทางเศรษฐศาสตร์

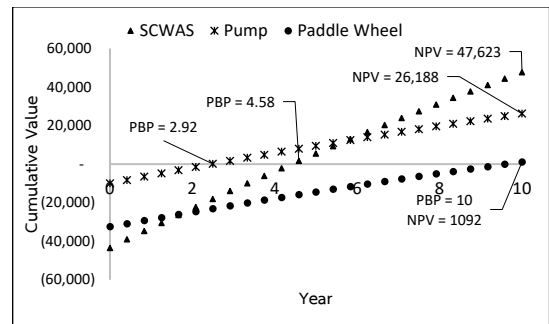
เพื่อการตัดสินใจเลือกใช้งานระบบ SCWAS ได้ทำการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และทำการเปรียบเทียบกับบ่อเพาะเลี้ยงที่ใช้ปั๊มลม (Pump) และกังหันตึน้ำ (Paddle Wheel) ร่วมด้วย โดยในการประเมินได้ใช้ 3 ตัวแปรประกอบการตัดสินใจ ได้แก่ NPV, PBP และ IRR ซึ่งผลที่ได้เป็นดังนี้

ตารางที่ 7 การประเมินมูลค่าแบบแยกรายการของอุปกรณ์เดิมอากาศทั้ง 3 ชนิด

รายการ		อุปกรณ์เดิมอากาศ		
		SCWAS	Pump	Paddle Wheel
Capital Cost	เงินลงทุนค่าอุปกรณ์	-43,500	-10,000	-32,500
	ค่าพันธุ์ปลา	-3,120	-3,120	-6,280
Flexibility Cost	ค่าอาหารปลา	-15,375	-15,375	-15,375
	ค่าไฟฟ้า	0	-2,524	-22,810
	ค่าบำรุงรักษา	-200	-200	-200
Income	รายได้จากการขาย	22,932	22,932	46,158
	ค่าซาก	181	42	135
Annual Cost	มูลค่าสุทธิในแต่ละรอบ	4,418	1,755	1,629

เพื่อประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน ได้นำเงินลงทุนค่าอุปกรณ์ (Capital Cost) และมูลค่าสุทธิในแต่ละรอบของการเพาะเลี้ยง (Annual Cost) ในตารางที่ 7

ไปคำนวณหา NPV และ PBP ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของอุปกรณ์เดิมอากาศทั้ง 3 ชนิด

รูปที่ 14 เป็นการแสดงจุดคุ้มทุน (PBP) และกำไรสุทธิเมื่อสิ้นสุดโครงการ (NPV) ของทั้ง 3 อุปกรณ์ จากรูปแสดงให้เห็นว่า หากในการเพาะเลี้ยงมีการใช้ Pump เป็นอุปกรณ์เดิมอากาศ จะคืนทุนเร็วที่สุดภายในเวลา 2.50 ปี รองลงมาคือระบบ SCWAS จะคืนทุนภายใน 4.58 ปี และสุดท้ายเป็น Paddle Wheel จะคืนทุนในปีที่ 10 และเมื่อพิจารณาที่ NPV จะพบว่า ระบบ SCWAS มีกำไรสุทธิเมื่อสิ้นสุดโครงการมากกว่า Pump และ Paddle Wheel และจากการคำนวณหาอัตราผลตอบแทนเฉลี่ยรายปี (IRR) ยังพบว่า IRR ของ SCWAS, Pump และ Paddle Wheel เป็นร้อยละ 21.17, 41.17 และ 3.68 ตามลำดับ และจากการคำนวณ IRR ข้างต้น ถึงแม้ว่า SCWAS ให้อัตราผลตอบแทนต่ำกว่าการใช้ Pump แต่ IRR ของระบบ SCWAS ยังสามารถเพิ่มขึ้นได้ หากเกษตรกรสร้างระบบขึ้นมาใช้เองเพื่อลดต้นทุนในการผลิต และใช้วัสดุที่มีในชุมชนเพื่อนำมาประกอบตามขนาดรูปทรงที่ได้จากงานวิจัย นอกจากการทำเช่นนี้จะช่วยเพิ่มค่า IRR ได้แล้ว ยังช่วยให้ระยะเวลาคืนทุนเร็วขึ้น เนื่องจากใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำลง นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มกำไรเมื่อสิ้นสุดโครงการได้อีกทางหนึ่งด้วย และสุดท้ายพบว่า

หากในบ่อเพาะเลี้ยงเลือกใช้งานระบบ SCWAS จะสามารถลดต้นทุนได้ถึงร้อยละ 17.49 เมื่อเทียบกับบ่อที่ใช้ Paddle Wheel

5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาระบบเติมอากาศแบบน้ำไหลเวียนพลังงานแสงอาทิตย์ (SCWAS) ที่ได้นำเสนอในบทความนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

- การหุ้มฉนวนบนแท่งนำความร้อนส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำในระบบ โดยฉนวนความร้อนที่มีความยาวมากขึ้นจะส่งผลให้อัตราการไหลเวียนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามระยะในการหุ้มฉนวนที่ดีไม่ควรยาวมากเกินไปจนเกินไปจนไม่มียะให้ความร้อนถ่ายเทออกมาได้

- อิทธิพลของการขยายรูปทรงในแนวราบส่งผลให้อัตราการไหลเวียนเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งขนาดที่ดีที่สุดที่แนะนำสำหรับ r: R: L ควรเป็น 1: 2: 3

- ผลจากการทดสอบระบุว่า ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่ชั้นล่างของบ่อมีค่าใกล้เคียงกับค่าออกซิเจนที่ผิวน้ำชั้นบน และจากการเปรียบเทียบค่าออกซิเจนที่ตำแหน่ง Treatment กับ Control ของทั้ง 2 ระดับ พบว่าที่ผิวน้ำชั้นบนออกซิเจนเพิ่มขึ้น 1.45 เท่า และน้ำชั้นล่างออกซิเจนเพิ่มขึ้น 1.40 เท่า

- จากการประเมินทางเศรษฐศาสตร์พบว่า ระบบ SCWAS สามารถคืนทุนได้ภายใน 4.58 ปี และมี NPV เท่ากับ 47,623 บาทตลอดระยะเวลาโครงการ และเมื่อเทียบกับ Paddle Wheel พบว่ามีงบลงทุนต่ำกว่าร้อยละ 17.49

- ระบบ SCWAS ที่ทำการศึกษานี้สามารถทำงานได้ในรัศมี 3 เมตร นั้นหมายความว่าระบบนี้เหมาะกับบ่อที่มีพื้นที่ 27 ตารางเมตร หรือหากบ่อของเกษตรกรมีขนาดใหญ่ควรตั้งทุก ๆ 27 ตารางเมตรเพื่อการทำงานที่ดีในการเติมออกซิเจนให้กับบ่อ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่มอบทุนกิตติบัณฑิต และขอบคุณทุนสนับสนุนการทำวิจัยจากโครงการ การพัฒนาระบบเติมอากาศและเครื่องให้อาหารปลาอัตโนมัติสำหรับสมาร์ตฟาร์มเมอร์ ในการทำการวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. D. Culberson and R. H. Piedrahita, "Aquaculture pond ecosystem model: temperature and dissolved oxygen prediction-mechanism and application," *Ecological modelling*, vol. 89, no. 1-3, pp. 231-258, Aug. 1996.
- [2] A. Kumar, S. Moulick and B. C. Mal, "Selection of aerators for intensive aquacultural pond," *Aquacultural engineering*, vol. 56, pp. 71-78, Sep. 2013.
- [3] L. T. Phan, T. M. Bui, T.T.T. Nguyen, G. J. Gooley and B. A. Ingram, "Current status of farming practices of striped catfish, *Pangasianodon hypophthalmus* in the Mekong Delta, Vietnam," *Aquaculture*, vol. 296, no. 3-4, pp. 227-236, Nov. 2009.
- [4] J. Southard, (2006). Dissolved Oxygen and Water Column Stratification. [Online]. Available: [http:// www.fondriest.com](http://www.fondriest.com)
- [5] A. Ali, "Oxygen regime and productivity in fish ponds," M.S. thesis, Dept. Tech. (Aquaculture), African Regional Aquaculture Centre/Rivers State University of Science and Technology, Port Harcourt, 1986.

- [6] F. Struckmann, "Analysis of a flat-plate solar collector," Heat and Mass Transport, Project Report, 2008MVK160. (2008).
- [7] A. Mahmoud, T. N. Quang and E Pavlov, "Development of a solar updraft aeration system for pond aquaculture in resource-constrained environments," in *Proceeding of 2015 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, Seattle, WA, USA, IEEE, 2015, pp. 306-313.
- [8] T. Chenvidyakarn and A. Woods, "Multiple steady states in stack ventilation," *Building and Environment*, vol. 40, pp. 399-410, 2005.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การออกแบบรูปแบบล้อรันแฟลทที่เหมาะสมสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกประเภท ขนาดเล็กติดเการะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นุชนาถ ทองใหญ่ และ ประกอบ ชาติภักต์*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 6 เมษายน 2565 แก้ไขบทความ 19 พฤษภาคม 2565. ตอรับบทความ 20 พฤษภาคม 2565

บทคัดย่อ

ล้อรันแฟลทสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดเการะ ได้รับการพัฒนาขึ้นใหม่จากวัสดุเดิมที่เป็นโลหะ เปลี่ยนเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีสารตั้งต้นสำคัญเป็นวัสดุกลุ่มโพลิเมอร์และเพิ่มผงวัสดุลูมิเนียมออกไซด์เพื่อให้เกิดความแข็งแรงและสามารถต้านทานการสึกหรอได้สูงขึ้น โดยใช้กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย ออกแบบและวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks Simulation เปรียบเทียบผลที่วิเคราะห์ได้กับการทดลอง การออกแบบและการวิเคราะห์ต้องพิจารณาตัวแปรหลายตัว ประกอบด้วย 1) ความหนาที่เหมาะสมของล้อรันแฟลท ทั้งในส่วนที่ติดกับกระทะล้อและส่วนที่จะต้องสัมผัสกับพื้นผิวยางด้านใน 2) รัศมีภายในและภายนอก ซึ่งรัศมีภายในขึ้นอยู่กับขนาดของกระทะล้อ และรัศมีภายนอกเป็นตัวแปรที่กำหนดค่าความสูงของล้อรันแฟลท 3) การออกแบบรูปทรงเพื่อป้องกันล้อรันแฟลทกินผิวยางภายใน และรูปทรงของวงล้อรันแฟลทในส่วนที่ต้องสัมผัสกับกระทะล้อ ซึ่งกระทะล้อไม่เรียบมีพื้นที่ที่เอียง ยากต่อการจับยึด 4) การออกแบบชุดอุปกรณ์การล็อคให้สามารถตรึงล้อรันแฟลทเข้ากับกระทะล้อได้อย่างแน่นหนา 5) วัสดุที่ใช้ในการสร้างล้อรันแฟลท และ 6) ความดันลมยาง ล้อรันแฟลทได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นในรูปแบบแยกส่วนจำนวน 3 ชิ้นส่วน เพื่อความสะดวกในการประกอบเข้ากับกระทะล้อ โดยต้องมีรูปแบบที่สามารถเข้าได้กับลักษณะของกระทะล้อรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดเการะ มีความสะดวกในการประกอบเข้ากับกระทะล้อ การประกอบต้องแนบสนิท ไม่หลวมคลอน ไม่เสียรูปเมื่อได้รับแรงกระแทก อุปกรณ์การจับยึดล้อรันแฟลทได้รับการออกแบบใหม่ให้สามารถล็อคชิ้นส่วนล้อรันแฟลททั้ง 3 ชิ้นเข้าด้วยกัน ด้านทานแรงกระแทกจากน้ำหนักรถที่วิ่งด้วยความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

คำสำคัญ : ล้อรันแฟลท; การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์; รถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดเการะ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 8279 5855, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: prakorb.c@rmutp.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

A Pattern Design for Run Flat Wheel Suitable for Small Regular Armored Truck Using Finite Element Method

Nutchanat Tongyai and Prakorb Chartpuk*

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

1381 Pracharat 1 Road, Wongsawang Sub-district, Bang Sue District, Bangkok, 10800 Thailand

Received 6 April 2022; Revised 19 May 2022; Accepted 20 May 2022

Abstract

Run flat wheels for small armored regular trucks have been re-developed by transformation from the original metallic material to compound materials, polymer group materials as important raw materials, then added with aluminum oxide powder to achieve higher strength and wear resistance. The research was performed by using reverse engineering processes including designing, and analysis with finite element methodology with the SolidWorks Simulation program and comparing the analyzed results with outcome experiments. Several variables used for the design and analysis were 1) the optimal width of the run flat wheel at the parts both attached to the wheel pan and contacted with the inner rubber surface 2) internal and external radiuses. The internal radius is depending on the size of the wheel pan and the external radius is a variable that determines the height of the Run flat wheel. 3) the shape designed to prevent wearing of the inner tire surface of the run flat wheel and the shape of the run flat reel in the part contacted with the wheel pan. This wheel pan part is such uneven inclined area which is difficult to hold. 4) a design locking kit for tightly fastening the run flat reels to the wheel pan 5) the material used to create the run flat wheel and 6) tire pressure. The run-flat wheels were then designed and constructed in a modular form of 3 parts for ease of the wheel pan assembly. In designing pattern, the assembling run flat reels had to be fit into the characteristics of a small armored regular truck wheel pan, convenient to assemble with a wheel pan, and tightly attached without looseness or deformation when impacted. The run flat reel gripping device has been redesigned to lock all three run flat parts together. It brought up the impact resistance from body weight was at 50 km/hr.

Keywords : Run Flat Wheel; Finite Element Analysis; Small Armored Regular Trucks

* Corresponding Author. Tel.: +669 8279 5855, E-mail Address: prakorb.c@rmutp.ac.th

1. บทนำ

ยางรันแฟลท (Run Flat Tires, RFT) คือ ยางรถยนต์ที่จะทำให้รถยนต์สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้แม้ว่ายางจะแบนด้วยการถูกเจาะหรือไม่มีลมยางด้วยเหตุผลต่างๆ ยางรันแฟลทได้ถูกนำเสนอขึ้นในช่วงกลางทศวรรษ 1980 หลังจากนั้นก็จะได้รับความนิยมมากขึ้นและผู้ผลิตรถยนต์ในบางยี่ห้อก็ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับรถยนต์ใหม่ เช่น ยางรันแฟลทของ Bridgestone ถึงแม้ว่าจะไม่มีลมยางก็จะสามารถวิ่งได้เป็นระยะทางถึง 80 กิโลเมตร ด้วยความเร็วไม่เกิน 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

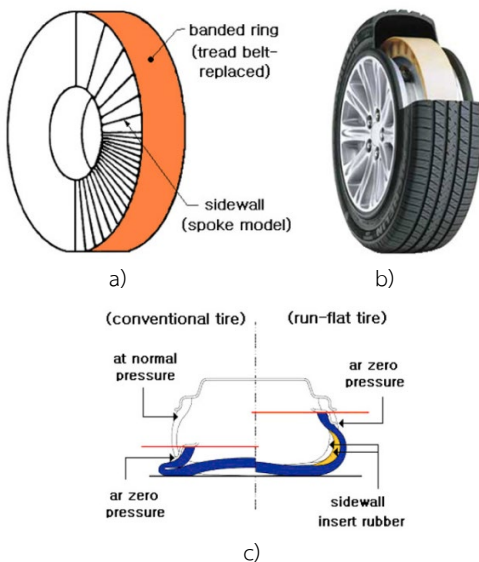
TAC Composite Run Flat (หรือเรียกว่า TAC CRF Run Flat) เป็นอุปกรณ์เสริมโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักเบาออกแบบมาเพื่อให้สามารถขับยานหุ้มเกราะที่มีน้ำหนักสูงต่อไปได้ CRF Run Flat ประกอบด้วยสองหรือสามส่วนล้อมรอบกระโหลก และมีชุดล้อ CRF Run flat เข้าด้วยกัน วัสดุผสมสูตรพิเศษซึ่งเป็นความลับทางการค้าอย่างหนึ่ง ให้ผลที่ดีในการลดแรงเสียดทานและความร้อนสะสมภายในขณะยางแบน ใช้วัสดุที่สามารถทนต่อการโจมตีทั้งอาวุธปืนและตะปูเรือใบ [1] จากการนำเสนอของ Dieter Kuerten [2] กล่าวถึงร้อยละ 30 ของความเสียหายจะเกิดขึ้นกับล้อของรถหุ้มเกราะ เช่น การเจาะยาง การวิจัยจึงถูกดำเนินการในการประเมินความเสียหายในสนามรบ การซ่อมแซมยางแบนและการเปลี่ยนล้ออย่างรวดเร็ว แต่ทางออกที่ดีที่สุดในช่วงเวลาปัจจุบันคือการใช้ยางรันแฟลท ซึ่งจะช่วยให้รถสามารถขับเคลื่อนต่อไปได้ แม้ว่ายางได้รับการเจาะอย่างหนัก ล้อรันแฟลทมีสองระบบคือ Vorwerk NLR และ Michelin ACM ได้ใส่ห่วงเหล็กลงในล้อและได้รับการทดสอบโดยกองทัพเยอรมัน และในการทดลองเดียวกันนี้ได้ผ่านการทดสอบที่กองทัพสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นล้อที่เติมโพมยางลงไป Dieter Kuerten [2] ยังได้นำเสนอระบบ NLR เป็นล้อรันแฟลทที่ใส่ลงในยางเรเดียลในขณะที่ยังไม่แบน ล้อรันแฟลททำมาจากยางที่แข็ง ภายใต้สมมติฐานที่เป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกันทั้งชิ้น

(Homogeneous) และใส่ห่วงเหล็กลงใน ล้อรันแฟลท จากนั้นติดตั้งลงในยางแบบเรเดียล การติดตั้งไม่ได้ส่งผลกระทบต่อถนนปกติหรือการขับรถ หากมีการเจาะยางในทางใดทางหนึ่ง รถยังคงสามารถขับเคลื่อนต่อไปได้โดยไม่ต้องหยุด หากล้อยางหนึ่งวงหรือมากกว่านั้นแบนอย่างสมบูรณ์ รถจะยังสามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้ด้วยความเร็วต่ำเพื่อออกจากเขตอันตราย แล้วดำเนินการขับต่อที่ความเร็วปานกลาง ซึ่งจะได้ระยะทางมากขึ้น และขับจนกว่าจะถึงจุดที่สามารถทำการซ่อมแซมได้ ข้อดีของการใช้ NLR Run flat คือน้ำหนักเบา, วงล้อแบนสมดุลและติดตั้งง่าย เมื่อยางถูกเจาะ รูปร่างของล้อวงแหวนจะยังคงใช้งานต่อไปได้ และยังคงไว้ซึ่งความนุ่มนวลประสิทธิภาพของระบบเบรกจะไม่ได้รับผลกระทบ

J. Stearns [3] ได้ทำการศึกษาตัวแปรของความดันและความเค้นในล้อ ดำเนินการที่ University of Akron โดยใช้ซอฟต์แวร์ ALGOR FEA เพื่อตรวจสอบความเสียหายของล้อเมื่อแรงดันลมยางต่ำ โดยสร้างโมเดลล้อที่ทำจากอลูมิเนียมใน Pro/ENGINEER ให้กับ Goodyear และถ่ายโอนโมเดลเข้าสู่โปรแกรม ALGOR ด้วยเทคโนโลยี InCAD Algor ผ่านไฟล์ IGES เลือกชนิดเอลิเมนต์เป็นเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) จำนวน 35,000 เอลิเมนต์ น้ำหนักของรถกระทำลงบนยางสองวงเท่ากับ 1,000 lb ซึ่งเป็นภาระสูงสุด น้ำหนักนี้ถูกนำไปใช้เป็นการดันโหลดลงบนส่วนด้านล่างของล้อ ที่มีการกระจายแรงในรูปแบบพาราโบลา ผลคือ ล้อรันแฟลทสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีแรงดันลมยางอย่างน้อย 80 กิโลเมตร (50 ไมล์) และสูงสุด 150 กิโลเมตร (93 ไมล์) ที่ 80 กิโลเมตร/ชั่วโมง (50 ไมล์ต่อชั่วโมง) (กรณีรถยนต์ส่วนบุคคลธรรมดา) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของรถที่ติดตั้งแก้มยางเสริมด้วยยางที่ออกแบบพิเศษสามารถต้านทานความร้อนและความเครียดเมื่อไม่มีแรงดันลมยาง

นอกจากนี้ J. R. Cho และคณะ [4] ได้ทำการออกแบบยางรันแฟลทที่ใช้ยางอยู่ด้านในที่เหมาะสม

กล่าวว่า เมื่อความดันภายในยางลดลงหรือแม้จนถึงศูนย์ จะทำให้ตัวล้อยางทรุดตัวลงมาและแก้มยางจะเกิดความเสียหาย เนื่องจากน้ำหนักของรถที่ส่งผ่านมายังกระทะล้อจะกดลงไปบนแก้มยางที่มีพื้นถนนรองรับ ความคิดพื้นฐานของล้อรันแฟลท คือการปกป้องผนังยางหรือแก้มยางจากการถูกกดให้แบน แม้ในขณะที่ระดับความดันภายในจะกลายเป็นศูนย์ โดยทั่วไปการประเมินผลการใช้งานของล้อรันแฟลทจะประเมินด้วยความเร็วในการขับที่สูงสุด ระยะทาง ความสะดวกสบายในการขับ และความทนทาน [4]



รูปที่ 1 ล้อรันแฟลทที่นำเสนอโดย J. R. Cho, a) banded type b) support ring type และ c) sidewall reinforcement type [4]

จากรูปที่ 1 a) แสดงให้เห็นรูปแบบของยางรันแฟลทที่ประกอบด้วย Sidewall และวงล้อ Banded Ring ภายในจะเสริมความแข็งแรงด้วยวงแหวนโลหะแล้วนำใส่เข้ากับล้อดังรูปที่ 1 b) รูปแบบแบบนี้มีความสามารถในการทำงานมากกว่า 160 กิโลเมตร ผลกระทบหลักคือการขาดของความทนทานในระยะยาวและไม่ปลอดภัยกับกระแทกแบบไดนามิก ยางรันแฟลทแสดงในรูปที่ 1 c) จะเป็นแบบที่มีการเสริมเนื้อยางแข็ง

เข้าไปที่แก้มยางด้านใน ข้อได้เปรียบที่โดดเด่นที่สุดของประเภทนี้คือการเปลี่ยนแปลงของลมยางมาตรฐานคือไม่มีผลกระทบหากลมยางลดลงบ้าง แต่ความนุ่มนวลในการขับซึ่งอาจจะลดลง และไม่เหมาะสมในกรณีที่ได้รับกระแทกสูง ๆ [4], [5]

จากรายงานวิจัยเรื่อง การวิจัยและพัฒนา รถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดเกาะ โดยกรมการขนส่งทางบก กองทัพบก ร่วมกับภาคเอกชน ได้ทำการสร้าง Run flat สำหรับล้อทั้ง 4 ล้อ ด้วยวงล้อเหล็กที่ออกแบบเป็นพิเศษ เพื่อให้เข้ากับล้ออูมิเนียมอัลลอยด์ ซึ่งเป็นล้อรถที่มาจากโรงงานผู้ผลิตโดยตรง เริ่มต้นจากการตัดแผ่นเหล็กและนำมาเชื่อมประกอบเข้าด้วยกันตามแบบที่ออกแบบไว้ ทำการตัดโค้งด้วยเครื่องอัดเพื่อให้ได้ Run flat ที่มีรัศมีคงที่ จากนั้นทำการกัดพื้นผิวด้านในและด้านนอกของวงล้อ Run flat ด้วยเครื่อง CNC เพื่อให้มีรัศมีคงที่ทั้งด้านในและด้านนอก และนำมาประกอบเข้ากับกระทะล้อรันแฟลทหนึ่งวงมีน้ำหนักโดยประมาณ 11.36 กิโลกรัม

จากบทความวิจัยโดย N. Chalo and P. Chartpuk [6] นั้นได้มีการนำเสนอสูตรส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบสองชนิด คือ ผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) กับผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot Compression Molding Process) เพื่อใช้เป็นวัสดุเชิงประกอบในการผลิตวงล้อรันแฟลท ที่ให้สมบัติทางกลที่ดีและสมบัติความต้านทานการสึกหรอสูง สภาวะที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูปอยู่ภายใต้ความดัน 100 บาร์ และอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส จากการวิจัยได้เลือกใช้เกรดของ Al_2O_3 เป็น Al_2O_3 HTM 30 มีขนาดอนุภาคผงไม่สม่ำเสมอเคล้ากันไปอยู่ในช่วง 2 ถึง 5 μm และปริมาณการผสม Al_2O_3 ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกล และสมบัติในการต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE Composite คือ UHMWPE+ Al_2O_3 HTM 30 ที่อัตราส่วนร้อยละ

