

บทความวิจัย

- ◆ ผลของการลวกน้ำร้อนและระดับอุณหภูมิพื้ฟึงต่อคุณภาพของกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบ
สุรพิชญ์ ทับเที่ยง
- ◆ ผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์ไฟฟ้าและปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่อคุณภาพของใบมะกรูด
และความสิ้นเปลืองพลังงาน
บุญยาพร แสนแปง หยาดฝน ทนงการกิจ และ ปริญ คงกระพันซ์
- ◆ การพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ผสมวุ้นน้ำมะพร้าวพร้อมดื่ม และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ
จันทร์เพ็ญ บุตรใส วรภา วงศ์แสงธรรม และ วิจิตรา เหลียวตระกูล
- ◆ การจัดส่งน้ำมันเชื้อเพลิงโดยรถบรรทุกแบบหลายช่องด้วยรูปแบบการขนส่งแบบโครงข่ายการไหล
มานพ ดอนหมื่น และ คมกฤช ปิติฤกษ์
- ◆ การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบอิสระและแบบแรงกระทำด้วยสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมแบบโดเมนย่อยตาม
ด้านสำหรับปัญหา 2 มิติ
กัณธรเกียรติ มุสิกเกต บุญชัย ผึ้งไผ่งาม และ สุธี ปิยะพิพัฒน์
- ◆ ผลของสภาวะการย้อมต่อค่าสีและความคงทนของสีด้วยฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่น
ศุทธวดี เววา ขจีจรัส ภิรมย์ธรรมศิริ และ สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ
- ◆ การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานไฟฟ้าร่วมกับแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้
จินทนา สีลาน้ำเที่ยง เทวรัตน์ ตรีอำนาจกร กระวี ตรีอำนาจกร และ เกียรติศักดิ์ ใจโต
- ◆ ผลกระทบของกรดไขมันอิสระที่เติมอยู่ในน้ำมันปาล์มต่อสมบัติความหนืด การวัดค่าในซ์ และสมบัติเชิงกล ของคอมพาวนด์
ยางธรรมชาติผสมเซมาต้า
ศิวโรฒ บุญราศรี จันทร์จิรา เหลลาราช และ พรชัย ราชตะนะพันธ์
- ◆ ผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบ
นราธร สัตย์เชื้อ และ น้อมจิตต์ สุธิบุตร
- ◆ การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียของสับฐานสกัดชาใบหม่อนและสับฐานสกัดชาใบหม่อนผสมขมิ้น
ปิยวรรณ พันสี เจนจิรา สุระ และ กัลย์สุดา ดวงศรีแก้ว
- ◆ การออกแบบและประเมินสมรรถนะชุดทำน้ำร้อนและน้ำเย็นแบบเคลื่อนที่
นัทธิธนนท์ พงษ์พานิช และ สิทธิเดช เพชรราช
- ◆ ผลของวิธีการแปรรูปที่แตกต่างกันต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และการยอมรับจากผู้บริโภคของชาใบชาวก่ำ
ดอยสะเก็ด
สุวีรวรรณ ราชสม จรรย์วรรณ ตันต์เจริญรัตน์ วุฒิจำนงค์ และ พรสวรรค์ สมบัตินันท์
- ◆ Tyrosinase Inhibitory Efficiency and Antioxidant Activity of Gac fruit (*Momordica cochinchinensis* Spreng.) Extract
Pornsinee Darapong Sirichan Tachai Jetchan Atthaisong Nanthawan Jaikla Buranee Rabiab and Rawinipa Srimoon
- ◆ การพัฒนาสูตรขอสบวัยเสียดจากน้ำส้มโอและเปลือกส้มโอ
สุธิดา กิจจาวรเสถียร จิราภัทร โอทอง ลัดดาวัลย์ กลิ่นมัลย์ วรลักษณ์ ป้อมน้อย และ วรธร ป้อมเย็น
- ◆ Effect of Stone Dust on the Properties of Interlocking Block
Chookiat Choosakul Tawich Klathae Suporn Rittipaukdee Khwanchiwa Yongsata Sunun Monkaew and Saravut Jaritngam
- ◆ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขอสบวัยเสียดเสริมมันสำปะหลัง
เชาวลิต อุปราก ปรัชญ์ ทับใบแย้ม สมภา เทิดขวัญชัย สุธิดา กิจจาวรเสถียร วรธร ป้อมเย็น
วรลักษณ์ ป้อมน้อย ลัดดาวัลย์ กลิ่นมัลย์ จิราภัทร โอทอง และ เปรมระพี อูยามาวิริหิรัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

RMUTP RESEARCH JOURNAL

ที่ปรึกษา

ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล
อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญ์ บุญกนิษฐ
รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร วิจัยและพัฒนานวัตกรรม

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วาทีเรื้อตรี 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

รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งอรุณ พรเจริญ	รองศาสตราจารย์ ดร.รัตนพล มงคลรัตนาสีธิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลทิมา เชาวชาญชัยกุล	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรลักษณ์ ปัญญาธิติพงศ์
ดร.ชลากร อุดมรักษาสกุล	ดร.สิงห์แก้ว ปือกเท้ง
ดร.วราพร ทองจีน	นางสาวพัชรนันท์ ยั่งวรวิเชียร

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)
ประจำปี 17 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2566

รองศาสตราจารย์ ดร.กุสุมาลย์ น้อยผา	มหาวิทยาลัยทักษิณ
รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริมผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.จิรารัตน์ อนันตกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติพรรณ นิยมสุข	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐจรรย์ จิระคกุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ดนุพล ต้นโยภาส	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ธราวุธ พงศ์ประยูร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ธรา อังสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีร เจียศิริพงษ์กุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.นันทวัน เทิดไทย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.บวรศักดิ์ สีนานนท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะรัตน์ บุญแสวง	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเวียง ฤทธิศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภอรรถ ศรีกันทรมาศ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนวิไล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณิ อึ้งปัญสัตวงศ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สุภาวดี ดาวดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.หทัยรัตน์ ริมศิริ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อรุณี คงดี อัลเดรด	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
รองศาสตราจารย์ ดร.เอกไท วิโรจน์สกุลชัย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ อริยะเครือ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
รองศาสตราจารย์เอกชัย วิมลมาลา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ รัตนเดช	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทพกัญญา หาญศิลาวัต	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิต สวัสดิ์เสวี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิดาพร ศุภภากร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรินทร์ เจริญพันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นทีวัชรณ อุดมศิลป์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตันไพบูลย์กุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา ปราบกุ่มมาก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรภรณ์ พิมพิจันทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ หนักแน่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ วงศ์พุทธิสิน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รักฤดี สารธิมา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิสาขะ อนันธวัช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิประภา รัตนดิลก ณ ภูเก็ต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม อรุณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ คุณศรีสุข
ดร.ไตรภพ พาหอม
ดร.มูฮำหมัด นิยมเคชา

มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยพะเยา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญ
วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร
ปีที่ 17 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2566 ISSN 2651-1096 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

ผลของการลวกน้ำร้อนและระดับอุณหภูมิฟุ้งต่อคุณภาพของกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบ สุรพิชญ์ ทับเที่ยง	1
ผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์ไฟฟ้าและปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่อคุณภาพของใบมะกรูดและความสิ้นเปลืองพลังงาน ปยุตยาพร แส่นแปง หยาดฝน ทนงการกิจ และ ปริญ คงกระพันธ์	15
การพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ผสมวุ้นน้ำมะพร้าวพร้อมดื่ม และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ จันทร์เพ็ญ บุตรใส วรรณภา วงศ์แสงธรรม และ วิจิตรา เหลียวตระกูล	28
การจัดส่งน้ำมันเชื้อเพลิงโดยรถบรรทุกแบบหลายช่องด้วยรูปแบบการขนส่งแบบโครงข่ายการไหล มานพ ดอนหมื่น และ คมกฤษ ปิติฤกษ์	40
การวิเคราะห์การสันตะเทียนแบบอิสระและแบบแรงกระทำด้วยสมุทไฟไนท์เอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมแบบโดเมนย่อยตามด้านสำหรับปัญหา 2 มิติ กำธรเกียรติ มุสิกเกต บุญชัย ผึ้งไผ่งาม และ สุธี ปิยะพิพัฒน์	53
ผลของสภาวะการย้อมต่อค่าสีและความคงทนของสีด้วยฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่น ศุภธวดี เววา ขจีจรัส ภิรมย์ธรรมศิริ และ สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ	67

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 17 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2566 ISSN 2651-1096 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานไฟฟ้าร่วมกับแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้	77
จันทนา สีลาน้ำเที่ยง เทวรัตน์ ตรีน่านรรค กระวี ตรีน่านรรค และ เกียรติศักดิ์ ใจโต	
ผลกระทบของกรดไขมันอิสระที่เดิมอยู่ในน้ำมันปาล์มต่อสมบัติความหนืดการวัลคาไนซ์ และสมบัติเชิงกล ของคอมพาวนด์ยางธรรมชาติผสมขมิ้นดำ	89
ศิวโรฒ บุญราศรี จันทร์จิรา เหลลราช และ พรชัย ราชตะนะพันธุ์	
ผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบ	103
นราธร สัตย์เชื้อ และ น้อมจิตต์ สุธิบุตร	
การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียของสบู่อารสศักดิ์ขาใบหม่อนและสบู่อารสศักดิ์ขาใบหม่อนผสมขมิ้น	115
ปิยวรรณ พันสี เจนจิรา สุระ และ กัลย์สุตา ดวงศรีแก้ว	
การออกแบบและประเมินสมรรถนะชุดทำน้ำร้อนและน้ำเย็นแบบเคลื่อนที่	126
นัทธีธนนท์ พงษ์พานิช และ สิทธิเดช เพชรราช	
ผลของวิธีการแปรรูปที่แตกต่างกันต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และการยอมรับจากผู้บริโภคของชาใบข้าวกำลังดอยสะเก็ด	137
สุวีวรรณ ราชสม จรรย์วรรณ ตันท์เจริญรัตน์ วุฒิจำนงค์ และ พรสวรรค์ สมบัตินันท์	
Tyrosinase Inhibitory Efficiency and Antioxidant Activity of Gac fruit (<i>Momordica cochinchinensis</i> Spreng.) Extract	149
Pornsinee Darapong Sirichan Tachai Jetchan Atthaisong Nanthawan Jaikla Buranee Rabiab and Rawinipa Srimoon	

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 17 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2566 ISSN 2651-1096 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

การพัฒนาสูตรขอสบวัยเจียจากน้ำส้มโอและเปลือกส้มโอ	157
สุธิดา กิจจาวรเสถียร จิราภทร โอทอง ลัดดาวัลย์ กลิ่นมัลย์ วรลักษณ์ ป้อมน้อย และ วรธร ป้อมเย็น	
Effect of Stone Dust on the Properties of Interlocking Block	168
Chookiat Choosakul Tawich Klathae Suporn Rittiprakdee Khwanchiwa Yongsata Sunun Monkaew and Saravut Jaritngam	
การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขอสเทอร์ริยากิเสริมมันสำปะหลัง	177
เชาวลิต อุปฐาก ปรศนีย์ ทับใบแย้ม สุมภา เทิดขวัญชัย สุธิดา กิจจาวรเสถียร วรธร ป้อมเย็น วรลักษณ์ ป้อมน้อย ลัดดาวัลย์ กลิ่นมัลย์ จิราภทร โอทอง และ เปรมระพี อูยามาวีร์หิรัญ	

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

ผลของการลวกน้ำร้อนและระดับอุณหภูมิพัฟฟิงต่อคุณภาพของกล้วย น้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบ

สุรพิชญ์ ทับเที่ยง*

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชากรราษฎร์สาย 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 23 กรกฎาคม 2564 แก้ไขบทความ 5 พฤษภาคม 2565 ตอรับบทความ 28 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

เทคนิคพัฟฟิงด้วยอุณหภูมิสูงช่วยลดการหดตัวและเพิ่มความกรอบของเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์กล้วยกรอบได้ แต่ผิวของกล้วยกรอบเกิดสีน้ำตาลคล้ำและไหม้บางส่วน การลวกน้ำร้อนก่อนแปรรูปช่วยลดการเกิดสีน้ำตาลบนอาหารอบแห้งได้ ดังนั้นการวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของการลวกน้ำร้อนและระดับอุณหภูมิพัฟฟิงต่อโครงสร้างระดับจุลภาค คุณภาพของกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมกรอบ การทดลองนำกล้วยแผ่นที่ไม่ผ่านการลวกและผ่านการลวกน้ำร้อน มาอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นนำกล้วยมาพัฟฟิงโดยลมร้อนที่อุณหภูมิ 150 – 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที ขั้นตอนสุดท้ายนำกล้วยแผ่นมาอบแห้งอีกครั้งเหมือนขั้นตอนแรก จนความชื้นในกล้วยลดลงเหลือร้อยละ 4 ฐานแห้ง ผลการทดลองพบว่าการลวกน้ำร้อนช่วยลดการเกิดสีน้ำตาลของกล้วยกรอบทั้งสองพันธุ์ เมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยกรอบที่ไม่ผ่านการลวก การลวกน้ำร้อนช่วยให้กล้วยน้ำว้ากรอบมีปริมาตรเพิ่มขึ้นระหว่างร้อยละ 12.3 – 15.4 แต่กลับส่งผลให้กล้วยหอมทองกรอบมีปริมาตรลดลงระหว่างร้อยละ 24.0 – 28.7 เมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยกรอบที่ไม่ผ่านการลวก การลวกน้ำร้อนและการเพิ่มระดับอุณหภูมิพัฟฟิงช่วยให้เนื้อสัมผัสของกล้วยกรอบทุกกลุ่มมีความแข็งลดลง อย่างไรก็ตามระดับอุณหภูมิพัฟฟิงที่สูงขึ้นทำให้ผิวของกล้วยกรอบทุกกลุ่มเกิดสีน้ำตาลมากขึ้น การลวกน้ำร้อนมีความเหมาะสมต่อการแปรรูปกล้วยน้ำว้ามากกว่ากล้วยหอมทอง โดยควรใช้อุณหภูมิพัฟฟิงไม่เกิน 170 องศาเซลเซียส เพื่อคงคุณภาพที่ดีของผลิตภัณฑ์

คำสำคัญ : การลวกน้ำร้อน; พันธุ์กล้วย; พัฟฟิง; สี; เนื้อสัมผัส

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 1876 1661, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: surapit.t@cit.kmutnb.ac.th

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

Effects of Hot Water Blanching and Puffing Temperature Level on Qualities of Namwa- and Homtong-Banana Chips

Surapit Tabtiang*

College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
1518 Pracharat 1 Road, Wong Sawang Subdistrict, Bangsue, Bangkok 10800

Received 23 July 2021; Revised 5 May 2022; Accepted 28 June 2022

Abstract

Puffing technique can reduce the degree of volume shrinkage and increase the textural crispness of banana chips. However, banana chips tend to be more browning and some scorching on their surface. The hot water blanching pretreatment could improve the color of dried products. Therefore, the objective of this work was to study the effects of hot water blanching pretreatment and puffing temperature on the banana microstructure and the qualities of crisp Namwa- and Homtong-bananas. The non-blanching banana slices and hot water blanched banana slices were dried by hot air at temperature of 90 °C, and then, it were puffed by hot air at temperature of 150 - 190 °C for 2 min. Finally, it were dried again by hot air at temperature of 90°C until its moisture content reached 4% dry basis (d.b.). The experimental results showed that hot water blanching pretreatment could limit the brown colour of both crisp banana products compared to non-blanching samples. In addition, the blanching pretreatment remarkably increased the volume ratio of the crisp Namwa-bananas in ranged of 12.3 – 15.4% compared to non-blanching sample. However, the 24.0 – 28.7% of volume ratio decreasing was noticeably observed on the crisp blanched Homtong-bananas. The hot water blanching pretreatment coupled with a higher puffing temperature significantly decreased the hardness of both crisp products. Nevertheless, the color of crisp bananas had more browning as higher puffing temperature. The hot water blanching pretreatment is more suitable for Namwa-banana processing than Homtong-banana processing. To preserve the color quality of banana chips, the puffing temperature for processing should not exceed 170 °C.

Keywords : Hot water Blanching; Banana Variety; Puffing; Colour; Texture

* *Corresponding Author. Tel.: +669 1876 1661, E-mail Address: surapit.t@cit.kmutnb.ac.th*

1. บทนำ

กล้วยกรอบอบแห้งเป็นผลิตภัณฑ์อาหารกรอบชนิดหนึ่งที่มีความนิยมนิยมบริโภค โดยกล้วยกรอบมักแปรรูปจากกล้วยหลายพันธุ์ เช่น กล้วยน้ำว้า (*Musasapientum* Linn. (ABB group)) กล้วยหอมทอง (*Musaacuminata* (AAA group)) ในปัจจุบันความนิยมผลิตภัณฑ์อาหารกรอบสำหรับผู้บริโภคสมัยใหม่ต้องการผลิตภัณฑ์อาหารกรอบไร้ไขมัน ดังนั้นกล้วยกรอบจึงถูกแปรรูปโดยการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์กล้วยอบแห้งมีคุณภาพไม่ดีเนื่องจากกล้วยกรอบมีการหดตัวที่สูงทำให้เนื้อสัมผัสมีความแข็งมาก [1] คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหารกรอบเป็นคุณภาพด้านหนึ่งที่มีความสำคัญต่อความพึงพอใจของผู้บริโภค [2] การนำเทคนิคฟฟิงมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำช่วยลดการหดตัวและเพิ่มความกรอบของเนื้อสัมผัสอาหาร [3], [4] K. Hofsetz et al. [5] รายงานว่าเทคนิคฟฟิงด้วยอุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาสั้นร่วมกับกับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำสามารถลดการหดตัวของกล้วยกรอบเนื่องจากเทคนิคฟฟิงทำให้กล้วยมีอุณหภูมิภายในโครงสร้างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นน้ำภายในกล้วยจึงเดือดและระเหยอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดไอน้ำแรงดันสูงกระทำต่อโครงสร้างภายในส่งผลให้ปริมาตรของอาหารขยายตัว [1], [6], [7] ผลของปริมาตรที่ขยายตัวทำให้โครงสร้างภายในมีความพรุนสูงขึ้น ดังนั้นกล้วยกรอบจึงมีเนื้อสัมผัสที่แข็งลดลงและกรอบมากขึ้น [4], [5]

มีปัจจัยหลายอย่าง que ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารกรอบ เช่น อุณหภูมิฟฟิง เวลาฟฟิง ความชื้นก่อนฟฟิง [4], [7], [8] S. Tabtiang et al. [9] รายงานว่าการใช้อุณหภูมิฟฟิงที่สูงขึ้นร่วมกับการใช้เวลาฟฟิงนานขึ้นช่วยให้กล้วยกรอบมีการหดตัวลดลงและมีเนื้อสัมผัสที่กรอบมากขึ้น นอกจากนี้ C. Raikhamh et al. [4] รายงานว่าความชื้นก่อนฟฟิงที่เหมาะสมใน

การแปรรูปกล้วยหอมกรอบมีค่าร้อยละ 25 ฐานแห้ง ซึ่งที่ระดับความชื้นดังกล่าวกล้วยกรอบมีการหดตัวน้อยและเนื้อสัมผัสกรอบมากกว่าระดับความชื้นอื่นๆ อย่างไรก็ตามเทคนิคฟฟิงภายใต้ระดับอุณหภูมิที่สูงระหว่าง 150 - 220 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่ด้อยลงเนื่องจากผลิตภัณฑ์เกิดสีน้ำตาลล้ามากขึ้น [10], [11] โดยคุณภาพสีของผลิตภัณฑ์อาหารกรอบมีอิทธิพลต่อการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค การจำกัดการเกิดสีน้ำตาลของอาหารกรอบสามารถใช้การปรับสภาพก่อนแปรรูป เช่น การลวกด้วยไมโครเวฟ [12] การแช่โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ [13] การแช่กรดซิตริก [13] การลวกน้ำร้อน [14] การปรับสภาพด้วยความร้อนเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคมากกว่าการใช้สารเคมี การปรับสภาพอาหารด้วยน้ำร้อนเป็นวิธีการปรับสภาพรูปแบบหนึ่งได้รับความนิยมเนื่องจากมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน A. I. Varnalis et al. [15] พบว่าการลวกน้ำร้อนช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลบนผิวของมันฝรั่งอบแห้ง นอกจากนี้การลวกช่วยให้น้ำมันฝรั่งพองตัวมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมันฝรั่งที่ไม่ผ่านการลวกน้ำร้อน เพราะว่าการลวกทำให้โครงสร้างของมันเป็นความแข็งแรงลดลง ดังนั้นจึงช่วยให้น้ำมันฝรั่งเกิดการพองตัวได้ดีขึ้นขณะฟฟิงด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส S. Paengkanya et al. [14] รายงานว่าการลวกน้ำร้อนช่วยให้โครงสร้างภายในของกล้วยน้ำว้ามีความแข็งแรงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยที่ไม่ผ่านการลวก ความแข็งแรงที่ลดลงเนื่องจากโครงสร้างเซลล์เกิดการเสียหายและสูญเสียการยึดเกาะกันระหว่างเซลล์ เพราะฉะนั้น Middle Lamellar เกิดการเสื่อมสลายจากความร้อน [16] ลักษณะของโครงสร้างที่เกิดขึ้นจึงช่วยส่งเสริมให้กล้วยกรอบมีปริมาตรขยายมากขึ้น รวมทั้งการลวกยังช่วยให้เนื้อสัมผัสของกล้วยกรอบมีความแข็งแรง อย่างไรก็ตาม C. Raikhamh et al. [13] รายงานว่าการลวกน้ำร้อนส่งผลให้กล้วยหอมทองกรอบมีการหดตัวมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยหอมกรอบที่ไม่ผ่านการลวก

รายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาเปรียบเทียบผลของการลวกน้ำร้อนต่อคุณภาพของกล้วยกรอบต่างพันธุ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของการลวกน้ำร้อนและระดับอุณหภูมิฟัพฟิงต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของกล้วยก่อนอบแห้ง รวมทั้งคุณภาพของกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบในเทอมของ สี อัตราส่วนปริมาตรและเนื้อสัมผัส

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมกล้วยแผ่น

การทดลองอบแห้งใช้กล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมทองที่มีระดับความสุกระหว่าง 21-22 และ 17-18 องศาบริกซ์ ตามลำดับ [4, 9, 20] นำกล้วยมาหั่นขวางด้วยเครื่องหั่นให้มีความหนา 2.5 มิลลิเมตร ในการเตรียมตัวอย่างจะแบ่งกล้วยแผ่นแต่ละพันธุ์เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรก คือ กล้วยแผ่นที่ไม่ผ่านการลวกน้ำร้อน กลุ่มที่ 2 กล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกน้ำร้อนด้วยอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นหาความชื้นเริ่มต้นของกล้วยแต่ละกลุ่มโดยการสุ่มกล้วยแผ่นในแต่ละสภาวะมาสับให้ละเอียดแล้วบรรจุในกระป๋องอลูมิเนียม นำกระป๋องอลูมิเนียมที่บรรจุกล้วยมาใส่ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง [11]

2.2 กระบวนการอบแห้งหลายขั้นตอน

การอบแห้งกล้วยแผ่นประกอบด้วย 3 ขั้นตอนย่อย ในขั้นตอนแรกอบแห้งกล้วยแผ่นด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ภายใต้ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที จนความชื้นของกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมทองแผ่นลดลงถึงร้อยละ 30 และ 25 ฐานแห้ง ตามลำดับ [4, 9, 20] หลังจากนั้นนำกล้วยมาฟัพฟิงโดยลมร้อนที่อุณหภูมิ 150 170 และ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที แล้วนำกล้วยแผ่นมาอบแห้งในขั้นตอนสุดท้ายด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ซ้ำอีกครั้ง จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือร้อยละ 4 ฐานแห้ง

2.3 การวัดอัตราส่วนปริมาตร

การหัตถ์ของกล้วยกรอบพิจารณาในเทอมของอัตราส่วนปริมาตรโดยใช้วิธีการแทนที่ในของแข็งด้วย Glass Beads วิธีการหาปริมาตรของกล้วยแผ่นปฏิบัติตามรายงานวิจัยของ P. Tantong et al. [10] การวัดปริมาตรของกล้วยกรอบในแต่ละสภาวะการทดลองจะทำการทดสอบซ้ำ 20 ครั้ง การวัดอัตราส่วนปริมาตรสามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$\text{Volume ratio (\%)} = \frac{V}{V_i} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

V_i คือ ปริมาตรของกล้วยแผ่นก่อนอบแห้ง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

V คือ ปริมาตรของกล้วยแผ่นหลังอบแห้ง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.4 การวัดเนื้อสัมผัส

การทดสอบด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยกรอบใช้เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส (Stable Micro Systems, รุ่น TA-XT Plus, Surrey, UK) การทดสอบใช้หัวกดแบบตัด (HDP-BSK Type) โดยวางกล้วยแผ่นบนแท่นวางตัวอย่างแล้วใช้ใบมีดกดลงบนตัวอย่างกล้วยด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที [8] จนกระทั่งกล้วยแผ่นแตกและแยกออกจากกัน ทำการทดสอบเนื้อสัมผัสซ้ำ 20 ครั้งต่อสภาวะการทดลอง แล้วนำค่าทั้งหมดจากการทดสอบมาหาค่าเฉลี่ย คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยกรอบพิจารณาในเทอมของค่าความแข็ง (Hardness) และความชันเริ่มต้น (Initial Slope) [4], [8]

2.5 การวัดสี

สีของกล้วยกรอบวัดค่าโดยใช้เครื่องวัดสีของอาหาร (Hunter Lab, รุ่น Colour Flex, VA, UK) ที่แหล่งกำเนิดของแสง D65 และมุมมอง 10 องศา [3] การวัดค่าสีของกล้วยแผ่นทำในแนวระนาบและแสดงค่าสีในเทอมของค่าความสว่าง (Lightness, L^*) ค่าความ

เป็นสีแดงและสีเขียว (Redness, a^*) และค่าความเป็นสีเหลืองและน้ำเงิน (Yellowness, b^*) ก่อนการวัดค่าสีของกล้วยอบแห้งต้องปรับเทียบเครื่องวัดสีอาหารด้วยแผ่นสีขาวและแผ่นสีดำมาตรฐาน การทดสอบน้ำหนักกล้วยแผ่นวางบนแท่นแล้วครอบกล้วยด้วยฝาโลหะแล้ววัดค่าสี จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์สี a^* และ b^* ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าโทนสี ($h^\circ = \tan^{-1}(b^*/a^*)$) [8] การทดสอบจะทำการทดสอบซ้ำ 20 ครั้งต่อสภาวะการทดลอง แล้วนำค่าจากการทดสอบมาหาค่าเฉลี่ย

2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

นำตัวอย่างเนื้อเยื่อของกล้วยก่อนอบแห้งซึ่งได้มาจากด้านในที่ระยะห่างจากผิวกล้วยประมาณ 2 – 3 มิลลิเมตร มาแช่ด้วยสาร Glutaraldehyde ที่เข้มข้นร้อยละ 2.5 โดยปริมาตร และ Phosphate buffer 0.1 โมลาร์ แช่ตัวอย่างไว้ประมาณ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงแช่ตัวอย่างในสารละลาย Osmium Tetroxide เข้มข้นร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างมาล้างด้วยน้ำกลั่นและกำจัดความชื้นด้วย Acetone ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30-100 โดยปริมาตร จากนั้นเนื้อเยื่อกล้วยจะถูกแทนที่ด้วย Spurr's Resin เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ตัวอย่างถูกตัดเป็นชิ้นขนาดเล็กโดยใช้เครื่อง Ultramicrotome (Leica, รุ่น EM UC7, Vienna, Austria) ที่ความหนา 1 ไมโครเมตร และย้อมด้วย Toluidine Blue เข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวลต่อปริมาตร และ Basic Fuchsin เข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวลต่อปริมาตร แล้วนำตัวอย่างที่ได้มาส่องด้วยเครื่อง Light Microscope (Zeiss, รุ่น Axio star plus, Göttingen, Germany)

2.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกล้วยก่อนอบแห้ง

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมทองก่อนอบแห้งจะทำการวิเคราะห์

หาปริมาณสตาร์ช น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโตส โดยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีทั้งหมดจะปฏิบัติตามรายงานวิจัยของ Tantong et al. [10]

2.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลจากการทดลอง ได้แก่ ปริมาณสตาร์ช ปริมาณน้ำตาล สี อัตราส่วนปริมาตร ความแข็งและความชื้นเริ่มต้น ถูกทำการวิเคราะห์ผลด้วยสถิติ ANOVA (Analysis of Variance) เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเชิงพหุที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) การวิเคราะห์ผลทางสถิติใช้โปรแกรม SPSS® เวอร์ชัน 21 (IBM Corp, Armonk, NY, USA)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 โครงสร้างระดับจุลภาคของกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมทองก่อนอบแห้ง

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมทองที่ไม่ผ่านการลวกและผ่านการลวกน้ำร้อนโดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Light Microscope เซลล์ของกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมทองที่ไม่ผ่านการลวกมีลักษณะรูปร่างกลมบางส่วนและรูปร่างรีบางส่วน โดยภายในเซลล์ยังคงปรากฏอนุภาคสตาร์ช ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) และ (ข) ผนังเซลล์ของกล้วยทั้งสองพันธุ์มีลักษณะเรียบและยังคงมีความสมบูรณ์จึงสามารถสังเกตเห็นได้ง่าย ลักษณะผนังเซลล์ที่ปรากฏนี้เนื่องจากภายในโครงสร้างผนังเซลล์ยังมีสารโมเลกุลใหญ่ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพกติน อยู่ในปริมาณมาก [17] ผนังเซลล์ที่ยังมีความสมบูรณ์ช่วยให้เซลล์มีความแข็งแรงและคงรูปร่างอยู่ได้ โดย S. Paengkanya et al. [14] รายงานผลการศึกษาที่สอดคล้องกัน อย่างไรก็ตาม ผนังเซลล์ของกล้วยน้ำว้าจะสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนกว่ากล้วยหอมทอง อาจเนื่องจากว่าผนังเซลล์ของกล้วยน้ำว้ามีสารโมเลกุลใหญ่ภายในโครงสร้างมากกว่าผนังเซลล์ของกล้วยหอมทอง ส่งผลให้การส่องผ่านของแสงบริเวณผนังเซลล์กล้วยน้ำว้าด้วยเครื่อง Light

Microscope มีปริมาณลดลง นอกจากนี้เซลล์ของกล้วยที่ไม่ผ่านการลวกทั้งสองพันธุ์มีการยึดเกาะกันระหว่างเซลล์ได้ดี การยึดเกาะกันระหว่างเซลล์เนื่องจากมีชั้น Middle Lamellar เป็นตัวประสานเชื่อมเซลล์ให้ติดกัน [16], [17]

อย่างไรก็ตามเมื่อลวกกล้วยแผ่นทั้งสองพันธุ์ด้วยน้ำร้อนพบว่าภายในโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 1 (ค) และ (ง) เซลล์ของกล้วยมีรูปร่างไม่แน่นอน รวมทั้งผนังเซลล์มีลักษณะไม่เรียบและสังเกตเห็นผนังเซลล์ได้ยาก ลักษณะของผนังเซลล์ที่เปลี่ยนแปลงนี้เนื่องจากการลวกด้วยความร้อนทำให้สารโมเลกุลใหญ่ภายในโครงสร้างผนังเซลล์เกิดการเสื่อมสลายตัวและมีขนาดเล็กลง [14], [18] ดังนั้นจึงทำให้โครงสร้างเซลล์สูญเสียความแข็งแรงจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง นอกจากนี้พบว่ากล้วยหอมทองเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเซลล์หลังการลวกน้ำร้อนมากกว่ากล้วยน้ำว้า อาจเนื่องจากผนังเซลล์ของกล้วยหอมทองมีความแข็งแรงน้อยกว่ากล้วยน้ำว้า ส่งผลให้โครงสร้างเซลล์ของกล้วยหอมทองมีความทนทานต่อความร้อนจากการลวกน้อยกว่ากล้วยน้ำว้า การลวกน้ำร้อนไม่เพียงส่งผลต่อโครงสร้างเซลล์แต่ยังส่งผลต่อการยึดติดกันระหว่างเซลล์ กล้วยทั้งสองพันธุ์สูญเสียการยึดติดกันระหว่างเซลล์บางส่วนทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเซลล์มากขึ้น การสูญเสียความสามารถในการยึดติดกันระหว่างเซลล์เนื่องจากความร้อนจากการลวกทำให้ชั้น Middle Lamellar เกิดการเสื่อมสภาพจึงส่งผลให้เซลล์สูญเสียการยึดติดกัน มีผลการทดลองที่สอดคล้องกันซึ่งรายงานโดย E. M. Ahmed et al. [16] นอกจากนี้ภายในเซลล์ของกล้วยที่ผ่านการลวกทั้งสองพันธุ์พบว่ามีสารละลายตัวของอนุภาคสตาร์ช ดังแสดงในรูปที่ 1 (ค) และ (ง)

3.2 อัตราส่วนปริมาตร

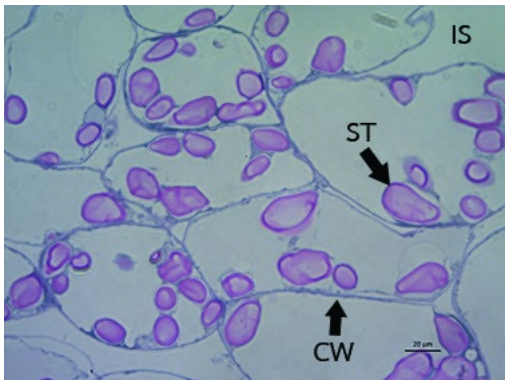
การหดตัวของกล้วยกรอบแสดงในเทอมของอัตราส่วนปริมาตร (Volume Ratio) ถ้ากล้วยกรอบมี

ร้อยละอัตราส่วนปริมาตรมากแสดงว่ากล้วยกรอบมีระดับการหดตัวน้อย [13] รูปที่ 2 แสดงผลของการลวกน้ำร้อนและระดับอุณหภูมิที่สัมพันธ์ต่ออัตราส่วนปริมาตรของกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบ กล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบที่ไม่ผ่านการลวกมีอัตราส่วนปริมาตรร้อยละ 54.8 – 65.4 และร้อยละ 73.2 – 83.4 ตามลำดับ การลวกน้ำร้อนส่งผลต่ออัตราส่วนปริมาตรของกล้วยกรอบทั้งสองพันธุ์แตกต่างกัน การลวกกล้วยน้ำว้าก่อนอบแห้งช่วยให้กล้วยน้ำว้ากรอบมีอัตราส่วนปริมาตรเพิ่มขึ้นระหว่างร้อยละ 12.3 – 15.1 เมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยกรอบที่ไม่ผ่านการลวก โดยกล้วยน้ำว้ากรอบที่ผ่านการลวกมีอัตราส่วนปริมาตรระหว่างร้อยละ 61.5 – 75.3 ขึ้นอยู่กับระดับอุณหภูมิที่พื้ การลวกช่วยส่งเสริมการขยายปริมาตรเนื่องจากการลวกทำให้โครงสร้างเซลล์ของกล้วยน้ำว้าเกิดการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 1 (ค) โครงสร้างเซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและสูญเสียการยึดติดกันระหว่างเซลล์ ส่งผลให้โครงสร้างเซลล์มีความแข็งแรงลดลงและมีความยืดหยุ่นมากขึ้น [6] ลักษณะดังกล่าวช่วยส่งเสริมให้เซลล์ขยายตัวได้ดีขณะพื้ด้วยอุณหภูมิสูง มีรายงานของ S. Paengkanya et al. [14] ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามการลวกน้ำร้อนทำให้กล้วยหอมทองกรอบมีอัตราส่วนปริมาตรลดลงระหว่างร้อยละ 24.0 – 28.7 เมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยที่ไม่ผ่านการลวก ปริมาตรที่ลดลงอาจมีสาเหตุมาจากผนังเซลล์ของกล้วยหอมทองมีการแตกและเสียสภาพมากเกินไปดังแสดงในรูปที่ 1 (ง) จึงทำให้โครงสร้างเซลล์ไม่สามารถกักเก็บไอน้ำระหว่างขั้นตอนพื้ด้วยอุณหภูมิสูงได้ ส่งผลให้กล้วยหอมทองเกิดการขยายปริมาตรได้น้อยขณะพื้ และมีรายงานของ C. Raikhamh et al. [13] ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกัน การลวกน้ำร้อนส่งผลให้กล้วยหอมกรอบมีอัตราส่วนปริมาตรต่ำสุดหรือเกิดการหดตัวมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยกรอบกลุ่มอื่นๆ การหดตัวที่มาก

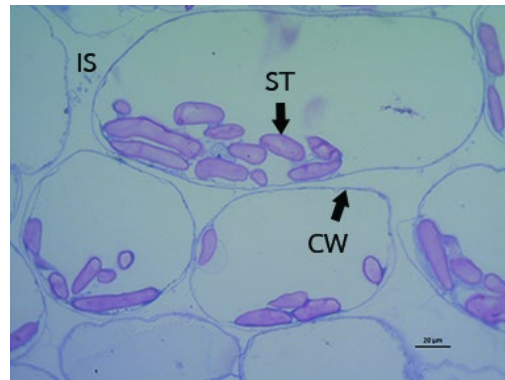
จะส่งผลกระทบต่อลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์กรอบ ซึ่งลักษณะดังกล่าวอาจลดความดึงดูดใจในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคได้

เมื่อพิจารณาผลของระดับอุณหภูมิพัฟฟิงต่ออัตราส่วนปริมาตร พบว่ากล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบมีอัตราส่วนปริมาตรต่ำที่สุดเมื่อพัฟฟิงด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มระดับอุณหภูมิพัฟฟิงสูงขึ้นเป็น 190 องศาเซลเซียส ช่วยให้กล้วยกรอบทุกกลุ่มมีปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากระดับอุณหภูมิพัฟฟิงที่สูงขึ้นทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานความร้อนให้กล้วยแผ่นมากขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิภายในกล้วยแผ่นจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว [5], [11] ส่งผลให้น้ำระเหยเร็วขึ้นและเกิดการสร้างความดันไอที่สูงขึ้นด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้กล้วยแผ่นมีการขยายปริมาตรมากขึ้น รายงานวิจัยของ S. Tabtiang et al. [9] ให้ผลการ

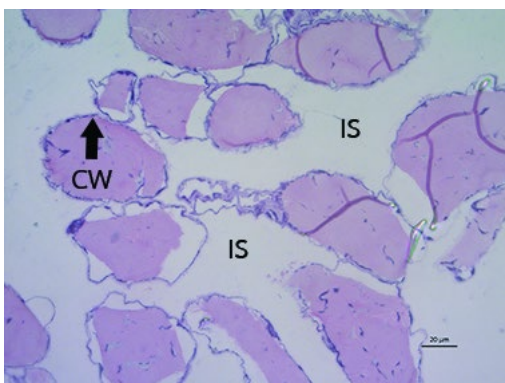
ทดลองที่สอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามการเพิ่มระดับอุณหภูมิพัฟฟิงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปริมาตรของกล้วยน้ำว้ากรอบที่ผ่านลวกมากกว่ากล้วยหอมกรอบที่ผ่านการลวก โดยกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมกรอบที่ผ่านลวกมีอัตราส่วนปริมาตรเพิ่มขึ้นร้อยละ 22.2 และ 8.6 ตามลำดับ เมื่อระดับอุณหภูมิพัฟฟิงเพิ่มจาก 150 องศาเซลเซียส ไปยังระดับอุณหภูมิสูงสุด ความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปริมาตรเนื่องจากโครงสร้างเซลล์ที่แตกต่างกันระหว่างกล้วยทั้งสองพันธุ์ โครงสร้างเซลล์ของกล้วยหอมทองมีการเสียสภาพมากกว่ากล้วยน้ำว้าหลังการลวก จึงส่งผลให้เซลล์ของกล้วยหอมทองมีความสามารถในการกักไอน้ำที่เกิดขึ้นขณะพัฟฟิงลดลง ดังนั้นการเพิ่มระดับอุณหภูมิพัฟฟิงจึงส่งผลต่อการเพิ่มปริมาตรของกล้วยหอมทองน้อยกว่ากล้วยน้ำว้า



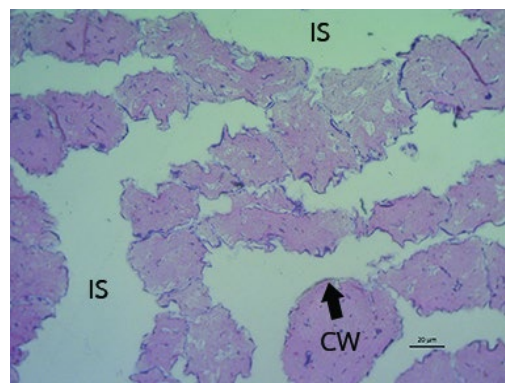
(ก) กล้วยน้ำว้าที่ไม่ผ่านการลวก



(ข) กล้วยหอมทองที่ไม่ผ่านการลวก

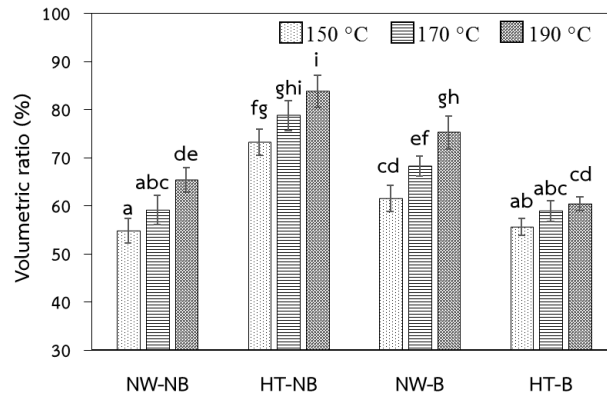


(ค) กล้วยน้ำว้าที่ผ่านการลวก

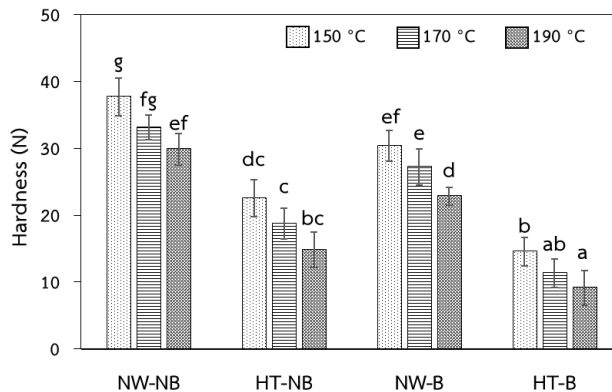


(ง) กล้วยหอมทองที่ผ่านการลวก

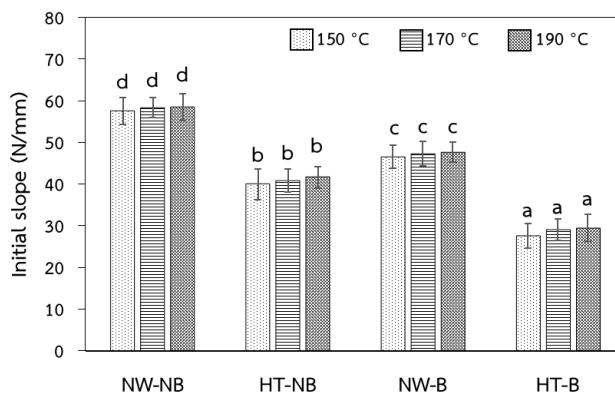
รูปที่ 1 โครงสร้างระดับจุลภาคของกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมทองที่สภาวะการปรับสภาพต่างๆ; ST = อนุภาคสตาร์ช; CW = ผนังเซลล์; IS = ช่องว่างระหว่างเซลล์



รูปที่ 2 ผลของการลวกน้ำร้อนและระดับอุณหภูมิที่พึงต่ออัตราส่วนปริมาตรของกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบ; NW-NB = กล้วยน้ำว้ากรอบที่ไม่ผ่านการลวก; HT-NB = กล้วยหอมทองกรอบที่ไม่ผ่านการลวก; NW-B = กล้วยน้ำว้ากรอบที่ผ่านการลวก; HT-B = กล้วยหอมทองกรอบที่ผ่านการลวก



รูปที่ 3 ผลของการลวกน้ำร้อนและระดับอุณหภูมิที่พึงต่อความแข็งของเนื้อสัมผัสกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบ; NW-NB = กล้วยน้ำว้ากรอบที่ไม่ผ่านการลวก; HT-NB = กล้วยหอมทองกรอบที่ไม่ผ่านการลวก; NW-B = กล้วยน้ำว้ากรอบที่ผ่านการลวก; HT-B = กล้วยหอมทองกรอบที่ผ่านการลวก



รูปที่ 4 ผลของการลวกน้ำร้อนและระดับอุณหภูมิที่พึงต่อค่าความชันเริ่มต้นของเนื้อสัมผัสกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบ; NW-NB = กล้วยน้ำว้ากรอบที่ไม่ผ่านการลวก; HT-NB = กล้วยหอมทองกรอบที่ไม่ผ่านการลวก; NW-B = กล้วยน้ำว้ากรอบที่ผ่านการลวก; HT-B = กล้วยหอมทองกรอบที่ผ่านการลวก

3.3 เนื้อสัมผัส

เนื้อสัมผัสของกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบพิจารณาในเทอมของความแข็ง (Hardness) และความชันเริ่มต้น (Initial Slope) ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ กล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบหลังการแปรรูปพบว่ามีค่าความชันสุดท้ายระหว่างร้อยละ 3.4 – 3.9 และ 3.2 – 3.8 ฐานแห้ง ตามลำดับ ซึ่งเป็นระดับความชันที่เหมาะสมจะทำให้กล้วยมีเนื้อสัมผัสที่กรอบ กล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบมีความแข็งของเนื้อสัมผัสระหว่าง 30.0 – 37.8 นิวตัน และ 14.8 – 22.5 นิวตัน ตามลำดับ ส่วนค่าความชันเริ่มต้นของกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบมีค่าระหว่าง 57.6 – 58.5 นิวตันต่อมิลลิเมตร และ 40.0 – 41.7 นิวตันต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ การลวกกล้วยก่อนการอบแห้งช่วยให้กล้วยกรอบมีเนื้อสัมผัสที่แข็งลดลงและค่าความชันเริ่มต้นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยกรอบที่ไม่ผ่านการลวก ณ ระดับอุณหภูมิพัพฟิงเดียวกัน เนื่องจากว่ากล้วยที่ผ่านการลวกน้ำร้อนมีการเสียสภาพของโครงสร้างเซลล์ ส่งผลให้โครงสร้างเซลล์มีความแข็งแรงลดลง ดังนั้นจึงทำให้กล้วยกรอบมีความต้านทานต่อแรงกดเพื่อตัดขึ้นกล้วยกรอบลดลง และสอดคล้องกับรายงานวิจัยก่อนหน้านี้ S. Paengkanya et al. [14] ได้รายงานว่กล้วยน้ำว้ากรอบที่ผ่านการปรับสภาพก่อนอบแห้งด้วยการลวกน้ำร้อนหรือการนึ่งไอน้ำร้อนจะมีเนื้อสัมผัสที่แข็งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยกรอบที่ไม่ผ่านการปรับสภาพก่อนอบแห้ง

เมื่อพิจารณากล้วยหอมทองกรอบพบว่ากล้วยหอมทองกรอบที่ผ่านการลวกมีอัตราส่วนปริมาตรต่ำว่าหรือมีการหดตัวมากกว่ากล้วยหอมทองกรอบที่ไม่ผ่านการลวก ณ ระดับอุณหภูมิพัพฟิงเดียวกัน การหดตัวที่สูงของกล้วยหอมทองกรอบที่ผ่านการลวกส่งผลให้กล้วยหอมทองกรอบที่ผ่านการลวกมีความพรุนตัวของโครงสร้างภายในต่ำกว่ากล้วยหอมทองกรอบที่ไม่ผ่าน