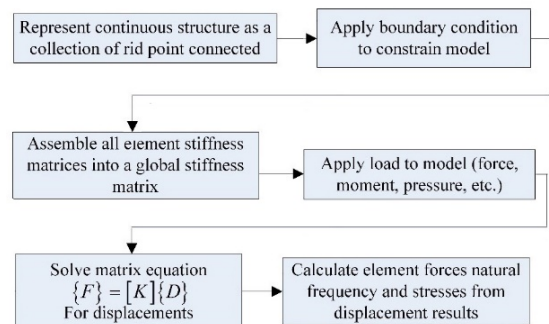
95:5 โดยพิจารณาทั้งในด้านสมบัติของวัสดุและต้นทุน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของวงล้อรันแพลทด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม SolidWorks Simulation เพื่อให้ได้รูปแบบวงล้อรันแพลทที่เหมาะสมสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะที่กรมการขนส่งทหารบก กองทัพบก ได้วิจัยไว้ร่วมกับภาคเอกชนดังกล่าว

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัยจะใช้กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering) เป็นกระบวนการพัฒนาและสร้างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลขึ้นมาใหม่ให้มีประสิทธิภาพด้านการใช้งานที่ดีกว่าเดิม หรือเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนเดิม โดยปกติจะเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ชิ้นส่วนเครื่องมือ อุปกรณ์ หรือตัวผลิตภัณฑ์ก็ได้ จัดได้ว่าเป็นกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ และชิ้นส่วนเดิมที่มีอยู่โดยใช้หลักการออกแบบทางวิศวกรรม ที่ได้รับความนิยมของนักวิศวกรการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์หาความแข็งแรงของล้อรันแพลท แสดงการกระจายของความเค้นและความเครียด และการเสียรูป มีกระบวนการวิเคราะห์ดังรูปที่ 2 [7], [8] โดยกำหนดสมบัติของวัสดุเป็น UHMWPE+Al₂O₃ ที่อ้างอิงจากบทความวิจัยของ N. Chalo and P. Chartpuk [6] กระบวนการวิเคราะห์ที่ตั้งอยู่บนสมมติฐาน คือ เป็นวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Material) มีการกระจายตัวของอนุภาค Al₂O₃ ทั่วทั้งปริมาตรของชิ้นทดสอบ มีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทุกทาง (Isotropic Materials) และการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดรวมทั้งการเสียรูปอยู่ในช่วงขีดจำกัดยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Region)

ในกระบวนการวิจัยประกอบด้วย 2 วิธี คือ 1. การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ และ 2. การทดลอง โดยเปรียบเทียบผลของทั้งสองวิธีด้วยค่าความเค้นใน

ตำแหน่งเดียวกันที่เกิดขึ้นบนล้อรันแพลท ภายใต้แรงกระทำภายนอกที่หยุดนิ่ง (Static Loading) สำหรับการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มจากการสร้างโมเดล 3 มิติด้วยโปรแกรม SolidWorks ที่มีขนาด และรูปร่างเป็นไปตามรูปแบบล้อรันแพลทสำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะที่ออกแบบและสร้างไว้โดยกรมการขนส่งทหารบก กองทัพบก และนำเข้าสู่โปรแกรม SolidWorks Simulation เพื่อวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ และบันทึกค่าความเครียด จากนั้นทำการทดลองโดยใช้เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุนของยางล้อและอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล Data Logger ผ่านอุปกรณ์สแตนด์บาย โดยเก็บค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในกระทะล้อและวงล้อรันแพลท และทำการเปรียบเทียบค่าความเครียดระหว่างวิธีการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทดสอบขีดจำกัดและความสามารถของโปรแกรมว่าสามารถวิเคราะห์และจำลองสภาพของโจทย์ปัญหานี้ได้



รูปที่ 2 กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [7], [8]

2.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังตารางที่ 1 โดยวัสดุ Aluminum Alloy ใช้กำหนดให้กับกระทะล้อ วัสดุ AISI 1020 ใช้กำหนดให้กับล้อรันแพลทโลหะ (ล้อรันแพลทแบบเดิม) และวัสดุ UHMWPE Composite [6] ใช้กำหนดวัสดุให้กับล้อรันแพลทแบบใหม่ของงานวิจัยนี้

2. เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุนของยางล้อ

3. KYOWA Data Logger รุ่น EDX-200A และ DCS-100A Program และ Strain Gages

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Properties	Aluminum alloy	AISI 1020	UHMWPE Composite [6]
Elastic Modulus, MPa	69x10 ³	200x10 ³	784.46
Poisson's Ratio	0.303	0.29	0.30
Shear Modulus, GPa	26	77	-
Mass Density, kg/m ³	2,700	7,900	1,246.46
Tensile Strength, MPa	310	420	29.96
Yield Strength, MPa	275	351	20.52

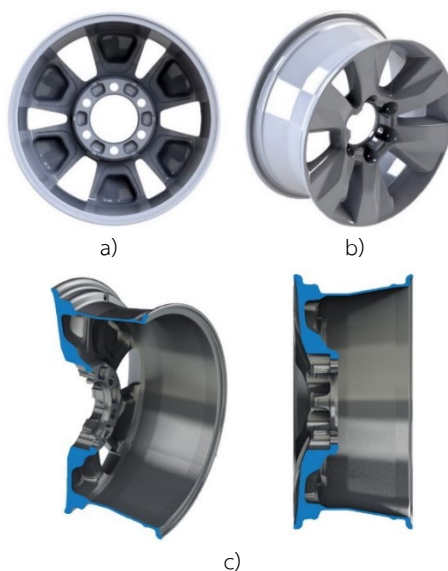
2.2 กระบวนการเตรียมโมเดล 3 มิติ และการออกแบบล้อรีนแฟลท

การทำวิศวกรรมย้อนรอยต้องอาศัยข้อมูลทางเทคนิคและอื่นๆ ของชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์เดิมนำมาขึ้นรูปใหม่ให้เป็นโมเดล 3 มิติ ด้วยเครื่องสแกน 3 มิติ ตรวจสอบและตกแต่งผิวโมเดล และทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อตรวจสอบขีดความสามารถในการใช้งานได้ของชิ้นส่วนนั้น ๆ และทำการออกแบบโมเดลใหม่ โดยอาศัยข้อมูลเดิมพัฒนาต่อยอด และทำการจำลอง ทดสอบการใช้งานภายใต้ตัวแปรต่าง ๆ จนกระทั่งได้โมเดลที่ดีที่สุดตามต้องการ ดังนั้น การทำวิศวกรรมย้อนรอยอย่างเต็มรูปแบบจึงเกี่ยวข้องกับการสืบค้นหาข้อมูลทางเทคนิค การย้อนรอยขนาดและรูปร่างของต้นแบบ วัสดุและกรรมวิธีการผลิตชิ้นส่วนแต่ละชิ้น การประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เป็นอุปกรณ์หรือระบบ รวมทั้งการตรวจสอบสมบัติ และพัฒนาสมรรถนะทั้งในระหว่างการผลิตและระหว่างการใช้งาน การเตรียมโมเดลสำหรับการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการนำกระทะล้อไปสแกนด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ FARO Messurement FARO

P06-05 ดังรูปที่ 3 เพื่อให้ได้โมเดลสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์และออกแบบล้อรีนแฟลทโดยใช้โปรแกรมออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลด้วย SolidWorks จากนั้นทำการสร้างพื้นผิวโมเดลด้วยคำสั่ง Surface และแปลงเป็น Solid Model และดำเนินการแก้ไขพื้นผิวของกระทะล้อ เนื่องด้วยการสแกนนั้นจะไม่ได้พื้นผิวโค้งที่เรียบอย่างแท้จริง จนได้รูปแบบโมเดล 3 มิติ ดังรูปที่ 4 จากนั้นจึงนำไปจำลองความแข็งแรงและหาค่าความเค้นและความเครียดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม SolidWorks Simulation



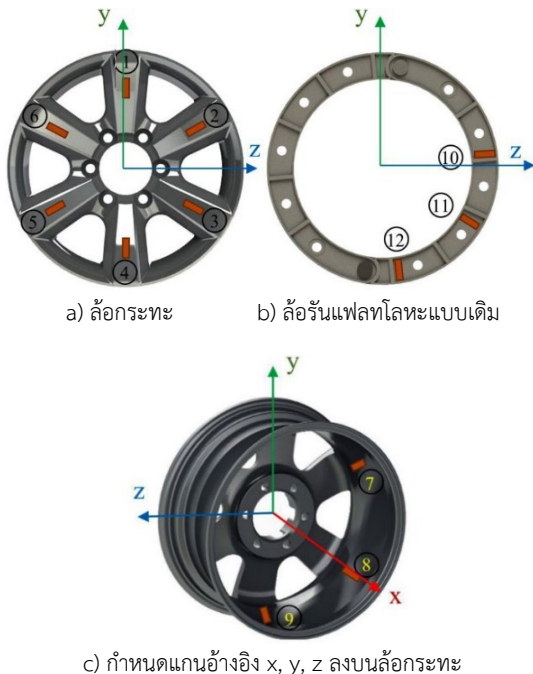
รูปที่ 3 การสแกนกระทะล้อด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ FARO Measurement FARO P06-05



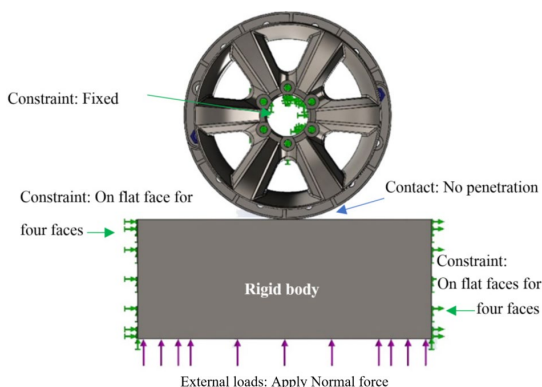
รูปที่ 4 โมเดล 3 มิติ a) มุมมองด้านหลัง b) มุมมองไอโซเมตริก และ c) มุมมองภาคตัดขวาง

2.3 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการสร้างกระทะล้อและล้อรันแฟลทขึ้นมาด้วยโปรแกรม SolidWorks ที่มีลักษณะในมุมมองต่าง ๆ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 5 ส่วนประกอบชุดล้อรันแฟลท และตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจลงบนกระทะล้อและล้อรันแฟลท



รูปที่ 6 กระบวนการ Pre-Processing สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากโมเดล 3 มิติของแต่ละชิ้นส่วนและนำมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นชิ้นงานประกอบ (Assembly)

จากนั้นได้นำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการวิเคราะห์และจำลองสภาพการเสียรูปกระบวนการวิเคราะห์จะถูกต้องได้นั้นต้องระมัดระวังในขั้นตอนการ Pre-Processing โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกำหนดค่าคู่สัมผัส (Contact) และการควบคุมขนาดเอลิเมนต์ (Mesh Control) ดังรูปที่ 6 ด้วยเอลิเมนต์ชนิด 10 Nodes Tetrahedral ที่มีขนาดเฉลี่ย 15 มิลลิเมตร จำนวน 170,328 เอลิเมนต์ 261,846 โหนด ทำการกำหนดการจับยึด (Fixtures) ด้วย Fixed ลงไปที่ดุมล้อกระทะ และใส่แรงกระทำด้วยแรงกด (Normal Force) สำหรับกระบวนการ Solve-Processing จะต้องทำการจำลองและปรับค่าตัวแปรในการวิเคราะห์จนกระทั่งได้รูปแบบที่เหมาะสม จากนั้นจึงทำการอ่านค่าความเครียดที่เกิดขึ้น โดยต้องปรับเปลี่ยนการแสดงผลออกมาในแนวแกน x, y และ z (ดูรูปที่ 5 ทิศทางของแกน x, y และ z) เนื่องด้วยทิศทางและตำแหน่งที่ติดตั้งสเตรนเกจในการทดลองจะต้องตรงกันกับทิศทางของค่าความเครียดที่วิเคราะห์ได้



รูปที่ 7 การติดตั้งสเตรนเกจเข้ากับกระทะล้อและล้อรันแฟลท

2.4 การเตรียมการทดลอง

ในการทดลองจะเริ่มต้นจากการนำกระทะล้อมาทำความสะอาดและติดตั้งสเตรนเกจ KFG-5-120-C1-11L3M2R ลงไปที่กระทะล้อ และที่ล้อรันแฟลท ดังรูปที่ 7 มีจำนวนตำแหน่งที่ติดตั้งสเตรนเกจทั้งหมด 12 จุด

แต่จากการทดสอบจะใช้เพียง 7 จุดเท่านั้น เพื่อให้การอ่านค่าสามารถอ่านได้อย่างถูกต้องที่สุด โดยพิจารณาจากทิศทางของแกนอ้างอิง x, y, z ทำการติดตั้งดุมล้อเข้ากับล้อรันแฟลท จากนั้นนำไปติดตั้งลงบนแท่นเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุนของยางล้อรูปที่ 8 ซึ่งมีรูปแบบการทดสอบเช่นเดียวกับ Ch. Dechwayukul และคณะ [9] ที่สามารถดันชุดล้อเข้าไปสัมผัสกับวงล้อหมุนขนาดใหญ่ที่เปรียบเสมือนถนน และสามารถตั้งค่าแรงกดที่เป็นแรงมาจากระบบไฮดรอลิค



รูปที่ 8 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบเข้ากับล้อรันแฟลทและกระทะล้อ

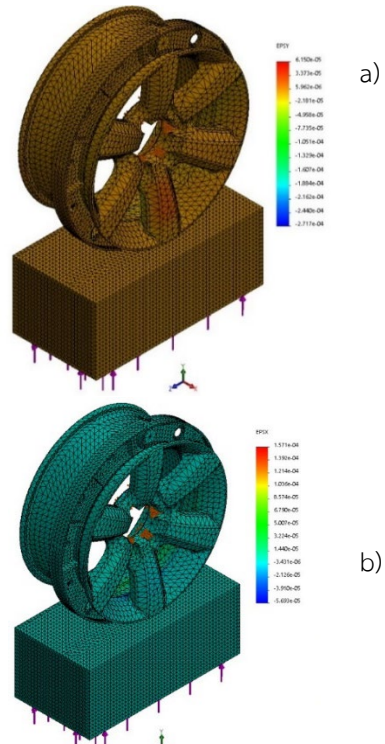
จากนั้นติดตั้งสายสัญญาณเข้ากับเครื่องอ่านและบันทึกค่าความเครียดด้วย KYOWA EDX-200A ที่ผ่านการสอบเทียบมาก่อนแล้ว ในการทดลองได้กระทำด้วยแรงกดภายนอกจำนวน 2 ค่า คือ แรงกด 4,905 และ 7,848 N จากนั้นทำการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่อการอ่านค่า และเริ่มต้นปรับค่าความเครียดให้เป็นศูนย์ (Set Zero) แล้วจึงเริ่มการอ่านค่าความเครียด และบันทึกผล

3. ผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบ

3.1 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ความเครียดแสดงดังรูปที่ 9 ที่แสดงทั้งค่าความเค้น ความเครียด และการเสียรูปสำหรับผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) และผลการ

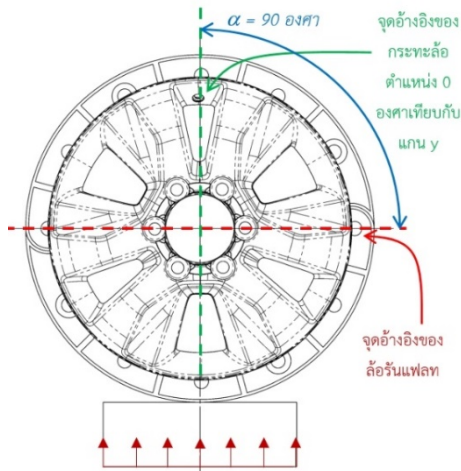
ทดลอง (Experimental) แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าความแตกต่างของทั้งสองวิธี มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10-16 เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและค่าความชื้นในห้องทดสอบ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความไวและความถูกต้องของความเครียด



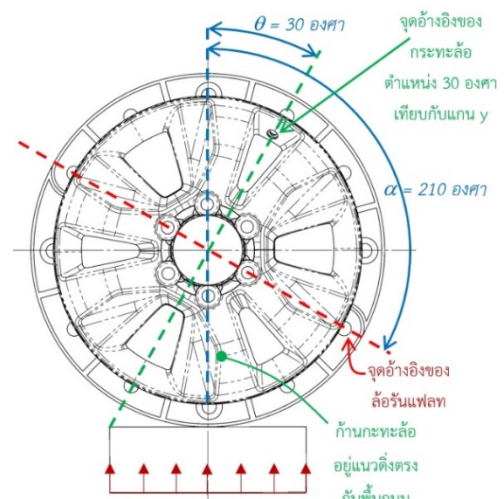
รูปที่ 9 ตัวอย่างการแสดงผลของ a) ความเค้นและ b) ความเครียดในแนวแกน x และ y

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าความเครียดในแนวแกนระหว่างวิธีการทดลองกับไฟไนต์เอลิเมนต์

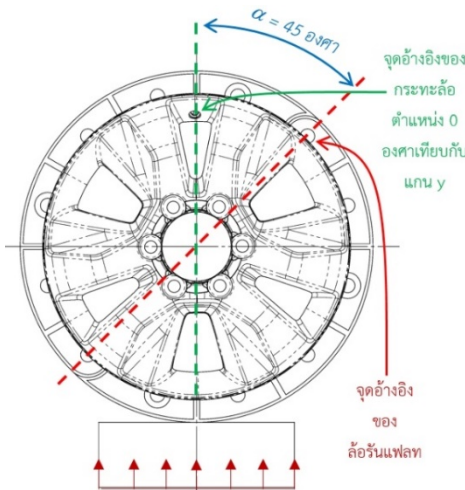
point No.	Strain (x10 ⁻⁶)				% Diff.		Remark
	Exp. result		FEA result				
	F=500 kg	F=800 kg	F=500 kg	F=800 kg	F=500 kg	F=800 kg	
1	0.57	0.91	0.50	0.80	11.88	11.67	y direction
4	22	35.73	18.83	30.12	14.41	15.70	y direction
7	0.38	0.93	32	0.83	15.69	10.66	x direction
8	-1.98	2.46	-1.66	-2.14	16.31	12.99	x direction
9	-1.80	2.86	-1.51	-2.41	16.39	15.65	x direction
10	0.30	41	27	-0.35	11.37	13.95	z direction
12	-4.99	-93	-4.44	-0.80	11.03	14.03	y direction



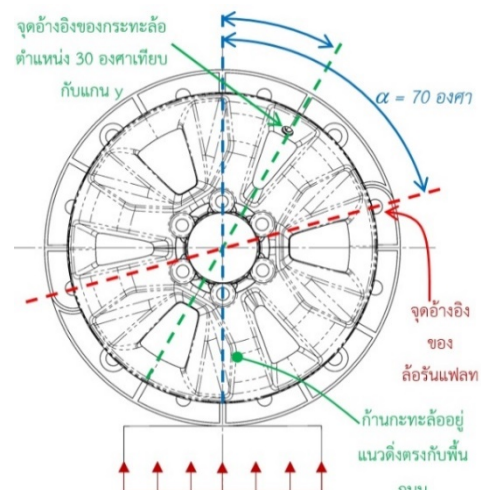
รูปที่ 10 การศึกษาความเค้นที่ล้อรับแพลตฟอร์มในกรณี ที่ 1



รูปที่ 12 การศึกษาความเค้นที่ล้อรับแพลตฟอร์มในกรณี ที่ 3



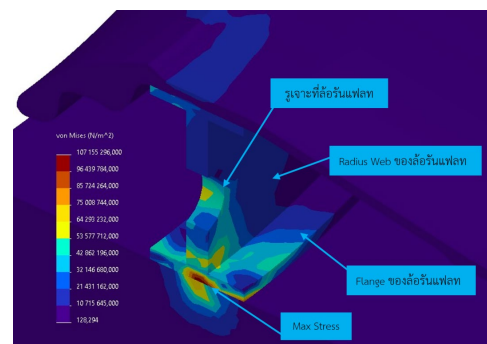
รูปที่ 11 การศึกษาความเค้นที่ล้อรับแพลตฟอร์มในกรณี ที่ 2



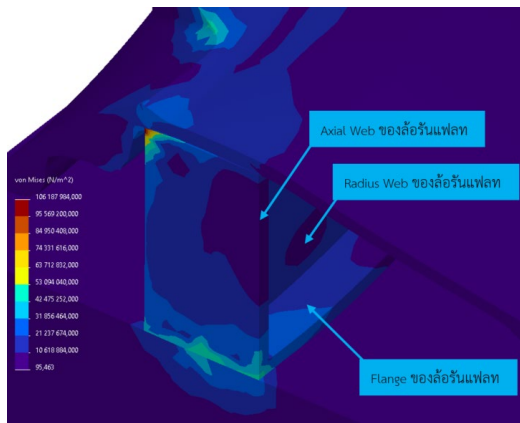
รูปที่ 13 การศึกษาความเค้นที่ล้อรับแพลตฟอร์มในกรณี ที่ 4

3.2 ผลการตรวจสอบความเค้นในตำแหน่งต่างๆ ของล้อรับแพลตฟอร์มแบบเดิม (ล้อโลหะ)

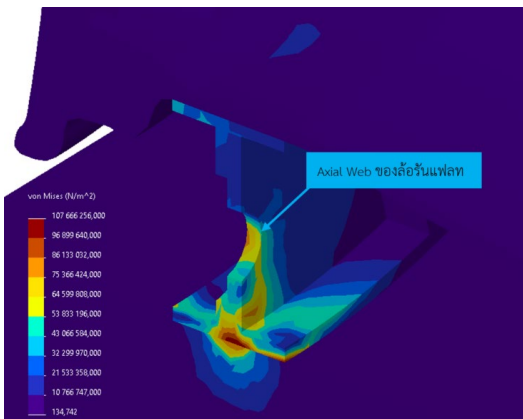
จากการดำเนินการเปรียบเทียบผลการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีค่าความแตกต่างร้อยละ 10-16 จึงได้ดำเนินการตรวจสอบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับล้อรับแพลตฟอร์มเดิมที่เป็นล้อโลหะ AISI 1020 พบว่ามี 4 กรณีที่ได้รับการพิจารณาด้วยการบิดมุดติดตั้งของวงล้อรับแพลตฟอร์มและกระทะล้อในมุมบิดต่างๆ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 10-13



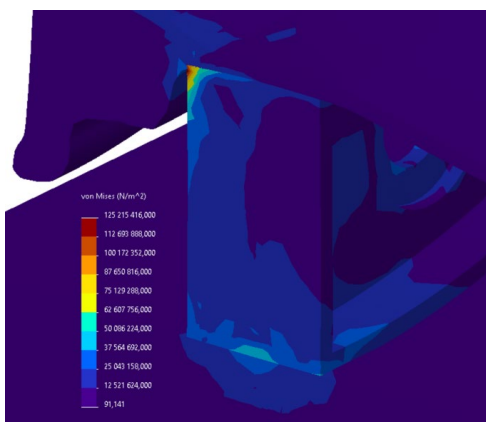
รูปที่ 14 การกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณล้อรับแพลตฟอร์มสำหรับกรณี ที่ 1 ด้วยแรงกด 10,000 N



รูปที่ 15 การกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณ ล้อนรับแฟลทสำหรับกรณีที่ 2 ด้วยแรงกด 10,000 N



รูปที่ 16 การกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณ ล้อนรับแฟลทสำหรับกรณีที่ 3 ด้วยแรงกด 10,000 N



รูปที่ 17 การกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณ ล้อนรับแฟลทสำหรับกรณีที่ 1 ด้วยแรงกด 10,000 N

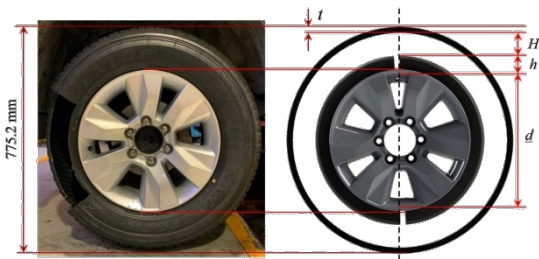
จากการวิเคราะห์ผลดังรูปที่ 14-17 โดยอ้างอิงมุมการติดตั้งล้อนรับแฟลทและกระทะล้อนเข้าด้วยกันและอ้างอิงตำแหน่งพื้นผิวที่สัมผัสกับถนน (กำหนดให้ฐานเป็นวัตถุแข็งเกร็ง) พบว่า เกิดการกระจายความเค้นในล้อนรับแฟลท ณ ตำแหน่งที่ล้อนรับแฟลทสัมผัสกับถนนและความเค้นที่เกิดขึ้นไม่เกินความเค้นที่จุดคราก แต่ล้อนรับแฟลทโลหะนี้ยังต้องได้รับการพัฒนาไปสู่ล้อนรับแฟลทด้วยวัสดุใหม่ โดยใช้วัสดุ UHMWPE Composite [6] ที่ต้องออกแบบด้วยการลดความสูงของหน้าตัดรับแฟลทใหม่และเพิ่มความหนาของรับแฟลท ให้ความเค้นที่เกิดขึ้นกระจายตัวได้มาก และความเค้นจะลดลงมากกว่าที่แสดงในรูปที่ 14-17 และความเค้นสูงสุดที่ล้อนรับแฟลทแบบเดิมแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความเค้นสูงสุดที่ล้อนรับแฟลทแบบเดิม

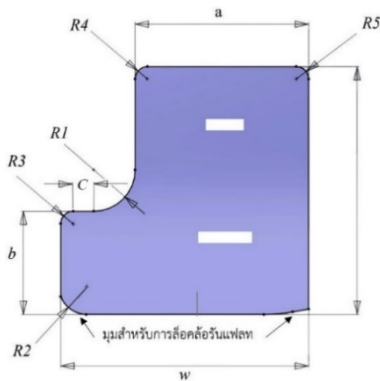
กรณี	ความเค้นสูงสุด (Max.Von-Mises, MPa) เทียบกับแรงกระทำ					
	$\frac{F}{A}$	$\frac{F}{A}$	$\frac{F}{A}$	$\frac{F}{A}$	$\frac{F}{A}$	$\frac{F}{A}$
1	53.5	64.3	75.0	85.7	96.2	107.1
2	53.1	63.7	74.3	84.95	95.6	106.2
3	53.8	64.6	75.3	86.1	96.9	107.6
4	62.6	75.2	87.6	100.2	112.7	125.2

3.3 ผลการออกแบบวงล้อนรับแฟลทใหม่

จากรูปที่ 18 เป็นรูปที่แสดงมิติสำคัญต่างๆ โดยเฉพาะตัวแปรช่องว่าง (H) ที่เป็นระยะความสูงระหว่างผิวทางด้านในของยางมาถึงผิวของล้อนรับแฟลท ในการออกแบบต้องให้มีระยะห่างนี้มากที่จะไม่ทำให้เกิดการกระแทกกันระหว่างสองพื้นผิวดังกล่าวจากการที่ล้อนรับแฟลทเกิดการกระแทกอันเนื่องมาจากพื้นผิวนอนที่ไม่ราบเรียบ โดยปกติแล้วล้อนรับแฟลทเป็นล้อนเสริมใยเหล็ก หากความดันลมยางภายในอยู่ในเกณฑ์กำหนดและยางนอกยังคงเป็นยางมาตรฐานเดิมของโรงงานผู้ผลิตก็จะไม่เกิดปัญหาการกระแทกนี้ จากรูปที่ 18 ร่วมกับรูปที่ 19 จะทำให้มองเห็นการออกแบบตัวแปรด้วยระยะต่างๆ ที่สอดคล้องกัน แสดงความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4



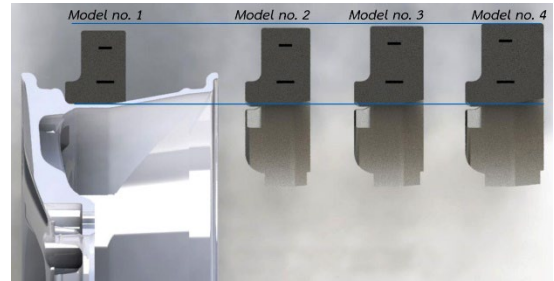
รูปที่ 18 การกำหนดตัวแปรที่สัมพันธ์ระหว่างล้อรถ
แพลตฟอร์ม กระดาษล้อ และยางรถยนต์



รูปที่ 19 การกำหนดตัวแปรควบคุมหน้าตัดของล้อรถ
แพลตฟอร์มใหม่

ตารางที่ 4 กำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับออกแบบหน้า
ตัดล้อรถแพลตฟอร์ม

Parameter	Model no. 1	Model no. 2	Model no. 3	Model no. 4	Remark
a	50	55	60	70	$50 \leq a \leq 85$
h	82	85	87	90	$82 \leq h \leq 90$
w	68	73	78	88	$w = a + R1 + R3 + c$
b	25	25	25	25	-
c	5	5	5	5	fix
R1	10	10	10	10	fix
R2	6.77	6.77	6.77	6.77	fix
R3	3	3	3	3	fix
R4	3	3	3	3	$R4 = R5$
R5	3	3	3	3	$R4 = R5$
d	401.2	401.2	401.2	401.2	fix
t	20	20	20	20	fix
H	85	82	80	77	height for tire collapse



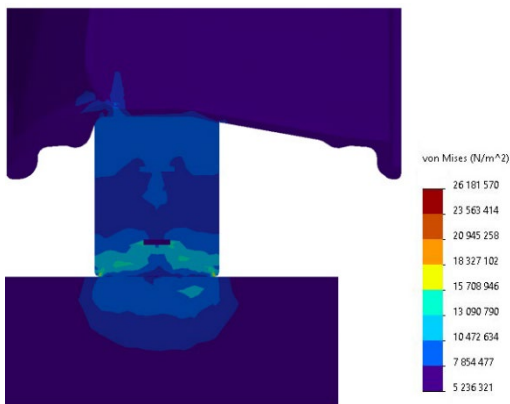
รูปที่ 20 รูปแบบหน้าตัดล้อรถแพลตฟอร์มแบบต่าง ๆ

ส่งผลให้ได้โมเดลของล้อรถแพลตฟอร์มที่มีหน้าตัดขนาดต่างๆ ดังรูปที่ 20 ซึ่งประกอบด้วยโมเดลจำนวน 4 โมเดลด้วยกัน ขนาดของโมเดลล้อรถแพลตฟอร์มจากโมเดลที่ 1 ไปโมเดลที่ 4 จะมีขนาดหน้าตัดใหญ่จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์โมเดลที่ 1-4 พบว่าโมเดลที่ 4 เป็นรูปแบบที่กระจายแรงกดและส่งผลให้ความเค้นที่เกิดขึ้นกระจายตัวออกได้มากดังรูปที่ 21-22 ล้อรถแพลตฟอร์มสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกปดขนาดเล็กนี้ และรูปแบบของล้อรถแพลตฟอร์มสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับรถยนต์นั่งส่วนบุคคล สำหรับขนาดของอุปกรณ์การล้อที่เป็โครงเหล็กสแตนเลส ภายในสามารถใช้ร่วมกันได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนขนาดความหนาของสายรัด แต่อาจต้องเปลี่ยนแปลงขนาดของหน้าแปลนและรัศมีความโค้ง ในกรณีที่เป็นการประยุกต์ใช้กับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลนั้น สามารถกระทำได้ เนื่องด้วยการออกแบบและสร้างที่ผ่านมาทั้งหมดใช้ได้กับรถยนต์บรรทุกทุกปดขนาดเล็กติดเกราะที่มีน้ำหนักมากกว่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลทั่วไป 2 เท่าตัว ดังนั้นจึงไม่ใช่ปัญหาด้านความแข็งแรง แต่จะเป็นปัญหาด้านมิติของล้อรถแพลตฟอร์มกับกระโหลกรถยนต์ กรณีที่รถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่ใช้ยางแบบแก้มเตี้ย เช่น รถยนต์ BMW หรือ BENZ จะต้องได้รับการพิจารณาให้ความสูง (h) ของวงล้อรถแพลตฟอร์มเตี้ยลงด้วย และเพิ่มความหนาของวงล้อรถแพลตฟอร์มให้มากขึ้นเพื่อกระจายแรงกด

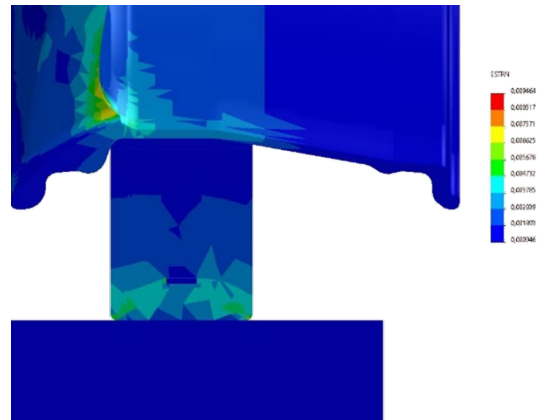
จากการการนำเสนอของ D. Kuerten, [2] นั้นพบว่า การเสริมวงล้อรถแพลตฟอร์มแบบแยกชิ้นนี้ จะมีความ

สะดวกกว่าการสร้างยางรถยนต์ที่แก้มยางมีการเสริมเนื้อยางลงไปให้แข็งแรงเป็นรันแฟลทในตัวดังรูปที่ 18 วงล้อรันแฟลทสามารถใช้งานได้อย่างยาวนานและต้นทุนไม่สูงเกินไป รูปแบบวงล้อรันแฟลท NLR และ ACM Run Flat จะเป็นรูปแบบตัวอย่างในการพัฒนางวงล้อรันแฟลทใหม่ของบทความนี้ ซึ่งจะเลือกรูปแบบ NLR Run Flat เป็นหลักแต่จะเพิ่มเติมเป็นวงล้อตันไม่มีช่องว่างภายในเพื่อให้เกิดเสถียรภาพและความแข็งแรงในการควบคุมขณะวิ่งบนถนนจริง

Ch. Dechwayukul และคณะ [9] ได้นำเสนอรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง “พัฒนาล้อยางเสริมชั้นโฟมยาง” เป็นการสร้างรันแฟลทที่ทำจากวัสดุยางประกอบด้วยรันแฟลทที่แบ่งออกเป็น 3 ชั้น มีการสร้างแม่พิมพ์เพื่อหล่อยางรันแฟลท พบว่าช่องว่างของล้อยางรันแฟลทกับกระทะล้อหากไม่แนบแน่นจะส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนขณะใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบการยึดวงล้อรันแฟลทให้แนบสนิทด้วยการเสริมโครงเหล็กเข้าไปภายในของวงล้อรันแฟลท และจำเป็นต้องนำชุดล้อที่ประกอบเข้าด้วยกันทั้งหมดไปทำการติดตั้งตะกั่วถ่วงล้อ เพื่อให้เกิดความสมดุลของมวลล้อขณะทำการวิ่งใช้งาน งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การออกแบบวงล้อรันแฟลทใหม่ให้มี 3 ชั้นส่วนด้วยเช่นกันเพื่อให้สะดวกต่อการประกอบเข้ากับกระทะล้อ และรูปที่ 23 คือ นวัตกรรมล้อรันแฟลทแบบใหม่ที่ได้จากงานวิจัย



รูปที่ 21 ผลการวิเคราะห์ความเค้นของล้อรันแฟลท โมเดลที่ 4 แบบใหม่



รูปที่ 22 ผลการวิเคราะห์ความเครียดของล้อรันแฟลท โมเดลที่ 4 แบบใหม่



รูปที่ 23 รูปแบบวงล้อรันแฟลทที่ประกอบเข้ากับกระทะล้อ

4. สรุปและอภิปรายผล

วิศวกรรมย้อนรอยเป็นกระบวนการพัฒนาและสร้างชิ้นส่วนเครื่องจักรกลขึ้นมาใหม่ให้มีประสิทธิภาพด้านการใช้งานที่ดีกว่าเดิม ในกระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยประกอบด้วย การทดลองและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์และวิธีการทดสอบจริงจะเป็นค่าความเครียด หากนำผลค่าความเครียดของทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกัน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของกระทะล้อและตำแหน่งต่าง ๆ ของล้อรันแฟลท แล้วให้ผลที่สอดคล้องกันจะถือได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี

ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้คอมพิวเตอร์นั้นสามารถเป็นตัวแทนแทนการทดลองได้ จากนั้นจึงทำการออกแบบโมเดลล้อรันแพลทขึ้นมาใหม่ในรูปแบบต่าง ๆ และหาแบบที่ดีที่สุด ระหว่างการออกแบบในแต่ละรูปแบบนั้นก็จะต้องทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งหมด โดยการพิจารณาความแข็งแรงนั้นคือค่าความเค้นที่เกิดขึ้นและค่าความخمของความเค้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของล้อรันแพลท สำหรับ J. Stearns [3] ก็ได้ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของกระทะล้อโดยเลือกใช้วิธีการทดลอง และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ALGOR เปรียบเทียบผลต่าง ๆ เช่น ค่าความเครียดและการเสียรูป ทำให้ได้การกระจายของความเค้นตามมา ซึ่งบทความวิจัยนี้ก็ใช้วิธีการเดียวกัน เพียงแต่มีล้อรันแพลทเพิ่มเติมเข้ามา และโปรแกรมที่เลือกใช้คือ SolidWorks Simulation จากการวิเคราะห์ ทดสอบและเปรียบเทียบผล พบว่าความแตกต่างของทั้งสองวิธี มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10-16 เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและค่าความขึ้นในห้องทดสอบ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความไวและความถูกต้องของความเครียด แม้ว่าค่าที่ได้จะแตกต่างกันแต่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และเพียงพอที่จะใช้ผลนี้รับรองกระบวนการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

ล้อรันแพลทได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นเป็นวงล้อแบบแยกส่วน จึงมีความสะดวกและต้นทุนต่ำกว่าการสร้างยางรันแพลทที่แกมมามีการเสริมเนื้อยางลงไปให้เกิดความแข็งแรงหรือที่เรียกว่าเป็นรันแพลทในตัว วงล้อรันแพลทแบบแยกส่วนจะสามารถใช้งานได้ยาวนานและต้นทุนไม่สูงเกินไป วงล้อรันแพลทของนี้มีโครงโลหะกันสนิมทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นโครงกระดูกในร่างกายมนุษย์ให้เกิดความแข็งแรงและสามารถทำให้วงล้อรันแพลทแนบแน่นเข้ากับกระทะล้อได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังได้นำเสนอรูปแบบหน้าตัดและขนาดของวงล้อรันแพลท สำหรับรูปแบบและเทคนิค

การผลิตรวมทั้งวัสดุคอมพิวเตอร์จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์สร้างวงล้อรันแพลทสำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลได้ ในกรณีรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่ใช้ยางแบบแกมมเดียวที่ต้องพิจารณาให้ความสูงของวงล้อรันแพลทเตี้ยลงด้วย และเพิ่มความหนาของวงล้อรันแพลทให้มากขึ้น ทั้งนี้ เพื่อให้สามารถนำวงล้อรันแพลทประกอบเข้าไปในกระทะล้อได้นั้น การเพิ่มความหนาของวงล้อรันแพลทจะต้องไม่เกินความสูงระหว่างขอบยางกับกระทะล้อ ความหนาของวงล้อรันแพลทที่ออกแบบสามารถใช้งานได้กับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดกระทะที่วิ่งด้วยความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ได้ระยะทางไกลกว่า 50 กิโลเมตร ล้อรถยนต์หนึ่งล้อจะใช้วงล้อรันแพลทหนึ่งวง ซึ่งแบ่งออกเป็นสามตอนแล้วประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อให้เกิดความสะดวกในการประกอบและถอดนอกเหนือจากรถบรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กติดกระทะแล้ว ก็สามารถประยุกต์ใช้ได้กับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลทั่วไปซึ่งมีใช้ในชีวิตประจำวัน แต่รูปแบบของพื้นผิวกระทะล้อด้านในที่ต้องสัมผัสกับวงล้อรันแพลทของรถยนต์แต่ละยี่ห้อและแต่ละรุ่นจะแตกต่างกันออกไป จึงจำเป็นต้องออกแบบและสร้างล้อรันแพลทให้เหมาะสมในแต่ละยี่ห้อและแต่ละรุ่นด้วย สำหรับการพัฒนาล้อรันแพลทไปสู่ระดับอุตสาหกรรมจำเป็นต้องประเมินต้นทุนในการผลิตภาพรวมและเปรียบเทียบความคุ้มค่าอีกครั้งหนึ่ง

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ พ.ศ. 2561 ตามสัญญาเลขที่ กบง./2559-194 คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ เครื่องจักร และสาธารณูปโภคต่าง ๆ ในการทำงานวิจัย และขอขอบคุณ ดร.ศุภชัย หลักคำ สำหรับความช่วยเหลือในการทดสอบและบันทึกผลด้วยเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์ ความเสียดทานยางล้อ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

6. บรรณานุกรม

- [1] Texas Armoring Corporation. (2018, 22 Aug). Bulletproof Armoring Materials. [Online] . Available: <https://www.texasarmoring.com/armoring/materials/>
- [2] D. Kuerten, "Run-flat tires" in *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, IEEE. USA, 1988, pp. 62-67.
- [3] J. Stearns, "Reinventing the tire," *International News / Materials and Design*, vol. 22, pp. 591–593, 2001.
- [4] J.R. Cho et.al, "Optimum design of run-flat tire insert rubber by genetic algorithm," *J. Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 52, pp. 60-70, 2012.
- [5] E.G. Markow, "Evolving the banded radial tire," *Tire Sci. Technol. TSTCA*, vol. 15, no. 1, pp. 30–41, 1987.
- [6] N. Chalo and P. Chartpuk, "Mechanical Properties of UHMWPE Composite with Al_2O_3 for Application in Engineering," *RMUTP Research Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 191-201, Jan.-Jun. 2022.
- [7] V. Voranavin, S. Luangsod and P. Chartpuk, "Analysis of Stress Concentration that occurs in the Reform with Finite element method," *RMUTP Research Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 13-23, Mar. 2011.
- [8] T. Fongsamootr and P. Chartpuk, "Analyses of Stress Distribution in Overhanging Traffic Sign Pole Using Finite Element Method," *KKU Engineering Journal*, vol. 33, no. 6, pp. 587 – 597, Nov. – Dec. 2006.
- [9] Ch. Dechwayukul, W. Thongruang, P. bunnaul and W. Wisutmethangoon, "Developed pneumatic rubber wheels to add rubber foam layer," Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai Campus, 2011.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Finite Element Analysis of Armor Piercing Bullet Penetrating Hard Steel Armor Plate

Visa Khramum and Prakorb Chartpuk*

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
1381 Pracharat 1 Road, Wongsawang Sub-district, Bang Sue District, Bangkok, 10800 Thailand

Received 19 April 2022; Revised 19 May 2022; Accepted 20 May 2022

Abstract

The bulletproof plates with materials that can convincingly be destroyed by the 7.62 mm bullet with its speed at 878 ± 9.1 m/s were developed by designing according to the National Institute of Justice Level 4 (NIJ 4). The plates were made of two flat sheets stacking, SKD11 and SUS304. Their components were composed of the front and back plates; the first sheet made of SKD11 material hardening at 65 HRC with a thickness of 6 mm and the back plate made of SUS 304 material with a thickness of 5 mm. The finite element method was applied to simulate and analyze the results to demonstrate the bullet resistance to the perforation by setting perpendicular sheet to the bullets. Therefore, the simulating studies for the bullet firing were demonstrated by locating its angles of 15, 30, 45 and 60 degrees to the SKD11 sheet with a thickness of 6, 8, and 10 mm coupled with the SUS304 sheet with a thickness of 5, 6, 8, and 10 mm. These plates were stacking into two layers then the finite element method was applied to simulate one at a time. The results showed that the first sheet of SKD11 with 6 mm of thickness could resist the perforation of the bullet at 60 degree and the plate thickness of 8 and 10 mm could start resisting to the perforation at 45 degree. The second sheet of SUS304 with the thickness of 5, 6, 8, and 10 mm were incapable to resist to the perforation and the refraction of the bullet direction as good as that of SKD11. Therefore, the principle applying two metal sheets stacked into layers was essential to impel the resistance of the bullet perforation and change the direction of the bullet.

Keywords : 7.62 mm Bullet, NIJ 4, Bulletproof Plate, Finite Element Method

* Corresponding Author. Tel.: +669 8279 5855, E-mail Address: prakorb.c@rmutp.ac.th

1. Introduction

Development and design of bulletproof armor plates with materials was performed to understand the armor behavior in destroying of 7.62 mm bullets. The finite element simulation was applied to analyze the thickness parameters affecting on the penetration resistance. A.M. Iqbal et al. [1] had simulated the durability behaviors of 12 mm and 16 mm thicken-steel plates affected by a 7.62 AP bullet at different speeds and angles. From the test, the brass sleeve was removed from the outer bullet and only the internal metal bullet left was chosen for studying its banging behaviors to the metal armor plate. The studied criteria were based on the simulation consisting of the metal thickness at 12 mm and 16 mm, the plate size at 200 x 200 mm, the bullet with its size of 6.06 mm, and total length of 28.4 mm at the speed of 818 m/s.

The selected element for the bullet was hexahedral with the size of 1 mm³. Also, the other sizes were 0.8, 0.6, 0.2 and 0.1 mm³. The tests were done at the plate target of 12 mm thickness and the remaining speeds for those sizes were observably decreased by 669, 663, 658 and 657 m/s, respectively. The armor plate was made of a tetrahedral mesh of size 0.2, 1, and 2 mm³. The calculated procedures for the test took 5 hours for the thickness of 12 mm and 9 hours for the thickness of 16 mm. The tested plate thickness was 12 mm with a 45 degree for collision angle causing the actual test speed at 555.3 m/s. In addition, the simulated speed with the program was at 515.82 m/s, displaying 7.6% difference

from the actual speed. From the actual experiment of the collision with a tilt angle of 57 degree, the bullet speed was reduced to 368.9 m/s and the thickness of the armor plate was 16 mm. The simulated results indicated that the bullet was embedded in the armor plate whereas the experiment results were different due to a 6% increase in bullet embedding if using a bullet shooting at 51 degrees. The simulation for bullet buried in the armor plates was performed for the bullet piercing through a 12 mm thick plate. The perforation on the piercing back was appeared to be smaller than the front piecing, looked like an oval shape. T. Børvik et al. [2] had examined the impact of bullet shot on aluminum plates AA6082-T4 at 20 mm thickness using experimental and simulation methods. Two bullet sizes applied for the tests were 7.62 x 51 mm and 7.62 x 63 mm. The detected impact speed was also set at 830 m/s for all tests. During the tests, the bullet velocity started and ended was recorded. Their speeds were measured by many types of laser-based optical devices using a high-speed video camera. The photographs of the armor penetration process, particularly relevant to the important parts, were made for the observation the effects of tilted angles in which influence the various penetration results. The studies were observed for the the inclination angles of less than 60 degrees and the change in penetration behaviors accounted to be the perforation, implantation, or reflection.

T. Binar et al., [3] simulated with the LS-Dyna program demonstrated whether

the armored materials were damaged increasing or not it was depending on the change in temperature. As the temperature rises, the deep penetration of the bullet increases. If the temperature drops, the deep penetration decreases. In summary presents that Element mesh is very important, mesh sizes varied for different mesh damage were displayed as expected in that the stress value could cause an increase in DOP value correctly when mesh sizes were created at very fine (0.5 x 0.5 x 0.5 mm), fine (1 x 1 x 1 mm), rough (1.5 x 1.5 x 1.5 mm), and very rough (2 x 2 x 2 mm) particles.