การลวก ตัวอย่างเช่น กล้วยหอมทองกรอบที่ไม่ผ่านการลวกและกล้วยหอมทองกรอบที่ผ่านการลวก เมื่อพัพฟิงที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส จะมีความพรุนตัวของโครงสร้างภายในร้อยละ 46.3 และ 30.2 ตามลำดับ ซึ่ง S. Tabtiang et al. [8] รายงานว่กล้วยกรอบที่มีความพรุนตัวของโครงสร้างภายในสูงกว่าจะมีความแข็งของเนื้อสัมผัสน้อยกว่ากล้วยกรอบที่มีความพรุนตัวของโครงสร้างต่ำกว่า อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้กลับพบว่ากล้วยหอมทองกรอบที่ผ่านการลวกมีความแข็งของเนื้อสัมผัสน้อยกว่ากล้วยหอมทองกรอบที่ไม่ผ่านการลวก ณ ระดับอุณหภูมิพัพฟิงเดียวกัน จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าลักษณะโครงสร้างของวัตถุดิบก่อนการแปรรูปมีอิทธิพลต่อเนื้อสัมผัสมากกว่าโครงสร้างกล้วยกรอบหลังการอบแห้ง

เมื่อพิจารณาผลของระดับอุณหภูมิพัพฟิงต่อค่าความแข็ง พบว่าเมื่อกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบมีความแข็งสูงสุดเมื่อพัพฟิงที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส การเพิ่มระดับอุณหภูมิพัพฟิงสูงขึ้นเป็น 190 องศาเซลเซียส ช่วยให้กล้วยกรอบทุกกลุ่มมีความแข็งของเนื้อสัมผัสลดลง ความแข็งที่ลดลงเนื่องจากอุณหภูมิพัพฟิงที่สูงขึ้นทำกล้วยกรอบมีอัตราส่วนปริมาตรเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างภายในมีความพรุนตัวสูงขึ้น ดังนั้นเนื้อสัมผัสของกล้วยกรอบจึงมีความแข็งลดลง [1], [4], [11] อย่างไรก็ตามการเพิ่มระดับอุณหภูมิพัพฟิงไม่ส่งผลต่อการเพิ่มของค่าความชันเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในกล้วยกรอบที่ไม่ผ่านการลวกและที่ผ่านการลวกน้ำร้อน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างกล้วยทั้งสองพันธุ์ พบว่ากล้วยน้ำว้ากรอบมีค่าความแข็งและค่าความชันเริ่มต้นของเนื้อสัมผัสมากกว่ากล้วยหอมทองกรอบทั้งกล้วยที่ไม่ผ่านและที่ผ่านการลวกน้ำร้อน เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของกล้วยทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างกัน กล้วยน้ำว้ามีปริมาณน้ำตาลมากกว่ากล้วยหอมทองทั้งสภาวะก่อนการลวกน้ำร้อนและหลังการ

ลวกน้ำร้อนดังตารางที่ 1 จึงส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ทั้งสองของเนื้อสัมผัสกล้วยน้ำว้ากรอบมีค่าสูงกว่ากล้วยหอมทองกรอบ ณ ระดับอุณหภูมิที่พื้เพียงเดียวกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Tabtiang et al. [20]

3.4 สี

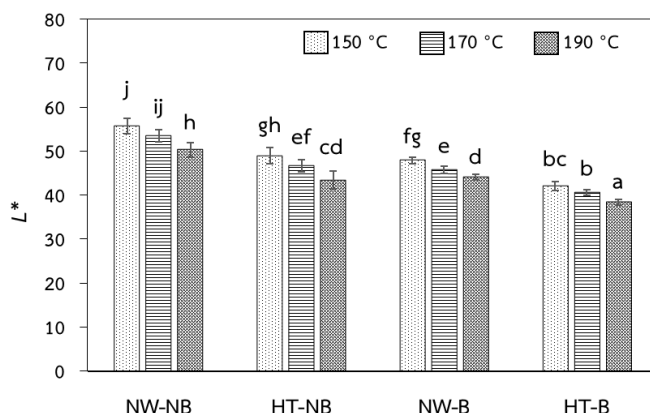
สีของกล้วยกรอบจะพิจารณาในเทอมของค่าความสว่าง (L^*) และค่าโทนสี (Hue Angle) ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 การลวกกล้วยน้ำว้าและระดับอุณหภูมิที่พื้ส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์สีทั้งสองของกล้วยกรอบกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบที่ไม่ผ่านการลวก เมื่อพื้ด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส มีสีขาวครีมปนสีแดงและสีขาวครีมปนสีน้ำตาลเข้มตามลำดับ ลักษณะของสีกล้วยกรอบที่เกิดขึ้นทำให้กล้วยน้ำว้ากรอบมีค่าความสว่างและค่าโทนสีเท่ากับ 55.7 และ 73.4 ตามลำดับ ส่วนกล้วยหอมทองกรอบมีค่าความสว่างและค่าโทนสีเท่ากับ 48.9 และ 70.0 ตามลำดับ การลวกกล้วยก่อนการแปรรูปช่วยปรับปรุงคุณภาพสีของกล้วยกรอบทั้งสองพันธุ์ ทำให้สีของกล้วยกรอบมีความสม่ำเสมอและเกิดสีน้ำตาลคล้ำลดลง กล้วยน้ำว้ากรอบที่ผ่านการลวกมีสีเหลืองทองและมันวาว ส่วนกล้วยหอมทองกรอบที่ผ่านการลวกมีสีเหลืองทอง

ปนสีแดงและมันวาว ลักษณะสีดังกล่าวทำให้กล้วยน้ำว้ากรอบที่ผ่านการลวกมีค่าความสว่างและโทนสีเท่ากับ 47.9 และ 75.6 ตามลำดับ ส่วนกล้วยหอมทองกรอบที่ผ่านการลวกมีค่าความสว่างและโทนสีเท่ากับ 42.11 และ 72.7 ตามลำดับ ค่าความสว่างของกล้วยกรอบที่ผ่านการลวกทั้งสองพันธุ์มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยกรอบที่ไม่ผ่านการลวก สาเหตุเนื่องจากการลวกน้ำร้อนทำให้อนุภาคสตรัคเจอร์ในเซลล์ของกล้วยสลายตัวและเกิดเจลลาตินเซชันของสตรัคเจอร์ งานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับรายงานของ Prachayawarakorn et al. [21] ซึ่งรายงานว่ากล้วยหอมทองกรอบที่ผ่านการนึ่งด้วยไอน้ำก่อนอบแห้งมีค่าความสว่างลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยหอมทองกรอบที่ไม่ผ่านการนึ่งไอน้ำ นอกจากนี้ค่าโทนสีของกล้วยกรอบที่ผ่านการลวกทั้งสองพันธุ์มีค่าสูงกว่ากล้วยกรอบที่ไม่ผ่านการลวก เนื่องจากการลวกน้ำร้อนช่วยลดกิจกรรมของเอนไซม์ Polyphenol Oxidase และ Peroxidase ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ใช้เอนไซม์ [14] รวมทั้งการลวกน้ำร้อนยังช่วยลดปริมาณของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวในเนื้อกล้วย ดังแสดงในตารางที่ 1 จึงส่งผลให้ผิวของกล้วยกรอบทั้งสองพันธุ์มีสีน้ำตาลลดลง

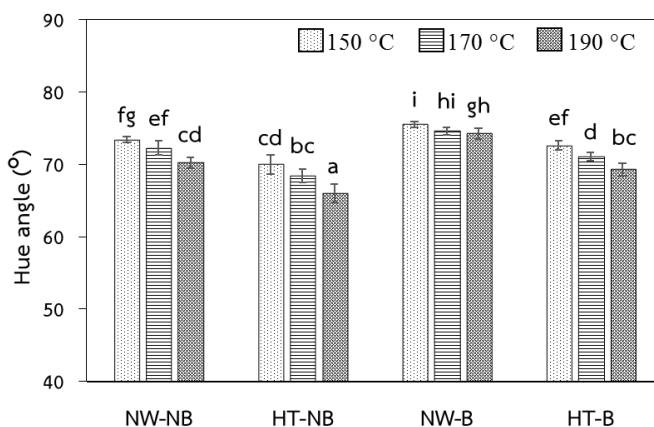
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีในกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมทองก่อนอบแห้ง

Variety	Pretreatment	Starch (g/g dry mass)	Fructose (g/g dry mass)	Glucose (g/g dry mass)
Namwa	None-blanching	0.701 ± 0.034 ^d	0.044 ± 0.003 ^b	0.048 ± 0.004 ^{bc}
	Blanching	0.554 ± 0.028 ^c	0.030 ± 0.004 ^a	0.033 ± 0.004 ^a
Homtong	None-blanching	0.411 ± 0.025 ^b	0.058 ± 0.005 ^c	0.060 ± 0.006 ^d
	Blanching	0.202 ± 0.031 ^a	0.040 ± 0.004 ^b	0.042 ± 0.003 ^b

Note: Different superscripts in the same column indicate that the values were significantly different at a 95% confidence level



รูปที่ 5 ผลของการลวกน้ำร้อนและระดับอุณหภูมิฟัพฟิงต่อค่าความสว่างของกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบ; NW-NB = กล้วยน้ำว้ากรอบที่ไม่ผ่านการลวก; HT-NB = กล้วยหอมทองกรอบที่ไม่ผ่านการลวก; NW-B = กล้วยน้ำว้ากรอบที่ผ่านการลวก; HT-B = กล้วยหอมทองกรอบที่ผ่านการลวก



รูปที่ 6 ผลของการลวกน้ำร้อนและระดับอุณหภูมิฟัพฟิงต่อค่าโทนสีของกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบ; NW-NB = กล้วยน้ำว้ากรอบที่ไม่ผ่านการลวก; HT-NB = กล้วยหอมทองกรอบที่ไม่ผ่านการลวก; NW-B = กล้วยน้ำว้ากรอบที่ผ่านการลวก; HT-B = กล้วยหอมทองกรอบที่ผ่านการลวก

เมื่อพิจารณาผลของระดับอุณหภูมิฟัพฟิงต่อค่าพารามิเตอร์สีของกล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมทองกรอบ การเพิ่มระดับอุณหภูมิฟัพฟิงจากต่ำสุดไปยังระดับ 190 องศาเซลเซียส ทำให้กล้วยกรอบทุกกลุ่มมีสีน้ำตาลมากขึ้น กล้วยน้ำว้ากรอบและกล้วยหอมกรอบที่ไม่ผ่านการลวกมีสีชาวมืดปนสีน้ำตาลและสีชาวมืดปนสีน้ำตาลอมดำรวมทั้งมีรอบไหม้บางส่วนบนผิวกล้วยตามลำดับ ส่วนกล้วยน้ำว้ากรอบที่ผ่านการลวกพบว่าไม่มีสีเหลืองทองปนสีแดงและมันวาว สำหรับกล้วยหอมกรอบ

ที่ผ่านการลวกพบว่าไม่มีสีเหลืองทองปนสีน้ำตาลเข้มและมันวาว ลักษณะสีที่เกิดขึ้นดังกล่าวส่งผลให้ค่าความสว่างและค่าโทนสีของกล้วยกรอบทุกกลุ่มมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยกรอบที่ฟัพฟิงด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส การเพิ่มระดับอุณหภูมิฟัพฟิงทำให้กล้วยกรอบเกิดสีน้ำตาลมากขึ้นเนื่องจากระดับอุณหภูมิฟัพฟิงที่สูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิภายในของกล้วยเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ [4], [8], [11] เป็นที่

สังเกตว่าการลวกน้ำร้อนช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยกรอบทั้งสองพันธุ์เมื่ออุณหภูมิพuffingเพิ่มจากระดับต่ำสุดไปยัง 190 องศาเซลเซียส ตัวอย่างเช่นกล้วยหอมทองกรอบที่ไม่ผ่านการลวกมีค่าความสว่างและค่าโทนีสีลดลงร้อยละ 11.3 และ 5.7 ตามลำดับ ส่วนกล้วยหอมทองกรอบที่ผ่านการลวกมีค่าความสว่างและค่าโทนีสีลดลงร้อยละ 8.8 และ 4.5 ตามลำดับ การลวกช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีเนื่องจากการลวกน้ำร้อนทำให้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวในกล้วยแผ่นมีการแพร่ออกจากกล้วยระหว่างการลวก จึงทำให้กล้วยที่ผ่านการลวกมีปริมาณน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวลดลงดังแสดงในตารางที่ 1 ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ของกล้วยกรอบจึงลดลงด้วย [22]

4. สรุป

การปรับสภาพโดยการลวกน้ำร้อนและระดับอุณหภูมิพuffingส่งผลกระทบต่อคุณภาพของกล้วยกรอบทั้งสองพันธุ์ การลวกน้ำร้อนช่วยปรับปรุงคุณภาพสีของกล้วยกรอบทั้งสองพันธุ์โดยกล้วยกรอบมีสีสม่ำเสมอมากขึ้นและเกิดสีน้ำตาลลดลง อัตราส่วนปริมาตรของกล้วยน้ำว้ากรอบที่ผ่านการลวกมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยกรอบที่ไม่ผ่านการลวก แต่การลวกกลับส่งผลให้กล้วยหอมทองกรอบมีปริมาตรลดลง การลวกน้ำร้อนร่วมกับระดับอุณหภูมิพuffingที่สูงขึ้นช่วยลดความแข็งของเนื้อสัมผัสกล้วยกรอบ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิพuffingที่ระดับสูงสุดทำให้กล้วยกรอบมีการเปลี่ยนแปลงสีมากขึ้น การลวกน้ำร้อนมีความเหมาะสมต่อการแปรรูปกล้วยน้ำว้ามากกว่ากล้วยหอมทอง และควรใช้อุณหภูมิพuffingไม่เกิน 170 องศาเซลเซียส

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้อุปกรณ์อบแห้งเพื่อการทดลองนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Saca and E. J. Lozano, "Explosion puffing of bananas," *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 27, no. 4, pp. 419 - 426, Aug. 1992.
- [2] A. S. Szczesniak, "Texture is a sensory property," *Journal of Food Quality and Preference*, vol. 13, no. 4, pp. 215 - 225, Jun. 2002.
- [3] S. Paengkanya, S. Soponronnarit and A. Nathakaranakule, "Application of microwave for drying of durian chip," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 96, pp. 1 - 11, Oct. 2015.
- [4] C. Raikham, S. Prachayawarakorn, A. Nathakaranakule and S. Soponronnarit, "Optimum conditions of fluidized bed puffing for producing crispy banana," *Drying Technology*, vol. 31, no. 6, pp. 726 - 739, Apr. 2013.
- [5] K. Hofsetz, C. C. Lopez, M. D. Hubinger, L. Mayor and A. M. Sereno, "Change in the physical properties of bananas on applying HTST pulse during air drying," *Journal of Food Engineering*, vol. 83, no. 4, pp. 531 - 540, Dec. 2007.
- [6] A. I. Varnalis, J. G. Brennan and D. B. MacDougall, "A proposed mechanism of high- temperature puffing of potato. Part I. the influence of blanching and drying conditions on the volume of puffed cubes," *Journal of Food Engineering*, vol. 48, no. 4, pp. 361 - 367, Jun. 2001.
- [7] N. C. Shilton, A. A. Bekhit and K. Niranjana, "Optimization of a dehydration process for potato cubes using an intermediate puffing

- step,” *Potato Research*, vol. 41, no. 3, pp. 203 - 209, Jun. 1998.
- [8] S. Tabtiang, S. Prachayawarakorn and S. Soponronnarit, “Effects of osmotic treatment and superheated steam puffing temperature on drying characteristics and textural properties of banana slices,” *Drying Technology*, vol. 30, no. 1, pp. 20 - 28, Jan. 2012.
- [9] S. Tabtiang, S. Prachayawarakorn and S. Soponronnarit, “Optimum condition of producing crisp osmotic banana using superheated steam puffing,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 97, no. 4, pp. 1244 - 1251, Mar. 2017.
- [10] P. Tanthong, S. Paengkanya and S. Tabtiang, “Effects of ripening level and puffing temperature on qualities of puffed Homthong banana slices,” *SNRU Journal of Science and Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 116 - 123, May 2018.
- [11] S. Tabtiang and S. Prachayawarakorn, “Effects of banana ripeness and puffing temperature on crisp banana qualities and drying time,” *Journal of Agricultural Technology*, vol. 13, no. 2, pp. 281 - 292, Mar. 2017.
- [12] S. Tabtiang, S. Paengkanya and S. Soponronnarit, “Effects of microwave blanching time and puffing temperature on drying time and qualities of crisp banana,” *Journal of Food Technology (Siam University)*, vol. 16, no. 1, pp. 32 - 42, Jan. 2021.
- [13] C. Raikham, S. Prachayawarakorn, A. Nathakaranakule and S. Soponronnarit, “Influences of pretreatments and drying process including fluidized bed puffing on quality attributes and microstructural changes of banana slices,” *Drying Technology*, vol. 33, no. 8, pp. 915 - 925, May 2015.
- [14] S. Paengkanya, S. Tabtiang, S. Prachayawarakorn and S. Soponronnarit, “Comparative study of effects of hot water and steaming blanching on crisp banana qualities,” *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports*, vol. 24, no. 1, pp. 49 - 60, Jan. 2021.
- [15] A. I. Varnalis, J. G. Brennan, D. B. McDougall and S. G. Gilmour, “Optimization of high temperature puffing of potato cubes using response surface methodology,” *Journal of Food Engineering*, vol. 61, no. 2, pp. 153 - 163, Feb. 2004.
- [16] E. M. Ahmed, S. Mirza and A. G. Arreola, “Ultrastructural and textural changes in processed carrot tissue,” *Journal of Food Quality*, vol. 14, no. 4, pp. 321 - 330, Aug. 1991.
- [17] V. Prasanna, T. N. Prabha and R. N. Tharanathan, “Fruit ripening phenomena – An overview,” *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 47, no. 1, pp. 1 - 19, Jan. 2007.
- [18] S. S. Roy, T. A. Taylor and H. L. Kramer, “Textural and ultrastructural changes in carrot tissue as affected by blanching and freezing,” *Journal of Food Science*, vol. 66, no. 1, pp. 176 - 180, Jan. 2001.
- [19] L. C. Greve, R. N. McArdle, J. R. Gohlke and J. M. Labavitch, “Impact of heating on carrot

- firmness: changes in cell wall components,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 42, no. 12, pp. 2900 - 2906, Dec. 1994.
- [20] S. Tabtiang, A. Yodrux, C. Nimmol, S. Prachayawarakorn, and S. Soponronnarit, “Effects of variety and ripening level on chemical composition, microstructure change, and qualities of crisp bananas,” *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 46, no. 3, e16366, Mar. 2017.
- [21] S. Prachayawarakorn, C. Raikham and S. Soponronnarit, “Effects of ripening stage and steam time on quality attributes of fat free banana snack obtained from drying process including fluidized bed puffing,” *Journal of Food Science and Technology*, vol. 53, no. 2, pp. 946 - 955, Feb. 2016.
- [22] M. Villamiel, D. del Castillo and N. Corzo, *Food Biochemistry and Food Processing*, Y. H. Hui, W. K. Nip, L. M. L. Nollet, G. Paliyath and B. K. Simpson, 1st ed. Oxford: Blackwell, 2006, pp. 71 – 100.

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

ผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์ไฟฟ้าและปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่อคุณภาพของใบมะกรูดและความสิ้นเปลืองพลังงาน

ปยุตยาพร แสนแปง¹ หยาดฝน ทนงการกิจ^{1*} และ ปริญ คงกระพันธ์²

¹ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

² วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

^{1,2} 63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

รับบทความ 26 ตุลาคม 2564 แก้ไขบทความ 10 พฤษภาคม 2565 ตอรับบทความ 28 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า และระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของใบมะกรูดรวมทั้งค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง โดยผลการศึกษาพบว่า อัตราการอบแห้งใบมะกรูดมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาผลการอบแห้งของทั้งสามระบบที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงที่สุดจึงส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นกว่าระบบปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์ไฟฟ้า ส่วนผลการศึกษาค่าสีของใบมะกรูดหลังการอบแห้งพบว่า การใช้ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 45 และ 55 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ใบมะกรูดอบแห้งมีค่าสีดีที่สุด นอกจากนี้ผลการศึกษาของปริมาณของสารและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระพบว่า ใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะนั้นพบว่า การอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าใช้พลังงานมากที่สุด ดังนั้นหากพิจารณาจากผลการศึกษาโดยรวมทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 330 นาที ส่งผลให้ใบมะกรูดอบแห้งมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพดีที่สุดโดยที่ใช้พลังงานในการอบแห้งน้อยที่สุด

คำสำคัญ : ความสิ้นเปลืองพลังงาน; ปั๊มความร้อน; ผสมผสาน; สารต้านอนุมูลอิสระ; ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 1698 9993, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: yardfon@mju.ac.th

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

Effects of Drying with Heat Pump, Heater and Heat Pump in Combination with Heater on Quality of Kaffir Lime Leaves and Energy Consumption

Poonyaporn Sanpang¹, Yardfon Tanongkankit^{1*} and Parin Khongkrapan²

¹ Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University

² School of Renewable Energy, Maejo University

^{1,2} 63 Moo 4, Nongharn, Sansai, Chiang Mai 50290

Received 26 October 2021; Revised 10 May 2022; Accepted 28 June 2022

Abstract

The objectives of this research were to study the effects of drying kaffir lime leaves using heat pump, heater and heat pump in combination with heater at temperatures of 45 , 55 and 65°C on physical and chemical properties of kaffir lime leaves and specific energy consumption. The results showed that the drying rate increased with an increase of drying temperature. When considering among three drying systems at the same drying temperature, it was also observed that an average drying rate of heat pump-heater drying exhibited the highest value resulting in shorter drying time than heat pump and heater system. For the result of color of kaffir lime leaves after drying, it was found that dried kaffir lime leaves with heater and heat pump in combination with heater system at 45 and 55°C provided the best color value. Moreover, the results of the antioxidant content and activity showed that dried kaffir lime leaves with heater and heat pump in combination with heater system at 55°C contained the highest content of beta-carotene and phenolic compounds and antioxidant activity. However, the result of energy usage revealed that heater had the highest specific energy consumption. Therefore, overall results indicated that drying with heat pump in combination with heater system at 55°C for 330 min led to dried kaffir lime leaves with the best of physical and chemical properties and the lowest energy consumption.

Keywords : Antioxidants; Combination; Energy Consumption; Heater; Heat Pump

** Corresponding Author. Tel.: +669 1698 9993, E-mail Address: yardfon@mju.ac.th*

1. บทนำ

ใบมะกรูด (*Citrus hystrix* D.C.) เป็นพืชสมุนไพรที่ถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบอย่างแพร่หลายในอาหารเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เนื่องจากมีกลิ่นหอมเฉพาะตัวและให้รสชาติที่โดดเด่นแก่อาหาร นอกจากนี้ยังมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญเช่น สารเบต้าแคโรทีนและสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งมีฤทธิ์ในการป้องกันโรคต่างๆ เช่น โรคกระเพาะ โรคหัวใจ และโรคหลอดเลือด [1], [2] แต่อย่างไรก็ตามใบมะกรูดนั้นเป็นพืชที่เน่าเสียได้ง่ายเมื่อพิจารณาจากสีและสารสำคัญที่เปลี่ยนแปลงไปใบมะกรูดจะมีอายุการเก็บรักษาเพียง 3 วัน ที่อุณหภูมิห้องและ 18 วัน ที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส [2], [3] ซึ่งอายุการเก็บรักษาที่สั้นนี้อาจเป็นข้อจำกัดหากจะนำใบมะกรูดมาใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรมหรือเพื่อการส่งออก ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการยืดอายุการเก็บรักษาใบมะกรูดโดยการอบแห้ง เนื่องจากมีงานวิจัยของ Pongsirikul [3] ที่รายงานว่า ใบมะกรูดแห้งที่เก็บไว้ในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ที่อุณหภูมิห้อง มีอายุการเก็บรักษาประมาณ 133 วัน เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของสีและสารสำคัญ

การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นกระบวนการที่ใช้กันทั่วไปในการลดความชื้นของวัสดุลงจนถึงระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเน่าเสียได้ [4] อากาศร้อนในเครื่องอบแห้งเกิดขึ้นได้จากแหล่งความร้อนหลายชนิด เช่น ฮีตเตอร์ไฟฟ้า เชื้อเพลิงชีวมวล และก๊าซ เป็นต้น โดยฮีตเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ทำความร้อนที่นิยมใช้กันมากที่สุดสามารถทำให้เกิดความร้อนโดยการให้ไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทานสูงจนเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งระบบนี้มีข้อดีคือ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สม่ำเสมอตามต้องการและมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ค่อนข้างเร็ว แต่อย่างไรก็ตามระบบนี้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูง ดังนั้นจึงมีการนำระบบปั๊มความร้อนซึ่งใช้หลักการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการเปลี่ยนสถานะของสารทำความเย็นในการทำให้อากาศร้อน [5]

ซึ่งต่างจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนโดยตรง จึงทำให้ช่วยประหยัดพลังงานในการอบแห้ง [6] โดยมีงานวิจัยที่ผ่านมาของ Taseria et al. [7] ได้รายงานว่าการอบแห้งที่ทำให้แห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนใช้พลังงานในการอบแห้งลดลงประมาณร้อยละ 51 เมื่อเทียบกับระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามระบบนี้มีข้อจำกัดคืออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิความร้อนจะช้ากว่าการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าจึงทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งนานกว่า เมื่อพิจารณาจากข้อดีและข้อจำกัดของการให้ความร้อนทั้งสองระบบจะเห็นได้ว่า หากนำระบบให้ความร้อนทั้งสองแบบมาผสมผสานกันก็อาจจะช่วยทำให้อัตราการอบแห้งและการใช้พลังงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น และจากการศึกษาทางวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีรายงานเกี่ยวกับการใช้ระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการอบแห้งใบมะกรูด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของการอบแห้งใบมะกรูดที่มีแหล่งความร้อนเป็นฮีตเตอร์ไฟฟ้า ปั๊มความร้อนและระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ย สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของใบมะกรูดและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

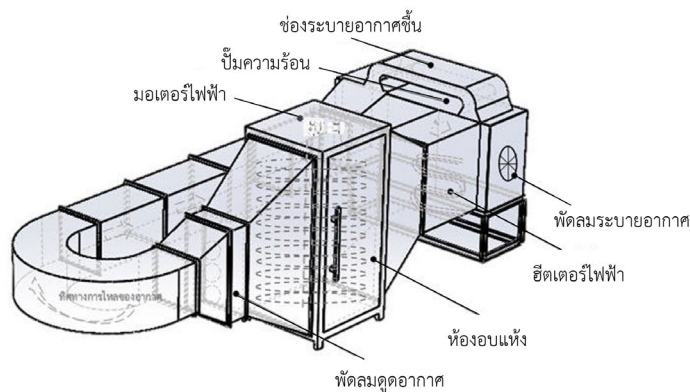
นำใบมะกรูดสดที่มาจากแหล่งปลูกในอำเภอฟัว จังหวัดเชียงใหม่ มาคัดคุณภาพโดยใบมะกรูดจะต้องไม่มีจุดสีดำหรือมีแมลงเจาะ มีขนาดความกว้าง 3-4 เซนติเมตร ความยาว 8-10 เซนติเมตร และความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 65.28 ± 1.02 ฐานเปียก จากนั้นนำไปล้างน้ำให้สะอาดและผึ่งให้สะเด็ดน้ำ

2.2 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการศึกษา

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 1 สามารถควบคุมการทำงานของแหล่งความร้อนแต่ละชนิดอย่างอิสระ โดยในระหว่างการศึกษาการอบแห้ง

ด้วยระบบปั๊มความร้อนที่มีขนาด 10.5 กิโลวัตต์ ซึ่งใช้สารทำความเย็น R-134a คอมเพรสเซอร์ขนาด 4 กิโลวัตต์ อัตราการไหลของอากาศ 0.3 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และสัดส่วนของอากาศที่ไหลข้ามเครื่องระเหยร้อยละ 75 แหล่งความร้อนฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะถูกปิดการทำงาน และเมื่อทำการอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งมีขนาด 18 กิโลวัตต์ ระบบปั๊มความร้อนก็จะถูกปิด

การทำงาน ในส่วนของการอบแห้งด้วยระบบผสมผสาน ในช่วงแรกของการอบแห้ง ระบบปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะถูกเปิดให้ทำงานพร้อมกันจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ จากนั้นจะทำการปิดระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า เหลือเพียงแต่การทำงานของระบบปั๊มความร้อนสำหรับควบคุมอุณหภูมิที่กำหนดไว้ ในระหว่างการอบแห้ง ความเร็วลมจะถูกควบคุมไว้ที่ 1.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง

2.3 การศึกษาการอบแห้ง

ในการศึกษาการอบแห้ง นำใบมะกรูดสดที่เตรียมไว้มาวางลงบนถาด ถาดละ 1 กิโลกรัม จำนวน 10 ถาด จากนั้นทำการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งต่างๆ ที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการอบแห้งที่ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกลิ่นใบมะกรูดอย่างมีนัยสำคัญ [8] ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างใบมะกรูดสดจากตู้อบแห้งทุก 30 นาที เพื่อนำมาวัดความชื้นจนกระทั่งความชื้นของใบมะกรูดคงที่ แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปหาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งโดยพิจารณาจากเวลาที่ใช้อบแห้งจนกระทั่งใบมะกรูดมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 12 ฐานเปียก ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้อบแห้ง (มผช.136/2558) หลังจากนั้นทำการอบแห้งใบมะกรูดตามเวลาอบแห้งที่ได้ในแต่ละอุณหภูมิ และเก็บตัวอย่างในถุงอะลูมิเนียมฟอยด์ปิดสนิท ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกระทั่งนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

2.4 ความชื้นและอัตราการอบแห้งเฉลี่ย

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นทำตามวิธีของ AOAC [9] โดยนำตัวอย่างประมาณ 3 กรัม ใส่ลงในกระป๋องอะลูมิเนียมที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้นออกแล้วนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักหลังอบแห้ง และคำนวณตามสมการที่ (1)

$$M_{wb.} = \frac{(W-d)}{W} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

$M_{wb.}$ คือ ความชื้นฐานเปียก (ร้อยละ)

W คือ มวลเปียกของวัสดุ (กรัม)

d คือ มวลแห้งของวัสดุ (กรัม)

การวิเคราะห์อัตราการอบแห้งเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$DR_{\text{average}} = \frac{(M_i - M_0)}{t} \quad (2)$$

โดยที่

DR_{average} คือ อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (กิโลกรัม น้ำที่ระเหย ต่อชั่วโมง)

M_0 คือ มวลของวัสดุที่เวลาการอบแห้ง (กิโลกรัม)

M_i คือ มวลของวัสดุที่เวลาเริ่มต้น (กิโลกรัม)

t คือ เวลาในการรอบแห้ง (ชั่วโมง)

2.5 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w)

นำใบมะกรูดอบแห้งในแต่ละสภาวะการ
ทดลอง จำนวน 3 กรัม ใส่ในเครื่อง α_w meter (Aqua
Lab รุ่น Series 3TE, สหรัฐอเมริกา) จากนั้นเครื่องจะ
แสดงผลบนหน้าจอพร้อมบันทึกค่า

2.6 คำสั่ง

การวิเคราะห์สีของใบมะกรูดด้วยเครื่องวัดสี (Hunter Lab รุ่น Mini Scan XE Plus, สหรัฐอเมริกา) ด้วยระบบ CIE ซึ่งแสดงผลในเทอมของค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดงและสีเขียว ($+a^*$, $-a^*$) และค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน ($+b^*$, $-b^*$) และค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (3)$$

โดยที่

$L^* a^*$ และ b^* คือ ค่าพารามิเตอร์สี่ของโบนะกรุดแห้ง
 $L_0^* a_0^*$ และ b_0^* คือ ค่าพารามิเตอร์สี่ของโบนะกรุดสด

2.7 ปริมาณเบต้าแคโรทีน

การวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีน ตามวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีการของ Hornero-Mendez and Minguez-Mosquera [10] โดยนำตัวอย่างใบมะกรูดอบแห้งประมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำโซเดียม 75 มิลลิลิตรลงไป คนผสม

ให้เข้ากัน จากนั้นทิ้งไว้ในที่มีแดดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 จากนั้นนำส่วนใสที่กรองได้มาทำการปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยอะซิโตน นำสารละลายที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีนโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ UV-vis ที่ความยาวคลื่น 453 นาโนเมตร คำนวณจากการเปรียบเทียบกับกราฟสารละลายมาตรฐานของเบต้าแคโรทีน และวิเคราะห์ผลเป็นมิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้ง

2.8 การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

การวิเคราะห์สารประกอบพีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระตามวิธีของ Kunvana et al. [11] โดยนำตัวอย่างใบมะกรูดอบแห้งที่บดเป็นผงแล้วมาชั่งน้ำหนัก 5 กรัม และใส่ลงในบีกเกอร์ จากนั้นนำเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 75 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และคนผสมให้เข้ากัน ตั้งไว้เป็นเวลา 30 นาที นำสารสกัดที่ได้ไปหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 เก็บตัวอย่างสกัดส่วนใสไว้ในขวดปิดสนิท ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำมาใช้วิเคราะห์

การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทำได้โดยนำสารสกัดใบมะกรูดที่เตรียมไว้ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 2 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลาย Folin-Ciocalteu Phenol Reagent ลงไป 0.1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ UV-vis ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร คำนวณค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมทั้งหมดเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก รายงานผลเป็นมิลลิกรัม GAE ต่อกรัมตัวอย่างแห้ง

การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระทำได้โดย ซึ่งสาร 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) 0.1972 กรัม จากนั้นปรับปริมาตรด้วยเมทานอลเป็น 100 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลาย DPPH นี้มา 2 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยเมทานอล 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลาย DPPH เข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ จากนั้นปิเปตสารสกัดตัวอย่างที่เตรียมไว้ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย DPPH ปริมาตร 2.9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งไว้ในที่มืดนาน 30 นาที พร้อมกับตัวอย่างควบคุม (Control) ซึ่งเป็นสารละลาย DPPH ที่ไม่มีตัวอย่างสารสกัด จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร และรายงานผลเป็นค่า ร้อยละ Inhibition ซึ่งคำนวณตามสมการที่ (4)

$$Inhibition = \frac{(A_{control} - A_{sample})}{A_{control}} \times 100 \quad (4)$$

โดยที่

Inhibition คือ ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (ร้อยละ)

A_{sample} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของชุดทดสอบ

$A_{control}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุม

2.9 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

การวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทำได้โดยการวัดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งในแต่ละสภาวะการทดลองด้วยเครื่องวัดพลังงานยี่ห้อ Kepler Series Current Transformer 3 phase รุ่น KCT-60-400/5A จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณดังสมการที่ (5)

$$SEC = \frac{(P_e \times 3600)}{(W_i - W_f)} \quad (5)$$

โดยที่

SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูล/กิโลกรัมน้ำที่ระเหย)

P_e คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

W_i คือ มวลใบมะกรูดก่อนอบแห้ง (กิโลกรัม)

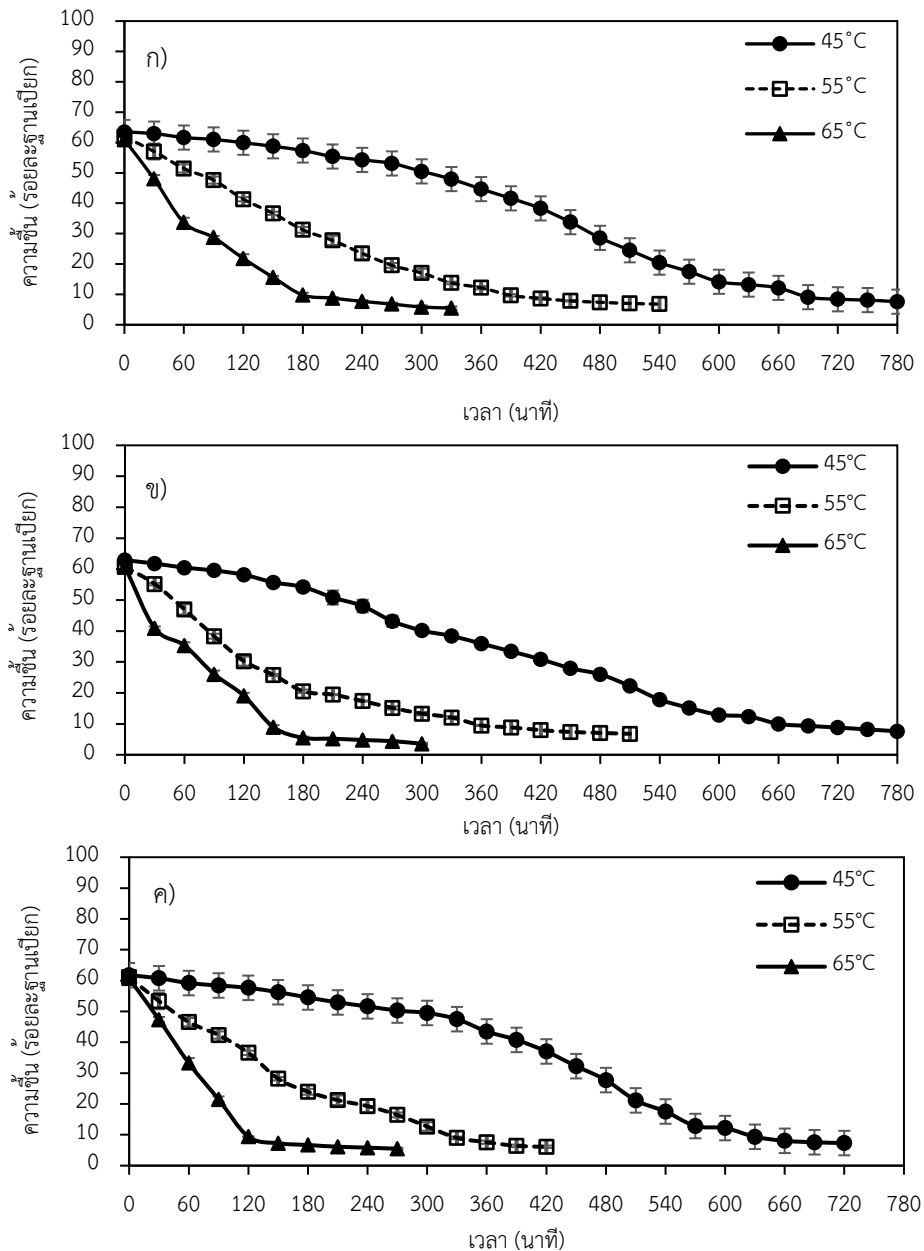
W_f คือ มวลใบมะกรูดหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)

2.10 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยวิธี ANOVA ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 17.0 (SPSS Inc., สหรัฐอเมริกา) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการทดลองแสดงในรูปค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์ไฟฟ้า และระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียสในรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าความชื้นของใบมะกรูดในทุกสภาวะการทดลองลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งนานขึ้น โดยอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการลดลงของความชื้นมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการลดลงความชื้นที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสจะช้ากว่าที่อุณหภูมิ 55 และ 65 องศาเซลเซียสอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นก็จะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างลมร้อนและใบมะกรูดมากขึ้น จึงส่งผลให้มีความแตกต่างของความดันไอน้ำในเซลล์วัสดุที่สูงขึ้นตาม ทำให้เกิดการแพร่ของมวลไอน้ำออกจากวัสดุมาสู่ลมร้อนได้เร็วขึ้น [12] ดังนั้นในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสมีความแตกต่างของความดันไอระหว่างน้ำในวัสดุกับอากาศน้อยมากจึงทำให้เกิดการแพร่ของมวลไอน้ำออกจากวัสดุช้ากว่าที่อุณหภูมิ 55 และ 65 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2 ความชื้นของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบ ก) ป้อนความร้อน ข) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า และ ค) ป้อนความร้อนร่วมกับ ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

นอกจากนี้ หากพิจารณาผลการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสโดยใช้ระบบความร้อนแตกต่างกัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3 พบว่า อัตราการลดลงของความชื้นของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบป้อนความร้อนต่ำกว่าระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบป้อนความร้อน

ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า และสามารถพิจารณาได้จากค่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยซึ่งแสดงในตารางที่ 1 ของระบบป้อนความร้อนมีค่าน้อยที่สุด ในขณะที่อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของระบบป้อนความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน จึงส่งผลให้เวลา

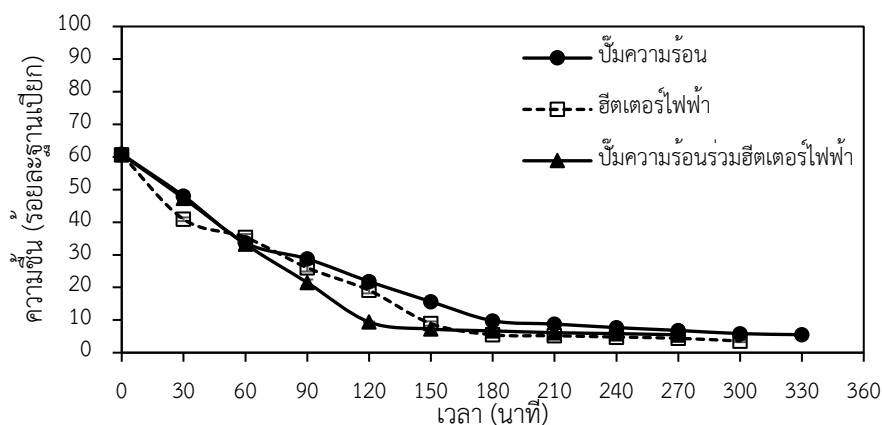
ที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งพิจารณาจากเวลาที่ความชื้นของใบมะกรูดมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 12 ฐานเปียก ด้วยระบบปั๊มความร้อนนานกว่าระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิความร้อนในระบบปั๊มความร้อนต้องอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำความเย็นในการทำให้อากาศร้อน ในขณะที่ฮีตเตอร์ไฟฟ้าอาศัยหลักการสร้างความร้อนจากการเกิดความร้อนต้านทานไฟฟ้าจึงสามารถทำอุณหภูมิได้อย่างรวดเร็ว ส่วนระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าซึ่งมีการใช้

ฮีตเตอร์ไฟฟ้าช่วยในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศในช่วงแรกของการอบแห้ง ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศร้อนด้วยระบบปั๊มความร้อนที่ช้ากว่าจึงทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยใบมะกรูดมีค่าน้อยกว่าและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจึงนานกว่าระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า นอกจากนี้ผลการศึกษาค่า α_w ของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยสภาวะต่างๆ นั้นพบว่าทุกตัวอย่างมีค่า α_w ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนสำหรับอาหารแห้งที่ทำให้ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้

ตารางที่ 1 เวลาอบแห้ง ความชื้นสุดท้าย และค่า α_w ของใบมะกรูดอบแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยสภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน

ระบบความร้อน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (กิโลกรัม น้ำที่ระเหยต่อ ชั่วโมง)	เวลาอบแห้ง (นาที)	ความชื้นสุดท้าย (ร้อยละฐานเปียก)	ค่า α_w
ปั๊มความร้อน	45	0.42±0.03 ^g	690	9.09±0.24 ^a	0.54±0.01 ^a
	55	0.77±0.03 ^f	390	9.68±0.40 ^a	0.36±0.01 ^c
	65	1.67±0.09 ^c	180	9.78±0.75 ^a	0.30±0.02 ^d
ฮีตเตอร์ไฟฟ้า	45	0.45±0.02 ^g	660	9.98±0.24 ^a	0.53±0.02 ^{ab}
	55	0.83±0.03 ^e	360	9.48±0.21 ^a	0.37±0.01 ^c
	65	2.00±0.10 ^b	150	8.92±0.67 ^a	0.30±0.02 ^d
ปั๊มความร้อน ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า	45	0.48±0.03 ^g	630	9.35±0.83 ^a	0.52±0.01 ^b
	55	0.91±0.02 ^d	330	9.00±0.70 ^a	0.36±0.01 ^c
	65	2.50±0.13 ^a	120	9.40±0.15 ^a	0.28±0.01 ^d

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



รูปที่ 3 ความชื้นของใบมะกรูดที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสด้วยระบบปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์ไฟฟ้าและ ปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า

ผลการศึกษาค่าสีของใบมะกรูดแสดงในตารางที่ 2 พบว่า การอบแห้งใบมะกรูดในทุกกระบวนการที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ส่งผลให้มีค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง ($+b^*$) มากที่สุด แต่มีค่าความเป็นสีเขียว ($-a^*$) น้อยที่สุด นั้นมีสาเหตุจากการที่เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งจะทำให้คลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นรงควัตถุสีเขียวสลายตัวไปรวมทั้งความร้อนที่สูงขึ้นสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลในระหว่างการอบแห้งจึงทำให้ใบมะกรูดมีสีเขียวลดลง ค่าสีเหลืองและสีสว่างมากขึ้น [11] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Weemaes et al. [12] ที่รายงานว่า การสลายตัวของคลอโรฟิลล์ในบล็อกเคอร์รี่จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ของใบมะกรูดอบแห้งเมื่อเทียบกับใบมะกรูดสดแล้วพบว่า สีใบมะกรูดอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส มีความแตกต่างจากใบมะกรูดสดมากที่สุด โดยที่ใบมะกรูดอบแห้งที่

อุณหภูมิ 45 และ 55 องศาเซลเซียส มีค่า ΔE ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของระบบความร้อนต่อค่า ΔE นั้นจะเห็นได้ว่าการอบแห้งด้วยระบบบ่มความร้อนส่งผลใบมะกรูดให้มีค่า ΔE มากที่สุด เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งด้วยระบบบ่มความร้อนยาวนานกว่าระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบบ่มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า ดังนั้นจึงเกิดการสลายตัวของคลอโรฟิลล์และเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลได้มากกว่า สีของใบมะกรูดอบแห้งด้วยระบบบ่มความร้อนจึงมีสีที่เปลี่ยนแปลงจากใบมะกรูดสดมากที่สุด ดังนั้นหากพิจารณาจากค่าสีของตัวอย่างทั้งหมด จะเห็นได้ว่าสถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งใบมะกรูด คือการใช้ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าหรือระบบบ่มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 45 หรือ 55 องศาเซลเซียส เนื่องจากสีของใบมะกรูดอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกับใบสดมากกว่าการอบแห้งด้วยระบบฮีตบ่มหรือการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2 ค่าสีของใบมะกรูดสดและที่ผ่านการอบแห้งด้วยสภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน

ระบบความร้อน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าสี			
		L^*	a^*	b^*	ΔE
-	สด	39.36±0.98 ^d	-9.53±0.20 ^e	15.39±0.26 ^d	-
บ่มความร้อน	45	44.67±0.41 ^a	-6.98±0.14 ^b	29.68±0.85 ^{bc}	15.46±0.91 ^c
	55	42.08±0.74 ^c	-8.27±0.17 ^d	30.20±0.07 ^b	15.12±0.14 ^c
	65	43.80±1.05 ^{ab}	-6.42±0.18 ^a	34.51±0.47 ^a	19.90±0.40 ^a
ฮีตเตอร์ไฟฟ้า	45	43.33±0.03 ^b	-7.76±0.07 ^c	28.59±0.86 ^c	13.90±0.82 ^d
	55	41.63±0.10 ^c	-6.80±0.09 ^b	28.84±0.63 ^c	13.91±0.62 ^d
	65	44.12±0.05 ^{ab}	-6.49±0.09 ^a	34.31±0.18 ^a	19.74±0.17 ^a
บ่มความร้อน ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า	45	41.32±0.25 ^c	-6.41±0.29 ^a	28.68±0.39 ^c	13.80±0.34 ^d
	55	41.46±0.35 ^c	-7.53±0.15 ^c	27.98±0.45 ^c	12.92±0.48 ^d
	65	43.34±0.31 ^b	-6.20±0.13 ^a	33.33±0.72 ^a	18.68±0.71 ^b