2. Research Methodology

2.1 Material modeling

According to SKD11 plate model used for analysis of bulletproof armor, the material was chosen to indicate the bullet head destroyed and the impact to the armor plate 1. The bullet was broken into pieces and penetrating to the armor plate 2. For the armor plate 1, the analyzed SKD11 material with the hardness standard specification of 60-62 HRC (Rockwell scale C), the thickness of 3 types – 6, 8, and 10 mm, the size of 30 x 30 cm, and the tilt angle of 60 degree, was performed according to Johnson-Cook Model (JC) of failure. These possessed criteria were described by an equation below. [4]

$$\sigma = [A+B(\varepsilon_p)^n][1 + C \ln (\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)][1 - \{(T - T_0)/(T_m - T_0)\}^m] \quad (1)$$

Where A is initial yield stress, B is hardening constant, ε_p is equivalent plastic strain, n is hardening exponent, $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ is reference strain-rate and $\dot{\varepsilon}$ is the

plastic strain rate. In addition, C is the strain rate constant, m is temperature softening exponent, $(T - T_0)/(T_m - T_0)$ is a temperature absolute, whereas T, T_0 and T_m is temperature set at room temperature and melting temperature [4]

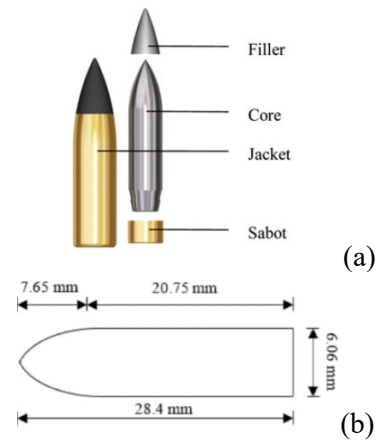


Fig. 1 Bullet structure (a) assembly of bullet [2] (b) dimension of bullet [5].

Table 1. Properties and parameter JC of SKD11 (60-62 HRC) [6]-[8]

Properties	SKD11
Density (ρ , kg/m ³)	8400
Modulus of elasticity (E, GPa)	208
Poisson ratio (ν)	0.3
Bulk modulus (GPa)	173
Shear modulus (GPa)	80
Thermal conductivity (W/m.k)	20.5 (350°C)
Thermal expansion (m/m.k)	11
Specific heat (J/kg. °C)	461
Johnson-cook strength	
Initial yield stress (A, MPa)	1766
Hardening constant (B, MPa)	904
Hardening exponent (n)	0.39
Strain rate constant (C)	0.012
Thermal softening exponent	3.38
Melting temperature (K)	1733

The simulated bullet had a size of 7.62 mm, shown in **Fig. 1**. The shell of bullet was removed, and only the core made from Tungsten carbide (WC) remained was analyzed for the effects of impact and the breaking behaviors on the armor, of which mechanical properties and parameters were described by simulations according to Johnson-Holmquist failure model (JH-2), shown in **Table 2**.

Table 2. Properties and parameter JH of tungsten carbide [7], [9]

Properties	Tungsten carbide
Density ($\rho, g/cm^3$)	14.56
Young's modulus (E, GPa)	539
Poisson ratio (ν)	0.23
Bulk modulus (GPa)	332
Shear modulus (GPa)	219
Tensile yield strength (GPa)	3.85
Compressive yield strength (GPa)	4.53
Johnson-Holmquist Strength (Continuous JH-2)	
Damage type	Gradual (JH2)
Hugoniot elastic limit (HEL, GPa)	656
Intact strength constant (A)	0.9899
Intact strength exponent (n)	0.0322
Strain rate constant (C)	0
Fracture strength constant (B)	0.67
Fracture strength exponent (m)	0.0322
Maximum fracture strength ratio	1000
Damage constant (D1)	1
Damage constant (D2)	0
Hydrodynamic tensile limit (GPa)	-4

The equation of failure is demonstrated as follows.

$$Y = [A(p^* + T^*)^n(1 - D) + B(p^*)^m D][1 + C \ln(\dot{\epsilon}_p^*)] \quad (2)$$

$$p^* = \frac{p}{p_{HEL}}, \quad T^* = \frac{T}{p_{HEL}} \quad (3)$$

When Y is yield stress, p_{HEL} is the pressure at Hugoniot Elastic Limit (HEL), T is Maximum hydrodynamic tensile strength, and A, B, C, n, m are parameters of materials. HEL could yield the limit at uniaxial strain when materials receive loads in one direction, therefore, there will be 2 equations for separating the yield stress, when $D = 1$ or $D < 1$ in Johnson-Holmquist, the Yield stress is continual failure function of D. Therefore, the types of materials of these properties are called “active” failure simulation. For special cases, when $D = 0$, there is no any damages, and when $D = 1$, there are damages according to the equation below. [6]-[9]

$$Y = A(p^* + T^*)^n[1 + C \ln(\dot{\epsilon}_p^*)] \quad (\text{Intact, } D=0) \quad (4)$$

$$Y = B(p^*)^m[1 + C \ln(\dot{\epsilon}_p^*)] \quad (\text{fragmented, } D=1) \quad (5)$$

For plate 2, SUS304 material was used to absorb the force of scattering broken pieces of bullet and showed the impact on the plate 1 penetrated out thoroughly. The size of plate was 30 x 30 cm, and its thickness from 5 mm was used for testing the normal SUS304 material with the thickness of 1 mm to 5 mm. After that, its thickness was changed to 6, 8, 10 mm etc. The thickness used in the simulation was 5, 6, 8, and 10 mm and the failure theory of Steinberg-Guinan Strength model was employed for situation of high strain ratio and extended to low strain ratio [10]. The equation is accomplished as follows.

$$G = G_0 \left\{ 1 + \left(\frac{G_p}{G_0} \right) \frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{G_t}{G_0} \right) (T - 300) \right\} \quad (6)$$

or

$$Y = Y_0 \left\{ 1 + \left(\frac{\dot{\gamma}_p}{Y_0} \right) \frac{p}{\eta^{1/3}} + \left(\frac{\dot{G}_t}{G_0} \right) (T - 300) \right\} (1 + \beta \varepsilon)^n \quad (7)$$

at $Y_0 = [1 + \beta \varepsilon]^n \leq Y_{max}$

Table 3. Properties and parameter of SUS304 [7]

Properties	SUS304
Density (ρ , kg/m ³)	7900
Specific heat (J/kg. °C)	423
Shock EOS linear	
Gruneisen coefficient	1.93
Parameter (C1, m/s)	4570
Parameter (S1)	1.49
Parameter quadratic (S2)	0
Steinberg Guinan strength	
Initial yield stress (Y, MPa)	340
Max. yield stress (Ymax, GPa)	2.5
Shear modulus (GPa)	80
Hardening constant (B)	43
Hardening exponent (n)	0.35
Derivative (dG/dP , G'P)	1.74
Derivative (dG/dT , G'T, MPa/°C)	-35
Derivative (dY/dP , Y'P)	0.007684
Melting temperature (Tmelt, °C)	2106.9
Shear modulus (GPa)	77

Where ε is effective plastic strain, T is temperature (K), η is compression, and parameters of subscript p and t are derivatives for pressure and temperature that refer to those conditions ($T = 300$ K, $p = 0$, $\varepsilon = 0$). The subscription zero refers to the value of G and Y at those conditions. If the temperature of material is higher than the specific melting point, shear modulus and strength will be set to

zero [7], [8]. The properties and parameters of SUS304 are provided in the finite element simulation software, shown in the **Table 3.**

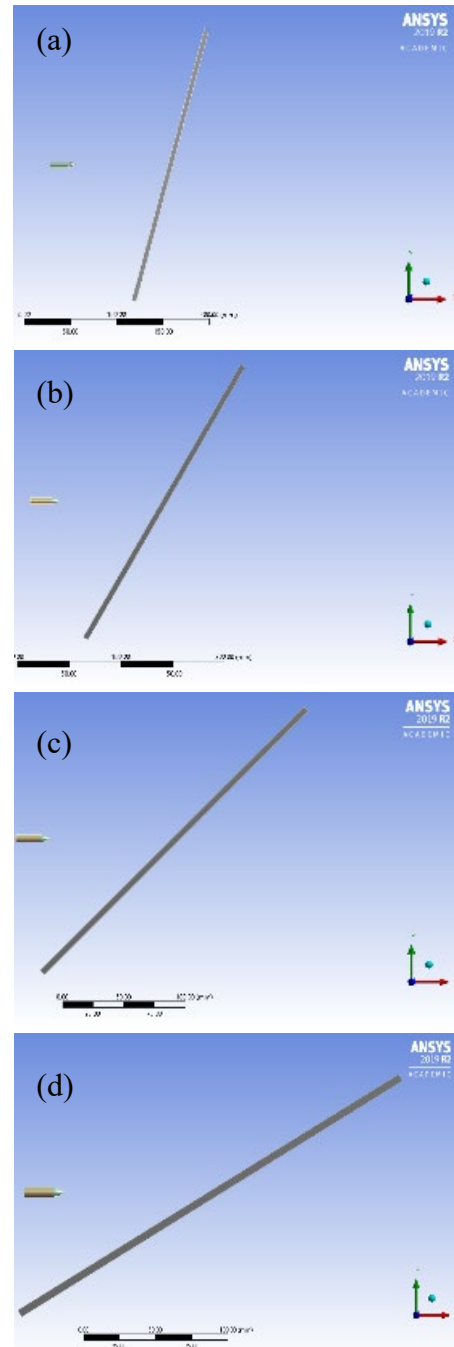


Fig. 2 Tilt angles in simulations: (a) 15 (b) 30 (c) 45 and (d) 60 degrees.

2.2 Numerical method

The finite element simulation using Ansys/Explicit dynamics software was used to simulate the conditions of shooting according to NIJ standard level 4, of which speed of bullet is 878 ± 9.1 m/s compared to NIJ standard level 3, of which speed of bullet is 847 ± 9.1 m/s [7], [8], at setting speed of 880 m/s and bullet size of 7.62 mm. The bullets made from WC were selected for 2 types of simulations. In the simulation 1, the materials for the armor plate 1 is SKD and that of the armor plate 2 is SUS304, of which tilt angles in simulation are set at 15, 30, 45 and 60 degrees, shown in **Fig. 2**. For the pattern of mesh, it was hexahedral at both the armor plate and bullet, of which a size of mesh at bullet was 0.5 mm and at the armor plate was 4 mm.

3. Results and Discussion

3.1 Simulation of NIJ standard level 4

In simulation 1 using SKD11 material at thickness of 6 mm with titled angles of 15, 30, 45, and 60 degrees, it was found that the tilted armor plates at angles of 15, 30, and 45 degrees were unable to endure the penetration of 7.62 mm bullet but would be able to break the bullet. Additionally, for a tilt angle at 60 degree, the armor plate was able to endure the penetration of bullet. It caused the impact angle to the armor and compelled the bullet break and change directions. The broken pieces of bullet metals moved towards the tilt angle of the armor could be demonstrated in **Fig. 3**. From **Fig. 4**, the graph displayed the tilt angle of 45 degree at the time step 18-20 ms. It was

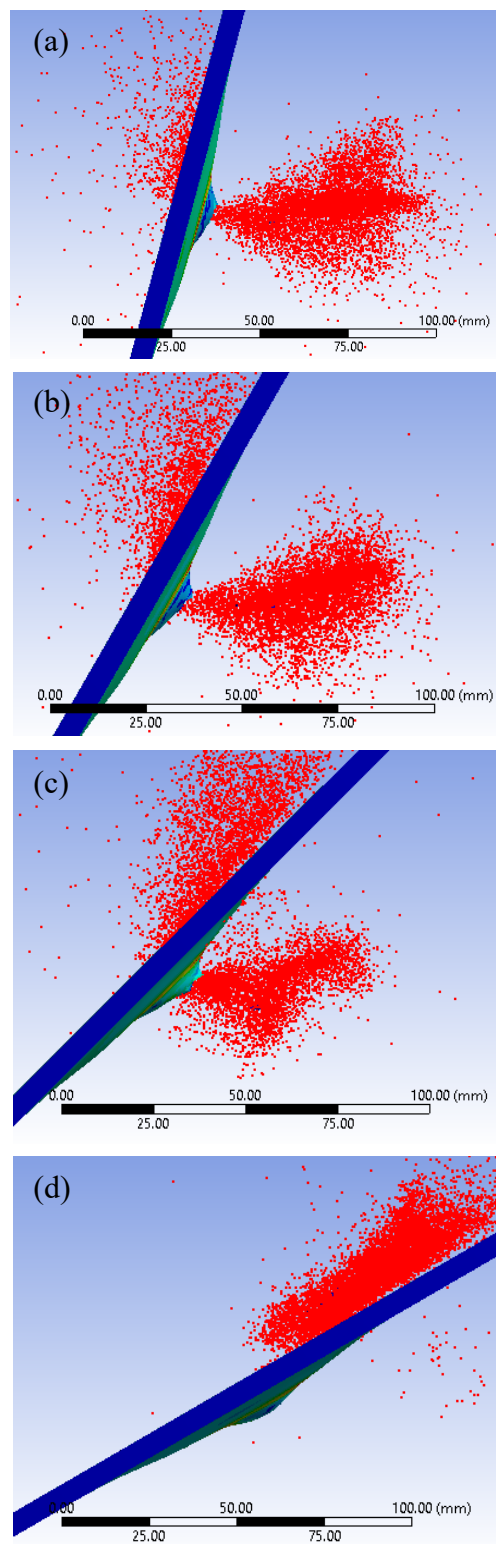


Fig. 3 Damages of armor plate with 6 mm thickness at step 22 ms (a) 15 (b) 30 (c) 45 and (d) 60 degrees.

found that its strain was predominantly at the highest-level contrasting from others tilted angles of 15, 30, 45, and 60 degrees. At these following angles, the observed armor plates had started to endure the penetration of bullet due to less deformation and increased in impact angles as shown in **Fig. 5**. Also, there were rebounding bullet happened at the front of the armor plate with the tilt angle of 60 degree and at the same time, the armor plate attained the strain accumulated increasingly and was appeared to endure the penetration. The situation thus caused

a change in the direction of small pieces of metal bullets.

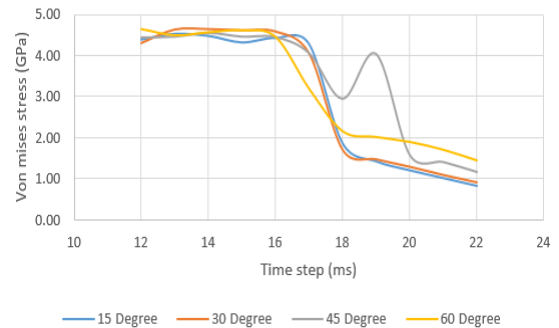
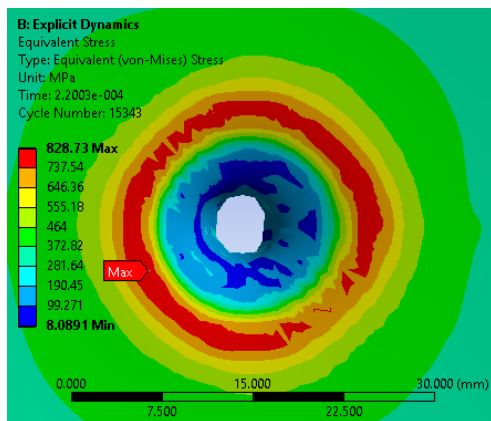
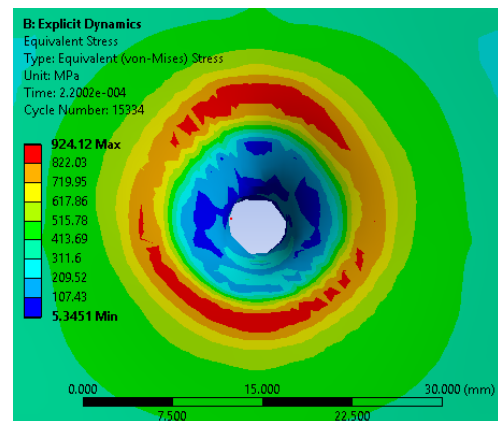


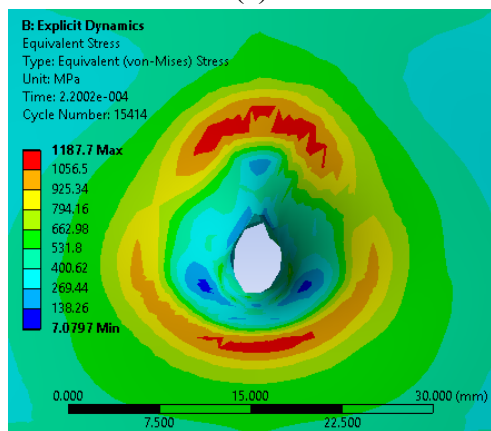
Fig. 4 A graph representing the stress of the SKD11 armor with 6 mm thickness.



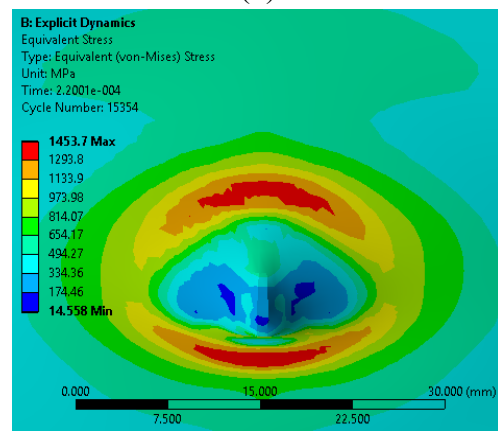
(a)



(b)



(c)

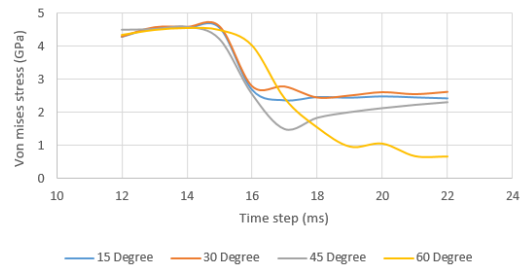


(d)

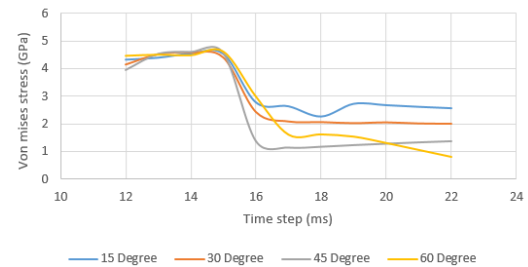
Fig. 5 Impact of bullet at the angles of 15, 30, 45, and 60 degrees at time steps of 22 ms
(a) 15 (b) 30 (c) 45 and (d) 60 degrees.

For the experiment using the thickness of 8 mm and tilted at the angles of 15, 30 degrees, the plates were in tolerant to all penetration of the bullets. At the tilt angles of 45 and 60 degrees, the armor plates could evenly endure the penetration and change the directions of bullet heads. From the graph in **Fig. 6 (a)**, the results exhibited the different strains for the tilt angles of 15 and 30 degrees. The less stress was taken place when the bullet had changed its direction, affecting the impact on to the armor plate and bringing up less deformation with higher impact angles of bullet head. For the strain at 15 and 30 degrees, the bullet could penetrate the armor plate thoroughly out. The strain was gained steadily because the armor plate was penetrated without any deformation in long term investigation. **Fig. 6 (b)** indicated that the armor plate with 10 mm thickness could resist the penetration of 7.62 mm bullet. It caused the bullet broken into small pieces of metals. From this graph, the performances applied the tilt angles of 15, 30, and 45 degrees showed that the bullet had impacted to the armor plate by increasing impact angle and thus causing the strain decreased according to increases in the tilt angles.

However, at the tilt angle of 60 degree, the bullet had impacted, the strain was decreased slower than those tilted at the angles of 15, 30, and 45 degrees. This was because of the change in the direction of small pieces of the bullets and having less deformation, shown in **Fig. 7**.



(a) The armor plate with 8 mm thickness.



(b) The armor plate with 10 mm thickness.

Fig. 6 Graph representing the strain of the SKD11 armor plate.

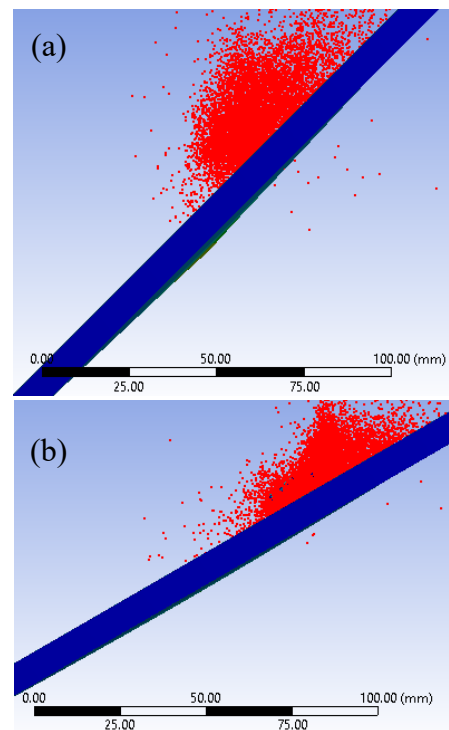


Fig. 7 Change in directions of bullets
(a) 45 and (b) 60 degrees.

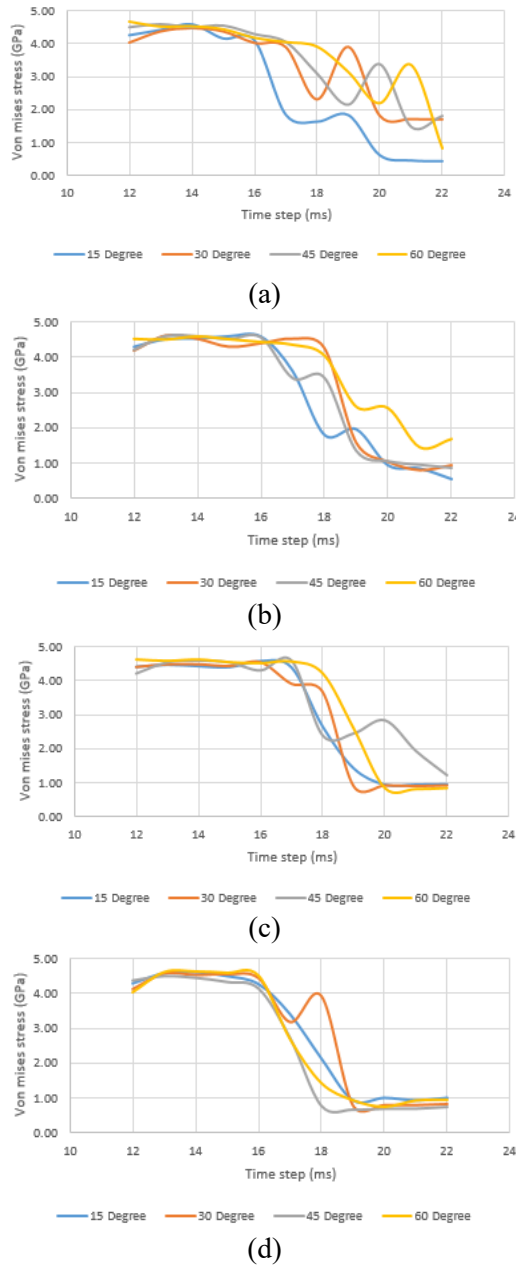


Fig. 8 Graph representing the strain in SUS304 armor plate with (a) 5, (b) 6, (c) 8, and (d) 10 mm thickness.

For SUS304 armor possessing the tilt angles of 15, 30, 45, and 60 degrees together with either 5, 6, 8, and 10 mm thickness, all observed simulations demonstrated that the plates could endure the penetration of 7.62 mm bullet. From

Fig. 8, at 6, 8, and 10 mm thickness and having impact of the bullets, the similar results were dominantly expressed since the observed strain seemed indifferent from other armor types.

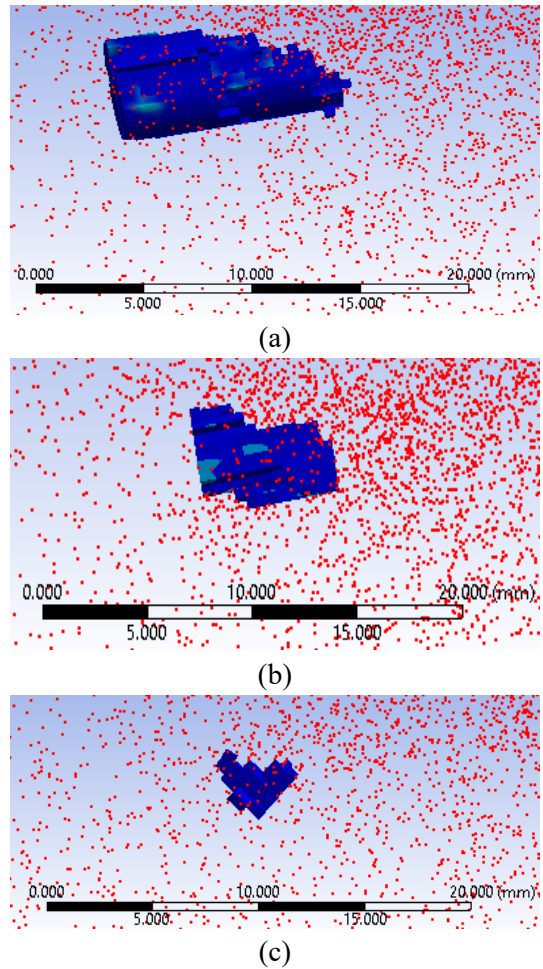


Fig. 9 Penetration of the bullet into the armor plate at a tilt angle of 15 degree and thickness of (a) 6 mm (b) 8 mm and (c) 10 mm.

At the angles of 15, 30, 45, and 60 degrees, after hitting to the armor, the bullets were broken in to large pieces and penetrating through the armor. Its particle sizes were smaller even if increasing in the armor thickness, illustrated in **Fig.9**.

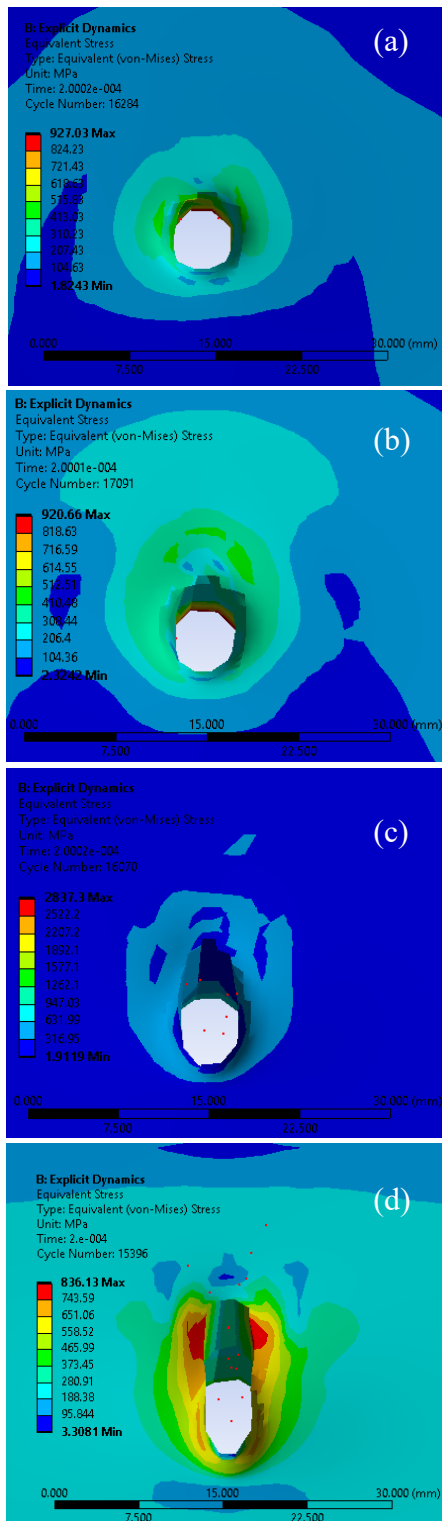


Fig. 10 Impact tracing of the bullet on the armor with 8 mm thickness at time step 20 ms and at tilt angle of (a) 15 (b) 30 (c) 45 and (d) 60 degrees.

More prominent deformation was created on the penetrated traces and holes in SUS304 armor plate than SKD11 armor plate because the SUS304 is softened in property. It can then assist in holding the bullet and resulting more damages on the armor, shown in **Fig.10**. However, the bullets would be broken severely if the plate thickness was increasing. The increase in thickness of the armor intensified more bullet breaking into large numbers of pieces due to softening property of the armor. However, if less thickness of the armor was chosen, more built up softening property of the armor was. These significances led to opposite results in that the bullet would be broken into larger pieces.

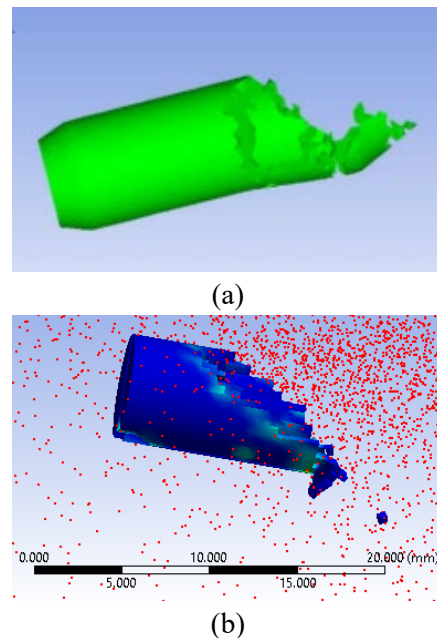


Fig. 11 Simulation of the bullet after penetration to the armor tilted at the angles of 15, 30, and 45 degrees, (a) damages of the bullet described by F. M. John et al. [9] and (b) damages of bullet produced by our study.

At the thickness of 5 mm of the armor with tilt angles of 15, 30, and 45 degrees, the bullet caused impact directly to the armor plate. The bullet would be damaged, and broken into large pieces of metals before penetrating into the armor. Its shape was still be the bullet like particle but the penetrated direction of the metal pieces was changed slightly. Therefore, when compared to model of F. M. John et al. [9], their results of bullet appearance after penetrating through the armor plate were similar to our findings shown in **Fig. 11**.

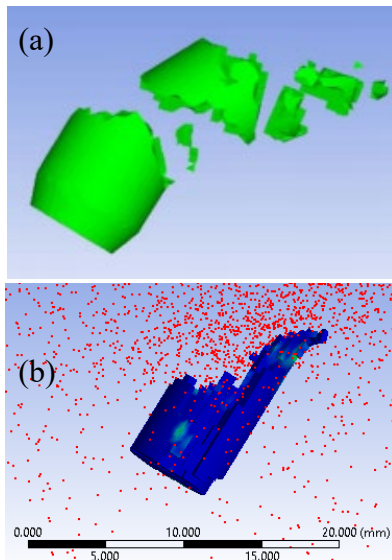


Fig.12 Simulation of the bullet after penetration to the armor tilted at the angles of 15,30, and 45 degrees, (a) damages of the bullet described by F. M. John [9] and (b) damages of bullet produced by this study.

At the angle of 60 degree, after penetration through the armor plate, the bullets were changed in their direction clearly. They were further broken into a group of large pieces of metals, explained

in **Fig. 12** The bullet appearances were similar to those at the tilt angle of 18 degree determined by F.M. John et al. [9]

Two plates stacked together into two layers were designed, of which the front plate was SKD11 whereas the back plate was SUS304. Thickness of the first plate, t_1 , was of 6, 8, and 10 mm. Thickness of the back plate, t_2 , was 5, 6, 8, and 10 mm. For simulation test tilt angles at 15, 30, 45, and 60 degrees, the results from simulation process were determined for the thickness of the condition with $t_1 = 6$ mm and $t_2 = 5$ mm and with $t_1 = 6$ mm and $t_2 = 6$ mm, at tilt angles of 15 and 30 degrees. The armor plates were unable to endure the penetration of bullets. The broken bullet into pieces of metal were clearly observed. Then these pieces were penetrated into the armor. The tilt angle of 45 and 60 degrees oppositely caused the bullet penetrate through the armor and change in the direction of small pieces of bullet metals broken before moving along the tilt angle of metal. The results were illustrated in **Fig. 13**.

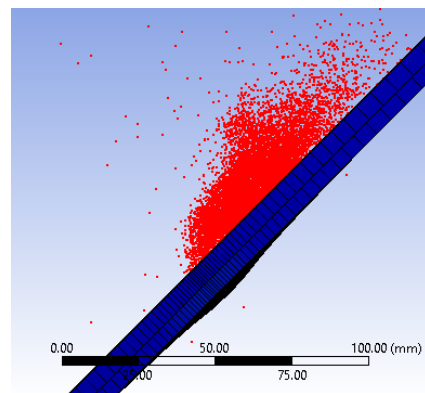


Fig. 13 Appearances of a group of broken small pieces of metals when impacted to armor plate with various thickness at 45 degree.

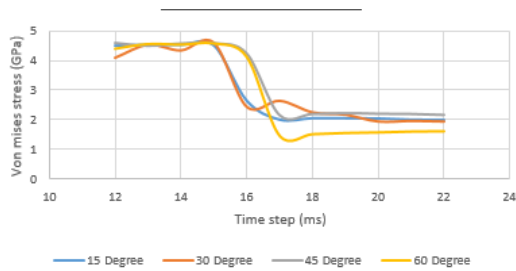
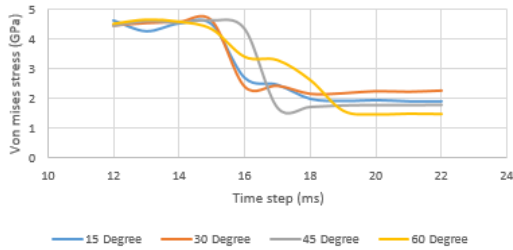
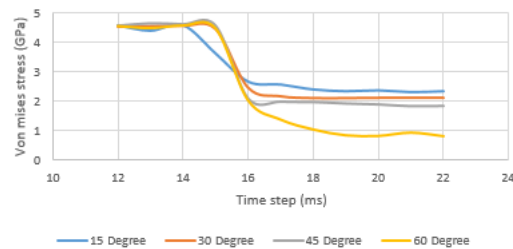
(a) SKD11, $t_1 = 6$ mm and SUS304, $t_2 = 5$ mm.(b) SKD11, $t_1 = 6$ mm and SUS304, $t_2 = 6$ mm.(c) SKD11, $t_1 = 8$ mm and SUS304, $t_2 = 8$ mm.

Fig. 14 A graph of the strain vs time step of 2 layered armor.

For the thickness of $t_1 = 8$ mm and $t_2 = 8$ mm at tilted angles of 15, 30, 45 and 60 degrees, the armor plates were impenetrable to 7.62 mm bullet and there was changes in directions of a group of small pieces of metals after impact on the armor plate. In **Fig. 14 (c)**, the strain had risen from the impact of bullet, thus decreasing and remaining constant. The step of decreased strains was occurred according to increases in tilt angles or impact angles of the armor plates. In addition, the results shown in **Fig.14 (a)**

and **(b)** specified that the strain at angels of 15 and 30 degrees decreased faster than those of 45 and 60 degrees because the armor plate was not be penetrable then the strain was accumulated more at the inside plate, then be unchanging after the armor plate was penetrated. For the angles of 45 and 60 degrees, the plates were able to endure the penetration, thus, the strain decreased slower than that of 15 and 30 degrees because of more accumulated strain at the armor plate. The thickness of $t_1 = 10$ mm and $t_2 = 10$ mm, also absolutely influenced the penetrating resistance especially, at its thickness of $t_1 = 8$ mm and $t_2 = 8$ mm, the armor presented well durability in penetration of the bullet. The armors plates composed of 2 layers of 8 mm plate could even better endure the penetration at tilt angles of 15, 30, 45 and 60 degrees when impacts happened. Additionally, in simulation of impact from tilt angles, the bullets were enforced to change in direction after penetration through the armor that were dependent on particular tilt angles and thickness. These parameters affected the decrease in the speed of bullet after impact [11].

3.2 Comparison with NIJ standard level 3

For the simulation according to NIJ standard level 3, the speed was simulated set at 847 m/s for either armor using of 1 layered plate or 2 layered plates, of which all parameters including tilt angles, materials and thickness of the armor were the same as previously used in the standard level 4. In this case, the armor plate was SKD11 with thickness of 6 mm,

and tilt angles was at 15 and 30 degrees. The results demonstrated that the armor plates were penetrated. In the other case, at tilt angles of 45 and 60 degrees, the armor plates could not be able to resist the penetration and caused the bullet change its direction when impact on the armor plate. In the test using thickness of 8 mm and tilt angle of 15 degree, the armor plate showed opposite behavior in that it did not tolerate to the penetration whereas this plate tilted at the angles of 30, 45 and 60 degrees could withstand the penetration. These results were different from those determined in the NIJ standard level 4 applying the conditions of the thickness of 6 mm and the angle of 45 degree (**Fig.15**) as well as thickness of 8 mm and tilt angle of 30 degree and (**Fig. 16**).

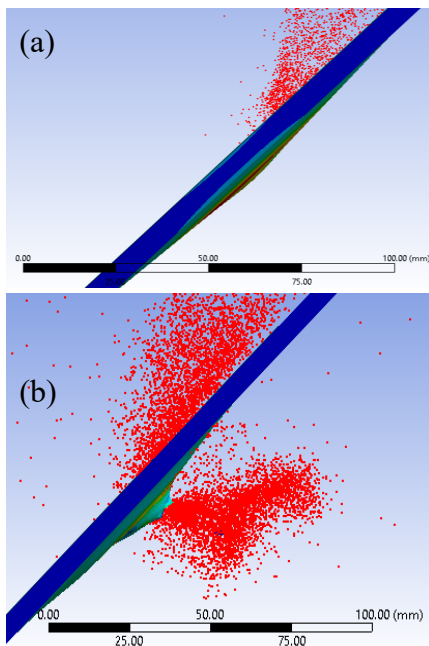


Fig. 15 The simulations for the time step 20 ms (a) according to NIJ standard level 3, using tilt angle of 45 degree and (b) according to NIJ standard level 4, using tilt angle of 45 degree.

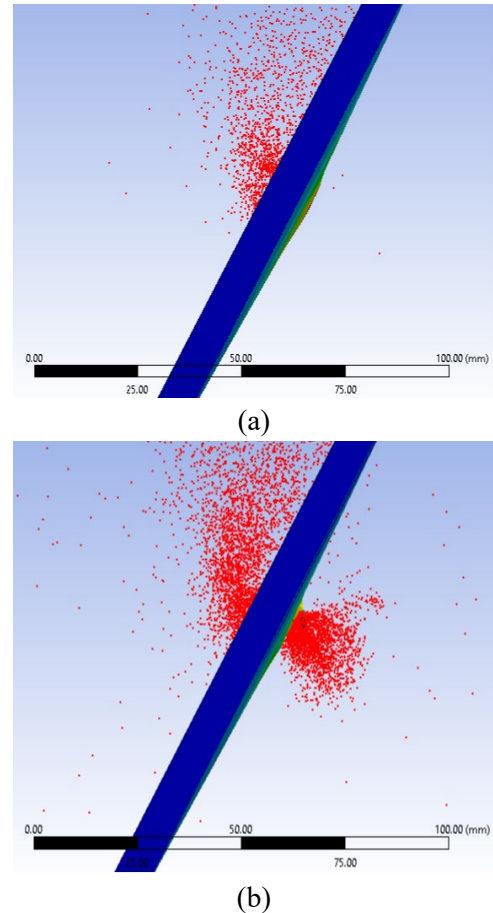


Fig. 16 The simulations for time step 20 ms (a) according to NIJ standard level 3, using tilt angle of 30 degree (b) according to NIJ standard level 4, using tilt angle of 30 degree.

For armor plate of SUS304 having the thickness of 5, 6, 8, and 10 mm and tilt angles of 15, 30, 45, and 60 degrees, compared with that determined by NIJ standard level 4, all armor plates could prevent the penetration (**Fig. 17**). Therefore, there were no significant differences in their simulation results.

Using two layered armor plates, the front plate made of SKD11 and the back plate made of SUS304, of which thickness were performed at $t_1 = 6$ mm, $t_2 = 5$ mm

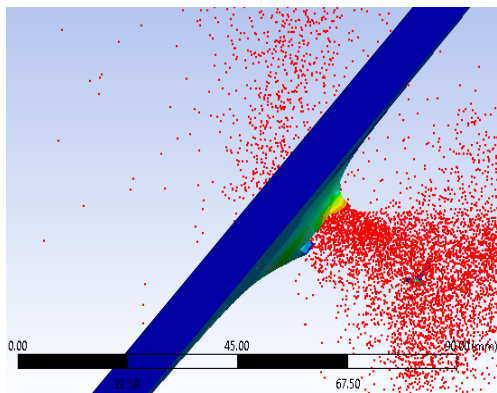


Fig. 17 Armor plate with 8 mm thickness and a tilt angle of 45 degree at time step 20 ms.

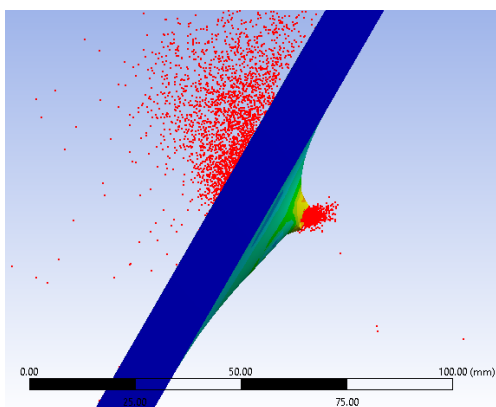


Fig.18 Armor plate with $t_1 = 6$ mm, $t_2 = 6$ mm, a tilt angle of 30 degree, time step 20 ms.

and $t_1 = 6$ mm, $t_2 = 6$ mm and tilt angles of 15 and 30 degrees (**Fig. 18**), the results showed that the armor plates were penetrated. In the contrast, the tilt angles of 45 and 60 degrees induced the armor plates to resist to the penetration of the bullet when setting at $t_1 = 8$ mm, $t_2 = 8$ mm and tilt angles at 15, 30, 45 and 60 degrees. These data were expressively correspondent to the results established by NIJ standard level 4.

Therefore, the armor plate at a thickness of 12 mm was compared to that of M.A. Iqbal et al. [1] The penetration characteristics at the back of the armor plate had a smaller hole than that in the front plate, a fire element simulation that is close to the actual experiment as shown in **Fig. 19**, so the studied simulation can be used to analyze the destructive situation occurring on the armor plates before developing a real armor plate.

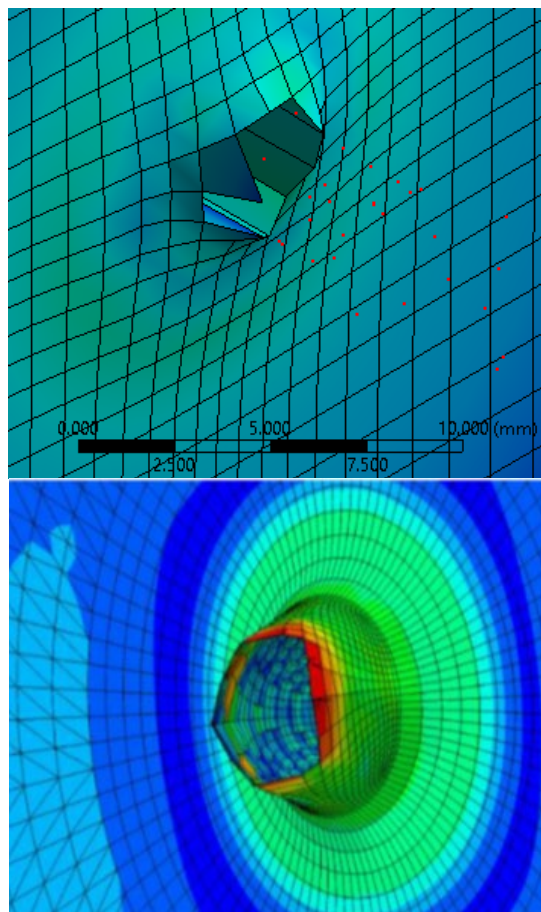


Fig. 19 The resulted WC and SUS 304 armor plate 2 with thickness of 12 mm after penetration (Above) compared with simulated plates of mild steel with thickness of 12 mm determined by M.A. Iqbal et al. (Below) [1].

4. Conclusion

The simulation of armor plates composed of two types of materials: SKD11 at thickness 6, 8 and 10 mm and SUS304 at thickness 5, 6, 8 and 10 mm together with the use of various collision angles in the simulation at 15, 30, 45 and 60 degrees were evaluated by applying with finite element method. The simulation at 15 and 30 degrees for the collision angle on the armor plate made of the SKD11 material could be clearly detected. At thickness of 6 and 8 mm, the armor could not resist to the penetration but causing the bullet broken into small metal pieces. The armor made of SUS304 material at thickness of 5, 6, 8 and 10 mm could not resist to the penetration. The bullet was broken into large metal pieces, thus penetrating the plate. Their smaller perforating sizes were observed when the thickness of the armor plate increased. However, a thin armor plate used could change the direction of broken large bullet pieces more than a very thick armor plate. The simulations at the 45 and 60 degrees of the collision angles indicated that one type of armor plates made of SKD11 material with 8 mm thickness could resist the penetration and refract the bullets. In addition, the bullet broken into small metal piece would be slipping out along the tilt angle. The other armor plate type using SUS304 material could not resist penetration thus be damaged in the piercing area greater than those tilted at the angle of 15 and 30 degrees. Since the SUS304 plate showed more softening effect than SKD11 plate, thus allowing more bullet holding and increasing the

damage on the armor plate. The armor plates made of SKD11 material at the thickness of 10 mm could resist penetration through every degree. From the simulation of two layered stacking having tilt angle of 15 and 30 degrees and the thickness of $t_1 = 6$ mm, $t_2 = 5$ mm and $t_1 = 6$ mm and $t_2 = 6$ mm, the plates could not resist the penetration of the bullet. The results of the impact angle modification in this study are consistent with those of P. K. Gupta et al. [12] and M. A. Iqbal et al. [13]. However, the plates tilted at 45 and 60 degrees could withstand the penetration of the bullet. The armor plate having a thickness of $t_1 = 8$ mm and $t_2 = 8$ mm was all able to withstand the penetration of the 7.62 mm bullet in all angles. Therefore, the two layered plates with thickness more than $t_1 = 8$ mm and $t_2 = 8$ mm would be able to resist the penetration of the 7.62 mm bullet at 878 ± 9.1 mm in accordance with the standard measurement of NIJ 4.

5. Acknowledgement

The authors would like to express the appreciation to the National Research Council of Thailand (NRCT), National Research Policy and Strategy for the financial support according to the contract no. 47/2561 and Rajamangala University of Technology Phra Nakhon (RMUTP) for supportive facilities.