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ในตารางที่ 3 แสดงผลการศึกษาของปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งได้แก่ เบต้าแคโรทีนและสารประกอบฟีนอลิกรวมและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

ในใบมะกรูดสดและใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยสภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่า ปริมาณสารเบต้าแคโรทีน สารประกอบฟีนอลิกรวมและฤทธิ์การ

ด้านอนุมูลอิสระในใบมะกรูดอบแห้งมีค่าน้อยกว่าใบสด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ของทุกระบบความร้อนส่งผลให้ค่าปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากกว่าอุณหภูมิ 45 และ 65 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากการสลายตัวของสารต้านอนุมูลอิสระเกิดได้จากความร้อน โดยสารเบต้าแคโรทีนและฟีนอลิกจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [13,14] และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [4] ดังนั้นในระหว่างการอบแห้งการลดลงของสารต้านอนุมูลอิสระจึงเกิดจากผลรวมของทั้งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อพิจารณาการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าจะเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 55 องศาเซลเซียส แต่ใช้เวลาการอบแห้งนานกว่า การลดลงของสารต้านอนุมูลอิสระจึงเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากกว่า ในขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นั้น แม้ว่าจะใช้เวลาการอบแห้งสั้นกว่าที่อุณหภูมิ 55 องศา

เซลเซียส แต่การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจึงเป็นการทำลายสารต้านอนุมูลอิสระได้มากกว่า โดยผลศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wanyo et al. [15] ที่รายงานว่าการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงมีค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาผลของระบบความร้อนต่อปริมาณและฤทธิ์ของสารต้านอนุมูลอิสระจะเห็นได้ว่า ปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีค่ามากกว่าระบบปั๊มความร้อน ดังนั้นหากพิจารณาปริมาณและฤทธิ์ของสารต้านอนุมูลอิสระ สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ การใช้ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าหรือระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3 ปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

ระบบความร้อน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เบต้าแคโรทีน (มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้ง)	สารประกอบฟีนอลิกรวม (มิลลิกรัม _{GAE} ต่อน้ำหนักแห้ง)	ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (ร้อยละ)
	สด	2.93±0.02 ^a	43.03±1.01 ^a	62.23±0.49 ^a
ปั๊มความร้อน	45	1.70±0.06 ^e	9.90±0.19 ^g	52.13±0.73 ^{de}
	55	1.83±0.01 ^{de}	14.52±0.33 ^{cd}	54.69±1.70 ^{bcd}
	65	1.80±0.03 ^{de}	14.02±0.88 ^d	51.98±1.79 ^{de}
ฮีตเตอร์ไฟฟ้า	45	1.91±0.01 ^{cd}	12.47±0.34 ^e	52.37±0.71 ^{de}
	55	2.08±0.09 ^{bc}	15.53±0.10 ^{bc}	56.67±0.25 ^b
	65	1.80±0.24 ^{de}	14.39±0.27 ^d	53.24±1.30 ^{cde}
ปั๊มความร้อน ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า	45	1.83±0.01 ^{de}	11.06±1.52 ^f	51.29±3.26 ^e
	55	2.13±0.11 ^b	15.63±0.13 ^b	55.56±0.74 ^{bc}
	65	1.93±0.02 ^{cd}	14.32±0.07 ^d	52.66±0.68 ^{de}

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลของการใช้พลังงานในการอบแห้งใบมะกรูดที่สภาวะต่างๆ แสดงในตารางที่ 4 โดยผลการศึกษพบว่า

การอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนมีค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะที่น้อยที่สุดและระบบฮีตเตอร์มีค่า

พลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะมากที่สุด โดยมีสาเหตุดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิความร้อนในระบบปั๊มความร้อนอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำความเย็นในการทำให้อากาศร้อนจึงมีการใช้พลังงานเฉพาะในส่วนของการพัดลมและระบบควบคุม แต่ฮีตเตอร์ไฟฟ้าต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการสร้างความร้อนด้วย จึงมีการค่าการใช้พลังงานสิ้นเปลืองสูง ในขณะที่ระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะมีการใช้พลังงานทั้งสองระบบพร้อมกันเพื่อทำให้อุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่กำหนดจากนั้นจะเหลือเพียงระบบปั๊มความร้อนที่ทำงาน ดังนั้นจะมีการใช้พลังงานสูงในช่วงแรก ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะจึงน้อยกว่าระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าแต่มากกว่าระบบปั๊มความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่า การอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะที่ใช้การอบแห้งนั้นมีค่าลดลง แต่กลับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า ในขณะที่ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะในการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 และ 65 องศาเซลเซียส มีสาเหตุจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในระบบปั๊มความร้อนซึ่งส่วนใหญ่เป็นพัดลมและระบบควบคุมจึงลดลงเมื่อเวลาอบแห้งสั้นลง แต่อย่างไรก็ตามค่าการใช้พลังงานสิ้นเปลืองกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากในการเพิ่มอุณหภูมิด้วยฮีตเตอร์ต้องเพิ่มความต้านทานของไฟฟ้าจึงทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบที่สูงขึ้น ในขณะที่ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะในการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 และ 65 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้า ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะจึงสูงกว่า 45 และ 55 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4 พลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

ระบบความร้อน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	พลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะ (เมกะจูล/กิโลกรัมน้ำที่ระเหย)
ปั๊มความร้อน	45	12.4±0.6 ^e	8.93±0.42 ^e
	55	11.7±0.4 ^e	8.42±0.64 ^e
	65	10.5±0.5 ^f	7.56±0.36 ^f
ฮีตเตอร์ไฟฟ้า	45	16.2±0.6 ^c	11.66±0.38 ^c
	55	17.4±0.4 ^b	12.53±0.47 ^b
	65	19.3±0.4 ^a	13.90±0.40 ^a
ปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า	45	15.1±0.6 ^c	10.87±0.39 ^c
	55	13.8±0.5 ^d	9.94±0.41 ^d
	65	18.7±0.7 ^a	13.46±0.34 ^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4. สรุป

ผลการศึกษาการใช้ระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65 องศาเซลเซียสในการอบแห้งใบมะกรูดพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นและการใช้ระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าส่งผลให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยมากที่สุด เวลาในการอบแห้งจึงสั้นที่สุด นอกจากนี้การอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้าและระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นั้นส่งผลให้ค่า ปริมาณเบต้าแคโรทีนและสารประกอบฟีนอลิกรวมและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมีค่าดีที่สุด ส่วนผลของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะนั้นพบว่า การอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดแต่ระบบฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีค่ามากที่สุด ดังนั้นหากพิจารณาผลการศึกษาโดยรวมทั้งทางด้านสมบัติทางกายภาพและเคมีของใบมะกรูดอบแห้งรวมทั้งความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะเห็นได้ว่า การอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ 55 องศาเซลเซียสเป็นสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ที่ให้สนับสนุนทุนวิจัยบัณฑิตศึกษาด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร ประจำปีงบประมาณ 2563

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Venkatachalam, "Changes in phytochemicals and antioxidant properties of kaffir lime leaves under chilling storage," *Khon Kaen Agriculture Journal*, vol. 47, pp. 531-536, Feb. 2019.
- [2] S. M. Tasirin, I. Puspasari, A. W. Lun, P. V. Chai, W. T. Lee, "Drying of kaffir lime leaves in a fluidized bed dryer with inert particles: Kinetics and quality determination," *Industrial Crops Products*, vol. 61, pp. 193–201, Nov. 2014.
- [3] I. Pongsirikul, "Shelf life of dried kaffir lime leaves using solar dryer, hot air tray dryer and vacuum microwave dryer," M.S. thesis, Dept. Postharvest. Technol., Chiang Mai Univ., Chiang Mai, Thailand, 2010.
- [4] C. Phungamgnoen, P. Detchewa, Y. Tanongkankit and J. Moongngam, "Physicochemical properties of dried guizhou as affected by pretreatments, drying techniques and storage period," *Journal of Sustainability Science and Management*, vol. 16, no. 5, pp. 1-21, Jul. 2021.
- [5] P. Chunkaew, "Development and evaluation of mini heat pump dryer for slice banana," *RMUTP Research Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 179-192, Jan. 2021.
- [6] C. Tnckal and I. Doymaz, "Performance analysis and mathematical modelling of banana slices in a heat pump drying system," *Renewable Energy*, vol. 150, pp. 918-923, May 2020.
- [7] L. Taseria, M. Aktasb, S. Sevikc, M. Gülcüa, G. U. Seçkina and B. Aktekelid, "Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer," *Food Chemistry*, vol. 260, pp. 152–159, Sep. 2018.
- [8] W. Jirapakkul, P. Tinchana and S. Chaiseri, "Effect of drying temperature on key odourants in kaffir lime (*Citrus hystrix* D.C., Rutaceae) leaves," *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 48, no. 1, pp. 143-149, Sep. 2012.
- [9] AOAC. *Official Method of Analysis of AOAC International*, 17th ed. Washington DC: The Association of Official Analytical Chemists, 2000.
- [10] D. Hornero-Mendez and M. I. Minguez-Mosquera, "Rapid spectrophotometric determination of red and yellow isochromic carotenoid fractions in paprika and red pepper oleoresins," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 49, no. 8, pp. 3584-3588, Aug. 2001.
- [11] S. Kunvana, Y. Tanongkankit and P. Khongkrapan, "Development of production

- process of dried mulberry leaf for infusion using a combined infrared and hot air drying,” *Journal of Science and Technology YRU*, vol. 6, no. 2, pp. 162-170, Jul. 2021.
- [12] C. Weemaes, V. Ooms, Indrawati, L. Ludikhuyze, I. Van den Broeck, A. Van Loey and M. Hendrickx, “Pressure-temperature degradation of green color in broccoli juice,” *Journal of Food Science*, vol. 64, no.3, pp. 504-508, Jul. 2006.
- [13] S. Jirasatid, P. Chaikham, and M. Nopharatana, “Thermal degradation kinetics of total carotenoids and antioxidant activity in banana-pumpkin puree using Arrhenius, Eyring-Polanyi and Ball models,” *International Food Research Journal*, vol. 25, pp. 1912-1919, Oct. 2018.
- [14] J. Larrauri, P. Ruperez and F. Saura-Calizto, “Effect of drying temperature on the stability of polyphenols and antioxidant activity of red grape pomace peel,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 45, pp. 1390-1393, Apr. 1997.
- [15] P. Wanyo, K. Huaisan and T. Chamsai, “Phenolic compounds and antioxidant properties of Thai rice paddy herb as affected by different drying temperature,” *International Journal of Agricultural Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 423-440, May 2018.

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

การพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ผสมวุ้นน้ำมะพร้าวพร้อม ดื่ม และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

จันทร์เพ็ญ บุตรไส วรภา วงศ์แสงธรรม* และ วิจิตรา เหลียวตระกูล

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
60 หมู่ที่ 3 ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

รับบทความ 7 กันยายน 2564 แก้ไขบทความ 11 พฤษภาคม 2565 ตอบรับบทความ 28 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

มะม่วงหาวมะนาวโห่ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Carissa carandas* L. เป็นพืชพื้นบ้านของไทยที่ได้รับความนิยมมากขึ้นเนื่องจากมีประโยชน์ต่อร่างกาย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ผสมวุ้นน้ำมะพร้าวพร้อมดื่ม โดยศึกษาสารสำคัญในผลมะม่วงหาวมะนาวโห่ 3 ระยะ ได้แก่ผลดิบ ผลกึ่งสุกและผลสุก พบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด พบสูงสุดในผลสุกเท่ากับ 9.13 องศาบริกซ์, 133.59 มิลลิกรัมไซยานิดินต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 540 มิลลิกรัมกรดกาอิกต่อ 100 มิลลิตรตัวอย่าง ตามลำดับ ผลดิบมีปริมาณกรดสูงสุดร้อยละ 3.99 ผลกึ่งสุกมีปริมาณวิตามินซีสูงสุดเท่ากับ 45.67 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิตรตัวอย่าง การประเมินทางประสาทสัมผัส (9-Pointed Hedonic Scale) น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่ม พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีส่วนผสมของน้ำตาลทรายขาวร้อยละ 12 อัตราส่วนของวุ้นมะพร้าวที่เหมาะสมร้อยละ 10 เนื่องจากผู้ชิมให้คะแนนด้านสี รสชาติ และความชอบโดยรวมมากที่สุด ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณใยอาหารร้อยละ 0.02 มีปริมาณกรดทั้งหมดในรูปของกรดซิตริก (ร้อยละ) 5.37 ด้านเคมีมีสารประกอบฟีนอลิก 40.14 mg/100 g และสารแอนโทไซยานิน 27.60 mg/100 g ด้านคุณภาพทางจุลินทรีย์มีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (น้ำมะเฒ่า มพช. 486/2556)

คำสำคัญ : มะม่วงหาวมะนาวโห่; วุ้นมะพร้าว; แอนโทไซยานิน

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

The Product Development of Koranda (*Carissa carandas* Linn) Juice Mixed with Nata de Coco and Physiochemical Properties

Janpen Butsai Wanpa Wongsangtham* and Wijitra Liaotrakoon

Faculty of Agricultural Technology and Agro Industry, Rajamangala University of Technology
Suvarnabhumi

60 Moo. 3, Huntra, Phra Nakhon Si Ayutthaya, Phra Nakhon Si Ayutthaya 13000

Received 7 September 2021; Revised 11 May 2022; Accepted 28 June 2022

Abstract

Koranda (*Carissa carandas* L.), which is a kind of Thai local fruit that received more attention due to its health benefits. This research was aimed to develop the new product of ready to drink Koranda juice mixed with Nata de coco. The active ingredients of the Koranda were investigated. It was done in three different stages of Koranda: raw stage, semi-ripening stage and ripening stage. The result was shown that the maturation stage affected the amount of active ingredients. The ripening stage of Koranda had the highest total soluble solid, total anthocyanin content and total phenolic content which were 9.13 °Brix, 133.59 mg cyanidin/100 g, and 540 mg GAE/100 g, respectively. The raw and semi-ripening stages of Koranda had the highest acidity and vitamin C content which were 3.99% and 45.67 mg/100 ml, respectively. The sensory evaluation of Koranda Juice was also investigated to select the optimal amount of sugar and Nata de Coco. It was found that the optimal amount of sugar and Nata de Coco in Koranda juice were 12% and 10%, respectively. Koranda Juice mixed with Nata de Coco had fiber content 0.02%, citric acid 5.37%, total phenolic content 40.14 mg/100 g, and anthocyanin 27.60 mg/100 g. Furthermore, the microbiology qualities of the product were within the Community Product Standards (Ma-maow Juice TCPS 486/2556).

Keywords: Koranda (*Carissa carandas* Linn.); Nata de Coco; Anthocyanin

* Corresponding Author. Tel.: +668 1349 3521, E-mail Address: wanpa21@hotmail.com

1. บทนำ

มะนาวโห่มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Carissa carandas* L. ชื่อเรียกอื่นๆ เช่น มะนาวไม่รู้โห่ (ภาคกลาง) มะนาว โห่ (ภาคใต้) หนามขี้แฮด (เชียงใหม่) หนามแดง (กรุงเทพฯ) เป็นต้น สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ทั้งปี [1] มะม่วงหาวมะนาวโห่มีผลแบบมีเนื้อหลายเมล็ด (Berry) ผลดิบมักจะใช้แปรรูปเป็นเครื่องดื่ม เยลลี่ แยม ทาร์ต และเครื่องเคียง ผลก่อนสุกส่วนใหญ่มักจะทำดอง ในผลสุกจะมีเพคตินมาก ผลสุกชนิดที่มีรสหวานสามารถรับประทานได้ทันที ในบางประเทศปรุงร่วมกับพริกเขียวเพื่อเป็นอาหารที่รับประทานคู่กับแผ่นโรตีส [1],[2] มะม่วงหาวมะนาวโห่เป็นผลไม้พื้นบ้านของไทยเป็นไม้พุ่มยืนต้น ผลอ่อนจะมีสีชมพูอ่อนและเข้มขึ้นเป็นสีแดง สุกจะกลายเป็นสีดำ เป็นพืชที่ปลูกและเจริญเติบโตง่าย ทนแล้ง มีคุณสมบัติและคุณประโยชน์ได้แก่ มีสารต้านอนุมูลอิสระสูง ป้องกันมะเร็ง ชะลอการแก่ก่อนวัย ช่วยบำรุงโลหิต ขยายหลอดเลือด ป้องกันโรคหัวใจ และยังมีรายงานว่าสามารถใช้เป็นยาบรรเทาปวด ยาต้านการอักเสบ ช่วยขับน้ำย่อยในกระเพาะอาหาร เป็นต้น [1] คนไทยที่ให้ความสนใจมากขึ้นเนื่องจากมีประโยชน์ต่อร่างกาย [3]

วุ้นมะพร้าว หรือ Nata de Coco เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมักด้วยแบคทีเรีย ในกลุ่ม *Acetobacter* sp. ทำให้เกิดเป็นเซลลูโลสในรูปแบบเจล (Cellulose Microfiber) มีลักษณะเป็นเยื่อเหนียว มีสีขาวหรือครีม มีกลิ่นตามแหล่งวัตถุดิบ [4] ให้ใยอาหารสูงและพลังงานต่ำ สามารถผลิตได้จากพืชสัตว์และเชื้อแบคทีเรีย การผลิตวุ้นสวรรค์สามารถใช้วัตถุดิบหลายชนิด ได้แก่ น้ำมะพร้าว สับปะรด น้ำกะทิ น้ำหางนม กากน้ำตาล และวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร ในประเทศไทยนิยมผลิตวุ้นสวรรค์จากน้ำมะพร้าวซึ่งได้จากส่วนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตกะทิ [5] ปัจจุบันมี

การนำวุ้นมะพร้าวมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นแหล่งเส้นใยอาหาร (Dietary Fiber) [4]

จากสรรพคุณข้างต้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องดื่มจากผลมะม่วงหาวมะนาวโห่โดยการเสริมเส้นใยอาหารด้วยวุ้นมะพร้าว เพื่อเพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์และเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคที่ต้องการบริโภคเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ ดังนั้นในการศึกษาริเริ่มจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สารสำคัญในผลมะม่วงหาวมะนาวโห่ ได้แก่ ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณกรด และปริมาณวิตามินซี ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวุ้นน้ำมะพร้าวเพื่อเพิ่มปริมาณใยอาหารในการผลิตผลิตภัณฑ์น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มผสมวุ้นน้ำมะพร้าว และศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการผลิต

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

คัดแยกผลมะม่วงหาวมะนาวโห่ออกเป็น 3 ระยะ คือ ระยะที่ 1 ผลดิบแก่จัดสีชมพูขาว ระยะที่ 2 ผลกึ่งสุกสีแดงเข้ม และระยะที่ 3 ผลสุกสีม่วงเข้ม นำมาล้างทำความสะอาดจากนั้นนำมาปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่นอาหารและกรองด้วยผ้าขาวบางเพื่อใช้ทดสอบหรือวิเคราะห์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.2 การศึกษาและวิเคราะห์สารสำคัญในผลมะม่วงหาวมะนาวโห่

นำน้ำของมะม่วงหาวมะนาวโห่ที่ได้จากข้อ 2.1 ทั้ง 3 ระยะไปทำการวิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่

1) ค่าสี ด้วยเครื่องวัดค่าสี (Color QuestXE, HunterLab, USA) ค่า L^* แสดงค่าความสว่าง

(Lightness) จากสีขาวจนถึงสีดำ ส่วน a^* มีค่าสีแดงจนถึงสีเขียว ส่วน b^* มีค่าสีเหลืองจนถึงสีน้ำเงิน ค่า

2) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total Soluble Solid: TSS) โดยใช้ Hand Refractometer (Atago, Japan) มีหน่วยเป็นองศาบริกซ์ ($^{\circ}\text{Brix}$)

3) วัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter

4) วัดปริมาณกรดทั้งหมดในรูปของกรดซิตริก โดยวิธีไตเตรท ตามวิธีการของ AOAC [6]

5) ค่าปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (Total Anthocyanin Content) วิเคราะห์ด้วยวิธีพีเอช-ดิฟเฟอเรนเชียล (pH-differential Method) ตามวิธีการของ S. Fakngoen and S. Meerod [7]

6) ค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Content) ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu โดยเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานของกรดแกลลิก (Gallic Acid) [8]

7) ค่าปริมาณวิตามินซีทั้งหมด โดยวิธีการไตเตรทกับสารละลายไอโอดีน ตามวิธีการของ AOAC [6] โดยการไตเตรทกับสารละลายไอโอดีนเป็นสารละลายมาตรฐานที่ผสมกับน้ำแข็งสุก บันทึกจำนวนหยดแล้วนำไปคำนวณปริมาณวิตามินซี

2.3 การพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มผสมวุ้นมะพร้าว

2.3.1 การเตรียมน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่

การเตรียมวัตถุดิบสำหรับการผลิตน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่ม [9] โดยนำผลของมะม่วงหาวมะนาวโห่ระยะผลกึ่งสุกสีแดงและผลสุกสีม่วงเข้มในอัตราส่วน 20:80 มาล้างทำความสะอาด ผ่าเอาเมล็ดออก ต้มในน้ำเดือดในอัตราส่วนผลมะม่วงหาวมะนาวโห่ต่อน้ำสะอาด 1:3 โดยน้ำหนัก นำมาต้มเดือด 20 นาที เพื่อสกัดสี กลิ่นรสชาติ จากนั้นกรองผ่านผ้าขาวบางได้น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ สำหรับวุ้นมะพร้าวในการทดลองครั้งนี้ใช้วุ้น

น้ำมะพร้าวในน้ำเชื่อมทรงลูกเต๋า ตราคิงโกลแลนด์ เตรียมโดยการเทผ่านกระชอนเพื่อพักสะเด็ดน้ำเชื่อม จากนั้นนำไปต้มในน้ำเดือดนาน 15 นาที ตักพักในกระชอนเพื่อพักให้สะเด็ดน้ำ จากนั้นนำมาปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่นอาหาร เพื่อใช้ทำการผลิตในขั้นตอนถัดไป

2.3.2 การศึกษาอัตราส่วนการผลิตน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มที่เหมาะสม

นำน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ที่ได้ข้างต้นมาต้มให้เดือดเติมกรดซิตริกร้อยละ 0.06 คนให้ละลาย เติมน้ำตาลทรายขาวที่อัตราส่วนแตกต่างกัน 3 ระดับได้แก่ ร้อยละ 12, 14 และ 16 ตามลำดับ คนให้เข้ากัน นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที บรรจุลงขวดแก้วในขณะร้อน ปิดฝาขวด นำไปให้ความร้อนด้วยกระบวนการพาสเจอร์ไรส์อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทำการหล่อเย็นด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง [10] แล้วเก็บรักษาอุณหภูมิ 4-6 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสเพื่อคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่ม โดยเลือกสูตรที่ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมมากที่สุดไปผลิตน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มผสมวุ้นมะพร้าวในขั้นตอนต่อไป

2.3.3 การศึกษาอัตราส่วนการผลิตน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มผสมวุ้นมะพร้าวที่เหมาะสม

นำน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ที่ได้รับการยอมรับโดยรวมมากที่สุดจากข้อ 2.3.2 ไปเติมวุ้นมะพร้าวที่เตรียมไว้ในอัตราส่วนแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 10, 15 และ 20 ตามลำดับ คนให้เข้ากัน นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที บรรจุลงขวดแก้วในขณะร้อน ปิดฝาขวด นำไปให้ความร้อนด้วยกระบวนการพาสเจอร์ไรส์อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทำการหล่อเย็นด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง [10] แล้วเก็บรักษาอุณหภูมิ 4-6 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปประเมินคุณภาพทางประสาท

สัมผัสเพื่อคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มผสมวันมะพร้าว

2.4 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์

นำน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มผสมวันมะพร้าวที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดมาทำการวิเคราะห์ค่าปริมาณใยอาหารหยาบ [6] วัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ โดยใช้ Hand Refractometer (Atago, Japan) โดยมีหน่วยเป็นองศาบริกซ์ (°Brix) วัดปริมาณกรดทั้งหมดในรูปของกรดซิตริกโดยวิธีไตเตรท [6] วัดค่าสี ด้วยเครื่องวัดค่าสี ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Ultra Scan VIS โดยค่า L* หมายถึง ค่าความสว่าง ค่า a* (เป็นบวก) หมายถึง ความเป็นสีแดง a* (เป็นลบ) หมายถึง ความเป็นสีเขียว และค่า b* (เป็นบวก) หมายถึง ความเป็นสีเหลือง b* (เป็นลบ) หมายถึง ความเป็นสีน้ำเงิน วัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH Meter วัดค่าปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (Total Anthocyanin Content) วิเคราะห์ด้วยวิธีฟิเอช-ดิฟเฟอเรนเชียล (pH-differential method) ตามวิธีการของ S. Fakngoen and S. Meero [7] วัดปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Content) ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu โดยเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานของกรดแกลลิก (Gallic Acid) [8] และวิเคราะห์ปริมาณยีสต์และรา *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* ตามวิธีของ USFDA. [11]

2.5 การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ทำการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมด้วยแบบทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-Points Hedonic Scale) ซึ่งมีค่าคะแนนดังนี้ 1 = ไม่ชอบมากที่สุด 2 = ไม่ชอบมาก 3 = ไม่ชอบปานกลาง 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย 5 =

เฉย ๆ 6 = ชอบเล็กน้อย 7 = ชอบปานกลาง 8 = ชอบมาก และ 9 = ชอบมากที่สุด ใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน

2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การศึกษาคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของผลมะม่วงหาวมะนาวโห่ และการศึกษาคุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มผสมวันมะพร้าว มีการวางแผนการทดลองสุ่มแบบสมบูรณ์ (Complete Randomized Design, CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ส่วนการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสของน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มและน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มผสมวันมะพร้าวมีการวางแผนการทดลองสุ่มแบบบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยรายงานในรูปของค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเปรียบเทียบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การศึกษาและวิเคราะห์สารสำคัญในผลมะม่วงหาวมะนาวโห่

ผลมะม่วงหาวมะนาวโห่ออกเป็น 3 ระยะ คือ ระยะที่ 1 ผลดิบสีชมพูขาว ระยะที่ 2 ผลกึ่งสุกสีแดงเข้ม และระยะที่ 3 ผลสุกสีม่วงเข้ม

จากการนำผลมะม่วงหาวมะนาวโห่ออกเป็น 3 ระยะ มาทำการวิเคราะห์ค่าสี ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ค่าปริมาณกรดที่ได้โดยการไตเตรท ค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ค่าปริมาณสารแอนโทไซยานิน และปริมาณวิตามินซี ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า

1) คุณภาพด้านสี แสดงในตารางที่ 1 พบว่า ระยะการสุกของผลมะม่วงหาวมะนาวโห่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ค่าความสว่าง L^* ผลมะม่วงหาวระยะที่ 1, 2 และ 3 มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยผลดิบจะมีค่าความสว่าง L^* มากที่สุดเท่ากับ 46.66 ± 1.28 รองมาคือ ผลกึ่งสุกและผลสุก ตามลำดับ เมื่อผลเริ่มสุกค่าความสว่างจะเริ่มลดลง ค่าความเป็นสีแดง-เขียว a^* ผลกึ่งสุกมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 13.52 ± 0.27 ผลดิบเมื่อเริ่มเข้าสู่ผลกึ่งสุกค่า a^* จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเมื่อผลกึ่งสุกเข้าสู่ผลสุกค่า a^* จะมีแนวโน้มลดลง ค่าสีเหลือง b^* ผลดิบมีค่ามากที่สุด เท่ากับ 0.86 ± 0.47 รองลงมาคือผลกึ่งสุกและผลสุก ผลของมะม่วงหาวมะนาวโห่มีการเปลี่ยนแปลงของรงควัตถุทำให้มีสีเข้มขึ้นตามระยะ

ความแก่อ่อน ค่า L^* และ ค่า b^* มีค่าลดลงตามความแก่ของผล ผลสีม่วงเข้มจะมีค่า L^* มากที่สุด ผลดิบค่า a^* มีค่าเพิ่มขึ้นผลสีขาวยิ่งสีแดงและมีค่าลดลงจากผลสีม่วงถึงสีดำ ซึ่งสีของผลเกิดจากการสังเคราะห์และการสะสมของสารแอนโทไซยานิน [12], [13]

2) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS) แสดงในตารางที่ 2 พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะการสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยผลสุกมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 9.13 ± 0.21 องศาบริกซ์ รองลงมาคือผลกึ่งสุกและผลดิบ ตามลำดับ จากรายงานวิจัยของ T. Kayyen [14] กล่าวว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ทั้ง 4 ระยะ คือ ผลดิบ ห่าม แก่ และสุก มีค่าความหวานอยู่ในช่วง 7-10 °Brix



รูปที่ 1 ลักษณะของผลมะม่วงหาวมะนาวโห่ 3 ระยะ ก) ระยะที่ 1 ข) ระยะที่ 2 และ ค) ระยะที่ 3

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพด้านสีของน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่

ระยะการสุก	สีน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่		
	L^*	a^*	b^*
ผลดิบ	46.66 ± 1.28^a	2.52 ± 0.31^b	0.96 ± 0.47^a
ผลกึ่งสุก	37.15 ± 0.74^b	13.52 ± 0.27^a	0.65 ± 0.44^b
ผลสุก	32.59 ± 0.49^c	3.03 ± 0.09^b	-0.78 ± 0.31^c

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวดิ่ง หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

3) ความเป็นกรด-ด่าง พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะการสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ผลดิบมีค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยที่สุด และมีค่าเพิ่มขึ้นในผลกึ่งสุกและผลสุก ตามลำดับ เท่ากับ 2.68 ± 0.01 , 2.71 ± 0.01 และ 3.03 ± 0.01 ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ T. Kayyen [14] พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ทั้ง 4 ระยะ มีค่าอยู่ในช่วง 2.65-2.98 น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ที่ได้จากผลสุกมีค่า pH 2.85

4) ค่าปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรทได้ พบว่า ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรทได้ลดลงตามระยะการสุก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยผลดิบจะมี ปริมาณกรดมากที่สุด รองมาคือผลกึ่งสุกและผลสุก มีค่า เท่ากับร้อยละ 3.99, 2.20 และ 1.09 ตามลำดับ ปริมาณ กรดทั้งหมดลดลงเนื่องจากกรดจะถูกนำไปใช้เป็น สารประกอบของการหายใจ และเป็นโครงสร้างคาร์บอน ของการสังเคราะห์สารชนิดใหม่ในระหว่างการสุก สอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ T. Kayyen [14] พบว่า ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรทได้ของน้ำมะม่วง หาวมะนาวโห่ทั้ง 4 ระยะ คือ ผลดิบ ห่าม แก่และสุก มี ค่าลดลง โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 3.84, 3.46, 3.07 และ 2.43 ตามลำดับ

5) แอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุในกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่ทำให้เกิดสีแดง สีของแอนโทไซยานินเป็นผลมาจากโครงสร้างของแอนโทไซยานินซึ่งรวมกับน้ำตาลมอโนแซ็กเคไรไรต์ที่พบมากในเนื้อเยื่อพืช [15], [16] สารแอนโทไซยานินมีสมบัติเป็นโคเซนเนสส์ เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ช่วยชะลอความเสื่อมของเซลล์ ช่วยลดอัตราเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจและเส้นเลือดอุดตันในสมอง ชะลอความเสื่อมของดวงตา ช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค ในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคท้องร่วงและอาหารเป็นพิษ [20] ผลการวิเคราะห์ พบว่า ค่าปริมาณสารแอนโทไซยานินทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตามระยะการสุก โดยผลสุกจะมีปริมาณสารแอนโทไซยานินมากที่สุด รองลงมาคือ ผลกึ่งสุกและผลดิบตามลำดับ เท่ากับ 133.59, 92.40 และ 6.68 mg cyanidin/100g ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ W. Pewlong et al [17] พบว่า ปริมาณแอนโทไซยานินมีความสัมพันธ์กับระยะการสุกของผลมะม่วงหาวมะนาวโห่ที่มีความสุกมากขึ้น ผลสุกจะมีปริมาณแอนโทไซยานินมากกว่าผลดิบ และสอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ S. Simla [1] รายงานว่าปริมาณสารแอนโทไซยานิน ในระยะดิบ

ระยะกึ่งสุก และระยะสุก มีปริมาณเท่ากับ 13.2, 205.0 และ 427.4 mg cyaniding/100g ตามลำดับ

6) สารประกอบฟีนอลิกมีคุณสมบัติเป็นโคเซนเนสส์ที่ดีต่อสุขภาพ คือมีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) [21] ผลการวิเคราะห์ พบว่า ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตามระยะการสุก โดยผลสุกมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมากที่สุด เท่ากับ 540 mg GAE/100g รองลงมาคือผลกึ่งสุกและผลดิบ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสะสมของสารประกอบฟีนอลิกในระหว่างระยะเวลาการสุก รายงานการศึกษาของ S. Simla [1] พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในระยะผลดิบ ระยะผลกึ่งสุก และระยะผลสุกที่มีปริมาณมีค่าเท่ากับ 27.4, 71.2 และ 111.6 mg GAE/100g ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน สอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ N. Peamaroon et al [18] กล่าวว่าในระยะผลสุกพบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมากกว่าในระยะผลห่าม

7) วิตามินซี เป็นหนึ่งในสารอาหารสำคัญที่ร่างกายมีความต้องการอย่างมาก เนื่องจากมีส่วนช่วยในการเสริมสร้างภูมิคุ้มกัน ต่อต้านอนุมูลอิสระ ช่วยในกระบวนการสร้างคอลลาเจน และช่วยบำรุงผิวพรรณ ในภาวะที่ร่างกายขาดวิตามินซีจะเกิดความผิดปกติของกระดูก เยื่อและผิวหนังต่างๆ ซึ่งเรียกว่าโรคลักปิดลักเปิด หรือ Scurvy ได้ [22] ผลการวิเคราะห์ พบว่า ปริมาณวิตามินซีจะเพิ่มขึ้นในระยะผลดิบไปถึงกึ่งสุกและจะลดลงในระยะผลสุกมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ปริมาณวิตามินซีที่ได้แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับระยะการสุก การเก็บเกี่ยว การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม การจัดการหลังการเก็บเกี่ยว และสภาวะการเก็บรักษา สอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ S. Simla [1] พบว่าปริมาณวิตามินซีในมะม่วงหาวมะนาวโห่ผลระยะดิบระยะกึ่งสุก และระยะสุก มีค่าเท่ากับ 541.7,

1,081.2 และ 1,022.9 mg/100 ml ตามลำดับ การเก็บเกี่ยวผลที่ระยะการสุกแก่ (ripening stage) จะให้ค่าปริมาณสารสำคัญและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่ต่างกัน ระยะผลสุกเป็นระยะที่มีปริมาณสารสำคัญมากที่สุด รองลงมาคือ ผลกึ่งสุกและผลดิบให้ปริมาณสารสำคัญน้อยที่สุด ผลสุกที่มีสีม่วงจะมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าผลดิบ (ผลสีชมพู) และผลกึ่งสุก (ผลสีแดง) และมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก

ทั้งหมดและปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดในผลสุกสูงกว่าผลดิบและผลกึ่งสุก [1], [19] มะม่วงหาวมะนาวโห่ระยะผลสุกมีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH สูงสุด 4.67 ± 0.41 mg GAE/g, 54.80 ± 6.07 mg/L และ 2.42 ± 0.41 mg AAE/ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับระยะผลดิบ (ผลมีสีเขียว) และผลกึ่งสุก (ผลมีสีชาปนชมพู) และมีวิตามินซี 180.40 mg/100g [17]

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของผลมะม่วงหาวมะนาวโห่

ระยะการสุก	TSS (%Brix)	pH	TA (%)	TAC (mg cyanidin/100g)	TPC (mg GAE/100g)	Vitamin C (mg/100ml)
ผลดิบ	5.90 ± 0.10^b	2.68 ± 0.01^c	3.99 ± 0.10^a	6.68 ± 1.67^c	117.00 ± 1.73^c	44.43 ± 0.00^b
ผลกึ่งสุก	8.77 ± 0.25^a	2.71 ± 0.01^b	2.20 ± 0.10^b	92.40 ± 1.03^b	280.00 ± 1.15^b	45.67 ± 0.10^a
ผลสุก	9.13 ± 0.21^a	3.03 ± 0.01^a	1.09 ± 0.15^c	133.59 ± 3.34^a	540.00 ± 1.15^a	13.46 ± 0.10^c

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$), Total soluble solid (TSS), Total acid (TA), Total anthocyanin content (TAC), phenolic content (TPC)

3.2 การพัฒนากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มผสมวุ้นมะพร้าว

3.2.1 การพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่ม

ผลการคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่ม โดยการเติมน้ำตาลที่ปริมาณแตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 10, 12, 14 และ 16 (ตารางที่ 3) พบว่าผู้ชิมให้คะแนนความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส ความชอบโดยรวมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่สูตรเติมน้ำตาลร้อยละ 12 ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมมากที่สุดในระดับคะแนนความชอบมาก รองลงมาคือสูตรที่เติมน้ำตาลร้อยละ 14, 10 และ 16 ตามลำดับ ที่คะแนนชิมชอบมาก ชอบปานกลางและชอบปานกลาง ตามลำดับ ลักษณะ

ปรากฏของน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ที่มีลักษณะใส มีกลิ่นตามธรรมชาติของผลมะม่วงหาวคล้ายกลิ่นของน้ำกระเจียบ [16] ดังนั้นจึงใช้สูตรการเติมน้ำตาลที่ปริมาณร้อยละ 12 ไปทดสอบในขั้นต่อไป

3.2.2 การคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของวุ้นมะพร้าว

นำน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดไปเติมวุ้นมะพร้าวที่อัตราส่วนแตกต่างกัน 3 ระดับที่ร้อยละ 10, 15 และ 20 ตามลำดับ (ตารางที่ 4) พบว่า ปริมาณวุ้นมะพร้าวเพิ่มขึ้นทำให้กลิ่นของมะม่วงหาวมะนาวโห่ลดลง เครื่องดื่มเกิดความข้นและข้นขึ้น ผู้ชิมให้คะแนนความชอบต่อน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ผสมวุ้นมะพร้าวลดลงเมื่อปริมาณวุ้นมะพร้าวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผู้ชิมคะแนน

ความชอบด้านสี กลิ่น และรสชาติ ไม่มีความแตกต่างกัน ในทางสถิติ ($p>0.05$) มีคะแนนอยู่ในระดับความชอบปานกลาง ชอบเล็กน้อยและชอบปานกลาง ตามลำดับ ผู้ชิมให้คะแนนความชอบต่อลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่อปริมาณวันมะพร้าวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) อย่างไรก็ตามผู้ชิมให้คะแนนความชอบโดยรวมสูตรเติมวันมะพร้าวร้อยละ 10

มากที่สุด ในระดับคะแนนความชอบปานกลาง รองลงมาคือสูตรเติมวันมะพร้าวร้อยละ 15 และ 20 ตามลำดับ ขึ้นสอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ S. Simla et al [9] พบว่า อัตราส่วนของวันน้ำมะพร้าวร้อยละ 10 เป็นอัตราส่วนที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดในด้านรสชาติและความชอบโดยรวมในการผลิตผลิตภัณฑ์น้ำมาพร้อมดื่มผสมวันมะพร้าวบรรจุขวดแก้ว

ตารางที่ 3 ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสของเครื่องดื่มน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ค่าทางประสาทสัมผัส	ปริมาณน้ำตาล (ร้อยละ)			
	10	12	14	16
สี	8.00 $\pm$ 0.87 ^b	8.30 $\pm$ 0.75 ^a	8.11 $\pm$ 0.79 ^{ab}	7.93 $\pm$ 0.98 ^b
กลิ่น	7.61 $\pm$ 1.12 ^b	7.93 $\pm$ 1.23 ^a	7.96 $\pm$ 1.12 ^a	7.63 $\pm$ 1.21 ^b
รสชาติ	7.77 $\pm$ 1.14 ^b	8.28 $\pm$ 0.95 ^a	8.25 $\pm$ 0.82 ^a	7.56 $\pm$ 1.29 ^b
เนื้อสัมผัส	8.00 $\pm$ 0.87 ^b	8.30 $\pm$ 0.75 ^a	8.11 $\pm$ 0.79 ^{ab}	7.93 $\pm$ 0.98 ^b
ความชอบโดยรวม	7.75 $\pm$ 1.04 ^b	8.30 $\pm$ 0.86 ^a	8.20 $\pm$ 0.86 ^a	7.70 $\pm$ 1.34 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

ตารางที่ 4 ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสของเครื่องดื่มน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ผสมวันมะพร้าว

ค่าทางประสาทสัมผัส	อัตราส่วนของวันน้ำมะพร้าวในน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ (ร้อยละ)		
	10	15	20
สี ^{ns}	7.25 $\pm$ 1.37	7.08 $\pm$ 1.26	7.00 $\pm$ 1.23
กลิ่น ^{ns}	6.70 $\pm$ 1.63	6.48 $\pm$ 1.58	6.81 $\pm$ 1.39
รสชาติ ^{ns}	7.40 $\pm$ 1.38	7.23 $\pm$ 1.37	7.11 $\pm$ 1.19
เนื้อสัมผัส	7.20 $\pm$ 1.19 ^a	7.25 $\pm$ 1.31 ^a	6.38 $\pm$ 1.60 ^b
ความชอบโดยรวม	7.63 $\pm$ 1.09 ^a	7.36 $\pm$ 1.19 ^{ab}	7.23 $\pm$ 1.15 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$), ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

3.2.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มผสมวันมะพร้าว

จากการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มผสมวันมะพร้าวบรรจุขวดแก้วใส ขนาด 180 มิลลิลิตร ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า น้ำ

มะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มผสมวันมะพร้าวมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 12 ± 0.00 องศาบริกซ์ ผลิตภัณฑ์มีลักษณะสีแดงเข้ม กลิ่นหอม ใสไม่ตกตะกอน ปริมาณกรดทั้งหมดในรูปของกรดซิตริก(ร้อยละ) 5.37 ± 0.05 อยู่ในช่วงที่เป็นมาตรฐานของน้ำพร้อมดื่ม การเติมวันมะพร้าวเพื่อเสริมใยอาหารให้กับน้ำมะม่วง

หาวมะนาวโท ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์พบปริมาณ
ใยอาหารร้อยละ 0.02 ± 0.00 สอดคล้องกับการศึกษา
ของ S. Simla et al [9] พบว่าการเติมวุ้นมะพร้าวลงใน
น้ำเม่าพร้อมดื่มทำให้ปริมาณใยอาหารของผลิตภัณฑ์น้ำ
เม่าพร้อมดื่มผสมวุ้นมะพร้าวมีปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้น
เมื่อเทียบกับน้ำเม่าพร้อมดื่มที่ไม่เติมวุ้นมะพร้าว ค่า
ความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 3.22 ± 0.01 พบปริมาณ

สารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 40.14 ± 1.16 mg/100 g
และสารแอนโทไซยานินเท่ากับ 27.60 ± 0.91 mg/100 g
ในด้านจุลินทรีย์พบปริมาณยีสต์และราน้อยกว่า 100
โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ตรวจแล้วไม่พบเชื้อ
Staphylococcus aureus และ *Escherichia coli*
เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของน้ำมะเม่า
(486/2556) [23]

ตารางที่ 5 คุณภาพของน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มผสมวุ้นมะพร้าว

คุณภาพของน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ พร้อมดื่มผสมวุ้นมะพร้าว	ผลการวิเคราะห์	มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (ฉบับที่ 486/2556) เรื่อง น้ำมะเม่า
ใยอาหาร (ร้อยละ)	0.02 ± 0.00	-
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์)	12.00 ± 0.00	-
ปริมาณกรดทั้งหมดรูปกรดซิตริก (ร้อยละ) ค่าสี	5.37 ± 0.05	-
- L*	30.35 ± 0.02	-
- a*	1.01 ± 0.11	-
- b*	-2.41 ± 0.02	-
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	3.22 ± 0.01	-
Phenol (Gallic mg/100 g (wet basis))	40.14 ± 1.16	-
anthocyanin (mg/100 g)	27.60 ± 0.91	-
ยีสต์และรา (CFU/ml.)	<1	<100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร
<i>Staphylococcus aureus</i>	ไม่พบ	<10 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร
<i>Escherichia coli</i>	ไม่พบ	ไม่พบในตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร

4. สรุป

การศึกษาสารสำคัญในผลมะม่วงหาวมะนาวโห่
พบว่าปริมาณสารแอนโทไซยานินทั้งหมด และปริมาณ
สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด มีค่ามากที่สุดในผลสุก ผล
ดิบมีค่าปริมาณกรดมากที่สุด ผลกึ่งสุกพบปริมาณ
วิตามินซีมากที่สุด น้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่พร้อมดื่มผสม
วุ้นมะพร้าวที่ได้มีส่วนผสมของน้ำตาลทรายขาวร้อยละ
12 อัตราส่วนของวุ้นมะพร้าวที่เหมาะสมร้อยละ 10
เนื่องจากให้สี รสชาติ และความชอบโดยรวมมากที่สุด
ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณใยอาหารร้อยละ 0.02 ปริมาณ

ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 12 องศาบริกซ์ ผลิต
ผลิตภัณฑ์มีปริมาณกรดทั้งหมดในรูปของกรดซิตริก
(ร้อยละ) 5.37 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เป็นมาตรฐานของน้ำพร้อม
ดื่ม ด้านเคมีพบสารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 40.14
mg/100 g และสารแอนโทไซยานินเท่ากับ 27.60
mg/100 g ด้านคุณภาพทางจุลินทรีย์มีค่าไม่เกินเกณฑ์
มาตรฐานกำหนด ดังนั้นจึงเป็นการมุ่งเน้นการเพิ่มมูลค่า
และการใช้ประโยชน์จากมะม่วงหาวมะนาวโห่โดยนำมา
พัฒนาเป็นเครื่องดื่มน้ำมะม่วงหาวมะนาวโห่ผสมวุ้น
มะพร้าวเป็นการเสริมใยอาหารในผลิตภัณฑ์ด้วยวุ้น

มะพร้าวเพื่อเพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาต่อยอดเชิงพาณิชย์ เป็นการส่งเสริมธุรกิจใหม่ให้กับชุมชนต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย ขอขอบคุณนางสาวปัทมา จำนงค์หาญ และนางสาวพรรัตน์ แดงสุวรรณ ผู้ช่วยนักวิจัย ตลอดจนบุคลากรและนักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร ทุกคนที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Simla, "Carissa carandas L.: The fruit mentioned in Thai literature that has many health benefits," *Khon Kean Agr. J.*, vol. 44, no. 3, pp. 557-566, 2016.
- [2] R. Maheshwari, A. Sharma and D. Verma, "Phyto-therapeutic Significance of Karaunda B.," *Environ Pharmacol Life Sci*, vol. 1, no. 12, pp. 6-34, 2012.
- [3] N. Gumlungpat, A. Charoenpanich and P. Limpachayaporn, "Biological Activity of Carissa Carandas Linn. Young Fruit Extract on HepG2, HeLa and Human Keratinocyte Cell HaCaT," *Udon Thani Rajabhat University Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 33-48, 2020.
- [4] K. Sanoppa, T. Poonyavanit and P. Pisuttipong, "Substitution of Sodium Nitrite in Sausages by Pigment Powders from Monascus purpureus Fermented with Nata de Coco," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 2, pp. 288-299, 2021.
- [5] K. Srisupak, S. Ngoenyen and P. Yuthachit. "A Study on the Optimum Amount of Saccharin for Nata de Coco Production," *Science and Technology Research Journal*, vol. 5, No. 2, pp. 7-15, 2020.
- [6] A.O.A.C., "Official Methods of Analysis of AOAC International," *Gaithersburg, Md.: Association Official Analytical Chemists*, 2000.
- [7] S. Fakngoen and S. Meerod, "Extraction and Separation of Anthocyanins from Carissa carandas L.," in *The 4th National Conference KPRU, Kamphaengphet Rajabhat University, Kamphaengphet*, 2017, pp. 1002-1011.
- [8] N. Buachoon, "Antioxidant Activity and Total Phenolic from Seed and Fruits of Carissa Carandas," *VRU Research and Development Journal Science and Technology*, vol. 13, No. 2, pp. 53-63, 2018.
- [9] S. Saithi, S. Sakhunkhu and K. Sombun, "Production of Mao (Antidesma bunius) juice mixed with Nata de coco in clear-glass bottle," *RMUTP Research Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 66-74, 2016.
- [10] N. Kumkong and S. Vatanyoopaisarn. "Development of Vinegar Drink from Fermented Indian Gooseberry," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 1, pp. 163-174, 2018.
- [11] U.S. Food and Drug Administration (USFDA). (2020, June 14). Bacteriological Analytical

- Manual Online (BAM online): Yeasts, Molds and Mycotoxins. [Online]. Available: <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-18-yeasts-molds-and-mycotoxins>
- [12] K. Klinsukhon, U. Sukatta, P. Rukthaworn, L. Khacharat, W. Suravanichnirachorn and P. Neumyem, "Fruit ripening stages of *Carissa carandas* Linn. on antioxidant and alpha-Glucosidase inhibition activities," in *Proceeding of 55th Kasetsart University Annual Conference*, Kasetsart University, Bangkok, 2017, pp. 841-844.
- [13] A. Joomwong, "Effect of Maturity Stages on Physical and Chemical Quality of *Carissa Carandas* Linn.," *Agricultural Sci J.*, vol. 45, no. 3/1 (Suppl.), pp. 229-232, 2014.
- [14] T. Kayyen. "Effect of Maturation Stage on Biological Properties of *Carissa carandas*," M.S. Thesis, Dept. Biotechnology Graduate School, Silpakorn Univ., Bangkok, Thailand, 2017.
- [15] N. Rattanapanone, *Food Analysis Principles*, Oadian Store, Bangkok, 2011.
- [16] P. Rittilert and K. Warin, "Development of Karanda (*Carissa carandas* L.) Gummy Jelly Product," *Thai Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 341-354, 2020.
- [17] W. Pewlong, S. Sajjabut, S. Singphet and J. Eamsiri, "Influence of Fruit Ripening Stages on the Bioactive Compounds of *Carissa carandas*," *Agricultural Sci. J.*, vol. 44, no. 2 (Suppl.), pp. 337-340, 2013.
- [18] N. Peamaroon, N. Moonrungsee, A. Boonmee, S. Suwancharoen, T. Kasemsuk and J. Jakmunee. "Phytochemical and xanthine oxidase inhibitory activity of *Carissa carandas* L. fruit extract," *RMUTP Research Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 106-118, 2019.
- [19] S. Simla, S. Boontang and P. Siritrakulsak. "The evaluation of some Phytochemical content and Antioxidant activity in *Carissa carandas* L., *Khon Kaen Agr. J.*, vol. 41, Suppl. 1, pp. 602-606, 2013.
- [20] S. Parnsakhorn, J. Langkapin, P. Jamphung and C Srimas. "The production of malt high anthocyanin powder from rice berry," *Journal of Engineering, RMUTT*, vol. 15, no. 2, pp. 41-50, 2017.
- [21] C. D. Sae-chan, J. Rinkham, J. Lankaew, V. Visutthithada and S. Sriyam. "Determination of Phenolic Compounds and Antioxidant Activity in Wampee (*Clausena lansium* (Lour.) Skeels)," *Journal of Innovative Technology Research*, vol. 4, no. 2, pp. 12-21, 2020.
- [22] N. Tangkawattanakul and P. Tantanasrigul, "Role of Vitamin C in the Skin," *J. Dept Med Ser*, vol. 44, no. 3, pp. 7-8, 2019.
- [23] *Thai Community Product Standard*, Ma-maow Juice TCPS 486/2556, 2013.