6. References

- [1] M. A. Iqbal, K. Senthil, P. Bhargava, and N. K. Gupta, "The characterization and ballistic evaluation of mild

- steel,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 78, pp. 98–113, Apr. 2015.
- [2] T. Børvik, L. Olovsson, S. Dey, and M. Langseth, “Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 38, no. 7, pp. 577–589, Jul. 2011.
- [3] T. Binar et al., “The use of numerical simulation for the evaluation of special transparent glass resistance,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 91, pp. 433–448, Sep. 2018.
- [4] B. Banerjee, “An evaluation of plastic flow stress models for the simulation of high-temperature and high-strain-rate deformation of metals,” p. 53, Dec. 2005.
- [5] M. A. Iqbal, K. Senthil, V. Madhu and N. K. Gupta, “Oblique impact on single, layered and spaced mild steel targets by 7.62 AP projectiles,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 110, pp. 26–38, Dec. 2017.
- [6] J. L. Li, L. L. Jing and M. Chen, “An FEM study on residual stresses induced by high-speed end-milling of hardened steel SKD11,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 9, pp. 4515–4520, May 2009.
- [7] N. Klangtup and P. Chartpuk, “Parameter analysis of SKD11 and SUS304 bulletproof plate that resistance penetration of bullet 7.62 mm according to standard NIJ 4 by finite element method,” *International Journal of Mechanical Engineer and Technology*, vol. 10, pp. 207–221, Sep. 2019.
- [8] A. Saicharoen, P. Tinprabath and P. Chartpuk, “Parameter Analysis that Affects the Ability to Resistance Penetration of Ammunition on the Aluminum Armor Surface Using Finite Element Method,” *RMUTP Research Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 177-191, 2022.
- [9] F. M. John, T. Jan Arild, S. Stian, B. Svien Morten, S.-E. Lasse and F. Haakon, “Development of material models for semi-brittle materials like tungsten carbide,” 09-Nov-2010.
- [10] “Steinberg-Guinan Strength.” [Online]. Available: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/enus/help/wb_sim/ds_ex_mat_steingu i.html.
- [11] K. Krishnan, S. Sockalingam, S. Bansal, and S. D. Rajan, “Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 41, no. 8, pp. 583–593, Dec. 2010.
- [12] P. K. Gupta, M. A. Iqbal, and Z. Mohammad, “Energy dissipation in plastic deformation of thin aluminum targets subjected to projectile impact,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 110, pp. 85–96, Dec. 2017.
- [13] M. A. Iqbal, A. Chakrabarti, S. Beniwal and N. K. Gupta, “3D numerical simulations of sharp nosed projectile impact on ductile targets,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, no. 2, pp. 185–195, Feb. 2010.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ผลของสารสกัดหยาบด้วยเอทานอลจากสมุนไพร 7 ชนิดต่อการไล่แมลง

อิสสรียา เอี่ยมสุวรรณ* ศราวุธ สุทธิรัตน์ ณัฐริณี หอระตะ และ ทวีพร พันธุ์พานิชย์

คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

18/18 ถนนเทพรัตน กม.18 อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540

รับบทความ 5 สิงหาคม 2564 แก้ไขบทความ 3 สิงหาคม 2565 ตอรับบทความ 16 กันยายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการไล่แมลงของสารสกัดหยาบด้วยเอทานอลจากสมุนไพร 7 ชนิด ได้แก่ เมล็ดพริกไทยดำ เหง้าข่า ใบโหระพา กาบใบตะไคร้ เปลือกผลมะนาว เปลือกผลมะกรูด และรากหนอนตายหายาก การทดลองทดสอบในพื้นที่ที่พบมดในธรรมชาติ โดยนับจำนวนมดแดงที่มอดมาเหยียบบนกระดาษกรองที่ชุบด้วยสารสกัดจากสมุนไพรที่ความเข้มข้น 0.625 1.25 2.5 และ 5 % w/v ที่เวลา 0 - 30 นาที ผลการทดลองพบว่า สารสกัดหยาบจากเหง้าข่าที่ความเข้มข้น 5 % w/v มีอัตราการไล่แมลง (% repellency; %R) ได้ดีที่สุด (%R = 94.72 ± 2.39) รองลงมาคือ กาบใบตะไคร้ (%R = 89.45 ± 3.85) รากหนอนตายหายาก (%R = 82.92 ± 4.47) และเมล็ดพริกไทยดำ (%R = 81.20 ± 5.92) โดยอัตราการไล่แมลงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มควบคุมแบบลบ (น้ำกลั่น) $P < 0.05$ เนื่องจากสารสกัดจากเหง้าข่ามีประสิทธิภาพในการไล่แมลงได้ดีที่สุด จึงนำสารสกัดหยาบจากเหง้าข่ามาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ไล่แมลงในรูปแบบสเปรย์ ครีม ขอลูก และผงโรยพบว่าสเปรย์จากเหง้าข่าที่ความเข้มข้น 5% w/v มีประสิทธิภาพในการไล่แมลงได้ดีที่สุด (%R = 100) ที่เวลา 30 นาที จากผลแบบประเมินความชอบในการใช้ผลิตภัณฑ์ไล่แมลงในรูปแบบสเปรย์ พบว่ามีความพึงพอใจโดยรวมในการใช้ผลิตภัณฑ์ระดับมาก

คำสำคัญ : สารสกัดหยาบ; สมุนไพร; การไล่แมลง

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Effect of Crude Ethanol Extracts from Seven Herbs on Ant Repellent

Issariya leamsuwan* Sarawut Suttirat Natharinee Horata and Taweebhorn Phunpanich

Faculty of Medical Technology, Huachiew Chalermprakiet University

18/18 Debaratana Road km.18, Bangplee District, Samutprakarn 10540 Thailand

Received 5 August 2021; Revised 3 August 2022; Accepted 16 September 2022

Abstract

This research aims to study the ant repellent effects of the crude ethanolic extracts from 7 herbs; *Piper nigrum* Linn., *Alpinia galanga* (L.) Willd, *Ocimum basilicum* L., *Cymbopogon citratus* Stapf, *Citrus aurantiifolia* (Christm.) Swingle, *Citrus hystrix* DC, and *Stemona collinsae* Craib. Whatman filter paper was dipped with each concentration of the crude ethanolic extracts (0.625 1.25 2.5 and 5 % w/v) and placing the bait on a treated filter paper. The experiments were conducted in the natural. The numbers of weaver ants were recorded at 0 - 30 minutes. From the results, the crude ethanolic extracts at 5% w/v of *A. galanga* was the most effective for repellent the ant, (repellent rate; %R = 94.72 ± 2.39) followed with *C. citratus* (%R = 89.45 ± 3.85), *S. collinsae* (%R = 82.92 ± 4.47), and *P. nigrum* (%R = 81.20 ± 5.92). The repellent rates of those crude ethanolic extracts were significantly difference from distilled water which use for the negative control ($P < 0.05$). The crude ethanolic extract of *A. galanga* at concentration 5% w/v was prepared as spray, cream, chalk and powder. At 30 minutes of the observation, the ethanolic extracts of *A. galanga* spray was the best ant repellent effect (%R = 100). The result from questionnaires reveals that a spray preparation was the more satisfaction for the using ant repellent products.

Keywords : Crude Extracts; Herbs; Ant Repellent

* Corresponding Author. Tel.: +668 9359 2942, E-mail Address: iss_i@yahoo.com

1. บทนำ

มดเป็นแมลงชนิดหนึ่งในวงศ์ Formicidae อันดับ Hymenoptera มีมากกว่า 15,000 ชนิด พบมากในเขตร้อน ประเทศไทยมีมดประมาณ 800-1,000 ชนิด โดยมดที่พบได้บ่อยตามแหล่งที่อยู่อาศัย ได้แก่ มดแดง มดดำ มดละเอียด มดตะนอย มดคันไฟ เป็นต้น มดสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ดีทั้งในสภาพทั่วไป ในพื้นที่เกษตรกรรมและบริเวณอาคารบ้านเรือน โดยสร้างปัญหาให้แก่มนุษย์มากมาย เช่น มดบางชนิดสามารถกัดหรือต่อยด้วยเหล็กใน ทำให้เกิดความเจ็บปวด เกิดอาการแพ้ หากมีการแพ้ที่รุนแรง อาจมีผลต่อระบบทางเดินหายใจ เช่น ทำให้แน่นหน้าอก หายใจลำบาก เป็นต้น รวมถึงเป็นแมลงทำลายศัตรูพืชทางการเกษตร ทั้งในแปลงปลูกและในโรงเก็บพืชผลทางการเกษตร หรือก่อความรำคาญและก่อความเสียหายภายในบ้านเรือน [1], [2] จากสาเหตุนี้จึงจัดเป็นแมลงศัตรูและเป็นแมลงที่มีความสำคัญทางการแพทย์ มนุษย์จึงหาวิธีกำจัดโดยใช้ยาฆ่าแมลงหรือสารเคมี เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ใช้สะดวก ให้ผลเร็ว ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ไล่และกำจัดมดวางจำหน่ายหลากหลายรูปแบบ ส่วนใหญ่ผลิตจากสารเคมีต่างๆ ซึ่งเป็นสารที่สามารถออกฤทธิ์ในการกำจัดมดและแมลงได้ดีและมีประสิทธิภาพสูง แต่มีผลทำให้มีการปนเปื้อนสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมด้วย [3], [4]

จากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่ามีการนำสมุนไพรที่มีสรรพคุณในการไล่และกำจัดแมลงมาใช้อย่างแพร่หลาย เช่น สารสกัดจากตะไคร้ สะระแหน่ โหระพา กะเพรา ขิง ข่า ขมิ้น กระเทียม มะกรูด มะนาว กระชาย พริกไทยดำ สะพลู สะเดา กานพลู และหนอนตายหยาก เป็นต้น [5]-[15] ดังนั้นการนำสมุนไพรมาใช้ในการไล่มดจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยลดการใช้สารเคมีและเพิ่มความปลอดภัยต่อผู้ผลิต ผู้บริโภค และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ทางคณะผู้วิจัยมีความสนใจที่จะนำสารสกัดจากพืชสมุนไพรที่มีอยู่ในครัวเรือน และหาได้ง่ายในท้องถิ่น

มาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการไล่มด และพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาและวิจัยในครั้งนี้ได้ผ่านการรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ เลขที่รับรอง อ.846/2562

2.1 สมุนไพรและการสกัดสมุนไพร

สมุนไพรที่ใช้ในการทำวิจัย ได้แก่ เมล็ดพริกไทยดำ (*Piper nigrum* Linn.) เหง้าข่า (*Alpinia galanga* (L.) Willd.) ใบโหระพา (*Ocimum basilicum* L.) กาบใบตะไคร้ (*Cymbopogon citratus* Stapf) เปลือกผลมะนาว (*Citrus aurantiifolia* (Christm.) Swingle) เปลือกผลมะกรูด (*Citrus hystrix* DC.) และรากหนอนตายหยาก (*Stemona collinsae* Craib) (ได้มีการพิสูจน์เอกลักษณ์ของพืชโดย ภาควิชาเภสัชเคมีและเภสัชเวท คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ) ล้างพืชสมุนไพรสดให้สะอาดด้วยน้ำเปล่า ผึ่งให้แห้งในที่ร่ม หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นนำเข้าสู่อบ (Memmert® ประเทศเยอรมันนี) เพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วบดด้วยเครื่องบดย่อย (Retsch Mühle® ประเทศเยอรมันนี) จนได้เป็นผงแห้ง นำไปหมักด้วยเอทานอล 95% (Alcoh-A® บริษัท Apex Alco ประเทศไทย) ในอัตราส่วนผงพืช 1 ส่วน ต่อ เอทานอล 95% 8 ส่วน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง นำสารสกัดที่ได้มารองผ่านกระดาษ Whatman No.1 และนำไประเหยเอทานอล 95% ออกด้วยเครื่องระเหยแห้งแบบหมุนชนิดสุญญากาศ (Vacuum Rotary Evaporator Buchi Rotavapor® model R-210 ประเทศสวิสเซอร์แลนด์) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นนำสารสกัดหยาบจากสมุนไพรที่ได้ไปทำให้แห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Dryer)

บันทึกน้ำหนักสารสกัดที่ได้แต่ละชนิด และเก็บในภาชนะปิดสนิทกันแสงที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียสเพื่อใช้ในการทดสอบต่อไป

2.2 การเตรียมสารสกัดหยาบจากสมุนไพร

เตรียมสารสกัดหยาบสมุนไพรโดยชั่งน้ำหนักสารสกัดหยาบด้วยเอทานอลจากสมุนไพรปริมาณ 2 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย้าสาร (Vortex Mixer) จะได้สารสกัดสมุนไพรที่ความเข้มข้น 5% w/v จากนั้นทำการเจือจางสารสกัดสมุนไพรให้มีความเข้มข้นลดลงทุกสองเท่า (Serial 2-Fold Dilution) ไปเรื่อยๆ โดยมีความเข้มข้นที่ 2.5 1.25 และ 0.625 % w/v ตามลำดับ สารละลายจากสารสกัดหยาบจากสมุนไพรจะถูกเก็บไว้ในขวดแก้วที่ป้องกันแสงเพื่อใช้ในการทดสอบต่อไป โดยสารสกัดหยาบจากสมุนไพรจะเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนนำไปใช้

2.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการไล่แมลงของสารสกัดหยาบจากสมุนไพร

นำกระดาษกรอง No.1 (Whatman, Cat. No.1001-150) มาชุบด้วยสารสกัดหยาบจากสมุนไพรที่ความเข้มข้นต่างๆ ให้ทั่วแผ่น และนำหมูป้องซึ่งใช้เป็นอาหารล่อแมลงมาวางบนแผ่นกระดาษกรองที่ชุบสารสกัดหยาบจากสมุนไพรแล้วนำไปวางในจุดที่พบแมลงตามแหล่งธรรมชาติ จากการสำรวจพื้นที่ในมหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ จากนั้นนับจำนวนแมลงที่เข้ามาตอมอาหาร โดยการจับบันทึก ถ่ายภาพจำนวนแมลงตั้งแต่เวลา 0-30 นาทีของการทดสอบ โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ต่อสารสกัดหยาบจากสมุนไพร 1 ความเข้มข้นแล้วคำนวณอัตราในการไล่แมลงของสารสกัดหยาบจากสมุนไพร (% Repellency) โดยชุดควบคุมแบบบวก (Positive Control) คือ 12% Diethyltoluamide (12% DEET) และชุดควบคุมแบบลบ (Negative Control) คือ น้ำกลั่น

วิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การไล่แมลงที่เข้ามาตอมอาหารบนแผ่นกระดาษกรองของแต่ละความเข้มข้นที่เวลา 30 นาที ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยใช้สูตรในการหา % repellency ดังสมการที่ (1)

$$\% \text{repellency} = \frac{N_c - N_t}{N_c} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

N_c = จำนวนมดบนกระดาษกรองที่ชุบน้ำกลั่น

N_t = จำนวนมดบนกระดาษกรองที่ชุบสารสกัดสมุนไพร

2.4 การเตรียมผลิตภัณฑ์ไล่แมลง (ดัดแปลงจากวิธีการของ [16])

นำสารสกัดหยาบจากสมุนไพรที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการไล่แมลงจากการทดลองในข้อ 2.3 มาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ ดังนี้

2.4.1 สเปรย์ไล่แมลง

นำสารสกัดหยาบจากสมุนไพรผสมน้ำกลั่นในอัตราส่วน 5 กรัม ต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร (ความเข้มข้น 5 % w/v) สารสกัดหยาบที่ได้จะถูกเก็บไว้ในขวดสเปรย์ที่ป้องกันแสง ปิดสนิท ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปใช้ต่อไป และจะเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนนำไปใช้

2.4.2 ครีมไล่แมลง

เตรียมครีมโดยใช้เบงกาน้ำมันสำปะหลัง 2 กรัม ผสมน้ำสะอาด 50 มิลลิลิตร คนให้เบงกาน้ำมันสำปะหลังละลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำไปเคี่ยวด้วยความร้อนต่ำ ๆ จนมีลักษณะเป็นเนื้อครีม ทิ้งให้เย็น จากนั้นนำครีมที่ได้มาผสมสารสกัดหยาบจากสมุนไพรที่เตรียมไว้ที่ความเข้มข้น 10% w/v โดยความเข้มข้นสุดท้ายคือ 5% w/v เก็บครีมที่ได้ในภาชนะที่มีฝาปิดสนิท ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2.4.3 ผงโรยไล่มด

เตรียมผงโรยโดยใช้ปูนปลาสเตอร์ 40 กรัม ผสมกับดินสอพอง 30 กรัม คลุกให้เข้ากันเติมสารสกัดหยาบจากสมุนไพรความเข้มข้น 5% w/v ลงไป 15 มิลลิลิตร จากนั้นผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ผึ่งให้แห้ง รวให้แห้งสนิท นำมาบดให้ละเอียด และเก็บใส่ภาชนะที่มีฝาปิดสนิท ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2.4.4 ขอล้ไล่มด

เตรียมขอล้โดยใช้ปูนปลาสเตอร์ 40 กรัม ผสมกับดินสอพอง 20 กรัม คลุกให้เข้ากันเติมสารสกัดหยาบจากสมุนไพรความเข้มข้น 5% w/v ลงไป 15 มิลลิลิตร จากนั้นผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำใส่แม่พิมพ์หลอด รวให้แห้งสนิท แกะขอล้ออกจากแม่พิมพ์และเก็บขอล้ไว้ในภาชนะที่มีฝาปิด ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2.5 การทดสอบผลิตภัณฑ์ไล่มด

นำผลิตภัณฑ์จากสารสกัดหยาบเหง้าข่า ความเข้มข้น 5 % w/v (หรือ 5 กรัมต่อมิลลิลิตร) ฟัน/ทา/ขีด/โรยให้เป็นวงกลมรอบแผ่นกระดาษกรอง No.1 (Whatman, Cat. No.1001-150) นำชิ้นหมูปิ้งซึ่งใช้เป็นเหยื่อล่อมดวางไว้ที่จุดกึ่งกลางของกระดาษกรอง และนำไปวางในจุดที่พบมด ซึ่งได้จากการสำรวจพื้นที่ในมหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ จากนั้นนับจำนวนมดที่เข้ามาตอมเหยื่อล่อ จัดบันทึก ถ่ายภาพจำนวนมดและพฤติกรรมของมด ที่เวลา 0 10 20 และ 30 นาที ตามลำดับ โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ต่อ 1 รูปแบบผลิตภัณฑ์ แล้วคำนวณอัตราในการไล่มดของสารสกัดหยาบเหง้าข่า (% repellency) เทียบกับการไม่ใช้สมุนไพรโดยสถิติ One-way ANOVA ใช้น้ำกลั่นเป็น Negative Control

2.6 สำรวจความชอบในการใช้ผลิตภัณฑ์ไล่มด

สำรวจความชอบในการใช้ผลิตภัณฑ์ไล่มดจากสารสกัดหยาบเหง้าข่า โดยใช้แบบประเมินความชอบของผู้ทดลองใช้ผลิตภัณฑ์ไล่มดในชุมชนบริเวณใกล้เคียง

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ จำนวน 30 คน ในแบบประเมินมีเนื้อหาครอบคลุมถึงความสะดวกในการใช้งาน ประสิทธิภาพในการไล่มด ระยะเวลาที่สามารถไล่มดได้ ความชอบในกลิ่นของผลิตภัณฑ์ ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน และความชอบโดยรวมในการใช้ผลิตภัณฑ์ ด้วยวิธีการทดสอบความชอบ 9-point Hedonic Scale (ช่วงคะแนน 1 = ไม่ชอบมากที่สุด, 2 = ไม่ชอบมาก, 3 = ไม่ชอบปานกลาง, 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย, 5 = ไม่สามารถบอกได้ว่าชอบหรือไม่ชอบ, 6 = ชอบเล็กน้อย, 7 = ชอบปานกลาง, 8 = ชอบมาก และ 9 = ชอบมากที่สุด) โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เปอร์เซ็นต์การไล่มดในแต่ละความเข้มข้นของสารสกัดหยาบจากสมุนไพร นำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการไล่มดของสารสกัดหยาบจากสมุนไพรแต่ละชนิด วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม SPSS รุ่นที่ 24 โดยใช้สถิติ One-way ANOVA ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่กำหนดความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.05$

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

คณะผู้วิจัยได้ลงพื้นที่สำรวจและเก็บข้อมูลชนิดมดในพื้นที่มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติและพื้นที่โดยรอบมหาวิทยาลัย สถานที่ที่พบมดตามต้นไม้ ใบไม้ พื้นดิน ทางเดินทั้งในอาคารและนอกอาคาร ในช่วงเดือนมีนาคม พบว่า ชนิดของมดที่พบมากที่สุดคือ มดแดง (*Oecophylla smaragdina*) รองลงมาเป็นมดดำ (*Paratrechina longicornis*) [17] และได้นำสารสกัดหยาบจากสมุนไพร 7 ชนิด ได้แก่ เมล็ดพริกไทยดำ เหง้าข่า ใบโหระพา กาบใบตะไคร้ เปลือกผลมะนาว เปลือกผลมะกรูด และรากหนอนตายหยาก ที่ความเข้มข้นต่างๆ มาทำการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการไล่มด จากผลการทดลองค่าเฉลี่ย

เปอร์เซ็นต์การไล่เมด (% repellency; %R) ของสารสกัดหยาบจากสมุนไพรพบว่า ที่ความเข้มข้น 5% w/v เมื่อทำการทดลองที่เวลา 0-30 นาที พบว่าสารสกัดหยาบเหง้าชำสามารถไล่เมดได้ดีที่สุด (%R = 94.72 ± 2.39) รองลงมาคือ สารสกัดหยาบกาบใบตะไคร้ (%R = 89.45 ± 3.85) สารสกัดหยาบรากหนอนตายหยาบ (%R = 82.92 ± 4.47) และสารสกัดหยาบเมล็ดพริกไทยดำ (%R = 81.20 ± 5.92) และสารสกัดหยาบจากสมุนไพรที่ความเข้มข้น 2.5% w/v พบว่าสารสกัดหยาบ

เหง้าชำสามารถไล่เมดได้ (%R = 69.34 ± 2.31) รองลงมาคือ สารสกัดหยาบกาบใบตะไคร้ (%R = 68.69 ± 3.50) และรากหนอนตายหยาบ ที่ความเข้มข้น 2.5 % w/v (%R = 66.84 ± 0.95) โดยไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับ กลุ่มควบคุมแบบบวก (Positive Control) 12% DEET แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มควบคุมแบบลบ (Negative Control) น้ำกลั่น $p < 0.05$ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การไล่เมดของสมุนไพร 7 ชนิด

สมุนไพร	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การไล่เมด (%repellency)				
	ความเข้มข้น (กรัมต่อมิลลิลิตร)				
	0.625	1.25	2.5	5	Positive control
เมล็ดพริกไทยดำ	37.14 ± 3.31	45.77 ± 3.66	51.18 ± 1.27	$81.20 \pm 5.92^*$	96.95 ± 2.69
เหง้าชำ	47.10 ± 2.59	61.52 ± 1.61	$69.34 \pm 2.31^*$	$94.72 \pm 2.39^*$	95.33 ± 4.04
ใบโหระพา	42.43 ± 6.13	43.97 ± 3.98	44.32 ± 2.55	48.22 ± 3.08	96.58 ± 2.96
กาบใบตะไคร้	45.83 ± 4.86	62.71 ± 4.56	$68.69 \pm 3.50^*$	$89.45 \pm 3.85^*$	95.12 ± 4.58
เปลือกผลมะนาว	28.33 ± 4.41	30.41 ± 2.52	33.14 ± 0.32	44.72 ± 1.55	95.61 ± 6.06
เปลือกผลมะกรูด	25.19 ± 2.57	28.33 ± 4.40	34.05 ± 7.76	56.23 ± 3.04	96.23 ± 6.52
รากหนอนตายหยาบ	46.84 ± 2.60	52.65 ± 3.66	$66.84 \pm 0.95^*$	$82.92 \pm 4.47^*$	96.07 ± 3.50

*P-value < 0.05

จากผลการทดลองสารสกัดหยาบเหง้าชำมีประสิทธิภาพในการไล่เมดได้ดีที่สุด จึงนำ 5% w/v สารสกัดหยาบเหง้าชำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ไล่เมด 4 รูปแบบ ได้แก่ สเปรย์ ครีม ผงโรย และขอล็กจากผลการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ทั้ง 4 รูปแบบที่มีส่วนผสมของสารสกัดหยาบเหง้าชำสามารถไล่เมดได้เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม โดยพบว่าในนาที่ที่ 30 สเปรย์มีประสิทธิภาพในการไล่เมดได้ดีที่สุด รองลงมาคือ ครีม ขอล็กและผงโรย คิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของการไล่เมดเท่ากับ 100 92.86 ± 1.15 และ 66.67 ± 1.53 ตามลำดับ โดยสเปรย์และครีมให้ผลเปอร์เซ็นต์ของการไล่เมดเท่ากับ 100 ตั้งแต่นาที่ที่ 0-30

และภายหลังจากการเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ในตู้เย็น (4 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 7 วัน พบว่าเปอร์เซ็นต์ของการไล่เมดในนาที่ที่ 30 ลดลงทุกผลิตภัณฑ์ ยกเว้นสเปรย์ที่ยังให้ผลเปอร์เซ็นต์ของการไล่เมดเท่ากับ 100 ตั้งแต่นาที่ที่ 0-30 จากผลการทดลอง พบว่าสเปรย์มีประสิทธิภาพในการไล่เมดได้ดีที่สุด รองลงมาคือ ครีม ขอล็กและผงโรย คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการไล่เมดเท่ากับ 100 82.76 ± 1.15 66.67 ± 0.71 และ 50.00 ± 0.58 ตามลำดับ แสดงว่าระยะเวลาในการเก็บผลิตภัณฑ์มีผลต่อประสิทธิภาพในการไล่เมด เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเก็บผลิตภัณฑ์นานขึ้น 7 วัน ทำให้ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เช่น สี

ความชุ่มชื้น ความคงตัว และกลิ่นจากสารสกัดหยาบเหง้า
ชำเริ่มลดลง อาจมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการไล่มด
ลดลงเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 2