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

การจัดส่งน้ำมันเชื้อเพลิงโดยรถบรรทุกแบบหลายช่องด้วยรูปแบบการขนส่งแบบโครงข่ายการไหล

มานพ ดอนหมื่น และ คมกฤษ ปิติฤกษ์*

ศูนย์วิจัยโลจิสติกส์และซัพพลายเชน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 หมู่ 16 ถนนมิตรภาพ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

รับบทความ 12 กรกฎาคม 2564 แก้ไขบทความ 16 พฤษภาคม 2565 ตอรับบทความ 28 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

การขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิงภายในประเทศไทยยังคงต้องพึ่งพาการขนส่งทางถนนเป็นหลัก เนื่องจากการขนส่งขึ้นพื้นฐานที่มีความสะดวก สามารถเข้าถึงได้ทุกสถานได้ดีกว่ารูปแบบการขนส่งอื่น และสามารถบรรจุตามความต้องการของผู้ใช้บริการอย่างทั่วถึง โดยหากมีเครื่องมือหรือวิธีการที่ช่วยในการวางแผนการจัดการขนส่งน้ำมัน การคำนวณต้นทุนที่ถูกต้องรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพแล้วจะส่งผลให้องค์กรหรือหน่วยงานดังกล่าวสามารถลดต้นทุนที่เกิดขึ้นจากการวางแผนการขนส่ง ช่วยลดข้อผิดพลาดจากการคำนวณต้นทุน และการวางแผนการขนส่ง อีกทั้งยังช่วยลดเวลาการทำงานของพนักงานลงได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาแนวทางแก้ปัญหาการขนส่งน้ำมัน 3 ประเภท ด้วยรถบรรทุกแบบหลายช่อง โดยใช้วิธีการขนส่งในรูปแบบโครงข่ายการไหล จากคลังน้ำมัน 2 แห่ง ส่งไปยังลูกค้าที่มีอยู่ 57 ราย มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอรูปแบบการจัดส่งแบบโครงข่ายการไหล สำหรับขนส่งน้ำมันโดยรถบรรทุกน้ำมันแบบหลายช่องให้ต้นทุนการขนส่งต่ำที่สุด โดยผู้วิจัยได้นำข้อมูลตัวอย่างของบริษัทกรณีศึกษา จำนวน 30 วัน (30 ตัวอย่าง) มาประมวลผลหาคำตอบ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีเดิมที่ใช้กับตัวแบบการขนส่งน้ำมันที่พัฒนาขึ้น ผลการวิจัยพบว่าตัวแบบที่พัฒนาขึ้น มีต้นทุนการขนส่งโดยเฉลี่ย 3.411 ล้านบาทต่อวัน ใช้เวลาในการหาคำตอบเฉลี่ย 433.20 วินาทีต่อตัวอย่าง ในขณะที่วิธีการเดิมมีต้นทุนโดยเฉลี่ย 3.493 ล้านบาทต่อวัน ใช้เวลาในการหาคำตอบเฉลี่ย 4,907.29 วินาทีต่อตัวอย่าง เมื่อเปรียบเทียบผลเฉลยพบว่า วิธีที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ให้ผลเฉลยดีกว่าวิธีปัจจุบันทั้งในด้านต้นทุนการขนส่งและด้านเวลาที่ใช้ในการประมวลผลหาผลเฉลย

คำสำคัญ : รูปแบบโครงข่ายการไหล; การวางแผนการจัดการขนส่งน้ำมัน; การขนส่งด้วยรถบรรทุกแบบหลายช่อง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 5384 9243, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: komkri@kku.ac.th

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

Multi-compartment Fuel Delivery with Network Flow Model of Transportation

Manop Donmuen and Komkrit Pitirerk*

Supply Chain and Logistic Systems Research Unit, Faculty of Engineering, Khon Kaen University
123 Mitraparb Road, Muang District, Khon Kaen 40000, Thailand

Received 12 July 2021; Revised 16 May 2022; Accepted 28 June 2022

Abstract

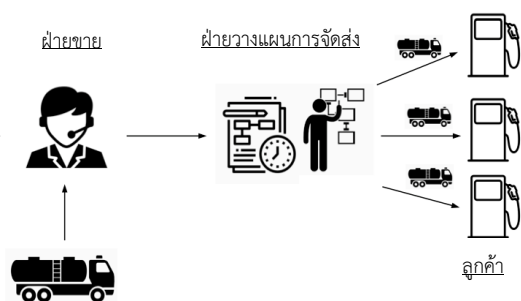
Thailand's fuel transportation business relies mainly on the road because it is a convenient form of transportation. It can deliver all places better than other modes of transport and can meet the needs of customers thoroughly. However, if there are methods that help in planning the fuel delivery management, fast accurate cost calculation and effective as a result, such organizations can reduce the costs incurred from planning the delivery, reduce errors in costing for delivery planning, and the operation time of employees. The research examines the solutions to three types of fuel delivery problems with multi-compartment of trucks. The objective is to propose a network flow model of transportation model for delivering fuel by multi-compartment of trucks, providing the lowest delivery costs. A 30-day sample of the company's data (30 samples) was taken and processed to find an answer to compare it with the current method and the proposed model. The results showed that the proposed model can help to calculate the average cost of 3.411 million baht per day. The average processing time for the solution of 433.20 seconds. While the current method costs an average of 3.493 million baht per day and an average processing time of 4,907.29 seconds. The proposed model provided better results than the current method regarding delivery costs and short processing times.

Keywords : Network Flow Model; Fuel Delivery; Multi Compartment Transportation

* *Corresponding Author. Tel.: +668 5384 9243, E-mail Address: komkri@kku.ac.th*

1. บทนำ

การแข่งขันในภาคธุรกิจการขนส่งน้ำมัน จัดเป็นกิจกรรมช่วงปลายน้ำของห่วงโซ่อุปทานอุตสาหกรรมน้ำมัน นับว่ามีการแข่งขันที่สูง เนื่องจากมีจำนวนความต้องการบริโภคในประเทศที่มาก ส่งผลให้การแข่งขันในภาคธุรกิจการขนส่งน้ำมันที่มากตามมา ซึ่งจากข้อมูลในเดือนมีนาคม 2561 ของสำนักงานนโยบายและแผนกระทรวงพลังงาน พบว่าจำนวนความต้องการบริโภคน้ำมันในประเทศไทยอยู่ที่ 160 ล้านลิตรต่อวัน มีสถานีให้บริการเติมน้ำมัน 27,300 แห่ง และมีบริษัทขนส่งน้ำมัน 3,025 ราย โดยบริษัทขนส่งน้ำมันเหล่านี้ นิยมบริหารจัดการขนส่งน้ำมันทางถนนเป็นหลักเนื่องจากการขนส่งทางถนนเป็นการขนส่งขึ้นพื้นฐานที่มีความสะดวก สามารถเข้าถึงได้ทุกสถานีได้ดีกว่ารูปแบบการขนส่งอื่น เพราะแม้ว่าการใช้รูปแบบการขนส่งแบบอื่น เช่น ทางรถไฟ หรือ ทางท่อ แต่ก็ยังคงจำเป็นต้องเชื่อมต่อการขนส่งทางถนนเพื่อให้การขนส่งได้บรรลุตามความต้องการอย่างทั่วถึง ในทุกพื้นที่ ซึ่งในสภาวะแวดล้อมจริงของการขนส่งน้ำมัน ค่อนข้างมีการผันผวนของปัจจัยหลายอย่าง เช่น ต้นทุนค่าน้ำมันซึ่งต้องอ้างอิงกับราคาตลาดสิงคโปร์ ปริมาณความต้องการของลูกค้าที่ไม่คงที่ ปัจจัยค่าจ้างแรงงาน การขาดแคลนแรงงานขับรถเป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ล้วนแต่ส่งผลกระทบต่อการวางแผนการดำเนินธุรกิจและส่งผลกระทบต่อต้นทุนของกิจการ



รูปที่ 1 ลักษณะการวางแผนการจัดส่งน้ำมันของบริษัท

ตัวอย่าง

ลักษณะปัญหาการจัดส่งของบริษัทน้ำมันกรณีศึกษา มีโครงข่ายการขนส่งน้ำมันจากคลังน้ำมันจำนวน 2 แห่ง ไปยังลูกค้าหรือสถานีให้บริการน้ำมันจำนวน 57 สถานี มีน้ำมันอยู่ 3 ประเภท วิธีการวางแผนจัดส่งน้ำมันไปยังลูกค้า จะประกอบด้วย 2 หน่วยงาน ที่ทำงานร่วมกัน แสดงดังรูปที่ 1 ได้แก่ 1) ฝ่ายขาย มีหน้าที่รับคำสั่งซื้อจากลูกค้าในแต่ละวันเริ่มตั้งแต่ 8.00 น. และสิ้นสุดการรับคำสั่งในเวลา 17.00 น. หลังจากได้รับคำสั่งซื้อ ฝ่ายขายจะเริ่มวางแผนภาพรวมการขนส่งจากคลังน้ำมันไปยังลูกค้า กล่าวคือ ระบุลูกค้าแต่ละรายส่งน้ำมันแต่ละชนิดใดบ้าง ปริมาณที่บรรจุลงช่องของรถบรรทุกทุกน้ำมัน และการเลือกใช้รถบรรทุกที่เหมาะสมแล้วคำนวณต้นทุนการใช้รถสำหรับขนส่ง 2) ฝ่ายวางแผนการจัดส่ง หลังจากฝ่ายขายดำเนินการแล้วเสร็จตามขั้นตอนข้างต้นแล้ว ฝ่ายวางแผนการจัดส่งจะเป็นผู้วางแผนเส้นทางขนส่งไปยังลูกค้าแต่ละแห่ง กำหนดเวลาเริ่มขนส่ง เวลาส่งมอบ และเวลาแล้วเสร็จ อย่างไรก็ตาม หากรถทุกคันไม่สามารถจัดส่งตามคำสั่งซื้อน้ำมันจากลูกค้าได้ภายใน 1 วัน บริษัทต้องนำส่งในวันถัดไป จากการสำรวจข้อมูลพบว่า ปัญหาการจัดส่งของบริษัทน้ำมันกรณีศึกษา เนื่องจากการแบ่งฝ่ายขายและฝ่ายวางแผนแยกจากกัน ทำให้เกิดการ ทำงาน 2 ขั้นตอน ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการดำเนินการ การใช้เวลาในการคำนวณต้นทุนการขนส่งที่ล่าช้า และไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งหากบริษัทสามารถบริหารจัดการโครงข่ายการขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิง มีการวางแผนที่เหมาะสมอย่างมีประสิทธิภาพ จะทำให้เกิดข้อได้เปรียบที่สำคัญของการดำเนินงานของธุรกิจ ดังนั้นการจัดการโครงข่ายการจัดส่งน้ำมันเชื้อเพลิง จึงถือเป็นหนึ่งในภารกิจที่สำคัญ และท้าทายที่สุดสำหรับผู้จัดการ นักวิจัย และผู้ปฏิบัติงาน เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อองค์กรในขณะที่สามารถตอบสนองต่อลูกค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยมุ่งเน้นไปที่การหาวิธีการจัดการโครงข่ายการขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิง มีหลายวิธีการที่นิยม

ประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย คือการแก้ปัญหาแบบ Vehicle Routing Problem (VRP) เช่น S. Martins et al. [1] E. Fernández et al. [2] และ S. W. Hwang et al. [3] ที่ใช้วิธีในการแก้ปัญหาโดยสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Programming) หรือ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed Integer Programming) แล้วนำมาหาผลเฉลยด้วยโปรแกรม LINGO [4] อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวมักจะไม่นิยมใช้กับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ประเภท NP-Hard [5] เนื่องจากใช้เวลาในการหาผลเฉลยที่ยาวนานหลายวัน จึงมีนักวิจัยใช้เครื่องมือวิธีการทาง Exact และ ฮิวริสติกมาแก้ปัญหาลดเวลาในการหาผลเฉลย เช่น L. Wang et al. [6] ใช้วิธี Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) หรือ M. Ji et al. [7] ใช้วิธี Genetic Algorithm (GA) ในขณะที่ N. Kasamtaranan และ H. Tiewtong [8] ใช้วิธี Saving algorithm นอกจากนี้ N. Koohatongsumrit [9] ใช้วิธีวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ในการเลือกเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสม นอกเหนือจากวิธีที่กล่าวข้างต้น ยังมีวิธีรูปแบบการไหล (Network flow model ; NFM) ซึ่งนิยมนำมาใช้แก้ปัญหาต่างๆ เช่น การกำหนดบุคลากร การจัดตารางโครงการ และยังสามารถประยุกต์ใช้สำหรับแก้ปัญหการวางแผนการขนส่ง (Network Flow Model Transportation ; NFMT) ได้เช่นกัน เช่น M. Ji et al. [7] ศึกษาการขนส่งตู้คอนเทนเนอร์แบบหลายขนาด ในรูปแบบโครงข่าย Hub และ Spoke ในประเทศจีนเพื่อลดต้นทุนโดยรวม นอกจากนี้ C. Kavirathna et al. [10] ได้พัฒนากอบปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกพอร์ตฮับของสายการบินเรือ เพื่อประเมินความสามารถในการแข่งขันสำหรับการแก้ปัญหการขนส่งน้ำมันแบบหลายชนิดเพื่อให้เกิดกำไรสูงสุด M. Donmuen และ K. Pitiruek [11] ได้นำวิธี NFMT มาใช้เช่นเดียวกัน

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ได้กล่าวมานั้น ยังขาดเงื่อนไขบางด้าน เช่น การกำหนดน้ำหนักบรรทุกที่ไม่เกินกฎหมายกำหนด ไม่ได้กำหนดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันเพื่ออ้างอิงกับน้ำหนักในการบรรทุก การกำหนดค่าการบรรทุกขั้นต่ำของน้ำมันเชื้อเพลิงในแต่ละช่องแบ่งของรถบรรทุก หรือการใช้รถบรรทุกขนส่งประเภทเดียวในการจัดการ และโดยส่วนมากจะเป็นการขนส่งแบบ VRP ในขณะที่การจัดส่งน้ำมันเชื้อเพลิงโดยรถบรรทุกแบบหลายช่องด้วยรูปแบบการขนส่งแบบโครงข่ายการไหล พบว่า ไม่มีงานวิจัยใดที่เสนอด้วยวิธีการนี้ในการแก้ปัญหาด้นทุนต่ำที่สุด แต่ในงานวิจัยนี้จะนำวิธีการการขนส่งด้วยโครงข่ายการไหลพร้อมทั้งนำปัจจัย หรือเงื่อนไขดังกล่าวมาพิจารณาร่วมด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อเสนอรูปแบบการขนส่งแบบโครงข่ายการไหลสำหรับจัดส่งน้ำมันโดยรถบรรทุกน้ำมันแบบหลายช่องให้มีต้นทุนต่ำที่สุด เพื่อหาแนวทางแก้ปัญหการขนส่งน้ำมัน 3 ประเภท ได้แก่ แก๊สโซฮอล์ 91 (E91) แก๊สโซฮอล์ 95 (E95) และ ดีเซล (Diesel) ด้วยรถบรรทุกแบบหลายช่อง โดยใช้วิธีการขนส่งในรูปแบบโครงข่ายการไหล จากคลังน้ำมัน 2 แห่งส่งไปยังลูกค้าที่มีอยู่ 57 ราย ผู้วิจัยนำข้อมูลตัวอย่างของบริษัท จำนวน 30 วัน (30 ตัวอย่าง) มาหาผลเฉลยแล้วเปรียบเทียบกับรูปแบบการจัดส่งน้ำมันที่พัฒนาขึ้น เพื่อช่วยในตัดสินใจแก่ผู้ประกอบการ สำหรับบริหารจัดการโครงข่ายโลจิสติกการจัดส่งน้ำมันเชื้อเพลิง ให้เกิดต้นทุนจากการขนส่งมีค่าต่ำที่สุด

2. ระเบียบวิธีวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อเสนอรูปแบบการขนส่งแบบโครงข่ายการไหลสำหรับจัดส่งน้ำมันโดยรถบรรทุกน้ำมันแบบหลายช่องให้ต้นทุนต่ำที่สุด ระเบียบวิธีวิจัย เริ่มตั้งแต่ขั้นแรก ผู้วิจัยดำเนินการสำรวจข้อมูลปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา ได้แก่ ศึกษาการวางแผนการจัดส่งน้ำมันรูปแบบวิธีปัจจุบัน ข้อมูล

ลูกค้า คลังน้ำมัน ข้อมูลรถบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการขนส่ง (หัวข้อ 2.1-2.3) ขั้นตอนถัดมา ผู้วิจัยจะกล่าวถึงรูปแบบการขนส่งแบบโครงข่ายการไหล (หัวข้อ 2.4) จากนั้นผู้วิจัยจะเสนอการพัฒนาแบบวิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการวางแผนการจัดส่งน้ำมัน (หัวข้อ 2.5) ท้ายสุด ผู้วิจัยจะกล่าวถึงการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของรูปแบบที่พัฒนาขึ้นเทียบกับวิธีปัจจุบัน (หัวข้อ 2.6)

2.1 ศึกษาการวางแผนการจัดส่งน้ำมันรูปแบบวิธีปัจจุบัน

ลักษณะการวางแผนการจัดส่งน้ำมันของบริษัทกรณีศึกษา เริ่มตั้งแต่ฝ่ายขายทำหน้าที่รับคำสั่งซื้อจากลูกค้าในแต่ละวัน จากนั้นจะตรวจสอบข้อมูลความพร้อมของรถ แล้ววางแผนการจัดส่ง ปริมาณความต้องการ ชนิดของน้ำมัน ไปยังฝ่ายวางแผนการจัดส่ง จากนั้นฝ่ายวางแผนจะเป็นคนกำหนดเวลาการเดินทางและเส้นทางการเดินทาง เพื่อจัดส่งไปยังลูกค้า โดยการวางแผนการส่งน้ำมัน ในปัจจุบันใช้ Spreadsheet software วางแผนโดยอาศัยประสบการณ์การทำงานของพนักงานฝ่ายขาย และฝ่ายวางแผนการจัดส่ง ซึ่งในขั้นตอนนี้จะต้องตรวจสอบว่ารถคันไหนว่าง เป็นรถประเภทอะไร มีจำนวนกี่ช่อง เหมาะสมที่จะนำมาบรรทุกน้ำมันตามคำสั่งซื้อลูกค้าหรือไม่ จากนั้นเจ้าหน้าที่ฝ่ายขายจึงจัดรถบรรทุก และชนิดของน้ำมันลงช่องของรถบรรทุก แล้วกำหนดเส้นทางการขนส่งให้กับพนักงานขับรถ เพื่อดำเนินการขนส่งไปยังลูกค้าเป็นลำดับถัดไป สำหรับแนวคิดการจัดเส้นทางการขนส่งของบริษัทกรณีศึกษา สามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณค่าสัดส่วน $\{D_{ip}/l_{ij}\} \forall(i)$ แล้วเลือกค่าที่มากที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 เลือกค่า $\{c_k\} \forall(k)$ ที่มีค่าน้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดความต้องการน้ำมันของลูกค้า D_{ip} ใส่ในช่องบรรทุก k โดยใช้วิธี PutDemand (PD)

ของ M. Furkan Uzar และ B. Çatay [12]

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบช่องบรรทุก k ที่เหลือแล้วกลับไปขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 5 ค้นหาลูกค้าที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้า ที่มี $\{l_{ij}\}$ ที่สั้นที่สุด แล้วดำเนินการจัดส่ง จากนั้นเลือกเส้นทาง $\{l_{ij}\}$ ที่สั้นที่สุดจัดส่งเป็นลำดับถัดไปจนครบ จากนั้นทำขั้นตอนที่ 1-4 ให้ครบทุกความต้องการของลูกค้า

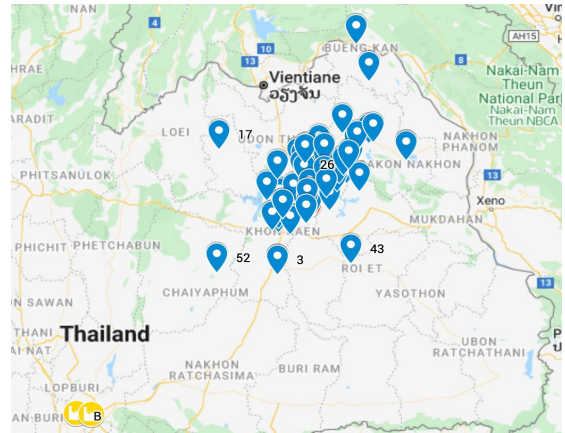
ขั้นตอนที่ 6 สิ้นสุดการจัดส่ง

กำหนดให้

D_{ip} คือ ปริมาณความต้องการ ของลูกค้า i สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงชนิด p (x1000 ลิตร)

l_{ij} คือ ระยะทางจากโหนด i ไปยังโหนด j ของเส้นทางที่เป็นไปได้ที่เชื่อมต่อกันของแต่ละโหนด (กม.)

c_k คือ ค่าใช้จ่ายรวมของรถขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยรถบรรทุกคันที่ k (บาท/กม.)



รูปที่ 2 ตำแหน่งคลังน้ำมัน และสถานีน้ำมันลูกค้า

2.2 ข้อมูลลูกค้า และคลังน้ำมัน

ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลลูกค้า หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สถานีให้บริการน้ำมัน ของบริษัทจำนวน 57 สถานี และคลังน้ำมัน 2 แห่ง รวมตำแหน่งของพิกัดข้อมูลจำนวน 59 แห่ง มีการกำหนดชื่อเป็นรหัส ตั้งแต่ 01 ถึง 59 เพื่อใช้ในการเรียก และการอ่านค่าผลคำตอบ โดย

รหัส 01-02 จะเรียกแทนคลังน้ำมันทั้งสองแห่ง และรหัส 03-59 เรียกแทนลูกค้า หรือสถานีน้ำมัน จากนั้นผู้วิจัยดำเนินการเก็บข้อมูลพิกัดต่างๆ ของแต่ละตำแหน่ง แล้วระบุพิกัดลงบนแผนที่ออนไลน์ Google Map ซึ่งสามารถเข้าถึงได้จากเว็บไซต์ <https://maps.google.com> แสดงดังรูปที่ 2

จากนั้นทางผู้วิจัยได้นำพิกัดข้อมูลมาจัดทำเป็นตารางระยะทางระหว่างแต่ละจุด ขนาด 59 x 59 ช่อง เพื่อหาระยะทางระหว่างตำแหน่งต่างๆ ของแต่ละจุด แล้วนำข้อมูลมากำหนดเส้นทางที่เป็นไปได้ของตำแหน่งที่สามารถเชื่อมต่อกันของแต่ละตำแหน่ง เพื่อนำไปใช้กำหนดเส้นทางการขนส่งในลำดับถัดไป

2.3 ข้อมูลเกี่ยวกับรถบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิง

ในการบริหารจัดการเส้นทางการขนส่งรถบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับน้ำมันหลายชนิด ได้แก่ E91 E95 และ Diesel รถบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่ง คือ รถบรรทุกพ่วง 22 ล้อ (Trailer) จำนวน 5 คัน มีขนาดช่องแบ่ง (Compartment) ที่แตกต่างกัน ผู้วิจัยได้กำหนดรหัส เก็บข้อมูลจำนวนช่อง ปริมาณความจุที่รับได้ น้ำหนักของตัวรถบรรทุก และปริมาตรที่บรรจุได้ในแต่ละช่องแบ่ง โดยรถบรรทุก รหัส T01-T05 จะประจำอยู่ตามคลังน้ำมัน บรรทุกน้ำมัน ส่งจากคลังไปยังลูกค้าภายใต้เขตการดูแลของบริษัท โดยข้อมูลต่างๆ ของรถบรรทุกน้ำมันที่ใช้ในงานวิจัยเป็นข้อมูลที่เก็บค่าจากบริษัทกรณีศึกษา แสดงดังตารางที่ 1

สำหรับต้นทุนการใช้รถบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิงแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2 ประกอบด้วย ต้นทุนค่าบริหารจัดการ 0.65 สตางค์ต่อลิตร โดยนำไปคิดรวมกับต้นทุนซื้อราคาน้ำมันแต่ละชนิด ต้นทุนค่าแรงคนขับรถ ต้นทุนค่าสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถแต่ละคัน และต้นทุนค่าซ่อมบำรุงรถบรรทุก อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยไม่ได้พิจารณาต้นทุนค่าล้างช่องบรรทุก ในกรณีที่มีการเปลี่ยนชนิดการเติมของน้ำมันในช่องนั้นเป็นชนิดอื่น ในการบรรจุรอบถัดไป เนื่องจากบริษัทกรณีศึกษาไม่ได้มีการเก็บบันทึกข้อมูลในส่วนนี้ไว้

ตารางที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของรถบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิง

รหัส รถ	ปริมาณความจุ แต่ละช่อง (X1,000 ลิตร)	น้ำหนักตัว รถบรรทุก (กก.)	น้ำหนัก บรรทุกสูงสุด (กก.)
T01	9/8/7/7/7/7	18,430	50,500
T02	9/8/7/7/7/7	18,430	50,500
T03	9/6/6/6/6/6/8	19,250	50,500
T04	8/6/4/4/4/6/8	18,600	50,500
T05	8/6/4/4/4/6/8	18,600	50,500

ตารางที่ 2 ข้อมูลต้นทุนการใช้รถบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิง

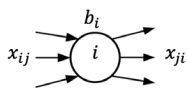
รหัสรถ	ค่าแรงคนขับ(บาท/วัน),ค่าซ่อมบำรุง และ ค่า สิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (บาท/กก.)
T01	600/10/8.06
T02	600/10/7.14
T03	600/10/7.81
T04	600/10/7.35
T05	600/10/7.14

2.4 รูปแบบการขนส่งแบบโครงข่ายการไหล

งานวิจัยนี้จะเสนอรูปแบบการวางแผนการขนส่งน้ำมันโดยนำวิธี NFMT มาประยุกต์ใช้การแก้ปัญหาการจัดส่งน้ำมันเชื้อเพลิงโดยรถบรรทุกแบบหลายช่อง ทฤษฎีปัญหาโครงข่ายการไหลอยู่ในรูปแบบของการเชื่อมต่อกันระหว่างโหนด ตั้งแต่ 2 โหนดขึ้นไป สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาต่างๆ เช่น กระบวนการขนส่ง การกำหนดบุคลากร การจัดตารางโครงการ เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ เช่นเดียวกับปัญหาทางคณิตศาสตร์เชิงการจัด (Combinatorics) สามารถแก้ปัญหาด้วยการเขียนโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ ทฤษฎีกราฟ หรืออัลกอริธึมการไหล มักมีวัตถุประสงค์สำหรับหาคำตอบของเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest Path) หรือต้นทุนการไหลที่ต่ำที่สุด (Minimum Cost Flow) โครงข่ายจะประกอบด้วยเซตของจุด และเซตของการเชื่อมต่อของจุด จุดที่เรียกว่าโหนด (Nodes) จะมีอยู่ 3 ลักษณะ ได้แก่ จุดต้นทาง (Original nodes) จุดปลายทาง (Destination Nodes) and และ จุดโอนถ่าย

(Transshipment Nodes) โดยมีเส้นที่เชื่อมต่อกันในแต่ละโหนดจะเรียกว่าอาร์ค (Arcs) หรือ ลิงค์ (Link) ซึ่งบางโหนดอาจจะไม่เชื่อมต่อกันก็ได้ ผลรวมการไหลเข้ามายังโหนด i ลบด้วยผลรวมการไหลที่ออกจากโหนด i จะต้องเท่ากับปริมาณความต้องการของโหนด i ดังสมการที่ 1 โดยแสดงได้ตามรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาค่า b_{ij} ที่โหนด i หากมีค่ามากกว่า 0 จะทำหน้าที่เป็นอุปทาน มีค่าน้อยกว่า 0 เป็นอุปสงค์ มีค่าเท่ากับ 0 ทำหน้าที่ส่งผ่านหรือหน้าที่อื่นๆ สำหรับปัญหาการขนส่งนี้จะเรียกเส้นทางการเชื่อมต่อกันว่า เส้นทางที่เป็นไปได้ (Possible path)

$$\left(\sum_i x_{ij} - \sum_j x_{ji} = b_i ; \forall i \right) \quad (1)$$



รูปที่ 3 แสดงการไหลเข้า และออกของโหนด i

2.5 การพัฒนารูปแบบวิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการวางแผนการจัดส่งน้ำมัน

การพัฒนารูปแบบวิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการจัดเส้นทางการขนส่งรถบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับน้ำมันหลายชนิด มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้เกิดต้นทุนการขนที่ต่ำที่สุด เป้าหมายของผลเฉลยเพื่อต้องการทราบคำตอบอยู่ 4 ด้าน คือ 1) รถบรรทุกคันใดบ้างที่จะนำมาใช้งานในการขนส่งน้ำมัน 2) น้ำมันแต่ละชนิดจะถูกบรรจุลงในถังของรถบรรทุกคันใดบ้าง และเป็นปริมาณเท่าใด 3) มีลูกค้าใดบ้างที่รถต้องวิ่งไปส่ง และ 4) ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นสำหรับการขนส่งมีค่าเท่าไร ซึ่งรูปแบบวิธีการทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว แสดงดังต่อไปนี้

2.5.1 ดัชนี

$I = \{1,2,3, \dots, 59\}$ เซตของคลังน้ำมัน สถานีน้ำมัน หรือลูกค้าหรือตำแหน่งปลายทางของโครงข่าย

การขนส่งของลูกค้า

$K = \{1,2,3,4,5\}$ เซตของรถบรรทุกทั้งหมดของบริษัท สำหรับใช้การขนส่งน้ำมัน

$C = \{6,7\}$ เซตของช่องบรรจุน้ำมันของรถบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิง

$P = \{D, E91, E95\}$ เซตชนิดน้ำมันเชื้อเพลิง

2.5.2 พารามิเตอร์

c_p ค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนการซื้อน้ำมันเชื้อเพลิง p เพื่อส่งจำหน่ายให้แก่ลูกค้า (บาทต่อลิตร)

$c_k^{[f]}$ ต้นทุนคงที่การใช้งานรถบรรทุก (บาทต่อรอบการขนส่ง)

c_u ค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพื่อนำมาใช้งานในการขนส่ง (บาทต่อกม.)

$c_k^{[m]}$ ค่าใช้จ่ายด้านบริหารจัดการขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยรถบรรทุกคันที่ k (บาทต่อลิตร)

ds_p ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดที่ p

D_{ip} ปริมาณความต้องการ ของลูกค้า i สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงชนิด p (x1000 ลิตร)

l_{ij} ระยะทางจากโหนด i ไปยังโหนด j ของเส้นทางที่เป็นไปได้ที่เชื่อมต่อกันของแต่ละโหนดในเซต I (กม.)

Q_{kc}^{max} ปริมาตรความจุมากที่สุดของช่องถังน้ำมันที่ c ของรถบรรทุกคันที่ k ที่สามารถบรรจุน้ำมันได้

C_k จำนวนช่องของรถบรรทุกคันที่ k

R_k^w น้ำหนักขณะยังไม่มีรถบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิงของรถบรรทุกคันที่ k

R_k^{max} น้ำหนักบรรทุกรวมสูงสุดที่สามารถบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิงได้ ของรถบรรทุกคันที่ k

2.5.3 ตัวแปรตัดสินใจ

x_{ijkcp} ปริมาณการขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิงจากโหนด i ไปยัง โหนด j โดยรถคันที่ k ในช่องถังน้ำมันที่ c ส่งน้ำมันชนิดที่ p

y_{kcp} ตัวแปรตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ รถบรรทุกคันที่ k ข่องบรรจุที่ c ได้บรรจุน้ำมันเชื้อเพลิงชนิด p ลงในช่องถังน้ำมันที่ c

z_{ijk} ตัวแปรตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ โหนด i, j กำหนดให้รถคันที่ k มีการใช้งาน

2.5.4 รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์

1) สมการเป้าหมาย

$$\text{Min } Z = \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j),k,c,p} (c_p + c_k^{[m]}) x_{ijkcp} y_{kcp}$$

$$+ \sum_{(i,j),k} c_{ulij} z_{ijk} + \sum_{(i,j),k} c_{fk}^f z_{ijk} ;$$

$$\forall (i,j) \in I, i \neq j, \forall (k,c,p) \in K,C,P$$

2) สมการข้อจำกัด

$$\sum_{(i,j),k,p,c} x_{ijkcp} - \sum_{i,j,k,p,c} x_{jikcp} = D_{ip} ; \quad (3)$$

$$\forall (i,j) \in I, i \neq j, \forall (k,c,p) \in K,C,P$$

$$\sum_j z_{ijk} \leq 1 ; \quad i,j \in I, i \neq j, \forall (k) \quad (4)$$

$$\sum_i z_{ijk} \leq 1 ; \quad i,j \in I, i \neq j, \forall (k) \quad (5)$$

$$(x_{ijkcp} - Q_{kc}^{max}) * y_{kcp} \leq 0 ; \forall (i,j,k,c,p) \quad (6)$$

$$\sum_p y_{kcp} \leq 1 ; \quad p \in P, \forall (k,c) \quad (7)$$

$$R_k^w + \sum_{(i,j),p,c} x_{ijkcp} ds_p \leq R_k^{max} ; \quad (8)$$

$$i,j \in I, i \neq j, p \in P, c \in C, \forall (k)$$

$$(x_{ijpkc} - Q_{kc}^{max}) * z_{ijk} \leq 0 ; \forall (i,j,p,k,c), i \neq j \quad (9)$$

$$\sum_{i,j} z_{ijk} - \sum_{j,i} z_{jik} \geq 0 ; \quad i,j \in I, i \neq j, \forall (k) \quad (10)$$

$$x_{ijkcp} \begin{cases} > 0, x_{ijkcp} = \text{Depot (supplier)} \\ = 0, x_{ijkcp} = \text{Transshipment point} \\ < 0, x_{ijkcp} = \text{Customers demand} \end{cases} \quad (11)$$

$$x_{ijkcp} \geq 0, \epsilon \{Integer\} \quad \forall (i,j,k,c,p) \quad (12)$$

$$y_{kcp} \in \{0,1\} \quad \forall (k,c,p) \quad (13)$$

$$z_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j,k) \quad (14)$$

รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของปัญหามีวัตถุประสงค์เพื่อให้ต้นทุนค่าขนส่งโดยรวมต่อเที่ยวต่ำที่สุดในการขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิงผ่านเครือข่ายการไหลเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าตามที่กำหนด มีรูปแบบดังนี้ (2) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ต้นทุนการขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิงผ่านเครือข่ายการขนส่งน้ำมันเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าตามที่กำหนดต่ำที่สุด (3) ผลรวมปริมาณน้ำมันที่ออกจากโหนด ลบด้วยผลรวมน้ำมันที่เข้ามายังโหนด จะต้องเท่ากับปริมาณความต้องการน้ำมันโหนด i (4) และ (5) รถบรรทุกทุกคันจะต้องเริ่มรับสินค้าที่คลังน้ำมัน (6) กำหนดให้รถบรรทุกบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิงลงในช่อง (7) กำหนดให้ช่องน้ำมันในรถบรรทุก 1 ช่อง จะบรรจุน้ำมันเชื้อเพลิงได้เพียง 1 ชนิดเท่านั้น (8) น้ำหนักบรรทุกรวมสูงสุดของรถบรรทุกคันที่ k ที่สามารถบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิงได้ ต้องไม่เกินน้ำหนักตามที่กฎหมายกำหนด (9) กำหนดให้รถคันที่ k มีการใช้งานที่โหนด i (10) รถที่ออกจากโหนด i ต้องมีจำนวนไม่เกินรถคันที่เข้ามายังโหนด i (11) และ (12) มีค่าเป็นบวกเมื่อทำหน้าที่เป็นการส่งน้ำมันเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อทำหน้าที่ส่งผ่านหรือโหนดการถ่ายเท มีค่าลบเมื่อทำหน้าที่เป็นจุดรับน้ำมันเชื้อเพลิง และเป็นจำนวนเต็ม (13) และ (14) กำหนดให้เป็นตัวแปรไบนารีมีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 เท่านั้น

2.6 การทดสอบหาประสิทธิภาพของรูปแบบที่พัฒนา

การทดสอบหาผลเฉลยของวิธีที่พัฒนาขึ้น มีวัตถุประสงค์เพื่อหาต้นทุนการขนส่งน้ำมันต่อเที่ยวต่ำที่สุด และด้านเวลาที่ใช้ประมวลผล โดยนำข้อมูลตัวอย่างของบริษัท จำนวน 30 วัน (30 ตัวอย่าง) เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีปัจจุบัน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวถูกแก้ปัญหาโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป LINGO 16.0 โดยใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง Intel Core I7 2.6GHz หน่วยความจำ 8 GB

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผู้วิจัยนำเสนอตัวอย่างผลการทดสอบแก้ปัญหาการจัดการขนส่งรถบรรทุกน้ำมันสำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงหลายชนิด สำหรับตัวอย่างที่ 1 แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลปริมาณความต้องการลูกค้า และต้นทุนราคาน้ำมัน ของตัวอย่างที่ 1

รหัสลูกค้า	ความต้องการน้ำมันของลูกค้า (ลิตร)
06	Diesel=3,000 E91=6,000 E95=20,000
09	Diesel=4,000
14	Diesel=8,000
20	Diesel=8,000
22	Diesel=4,000
25	Diesel=4,000
29	Diesel=22,000
34	Diesel=4,000
37	Diesel=4,000
43	E91=4,000
44	Diesel=4,000
46	E91=3,000
รวม 12 ราย	65,000
ราคาน้ำมัน (บาทต่อลิตร)	
คลังที่ 1 Diesel=23.79, E91=20.84, E95=22.35	
คลังที่ 2 Diesel=20.19, E91=21.75, E95=21.48	

ข้อมูล จากตารางที่ 3 มีปริมาณความต้องการของลูกค้าโดยรวมจำนวน 12 ราย มีความต้องการน้ำมันดีเซล 65,000 ลิตร น้ำมัน E91 ปริมาณ 13,000 ลิตร และ น้ำมัน E95 ปริมาณ 20,000 ลิตร และ รายละเอียดข้อมูลรถบรรทุกจำนวน 5 คัน ดังตารางที่ 1 และ 2 ผลการหาผลเฉลยของปัญหาพบว่า วิธีการที่พัฒนาขึ้น ใช้รถบรรทุกขนส่งจำนวน 3 คัน สามารถแสดงผลคำตอบดังตารางที่ 4 และแสดงเส้นทางการเดินรถดังรูปที่ 4 โดยมีรายละเอียดการขนส่ง ดังนี้

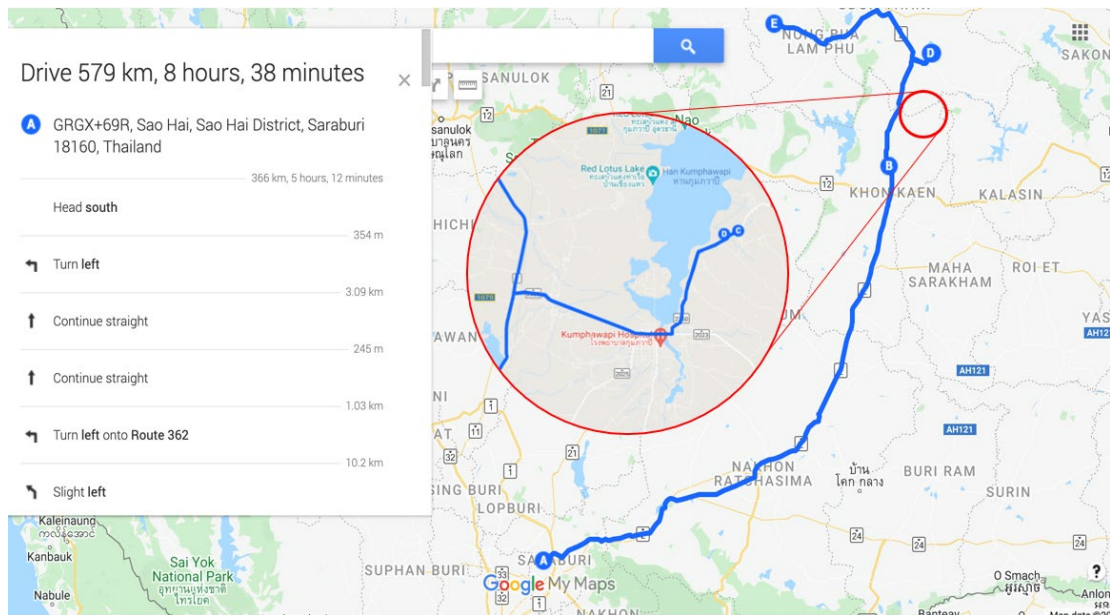
■ รถคันที่ 1 รหัส T01 เริ่มจากคลังน้ำมัน 02 (จุด A) วิ่งส่งลูกค้ารหัส 20-29-22-44 (จุด B-C-D-E) รวมระยะทางขนส่ง 579 กม. การใช้งานช่องของรถบรรทุกช่องที่ 1 ถึงช่องที่ 5 (c1, c2, c3, c4, และ c5) บรรทุกน้ำมัน Diesel โดยบรรทุกในช่อง c1=9,000 ลิตร ช่อง c2=8,000 ลิตร ช่อง c3=7,000 ลิตร ช่อง c4=7,000 ลิตร และช่อง c5=7,000 ลิตร (ไม่มีการบรรทุกน้ำมัน E91 และ E95)

■ รถคันที่ 2 รหัส T02 เริ่มจากคลังน้ำมัน 02 วิ่งส่งลูกค้ารหัส 09-14-34 รวมระยะทางขนส่ง 510 กม. การใช้งานช่องของรถบรรทุก ในช่องที่ c2, c3, c5, และ c6 บรรทุกน้ำมัน Diesel โดยบรรทุกในช่อง c2=6,000 ลิตร ช่อง c3=4,000 ลิตร ช่อง c5=2,000 ลิตร และช่อง c6=4,000 ลิตร (ไม่มีการบรรทุกน้ำมัน E91 และ E95)

■ รถคันที่ 3 รหัส T03 เริ่มจากคลังน้ำมัน 02 วิ่งส่งลูกค้ารหัส 25-46-06-43-37 รวมระยะทางขนส่ง 478 กม. มีการบรรทุกน้ำมัน Diesel ในช่องที่ c4 และ c6 โดยที่ c4=5,000 ลิตร ช่อง c6=6,000 บรรทุกน้ำมัน E91 ในช่องที่ 1 และ 5 โดยที่ c1=7,000 ลิตร ช่อง c5=6,000 บรรทุกน้ำมัน E95 ในช่อง c2,c3 และ c7 โดยที่ c2=6,000 ลิตร ช่อง c3=6,000 ลิตร และช่อง c7=8,000 ลิตร

รายละเอียดในตารางที่ 5 แสดงถึงผลการทดลองประมวลผลโปรแกรมเปรียบเทียบกับวิธีการปัจจุบัน ที่วางแผนด้วยประสิทธิภาพของพนักงานจำนวน 30 วัน (30 ตัวอย่าง) มีจำนวนลูกค้าที่ต้องการน้ำมันเชื้อเพลิงโดยเฉลี่ย 10.208 รายต่อวัน มีปริมาณความต้องการน้ำมันโดยเฉลี่ย 126,020 ลิตรต่อวัน

ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยค่าใช้จ่ายการขนส่งรถบรรทุกน้ำมันสำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงหลายชนิดสำหรับวิธีการที่พัฒนาขึ้น ให้ผลคำตอบในด้านต้นทุนการขนส่งที่ดีกว่าวิธีการปัจจุบัน



รูปที่ 4 ผลเฉลยตัวอย่างที่ 1 สำหรับเส้นทางเดินรถคันที่ T01

ตารางที่ 4 ผลเฉลยของตัวอย่างที่ 1 ตัว

ผลเฉลย		การใช้งานรถ		
ต้นทุนรวม	2.589	T01 วิ่งเส้นทาง 02-20-29-22-44	T02 วิ่งเส้นทาง 02-09-14-34	T03 วิ่งเส้นทาง 02-25-46-06-43-
เส้นทาง	ระยะทาง 579 กม.	ระยะทาง 510 กม.	37 ระยะทาง 478 กม.	
การใช้งานช่องของ	Diesel = c1,c2,c3,c4,c5	Diesel = c2,c3,c5,c6	Diesel = c4,c6	
รถบรรทุก	E91 = 0 E95 = 0	E91 = 0 E95 = 0	E91 = c1,c5 E95 = c2,c3,c7	
ปริมาณน้ำมัน (x1000 ลิตร)	c1=9,c2=8,c3=7,c4=7,c5=7 รวมปริมาณน้ำมัน = 38	c2=6,c3=4,c5=2,c6=4 รวมปริมาณน้ำมัน = 16	c1=7,c2=6,c3=6,c4=5,c5=6,c6= 6,c7=8 รวมปริมาณน้ำมัน = 44	

ตารางที่ 5 ผลเฉลยจำนวน 30 ตัวอย่างตัว

ตัวอย่างที่ 1-30 (Customer,demand)	ต้นทุน (x ล้านบาท)			เวลาประมวลผล (วินาที)		
	วิธีการ ปัจจุบัน	วิธีการที่ พัฒนาขึ้น	ผลต่าง	วิธีการ ปัจจุบัน	วิธีการที่ พัฒนาขึ้น	ผลต่าง
ค่าเฉลี่ย (10.208,12,6020)	3.493	3.411	-0.082	4,907.29	433.20	-4551.63
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (3.428,52513)	0.983	0.973	0.016	2,150.16	355.66	2034.00

โดยมีต้นทุนการขนส่งน้ำมันเฉลี่ย 3.411 ล้านบาทวัน ในขณะที่วิธีปัจจุบัน ให้ผลเฉลยด้านต้นทุนการขนส่งน้ำมันเฉลี่ย 3.493 ล้านบาทต่อวัน เมื่อพิจารณา

ด้านเวลาการประมวลผลเพื่อหาผลเฉลย พบว่าความเร็วการหาผลเฉลย สำหรับวิธีการที่พัฒนาขึ้นสามารถหาคำตอบได้เร็วกว่าวิธีปัจจุบัน โดยใช้เวลาเฉลี่ย 433.20

วินาทีต่อตัวอย่างการทดสอบ ในขณะที่วิธีปัจจุบัน ใช้เวลาเฉลี่ย 4,907.29 วินาทีต่อตัวอย่างการทดสอบ

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอตัวแบบสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อประเมินเครือข่ายการขนส่งในธุรกิจการขนส่งน้ำมัน โดยสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับแก้ปัญหาวางแผนการขนส่งรถบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิงแบบหลายช่องสำหรับน้ำมันหลายชนิด ขนส่งจากคลังน้ำมันสำเร็จรูปไปยังสถานีให้บริการน้ำมันหรือลูกค้า มีเป้าหมายเพื่อให้ต้นทุนจากการขนส่งมีค่าต่ำที่สุด ผู้วิจัยนำวิธี NFMT มาประยุกต์ใช้การสำหรับสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์ จากนั้นรวบรวมข้อมูลจริงของบริษัทกรณีศึกษา ได้แก่ จุดรับน้ำมันที่คลังน้ำมัน จำนวน 2 แห่ง ลูกค้าหรือสถานีให้บริการน้ำมัน จำนวน 57 แห่ง รถสำหรับขนส่งจำนวน 5 คัน และต้นทุนต่างๆที่เกิดขึ้นจากการบริหารจัดการขนส่ง

การทดสอบการแก้ปัญหาการจัดการขนส่งรถบรรทุกน้ำมันสำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงหลายชนิดโดยวิธีการพัฒนารูปแบบทางคณิตศาสตร์ ที่จำนวนตัวอย่าง 30 ตัวอย่าง พิจารณาหาผลเฉลยเป็นแบบรายวันเพื่อต้องการทราบผลคำตอบอยู่ 4 ด้าน คือ 1) รถบรรทุกคันใดบ้างที่จะนำมาใช้งานในการขนส่งน้ำมัน 2) น้ำมันแต่ละชนิดจะถูกบรรจุลงในแต่ช่องของรถบรรทุกช่องใดบ้าง และเป็นปริมาณเท่าไร 3) ต้องส่งน้ำมันไปตำแหน่งใดบ้าง และ 4) ต้นทุนเกิดขึ้นสำหรับการขนส่งน้ำมันมีค่าเท่าไร ซึ่งผลเฉลยดังกล่าวจะถูกแก้ปัญหาโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์สำเร็จรูป LINGO 16.0 โดยใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง Intel Core i7 2.6GHz หน่วยความจำ 8 GB

ผลการวิจัยพบว่า วิธีการที่พัฒนาขึ้น ให้ผลคำตอบในด้านต้นทุนการขนส่งน้ำมันเฉลี่ย 3.411 ล้านบาทต่อวัน ในขณะที่วิธีปัจจุบันให้ผลคำตอบในด้านต้นทุนการขนส่งน้ำมันเฉลี่ย 3.493 ล้านบาทต่อวัน

ในขณะที่ด้านเวลาในการประมวลผลเพื่อหาผลเฉลยพบว่า วิธีการที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาเฉลี่ย 433.20 วินาทีต่อตัวอย่าง ในขณะที่วิธีปัจจุบัน ใช้เวลาเฉลี่ย 4,907.29 วินาทีต่อตัวอย่าง

แนวความคิดการแก้ปัญหาเครือข่ายการขนส่งในธุรกิจการขนส่งน้ำมัน ที่พัฒนาวิธีการสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาวิธีการจัดเส้นทางขนส่งรถบรรทุกน้ำมันเชื้อเพลิงแบบหลายช่องสำหรับน้ำมันหลายชนิด ถือว่าเป็นวิธีที่นิยมเป็นอย่างแพร่หลายอีกวิธีหนึ่ง สำหรับงานวิจัยนี้ได้สร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยใช้แนวความคิดการขนส่งแบบโครงข่ายการไหล ซึ่งถือว่าเป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาการขนส่งเนื่องจากใช้เวลาในการประมวลผลเพื่อหาผลเฉลยได้รวดเร็วกว่าวิธีแบบ VRP หรือ Travelling Salesman Problem (TSP) ทั้งนี้พบว่าใช้เวลาในการหาผลเฉลยที่ดีที่สุดได้รวดเร็ว เกิดจากรูปแบบการระบุเส้นทางที่เป็นไปได้ลงในตัวแบบของปัญหา จึงทำให้เกิดการจัดเส้นทางที่ไม่เหมาะสมออกจากกระบวนการค้นหาคำตอบ จึงส่งผลให้แนวคิดนี้ใช้เวลาการหาผลเฉลยที่รวดเร็วกว่าวิธีที่กล่าวข้างต้น

สำหรับรูปแบบปัญหาในโจทย์วิจัย ผู้วิจัยได้ระบุสมการข้อจำกัดขึ้นภายใต้สภาวะรูปแบบการขนส่งที่ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด จากผลการวิจัยพบว่าแนวทางการพัฒนารูปแบบการขนส่งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสภาวะรูปแบบการขนส่งในลักษณะอื่นๆ ที่ใกล้เคียงกัน โดยเพิ่มเงื่อนไขต่างๆ เพื่อให้เกิดความเหมาะสม เช่น เงื่อนไขการแบ่งกลุ่มของลูกค้า [13], [14] เพื่อแบ่งกลุ่มของปัญหาให้มีขนาดเล็กลง โดยอาจแบ่งตามเขตพื้นที่รับผิดชอบ พื้นที่ใกล้เคียง หรือสามารถพัฒนาเขตพื้นที่ของการจัดส่ง เพื่อสร้างเส้นทางที่เป็นไปได้หลายๆ รูปแบบ เช่น การจัดเส้นทางที่ไม่ย้อนกลับเป็นต้น ทั้งนี้ก็เพื่อให้เกิดความง่าย และสะดวกในการบริหารจัดการรถขนส่ง นอกจากประเด็นที่กล่าวมานั้นแล้ว ด้านต้นทุนค่าล้างช่องบรรทุก ในกรณีที่มีการ

เปลี่ยนชนิดการเติมของน้ำมันในช่องเป็นชนิดอื่นในรอบบรรทุกถัดไป ควรถูกนำมาพิจารณาร่วมด้วย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ผู้วิจัยไม่ได้สร้างและทดสอบข้อมูลในหลายๆ ระดับของแต่ละปัจจัย ก่อนที่จะนำมาใช้ในการทดสอบกับข้อมูลของปัญหาจริง [15] เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือของวิธีการที่พัฒนาขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบกับปัญหาจริง จำนวน 30 ตัวอย่างสามารถให้ผลเฉลี่ยที่ดีกว่าวิธีการปัจจุบัน ทั้งในด้านต้นทุนรวมการขนส่ง และด้านเวลาในการคำนวณหาผลเฉลี่ย ซึ่งแนวทางดังกล่าวนี้ สามารถนำไปต่อยอดงานวิจัยได้ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทกรณีศึกษา ที่ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณศูนย์วิจัยโลจิสติกส์ และซัพพลายเชน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (SCLS) ที่สนับสนุนงบประมาณการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Martins, M. Ostermeier, P. Amorim, A. Hübner, and B. Almada-Lobo, "Product-oriented time window assignment for a multi-compartment vehicle routing problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 276, no. 3, pp. 893–909, 2019.
- [2] E. Fernández, H. Andersson, K. Fagerholt, and G. Laporte, "Computers & Operations Research Vessel routing with pickups and deliveries : An application to the supply of off shore oil platforms," vol. 79, no. March 2016, pp. 140–147, 2017.
- [3] S. W. Hwang, S. J. Kweon, and J. A. Ventura, "Locating Alternative-Fuel Refueling Stations on a Multi-Class Vehicle Transportation Network," *European Journal of Operational Research*, vol. 261, no. 3, pp. 941–957, 2017.
- [4] Z. Li and C. Jiang, "Study on the Transportation Problem of Petrol Secondary Distribution with Considering Shortage Cost," *Open J. Model. Simulation*, vol. 4, no. 2, pp. 34–40, Apr. 2016.
- [5] S. Fazayeli, A. Eydi, and I. N. Kamalabadi, "Location-routing problem in multimodal transportation network with time windows and fuzzy demands: Presenting a two-part genetic algorithm," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 119, pp. 233–246, May 2018.
- [6] L. Wang, J. Kinable, and T. van Woensel, "The fuel replenishment problem: A split-delivery multi-compartment vehicle routing problem with multiple trips," *Comput. Oper. Res.*, vol. 118, 2020.
- [7] M. Ji, L. Shen, B. Shi, Y. Xue, and F. Wang, "Routing optimization for multi-type containerships in a hub-and-spoke network," *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 2, no. 5, pp. 362–372, 2015.
- [8] N. Kasamtaranan and H. Tiewtong, "Routing for gasoline transportation : A Case Study of Gasoline Transport Service Company," *Interdiscip. Sripatum Chonburi J.*, vol. 6, no. 2, pp. 91–98, 2020.

- [9] Nitidetch Koohatongsumrit, "Optimal route selecting by multi-criteria decision making analysis," *RMUTP Res. J.*, vol. 11, no. 1, pp. 137–150, 2017.
- [10] C. Kavirathna, T. Kawasaki, S. Hanaoka, and T. Matsuda, "Transshipment hub port selection criteria by shipping lines: the case of hub ports around the bay of Bengal," *J. Shipp. Trade*, vol. 3, no. 1, pp. 1–25, 2018.
- [11] M. Donmuen and K. Pitiruek, "Network Model Approach for Fuel Transportation Business," *IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag.*, pp. 1370–1373, 2019.
- [12] M. Furkan Uzar and B. Çatay, "Distribution planning of bulk lubricants at BP Turkey," *Omega*, vol. 40, no. 6, pp. 870–881, 2012.
- [13] S. S. Mohri, S. Mortazavi, and N. Nassir, "A clustering method for measuring accessibility and equity in public transportation service: Case study of Melbourne," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 74, p. 103241, 2021.
- [14] M. A. Islam, Y. Gajpal, and T. Y. ElMekkawy, "Mixed fleet based green clustered logistics problem under carbon emission cap," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 72, p. 103074, Sep. 2021.
- [15] K. Heßler, "Exact algorithms for the multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 294, no. 1, pp. 188–205, 2021.

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

การวิเคราะห์การสันสเทือนแบบอิสระและแบบแรงกระทำด้วยสมุทไฟไนท์เอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมแบบโดเมนย่อยตามด้านสำหรับปัญหา 2 มิติ

กำธรเกียรติ มุสิกเกต บุญชัย ผึ้งไผ่งาม และ สุธี ปิยะพิพัฒน์*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12110

รับบทความ 7 พฤศจิกายน 2564 แก้ไขบทความ 22 พฤษภาคม 2565 ตอรับบทความ 28 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์การสันสเทือนแบบอิสระและแบบมีแรงกระทำด้วยสมุทไฟไนท์เอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมแบบแบ่งโดเมนย่อยตามด้านได้ถูกนำเสนอในครั้งนี้ โดเมนของปัญหาได้ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ขนาดเล็กรูปหลายเหลี่ยมใด ๆ เอลิเมนต์เหล่านั้น จะถูกแบ่งย่อยอีกครั้งให้กลายเป็นเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมตามด้านของเอลิเมนต์หลายเหลี่ยมที่เรียกว่าโดเมนต่อเนื่องสม่ำเสมอ ปัญหาตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์คือคานเซลลูลาร์ยื่นปลายซึ่งมีฐานรองรับด้านซ้ายเป็นแบบยึดแน่นในขณะที่ฐานรองรับปลายอิสระอีกด้านถูกแรงเฉือนในแนวตั้งกระทำสำหรับการวิเคราะห์การสันสเทือนแบบมีแรงกระทำ การวิเคราะห์การสันสเทือนแบบแรงกระทำชั่วขณะด้วยการแปรผันเชิงเส้นตามเวลารูปสามเหลี่ยมได้ถูกวิเคราะห์ด้วยเช่นกัน ผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ที่ใช้โครงตาข่ายความละเอียดสูงจะถูกใช้เป็นค่าสำหรับเปรียบเทียบแทนเนื่องจากการไม่มีผลเฉลยแม่นยำของคานตัวอย่างดังกล่าว ความถี่ธรรมชาติหกลำดับแรกรวมทั้งรูปร่างโหมดที่สอดคล้องของมันได้ถูกทำการตรวจสอบและพบว่ามีความสอดคล้องกับค่าอ้างอิงเป็นอย่างดี การตอบสนองในแนวตั้งตามเวลา ณ จุดบนคานตัวอย่างที่เลือกไว้ในกรณีของการวิเคราะห์แบบชั่วขณะที่ได้ ยังคงแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกับค่าที่ใช้ในการอ้างอิงได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : การสันสเทือนแบบอิสระและแบบแรงกระทำ; สมุทไฟไนท์เอลิเมนต์แบบโดเมนตามด้าน; เอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยม; ความถี่ธรรมชาติ; รูปร่างโหมด

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 7380 8222, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: suthee.p@en.rmutt.ac.th

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

Free and Forced Vibration Analysis by n-Sided Polygonal Edge-based Strain Smoothed Finite Element for 2D Problem

Kamtornkiat Musiket Boonchai Phungpaingam and Suthee Piyaphipat*

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thunyaburi

39 Moo. 1, Rangsit-Nakhonnayok Rd., Klong Hok, Klong Luang, Pathumthani 12110

Received 7 November 2021; Revised 22 May 2022; Accepted 28 June 2022

Abstract

Free and forced vibration analyses performed by polygonal edge-based strain smoothed finite element method is presented. Problem domain is discretized into small n-sided arbitrary polygonal elements. Those elements will be further subdivided into small triangular shape according to polygonal shape edges called smoothing domains. Benchmark problem is a castellated cantilever beam. Fixed support boundary condition is imposed to left edge while downward shear traction is applied on another free ended for forced vibration analysis. Transient vibration analysis also performed using triangular linear time variation. A close-to-exact solutions obtained from finite element employed very fine mesh due to unavailable exact solutions of the example problem will be used for comparison purpose. The first six natural frequencies along with their corresponding mode shapes are investigated and found in good agreement with references. The vertical response in time of selected node for transient analysis also showed in good agreement with reference.

Keywords: Free and Forced Vibration; Edge-based Strain Smoothed Finite Element; Polygonal Element; Natural Frequency; Mode Shape

* Corresponding Author. Tel.: +668 7380 8222, E-mail Address: suthee.p@en.rmutt.ac.th

1. บทนำ

วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมากมายได้ถูกเสนอมาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันเพื่อแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่นับวันจะมีความซับซ้อนมากขึ้น เริ่มจาก วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference Method, FDM) วิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method, FVM) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) วิธีเอลิเมนต์ขอบ (Boundary Element Method, BEM) วิธีสเปกตรัลเอลิเมนต์ (Spectral Element Method, SEM) วิธีเมสเลส (Meshless Methods) วิธีเอลิเมนต์เสมือน (Virtual Element Method, VEM) และวิธีสเกลบาวดารีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Scaled Boundary Finite Element Method, SBFEM) เป็นต้น ในบรรดาวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเหล่านี้ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [1-3] ถือว่าเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการคิดค้นพัฒนาวิธีการเชิงตัวเลขใหม่ๆ รวมทั้งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการสร้างความเครียดต่อเนื่องสม่ำเสมอ (Smoothed Finite Element Method, SFEM) ด้วยเช่นกัน สิ่งสำคัญประการหนึ่งที่เหมาะสมของวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเหล่านี้ คือการเปลี่ยนรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ลำดับต่าง ๆ สำหรับปัญหาที่กำลังสนใจ ซึ่งอยู่ในรูปที่เรียกว่า Strong Form ให้กลายเป็นรูปอย่างง่ายซึ่งสามารถทำกรานิทิกเรตได้ ที่เรียกว่า Weak Form หรือ Integral Form นั่นเอง ถึงแม้ว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโปรแกรมการวิเคราะห์และออกแบบที่มีอยู่มากมายในปัจจุบัน ก็ยังคงมีข้อด้อยที่จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงในหลาย ๆ ด้าน เช่น เรื่องของปัญหาสตีฟเนสที่มีค่ามากเกินไปกว่าพฤติกรรมจริงของโครงสร้าง (Over Stiff) ปัญหาเกี่ยวกับความแม่นยำเที่ยงตรงของค่าความเค้นสำหรับการเลือกใช้ประเภทของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับปัญหาที่สนใจ (Stress Accuracy) รวมไปถึงปัญหาการบิดเบี้ยวของโครงตาข่าย (Mesh Distortion) เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะของการเสียรูปอย่างมาก (Large Deformation) เป็นต้น

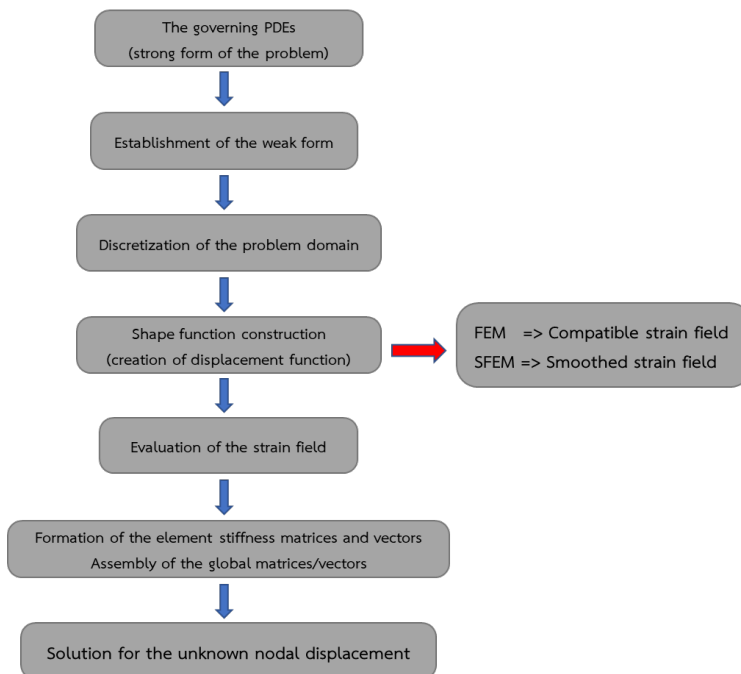
การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการสร้างความเครียดแบบสม่ำเสมอ (Smoothed Finite Element Methods, SFEM) ได้ถูกพัฒนาครั้งแรกโดย G.R. Liu และคณะ เพื่อแก้ปัญหาทั้งในส่วนของ Statics และ Dynamics [4] หัวใจสำคัญของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการสร้างความเครียดแบบสม่ำเสมอที่แตกต่างจากไฟไนต์เอลิเมนต์คือการสร้างสนามความเครียดต่อเนื่องสม่ำเสมอ (Smoothed Strain Field) โดยตรงจากการเปลี่ยนตำแหน่งที่สมมติไว้แล้ว โดยอาศัย Smoothed Galerkin Weak Form ในกรณีที่สนามความเครียดในขณะที่ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้สนามความเครียดที่เรียกว่าสนามความเครียดที่เข้ากันได้โดยตรง (Compatible Strain Field) โดยที่ยังคงมีคุณสมบัติของความเสถียรและการลู่เข้าหาผลเฉลยแม่นยำตรงเหมือนกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับขั้นตอนอื่น ๆ ของการวิเคราะห์นั้น ยังคงเป็นขั้นตอนเดียวกันกับที่ใช้ในไฟไนต์เอลิเมนต์นั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 1

สำหรับปัญหาความเค้นในระนาบสองมิตินี้ สมูทไฟไนต์เอลิเมนต์ ยังสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของการสร้างโดเมนย่อยสม่ำเสมอภายในโดเมนหลักออกเป็น 3 แบบกล่าวคือ หากการสร้างโดเมนย่อยสม่ำเสมอเกิดขึ้นภายในเอลิเมนต์หลัก เรียกว่า Cell-based SFEM (CS-FEM) หากทำการสร้างโดเมนย่อยตามโหนดของเอลิเมนต์หลัก เรียกว่า Node-based SFEM (NS-FEM) และเรียกว่า Edge-based SFEM (ES-FEM) เมื่อทำการสร้างโดเมนย่อยสม่ำเสมอตามเส้นขอบหรือด้านของเอลิเมนต์หลัก รูปแบบการสร้างโดเมนย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 2

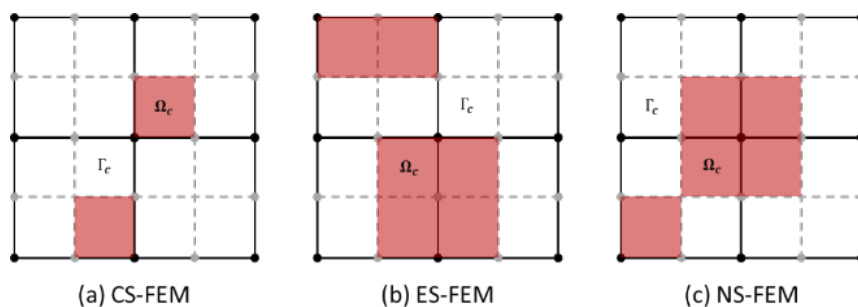
สมูทไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปใช้วิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ หลายรูปแบบเพื่อแสดงถึงความแม่นยำของมัน Lui et al. [6] ได้แสดงให้เห็นว่าการแบ่งเอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (Bilinear Quadrilateral Element, Q4) ออกเป็นเอลิเมนต์ต่อเนื่องสม่ำเสมอ ๆ สามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงและมีเสถียรภาพที่สูงกว่าไฟ

ไนท์เอลิเมนต์ Dai et al. [7] ใช้เอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยม (n-Sided Polygonal Element) สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาของการสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free Vibration) และแบบมีแรงกระทำชั่วขณะ (Transient Vibration) ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) และรูปร่างโหมดที่สอดคล้อง (Mode Shape) ของการวิเคราะห์หาค่าใกล้เคียงค่าที่ใช้ในการอ้างอิง นอกจากนี้ยังพบว่า ไม่ปรากฏว่ามี Spurious Zero Energy Modes ที่จะทำให้โหมดรูปร่างของโครงสร้างที่เกิดขึ้นไม่ตรงกับความเป็นจริง Jiang et al. [8] ทำการ

วิเคราะห์ปัญหาพลศาสตร์ของไหลสำหรับของแข็งที่บีบอัดไม่ได้ ปัญหาของการชนกัน (Impact Problem) [9] โดยใช้เมทริกซ์มวลแบบรวมผล (Lumped Mass Matrix) ผลลัพธ์ที่ได้ มีความเที่ยงตรงสูงกว่าวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ หรือปัญหาที่เกี่ยวข้องกับชีวกลศาสตร์ (Biomechanics) [10] ปัญหาของการถ่ายเทมวลและความร้อนด้วยสมุทไฟไนท์เอลิเมนต์แบบสร้างเอลิเมนต์ย่อยต่อเนื่องตามโหนดของเอลิเมนต์หลัก (NSFEM) [11] เป็นต้น



รูปที่ 1 ความแตกต่างของการสร้างสนามความเครียดทั้งสองแบบ [5]



รูปที่ 2 การสร้างโดเมนย่อยสม่ำเสมอ (a) CS-FEM, (b) ES-FEM และ (c) NS-FEM [5]

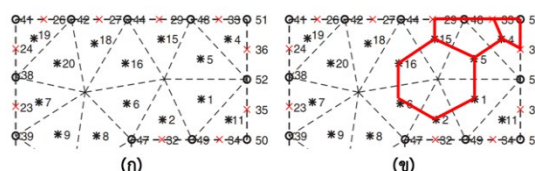
งานวิจัยครั้งนี้ ทำการศึกษาผลจากการใช้เอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมที่มีจำนวนด้านใด ๆ (n-Sided Polygonal Element) แทนเอลิเมนต์สามเหลี่ยม (Triangular Element, T3) หรือเอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยมเชิงเส้นคู่ (Bilinear Quadrilateral Element, Q4) ซึ่งนิยมใช้กันในสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์หรือไฟไนท์เอลิเมนต์ทั่วไป โดยทำการวิเคราะห์ปัญหาตัวอย่างคานเชลลูลาร์ยื่นปลาย (Castellated Cantilever Beam) ที่มีรูเจาะภายในเป็นรูปวงกลมทั้งแบบสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์ (Static and Dynamics Analyses) เพื่อหาค่าการเคลื่อนที่ของปลายคาน ณ จุดที่กำหนด หาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างโหมดของมันสำหรับวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free Vibration Analysis) รวมทั้งการตอบสนองตามเวลาของจุดที่สนใจบนคานสำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบมีแรงกระทำชั่วขณะ (Transient Vibration Analysis) เนื่องจากไม่สามารถหาค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) ของคานตัวอย่างได้โดยตรง คานตัวอย่างดังกล่าว จึงถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ที่ใช้เอลิเมนต์ทรงสี่เหลี่ยมจำนวนมากเพื่อให้มั่นใจว่าคำตอบที่ได้เป็นค่าที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรง (Close-to-Exact Solution) และจะถูกใช้สำหรับเปรียบเทียบกับค่าจากการวิเคราะห์ด้วยสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์ต่อไป

การจัดลำดับรูปแบบของบทความเริ่มด้วยการกล่าวถึงพื้นฐานของวิธีสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์ในส่วนที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วย การแบ่งโดเมนของปัญหาด้วยเอลิเมนต์หลักหลายเหลี่ยม การแบ่งโดเมนย่อยสม่ำเสมอตามจำนวนด้านของเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยม การสร้างสมการสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์ เมทริกซ์มวลแบบรวมผล (Lumped Mass Matrix) และเทคนิคของการอินทิเกรตเชิงตัวเลขตามเวลา (Numerical Time Integration Technique) ตามลำดับ ส่วนที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดของปัญหาตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ รวมทั้งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ ในส่วนที่ 4 จะเป็นบทสรุปของการศึกษาในครั้งนี้

2. สมูทไฟไนท์เอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมแบบโดเมนย่อยรอบด้านของเอลิเมนต์หลัก

2.1 การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมใด ๆ

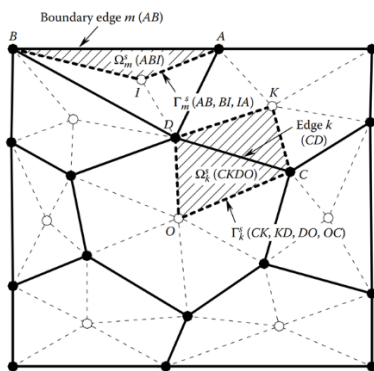
ขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขแบบต่าง ๆ มีความคล้ายคลึงกันคือ เป็นขั้นตอนการแบ่งโดเมนของปัญหาที่กำลังศึกษา ให้ประกอบไปด้วยเอลิเมนต์เล็ก ๆ (Finite Element) จำนวนหลาย ๆ เอลิเมนต์ สำหรับปัญหาความเค้นในระนาบ 2 มิติ (Two-dimensional Plane Stress Problems) นั้น เอลิเมนต์ที่ใช้กันทั่วไปคือเอลิเมนต์เชิงเส้นคู่แบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Quadrilateral Element) ซึ่งได้รับความนิยมในการใช้งานมากกว่าเอลิเมนต์เชิงเส้นรูปสามเหลี่ยม (Triangular Element) เนื่องจากให้ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำสูงกว่า สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ โดเมนของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์หลักเล็ก ๆ รูปหลายเหลี่ยมที่มีจำนวนด้านใด ๆ (n-Sided Polygonal Element) การสร้างเอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมนี้ สามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่ใช้สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ เริ่มจากการสร้างเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ทั่วไป เช่น ABAQUS, ANSYS, SOLIDWORKS หรือโปรแกรมเฉพาะสำหรับการสร้างโครงตาข่ายเช่น DistMesh [12] เป็นต้น แล้วจึงทำการลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลางของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมเหล่านั้นเข้าด้วยกัน เมื่อทำการลบเอลิเมนต์สามเหลี่ยมเกาออกให้หมด ก็จะได้เอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมในที่สุด ขั้นตอนการสร้างเอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมจากเอลิเมนต์สามเหลี่ยมดังกล่าว ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การสร้างเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยม

2.2 การสร้างโดเมนย่อยรอบด้านของเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยม

เมื่อโดเมนของปัญหาที่สนใจได้ถูกแบ่งออกเป็นโดเมนย่อยด้วยการสร้างรูปหลายเหลี่ยมตามที่ได้อธิบายไว้ในส่วนที่ผ่านมาแล้ว เอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมเหล่านั้น จะถูกแบ่งออกเป็นโดเมนย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอ (Smoothing Domain or Cell) รอบด้านแต่ละด้านของเอลิเมนต์หลัก (Edge-based Smoothing Domain) ต่อไป การแบ่งโดเมนย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอรอบด้านของเอลิเมนต์หลักนี้ สามารถทำได้โดยการลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนดที่ปลายทั้งสองด้านของเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมที่กำลังสนใจ ไปยังจุดกึ่งกลางของเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมนั้น ๆ จะได้เอลิเมนต์ย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอรูปสามเหลี่ยมจำนวนเท่ากับด้านของเอลิเมนต์หลักนั่นเอง เนื่องจากด้านแต่ละด้านของเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมแต่ละเอลิเมนต์ เป็นส่วนหนึ่งของเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมสองเอลิเมนต์ที่อยู่ติดกัน (Adjacent Element) ดังนั้น ด้านหนึ่งด้าน จะมีโดเมนย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอรูปสามเหลี่ยมที่เกี่ยวข้องจำนวน 2 โดเมนย่อยนั่นเอง ซึ่งจะถูกใช้ในการคำนวณหาค่าความเค้นหรือความเครียดที่เกิดขึ้นภายในเอลิเมนต์ได้ต่อไป สำหรับด้านที่เป็นขอบเขตโดเมนของปัญหาที่สนใจ (Boundary edges) นั้น จะมีโดเมนย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอรูปสามเหลี่ยมที่เกี่ยวข้องเพียง 1 โดเมนเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 เอลิเมนต์ย่อยรอบด้านเอลิเมนต์หลัก [4]

2.3 สมการสมุทไฟไนท์เอลิเมนต์

ในส่วนนี้ จะกล่าวถึงพื้นฐานที่สำคัญของการสร้างสมการสติเฟนสของสมุทไฟไนท์เอลิเมนต์ กล่าวโดยทั่วไปแล้ว ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างไฟไนท์เอลิเมนต์และสมุทไฟไนท์เอลิเมนต์อยู่ที่การสร้างสนามความเครียด (Strain Field) ส่วนขั้นตอนอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากนี้ไป ได้แก่ ขั้นตอนการรวมกันในระดับเอลิเมนต์ (Element Level) เพื่อให้ได้เมทริกซ์หรือเวกเตอร์ในระดับโครงสร้าง (Global Level) การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions) และการแก้ระบบสมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าการเปลี่ยนตำแหน่งของโหนด (Nodal Displacements) นั้น ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างสองวิธีดังกล่าว เพราะฉะนั้น ผู้เขียนจึงจะขอก้าวเฉพาะขั้นตอนของการสร้างสนามความเครียดสำหรับวิธีสมุทไฟไนท์เอลิเมนต์เพียงอย่างเดียว

เพื่อให้เกิดความสอดคล้องและง่ายต่อการทำความเข้าใจสำหรับผู้คนที่คุ้นเคยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์มาก่อน ค่าตัวแปรเมทริกซ์หรือเวกเตอร์ต่าง ๆ ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้จะใช้สัญลักษณ์เช่นเดียวกันกับที่ใช้ในวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยมีความแตกต่างคือ เครื่องหมายบาร์ที่อยู่ด้านบนของตัวแปรต่าง ๆ เหล่านั้น ใช้เพื่อแสดงว่า เป็นการกล่าวถึงตัวแปรเหล่านั้นในวิธีสมุทไฟไนท์เอลิเมนต์นั่นเอง

การสร้างสนามความเครียดต่อเนื่องสม่ำเสมอ นั้น สามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่ง่ายและสะดวกที่สุดเรียกว่า Strain/gradient Smoothing Technique สำหรับในวิธีสมุทไฟไนท์เอลิเมนต์นั้น มีสมมุติฐานที่ว่า สนามความเครียด (Strain Field) ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในโดเมนย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอ นั้น ได้มาจากการกระจายสนามความเครียดแบบสอดคล้องกัน (Compatible Strain Field) ที่ใช้ในวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ให้เกิดความสม่ำเสมอไปทั่วทั้งโดเมนย่อยนั้น ๆ และยังถูกสมมุติอีกว่าสนามความเครียดนี้มีค่าเท่ากันภายในโดเมนย่อย ๆ ที่ถูกสร้างขึ้นเหล่านั้น

สนามความเครียดสม่ำเสมอ (Smoothed Strain Field) ที่กล่าวมานี้ สามารถเขียนในรูปสมการได้ว่า

$$\bar{\varepsilon}(x_i) = \int_{\Omega} \varepsilon(x) W(x_i - x) d\Omega \quad (1)$$

โดยที่ $W(x_i - x)$ คือฟังก์ชันน้ำหนักของตำแหน่งที่กำลังสนใจภายในโดเมนย่อย โดยที่ฟังก์ชันน้ำหนักนี้ จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ [4] เพื่อความสะดวกสำหรับการนำไปใช้ ฟังก์ชันน้ำหนักนี้ จะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของ Heaviside Step Function ซึ่งเขียนเป็นสมการได้คือ

$$W(x_i - x) = \begin{cases} \frac{1}{A_i^s}, & x \in \Omega_i^s \\ 0, & x \notin \Omega_i^s \end{cases} \quad (2)$$

เมื่อ A_i^s คือพื้นที่ของโดเมนย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอ ในกรณีที่ความเครียดแบบสอดคล้องกันไม่สามารถหาได้อย่างง่ายซึ่งจัดว่าเป็นกรณีทั่วไปของปัญหาทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมนั้นแล้ว จะเปลี่ยนจากการใช้สนามความเครียดแบบสอดคล้องกันมาเป็นสนามการเคลื่อนที่ (Displacement field) ซึ่งหาได้ง่ายกว่าแทนแล้วจึงอาศัยการอินทิเกรตทีละส่วน (Integration by Parts) หรืออาจใช้ Green-Gauss Theory จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี เพราะฉะนั้น สนามความเครียดต่อเนื่องสม่ำเสมอดังกล่าว สามารถเขียนให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งได้คือ

$$\bar{\varepsilon}(x_i) = \frac{1}{A_i^s} \int_{\Gamma} L_n(x) \bar{u}(x) d\Gamma \quad (3)$$

เมื่อ $L_n(x)$ คือเมทริกซ์ที่มีสมาชิกเป็นเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วยที่มีทิศพุ่งออกจากด้านของเอลิเมนต์ Γ เขียนได้เป็น

$$L_n(x) = \begin{bmatrix} n_x & 0 & n_y \\ 0 & n_y & -n_x \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

เมื่อทำการแทนค่าประมาณของการเคลื่อนที่ ณ ปลายจุดต่อของเอลิเมนต์ในวิธีสมุทไฟไนต์เอลิเมนต์ $\bar{u}(x) = \sum_{i=1}^n N_i \bar{u}_i(x)$ ลงในสมการที่ 3 แล้วทำการจัดรูปสมการเสียใหม่จะได้ว่า

$$\bar{\varepsilon} = \sum_{i=1}^N [\bar{B}_1(x) \bar{B}_2(x) \dots \bar{B}_N(x)] \bar{d} \quad (5)$$

โดย $\bar{B}$ คือเมทริกซ์ความเครียด-การเปลี่ยนตำแหน่งแบบสม่ำเสมอในระบบโคออร์ดิเนตหลัก (Global Smoothed Strain-displacement Matrix, B Matrix) สามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$\bar{B}_I(x) = \frac{1}{A_i^s} \int_{\Gamma} L_n(x) N_I(x) d\Gamma = \begin{bmatrix} \bar{b}_x & 0 \\ 0 & \bar{b}_y \\ \bar{b}_y & \bar{b}_x \end{bmatrix} \quad (6)$$

เมื่อ

$$\bar{b}_i = \frac{1}{A_i^s} \int_{\Gamma} n_i(x) N_I(x) d\Gamma \quad (7)$$

$$i = x, y, I = 1, \dots, N_n$$

สมการที่ 7 เป็นสมการอินทิเกรตชั้นใน 1 มิติตามขอบเขตของเอลิเมนต์ที่อยู่ภายในโดเมนสม่ำเสมอ นั่นเอง เช่นเดียวกันกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถใช้กฎการอินทิเกรตของเกาส์ (Gauss Quadrature Rules) เข้ามาช่วยได้ หากฟังก์ชันรูปร่างการประมาณภายใน (Shape Functions) ที่ใช้บนแต่ละด้านของเอลิเมนต์นั้นมีการแปรผันแบบเชิงเส้นแล้ว ตำแหน่งของเกาส์เพียงแค่นั้นจุด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางด้านนั้น ก็เพียงพอที่จะให้ค่าการประมาณของฟังก์ชันมีความแม่นยำ ดังนั้น เครื่องหมายอินทิเกรตในสมการที่ 7 สามารถเปลี่ยนมาเขียนให้อยู่ในรูปเครื่องหมายผลรวมได้เป็น

$$\bar{b}_i = \frac{1}{A_k^s} \sum_{j=1}^{n_r} n_{ij}(x) N_I(x_j^G) L_j, i = x, y \quad (8)$$

เมื่อ n_j^r คือจำนวนด้านของโดเมนย่อยต่อเนื่องที่อยู่ภายในโดเมนสม่ำเสมอ x_j^G คือตำแหน่งของจุดเกาส์ (Gauss Point) ณ กึ่งกลางของด้านนั้น ๆ n_{ij} คือเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วยที่มีทิศออกจากด้านของโดเมนย่อยและ L_j คือความยาวด้านของโดเมนย่อยนั้น ๆ ตามลำดับ มีข้อพึงสังเกตที่สำคัญข้อหนึ่งนั่นคือ ในวิธีสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์นี้ เมทริกซ์ความเครียด-การเปลี่ยนตำแหน่ง (Strain-Displacement Matrix) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่สำคัญสำหรับการคำนวณหาสตีเฟนสมเมทริกซ์ต่อไปนั้น ไม่ต้องอาศัยการคำนวณเพื่อหาอนุพันธ์ของมันแต่อย่างใด ส่งผลให้ไม่ต้องหาจาโคเบียนเมทริกซ์ (Jacobian Matrix, J) รวมทั้งเมทริกซ์อินเวอร์สของมัน ทำให้ภาพรวมของการคำนวณสามารถทำงานได้เร็วกว่าวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ปัญหาที่ต้องใช้ฟังก์ชันรูปร่างในลำดับสูง ๆ เช่น 8-nodes หรือ 9-nodes Quadrilateral Element เป็นต้น

2.4 เมทริกซ์มวลแบบรวมผล (Lumped Mass Matrix)

การหาค่าเมทริกซ์มวลสำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่นิยมมีด้วยกัน 2 วิธี สำหรับวิธีแรก เป็นการอินทิเกรตฟังก์ชันรูปร่างการประมาณภายใน (Shape Functions) ของเอลิเมนต์ เรียกวิธีนี้ว่า Consistent Mass Matrix วิธีที่สอง ใช้หลักการแบ่งผลรวมมวลของเอลิเมนต์ไปยังโหนดต่าง ๆ เท่า ๆ กัน เรียกว่า Lumped Mass Matrix การศึกษาครั้งนี้ จะใช้วิธีแรกสำหรับการหาค่าของเมทริกซ์มวลแบบสอดคล้อง สำหรับเอลิเมนต์ย่อยต่อเนื่องสม่ำเสมอรูปสามเหลี่ยมที่อยู่ติดกับด้านของเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยม นั้น เมทริกซ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้เป็น

$$[m] = \frac{\rho A t}{12} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.5 การอินทิเกรตเชิงตัวเลขตามเวลา (Numerical Integration in Time)

สมการสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อแก้ปัญหาด้านพลศาสตร์สามารถเขียนเป็นสมการคือ

$$\bar{K} \bar{d} + \bar{C} \dot{\bar{d}} + \bar{M} \ddot{\bar{d}} = \bar{F} \quad (10)$$

เมื่อ $\bar{M}$, $\bar{C}$ คือ เมทริกซ์มวล (Mass Matrix) และเมทริกซ์การต้านทานแรงสั่นสะเทือน (Damping Matrix) ตามลำดับ เครื่องหมายจุดด้านบนตัวแปรหมายถึงลำดับของอนุพันธ์เทียบกับเวลา การอินทิเกรตตามเวลาที่นิยมใช้กันมากที่สุดสำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ทั่วไปอันเนื่องมาจากความสะดวกในการใช้งานรวมถึงประสิทธิภาพที่ดีของมัน ได้แก่ วิธีนิวมาร์ค (Newmark Method) [13]

ถ้าสมมุติให้เวลา ณ ปัจจุบันของการวิเคราะห์เท่ากับ t_0 และทราบค่าตัวแปรทั้งหมด ณ เวลาปัจจุบันนี้แล้ว หากต้องการหาค่าตัวแปรทั้งหมดเหล่านั้น ณ เวลาของการวิเคราะห์ถัดไป ในที่นี้กำหนดให้เป็นตัวแปร $t_1 = t_0 + \theta \Delta t$ โดย $0.5 \leq \theta \leq 1.0$ สามารถเขียนสมการที่ 10 เสียใหม่ได้เป็น

$$[\bar{M} + \beta(\Delta t)^2 K](\bar{d}_{i+1}) = \beta(\Delta t)^2 (F_{i+1}) + \bar{M}(\bar{d}_i) + (\Delta t) \bar{M} \dot{\bar{d}}_i + (\Delta t)^2 \bar{M} (0.5 - \beta) (\ddot{\bar{d}}_i) \quad (11)$$

$$(\dot{\bar{d}}_{i+1}) = (\dot{\bar{d}}_i) + (\Delta t) [(1 - \gamma) \ddot{\bar{d}}_i + \gamma \ddot{\bar{d}}_{i+1}] \quad (12)$$

$$(\bar{d}_{i+1}) = (\bar{d}_i) + (\Delta t) \dot{\bar{d}}_i + (\Delta t)^2 [(0.5 - \beta) \ddot{\bar{d}}_i + \beta \ddot{\bar{d}}_{i+1}] \quad (13)$$

โดย β และ γ คือค่าคงที่ โดยทั่วไปนิยมกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.25 และ 0.5 ตามลำดับเพื่อให้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขมีเสถียรภาพ [14]

สำหรับการศึกษาการสั่นสะเทือนแบบอิสระในครั้งนี้ สมมุติให้ไม่คิดแรงต้านทานของการสั่นสะเทือนเพื่อความสะดวกในการคำนวณ ดังนั้น สมการที่ 10 จึงลดรูปลงและสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 14

$$\bar{K} \bar{d} + \bar{M} \ddot{\bar{d}} = \bar{F} \quad (14)$$

เมื่อกำหนดให้ค่าเวกเตอร์ของแรงด้านขวาในสมการที่ 14 มีค่าเท่ากับศูนย์ ส่งผลให้สมการดังกล่าวเปลี่ยนรูปเป็นสมการอนุพันธ์แบบเอกพันธ์ (Homogeneous Differential Equation) ลำดับสอง ซึ่งสามารถหาคำเฉลยทั่วไปได้อย่างง่าย หากนำผลเฉลยทั่วไปนี้แทนค่ากลับลงไปในสมการอนุพันธ์ลำดับสองดังกล่าว จะทำให้สมการเปลี่ยนรูปไปเป็น

$$[\bar{K} - \omega^2 \bar{M}] \bar{d} = 0 \quad (15)$$

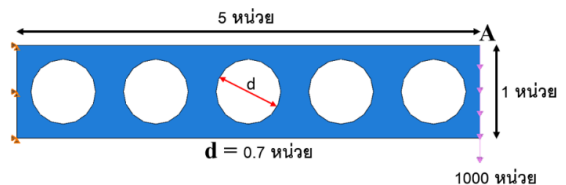
ที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่าเป็นรูปสมการ Eigenvalue Problems นั่นเอง เมื่อทราบค่าของ ω ก็สามารถคำนวณค่าของความถี่ธรรมชาติและรูปร่างโหมดที่สอดคล้องได้ตามลำดับต่อไป

3. ปัญหาตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์

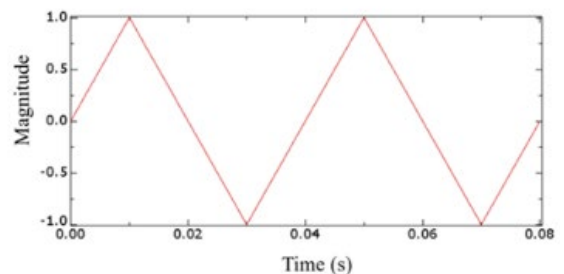
ปัญหาตัวอย่างสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ ใช้คานเชลลูลาร์ยื่นปลาย (Castellated Cantilever beam) ซึ่งมีรูเจาะวงกลมจำนวน 5 รูเจาะ ตามความยาวของคาน ขอบด้านซ้ายของคาน กำหนดให้มีสภาพเป็นฐานรองรับแบบยึดแน่น ส่วนปลายอิสระที่อยู่ด้านตรงข้ามกันนั้น กำหนดให้รับแรงเฉือนในแนวตั้ง (Vertical Traction) ซึ่งแปรผันตามฟังก์ชันของเวลาดังแสดงในรูปที่ 5 (b) ซึ่งใช้สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบมีแรงกระทำขนาด 1,000 หน่วย เพื่อความสะดวกในการคำนวณ ขนาดต่าง ๆ ของคานรวมทั้งรูเจาะและแรงเฉือนที่กระทำ ถูกกำหนดให้ไม่มีหน่วย ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) ถูกกำหนดให้มีค่าเป็น $3E+07$ และ 0.28 ตามลำดับ คานเชลลูลาร์ยื่นปลายสำหรับการวิเคราะห์ดังกล่าว ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 (a)