จากการสำรวจความต้องการในการใช้ผลิตภัณฑ์
ไล่มด โดยใช้แบบสอบถาม และนำผลิตภัณฑ์ไล่มดจาก
สารสกัดหยาบเหง้าชำในรูปแบบสเปรย์ไปทดลองใช้ใน
พื้นที่จริง โดยทดสอบประสิทธิภาพในการไล่มดบริเวณที่
พักอาศัย และชุมชนบริเวณโดยรอบมหาวิทยาลัย
หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติจำนวน 30 แหล่ง แล้วให้ทำ

แบบสอบถามเพื่อประเมินความพึงพอใจในการใช้สเปรย์
ไล่มดจากสารสกัดหยาบเหง้าชำ พบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่
เป็นเพศหญิง 22 คน คิดเป็นร้อยละ 73.33 อายุ
อยู่ในช่วง 21-30 ปี 18 คน คิดเป็นร้อยละ 60 ลักษณะ
ที่อยู่อาศัยของกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นหอพัก/ห้องเช่า
17 คน คิดเป็น 56.67 กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ไม่เคยใช้
ผลิตภัณฑ์ไล่มด 16 คน คิดเป็นร้อยละ 53.33 และกลุ่ม
ตัวอย่างทั้ง 27 คน ไม่เคยใช้ผลิตภัณฑ์ไล่มดในรูปแบบ
สมุนไพรมาก่อน คิดเป็นร้อยละ 90

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การไล่มดของผลิตภัณฑ์ 4 รูปแบบ จากสารสกัดหยาบเหง้าชำเปรียบเทียบกับวันที่ 1 และ วันที่ 7

ผลิตภัณฑ์	เวลา (นาที)							
	วันที่ 1*				วันที่ 7			
	0	10	20	30	0	10	20	30
สเปรย์	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^b	100.00 ^b	100.00 ^b	100.00 ^b
ครีม	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^a	100.00 ^b	93.10±1.15	86.21±1.53	82.76±1.15
ขอล้ก	100.00 ^a	100.00 ^a	93.33±0.57	92.86±1.15	100.00 ^b	75.00±0.71	70.00±2.12	66.67±0.71
ผงโรย	100.00 ^a	66.67±2.08	66.67±0.58	66.67±1.53	100.00 ^b	66.67±0.58	50.00±1.15	50.00±0.58

* ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การไล่มดเปรียบเทียบในวันที่ 1 และ 7 มีความแตกต่างกัน (P -value < 0.05)

a, b ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การไล่มดเปรียบเทียบในวันที่ 1 และ 7 ไม่แตกต่างกัน (P -value < 0.05)

จากการประเมินความพึงพอใจในการใช้
ผลิตภัณฑ์ไล่มดจากสารสกัดเหง้าชำแบบสเปรย์ จาก
กลุ่มผู้ทดลองใช้สเปรย์ไล่มดจากสารสกัดหยาบเหง้าชำ
จำนวน 30 คน พบว่ามีค่าคะแนนเฉลี่ยความชอบของ
ความสะดวกในการใช้งานเท่ากับ 8.40 ± 1.75 (ชอบ
มาก) ประสิทธิภาพในการไล่มดเท่ากับ 7.97 ± 1.30
(ชอบปานกลาง) ระยะเวลาที่สามารถไล่มดได้เท่ากับ
 7.77 ± 1.20 (ชอบปานกลาง) ความชอบในกลิ่นของ
ผลิตภัณฑ์ 7.73 ± 1.34 (ชอบปานกลาง) ประโยชน์ใน
ชีวิตประจำวัน 8.37 ± 1.67 (ชอบมาก) และความพึง
พอใจโดยรวมในการใช้ผลิตภัณฑ์ 8.23 ± 1.53 (ชอบ
มาก) จากคะแนนเต็ม 9 คะแนน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คะแนนความชอบในการใช้สเปรย์ไล่มดจาก
สารสกัดหยาบเหง้าชำด้วยวิธี 9-point Hedonic Scale

ความชอบของผลิตภัณฑ์ไล่มด	คะแนนความชอบ
ความสะดวกในการใช้งาน	8.40 ± 1.75
ประสิทธิภาพในการไล่มด	7.97 ± 1.30
ระยะเวลาที่สามารถไล่มดได้	7.77 ± 1.20
ความชอบในกลิ่นของผลิตภัณฑ์	7.73 ± 1.34
ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน	8.37 ± 1.67
ความพึงพอใจโดยรวมในการใช้ ผลิตภัณฑ์	8.23 ± 1.53

จากผลการวิจัยประสิทธิภาพในการไล่มดของ
สารสกัดหยาบจากสมุนไพร 7 ชนิด ได้แก่ เมล็ด
พริกไทยดำ เหง้าชำ ใบโหระพา กาบใบตะไคร้ เปลือก

ผลมะนาว เปลือกผลมะกรูด และรากหนอนตายหยากที่ความเข้มข้น 5 2.5 1.25 และ 0.625 %w/v ตั้งแต่เวลา 0 - 30 นาที พบว่าสารสกัดหยากเหง้าชาที่ความเข้มข้น 5 %w/v มีประสิทธิภาพในการไล่ตไล่ได้ดีที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพร อาทิเช่น Camphor, Cineole, Eucalyptol, Eugenol, Menthol, Methyl Salicylate, Phenylethanol, Linalool, Cineole, α -terpineol และ L(-)-borneol มีฤทธิ์ในการไล่ตไล่คันไฟได้ [18], [19] โดย Camphor และ Cineole เป็นสารที่สามารถพบได้ในเหง้าชา ซึ่งอาจจะเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้เหง้าชามีประสิทธิภาพในการไล่ตไล่ได้ดี [20], [21] เนื่องจากชาเป็นพืชที่มีกลิ่นหอม มีสารพฤกษเคมี (phytochemical) ที่สำคัญหลายชนิด ได้แก่ d-camphor, Resins, Pinenes, Eugenol, Eugenol Methyl, Methyl Cinnamate, Pinnamate, Terpin-4 -ol, Beta- Pinine, Beta-pinene, Ganlannin, Chavicol, Trans-p-coumaryl Diacetate, Coniferyl Diacetate, p-hydroxy-trans-cinnamaldehyde, Kaemferol, quercetin, cineole ชาจึงฤทธิ์ในการไล่ตไล่และแมลงได้ จากผลการวิจัยมีรายงานว่าสารสกัดเอทานอลจากชามีประสิทธิภาพในการกำจัดเหา [22] น้ำมันหอมระเหยจากเหง้าชามีประสิทธิภาพในการป้องกันกำจัดด้วงงวงข้าวโพด [23] และไล่มอดยาสูบได้ดี [24] นอกจากนี้ชายังมีคุณสมบัติทางเภสัชวิทยาอื่นๆ ได้แก่ มีฤทธิ์ต้านเชื้อรา ต้านการอักเสบ ต้านอนุมูลอิสระ ต้านเบาหวาน ต้านมะเร็ง ต้านการเกิดหนองในแผล และมีคุณสมบัติเป็นสารปรับสมดุลทางภูมิคุ้มกันได้อีกด้วย [25]

จากผลการวิจัยของคมคาย พฤษการและคณะ ทำการศึกษารูปแบบของผลิตภัณฑ์ไล่ตไล่ละเอียด (*Monomorium pharaonis*) ที่อยู่ตามธรรมชาติ จากสารสกัดหญ้าหวาน 4 รูปแบบ ประกอบด้วย ขอล็ก ยาป้าย สเปรย์ และผงโรย พบว่ารูปแบบของผลิตภัณฑ์สารสกัดหญ้าหวานรูปแบบของสเปรย์และยาป้ายไล่ตไล่จะ

สามารถไล่ตไล่ได้ดีกว่าแบบขอล็กและผงโรย [16] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยครั้งนี้ พบว่าผลิตภัณฑ์ไล่ตไล่จากสารสกัดหยากเหง้าชาที่ความเข้มข้น 5% w/v ในรูปแบบสเปรย์มีประสิทธิภาพในการไล่ตไล่ได้ดีที่สุด (%R = 100) ที่เวลา 30 นาที รองลงมาเป็น ครีม ขอล็กและผงโรย ตามลำดับ และจากการประเมินความพึงพอใจในการใช้ผลิตภัณฑ์ไล่ตไล่จากสารสกัดหยากเหง้าชาแบบสเปรย์ไปทดลองใช้ในพื้นที่จริงบริเวณที่พักอาศัยและชุมชนบริเวณรอบมหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ จำนวน 30 แห่ง พบว่ามีค่าคะแนนเฉลี่ยความชอบของความสะดวกในการใช้งานเท่ากับ 8.40 ± 1.75 (ชอบมาก) ประสิทธิภาพในการไล่ตไล่เท่ากับ 7.97 ± 1.30 (ชอบปานกลาง) ระยะเวลาที่สามารถไล่ตไล่ได้เท่ากับ 7.77 ± 1.20 (ชอบปานกลาง) ความชอบในกลิ่นของผลิตภัณฑ์ 7.73 ± 1.34 (ชอบปานกลาง) ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน 8.37 ± 1.67 (ชอบมาก) และความพึงพอใจโดยรวมในการใช้ผลิตภัณฑ์ 8.23 ± 1.53 (ชอบมาก) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของศนิพร จันทร์บุรี และคณะในงานวิจัยของพัฒนาผลิตภัณฑ์สเปรย์ไล่แมลงจากสารสกัดสมุนไพรโดยใช้เทคโนโลยีการกักเก็บสารสำคัญในอนุภาคนาโนเบื้องต้นพบว่าประสิทธิภาพไล่แมลงสาบได้ดีและศึกษาความชอบของผู้บริโภคในคุณลักษณะต่างๆ คือ ความชอบโดยรวม ลักษณะปรากฏ สี ลักษณะเนื้อสัมผัส และกลิ่น พบว่าผู้บริโภคมีความชอบโดยรวมในตัวผลิตภัณฑ์สเปรย์อยู่ในระดับชอบปานกลาง (7.0 ± 0.6 คะแนน จากคะแนนเต็ม 9 คะแนน) [26]

4. สรุป

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการไล่ตไล่ของสารสกัดหยากจากสมุนไพร พบว่าสารสกัดหยากจากเหง้าชาความเข้มข้น 5 %w/v มีประสิทธิภาพดีสามารถไล่ตไล่ได้ดีที่สุดจากสมุนไพร 7 ชนิด โดยมีอัตราการไล่ตไล่ได้ดีที่สุด (%R = 94.72 ± 2.39) ที่เวลา 0 - 30 นาที

จึงนำสารสกัดหยาบจากเหง้าข่ามาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ไล่มดในรูปแบบสเปรย์ ครีม ขอล็ก และผงโรย จากการทดลองพบว่าสเปรย์จากเหง้าข่าที่ความเข้มข้น 5% w/v มีประสิทธิภาพในการไล่มดได้ดีที่สุด (%R = 100) ที่เวลา 30 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับผลการเก็บผลิตภัณฑ์ไว้เป็นเวลา 7 วัน พบว่าสเปรย์จากเหง้าข่ายังคงมีประสิทธิภาพในการไล่มดได้ดี (%R = 100) ที่เวลา 30 นาที รองลงมาเป็น ครีม ขอล็กและผงโรย ตามลำดับ และจากผลการประเมินความชอบของกลุ่มผู้ทดลองใช้ ผลิตภัณฑ์ไล่มดในรูปแบบสเปรย์ พบว่าความชอบด้านความสะดวกในการใช้งาน ความพึงพอใจโดยรวมในการใช้ผลิตภัณฑ์และเห็นว่าผลิตภัณฑ์นี้มีประโยชน์ในชีวิตประจำวันอยู่ในระดับมาก ส่วนความชอบด้านประสิทธิภาพและระยะเวลาในการไล่มด รวมถึงกลิ่นของผลิตภัณฑ์อยู่ในระดับปานกลาง นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้สามารถสนับสนุนและส่งเสริมการใช้สมุนไพรพื้นบ้านที่สามารถปลูกได้เองและหาได้ง่ายในท้องถิ่น ราคาไม่แพงและมีความปลอดภัย โดยนำผลการวิจัยที่ได้มาต่อยอดและพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สมุนไพรไล่มดในรูปแบบสเปรย์ที่มีฤทธิ์ในการไล่มด ทดแทนการใช้และลดการสะสมของสารเคมี โดยไม่เป็นอันตรายต่อผู้ผลิต ผู้ใช้ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ผู้ให้การสนับสนุนงบประมาณทุนวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาเภสัชเคมีและเภสัชเวท คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของพืช อาจารย์และเจ้าหน้าที่คณะเทคนิคการแพทย์ที่สนับสนุนสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ในการทำวิจัยชิ้นนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Burikham, "Housing Enemies," Bangkok: Kasetsart University Press, pp. 17, 2013.
- [2] K. Chaithap, "Diversity and abundance of ants in Melaleuca forest," research report, 2014.
- [3] Department of Pharmacology, Faculty of Veterinary Medicine. Insecticides. Department of Pharmacology, Faculty of Veterinary Medicine, Kasetsart University. Bangkok, Thailand [Online] . Available: <http://www.pharmaco.vet.ku.ac.th>
- [4] R. Sapbamrer, "Pesticides and health effects," Bangkok: Odian Store, 2014.
- [5] P. Limthong, N. Iathip, and S. Buakhaosutthikul, "Study of plant extracts for chasing ants," research report, 2012.
- [6] K. Hutapat, "Natural insecticides," *Natural Agriculture*, vol. 10, pp. 58-59, 2009.
- [7] K.L. Sukontason, N. Boonchu, K. Sukontason, and W. Choochote, "Effect of eucalyptol on house fly (diptera: Muscidae) and blow fly (diptera: Calliphoridae)," *Rev Inst Med trop S Paulo*, vol. 46, no. 2, pp. 97-101, 2004.
- [8] P. Kunhachan, J. Chompoonsri, P. Bhakdeenuan, L. thiamsing, P. Mukkhun, P. Sirisopa, et al., "Efficacy of eight essential oils against housefly, *Musca domestica*," *Journal of Health Science*, vol. 27, no. 2, pp. 364-375, 2018.
- [9] N. Rajan, "Orientational effect of aqueous leaf extract of *Citrus aurantifolia* on house fly, *Musca domestica* (Diptera: Muscidae)," in *Proceedings of 2 nd International*

- Conference on Agriculture and Forestry, ICOAF – 2015*; Jun 10-12; Colombo, Sri Lanka; 2015, pp. 90-94.
- [10] P. Kumar, S. Mishra, A. Malik, and S. Satya, "Housefly (*Musca domestica* L.) control potential of *Cymbopogon citratus* Stapf. (Poales: Poaceae) essential oil and monoterpenes (citral and 1,8-cineole)," *Parasitol Res*, vol. 112, no. 1, pp. 69-76, 2013.
- [11] J. Nararak, S. Sathantriphop, M. Kongmee, M.J. Bangs, and T. Chareonviriyaphap, "Excito-repellency of *Citrus hystrix* DC leaf and peel essential oils against *Aedes aegypti* and *Anopheles minimus* (Diptera: Culicidae), Vectors of Human Pathogens." *J MedEntomol*, vol. 54, no. 1, pp. 178-186, 2017.
- [12] D. Fabbro, and N. Fabbro, "Repellent effect of sweet basil compounds on *Ixodes ricinus* ticks," *Exp Appl Acarol*, vol. 45, no. 3-4, pp. 219-228, 2008.
- [13] A. Jaisamak, and K. Khumsap. "Effective ethanol extract from medicinal plants eliminates jackbydley flour aphids," *Kaen Kaset*, vol. 42, no. 1, pp. 524-529, 2014.
- [14] W. Sornpeng, S. Pimsamarn, and C. Aromdee, "Insecticidal Activity of *Stemona tuberosa* Lour Extract," *KKU Res J*, vol. 14, no. 2, pp. 112-122, 2019.
- [15] K. Khoployklang, and J. Khoployklang, "Effect of dried extract of neem seeds (*Azadirachta* sp.), *Annona* sp.), Rootworm root (*Stemona* sp.) And derris sp. Death of larvae, flies, larvae, mosquitoes, mosquitoes, and cattle ticks," *RMUTSV Res. J*, vol. 6, no. 1, pp. 39-47, 2014.
- [16] K. Pruksakorn, S. Nonthapha, S. Sarobol, S. Nonthapha, and M. Sutthajit, "Development of ant repellent products from stevia extract," *Naresuan Phayao Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 110-117, 2014.
- [17] I. leamsuwan, S. Suttirat., N. Horata, and T. Phunpanich, "Survey of Ants and the Requirement of Using Ant-Repellent around Huachiew Chalermprakiet University, Bang Phli District, Samut Prakan Province," in *Proceeding of the 8th HCU National and International Conference*; 25th June 2021; Huachiew Chalermprakiet University, Samutprakarn, Thailand, 2021, pp. 1174-1184.
- [18] J. Chen, "Repellency of an over-the-counter essential oil product in China against workers of red imported fire ants," *J agric food chem*, vol. 57, pp. 618-622, 2009.
- [19] N. Zhang, L. Tang, W. Hu, K. Wang, Y. Zhou, and H. Li, "Insecticidal, fumigant and repellent activities of sweet wormwood oil and its individual components against red imported fire ant workers (Hymenoptera: Formicidae)," *J Insect Sci*, vol. 14, no. 241, pp. 1-6, 2014.

- [20] K. Wang, L. Tang, N. Zhang, Y. Zhou, W. Li, H. Li, et al, "Repellent and fumigant activities of *E. globulus* and *A. carvifolia* essential oils against *S. invicta*. *B. Insectol*," *Bulletin of Insectology*, vol. 67, no. 2, pp. 207-211, 2014.
- [21] J.T. Fu, "Fumigant toxicity and repellence activity of camphor essential oil from *C. camphora siebold* against *S. invicta* workers (Hymenoptera : Formicidae)," *J Insect Sci*, vol. 15, no. 1, pp. 129, 2015.
- [22] C. Chutaen, P. Lauprasert, and A. Tawatsin, "Efficacy of Turmeric, Ginger, Galangal and Fingerroot for Controlling Head Louse Infestation," *KKU-JPHR*, vol. 4, no. 3, pp. 41-50, 2011.
- [23] S. Thongkum, "Effect of Four Herbal Plant Volatile Oil and Powder on the Maize Weevil (*Sitophilus zeamais* Motschulsky) Control During Storage of Organic Brown Rice, Variety Khao Dawk Mali 105," M.S. Thesis, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand 2016.
- [24] Y. Wu, Y. Wang, Z.H. Li, C.F. Wang, J.Y. Wei, X.L. Li, et al, "Composition of the essential oil from *A. galangal* rhizomes and its bioactivity on *L. serricorne* *B. insectol*," *Bulletin of Insectology*, vol. 67, no. 2, pp. 247-254, 2014.
- [25] A. Chouni, and S. Paul, "A review on phytochemical and pharmacological potential of *A. galangal*," *Pharmacogn J*, vol. 10, no. 1, pp. 9-15. 2018.
- [26] S. Chanburee, T. Kitpot, K. Promjeen, and W. Likittrakulwong, "Development of insect repellent spray containing herb extracts using nanoencapsulation technology," *khon kaen agr J*, vol. 48, suppl. 1 , pp. 353-360, 2020.

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

RMUTP RESEARCH JOURNAL

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร เป็นวารสารสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่และถ่ายทอดผลงานวิจัยและผลงานวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ซึ่งอยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index Centre, TCI Centre) กำหนดการตีพิมพ์เผยแพร่ ปีละ 2 ฉบับ (ราย 6 เดือน) ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน และฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม โดยรับพิจารณาบทความทั้งที่เป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีกรอบของวารสารที่ครอบคลุมในสาขาวิชาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์ประยุกต์ และวิศวกรรมศาสตร์ ทั้งนี้บทความดังกล่าวผู้เขียนต้องไม่เสนอบทความฉบับเดียวกันกับที่เคยตีพิมพ์ในวารสารอื่นมาก่อน เว้นแต่ผ่านการเรียบเรียงและเพิ่มเนื้อหาใหม่ บทความแต่ละบทความต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิที่ตรงตามสาขาของบทความนั้นอย่างน้อย 2 ท่าน และผู้ทรงคุณวุฒิต้องมาจากหน่วยงานที่ต่างกันกับผู้เขียน อีกทั้งผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความเดียวกันนั้นจะต้องมาจากหน่วยงานที่ต่างกันด้วย ซึ่งจัดประเภทของการ Peer Review เป็นแบบ Double Blinded หมายถึง ผู้ทรงคุณวุฒิจะไม่ทราบชื่อผู้เขียน และผู้เขียนจะไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย มีเนื้อหาสำคัญที่อธิบายถึงระเบียบวิธีวิจัย ผลการทดลอง การวิเคราะห์ผล และการสรุปผลที่ชัดเจน

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. Literature review เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลายๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง
2. Technical paper เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ใหม่ๆ
3. Professional practice เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน
4. Policy paper เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่างๆ ของหน่วยงาน

2. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

2.1 บทความวิจัย

ก. ส่วนปก ให้แยกออกเป็น 2 หน้า โดยปกหน้าแรกเป็นภาษาไทย และปกหน้าที่สองเป็นภาษาอังกฤษ โดยแต่ละปกหน้าต้องจบในหน้าหนึ่งของตัวเอง ประกอบด้วย

1. ชื่อบทความ (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้นกะทัดรัด ชี้ถึงเป้าหมายหลักของการวิจัย
2. ชื่อผู้เขียนทุกท่าน (Authors) ให้ระบุเฉพาะชื่อ และ นามสกุล โดยไม่ต้องมีคำนำหน้านาม
3. หน่วยงาน/สังกัด และที่อยู่ สำหรับการติดต่อทางไปรษณีย์ ของผู้เขียนทุกท่าน
4. ตัวเลขยก ให้เขียนไว้บนนามสกุล เพื่อระบุว่าเป็นตำแหน่งทางวิชาการและที่อยู่ของผู้เขียนท่านใด

5. **บทคัดย่อ (Abstract) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ** ควรสั้นตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลและการวิจารณ์ เป็นต้น
6. **คำสำคัญ (Keywords) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ** เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถนำไปใช้เป็นคำสืบค้นในระบบฐานข้อมูล ประมาณ 3-5 คำ
7. **ผู้พิมพ์ประสานงาน (Corresponding Author)** ให้ทำเครื่องหมาย * ไว้บนนามสกุล และระบุหมายเลขโทรศัพท์ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (E-mail)

ข. ส่วนเนื้อหา ประกอบด้วย

1. **บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนของความสำคัญและมูลเหตุที่นำไปสู่การวิจัย พร้อมวัตถุประสงค์และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. **ระเบียบวิธีวิจัย (Research Methodology) หรือ วิธีการทดลอง (Experimental Methods)** เป็นการอธิบายวิธีการดำเนินการวิจัย การทดลอง อุปกรณ์ เครื่องมือ การติดตั้งและการวัดค่าต่างๆ
3. **ผลการทดลองและวิจารณ์ผล หรือ ผลการศึกษาและอภิปรายผล (Results and Discussion)** ควรเสนอผลอย่างชัดเจน ตรงประเด็น เป็นผลที่ค้นพบโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาพร้อมการวิจารณ์ผล
4. **สรุป (Conclusion)** สรุปสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
5. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการระบุแหล่งทุนสนับสนุนการวิจัย (ถ้ามี) และการระบุหน่วยงานหรือบุคคลที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือการทำวิจัย
6. **เอกสารอ้างอิง (References)** ต้องใช้ตามแบบที่วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร กำหนดอย่างเคร่งครัดและเขียนเอกสารอ้างอิง เฉพาะเอกสารที่นำมาอ้างอิงในเนื้อหาเท่านั้น

2.2 บทความวิชาการ

ก. ส่วนปก มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย

ข. ส่วนเนื้อหา ประกอบด้วย

1. **บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนของที่มาและมูลเหตุของการเขียนบทความ
2. **ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (Results)** เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ
3. **สรุป (Conclusion)** สรุปสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
4. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการระบุแหล่งทุนสนับสนุนการวิจัย (ถ้ามี) และการระบุหน่วยงานหรือบุคคลที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือการทำวิจัย
5. **เอกสารอ้างอิง (References)** ใช้รูปแบบที่วารสารฯ กำหนดอย่างเคร่งครัดและเขียนอ้างอิงเฉพาะเอกสารที่ปรากฏในบทความเท่านั้น

3. รูปแบบการพิมพ์บทความ

ให้ใช้ไฟล์รูปแบบบทความ (Template Form) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <http://journal.rmutp.ac.th/> โดยไฟล์รูปแบบบทความมีการตั้งค่านำกระดาษแล้ว ดังนี้