เนื่องจากไม่สามารถหาคำผลเฉลยทางทฤษฎีของคานตัวอย่างนี้ได้ จึงจำเป็นต้องใช้ค่าที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรง (Close-to-Exact Solution) แทน คำดังกล่าวนี้ สามารถหาได้ด้วยการใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ABAQUS ที่ใช้ความละเอียดของโครงตาข่ายแบบ

ทรงสี่หน้า (Q4) ซึ่งให้ค่าของผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงกว่าเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม (Triangular element) สำหรับปัญหาความเค้นในระนาบของของแข็ง [13] จำนวนมากพอและจะใช้เป็นค่าอ้างอิงตลอดการศึกษาในครั้งนี้ รูปที่ 6 แสดงถึงคานตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ที่ใช้โครงตาข่ายแบบทรงสี่หน้า สำหรับใช้ในการอ้างอิง (a) และโครงตาข่ายรูปหลายเหลี่ยมซึ่งได้มาจากการใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาเอง (In-house software) สำหรับการวิเคราะห์ด้วยสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์ (b) ตามลำดับ

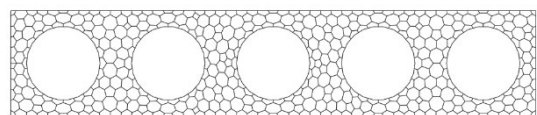


(a)



(b)

รูปที่ 5 ปัญหาตัวอย่าง (a) คานเชลลูลาร์ยื่นปลาย และ (b) การแปรผันของเวลา



(a)



(b)

รูปที่ 6 โครงตาข่าย (a) รูปหลายเหลี่ยม (b) รูปทรงสี่หน้า

3.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิตยศาสตร์ (Static Analysis)

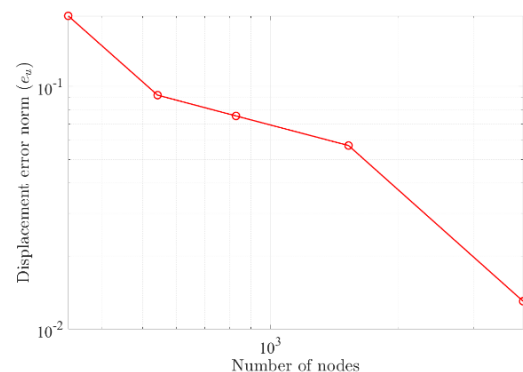
ขั้นตอนแรกเป็นการวิเคราะห์ทางสถิตยศาสตร์ของคานตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวของปลายคานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์กับความละเอียดโครงตาข่ายต่าง ๆ ค่าดังกล่าวได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 รวมทั้งถึงค่าที่ใช้ในการอ้างอิงในแถวสุดท้าย ค่ามาตรฐานความแตกต่างของการเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement Error Norm) ระหว่างการวิเคราะห์และค่าอ้างอิง ได้แสดงไว้ในคอลัมภ์สุดท้ายของตาราง พบว่า ค่าดังกล่าว มีค่าลดลงตามจำนวนของเอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีอื่น ๆ ค่าผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำของการโก่งตัวของปลายคาน ณ จุด A มีค่าเท่ากับ -0.002725 หน่วยในขณะที่ค่าจากการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ -0.002690 ที่จำนวนเอลิเมนต์หลายเหลี่ยมเท่ากับ 3,927 หรือเทียบเท่ากับ 8,628 โหนด ค่ามาตรฐานความคลาดเคลื่อนของการเปลี่ยนตำแหน่งจากโครงตาข่ายหยาบ (Coarse Mesh) ถึงโครงตาข่ายละเอียด (Fine Mesh) มีค่าอยู่ระหว่าง 19.5 ถึง 1.30 เปอร์เซ็นต์ของความละเอียดสูงสุด

การลู่เข้าหาผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำของการเปลี่ยนตำแหน่งครั้งนี้ สามารถแสดงให้เห็นในรูปแบบ Log-Log สเกล โดยมีจำนวนของโหนดเป็นแกนในแนวนอนและมาตรฐานความคลาดเคลื่อน

ของการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวดิ่งเป็นแกนในแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 7 จากกราฟพบว่า ค่าเฉลี่ยของมาตรฐานความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่งสำหรับการวิเคราะห์คานตัวอย่างในครั้งนี้ มีค่าเท่ากับ 0.5

ตารางที่ 1 การโก่งตัว ณ จุด A และค่ามาตรฐานความคลาดเคลื่อน

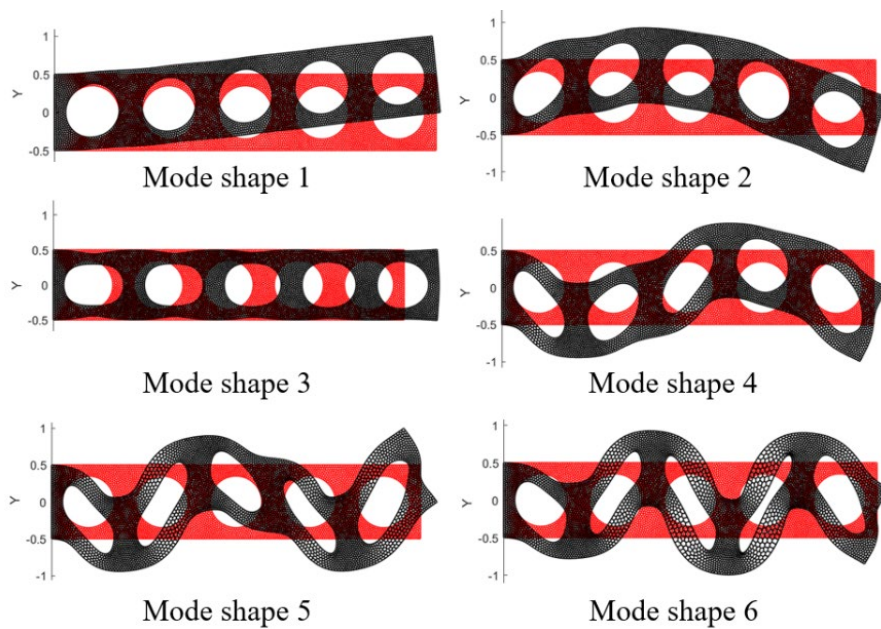
Polygon	Nodes	Deflection	Error norm
334	866	-0.002192	0.19542
542	1347	-0.002474	0.09211
829	1991	-0.002519	0.07562
1525	3518	-0.002569	0.05710
3927	8628	-0.002690	0.01303
Ref	9628	-0.002725	-



รูปที่ 7 การลู่เข้าหาผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำของคานตัวอย่าง

ตารางที่ 2 ความถี่ธรรมชาติ 6 ลำดับแรกที่โครงตาข่ายขนาดต่าง ๆ

เอลิเมนต์	ความถี่ธรรมชาติ (รอบต่อวินาที)					
	Mode					
	1	2	3	4	5	6
334	163.1	632.4	942.2	1282.1	1821.5	2203.4
542	154.9	612.1	935.8	1245.0	1770.4	2142.1
829	154.0	608.5	934.1	1238.2	1760.2	2131.4
1525	152.6	605.4	932.7	1233.0	1751.9	2120.7
3927	150.4	602.3	931.8	1227.4	1744.5	2111.8
Ref	149.3	597.8	931.1	1221.3	1732.8	2095.8



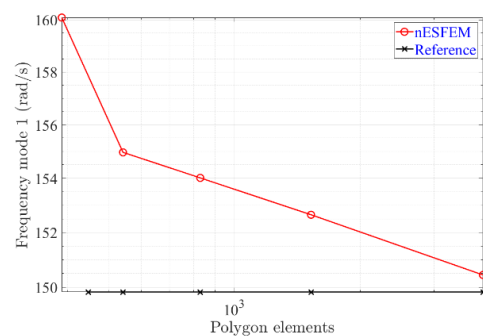
รูปที่ 8 รูปร่างโหมดหกลำดับแรกจากการวิเคราะห์พลศาสตร์

3.2 ผลวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free Vibration Analysis)

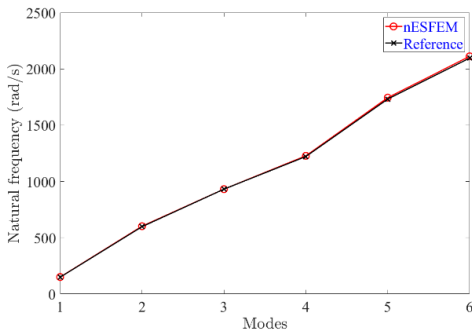
ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของคานตัวอย่างแบบอิสระเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างโหมดที่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาตินั้น ๆ ค่าความถี่ธรรมชาติหกลำดับแรกที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมูทไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ระดับความละเอียดของโครงตาข่ายขนาดต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 รวมทั้งค่าที่ใช้ในการอ้างอิง ค่ามาตรฐานความแตกต่าง (Error norm) ระหว่างการวิเคราะห์และค่าอ้างอิง ได้ถูกแสดงไว้ในแถวสุดท้ายของตาราง

จากตารางที่ 2 พบว่า ค่าความถี่ธรรมชาติลำดับแรกซึ่งมีความสำคัญมากกว่าลำดับอื่น ๆ นั้น มีการลู่เข้าหาผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรงเมื่อโครงตาข่ายมีความละเอียดมากขึ้นตามลำดับ โดยพบว่า ที่จำนวนเอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมเท่ากับ 3,927 ค่าดังกล่าวเท่ากับ 150.4 rad/s. เมื่อเทียบกับ 149.3 rad/s. ค่าความคลาด

เคลื่อนมีค่าเพียง 0.73 เปอร์เซ็นต์ การลู่เข้าหาผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรงของความถี่ธรรมชาติลำดับแรกได้แสดงไว้ในรูปที่ 9 ในขณะที่รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความถี่ธรรมชาติทั้งหกลำดับซึ่งได้จากการวิเคราะห์กับค่าจากผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรง จากรูปพบว่า ค่าที่ได้ทั้งสอง มีความสอดคล้องกันและไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ธรรมชาติลำดับแรก ๆ



รูปที่ 9 การลู่เข้าของความถี่ธรรมชาติลำดับแรก



รูปที่ 10 ความถี่ธรรมชาติทั้งหมดเทียบกับค่าอ้างอิง

รูปร่างโหมดทั้งหมดลำดับแรกที่มีความละเอียดโครงตาข่ายมากที่สุดซึ่งได้จากการวิเคราะห์ เมื่อเทียบกับคานก่อนการเสียรูป ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 และพบว่ารูปร่างโหมดทั้งหมด เป็นรูปร่างที่สอดคล้องกับรูปร่างทางกายภาพของคานและสามารถเกิดขึ้นได้จริงทั้งสิ้น ไม่มีปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Spurious zero energy modes แต่อย่างใด

3.3 ผลวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบมีแรงกระทำเป็นฟังก์ชันตามเวลา (Transient Vibration Analysis)

ในส่วนนี้ เป็นการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบแรงกระทำเพื่อหาค่าการตอบสนองที่เปลี่ยนไปตามเวลาของ จุด A ตามรูปที่ 5 (a) ในที่นี้จะหมายถึงการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของจุด A นั่นเอง ฟังก์ชันเวลาของแรงเฉือนในแนวดิ่งที่กระทำกับปลายคานด้านอิสระนั้น กระทำเป็นเส้นตรงมีค่าเท่ากับศูนย์ ณ เวลาเริ่มต้น มีค่าเท่ากับหนึ่ง ณ เวลา $t = 0.01$ มีค่าเป็น -1 ณ เวลา $t = 0.03$ และกลับมาเท่ากับศูนย์อีกครั้งที่เวลา 0.04 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 5 (b) โดยฟังก์ชันของเวลานี้ จะถูกนำไปใช้จำนวน 2 รอบ รวมระยะเวลาทั้งหมดของการวิเคราะห์ $t = 0.08$ วินาที

ผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบแรงกระทำ ช่วงขณะของจุด A (รูปที่ 5 (a)) สำหรับความละเอียดโครงตาข่ายจำนวน 4 ชุดด้วยกัน ได้แก่ 334, 542, 829,

1,525 เอลิเมนต์หลายเหลี่ยมหรือ 866, 1,347, 1,991 และ 3,518 โหนดตามลำดับ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 11 จากรูปพบว่า ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์ที่มีความละเอียดต่ำ (รูปที่ 11 (a)) มีความแตกต่างกับค่าอ้างอิงอย่างชัดเจนและความแตกต่างนี้ จะลดลงตามจำนวนความละเอียดของโครงตาข่ายที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีความสอดคล้องกับผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรงโดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ความละเอียดของโครงตาข่ายขนาดสูงสุดสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ (รูปที่ 11 (d))

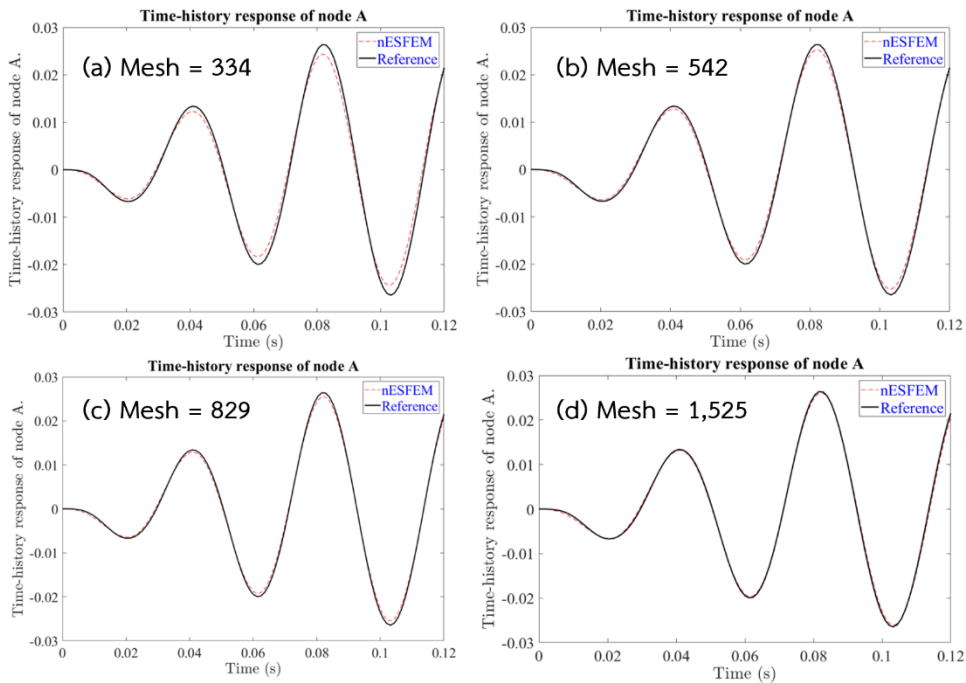
4. สรุปผลการศึกษา

การวิเคราะห์ปัญหาการสั่นสะเทือนแบบอิสระและแบบแรงกระทำสำหรับปัญหาความเค้นในระนาบสองมิติของคานเซลล์ูลาร์ด้วยสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์รูปหลายเหลี่ยมแบบแบ่งโดเมนย่อยตามจำนวนด้านของเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมได้ถูกนำเสนอในครั้งนี้ ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ABAQUS ที่มีโครงตาข่ายขนาดเล็กจำนวนมากที่มากพอถูกใช้เป็นค่าอ้างอิงแทนผลเฉลยแม่นยำตรงที่ไม่สามารถหาได้จากการวิเคราะห์โดยตรง การโก่งตัวของจุด A เมื่อทำการวิเคราะห์แบบสถิติศาสตร์ด้วยสมูทไฟไนท์เอลิเมนต์ที่โครงตาข่ายละเอียดสุดมีความแตกต่างกับค่าจากผลเฉลยที่ใกล้เคียงผลเฉลยแม่นยำตรงเพียง 1.3 เปอร์เซ็นต์

สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบอิสระ ความถี่ธรรมชาติลำดับแรกและรูปร่างโหมดมีค่าสอดคล้องกับค่าอ้างอิงโดยมีความแตกต่างของค่าความถี่ธรรมชาติลำดับแรกที่มีความละเอียดโครงตาข่ายมากที่สุดเพียง 0.73 เปอร์เซ็นต์ ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเมื่อโหมดรูปร่างมีค่าสูงขึ้นนั้น พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ รูปร่างโหมดที่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติที่ได้ทั้งหมด สอดคล้องกับสภาพของคานที่สามารถเกิดขึ้นได้จริง ในส่วนของการวิเคราะห์

แบบแรงกระทำนั้น การเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ณ จุด A ที่ได้จากสมูทไฟไนต์เอลิเมนต์ในครั้งนี้ มีความสอดคล้องกับค่าที่ใช้ในการอ้างอิงเป็นอย่างดี ความแตกต่างของค่าดังกล่าวเมื่อเทียบกับตามความละเอียดของโครงตาข่ายนั้นพบว่ามีความน้อยและสามารถละเลยได้ ผลของการวิเคราะห์ทั้งหมดนี้ ทำให้สมูทไฟไนต์เอลิเมนต์แบบรูป

หลายเหลี่ยมที่มีการแบ่งโดเมนย่อยออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมตามจำนวนด้านของเอลิเมนต์หลักรูปหลายเหลี่ยมนี้ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขซึ่งให้ค่าความแม่นยำของผลลัพธ์สูงและควรทำการศึกษาเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของวิธีนี้กับวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขอื่น ๆ ต่อไป



รูปที่ 11 การเปลี่ยนตำแหน่ง ณ จุด A (a) โครงตาข่ายขนาด 334 (b) โครงตาข่ายขนาด 542 (c) โครงตาข่ายขนาด 829 และ (d) โครงตาข่ายขนาด 1,525

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีสำหรับการสนับสนุนเวลาและแหล่งข้อมูลต่าง ๆ สำหรับการทําวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K.J. Bathe, *Finite Element Procedures*, New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [2] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor and J.Z. Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 6th ed. MA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [3] T.J. Hughes, *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*, New York: Dover Publication, 2000.
- [4] G.R. Liu, N.T. Trung, *Smoothed Finite Element Methods*, Boca Raton USA: CRC Press, 2010.

- [5] W. Junchum, K. Musiket, B. Phungpaingam and S. Pongsivasathit, "Two-Dimensional plane stress analysis by smoothed finite element method using 4 smoothing cells created by an arbitrary quadrilateral element," *Engineering Journal of Research and Development* vol. 32 no. 3, pp. 33-51, July-Sept. 2021.
- [6] G.R. Liu, K.Y. Dai, T.T. Nguyen, "A smoothed Finite Element Method for Mechanics Problems," *Computational Mechanics*, vol. 39, no. 6, pp. 859-877, May. 2007.
- [7] K Dai, G.R. Liu and T.T. Nguyen, "An n-sided Polygonal Smoothed Finite Element Method (nSFEM) for Solid Mechanics," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 43, no. 11-12, pp. 847-860, Aug. 2007.
- [8] C. Jiang, X. Han, G. R. Liu, Z.-Q. Zhang, G. Yang, and G.-J. Gao, "Smoothed finite element methods (S-FEMs) with polynomial pressure projection (P3) for incompressible solids," *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 84, pp. 253-269, Nov. 2017.
- [9] V. Kumar and R. Metha, "Impact simulations using smoothed finite element method," *International Journal of Computational Methods*, vol. 10, no. 04, pp. 1350012, Aug. 2013.
- [10] C. Jiang, Z.-Q. Zhang, X. Han, and G. R. Liu, "Selective smoothed finite element methods for extremely large deformation of anisotropic incompressible bio-tissues," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 99, no. 8, pp. 586-610, Aug. 2014.
- [11] X. Y. Cui, Z. C. Li, H. Feng, and S. Z. Feng, "Steady and transient heat transfer analysis using a stable node-based smoothed finite element method," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 110, pp. 12-25, Dec. 2016.
- [12] P.O. Persson and G. Strang, "A simple mesh generator in MATLAB," *SIAM review*, vol. 46, no. 2, pp. 329-345, 2004.
- [13] D.L. Logan, *A first course in the finite element method*, 6th ed. Boston USA: PWS Engineering, 2017.
- [14] E.L. Wilson, K.J. Bathe and F.E. Peterson, "Finite element analysis of linear and nonlinear heat transfer." *Nuclear engineering and design*, vol. 29, no. 1, pp. 110-24, Nov. 1974.

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

ผลของสภาวะการย้อมต่อค่าสีและความคงทนของสีผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่น

ศุภธวดี เววา* ขจีจรัส ภิรมย์ธรรมศิริ และ สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ

คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

รับบทความ 20 เมษายน 2565 แก้ไขบทความ 20 มิถุนายน 2565 ตอรับบทความ 28 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาผลของสภาวะการย้อมต่อสีและความคงทนของสีผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากบ้านดอนมะค่า ตำบลชนบท อำเภอนบพ จังหวัดขอนแก่น โดยทดลองใช้ปริมาณโคลนที่ระดับ 100 200 และ 300 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร เตรียมโคลนในการย้อม 2 วิธี คือ 1) ผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนย้อม และ 2) ผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที หลังการย้อมทำการวัดค่าสีและทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก ต่อแสงและต่อการขัดถู ผลการศึกษา พบว่า สีผ้าฝ้ายย้อมโคลนมีค่าเฉลี่ย L^* อยู่ระหว่าง 65.16-69.94 ค่า a^* 6.09-6.65 ค่า b^* 12.24-16.73 ค่า C^* 17.14-17.93 และค่า h^* 68.22-69.77 ทุกวิธีให้ผลค่า L^* a^* b^* C^* และ h^* ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05 ความคงทนของสีต่อการซักที่พิจารณาจากค่า dE^* ของการเปลี่ยนสีอยู่ที่เกรด 2 (ต่ำ) ถึงเกรด 3 (ปานกลาง) ความคงทนของสีต่อการซักที่พิจารณาจากค่า dE^* ของการเปลี่ยนสีอยู่ที่เกรด 4-5 (ดี-ดีมาก) ความคงทนของสีต่อแสงอยู่ที่เกรด 4-5 (ดี-ดีมาก) ถึงเกรด 5 (ดีมาก) ความคงทนของสีต่อการขัดถูแห่งที่พิจารณาจากค่า dE^* ของการเปลี่ยนสีอยู่ที่เกรด 4-5 (ดี - ดีมาก) ถึงเกรด 5 (ดีมาก) และความคงทนที่พิจารณาจากค่า dE^* ของการเปลี่ยนสีอยู่ที่เกรด 3 (ปานกลาง) ถึงเกรด 3-4 (ปานกลาง - ดี) ความคงทนของสีต่อการขัดถูเปียกที่พิจารณาจากค่า dE^* ของการเปลี่ยนสีอยู่ที่ระดับ เกรด 4-5 (ดี - ดีมาก) ถึงเกรด 5 (ดีมาก) และความคงทนที่พิจารณาจากค่า dE^* ของการเปลี่ยนสีอยู่ที่เกรด 3 (ปานกลาง) ถึงเกรด 3-4 (ปานกลาง - ดี) ทุกวิธีให้ค่า dE^* ของการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก ต่อแสงและต่อการขัดถูไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05 ผลการศึกษาสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย้อมผ้าฝ้ายด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่นคือ การใช้ปริมาณโคลน 100 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร โดยผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที

คำสำคัญ : ผ้าฝ้าย; การย้อมโคลน; ปริมาณโคลน; วิธีเตรียมน้ำโคลน

Effects of Dyeing Conditions on the Color Value and Colorfastness of Cotton Yarn Dyed with the Mud from Khon Kaen Province

Suthawadee Wewa* Kajjarus Phiromthamsiri and Suteeluk Kraisuwan

Faculty of Agriculture, Kasetsart University

50 Ngamwongwan Road, Ladyao Subdistrict, Chatuchak District, Bangkok 10900.

Received 20 April 2022; Revised 20 June 2022 Accepted 28 June 2022

Abstract

This research aimed to study effects of dyeing conditions on the color and colorfastness of cotton yarn dyed with the mud from Ban Don Makha, Chonnabot Sub-district, Chonnabot District, Khon Kaen Province. Dyeing experiments were conducted using mud content of 100 200 and 300 g per liter of water. Two methods of mud solution preparation used were 1) Mix mud and water then left for 1 hour before dyeing and 2) Mix mud and water then immediately used for dyeing. After dyeing the color values were measured and the tests for colorfastness to washing, colorfastness to light and colorfastness to abrasion were performed. The results of the study found that after dyeing cotton yarn with the mud, the colors obtained were L^* 65.16-69.94, a^* 6.09-6.65, b^* 12.24-16.73, C^* 17.14-17.93, and h^* 68.22-69.77. All dyeing methods yielded the L^* a^* b^* C^* and h^* values with no significant difference at .05. The colorfastness grades to washing, considered by dE^* of color change, were at 2 (poor) to 3 (fair). The colorfastness grades to washing, considered by dE^* of color staining, were at 4-5 (good – excellent) for all methods. The colorfastness grades to light were at 4-5 (good – excellent) to 5 (excellent). The colorfastness grades to dry abrasion, considered by dE^* of color change, were at 4-5 (good – excellent) to 5 (excellent). And the colorfastness grades considered by dE^* of color staining, were at 3 (fair) to 3-4 (fair-good). The colorfastness grades to wet abrasion, considered by dE^* of color change, were at 4-5 (good–excellent) to 5 (excellent). And the colorfastness grades, considered by dE^* of color staining, were at 3 (fair) to 4 (good). All methods yielded dE^* values of colorfastness to washing, to light and to abrasion, with no significant difference at .05. The results of the study pointed out that the optimum condition for dyeing cotton yarn with the mud from Khon Kaen province was using 100 grams of mud per liter of water by Mix mud and water then immediately.

Keywords: Cotton; Mud Dyeing; Mud quantity; Mud Solution Preparation

* Corresponding Author. Tel.: +666 2914 1935, E-mail Address: auijungja@hotmail.com

1. บทนำ

กลุ่มทอผ้าหมักโคลน อำเภอนบพ จังหวัดขอนแก่น เป็นสมาชิกกลุ่มทอผ้าวิสาหกิจกลุ่มหัตถกรรมสุโข มีผลิตภัณฑ์ที่มีชื่อเสียงคือผ้าหมักโคลน เนื่องจากกลุ่มมีบ่อโคลนหลายแห่ง โคลนจากบ่อน้ำข้างหมู่บ้าน 2 แห่งย้อมติดได้ดี จึงนิยมนำมาใช้ย้อมด้วยฝ้ายและด้ายไหม โดยเลือก โคลนสีดำที่อยู่ใต้บัว การทำผ้าฝ้ายหมักโคลนมีหลายขั้นตอน เริ่มจากนำโคลนจากคลอง และหนองน้ำในพื้นที่ขึ้นมารองด้วยตะแกรง เพื่อแยกเอาพวกเม็ดกรวดเม็ดดินออกให้เหลือแต่เนื้อโคลนล้วน ๆ แล้วนำไปผสมน้ำในสัดส่วนโคลน 5 กิโลกรัม ต่อน้ำ 30 ลิตร จากนั้นนำเปลือกไม้หรือใบไม้ให้สีที่ต้องการมาทุบหรือหั่นตามความเหมาะสมของวัตถุดิบ แล้วนำไปต้มในอัตราส่วนเปลือกไม้หรือใบไม้ให้สี 1 กิโลกรัมต่อน้ำ 4 ลิตร ต้มนาน 4 ชั่วโมง กรองเอาแต่น้ำสี เตรียมไว้ เมื่อต้องการย้อมจะนำน้ำที่กรองไว้แล้วขึ้นตั้งไฟให้อุ่น ๆ ผสมโคลนที่เตรียมไว้ลงไป คนให้เข้ากัน หลังจากนั้นนำเส้นด้ายฝ้ายลงแช่ย้อมนาน 30 นาที นำขึ้นไปล้าง แล้วนำไปแช่ในน้ำเกลือที่เตรียมไว้ โดยใช้เวลาในการแช่ประมาณ 5 นาที ก็นำขึ้นมาบิด และตากให้แห้ง แล้วจึงนำไปทอผ้าต่อไป

สีจากแร่ธาตุ (mineral dyes) เป็นสื่อนินทรีย์ โดยอาจเป็นส่วนผสมออกไซด์ของโลหะ หรือเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ สีประเภทนี้เคยมีความสำคัญในอดีต แต่ในปัจจุบันกล่าวได้ว่าเกือบสูญหายไปหมด สารให้สีเหล่านี้จะตกตะกอนในช่องว่างระหว่างโมเลกุลเส้นใย และเนื่องจากสารเหล่านี้มีเสถียรภาพมาก สีที่ได้จึงมีความทนทานต่อแสง ตัวอย่างเช่น ตะกั่ว โพแทสเซียมโครเมต ที่ให้สีเหลือง สีกากี้ที่ใช้ย้อมฝ้ายในอดีตได้จากออกไซด์ของเหล็กผสมกับออกไซด์ของโครเมียม เป็นต้น ส่วนมากโลหะที่ใช้ได้แก่ เหล็ก ตะกั่ว แมงกานีส ทองแดง โคบอลต์ และนิกเกิล [1] จากการวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่า โคลนจากอำเภอนบพ จังหวัดขอนแก่น ประกอบด้วย Mg

0.25 (แมกนีเซียม) Ca 0.20 (แคลเซียม) และ K 0.65 (โพแทสเซียม) สูง แมกนีเซียม เป็นสารมอร์แดนต์ที่นิยมใช้ในการย้อมฝ้ายเพราะช่วยให้สีที่ได้มีความสดใส และมีความคงทนต่อการซัก ต่อแสง และต่อการขัดถู [2] สารช่วยติดหรือ สารมอร์แดนต์ เป็นสารประกอบที่ช่วยให้สีย้อมติดอยู่บนผ้าและเส้นใยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้เส้นใยสามารถดูดซึมน้ำสีได้มากขึ้น และสารช่วยติดแต่ละชนิดยังมีส่วนทำให้เกิดสีที่แตกต่างกันอีกด้วย [3],[4] การย้อมสีธรรมชาติย้อมได้ทั้งการย้อมเย็น คือ ย้อมที่อุณหภูมิห้อง และการย้อมร้อนที่อุณหภูมิ 80 - 100 องศาเซลเซียส สีธรรมชาติเป็นสีที่ตกตะกอนง่าย ระหว่างการย้อมต้องคนสม่ำเสมอ [5] การย้อมสี สิ่งทอทั่วไป มีองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ได้หลังการย้อมมีคุณภาพดีคือ ชนิดของเส้นใย สารให้สีที่ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม และกรรมวิธีในการย้อม เพราะเส้นใยธรรมชาติจะมีความสามารถในการยึดติดกับสีได้แตกต่างกัน [1]

ฝ้ายเป็นพืชในตระกูล Gossypium และมีหลายชนิด เส้นใยฝ้ายมีความแตกต่างกันในเรื่องความยาว ความแข็งแรง การยืดตัว และความละเอียด ฝ้ายเป็นเส้นใยที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้ทำเครื่องแต่งกาย ผ้าฝ้ายทอมีเนื้อสัมผัสนุ่ม เป็นฉนวนความร้อนที่ดี ดูดความชื้นได้มากและ ดูดติดสีย้อมดี คุณสมบัติเหล่านี้รวมกับที่ฝ้ายมีราคาถูก ทำให้ฝ้ายเป็นผ้าที่ได้รับความนิยม [6] การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณโคลนและวิธีเตรียมน้ำโคลนสำหรับย้อมฝ้าย ที่มีต่อสีและความคงทนของสีเพื่อเลือกสภาวะการย้อมที่เหมาะสมสำหรับการย้อมฝ้ายด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่น

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเก็บตัวอย่างโคลน

เก็บตัวอย่างโคลนจากตำบลชนบท อำเภอนบพ จังหวัดขอนแก่น อบให้แห้งโดยใช้เตาอบลมร้อน

ที่อุณหภูมิ 95-105 องศาเซลเซียส จนมีความชื้น 1-2 เปอร์เซ็นต์ นำโคลนใส่ในถุงซิปปิดสนิท

2.2 การเตรียมน้ำโคลน

เตรียมน้ำโคลนสำหรับย้อม โดยใช้โคลน 100 200 และ 300 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตรและใช้วิธีเตรียมน้ำโคลน 2 วิธีคือ 1) ผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนย้อม และ 2) ผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที

2.3 การย้อม

นำเส้นด้ายฝ้ายพันธุ์ไทยเบอร์ 8 สีขาวที่ผ่านการต้มทำความสะอาดแล้วมาย้อมด้วยน้ำโคลนโดยใช้อัตราส่วนวัสดุต่อน้ำย้อม 1 กรัม ต่อ 30 มิลลิลิตร ย้อมที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำด้ายที่ย้อมแล้วไปล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง

2.4 การวัดค่าสีและทดสอบความทนของสี

2.4.1 การวัดค่าสี

วัดค่าสีโดยใช้เครื่อง spectrophotometer รุ่น DC 600 Data color วัดค่า $L^*a^*b^*$ และ h^*

2.4.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก

ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน AATCC Test method 16-2009 No.1A [7] โดยใช้อุณหภูมิการซัก 40 ± 3 องศาเซลเซียส ปริมาณสารละลายซักฟอก 200 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของสารซักฟอก 0.37 เปอร์เซ็นต์ ใส่ ลูกบอลสแตนเลส 10 ลูกต่อกระป๋อง และซักนาน 45 นาทีในเครื่องทดสอบซัก (Launder-Ometer) เตรียมชิ้นทดสอบโดย เรียงเส้นด้ายที่ย้อมให้ขนานกัน บนผ้าขาวขนาด 5×10 เซนติเมตรปิดทับด้วยผ้าขาวอีกชิ้นหนึ่ง แล้วเย็บริมทั้งสี่ด้าน หลังซักประเมินค่า dE^* ของการเปลี่ยนสี และ dE^* ของการเปื้อนสีด้วยเครื่องวัดสี

2.4.3 การทดสอบความคงทนของสีต่อการแสง

ทดสอบตามมาตรฐาน AATCC Test Method 16-2009 No. E Water – cooled Xenon arc Lamps

Continuous อบแสงนาน 5 ชั่วโมง [7] โดยใช้หลอดไฟซีนอนอาร์ค เป็นการทดสอบโดยการฉายแสงอาทิตย์จำลองในเครื่องทดสอบ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ไปบนด้ายฝ้ายย้อมสีที่พันรอบแผ่นกระดาษแข็งและผ้ามาตรฐานที่ถูกปิดครึ่งหนึ่งด้วยกระดาษ ฉายแสงจนสีผ้ามาตรฐานส่วนที่ถูกแสงเปลี่ยนไปถึงระดับที่กำหนดในมาตรฐาน จากนั้นประเมินค่า dE^* ของการเปลี่ยนสี

2.4.4 การทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถู

ทดสอบตามมาตรฐาน AATCC Test Method 8, 2010 Colorfastness to Crocking: Crockmeter Method [7] โดยใช้เครื่องทดสอบ Rotary vertical crockmeter การทดสอบนี้เป็นการทดสอบระดับของสีที่หลุดลอกออกจากผิววัสดุสิ่งทอที่ผ่านการย้อมหรือพิมพ์ไปยังวัสดุสิ่งทอชิ้นอื่น เมื่อเกิดการขัดถู ทำการขัดถูไปกลับ 1 รอบ ใน 1 วินาที จำนวน 10 รอบ ตามที่มาตรฐานกำหนด แล้วประเมินค่า dE^* ของการเปลี่ยนสีของชิ้นตัวอย่าง และ dE^* ของการเปื้อนสีของผ้าขัดทำการทดสอบทั้งในสภาพแห้งและเปียก

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของค่าสี $L^*a^*b^*$ และ h^* ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (the total color deference; dE^*) หลังการซัก หลังการอบแสง และหลังการขัดถู วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Two –Way-Analysis of Variance และตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Least Significant Difference [8] ใช้แผนการทดลองแบบ Factorial Experiment Design โดยศึกษา 2 ปัจจัย ดังนี้

1. ปัจจัย A ปริมาณโคลน มี 3 ระดับคือ 100 กรัม 200 กรัม และ 300 กรัม
2. ปัจจัย B วิธีการเตรียมน้ำโคลนมี 2 ระดับ ผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงแล้วย้อม และผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที ทำการทดลอง 4 ซ้ำ

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1.ค่าสี

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า ค่า L^* ซึ่งเป็นค่าแสดงความมืดความสว่างของสี พบว่ามีค่าสูงเล็กน้อย แสดงว่า การย้อมด้วยโคลนให้สีที่มีความสว่างปานกลาง (สีไม่เข้มมาก) การย้อมด้วยโคลน 200 กรัมต่อลิตร โดยผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที ให้สีที่มีความสว่างสูงสุดหรือมีสีอ่อนสุด (69.94) ส่วน

การย้อมด้วยโคลน 300 กรัมต่อลิตร โดยผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที ให้สีที่มีความสว่างต่ำสุดหรือมีสีเข้มที่สุด (65.16) ค่า L^* ที่ได้จากวิธีต่างๆ ไม่แตกต่างกันมาก ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า ปริมาณโคลน วิธีเตรียม และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลนและวิธีเตรียมไม่มีผลต่อค่า L^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ทุกวิธีให้สีที่มีค่า L^* ไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ย L^* a^* b^* C^* และ h^* ของผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่น

วิธีเตรียม	ปริมาณโคลน	L^*	a^*	b^*	C^*	h^*
ผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง	100	69.36	6.09	16.02	17.14	69.20
	200	67.94	6.18	16.51	17.63	69.49
	300	68.68	6.22	12.24	17.60	69.33
ผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที	100	66.83	6.44	16.73	17.93	68.97
	200	69.94	6.12	16.56	17.67	69.77
	300	65.16	6.65	16.64	17.93	68.22

ค่า a^* หมายถึงความเป็นสีแดง - สีเขียว พบว่า สีของผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนทุกปริมาณและทุกวิธีเตรียม มีค่า a^* เป็นบวก แสดงว่าสีของผ้าฝ้ายที่ย้อมโคลนมีความเป็นสีแดง การใช้ปริมาณโคลน 300 กรัมต่อลิตรโดยผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันทีให้สีที่มีค่า a^* สูงสุด (6.65) และการใช้ปริมาณโคลน 100 กรัมต่อลิตรโดยผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนย้อมให้สีที่มีค่า a^* ต่ำสุด (6.09) ค่า a^* ที่ได้จากวิธีต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า ปริมาณโคลน วิธีเตรียมและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลนและวิธีเตรียมไม่มีผลต่อค่า a^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ทุกวิธีให้สีที่มีค่า a^* ไม่แตกต่างกัน

ค่า b^* หมายถึง ความเป็นสีเหลือง - สีนํ้าเงิน พบว่าผ้าฝ้ายที่ย้อมโคลน ทุกวิธีมีค่า b^* เป็นบวก แสดงว่าสีของผ้าฝ้ายที่ย้อมโคลนมีความเป็นสีเหลือง

การใช้โคลน 100 กรัมต่อลิตรโดยละลายโคลนแล้วย้อมทันทีให้สีที่มีค่า b^* สูงสุด (16.73) และ การใช้โคลน 300 กรัมต่อลิตร โดยผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนย้อมให้สีที่มีค่า b^* ต่ำสุด (12.24) ค่า b^* ที่ได้จากวิธีต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปริมาณโคลน วิธีเตรียมและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลนและวิธีเตรียม ไม่มีผลต่อ ค่า b^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ทุกวิธีให้สีที่มีค่า b^* ไม่แตกต่างกัน

ค่า C^* ซึ่งเป็นค่าความสดใของสี พบว่าสีผ้าฝ้ายที่ย้อมโคลนทุกปริมาณและทุกวิธีเตรียม มีค่า C^* ค่อนข้างสูง 17.14-17.93 แสดงว่ามีความสดใส ซึ่งสอดคล้องกับ [2] ที่กล่าวว่า แมกนีเซียมช่วยให้สีสดใส การใช้โคลน 100 และ 300 กรัมต่อลิตร โดยผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที ให้สีที่มีค่า C^* สูงสุด (17.93) และ

การใช้โคลน 100 กรัมต่อลิตรโดยผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนย้อมให้สีที่มีค่า C^* ต่ำสุด (17.14) ค่า C^* ที่ได้จากวิธีต่างๆมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าปริมาณโคลน วิธีเตรียมและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลนและวิธีเตรียมไม่มีผลต่อค่า C^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ทุกวิธีให้สีที่มีค่า C^* ไม่แตกต่างกัน

ค่า h^* หรือค่า Hue angle เป็นค่าที่ระบุตำแหน่งสี พบว่า สีดำฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลน มีค่า h^* อยู่ระหว่าง 68.22-69.77 องศา แสดงว่าเป็นสีส้มเหลือง ซึ่งสอดคล้องกับค่า a^* และ b^* ที่ได้ การใช้โคลน 200 กรัมต่อลิตรโดยผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที ให้สีที่มีค่า h^* สูงสุด (69.77) และการใช้โคลน 300 กรัมต่อลิตรโดยผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที ให้สีที่มีค่า h^* ต่ำสุด (68.22) ค่า h^* ที่ได้จากวิธีต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ปริมาณโคลนวิธีเตรียมและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลนและวิธีเตรียม ไม่มีผลต่อค่า h^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ทุกวิธีให้สีที่มีค่า h^* ไม่แตกต่างกัน

การที่ไม่มีปัจจัยการทดลองใดมีผลต่อ ค่า L^* a^*

b^* C^* และ h^* อาจเป็นเพราะปริมาณโคลนและวิธีเตรียมน้ำโคลนสำหรับย้อมที่ใช้ในการทดลองมีความแตกต่างกันไม่มาก จึงให้สีที่ไม่แตกต่างกัน

3.2 ความคงทนของสีต่อการซัก

จากตารางที่ 2 ซึ่งแสดงค่า dE^* ของการเปลี่ยนสีและ dE^* ของการเปื้อนสี (การเปลี่ยนสีของผ้าทดสอบซัก) ที่ใช้พิจารณาระดับความคงทนของสีต่อการซัก พบว่าค่า dE^* ของการเปลี่ยนสีมีค่าค่อนข้างสูง สีดำฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลน 300 กรัมต่อลิตรโดยผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที มีค่า dE^* สูงสุด (9.01) มีความคงทนที่เกรด 2 (ต่ำ) และ สีดำฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลน 300 กรัมต่อลิตร โดยผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนย้อมมีค่า dE^* ต่ำสุด (4.01) มีความคงทนที่เกรด 3 (ปานกลาง) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ปริมาณโคลน วิธีเตรียม และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลนและวิธีเตรียมไม่มีผลต่อค่า dE^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 แสดงว่าการย้อมทุกวิธีให้สีที่มีความคงทนต่อการซักที่พิจารณาจากการเปลี่ยนสีไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ย dE^* ของการเปลี่ยนสี และ dE^* ของการเปื้อนสีหลังการซักของด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่น

วิธีเตรียม	ปริมาณโคลน	dE^* การเปลี่ยนสี	ระดับความคงทน	dE^* การเปื้อนสี	ระดับความคงทน
ผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง	100	4.53	2-3	3.68	4-5
	200	4.40	3	3.51	4-5
	300	4.01	3	3.31	4-5
ผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที	100	6.46	2-3	4.05	4-5
	200	4.27	3	3.68	4-5
	300	9.01	2	3.88	4-5

ค่า dE^* ของการเปื้อนสีซึ่งเป็นค่าแสดงการเปลี่ยนสีโดยรวมของผ้าทดสอบการเปื้อนสี พบว่ามีค่าไม่สูงมาก แสดงว่าการใช้ปริมาณโคลน และวิธีเตรียมตามที่

กำหนด สามารถป้องกันการตกของสีจากการซักได้ค่อนข้างดี สี ความคงทนที่เกรด 4-5 (ดี – ดีมาก) และสีด้ายฝ้ายที่ย้อมโคลน 300 กรัมต่อลิตรโดยผสมโคลนและ

น้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนย้อมทำให้ผ้าทดสอบการเปลี่ยนสี มีค่า dE^* ต่ำสุด (3.31) มีความคงทนที่เกรด 4-5 (ดี – ดีมาก) เช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับ [2] ที่กล่าวว่า แมกนีเซียมมีส่วนช่วยทำให้สีมีความคงทนต่อการซัก ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปริมาณโคลน วิธีเตรียมและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลนและวิธีเตรียมไม่มีผลต่อค่า dE^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ทุกวิธีให้สีที่มีความคงทนต่อการซักที่พิจารณาจากการเปลี่ยนสีไม่ต่างกัน

3.3 ความคงทนของสีต่อแสง

จากตารางที่ 3 ซึ่งแสดงค่า dE^* (การเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม) พบว่า มีค่าค่อนข้างต่ำ แสดงว่าหลังการอาบแสง สีด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลน

เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย จึงสรุปได้ว่าการใช้ปริมาณโคลน และวิธีเตรียมตามที่กำหนด ให้สีที่มีความคงทนต่อแสงดี สีด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลน 100 กรัมต่อลิตรโดยผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที มีค่า dE^* สูงสุด (1.04) มีความคงทนที่เกรด 4-5 (ดี – ดีมาก) และสีด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลน 300 กรัมต่อลิตรโดยผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนย้อมมีค่า dE^* ต่ำสุด (0.50) มีความคงทนที่เกรด 5 (ดีมาก) ซึ่งสอดคล้องกับ [2] ที่กล่าวว่า แมกนีเซียมมีส่วนช่วยทำให้สีมีความคงทนต่อแสง ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปริมาณโคลน วิธีเตรียมและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลนและวิธีเตรียมไม่มีผลต่อค่า dE^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ทุกวิธีให้สีที่มีความคงทนต่อแสงไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ย dE^* หลังการอาบแสงของด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่น

วิธีเตรียม	ปริมาณโคลน	dE^* การเปลี่ยนสี	ระดับความคงทน
ผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง	100	0.73	5
	200	0.98	4-5
	300	0.50	5
ผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที	100	1.04	4-5
	200	0.58	5
	300	0.72	5

3.4 ความคงทนของสีต่อการขัดถู

3.4.1 ความคงทนต่อการขัดถูแห้ง

จากตารางที่ 4 ค่า dE^* การเปลี่ยนสีซึ่งเป็นค่าแสดงการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมของด้ายฝ้ายย้อมโคลน พบว่า มีค่าค่อนข้างต่ำ แสดงว่าหลังการขัดถูแห้ง สีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย จึงสรุปได้ว่าการใช้ปริมาณโคลน และวิธีเตรียมตามที่กำหนด ให้สีที่มีความคงทนต่อการขัดถูแห้งดี สีด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลน 300 กรัมต่อลิตรโดยผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนย้อม มีค่า dE^* สูงสุด (1.49) มีความคงทนที่เกรด 4-5 (ดี – ดีมาก) และ

สีด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลน 100 กรัมต่อลิตรโดยผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที มีค่า dE^* ต่ำสุด (0.56) มีความคงทนที่เกรด 5 (ดีมาก) ซึ่งสอดคล้องกับ [2] ที่กล่าวว่า แมกนีเซียมมีส่วนช่วยทำให้สีมีความคงทนต่อการขัดถู ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปริมาณโคลน วิธีเตรียมและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลน และวิธีเตรียม ไม่มีผลต่อค่า dE^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ทุกวิธีให้สีที่มีความคงทนต่อการขัดถูแห้งที่พิจารณาจากการเปลี่ยนสีไม่แตกต่างกัน

ค่า dE^* ของการเปลี่ยนสีซึ่งเป็นค่าแสดงการเปลี่ยนสีโดยรวมของผ้าชุด หลังการขัดถูแห้งกับสีด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่น พบว่า มีค่าค่อนข้างสูง ค่าที่ได้อยู่ระหว่าง 7.26-10.06 แสดงว่าการใช้ปริมาณโคลน และวิธีเตรียมตามที่กำหนด ให้สีที่ทนต่อการหลุดของสีเนื่องจากการขัดถูแห้งปานกลาง สีด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลน 300 กรัมต่อลิตร โดยผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันทีทำให้ผ้าชุด มีค่า dE^* สูงสุด (10.06) มีความคงทนที่เกรด 3 (ปานกลาง) และสีด้าย

ฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลน 100 กรัมต่อลิตรโดยผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนย้อมทำให้ผ้าชุด มีค่า dE^* ต่ำสุด (7.26) มีความคงทนที่เกรด 3-4 (ปานกลาง-ดี) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปริมาณโคลน วิธีเตรียม และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลนและวิธีเตรียม ไม่มีผลต่อค่า dE^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ทุกวิธีให้สีที่มีความคงทนต่อการขัดถูแห้งที่พิจารณาจากการเปลี่ยนสีไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ย dE^* ของการเปลี่ยนสี และ dE^* ของการเปลี่ยนสีหลังการขัดถูแห้งของด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่น

วิธีเตรียม	ปริมาณโคลน	dE^* การเปลี่ยนสี	ระดับความคงทน	dE^* การเปลี่ยนสี	ระดับความคงทน
ผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง	100	0.82	5	7.26	3-4
	200	0.65	5	7.99	3-4
	300	1.49	4-5	8.01	3-4
ผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที	100	0.56	5	9.61	3
	200	0.84	4-5	9.05	3
	300	0.77	5	10.06	3

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ย dE^* ของการเปลี่ยนสี และ dE^* ของการเปลี่ยนสีหลังการขัดถูเปียกของด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่น

วิธีเตรียม	ปริมาณโคลน	dE^* การเปลี่ยนสี	ระดับความคงทน	dE^* การเปลี่ยนสี	ระดับความคงทน
ผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง	100	1.01	4-5	10.39	3
	200	0.73	5	9.66	3
	300	1.00	4-5	8.23	3-4
ผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที	100	1.39	4-5	10.54	3
	200	1.58	4-5	9.45	3
	300	0.65	5	11.59	3

3.4.2 ความคงทนต่อการขัดถูเปียก

จากตารางที่ 5 ค่า dE^* ของการเปลี่ยนสีซึ่งเป็นค่าแสดงการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมของด้ายฝ้ายย้อมโคลน พบว่ามีค่าค่อนข้างต่ำแสดงว่าหลังการขัดถูเปียก

สีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ค่า dE^* ที่ได้อยู่ระหว่าง 0.65-1.58 แสดงว่าการใช้ปริมาณโคลน และวิธีเตรียมตามที่กำหนด สามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงของสีเนื่องจากการขัดถูเปียก สีด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลน 200 กรัมต่อ

ลิตร โดยผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที มีค่า dE^* สูงสุด (1.58) มีความคงทนที่เกรด 4 -5 (ดี – ดีมาก) และสีด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลน 300 กรัมต่อลิตรโดยผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที มีค่า dE^* ต่ำสุด (0.65) มีความคงทนที่เกรด 5 (ดีมาก) ซึ่งสอดคล้องกับ [2] ที่กล่าวว่า แมกนีเซียมมีส่วนช่วยให้สีมีความคงทนต่อการซัก ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปริมาณโคลน วิธีเตรียม และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลน และวิธีเตรียม ไม่มีผลต่อค่า dE^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ทุกวิธีให้สีที่มีความคงทนต่อการซักเปียกที่พิจารณาจากการเปลี่ยนสีไม่แตกต่างกัน

ค่า dE^* ของการเปลี่ยนสีซึ่งเป็นค่าแสดงการเปลี่ยนสีโดยรวมของผ้าขัดหลังการซักเปียก พบว่า มีค่าค่อนข้างสูง แสดงว่าหลังการซักเปียก สีผ้าขัดเปลี่ยนแปลงไปมาก ค่า dE^* ที่ได้อยู่ระหว่าง 8.23-11.59 จึงสรุปได้ว่าการใช้ปริมาณโคลน และวิธีเตรียมตามที่กำหนด ให้สีที่ไม่ค่อยทนต่อการหลุดของสีเมื่อถูกซักเปียก สีด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลน 300 กรัมต่อลิตรโดยผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที ทำให้ผ้าขัดมีค่า dE^* สูงสุด (11.59) มีความคงทนที่เกรด 3 (ปานกลาง) และสีด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลน 300 กรัมต่อลิตรวิธีผสมโคลนและน้ำทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนย้อมทำให้ผ้าขัด มีค่า dE^* ต่ำสุด (8.23) มีค่าความคงทนที่เกรด 3 -4 (ปานกลาง-ดี) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปริมาณโคลน วิธีเตรียม และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลนและวิธีเตรียม ไม่มีผลต่อค่า dE^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ทุกวิธีให้สีที่มีความคงทนต่อการซักเปียกที่พิจารณาจากการเปลี่ยนสีของผ้าขัดไม่แตกต่างกัน

4. สรุป

4.1 คำสี

ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย $L^* a^* b^* C^*$ และ h^* ของสีด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่น พบว่าปริมาณโคลนวิธีเตรียม และปฏิสัมพันธ์ระหว่าง

ปริมาณโคลนและวิธีเตรียมไม่มีผลต่อค่า $L^* a^* b^* C^*$ และ h^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 แสดงว่าทุกวิธีให้สีไม่แตกต่างกัน

4.2 ความคงทนของสีต่อการซัก

เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของสีพบว่า ด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่น มีความคงทนของสีต่อการซักอยู่ที่เกรด 2 (ต่ำ) ถึงเกรด 3 (ปานกลาง) และทุกวิธีให้ค่าความคงทนของสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05

เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนสีของผ้าทดสอบ หลังการซักพบว่าด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่นทุกวิธีมีความคงทนต่อการซัก อยู่ที่เกรด 4-5 (ดี-ดีมาก) และทุกวิธีให้ค่าความคงทนของสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05

4.3 ความคงทนของสีต่อแสง

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย dE^* ของการเปลี่ยนสีหลังการอบแสง พบว่าของสีด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่นมีระดับความคงทนของสีอยู่ที่เกรด 4-5 (ดี – ดีมาก) และทุกวิธีให้ค่าความคงทนของสีต่อแสงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05

4.4 ความคงทนของสีต่อการขัดถู

4.4.1 การขัดถูแห้ง

เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของสี พบว่า ด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่นมีความคงทนต่อการขัดถูแห้งอยู่ที่เกรด 4-5 (ดี-ดีมาก) ถึงเกรด 5 (ดีมาก) และทุกวิธีให้ค่าความคงทนของสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05

เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนสีของผ้าขัด พบว่า ด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจังหวัดขอนแก่นมีความคงทนต่อการขัดถูแห้งอยู่ที่เกรด 3 (ปานกลาง) ถึงเกรด 3-4 (ปานกลาง – ดี) และทุกวิธีให้ค่าความคงทนของสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05

4.4.2 การขัดถูเปียก

เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของสี พบว่า ด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่นมีความคงทนต่อการขัดถูเปียกอยู่ที่เกรด 4-5 (ดี-ดีมาก) ถึงเกรด 5 (ดีมาก) และทุกวิธีให้ความคงทนของสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05

เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนสีของผ้าขัด พบว่า ด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่นมีความคงทนต่อการขัดถูเปียก อยู่ที่เกรด 3 (ปานกลาง) ถึงเกรด 3-4 (ปานกลาง-ดี) และทุกวิธีให้ค่าความคงทนของสีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05

4.5 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย้อม

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย้อมฝ้ายด้วยโคลนจากจังหวัดขอนแก่น คือ การย้อมด้วยโคลน 100 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร โดยผสมโคลนและน้ำแล้วย้อมทันที เพื่อเป็นการประหยัดโคลนและเวลา ย้อม ค่าสีที่ได้และค่าความคงทนของสีไม่แตกต่างจากวิธีอื่น ๆ อาจใช้ปริมาณโคลนที่แตกต่างกันมากกว่านี้ การทดลองนี้ วิธีย้อมที่ทดลองใช้เป็นวิธีย้อมเย็น คือ ย้อมที่อุณหภูมิ 32-35 องศา อาจทดลองวิธีย้อมร้อนเพื่อดูผลต่อค่าสีและความคงทนของสี

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงบประมาณจากมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Suree, "Development of natural dyes in upper North region" ChiangMai University, Chiang Mai, .2000.
- [2] O. Kulya. "Environmental Chemistry", 2nd ed. Ramkhamhaeng University, Bangkok. 2004.pp.471-473
- [3] S. Darika. "Product development Of Natural dyed fabric," Faculty of Accounting and Management. Mahasarakham Universit, 2003.
- [4] P. Turian. "The comparison of Cationic ions in mud and laterite for an Indigo blue mordant on cotton fiber". Master's thesis. Sakon Nakorn Rajabhat University, 2008.pp 103.
- [5] M. Thiansak. "Chemistry of Natural dyes and dyes". Science Journal 50. Thammasat University. Bangkok, 1996. pp.155-161.
- [6] S. Atcharaporn. "Guide to Dyeing". 2nd edition. Technique 19 Printing, Bangkok, 1984. 352P. pp. 65-69.
- [7] AATCC. 2010. AATCC Technical Manual, American Association of Textile Chemists And Colorists, North Carolina, 28, 107,146
- [8] D. Anantachai. Principles of Experimental planning. Department of Statistics, Faculty of Science Kasetsart University. Bangkok, 1997, 348 p.

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

การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานไฟฟ้าร่วมกับแสงอาทิตย์ สำหรับการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้

จันทนา สีลาน้ำเที่ยง¹ เทวรัตน์ ตรีอำนรรค^{1*} กระวี ตรีอำนรรค² และ เกียรติศักดิ์ ใจโต³

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

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

³ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

รับบทความ 14 มิถุนายน 2565 แก้ไขบทความ 26 สิงหาคม 2565 ตอรับบทความ 30 สิงหาคม 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานไฟฟ้าร่วมกับแสงอาทิตย์โดยการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ เครื่องอบแห้งประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบราบรูปตัววีขนาดพื้นที่ 2x1 ตารางเมตร จำนวน 3 ชุด ฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบน้ำมัน 1500 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ห้องอบแห้งขนาด 0.6x0.6x0.6 ลูกบาศก์เมตร ทำการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยร้อยละ 84.44 (มาตรฐานเปียก) ครั้งละ 4 กิโลกรัม ที่สภาวะการอบแห้งคืออุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของอากาศอบแห้ง 0.034 กิโลกรัมต่อวินาที จนเหลือความชื้นสุดท้ายของมะม่วงอบแห้งต่ำกว่าร้อยละ 18 (มาตรฐานเปียก) ประเมินสมรรถนะการอบแห้งจากค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) อัตราการอบแห้ง และประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งจากค่าความชื้น ค่าปริมาณน้ำอิสระ ค่าความต่างของสี และเนื้อสัมผัสซึ่งประกอบด้วยความแข็ง การยืดเกาะ ความยืดหยุ่น และค่าความเคี้ยวได้ ผลของการทดลองพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้ค่าคุณภาพของมะม่วงอบแห้งที่ดีที่สุดโดยมีค่าความแตกต่างสี น้อยที่สุด ค่าเนื้อสัมผัสที่เหมาะสมที่สุด โดยที่ความชื้นและค่าปริมาณน้ำอิสระเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้อบแห้ง โดยมีค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 46.36 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะต่ำที่สุดคือ 12.57 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ร้อยละ 27.15

คำสำคัญ : มะม่วงอบแห้ง; เครื่องอบแห้ง; พลังงานร่วมไฟฟ้าแสงอาทิตย์; ตัวเก็บรังสีอาทิตย์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 4694 2933, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: tawarat@sut.ac.th

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

Performance Evaluation of Electrical-solar Combined Energy Dryer for Nam Dok Mai Mango Drying

Jantana Seelanamtiang¹ Tawarat Treeamnu^{1*} Krawee Treeamnu² and Kaattisak Jaito³

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

²School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

³Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Krungthep

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

³ 2 Nanglinchee Road, Thungmahamek, Sathorn, Bangkok 10120

Received 14 June 2022; Revised 26 August 2022; Accepted 30 August 2022

Abstract

The objective of this research was to evaluate performance of a solar-electrical combined energy dryer by drying Nam Dok Mai mango. The dryer consists of 3 sets of 2x1 m² solar collector, 2 sets of 1500 watts of the finned heater, and a drying chamber size of 0.6x0.6x0.6 m³. Nam Dok Mai mango weight of 4 kg with initial moisture content of 84.44% (wet basis) was dried with drying air temperature of 60, 70, and 80°C and drying air flow rate of 0.034 kg/s until the final moisture content was less than 18% (wet basis). The performance of drying was evaluated by efficiency of solar collector, Specific electrical energy consumption (SEEC) and drying rate. The quality was evaluated by moisture content, color difference, and texture profile consists of hardness, cohesiveness, springiness, and chewiness. The result shown that, drying with temperature of 60°C has the best qualities of dried product with the lowest color difference, optimum texture, with moisture and water activity are up to the industry standard of dried fruit. The solar collector set has highest efficiency of 46.36%, the lowest of the specific electrical energy consumption of 12.57 MJ/kg, which can be save electrical energy of 27.15%

Keywords: Dried Mango; Dryer; Electrical-solar Combined Energy; Solar Collector

** Corresponding Author. Tel.: +668 4694 2933, E-mail Address: tawarat@sut.ac.th*

1. บทนำ

ในปัจจุบันการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานได้รับความสนใจมากขึ้นเนื่องจากราคาเชื้อเพลิงฟอสซิลที่สูงขึ้น ความกังวลด้านสิ่งแวดล้อม และคาดว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมีจำนวนลดลงอย่างรวดเร็ว การส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนทดแทนพลังงานฟอสซิลมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพื่อลดปัญหาด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อมและต้นทุนการผลิต [1] พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือกหนึ่ง จากรายงานของ R.H.B.Exell [2] ประเทศไทยมีความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 18.2 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งปัจจุบันการผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในการทำน้ำร้อนหรือการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นการขจัดความชื้นออกจากวัสดุ ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของอาหารและผลิตผลทางการเกษตรเพื่อลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวและลดต้นทุนการขนส่ง [3] การอบแห้งสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งวิธีที่ทำได้ง่ายคือการตากแห้ง ซึ่งวิธีการตากแห้งแบบดั้งเดิมใช้เวลาค่อนข้างนาน มีข้อเสียหลายประการ เช่น การเน่าเสียของผลิตภัณฑ์เนื่องจากสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวยมีฝน ลม ความชื้นและฝุ่นละอองจำนวนมาก การสูญเสียจากนก แมลงและสัตว์ฟันแทะมารบกวน และการเจริญเติบโตของเชื้อรา อีกทั้งต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ [4] เพื่อเอาชนะข้อจำกัดนี้จึงได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งทางกลทำให้ลดการสูญเสียพืชผลและสามารถลดความชื้นถึงระดับที่เก็บรักษาได้อย่างปลอดภัยโดยใช้เชื้อเพลิงทั่วไป เช่น เชื้อเพลิงฟอสซิล ไฟฟ้า น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ชีวมวล และพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับให้ความร้อนกับอากาศ เครื่องอบแห้งนำเข้ามักจะมีราคาสูง [5], [6] และเนื่องจากความผันผวนของราคาเชื้อเพลิงฟอสซิล ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และการลดลงของเชื้อเพลิง การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกการใช้พลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล [7] ซึ่งเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ยังคงมีข้อจำกัดไม่สามารถอบแห้งเนื้อได้เมื่อมีฝนตกหรือในตอน

กลางคืน จึงได้มีการพัฒนาโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานอื่นๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตปั๊ม [8] ในระบบนี้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำหน้าที่ผลิตความร้อนเป็นแหล่งความร้อนเสริมให้กับอากาศก่อนไปปรับความร้อนจากคอนเดนเซอร์ในระบบฮีตปั๊มอีกครั้ง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี เนื่องจากสามารถควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นได้ โดย C. Tiris et al. [9] ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมหลายชั้นวาง ซึ่งเครื่องอบแห้งประกอบไปด้วยตัวเก็บรังสี ห้องอบแห้ง ชั้นวาง พัดลม และเครื่องทำความร้อนไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งองุ่นด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ใช้ระยะเวลาสั้นกว่าเมื่อเทียบกับการตากแห้ง

T. Yaibok et al. [10] ได้ศึกษาการอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้า โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหลักและพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสริม ประกอบด้วยตู้อบชนิดโปร่งแสง ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ขนาด 4.08 ตารางเมตร ขดลวดไฟฟ้าสำหรับทำความร้อนขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ชุด จากการทดลองอบแห้งปลา 2 ชนิด คือ ปลาช่อนและปลาดุก โดยให้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าการอบแห้งปลาช่อนแบบใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งน้อยที่สุดเท่ากับ 42.57 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย และมีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 5.54 เปอร์เซ็นต์ ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 6 ชั่วโมง ส่วนการอบแห้งปลาดุกด้วยพลังงานความร้อนร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งน้อยที่สุดเท่ากับ 80.02 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย และมีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 2.98% และใช้ระยะเวลาการอบแห้ง 8 ชั่วโมง

นอกจากนี้ปัญหาผลผลิตมะม่วงล้นตลาดในช่วงฤดูการผลิตมีปริมาณเกินความต้องการของผู้บริโภค ทำให้เกิดการสูญเสียทั้งทางเศรษฐกิจและผลิตผลจำนวน

มาก การแปรรูปมะม่วงเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น มะม่วงกระป๋อง น้ำมะม่วง และมะม่วงอบแห้ง เป็นต้น มะม่วงอบแห้งแบบธรรมชาติที่ไม่มีการเพิ่มน้ำตาลและเติมวัตถุเจือปนอาหารเป็นที่สนใจสำหรับผู้ประกอบการขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะลดการใช้พลังงานในการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้า โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานเสริมในการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้และประเมินความสามารถในการอบแห้งของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

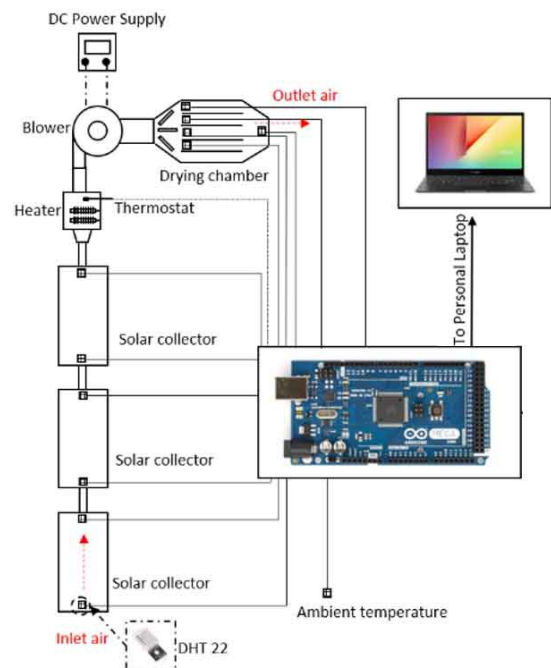
2.1 มะม่วงน้ำดอกไม้

มะม่วงน้ำดอกไม้ในการทดลองมาจากตลาดท้องถิ่นในจังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย ความชื้นเริ่มต้นโดยเฉลี่ยของมะม่วงอยู่ที่ 84.44% (มาตรฐานเปียก) และมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solids content, TSS) 20 องศาบริกซ์ ซึ่งเป็นมะม่วงระยะงอมหรือสุกเกินไป [11]

2.2 เครื่องอบแห้งพลังงานไฟฟ้าร่วมกับแสงอาทิตย์

เครื่องอบแห้งประกอบด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบร่องรูปตัววีชนิด 60 องศา ทำมุมเอียง 14 องศากับแนวระดับ ขนาด 2x1 ตารางเมตร จำนวน 3 ชุด จัดวางแบบอนุกรม โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำจากแผ่นเหล็กหนา 0.5 มิลลิเมตร ทาสีดำและแผ่นปิดด้านหลังเป็นอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตร ภายในติดตั้งฉนวนกันความร้อนหนา 20 มิลลิเมตร มีท่อลมเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บรังสีอาทิตย์และห้องผลิตลมร้อนที่ติดตั้งฮีตเตอร์พร้อมครีบน้ำมัน 1500 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ทางเข้าห้องอบแห้งติดตั้งโบลเวอร์เพื่อระบายความชื้นออกจากห้องอบแห้งและควบคุมอัตราการไหลของอากาศ ห้องอบแห้งขนาด 0.6x0.6x0.6 ลูกบาศก์เมตร

ทำจากเหล็กแผ่นอบสังกะสี และทำการติดตั้งฉนวนกันความร้อนไว้ภายใน มีทั้งหมด 4 ถาด ติดตั้งเซ็นเซอร์ DHT22 ที่ทางเข้าตัวเก็บรังสี 1 จุด ทางออกตัวเก็บรังสี 1 จุด ในห้องอบแห้งบนชั้นถาดละ 1 จุด ทางออกของห้องอบแห้ง 1 จุด และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม 1 จุด และทางออกห้องฮีตเตอร์ 1 จุด ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยอากาศจะไหลเข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เมื่อรังสีอาทิตย์กระทบกับแผงรับแสงจะทำให้อากาศอุ่นขึ้น อากาศถูกดูดมายังห้องผลิตลมร้อน ซึ่งฮีตเตอร์จะทำงานถ้าหากอากาศมีอุณหภูมิไม่ถึงค่าที่กำหนด และโบลเวอร์จะดูดอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้ง



รูปที่ 1 ตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

2.3 ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ทำการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยการเก็บข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าและทางออกของตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์โดยกำหนดให้อัตราการไหลของอากาศที่ผ่านตัวเก็บรังสีมีค่า 0.03 และ 0.09 กิโลกรัมต่อวินาที

ในช่วงเวลา 10.00 – 16.00 น. ซึ่งค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์หาได้จากอัตราส่วนของความร้อนที่อากาศได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต่อปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์รับไว้ ซึ่งค่าความร้อนที่อากาศได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$Q_u = \dot{m} C_a (T_{co} - T_{ci}) \quad (1)$$

โดยที่

Q_u คือ ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (กิโลวัตต์)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)

C_a คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม องศาเซลเซียส)

T_{co} คือ อุณหภูมิของอากาศขาออกจากตัวเก็บรังสี (องศาเซลเซียส)

T_{ci} คือ อุณหภูมิของอากาศขาเข้าตัวเก็บรังสี (องศาเซลเซียส)

ดังนั้นประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c \times I} \quad (2)$$

โดยที่

η_c คือ ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์

A_c คือ พื้นที่รับแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ตารางเมตร)

I คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)

2.4 การทดสอบอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้

การทดสอบอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งโดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 70 และ 80°C อัตราการไหลของอากาศอบแห้งเท่ากับ 0.034 กิโลกรัมต่อวินาที ทำการทดลอง 3 ซ้ำ การทดสอบเริ่มจากนำมะม่วง

น้ำดอกไม้ผลสดไปหาความชื้นเริ่มต้นตามวิธีของ AOAC [12] ค่าความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$M = \frac{w - d}{w} \times 100\% \quad (3)$$

โดยที่

M คือ ความชื้นของมะม่วง (เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานเปียก)

w คือ น้ำหนักของมะม่วงน้ำดอกไม้ (กรัม)

d คือ น้ำหนักแห้งของมะม่วงน้ำดอกไม้ (กรัม)

การทดสอบอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ดำเนินการโดยหั่นมะม่วงเป็นชิ้นซึ่งกำหนดให้ขนาดของมะม่วงเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 3x7x0.5 เซนติเมตร³ นำไปปรับสภาพก่อนการอบแห้งด้วยวิธีการลวกด้วยน้ำร้อน 1 นาที [13] จัดเรียงชิ้นมะม่วงแบบชั้นบางลงในถาดได้ประมาณ 85 ชิ้นต่อถาด คิดเป็นน้ำหนักโดยประมาณ ถาดละ 1 กิโลกรัม ทั้งหมด 4 ถาด นำเข้าห้องอบแห้งระหว่างการทดสอบทำการบันทึก พลังงานแสงอาทิตย์ ความเร็วลม อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ทุกๆ 1 ชั่วโมง และบันทึกน้ำหนักมะม่วงและค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้งทุกๆ 2 ชั่วโมง จนมะม่วงมีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 18 เปอร์เซ็นต์และมีค่า Water Activity ไม่เกิน 0.65 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้อบแห้ง (มอก. 919-2563) [14]

2.5 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Electrical Energy Consumption, SEEC) เป็นอัตราส่วนของค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง ประกอบไปด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับฮีตเตอร์และระบบควบคุม สามารถวัดได้ด้วยมาตรวัดไฟฟ้า (Kilowatt-hour Meter) ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากมะม่วงน้ำดอกไม้ 1 กิโลกรัม [15] โดยไม่คิดค่าพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานที่ได้ฟรีซึ่งค่า SEEC สามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$SEEC = \frac{3.6 \times E}{w_i - w_f} \quad (4)$$

โดยที่

SEEC คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)

E คือ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

w_i คือ น้ำหนักมะม่วงเริ่มต้น (กิโลกรัม)

w_f คือ น้ำหนักมะม่วงหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)

2.6 อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) เป็นความสามารถในการระเหยน้ำออกจากวัสดุโดยดูจากอัตราการระเหยน้ำออกจากมะม่วงน้ำดอกไม้ต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง [16] ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (5)

$$DR = \frac{m_{\text{water}}}{t} \quad (5)$$

โดยที่

DR คือ อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

m_{water} คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (กิโลกรัม)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

2.7 การประเมินคุณภาพมะม่วงอบแห้ง

ผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งที่ได้จากการทดลองถูกนำมาหาค่าปริมาณน้ำอิสระ (water activity, a_w) วัดค่าสี และวัดเนื้อสัมผัส โดยค่า a_w วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Aqualab รุ่น PR การวิเคราะห์ค่าสีใช้เครื่องวิเคราะห์ค่าสี HunterLab รุ่น UltraScan ทำการวัดค่าสีตามระบบสี CIE $L^*a^*b^*$ สามารถบนพื้นผิวของชิ้นมะม่วง โดยที่ L^* หมายถึงค่าความสว่าง (Lightness), a^* หมายถึงค่าความเป็นสีแดงและสีเขียว และ b^* หมายถึงค่าความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน ทำการหาความแตกต่างของสีชิ้นมะม่วงอบแห้งจากการทดลองเทียบกับชิ้นมะม่วงผล

สด (Total color difference, ΔE) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (6)

$$\Delta E = \sqrt{(L^*_0 - L^*)^2 + (a^*_0 - a^*)^2 + (b^*_0 - b^*)^2} \quad (6)$$

โดยที่

L^*_0, a^*_0, b^*_0 คือ ค่าพารามิเตอร์สีของมะม่วงผลสด

L^*, a^*, b^* คือ ค่าพารามิเตอร์สีของมะม่วงอบแห้ง

การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของมะม่วงอบแห้งแบบ Texture Profile Analysis (TPA) ได้แก่ Hardness, Cohesiveness, Springiness และ Chewiness ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA.XT Plus C, Texture Technologies Corp. and Stable Micro Systems, Ltd., Hamilton, MA, USA) ใช้หัวกดแบบแบนทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร โดยกดตัวอย่างลง 70% ของความสูงด้วยความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกดระหว่างและหลังทดสอบ คือ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที

2.8 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

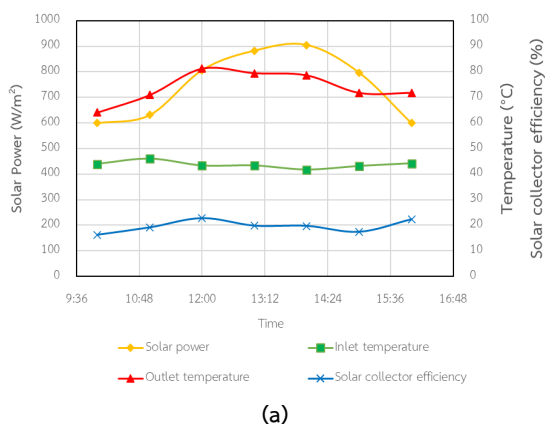
ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติของการอบแห้งต่อค่าคุณภาพของมะม่วงอบแห้ง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) และเปรียบเทียบพหุคูณของค่าเฉลี่ย (Multiple comparison test) ด้วยวิธี Duncan ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3. ผลการศึกษา

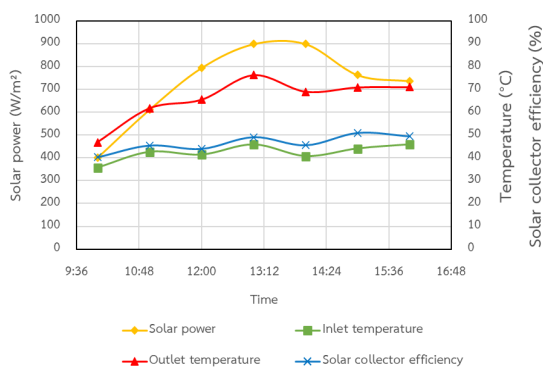
3.1 ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ผลการประเมินประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์พบว่าค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการไหลของอากาศโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 19.59 เมื่ออัตราการไหลอากาศเท่ากับ

0.03 กิโลกรัมต่อวินาที ค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ย 745.90 วัตต์ต่อตารางเมตร และ 46.36 เปอร์เซ็นต์ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.09 กิโลกรัมต่อวินาที ค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ย 728.57 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยค่าประสิทธิภาพจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไปดังแสดงในรูปที่ 2 นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราการไหล 0.03 กิโลกรัมต่อวินาที มีค่าอุณหภูมิอากาศขาออกเฉลี่ยคือ 73.99 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าที่อัตราการไหล 0.09 กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 65.89 องศาเซลเซียส



(a)



(b)

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความเข้มรังสีอาทิตย์ (Solar power) อุณหภูมิอากาศขาเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์กับ

ช่วงเวลาในการทดสอบ (a) อัตราการไหลอากาศ

0.03 กิโลกรัมต่อวินาที (b) อัตราการไหลอากาศ

0.09 กิโลกรัมต่อวินาที

3.2 ผลการประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

3.2.1 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ

การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาช่วยในการอุ่นอากาศก่อนเข้าฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อเพิ่มให้อุณหภูมิอากาศมีค่าสูงขึ้นตามที่ต้องการนั้นเป็นการช่วยลดค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบการอบแห้งลงได้ ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการอบแห้งส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นต้องการพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับฮีตเตอร์สูงขึ้น ซึ่งค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะเฉลี่ยของการอบแห้งมะม่วงที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส คือ 12.57 13.69 และ 14.83 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหยตามลำดับ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้มีแนวโน้มสิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น [17] ถึงแม้ว่าจะใช้เวลาในการอบแห้งที่น้อยกว่า เมื่อพิจารณาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะเทียบกับรายงานของ W. Sriariyakul [18] ซึ่งทำการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับลมร้อนพบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยสุด 68.84 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหยที่สภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิอินฟราเรด 70 องศาเซลเซียส เมื่อทำการทดสอบเปิดฮีตเตอร์ไฟฟ้าจนได้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน การผลิตลมร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าสามารถลดการใช้พลังงานจากไฟฟ้าได้ 4.68 6.66 และ 5.11 กิโลวัตต์ชั่วโมง หรือคิดเป็น 27.15 32.73 และ 25.63 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นการใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์อุ่นอากาศขึ้นต้นช่วยลดภาระของฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำให้ประหยัดพลังงาน [19] ส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลงได้

3.2.2 อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้แสดงในตารางที่ 1 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น

จาก 0.112 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส เป็น 0.153 กิโลกรัมต่อชั่วโมงที่ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส ซึ่งการ

เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องเกิดการถ่ายเทมวลได้มากขึ้น ทำให้ใช้เวลาในการ อบแห้งลดลง [20]

ตารางที่ 1 ค่าความชื้นสุดท้าย ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEEC) และอัตราการอบแห้ง (DR) ของการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ

อุณหภูมิอบแห้ง	ความชื้นสุดท้าย (%)	a_w	SEEC (MJ/kg)	DR (kg/h)
60 °C	14.65±2.19 ^a	0.59±0.06 ^a	12.57±0.98 ^b	0.122±0.017 ^b
70 °C	13.67±2.27 ^a	0.58±0.07 ^a	13.69±0.35 ^{ab}	0.145±0.025 ^{ab}
80 °C	14.58±2.49 ^a	0.54±0.04 ^a	14.83±0.23 ^a	0.153±0.006 ^a

หมายเหตุ อักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

3.2.3 ความชื้นสุดท้ายและ ค่าปริมาณน้ำอิสระ

ปริมาณความชื้นและค่าปริมาณน้ำอิสระของ มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยลมร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทาง

สถิติ ($p > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 1 มะม่วงอบแห้งมีความชื้นต่ำกว่า 18% (มาตรฐานเปียก) และมีค่า Water Activity ไม่เกิน 0.65 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้อบแห้ง [14]

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์สี่ และค่าความเปลี่ยนแปลงสี่ของมะม่วงน้ำดอกไม้

มะม่วงน้ำดอกไม้	L^*	a^*	b^*	ΔE
มะม่วงสด	63.09±2.57 ^a	13.84±1.64 ^b	61.08±3.28 ^a	-
อบแห้งอุณหภูมิ 60 °C	59.91±4.63 ^a	17.08±1.38 ^a	56.35±4.60 ^{ab}	9.32±3.38 ^a
อบแห้งอุณหภูมิ 70 °C	54.45±4.15 ^b	17.17±2.09 ^a	50.66±5.04 ^{bc}	11.45±5.70 ^a
อบแห้งอุณหภูมิ 80 °C	54.08±7.11 ^b	16.01±5.21 ^{ab}	48.6±5.20 ^c	15.36±5.28 ^a

หมายเหตุ อักษรที่ต่างกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

3.2.4 คุณภาพสีของผลิตภัณฑ์

จากการนำมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยลมร้อน พลังงานไฟฟ้าร่วมกับแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส มาทำการตรวจสอบคุณภาพด้านสี พบว่าค่าสี L^* ของมะม่วงน้ำดอกไม้ผลสดและอบแห้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังแสดงใน ตาราง 2 โดยค่าสี L^* ลดลงจากผลสด และการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่า L^* น้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

ส่วนค่าสี a^* ของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยลมร้อน พลังงานไฟฟ้าร่วมกับแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าค่าสี a^* ของมะม่วงผลสดและอบแห้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยค่าสี a^* เพิ่มขึ้นจากผลสดแสดงถึงการเกิดสีน้ำตาลของมะม่วงหลังผ่านการอบแห้ง [21] การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่า a^* น้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และค่าสี b^* ของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยลมร้อน

พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าค่า b^* ของมะม่วง น้ำดอกไม้ผลสดและอบแห้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยค่า b^* ลดลงจากผลสด และการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่า b^* น้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อทำจากการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างสี มะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งเทียบกับผลสด พบว่าทุกระดับอุณหภูมิให้ค่าความแตกต่างสีที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.2.5 เนื้อสัมผัสของมะม่วงอบแห้ง

จากการวิเคราะห์ค่า Hardness ของมะม่วง น้ำดอกไม้อบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อความแข็งของมะม่วงอบแห้งที่ได้ ($p \leq 0.05$) โดยค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้นดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อน [18] ซึ่งเป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลงจึงทำให้เกิดการหดตัวของมะม่วงลดลง ในส่วนของค่ายึดเกาะ (Cohesiveness) ของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งด้วยลมร้อนพลังงานไฟฟ้า

ร่วมกับแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมะม่วงอบแห้งที่มีค่ายึดเกาะน้อยที่สุดจะมีค่ายึดเกาะของเนื้ออาหารภายในหรือความเหนียวน้อยที่สุดเท่ากับ 0.11 คือ มะม่วงอบแห้งด้วยลมร้อนพลังงานไฟฟ้าร่วมกับแสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ส่วนค่าความยืดหยุ่น (Springiness) บ่งบอกถึงความยืดหยุ่นของเนื้อมะม่วงยังมีค่ามากยังมีความยืดหยุ่นมากจากการวิเคราะห์พบว่าอุณหภูมิส่งผลต่อค่าความยืดหยุ่นของมะม่วงอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมะม่วงอบแห้งที่มีค่าความยืดหยุ่นมากที่สุดเท่ากับ 0.11 คือ มะม่วงอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าความยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ผิวของมะม่วงมีการแข็งตัวจากการจับตัวของน้ำตาลในเนื้อมะม่วงทำให้เกิดการหดตัวได้น้อยลง และค่าความเคี้ยวได้ (Chewiness) เป็นค่าพลังงานใช้ในการบดอาหารที่มีสถานะของแข็งใช้ในการพิจารณาถึงความรู้สึกในช่องปากของผู้บริโภค จากการวิเคราะห์พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยมะม่วงอบแห้งที่มีค่า Chewiness น้อยที่สุดเท่ากับ 1.24 นิวตัน คือมะม่วงอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3 เนื้อสัมผัสมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้งที่ได้จากอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิอบแห้ง	Hardness (N)	Cohesiveness	Springiness	Chewiness (N)
60 °C	14.81±4.28 ^a	0.11±0.03 ^a	0.11±0.05 ^a	1.24±0.86 ^a
70 °C	12.93±4.28 ^{ab}	0.13±0.03 ^a	0.10±0.03 ^a	1.44±0.73 ^a
80 °C	9.48±3.83 ^b	0.12±0.05 ^a	0.07±0.05 ^b	1.73±1.15 ^a

หมายเหตุ อักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

จากการวิเคราะห์ เนื้อสัมผัสของมะม่วง น้ำดอกไม้อบแห้ง พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่า Springiness มากที่สุด และค่า Chewiness น้อยที่สุด รวมถึงค่า L^* และ ค่า b^* มาก

ที่สุด อีกทั้งให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด จึงเป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับลมร้อนที่ทำการ

ทดสอบโดย W. Sriariyakul [18] พบว่าสามารถลดพลังงานที่ใช้ในการระเหยนํ้าออกจากมะม่วงนํ้าดอกไม้ได้ และการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสนี้สามารถประยุกต์ใช้กับการอบแห้งมะม่วงชนิดอื่นและผลไม้อื่นได้เนื่องจากอุณหภูมิไม่สูงเกินไป โดยเฉพาะผลไม้ที่มีนํ้าตาลสูงเช่น ลำไย ลิ้นจี่ เป็นต้น

เมื่อพิจารณาด้านพลังงานพบว่าพลังงานแสงอาทิตย์มีศักยภาพในการนำมาเป็นแหล่งความร้อนเสริมให้การอบแห้งด้วยลมร้อนเพื่อลดการใช้พลังงานหลักจากไฟฟ้าหรือเชื้อเพลิงแก๊สได้ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสาครและคณะ [22] ที่พบว่าอากาศร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สมีค่าใช้จ่ายในการอบแห้งเพอร์นิเจอร์ไม้เคลือบสี 2.41 บาทต่อกิโลกรัมนํ้าระเหย ขณะที่ใช้อากาศร้อนจากห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สอย่างเดียวมีค่าใช้จ่ายในการอบแห้งสูงถึง 7.90 บาทต่อกิโลกรัมนํ้าระเหย

5. สรุป

จากการทดลองเพื่อประเมินสมรรถนะการอบแห้งมะม่วงนํ้าดอกไม้ด้วยลมร้อนจากพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าการอบแห้งด้วยอากาศอบแห้งอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นสถานะที่เหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะน้อยที่สุดคือ 12.56 เมกะจูลต่อกิโลกรัมค่าสี L^* และ b^* มากที่สุด ค่า Springiness มากที่สุดค่า Cohesiveness และค่า Chewiness น้อยที่สุด ค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุดร้อยละ 46.36 ช่วยลดใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ร้อยละ 27.15

4. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนวิจัยและสถานที่ในการทำวิจัย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Fudholi, K. Sopian, M.H. Ruslan, M.A. Alghoul and M.Y. Sulaiman, "Review of solar dryers for agricultural and marine products," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.14, pp. 1-30, 2010.
- [2] R.H.B. Exell, "The Fluctuation of Solar Radiation of Thailand," *Solar Energy*, Vol. 18, pp 549 – 554, 1976.
- [3] I. Dincer, "Moisture loss from wood products during drying-Part I: moisture diffusivities and moisture transfer coefficients," *Energy Sources*, vol.20, pp 67-75, 1998.
- [4] A.G.M.B. Mustayen, S. Mekhilef and R. Saidur, "Performance study of different solar dryers: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.34, pp 463–470, 2014.
- [5] M.S. Sodha, N.K. Bansal, K. Kumar, P.K. Bansal and M.A.S. Malik, "Solar crop drying, vol.1," Florida, USA, C. R. C. Press, Palm Beach, 1987.
- [6] O.V. Ekechukwu and B. Norton, "Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology," *Energy Conversion & Management*, vol.40, pp 615–655, 1999.
- [7] A.A. El-Sebaei and S.M. Shalaby, "Solar drying of agricultural products: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.16, pp 37–43, 2012.
- [8] A. B. Lingayat, V.P. Chandramohan, V.R.K Raju and V. Meda, "A review on indirect type solar dryers for agricultural crops – Dryer setup, its

- performance, energy storage and important highlights,” *Applied Energy*, vol. 258, 2022.
- [9] C. Tiris, M. Tiris and I. Dincer, “Experiments on the a new solar air heater,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol.16, pp 183–7, 1996.
- [10] T. Yaibok, S. Phethuayluk, J. WeawSak, M. Mani and P. Buaphet, “Development the Fish Drying Process with a Solar-Electrical Combined Energy Dryer under the Southern of Thailand Climate,” *Thaksin University Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 109–118, 2010.
- [11] S. Sombatpraiwan, T. Tipyavimol, and K. Treeamnuk, “Factors Related to Ripening-stages of Nam Dok-mai Mango after Harvesting,” *Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 52–58, 2012.
- [12] Horwitz, W., “Official Methods of AOAC International” 17th ed, Association of Official Analytical Chemists (AOAC) International, Gaithersburg, 2000.
- [13] J. Seelanamtiang, T. Treeamnuk and K. Treeamnuk, “Effect of Blanching Pretreatment on Physical Properties and Texture of Dried Chok-Anun Mango,” In *Proceeding of the 22 th TSAE National Conference and the 14 th TSAE International Conference*, Faculty of Engineering Khon Kaen University, Thailand, 2021, pp. 161-165.
- [14] Office of Industrial Product Standards, Ministry of Industry, Bangkok, “Dried Fruit Industrial Standard,” TIS. 919- 2563.
- [15] N. Saelim, T. Treeamnuk and K. Treeamnuk, “Development of a Continuous Flow Paddy Dryer with Infrared Radial Radiation Technique,” *RMUTP Research Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 37-46, 2018.
- [16] K. Jaito, T. Treeamnuk, K. Treeamnuk and N. Prangpru, “Shredded-Coconut Drying by Spouted-Bed Technique for Cold Press Coconut Oil Production,” *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, vol. 22, no. 1, pp 64-72, 2016.
- [17] E.O.M. Akoy, “Experimental characterization and modeling of thin-layer drying of mango slices,” *International Food Research Journal*, vol.21, pp 1911-1917, 2014.
- [18] W. Sriariyakul, “Drying of Nam Dok Mai Mango Using Far-Infrared Radiation in Combination with Hot-Air” *The Journal of Industrial Technology*, vol17, no. 3, pp 16-182, 2021.
- [19] P.N. Sarsavadia, “Development of solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion,” *Renewable Energy*, vol.32, pp 2529–47, 2007.
- [20] R. Kumwan, S. Thiangchanta and S. Kesai, “Determination of Drying Rate of Jackfruit by Infrared Dryer, Vacuum System,” *J. Industrial Technology Lampang Rajabhat University*, vol.11, no. 2, pp. 67-77, 2018.
- [21] G.M. Sapers and Jr.F.W. Douglas, “Measurement of enzymatic browning at

- cut surfaces and in juice of raw apple and pear fruits,” *Journal Food Science*, vol.52, pp. 1258-1261, 1987,
- [22] S. Inthachai, N. Meeso, S. Siriamornpun, “Use of hot-air from solar energy combined with gas fuel in coated wood furniture drying” *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, vol. 32, no. 5, pp. 659-663, 2013.

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

ผลกระทบของกรดไขมันอิสระที่เติมอยู่ในน้ำมันปาล์มต่อสมบัติความหนืด การวัลคาไนซ์ และสมบัติเชิงกล ของคอมพาวนด์ยางธรรมชาติผสมเขม่าดำ

ศิวโรฒ บุญราศรี^{1*} จันทรจิรา เหลลราช² และ พรชัย ราชชนะพันธ์³

¹ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

² คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

³ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

^{1,2,3} หมู่ 4 ถนนเชียงใหม่-พร้าว ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

³ 239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

รับบทความ 16 กุมภาพันธ์ 2565 แก้ไขบทความ 23 สิงหาคม 2565 ตอรับบทความ 28 กันยายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของกรดไขมันอิสระที่เติมลงไปน้ำมันปาล์มที่มีต่อสมบัติของคอมพาวนด์ยางธรรมชาติที่ผสมกับสารตัวเติมเขม่าดำ โดยใช้ไขมันปาล์มที่เติมกรดไขมันอิสระ (เติมกรดโอเลอิกปริมาณ 15% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม) เป็นสารกระตุ้นเปรียบเทียบกับการใช้กรดสเตียริก ตั้งแต่ 1-7 phr (ส่วนโดยน้ำหนักต่อยาง 100 ส่วน) ศึกษาสมบัติต่าง ๆ เช่น ความหนืดโมดูลัส เวลาที่ยางวัลคาไนซ์ เวลาที่ยางวัลคาไนซ์ 300% โมดูลัส ความต้านทานแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด ผลที่ได้พบว่ากรดสเตียริกจะให้ค่าความหนืดโมดูลัสนี้ที่น้อยกว่าน้ำมันปาล์มเล็กน้อย แต่เวลาที่ยางวัลคาไนซ์และเวลาที่ยางวัลคาไนซ์มากกว่า การใช้กรดสเตียริกและน้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้นในยางคอมพาวด์ มีผลให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่า 300% โมดูลัส และความต้านทานแรงดึงของยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลง ยางคอมพาวด์ที่ผสมกับน้ำมันปาล์มปริมาณ 3 phr ให้สมบัติด้านการวัลคาไนซ์ และสมบัติเชิงกลดีที่สุดดังนี้ เวลาคงรูป 8.15 ± 0.3 นาที และค่าความต้านทานแรงดึง 24.92 ± 0.4

คำสำคัญ : คอมพาวนด์ยางธรรมชาติ; น้ำมันปาล์ม; สารกระตุ้น; กรดไขมันอิสระ; เขม่าดำ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 0519 4926, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: siwarote.b@mju.ac.th

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

Effect of Free fatty Acid Added in Palm Oil on Viscosity, Cure Characteristics and Mechanical Properties of Carbon Black Filled Natural Rubber Compounds

Siwarote Boonrasri^{1*} Chanchira Laorach² and Pornchai Rachtanapun³

¹Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University

²Faculty of Liberal Arts, Maejo University

³Faculty of Agro-Industry, Chiang Mai University

^{1,2}63 Moo 4, Nong Han Subdistrict, San Sai District, Chiang Mai Province 50290

³239 Huay Kaew Road, Su Thep Subdistrict, Mueang Chiang Mai District, Chiang Mai Province 50200

Received 16 February 2022; Revised 23 August 2022; Accepted 28 September 2022

Abstract

This research studied the carbon black filled natural rubber (NR) incorporated with palm oil contained free fatty acid (oleic acid added of 15% by palm oil weight) or stearic acid as activators were developed and characterized. The effects of the palm oil and stearic acid content (1–7 phr (part per hundred of rubber)) on the advanced natural rubber compounds' properties were determined by measuring the Mooney viscosities, the scorch time, the curing time, 300% modulus, tensile strength, as well as elongation at break. It was found that the Mooney viscosities of the rubber compound with steric acid were lower than the compound with palm oil while the scorch time and the curing time were longer. As the stearic acid and palm oil in compound increased, elongation at break increased but 300% modulus and tensile strength of vulcanizes trended to decrease. The compound with 3 phr of palm oil displayed good cure and mechanical properties such as 8.15±0.3 minutes of cure time and 24.92±0.4 of tensile strength.