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
ระยะขอบ	ขอบบน (Top Margin) 2.50 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.00 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.00 ซม. ขอบขวา (Right Margin) 2.00 ซม.	ขอบบน (Top Margin) 2.50 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.00 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.00 ซม. ขอบขวา (Right Margin) 2.00 ซม.
ขนาดกระดาษ	ขนาดกระดาษ A4 (กำหนดเอง) ความกว้าง 19 ซม. ความสูง 27 ซม.	ขนาดกระดาษ A4 (กำหนดเอง) ความกว้าง 19 ซม. ความสูง 27 ซม.
เค้าโครง	หัวกระดาษและท้ายกระดาษ เลือกหน้าคู่และหน้าคี่ต่างกัน หน้าแรกต่างกัน จากขอบหัวกระดาษ และ ท้ายกระดาษ ตั้งค่า 1.25	หัวกระดาษและท้ายกระดาษ เลือกหน้าคู่และหน้าคี่ต่างกัน หน้าแรกต่างกัน จากขอบหัวกระดาษ และ ท้ายกระดาษ ตั้งค่า 1.25
รูปแบบตัวอักษร	TH SarabunPSK	Times New Roman
หมายเลขหน้า	ตำแหน่ง ด้านบน ไม่แสดงหมายเลขหน้าในหน้าแรก หน้าคี่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนขวา หน้าคู่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนซ้าย ขนาดตัวอักษร 14	ตำแหน่ง ด้านบน ไม่แสดงหมายเลขหน้าในหน้าแรก หน้าคี่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนขวา หน้าคู่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนซ้าย ขนาดตัวอักษร 14
การย่อหน้า	ส่วนปก ย่อ 1.00 ซม. ส่วนเนื้อหา ย่อ 1.00 ซม.	ส่วนปก ย่อ 1.00 ซม. ส่วนเนื้อหา ย่อ 1.00 ซม.
จำนวนหน้าทั้งหมด	8-12 หน้า	8-12 หน้า
ชื่อวารสาร (ภาษาไทย)	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคู่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา เอียง) “วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ x ฉบับที่ x...xxxx-xxxx,xxx”	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคู่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา เอียง) “วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ x ฉบับที่ x...xxxx-xxxx,xxx”
ชื่อวารสาร (ภาษาอังกฤษ)	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคี่ ขนาด ตัวอักษร 14 (ตัวหนา) “RMUTP Research Journal, Vol., No.,xxxx-xxxx,xxx”	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคี่ ขนาด ตัวอักษร 14 (ตัวหนา) “RMUTP Research Journal, Vol., No.,xxxx-xxxx,xxx”
การพิมพ์ส่วนปก	พิมพ์เต็มหน้ากระดาษ (พิมพ์ 1 คอลัมน์)	พิมพ์เต็มหน้ากระดาษ (พิมพ์ 1 คอลัมน์)
การพิมพ์ส่วนเนื้อหา	พิมพ์ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์กว้าง 7.1 ซม. ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.8 ซม.	พิมพ์ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์กว้าง 7.1 ซม. ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.8 ซม.
ชื่อบทความ	ทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษพิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 22 ตัวตรงหนา จัดชิดขอบ ซ้ายหน้ากระดาษ	ชื่อภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 16 ตัวตรงหนา จัดชิดขอบซ้าย หน้ากระดาษ
ชื่อผู้เขียน	ทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 18 ตัวตรงไม่หนา จัดชิด ขอบซ้ายหน้ากระดาษ	ชื่อภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 12 ตัวตรง ไม่หนา จัดชิดขอบซ้าย หน้ากระดาษ
ตัวเลขยกบนนามสกุล	ขนาดตัวอักษรเท่ากับชื่อและนามสกุล แต่ทำเป็น ตัวยก	ขนาดตัวอักษรเท่ากับชื่อและนามสกุล แต่ทำเป็น ตัวยก
หน่วยงาน/สังกัด และที่อยู่	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาดตัวอักษร 14	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาดตัวอักษร 11

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
ชื่อบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 20 (ตัวตรง หนา) จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ
เนื้อหาบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาดตัวอักษร 14	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาดตัวอักษร 12
ชื่อคำสำคัญ	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 14 (ตัวหนา)	ภาษาอังกฤษ ด้วย Times New Roman ขนาด 12 (ตัวหนา)
คำสำคัญ	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 ตัวตรง บาง ใส่เครื่องหมาย Semicolon (;) ระหว่างคำ	ด้วย Times New Roman ขนาด 12 ตัวตรง บาง ใส่เครื่องหมาย Semicolon (;) ระหว่างคำ
ชื่อผู้สนับสนุนประสานงาน หมายเลขโทรศัพท์ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 13 (ตัวเอียง หนา)	ด้วย Times New Roman ขนาด 10 (ตัวเอียง หนา)
ชื่อหัวเรื่องใหญ่	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 18 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย ประกอบด้วย 1.บทนำ 2.วิธีการทดลอง หรือ วิธีการศึกษา 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลหรือ ผลการศึกษาและอภิปรายผล 4. สรุป 5. กิตติกรรมประกาศ และ 6. เอกสารอ้างอิง	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย ประกอบด้วย 1.Introduction 2. Research Methodology 3. Results and Discussion 4. Conclusion 5. Acknowledgement and 6. References
ชื่อหัวเรื่องรอง	TH SarabunPSK ขนาด 16 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย	Times New Roman ขนาด 12 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย
ชื่อหัวเรื่องย่อย	TH SarabunPSK ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย	Times New Roman ขนาด 12 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย
เนื้อหาบทความ	TH SarabunPSK ขนาด 14	Times New Roman ขนาด 12
ชื่อตาราง	TH SarabunPSK 14 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “ตารางที่” ต้องเป็นตัวหนา จัดชิดขอบซ้าย	Times New Roman 12 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “Table 1” ต้องเป็นตัวหนา จัดชิดขอบซ้าย
ชื่อรูป	TH SarabunPSK 14 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “รูปที่” ต้องเป็นตัวหนา จัดกึ่งกลางคอลัมน์	Times New Roman 12 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “Fig.1.” ต้องเป็นตัวหนา จัดกึ่งกลางคอลัมน์
สมการ	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 สัญลักษณ์หรือตัวแปรที่เขียนในสมการ จะต้องมีรูปแบบเดียวกันกับสัญลักษณ์หรือตัวแปรที่อยู่ในคำอธิบายหรือในเนื้อหา และให้จัดชิดขอบซ้ายสุดเสมอ ส่วนเลขบอกลำดับสมการ ให้เขียนลำดับเลขไว้ในวงเล็บ และจัดชิดขวาสุด	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 สัญลักษณ์หรือตัวแปรที่เขียนในสมการ จะต้องมีรูปแบบเดียวกันกับสัญลักษณ์หรือตัวแปรที่อยู่ในคำอธิบายหรือในเนื้อหา และให้จัดชิดขอบซ้ายสุดเสมอ ส่วนเลขบอกลำดับสมการ ให้เขียนลำดับเลขไว้ในวงเล็บ และจัดชิดขวาสุด
คำอธิบายตัวแปรจากสมการ	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 จัดชิดขอบซ้ายสุด เครื่องหมาย “=” ของตัวแปรในแต่ละบรรทัด ต้องตรงกันในแนวดิ่ง	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 จัดชิดขอบซ้ายสุด เครื่องหมาย “=” ของตัวแปรในแต่ละบรรทัด ต้องตรงกันในแนวดิ่ง

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
เนื้อหาในตาราง / แผนภูมิ	TH SarabunPSK 12 ตัวบาง	Times New Roman 10 ตัวบาง
การอ้างอิงในเนื้อเรื่องและการอ้างอิงท้ายเรื่อง	ให้ดูจากข้อที่ 5. การอ้างอิง	ให้ดูจากข้อที่ 5. การอ้างอิง

4. การส่งต้นฉบับบทความ

การส่งต้นฉบับบทความ ผู้เขียนสามารถส่งบทความออนไลน์ ได้ที่ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/RMUTP/index> หรือสอบถามข้อมูลได้ที่ กองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร 399 ถนนสามเสน แขวงวชิรพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300 โทรศัพท์ 0 2665 3777 ต่อ 6645 โทรสาร 0 2665 3860

5. จริยธรรม บทบาท และหน้าที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จัดทำวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้หลักธรรมาภิบาลและเคร่งครัดในด้านจริยธรรม บทบาท และหน้าที่ต่อสังคมอย่างแท้จริง มีการ แต่งตั้งกองบรรณาธิการภายในและภายนอกโดยผู้บริหารสูงสุดของมหาวิทยาลัย กำหนดหน้าที่และความรับผิดชอบอย่างชัดเจน สามารถปฏิบัติงานได้อย่างโปร่งใสและมีความเป็นอิสระในการพัฒนาวารสารให้ก้าวหน้าและมีคุณภาพ การจัดทำวารสารเป็นการเชื่อมต่อบุคคลหรือกลุ่มบุคคล 3 ส่วน ประกอบด้วย 1) ผู้เขียน 2) บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสาร และ 3) ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ภายใต้การตรวจสอบ คุณภาพวารสารโดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) ทั้งนี้เพื่อให้วารสารมีคุณภาพเป็นไปตามหลักสากล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จึงได้กำหนดจริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้เขียน บรรณาธิการ และกองบรรณาธิการวารสาร และผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ไว้ดังต่อไปนี้

5.1 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้เขียน

5.1.1 บทความที่ผู้เขียนยื่นเข้ามายังวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร เพื่อให้พิจารณานั้น จะต้องไม่ไปยื่นต่อวารสารอื่นใดในคราวหรือเวลาเดียวกัน เว้นแต่ไม่ผ่านการพิจารณาและได้รับเอกสารยืนยันผลการพิจารณาจากกองบรรณาธิการแล้ว จึงจะสามารถดำเนินการยื่นต่อวารสารอื่นใดได้

5.1.2 ผู้เขียนต้องไม่ทำการคัดลอกผลงานทางวิชาการของผู้เขียนอื่น และไม่ตีพิมพ์ซ้ำผลงานของตนเอง (Self-Plagiarism) ไม่ลักลอกผลงานของตนเอง สำหรับข้อมูลอื่นใดของผู้เขียนอื่นที่ผู้เขียนนำมาใช้ในบทความจะต้องทำการเขียนอ้างอิงในส่วนเนื้อหาของเนื้อหาและอ้างอิงส่วนท้ายให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ

5.1.3 ผู้เขียนจะต้องนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง การวิเคราะห์ หรือการคำนวณอย่างตรงไปตรงมา ไม่บิดเบือนข้อมูล (Fabrication or Misrepresentation) จากความเป็นจริงและไม่สร้างหลักฐานเท็จเพื่อรองรับผลลัพธ์ของตนเอง

5.1.4 ผู้เขียนจำเป็นต้องกล่าวคำขอบคุณบุคคลหรือหน่วยงานไว้ในกิตติกรรมประกาศ หากผู้เขียนได้รับทุนวิจัยความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ หรือช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งความสำเร็จของบทความฉบับนั้น ๆ

5.1.5 วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ไม่อนุญาตให้เพิ่มเติมบุคคลอื่นใดที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้อง เข้ามา

ชื่ออยู่ในบทความ เช่น ไม่มีส่วนร่วมในการทำวิจัย หรือไม่มีส่วนร่วมในการเขียนบทความนั้น ๆ โดยผู้เขียนทุกท่านที่มีชื่อในบทความจะต้องมีส่วนร่วมรับผิดชอบ

5.2 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของบรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสาร

5.2.1 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร มีบทบาทและหน้าที่ในการพิจารณาบทความเบื้องต้นก่อนรับเข้าสู่กระบวนการของวารสาร ประกอบด้วย การพิจารณาเนื้อหาบทความกับกรอบของวารสาร การพิจารณารูปแบบการเขียนบทความ การพิจารณาความเข้มข้นของบทความ การลบลอกผลงานทางวิชาการ การเลือกและกำหนดผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ และพิจารณาคุณภาพโดยรวมของบทความ ก่อนเข้าสู่กระบวนการประเมินบทความต่อไป

5.2.2 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องพิจารณาบทความเบื้องต้นบนพื้นฐานคุณธรรมและจริยธรรม โดยไม่เอนเอียงหรือใช้ความรู้สึกส่วนตัวพิจารณาบทความนั้น ต้องไม่มีอคติต่อผู้เขียนหรือต่อหน่วยงาน ของผู้เขียน

5.2.3 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องกำหนดหรือเลือกผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความที่มีความเชี่ยวชาญตรงตามสาขาของบทความนั้น ๆ โดยผู้ทรงคุณวุฒิที่กำหนดนั้นจะต้องไม่มาจากหน่วยงานเดียวกันกับผู้เขียนและผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความทุกท่านที่ประเมินบทความเดียวกันจะต้องไม่มาจากหน่วยงานเดียวกันด้วย ทั้งนี้เพื่อป้องกันผลประโยชน์ทับซ้อนที่อาจเกิดขึ้น

5.2.4 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องเก็บรักษาความลับเกี่ยวกับผู้เขียนและผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ไม่ให้ทราบข้อมูลซึ่งกันและกัน หมายความว่า ผู้ทรงคุณวุฒิที่เป็นผู้ประเมินบทความจะต้องไม่ทราบชื่อผู้เขียนและชื่อหน่วยงาน และผู้เขียนจะต้องไม่ทราบชื่อและหน่วยงานผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ (ประเภทของ Peer Review เป็นแบบ Double Blinded) เพื่อป้องกันปัญหาความขัดแย้งที่อาจเกิดขึ้นได้

5.2.5 บรรณาธิการ กองบรรณาธิการ ที่ปรึกษาวารสาร รวมทั้งผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการจัดทำวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ต้องไม่ตีพิมพ์บทความของตนเองลงในวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ที่กำกับดูแลอยู่โดยไม่มีข้อยกเว้น

5.2.6 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ต้องไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนใด ๆ อันไม่ชอบธรรมและผิดหลักจริยธรรมกับผู้เขียน และกับผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ โดยต้องไม่มีการเรียกรับผลประโยชน์ใด ๆ ทั้งสิ้น

5.2.7 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องควบคุมและกำกับกระบวนการต่าง ๆ ของวารสารอย่างตรงไปตรงมา ไม่เข้าข้างผู้เขียนใด หรือให้ความช่วยเหลือที่ไม่ถูกต้อง ผิดหลักคุณธรรม จริยธรรมและขาดธรรมาภิบาล

5.2.8 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีหน้าที่ต้องให้ความร่วมมือ ควบคุมและกำกับให้วารสารมีความถูกต้องและมีคุณภาพเป็นไปตามที่ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทยกำหนดตามมาตรฐาน

5.3 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

5.3.1 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความมีหน้าที่ประเมินบทความในด้านต่าง ๆ ตามรูปแบบที่วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร กำหนดด้วยความเข้มข้นและให้ข้อเสนอแนะหรือเหตุผลเชิงวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อผู้เขียน

5.3.2 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องประเมินบทความที่ได้รับมอบหมายจากบรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ให้แล้วเสร็จในช่วงระยะเวลาที่กำหนด เพื่อประโยชน์สูงสุดของผู้เขียนบทความ

5.3.3 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องพิจารณาบทความที่ได้รับจากบรรณาธิการหรือกองบรรณาธิการถึงความเชี่ยวชาญของตนเองกับเนื้อหาในบทความ หากเห็นว่าบทความที่ได้รับมีเนื้อหาไม่ตรงตามความเชี่ยวชาญที่แท้จริงจะต้องแจ้งกองบรรณาธิการวารสารให้รับทราบโดยเร็วและปฏิเสธการประเมิน

5.3.4 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องมีหลักจริยธรรมในการประเมินบทความ ไม่เอนเอียงหรือมีอคติต่อเนื้อหาบทความ ต้องไม่ใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่เป็นไปตามหลักทฤษฎีเชิงวิชาการ ปราศจากหลักฐานที่น่าเชื่อถือได้มาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินบทความนั้น ๆ

5.3.5 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องเก็บรักษาความลับ ด้วยการไม่เปิดเผยข้อมูลเนื้อหาในบทความของผู้เขียนแก่บุคคลอื่นใดในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความนั้น

6. การอ้างอิง

การอ้างอิงในบทความวิจัยและบทความวิชาการสำหรับวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กำหนดการอ้างอิงให้เป็นไปตามรูปแบบ IEEE (อ้างอิงจาก <https://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf> หรือที่ http://www.ieee.org/documents/style_manual.pdf) โดยต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น หากบทความที่อ้างอิงมาจากบทความภาษาไทย ต้องแปลเป็นภาษาอังกฤษให้ถูกต้อง สำหรับการใส่อ้างอิงในเนื้อเรื่อง (In-text citations) ให้ใช้เครื่องหมาย [] โดยมีตัวอย่างการเขียน เช่น [1] หรือ [2] หรือ [1], [2] หรือ [1]-[3] หรือ [1], [3]-[8] หรือ [9], [10], [15], [16] หากมีการอ้างอิงซ้ำบทความเดิมให้ใช้หมายเลขเดิม

ในกรณีมีการอ้างอิงในเนื้อหาด้วยการกำหนดชื่อผู้แต่งบทความให้เขียนตามตัวอย่าง ดังนี้ K. S. Karukanan [1] หรือ L. A. Hoi and S. D. Woo [2] หรือ P. A. Abarwale et al. [3]

ในส่วนของการอ้างอิงส่วนท้าย (Reference List) จะต้องเรียงตามลำดับบทความที่เขียนอ้างอิงในเนื้อเรื่อง ซึ่งจำแนกรูปแบบการเขียนอ้างอิงส่วนท้ายได้ดังต่อไปนี้

1) การอ้างอิงจากบทความในวารสาร (Journal Articles)

รูปแบบ: [1] Author, "Title of Article," *Title of Journal*, Volume, Issue, Pages. Year.

ตัวอย่าง:

- [1] H. Li, Z. Huang, L. Cheng, S. Kong and S. Liu, "Structure and dielectric properties of novel low temperature co-fired Bi₂O₃-RE₂O₃-MoO₃ (RE=Pr, Nd, Sm, and Yb) based microwave ceramics," *Ceramics International Journal*, vol. 43, no. 5, pp. 4570-4575, Apr. 2017.

2) การอ้างอิงจากการนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ (Conference Technical Articles)

รูปแบบ: [1] Author, "Title of paper," in *Title of Conference*, Conference date, Editor, Ed.

Location: Publisher, Year, Pages.

ตัวอย่าง:

- [2] T. Fedushchak, M. Uimin, S. Zhuravkov and A. Vosmerikov, "Nanopowder hydrogenation catalysts of diesel fraction components," in *Proceeding of 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Tomsk Polytechnic University Tomsk, Russia, 2012, pp. 1–4.
- [3] W. Herz, M. Süßner, A. Ulbricht and F. Wüchner, "The operation experience with the dual cooling system of the polo coil (two phase-supercritical He)," in *Proceedings of the Sixteenth International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference*, Germany, 1997, pp. 469–472.

3) การอ้างอิงจากหนังสือ (Books)

รูปแบบ: [1] Author. *Title of Book*, Editor, ed. Location: Publisher, Year, Pages.

ตัวอย่าง:

- [4] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, 9th ed. Boston: Pearson, 2013.
- [5] R. M. Burton, B. Obel and G. DeSanctis, *Organizational Design: A Step-by-Step Approach*, 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2011.

4) การอ้างอิงจากบทในหนังสือ

รูปแบบ: [1] J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, Country if not USA: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง:

- [6] L. Stein, "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed. New York: Wiley, 1994, pp. 55-70.
- [7] R. L. Myer, "Parametric oscillators and nonlinear materials," in *Nonlinear Optics*, vol. 4, P. G. Harper and B. S. Wherret, 1st ed. San Francisco, CA: Academic, 1977, pp. 47-160.

5) การอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ (Theses and Dissertations)

รูปแบบ:

- [1] J. K. Author, "Title of dissertation," Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.
- [2] J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

ตัวอย่าง:

- [8] J. O. Williams, "Narrow-band analyzer," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Harvard Univ., Cambridge, MA, 1993.
- [9] N. Kawasaki, "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow," M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan, 1993.

6) การอ้างอิงจากสิทธิบัตร (Patents)

รูปแบบ: [1] J. K. Author, "Title of patent," U.S. Patent x xxx xxx, Abbrev. Month, day, year.

ตัวอย่าง:

[10] J. P. Wilkinson, "Nonlinear resonant circuit devices," U.S. Patent 3 624 125, July 16, 1990.

7) การอ้างอิงจากมาตรฐาน (Standards)

รูปแบบ: [1] *Title of Standard*, Standard number, date.

ตัวอย่าง:

[11] *IEEE Criteria for Class IE Electric Systems*, IEEE Standard 308, 1969.

[12] *Letter Symbols for Quantities*, ANSI Standard Y10.5-1968.

8) การอ้างอิงจากคู่มือ (Handbooks)

รูปแบบ: [1] *Name of Manual/Handbook*, x Ed., Abbrev. Name of Co., City of Co., Abbrev.
State, year, pp. xx-xx.

ตัวอย่าง:

[13] *Transmission Systems for Communications*, 3rd Ed., Western Electric Co., Winston-Salem, NC, 1985, pp. 44–60.

[14] *Motorola Semiconductor Data Manual*, Motorola Semiconductor Products Inc., Phoenix, AZ, 1989.

Research Articles

- ◆ **Formulation Development of Steamed Buns by Supplemented Toddy Palm Pulp Powder**
Suthida Kitjavorasatien
- ◆ **In vitro Micropropagation and Microrhizome Induction of *Curcuma comosa* Roxb.**
Sirirat Phakpaknam Natcha Yunchum Manusawee Dechkla and Vachiraporn Pikunthong
- ◆ **Isolation, Classification and Study of the Influence of Glow Discharge Plasma on Dirty Panicle Rice Fungal Pathogens**
Waraporn Sutthisa Perachat Chaidee Supicha Saengkaewsuk and Artit Chingsungnoen
- ◆ **Strength and acid resistance of mortar made from alkali activated high calcium fly ash**
Apai Benjapong Saofee Dueramae and Rattanasak Hongthong
- ◆ **The Study of Optimum Factors in Gold Plating Process to Enhance OTOP Knife Products for Ban Mai Knife Forgers Village, Lom Sak District, Phetchabun**
Suwimon Thiakthum Tannachart Wantang and Thongchai Khruaphue
- ◆ **Economic order-quantity determination for fuel demand: A case study of a freight forwarder**
Phatchara Sriphrabu and Chettha Chamnanlor
- ◆ **Biogas Production from Agricultural Residues Using Anaerobic Dry Fermentation System for Households in the Community of Koh Khan Sub-district, Nakhon Si Thammarat Province**
Pipat Junpadit Athirat Rerngnarong and Pajongsuk Sutarut
- ◆ **The Design of Power Harvester for Passive RFID Tags**
Norrarat Wattanamongkhol and Chaiphan Prakaraphan
- ◆ **Moisture sorption isotherms of Khao Dawk Mali 105 Paddy**
Tinnakorn Pengprakhon Krawee Treeamnuk Tawarat Treeamnuk and Nuttapon Ruttanadech
- ◆ **Physical and Aerodynamics Properties of Khao Dawk Mali 105 Paddy Rice**
Thamarat Yabsungnoen Krawee Treeamnuk Tawarat Treeamnuk and Nuttapon Ruttanadech
- ◆ **Investigation of the Effect of Harmonic Currents on Losses of Phase Shifting Transformers and Its Realization using a 15-Degree Phase shifting Transformer**
Paiboon Kiatsookkanatorn Passawit Klamrak Narongrit Yindeeyom and Napat Watjanatepin
- ◆ **Factors Affecting Delay of Construction Projects**
Titiwat Triwong Nirat Yamoat and Adisorn Pongsuwan
- ◆ **Simulation and Experiment of a Solar-Circulating Aeration System**
Phenphicha Niamsakul Samorn Ponchunchoovong and Atit Koonsrisuk
- ◆ **A Pattern Design for Run-Flat Wheel Suitable for Small Regular Armored Truck Using Finite Element Method**
Nuchanat Tongyai and Prakorb Chartpuk
- ◆ **Finite Element Analysis of Armor Piercing Bullet Penetrating Hard Steel Armor Plate**
Visa Khamum and Prakorb Chartpuk
- ◆ **Effect of crude ethanol extracts from seven herbs on ant-repellent**
Issariya Ieamsuwan Sarawut Suttirat Natharinee Horata and Taweebhorn Phunpanich