Keywords : Natural Rubber Compound; Palm Oil; Activator; Free Fatty Acid; Carbon Black

* Corresponding Author. Tel.: +669 0519 4926, E-mail Address: siwarote.b@mju.ac.th

1. บทนำ

ในระบบการวัลคาไนซ์ยางด้วยกำมะถันมีสารที่จำเป็นอย่างน้อยชนิด เช่น สารตัวเร่ง สารกระตุ้น และกำมะถัน ส่วนที่เป็นสารกระตุ้นมีสารเคมีที่สำคัญ 2 ชนิด ที่ใช้งานร่วมกัน คือ โลหะออกไซด์ (ซิงค์ออกไซด์) และกรดไขมัน (Fatty acid) ซึ่งกรดไขมันที่นิยมใช้ในปัจจุบันเป็นกรด สเตียริก (Stearic acid) A. Y. Coran [1] ศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดสเตียริกที่ใช้เป็นสารกระตุ้นในยางธรรมชาติ พบว่าอัตราการวัลคาไนซ์ลดลงถ้าความเข้มข้นของกรดสเตียริกเพิ่มขึ้น B. C. Barton et al. [2] ได้แสดงถึงผลของการใช้กรดลอริกกระตุ้นในการเชื่อมโยงโมเลกุลยาง (Crosslink) โดยพิจารณาจากมอดูลัส 200% พบว่าการเพิ่มปริมาณกรดลอริก 1-7 phr ทำให้มอดูลัสของยางมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่เมื่อใช้ปริมาณกรดลอริกมากกว่า 8 phr พบว่าค่ามอดูลัสก็จะคงที่ H. Ismail et al. [3] ศึกษาผลของกรดโอเลอิก (Oleic acid) ต่อสมบัติวัลคาไนซ์ และสมบัติเชิงกลของยางที่ผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าเวลายางเริ่มวัลคาไนซ์ (Scorch time, ts1) และเวลายางวัลคาไนซ์ (Cure time, tc90) เพิ่มขึ้นตามปริมาณของกรดโอเลอิก ในขณะที่ค่าแรงบิดสูงสุดและค่าแรงบิดต่ำสุด-(Maximum torque (MH), Minimum torque (ML)) เพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งแล้วลดลงตามปริมาณของกรดโอเลอิก สมบัติเชิงกล เช่น ค่า Tensile modulus, Hardness, Tensile strength และ Tear strength มีแนวโน้มคล้าย กับค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque, MH) ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum Torque, ML)

นอกจากกระบวนการวัลคาไนซ์แล้วมีการใช้น้ำมันเป็นสารที่ช่วยในการแปรรูปยาง (พลาสติกไซเซอร์) ในกรณีที่มีการใส่สารตัวเติมเขม่าดำในปริมาณมากกว่า 20 phr เพื่อทำให้การผสมยางกับเขม่าดำง่ายขึ้น ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้น้ำมันพืชแทนน้ำมันที่ได้จากปิโตรเลียมเนื่องจากน้ำมันปิโตรเลียมมีสารก่อมะเร็ง Y. Singh et al. [4] นอกจากนี้ Fernandez et al. [5] พบว่าน้ำมัน

จากเมล็ดของต้นปอปานสามารถใช้ในสูตรยางคอมพาวนด์ของยางธรรมชาติผสมกับกราฟีนได้ โดยปริมาณที่เหมาะสม คือ 2-4 phr ทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของยางดีขึ้น C. Siri Wong et al. [6] พบว่าน้ำมันถั่วเหลืองดัดแปลงสามารถช่วยในการแปรรูปยางง่ายขึ้นและสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับน้ำมันปิโตรเลียม S. Boonrasri et al. [7] พบว่าน้ำมันมะรุมและน้ำมันโนเจอร์ทำให้ซิลิกากระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดี ส่งผลให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี A. Saetung et al. [8] ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของการใช้น้ำมันพืชเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ในยางคอมพาวนด์ (STR 5L และ SBR 1502) ได้แก่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันเมล็ดยางพาราเปรียบเทียบกับน้ำมันอะโรมาติก ที่ปริมาณตั้งแต่ 0-10 phr พบว่าน้ำมันพืชเหล่านี้สามารถใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ในสูตรยางคอมพาวนด์ได้

จะเห็นได้ว่าน้ำมันพืชหลายชนิดสามารถใช้เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ในยางได้ แต่บางครั้งการผลิตน้ำมันพืชด้วยวิธีการที่แตกต่างกันทำให้เกิดกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid, FFA) ในน้ำมันพืชแตกต่างกัน น้ำมันปาล์มในท้องตลาดส่วนใหญ่มีปริมาณ FFA น้อยกว่า 1% ถ้าปริมาณกรดไขมันอิสระเกิน 1% ไม่สามารถใช้ทำเป็นน้ำมันสำหรับปรุงอาหารได้ ในขั้นตอนที่เป็นน้ำมันปาล์มดิบจะมีปริมาณ FFA ประมาณ 10-15% ในการผลิตน้ำมันพืชสำหรับบริโภคจะมีการสกัดเอากรดไขมันอิสระออกไปให้เหลือน้อยกว่า 0.6% B. Saad et al. [9] น้ำมันสบู่ดำดิบมี FFA ประมาณ 14% I. M. Atadashi et al. [10], A. K. Tiwari et al. [11] ขึ้นกับกระบวนการผลิต ซึ่งกรดไขมันเหล่านี้อาจจะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นแทนกรดสเตียริกได้ ในปัจจุบันราคากรดสเตียริกอยู่ที่ 80-105 บาท/กิโลกรัม ส่วนน้ำมันปาล์มราคาประมาณ 40-42 บาท/กิโลกรัม หากนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นสารกระตุ้นได้จะส่งผลต่อต้นทุนยางคอมพาวนด์ส่วนที่เป็นกรดไขมันลดลงประมาณ 50% การทดลองนี้

มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ไขมันปาล์มที่เติมกรดไขมันอิสระในระบบวัลคาไนซ์ของยางแท่นกรดสเดียริก เป็นสารกระตุ้นร่วมกับซิงค์ออกไซด์ โดยมีการศึกษาผลกระทบของกรดไขมันอิสระที่เติมอยู่ในน้ำมันปาล์ม ต่อสมบัติความเหนียว การวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของคอมพาวนด์ยางธรรมชาติผสมเขม่าดำ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ยางและสารเคมี

ยางธรรมชาติ STR XL (Standard Thai Rubber, STR) เป็นยางธรรมชาติอัดแท่งเกรด XL ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ชนิด White seal ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (Activator) ในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ กรดสเตียริก (Stearic acid, $C_{17}H_{35}COOH$) มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (Activator) ร่วมกับซิงค์ออกไซด์ในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติกำมะถัน (Sulphur, S) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองนวล ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ สารทีบีบีเอส (N-tert-butyl-benzothiazyl sulphenamide, TBBS) มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาวขุ่น เป็นสารตัวเร่งในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ เขม่าดำ (Carbon black) ลักษณะเป็นผงละเอียดในระดับนาโนเมตร สีดำ เป็นเกรด HAF (N330) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยาง ยางและสารเคมีเหล่านี้จัดจำหน่ายโดยบริษัทหลักกี้โฟร์ จำกัด จังหวัดนนทบุรี น้ำมันปาล์ม (Palm oil) ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระไม่เกิน 0.3% (กรดโอเลอิก และกรดปาล์มมาติก) ผลิตโดยบริษัท โอสิน จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร น้ำมันปาล์มมีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองใส ในการทดลองนี้มีการเติมกรดโอเลอิกลงไป 15% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม กรดโอเลอิก (Oleic acid) ลักษณะเป็นของเหลวมีสีเหลืองใส จัดจำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วนจำกัดนอร์ทเทอร์นเคมีเคิล จังหวัดเชียงใหม่

2.2 การเตรียมยางคอมพาวนด์

1) นำน้ำมันปาล์มทางการค้ามาเติมกรดโอเลอิก ลงไป 15% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม

2) เตรียมยางผสมสารเคมีตามสูตรในตารางที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบผลของการใช้กรดสเตียริกกับน้ำมันปาล์มที่เติมปริมาณกรดโอเลอิก 15% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม โดยแปรปริมาณกรดสเตียริกและน้ำมันปาล์มเป็น 1, 3, 5 และ 7 phr

3) วิธีการบดผสมเป็นไปตามที่กำหนดในมาตรฐาน ISO 1658-1973(E) หรือ ASTM D 3184-89 Rubber-Evaluation of NR ใช้อุณหภูมิในการบดผสมยางที่ 70°C ใช้เวลาในการบดยาง (mastication) 2 นาที ก่อนใส่สารเคมีอื่น ๆ ทุกสูตร เก็บยางผสมสารเคมีไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติกายภาพ

ตารางที่ 1 สูตรยางแปรชนิดและปริมาณกรดสเตียริก และน้ำมันปาล์ม

ส่วนผสม	กลุ่มที่ 1, phr กรดสเตียริก (Stearic acid, SA)	กลุ่มที่ 2, phr น้ำมันปาล์ม (Palm oil, PO)
STR XL	100.0	100.0
ZnO	5.0	5.0
S	2.25	2.25
SA	แปร 1, 3, 5 และ 7	-
PO	-	แปร 1, 3, 5 และ 7
N330	35.0	35.0
TBBS	0.7	0.7

2.3 ศึกษาความหนืดของยาง (Mooney viscosity)

หลังจากที่ผสมเสร็จแล้ว และตั้งทิ้งยางผสมสารเคมีไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง นำยางคอมพาวนด์มาทดสอบความหนืดด้วยเครื่อง Mooney viscometer ยี่ห้อ Tech Pro รุ่น Visc-TECH++ ที่อุณหภูมิ 100°C บันทึกค่าความหนืดที่เวลา 4 นาที การรายงานผลอยู่ใน

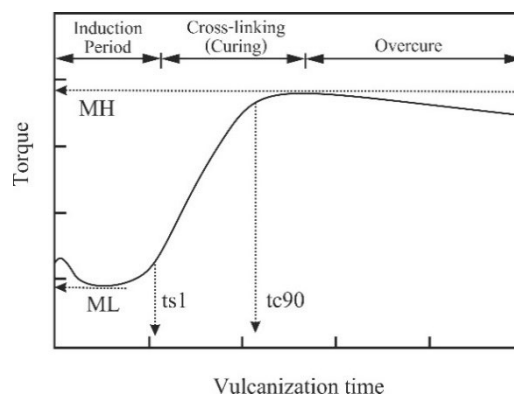
รูป X ML (1+4) 100°C มีหน่วยเป็น Mooney unit (MU) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 1646-87

2.4 ศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์ (Cure Characteristics)

สมบัติการวัลคาไนซ์ (Cure characteristics) สามารถศึกษาโดยใช้เครื่อง Moving die rheometer (MDR) ผลที่ได้เป็นเส้นกราฟวัลคาไนซ์ (Cure curve) ดังรูปที่ 1 ซึ่งแบ่งได้ 3 ช่วง 1) ช่วงเริ่มต้น (Induction) 2) ช่วงวัลคาไนซ์ (Curing) 3) ช่วงหลังการวัลคาไนซ์ (Over cure) X. Sun et al. [12] เวลาที่ย่างเริ่มวัลคาไนซ์ (Scorch time, ts1) คือ เวลาที่ย่างสามารถไหลได้ก่อนการคงรูป เวลาที่ย่างวัลคาไนซ์ (Cure time, tc90) คือ เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ขึ้นที่อุณหภูมิที่กำหนด โดยใช้เวลาเป็นนาฬิกาของค่าแรงบิด 90% ของแรงบิดสูงสุด ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยขึ้นอยู่กับชนิดของยางผสมและความหนาของผลิตภัณฑ์ การทดลองนี้ใช้เวลาที่ 90% ของการวัลคาไนซ์ทั้งหมด หรือ tc90 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบ ค่าอัตราการวัลคาไนซ์ (Cure rate index, CRI, min⁻¹) คือ อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ขึ้นของยางวัลคาไนซ์จากการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัลคาไนซ์ (Vulcanization) ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque, MH, lbf-in) ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum Torque, ML, lbf-in) ความหนาแน่นการเชื่อมโยง (Crosslink density) หาได้จาก MH - ML กราฟในช่วง Overcure หมายถึงช่วงที่อยู่หลังจากค่าแรงบิดสูงสุดเป็นต้นไป การเกิดรีเวอร์ชัน (Reversion) ปรากฏการณ์ที่ค่าแรงบิดหรือโมดูลัสของยางมีค่าลดลงเมื่อเกิดการสภาวะการคงรูปมากกว่าสภาวะที่เหมาะสม การเกิดรีเวอร์ชันเนื่องจากโมเลกุลหรือโครงร่างแหที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลเกิดการสลายตัว มักเกิดในยางธรรมชาติ (NR)

การศึกษาลักษณะของอุณหภูมิที่มีผลต่อสมบัติวัลคาไนซ์ โดยแปรอุณหภูมิจาก 150-190°C เพื่อศึกษา

อุณหภูมิที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์อย่างก่อนที่จะนำยางไปทดสอบสมบัติเชิงกล ทำการทดลองโดยนำยางผสมกับสารเคมีตามตารางที่ 1 โดยใช้ปริมาณน้ำมันปาล์ม 7 phr



รูปที่ 1 ตัวอย่างรูป Cure curve ที่ได้จากเครื่อง Moving die rheometer (MDR)

การศึกษาลักษณะของการใช้น้ำมันปาล์มเป็นสารกระตุ้นแทนกรดสเตียริกต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อศึกษาสมบัติ Cure characteristics เช่น ts1, tc90, ML, MH และ CRI สามารถทดสอบโดยใช้เครื่อง MDR ยี่ห้อ Tech Pro รุ่น rheOTECH MD+ โดยทดสอบตามมาตรฐาน ISO 6502

2.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (Tensile test) โดยนำยางที่ผสมสารเคมีแล้วไปอัดเข้าขึ้นรูปยางด้วยเครื่องอัดเข้า (Compression machine) ยี่ห้อ OOMN SEM -AUTOMATIC MOULDING PRESS รุ่น HPS-100(D) ที่อุณหภูมิ 150 C แรงดัน 3000 psi เวลาวัลคาไนซ์ใช้เวลาที่ tc90 หลังจากนั้นนำยางที่อัดเข้าแล้วมาตัดเป็นรูปดัมเบล Die type C จากนั้นนำไปทดสอบแรงดึงวัดค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength, TS) ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at

break, EB) ค่ามอดุลัส 300% (300% Modulus) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412-98 ใช้เครื่องทดสอบ Universal tester ยี่ห้อ Instron Universal รุ่น 5569 ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตร/นาที

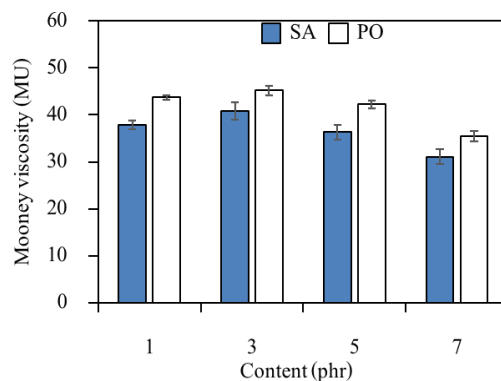
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลของความหนืดของยางคอมพาวนด์

ผลการศึกษาของยางคอมพาวนด์ที่ผสมกรดเตียริก (SA) และน้ำมันปาล์ม (PO) โดยแปรปริมาณสารเป็น 1, 3, 5 และ 7 ต่อค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) แสดงดังรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 พบว่า เมื่อปริมาณกรดเตียริกและน้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดของยางคอมพาวนด์จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดเมื่อปริมาณกรดไขมันระดับหนึ่งหลังจากนั้นจะเริ่มลดลง การที่ความหนืดเพิ่มขึ้นในช่วงแรกอาจเกิดจากการเตียริกและน้ำมันปาล์มที่ส่งผลให้โซ่พอลิเมอร์มีการกระจายตัวได้ดีขึ้น H. Ismail et al. [3] และ S. Boonrasri et al. [7] และเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม ทำให้ยางมีความหนืดมากขึ้น ซึ่งจะทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น ส่วนเมื่อเพิ่มปริมาณกรดเตียริกและน้ำมันปาล์มมากขึ้นอีกและทำให้ความหนืดลดลง เนื่องจากเมื่อมีการใช้ปริมาณกรดเตียริกและน้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้น กรดเตียริกและน้ำมันปาล์มซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอร์จะไปเป็นตัวช่วยลดความหนืดในยาง ทำให้ยางนิ่มลง เพราะอนุภาคของน้ำมันหรือสารโมเลกุลเล็กจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของยางทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการเคลื่อนที่และลื่นไหลได้ดีขึ้นค่าความหนืดของยางจึงลดลง ซึ่งค่าความหนืดของยางที่ผสมกรดเตียริกต่ำกว่าน้ำมันปาล์มเล็กน้อยอาจเนื่องมาจากกรดเตียริก (อยู่ในรูปของกรดไขมันอิสระ ดังรูปที่ 10) มีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าโมเลกุลของน้ำมันปาล์ม (อยู่ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ ดังรูปที่ 10) เมื่อเทียบน้ำหนักโดยประมาณ กรดไขมันอิสระจะมีปริมาณมากกว่าไตรกลีเซอไรด์ 3 เท่า ทำให้ กรดไขมันอิสระ

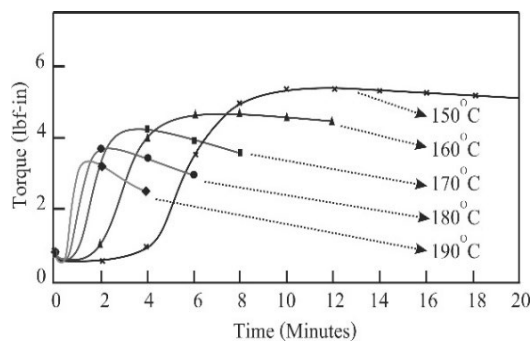
แทรกตัวเข้าระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางได้ดี ทำให้ยางนิ่มลงส่งผลให้ความหนืดของยางลดลง การที่ยางมีความหนืดต่ำทำให้สามารถแปรรูปยางได้ดี เนื่องจากยางคอมพาวนด์เมื่อได้รับความร้อน ความหนืดของยางลดลง ทำให้ยางเริ่มไหลตัวในแม่พิมพ์ได้ดี



รูปที่ 2 ค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์ที่ผสมกรดเตียริก (SA) และน้ำมันปาล์ม (PO) ในปริมาณแตกต่างกัน

3.2 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อสมบัติยางวัลคาไนซ์

ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อสมบัติยางวัลคาไนซ์ (โดยใช้สูตรยางที่มีน้ำมันปาล์ม 7 phr เนื่องจากเป็นปริมาณน้ำมันมากที่สุดในการทดลอง) โดยแปรอุณหภูมิจาก 150-190°C เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์ยางก่อนที่จะนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ค่า Cure curve ของยางคอมพาวนด์ที่อุณหภูมิ 150 - 190°C

จากรูปที่ 3 แสดงลักษณะของกราฟ Cure curve ที่ได้จากเครื่อง MDR ค่าที่ใช้พิจารณา คือ ค่า MH เป็นค่าแรงบิดสูงสุด หากค่า MH มีค่ามาก แสดงให้เห็นว่ายางมีสมบัติเชิงกลดี เช่น มีค่าสมบัติแรงดึงสูง และมีค่ามอดุลัสสูง จะเห็นว่าที่ อุณหภูมิ 150°C มีค่า MH สูงที่สุด และที่อุณหภูมิ 190°C มีค่า MH ต่ำที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิที่ 150°C ใช้ในการทดลองต่อไป

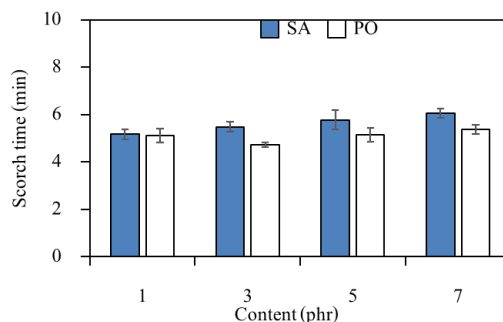
เมื่อสังเกตจากค่า Tc90 คือ เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาคัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิที่กำหนด โดยใช้เวลาเป็นนาฬิกาของค่าแรงบิด 90% ของแรงบิดสูงสุด ที่อุณหภูมิ 150°C มีค่าโดยประมาณ 8 นาที อุณหภูมิ 160°C มีค่าโดยประมาณ 4 นาที แสดงว่าทุก ๆ การเพิ่มอุณหภูมิ 10°C เวลาในการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วขึ้นเป็น 2 เท่า ซึ่งเป็นไปตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) สมการที่ (1) X. Sun et al. [12]

$$k = Ae^{-\frac{Ea}{RT}} \quad (1)$$

เมื่อพิจารณากราฟในช่วง Overcure เป็นช่วงที่อยู่หลังจากค่าแรงบิดสูงสุดเป็นต้นไป จะพบว่าอุณหภูมิ 170°C เป็นต้นไปกราฟช่วง Overcure ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าเกิดรีเวอร์ชันซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่มอดุลัสของยางมีค่าลดลงเมื่อเกิดการสลายตัวของโครงข่ายมากกว่าสถานะที่เหมาะสม จึงปรากฏกราฟแบบรีเวอร์ชันเนื่องจากโมเลกุลหรือโครงร่างแหที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลเกิดการสลายตัว เนื่องจากพันธะก้ำะกันที่เชื่อมอยู่ระหว่างสายโซ่เกิดการสลายตัวด้วยความร้อน ซึ่งมักเกิดในยางธรรมชาติ (NR) ดังนั้นเลือกใช้อุณหภูมิที่ 150°C ใช้ในการทดลองต่อไป

3.3 ผลสมบัติการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C

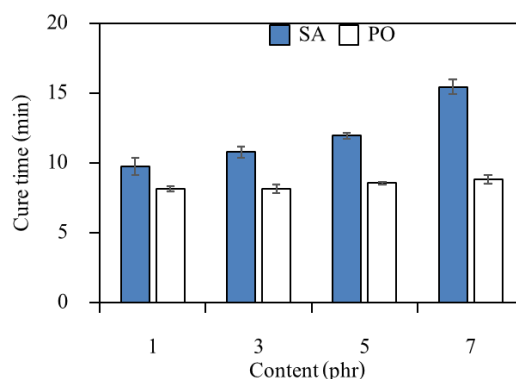
สมบัติการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิการอบยางปกติ 150°C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อศึกษาค่า ts1, tc90, CRI, Reversion, MH, ML และ Crosslink density (MH-ML) ผลการทดลองดังรูปที่ 4-7



รูปที่ 4 ค่าเวลายางเริ่มวัลคาไนซ์ (ts1) ของยางคอมพาวนด์ที่ผสมกรดสเตียริกและน้ำมันปาล์มในปริมาณแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4 เมื่อเพิ่มปริมาณกรดสเตียริกเป็น 1, 2, 5 และ 7 phr จะเห็นค่า ts1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนน้ำมันปาล์มเมื่อใช้ในปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลกระทบบต่อค่า ts1 เพียงเล็กน้อย ทำให้ได้ค่า ts1 ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

จากภาพที่ 5 เมื่อเพิ่มปริมาณกรดสเตียริกเป็น 1, 2, 5 และ 7 phr จะเห็นแนวโน้มค่า tc90 เพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากความเป็นกรดของกรดสเตียริกทำให้ยาง Cure ช้าลง ทำให้การแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางใช้เวลานานมากขึ้น ส่วนน้ำมันปาล์มเมื่อใช้ในปริมาณเพิ่มมากขึ้นส่งผลกระทบบต่อค่า tc90 เพียงเล็กน้อย ทำให้ได้ค่า tc90 มีค่าใกล้เคียงกัน



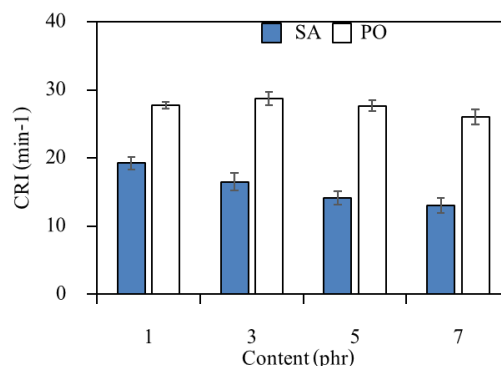
รูปที่ 5 ค่าเวลายางวัลคาไนซ์ (tc90) ของยางคอมพาวนด์ที่ผสมกรดสเตียริกและน้ำมันปาล์มในปริมาณแตกต่างกัน

ผลของกรดสเตียริกเมื่อใช้ปริมาณเพิ่มขึ้นให้ผลการทดลองสอดคล้องกับงานของ H. Ismail et al. [3] ที่ศึกษาผลของกรดโอเลอิก (Oleic acid) ต่อสมบัติวัลคาไนซ์โดยแปรปริมาณกรดโอเลอิก 0 - 7 phr โดยใช้ปริมาณเขม่าดำ 15, 30 และ 50 phr พบว่า ts1 และ tc90 เพิ่มขึ้นตามปริมาณของกรดโอเลอิก ในการทดลองนี้น้ำมันปาล์มมีปริมาณกรดโอเลอิก 15% โดยน้ำหนักในน้ำมันปาล์ม เมื่อใส่น้ำมันปาล์มในปริมาณ 7 phr ไม่มีผลต่ออัตราการวัลคาไนซ์ เมื่อเทียบสัดส่วนกรดโอเลอิกที่มีในน้ำมันปาล์ม 7 phr จะมีปริมาณกรดโอเลอิกเพียงแค่ว่า 1.05 phr เป็นเหตุผลหลักเมื่อใส่น้ำมันปาล์มลงไปแล้วทำให้ค่า ts1 และ tc90 ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นในกรณีเป็นสารกระตุ้น กรดสเตียริกควรใช้ประมาณ 1-2 phr ถ้าใช้กรดสเตียริกปริมาณเกินกว่า 2 phr ทำให้เวลา Cure time เพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่น้ำมันปาล์มที่เติมปริมาณกรดโอเลอิก 15% สามารถใช้ได้ 1-7 phr โดยมีผลกระทบต่อ cure time น้อย อย่างไรก็ตามต้องดูผลการทดสอบอย่างอื่นประกอบเพื่อเลือกสูตรที่เหมาะสม

A. Y. Coran [1] เสนอผลการศึกษาค้นคว้าของกรดสเตียริกต่ออย่างธรรมชาติ พบว่าอัตราการวัลคาไนซ์ลดลงเมื่อปริมาณกรดสเตียริกเพิ่มขึ้น กล่าวคือ Zinc ions ทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริก เกิดเป็นสารประกอบใหม่เป็น Zinc stearate เพื่อไปทำปฏิกิริยากับสารคงรูปกำมะถันและยางต่อไป ดังนั้นอาจจะเป็นไปได้ว่าในกรณีของน้ำมันปาล์มที่เติมกรดโอเลอิกลงไป กรดโอเลอิกสามารถทำปฏิกิริยากับซิงค์ออกไซด์สามารถฟอร์มตัวเป็น Zinc oleate ได้ เพื่อไปทำปฏิกิริยากับสารคงรูปกำมะถันและยางต่อไป

จากรูปที่ 6 อัตราการวัลคาไนซ์ของยางที่ผสมน้ำมันปาล์มสูงกว่ากรดสเตียริก แสดงให้เห็นว่าน้ำมันปาล์มทำให้ยางมีอัตราการวัลคาไนซ์เร็วกว่ากรดสเตียริก นอกจากนี้เมื่อปริมาณกรดสเตียริกเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราการวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงอย่างมาก แต่น้ำมัน

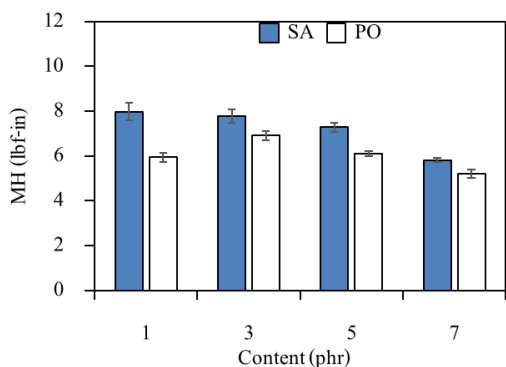
ปาล์มมีอัตราการวัลคาไนซ์ลดลงเพียงเล็กน้อย เหตุผลเช่นเดียวกับค่า tc90 และอีกเหตุผลหนึ่ง ที่อุณหภูมิการวัลคาไนซ์ 150°C กรดสเตียริกเมื่อใช้ในปริมาณ 5-10 phr จะทำหน้าที่คล้ายกับสารยับยั้งการเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุล Pre-vulcanization inhibitor (PVI) B. Saad et al. [9] ตัวอย่างสารที่นิยมใช้คือ N-(cyclohexylthio) phthalimide (CTP) โดยสารนี้จะไปทำให้ค่า ts1 เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการวัลคาไนซ์ย่าง แต่กรดสเตียริกเมื่อใช้ในปริมาณ 5-10 phr ทำให้ ts1 ให้เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และยังพบข้อเสียคือ มีผลต่ออัตราการวัลคาไนซ์ย่าง โดยทำให้อัตราการวัลคาไนซ์ลดลง และเวลา tc90 ของยางเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ค่าอัตราการวัลคาไนซ์ (CRI) ของยางคอมพาวนด์ที่ผสมกรดสเตียริกและน้ำมันปาล์มในปริมาณแตกต่างกัน

ผลการทดลองค่อนข้างสอดคล้องกับผลการทดลองของ A. Saetung et al. [8] อย่างไรก็ตามพบว่าสูตรยางที่ใช้ในงานวิจัยดังกล่าวมีความแตกต่างจากการทดลองนี้ โดยสูตรยางที่มีการเติมกรดสเตียริก 1 phr ในยางทุกสูตรที่ทำการทดลอง และทำการแปรปริมาณน้ำมันพืช แต่ในงานวิจัยนี้ในยางสูตรที่มีน้ำมันปาล์มจะไม่มีการเติมกรดสเตียริก ซึ่งจากการทดลองพบน้ำมันปาล์มเมื่อใช้ในปริมาณเพิ่มมากขึ้นจาก 2 phr ถึง 10

phr ทำให้ค่า ts1 และ tc90 ของยางเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงว่าน้ำมันปาล์มที่ใช้จะจะมีปริมาณ FFA มากกว่า 15% ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าถ้ามีปริมาณ FFA มากกว่านี้ ก็จะส่งผลต่อค่า ts1 และ tc90



รูปที่ 7 ค่าแรงบิดสูงสุด (MH) ของยางคอมพาวนด์ที่ผสมกรดสเตียริกและน้ำมันปาล์มในปริมาณแตกต่างกัน

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่ายางคอมพาวนด์ที่มีกรดสเตียริกจะมีค่า MH มากกว่ายางคอมพาวนด์ที่มีน้ำมันปาล์ม นอกจากนี้ค่า MH ของยางของคอมพาวนด์มีแนวโน้มลดลง เมื่อมีปริมาณกรดสเตียริกและน้ำมันปาล์มมากขึ้นอาจเนื่องมาจากสมบัติการเป็นพลาสติกไซเซอร์ของกรดสเตียริกและน้ำมันปาล์มเมื่อใส่สารเหล่านี้ในปริมาณมากขึ้น ดังนั้นน้ำมันปาล์มและกรดสเตียริกเมื่อใช้ในปริมาณตั้งแต่ 3-7 phr สามารถทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ได้ด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย C. T. Loo [13] ได้รายงานว่าการลดลงของค่าแรงบิดสูงสุดและการลดลงของค่าความแตกต่างระหว่างค่าแรงบิดสูงสุดกับค่าแรงบิดต่ำสุด เนื่องจากผลของการเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่มีมากเกินไปของ Zinc stearate ที่เกิดขึ้นระหว่างวัลคาไนซ์ ดังนั้นที่ 150°C Zinc stearate จะทำให้ยางนิ่มและส่งผลให้ค่าแรงบิดลดลง

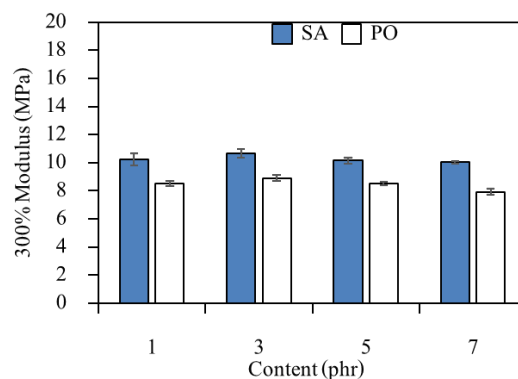
จากผลการทดลองเมื่อใช้น้ำมันปาล์มในปริมาณมากขึ้นทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดเพิ่มขึ้นที่ปริมาณ 3 phr หลังจากนั้นค่าแรงบิดเริ่มลดลง การที่ค่าแรงบิดสูงสุดที่

ปริมาณ 3 phr มากกว่าที่ 1 phr อาจเนื่องมาจากกรดโอเลอิกที่เพิ่มขึ้นทำให้ซิงค์ออกไซด์สามารถฟอร์มตัวเป็น Zinc oleate ได้ และทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นในยาง โดยจะไปกระตุ้นสารตัวเร่ง TBBS ให้ทำงานเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ทำให้มีปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลยางมากขึ้นส่งผลให้สมบัติยางดีขึ้น และอาจเนื่องมาจากการกระจายตัวของเขม่าดำดีขึ้น แต่เมื่อเติมในปริมาณมากกว่า 3 phr ทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดลดลงอาจเนื่องมาจากการเป็นพลาสติกไซเซอร์ดังกล่าวข้างต้น

ในสูตรยางที่ทำการทดลองนี้ไม่มีการเติมแอนติออกซิแดนต์ยางทุกสูตรที่อุณหภูมิ 150°C เกิดการ Reversion น้อยมาก ทั้งนี้การเกิด Reversion เกิดจากหลายปัจจัย เช่น สารตัวเร่ง ซึ่งจากการทดลองพบว่าสารตัวเร่ง TBBS ทำให้เกิดการ Reversion น้อยมาก ที่อุณหภูมิวัลคาไนซ์ 150°C

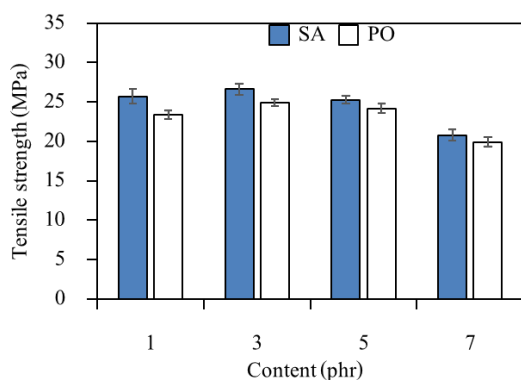
3.4 ผลของสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์

การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางที่วัลคาไนซ์โดยใช้กรดสเตียริกและน้ำมันปาล์มปริมาณต่าง ๆ ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปยาง 150°C เวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ขึ้นกับเวลา Cure time ของแต่ละสูตร หลังจากขึ้นรูปและตัดเป็นชิ้นทดสอบแล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลผลการทดลองดังรูปที่ 8-11



รูปที่ 8 ค่า 300% Modulus ของยางวัลคาไนซ์ที่ผสมกรดสเตียริกและน้ำมันปาล์มในปริมาณแตกต่างกัน

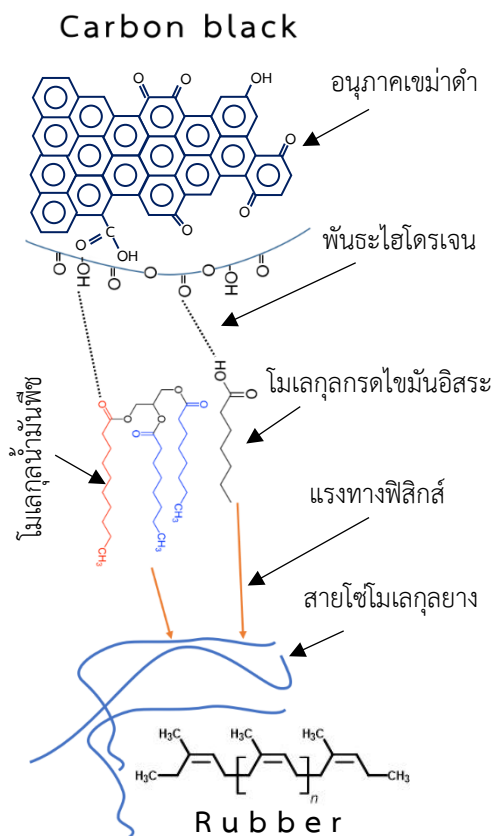
จากรูปที่ 8 พบว่าเมื่อใช้ปริมาณกรดเตียริก และน้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้น ค่า 300% Modulus ของยางวัลคาไนซ์จะมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อมีปริมาณการใช้กรดเตียริกและน้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้น กรดเตียริกและน้ำมันปาล์มจะทำให้ความแข็งแรงของยางวัลคาไนซ์ลดลง ทำให้แรงที่ต้องใช้ในการดึงยางวัลคาไนซ์ลดลง ส่งผลให้ค่ามอดุลัสลดลง และเห็นชัดเจนขึ้นเมื่อใช้ปริมาณกรดเตียริกและน้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้น กรดเตียริกจะให้ค่ามอดุลัสสูงกว่าน้ำมันปาล์มเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับค่า MH



รูปที่ 9 ค่าความต้านทานแรงดึง (TS) ของยางวัลคาไนซ์ที่ผสมกรดเตียริกและน้ำมันปาล์มในปริมาณแตกต่างกัน

จากรูปที่ 9 พบว่าในช่วงแรกที่ทำกรเติมปริมาณกรดเตียริกและน้ำมันปาล์มในปริมาณน้อยให้ค่า TS ของยางวัลคาไนซ์ต่ำ แต่พอเติมกรดเตียริกและน้ำมันปาล์มลงไปมากขึ้นค่า TS ของยางวัลคาไนซ์จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงจุด ๆ หนึ่งที่ 3 phr ค่าความต้านทานต่อแรงดึงจะค่อย ๆ ลดลง โดยปกติโครงสร้างของยางธรรมชาติสามารถเกิดการตกผลึกได้เนื่องจากมีความเป็นระเบียบของโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกจากการยืดตัว (Stain induced crystallization) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้น เมื่อใส่น้ำมันลงไปยางวัลคาไนซ์จะทำให้ค่า TS เพิ่มขึ้นในช่วงแรก เพราะน้ำมันจะไปช่วยให้การกระจายตัวของสารเคมีในยางวัลคาไนซ์เกิดได้ดีขึ้น

(จะอธิบายต่อไปในรูปที่ 10) แต่หากเติมลงไปปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้โมเลกุลของยางวัลคาไนซ์ถูกแยกห่างออกจากกันทำให้ความแข็งแรงของยางวัลคาไนซ์ลดลง



รูปที่ 10 ภาพกลไกที่อาจจะเกิดอันตรกิริยาของโมเลกุลน้ำมันพืช หรือกรดไขมันอิสระ อนุภาคเขม่าดำ และสายโซ่โมเลกุลยาง

(ดัดแปลงมาจาก S. Boonrasri et al. [7])

นอกจากนี้ที่ปริมาณน้ำมันปาล์ม 3 phr ให้ค่า TS สูงกว่าที่ 1 phr สอดคล้องกับค่า MH ซึ่งค่า MH สูงอาจจะส่งผลให้ปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลยางวัลคาไนซ์มากขึ้นทำให้สมบัติยางวัลคาไนซ์ดีขึ้น (แต่ถ้าปริมาณการเชื่อมโยงที่มากเกินไปอาจจะทำให้สมบัติยางวัลคาไนซ์ไม่ดีได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นปริมาณการเชื่อมโยงที่เหมาะสมทำให้สมบัติยางวัลคาไนซ์ดี)

กรดสเตียริกจะให้ค่า TS สูงกว่าน้ำมันปาล์มเล็กน้อยซึ่งให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับค่ามอดุลัส

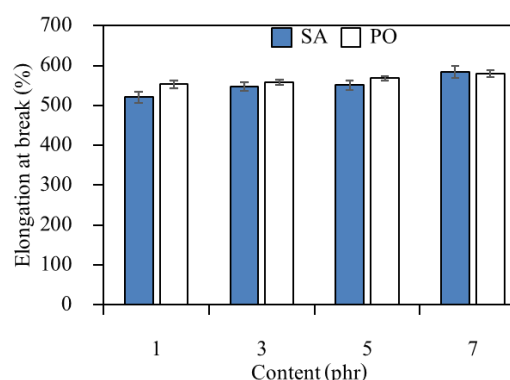
จากรูปที่ 10 ข้อเสนอภาพกลไกที่อาจจะเป็นไปได้ของโมเลกุลน้ำมันพืช หรือ กรดไขมันอิสระช่วยกระจายตัวเข้ามาดำ โดยอนุภาคของเขม่าดำมีความเป็นขั้วที่ผิวเล็กน้อยของหมู่ -OH, =O อาจจะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่เอสเทอร์ หรือหมู่คาร์บอกซิลิกของโมเลกุลน้ำมันพืช หรือ กรดไขมันอิสระ ส่วนที่ไม่มีขั้วของน้ำมันจะเกิดแรงทางฟิสิกส์กับโมเลกุลยางได้ S. Boonrasri et al. [7], T. R. Kukreja et al. [14], G. Fard-Zolfaghari et al. [15], R. Mohamed [16] ส่งผลให้ยางมีค่า TS เพิ่มขึ้นที่ 3 phr แต่ถ้าเติมในปริมาณที่มากกว่านี้ทำให้ค่า TS ลดลงเนื่องจากน้ำมันทำให้สายโซ่โมเลกุลห่างจากกัน ดังนั้นการใช้น้ำมันในยางควรใช้ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ S. H. Song [17], J. Li et al. [18] การใช้น้ำมันพืชในยางนอกจากเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมแล้วยังสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล(TS) และสมบัติพลวัต (wet grip and rolling resistance) ของยางให้ดีขึ้น P. Intharapat et al. [19], N. Sovtic et al. [20] นอกจากนี้ นักวิจัยได้เสนอและทดลองการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ -OH กับหมู่เอสเทอร์ของน้ำมันพืช พบว่าหมู่ดังกล่าวสามารถเกิดอันตรกิริยากันได้ S. Boonrasri et al. [7], C. K. Lee [21], C. Yan et al. [22]

จากรูปที่ 11 พบว่าเมื่อใช้ปริมาณกรดไขมันเพิ่มขึ้นค่า EB ของยางวัลคาไนซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากเมื่อมีปริมาณการใช้กรดไขมันเพิ่มขึ้นกรดไขมันจะทำให้ยางวัลคาไนซ์ยืดได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม การเติมกรดสเตียริกและการเติมน้ำมันปาล์ม มีการยืดตัวมากกว่า 500% และพบว่าการเพิ่มปริมาณทั้ง 2 ชนิดค่าการยืดตัวของยางไม่แตกต่างกันมากนัก

ยางวัลคาไนซ์ที่ผสมน้ำมันปาล์มให้ค่า EB สูงกว่ายางวัลคาไนซ์ที่ผสมกรดสเตียริกเล็กน้อย เนื่องจากยางวัลคาไนซ์ที่ผสมกรดสเตียริกมีค่า 300% Modulus

และค่า TS ที่สูงกว่า ยางวัลคาไนซ์ที่ผสมน้ำมันปาล์มเล็กน้อย ยางที่มีค่ามอดุลัสสูงมักจะมีความยืดหยุ่นน้อย ทำให้ระยะยืดสูงสุดมีค่าลดลง

ดังนั้นจากสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์พบว่าน้ำมันปาล์มที่เติมปริมาณกรดโอลิก 15% สามารถใช้เป็นสารกระตุ้นร่วมกับซิงค์ออกไซด์ได้ อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ใช้สารตัวเร่งเพียงตัวเดียวคือทียบีส ถ้าหากว่ามีการเปลี่ยนชนิดของสารตัวเร่งหรือสารตัวเติมเป็นชนิดอื่น ๆ อาจจะทำให้ผลการทดลองที่แตกต่างกันออกไปได้



รูปที่ 11 ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (EB) ของยางวัลคาไนซ์ที่ผสมกรดสเตียริกและน้ำมันปาล์มในปริมาณแตกต่างกัน

จากการทดลองการเลือกใช้น้ำมันปาล์มควรใช้ที่ปริมาณ 3 phr ทำให้ได้สมบัติการใช้งานที่ต้องการโดยให้ค่า TS ของยางวัลคาไนซ์สูงที่สุด เมื่อปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 1, 3, 5 และ 7 phr ทำให้ความหนืดของยางลดลง ค่า ts1 และ tc90 ค่อนข้างจะคงที่ ค่า EB มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

4. สรุป

ความหนืดมุนนี้ของยางคอมพาวนด์ที่ผสมน้ำมันปาล์มมีความหนืดสูงกว่ากรดสเตียริกเล็กน้อย เมื่อ

ปริมาณกรดสเตียริกและน้ำมันปาล์มเพิ่มมากขึ้นอย่างมีค่าความหนืดลดลง ทำให้ยางไหลได้ดีขึ้น การแปรรูปทำได้ดีขึ้น แสดงว่ากรดสเตียริกและน้ำมันปาล์มในปริมาณมากกว่า 3 phr สามารถใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ได้

อุณหภูมิ 150°C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติเพราะให้ค่า MH สูงกว่าที่อุณหภูมิมากกว่า 150°C

สมบัติการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C เมื่อปริมาณกรดสเตียริกเพิ่มขึ้นจาก 1-7 phr เวลา ts1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และ tc90 เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อปริมาณน้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้นจาก 1-7 phr เวลา ts1 มีค่าใกล้เคียงกัน และ tc90 มีค่าใกล้เคียงกัน ที่ปริมาณน้ำมันปาล์ม 3 phr ให้ค่า MH ของยางคอมพาวนด์สูงที่สุด

สมบัติเชิงกลการใช้กรดสเตียริกและน้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้นมีผลให้ค่า EB มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ค่า 300% Modulus และ TS ของยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลง ที่ปริมาณน้ำมันปาล์ม 3 phr ให้ค่า TS ของยางวัลคาไนซ์สูงที่สุด ดังนั้นน้ำมันปาล์มที่เติมปริมาณกรดโอเลอิก 15% สามารถใช้เป็นสารในระบบวัลคาไนซ์ของยางได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณแหล่งทุน สกว. ที่สนับสนุนการวิจัยนี้ รหัสโครงการ สกว.-54-010.

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Y. Coran, "Vulcanization. Part VII. Kinetics of Sulfur Vulcanization of Natural Rubber in Presence of Delayed-Action Accelerators," *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 38, no. 1, pp. 1-14, 1965.
- [2] B. C. Barton and E. J. Hart, "Variables Controlling the Cross-Linking Reactions in Rubber," *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 26, no. 1, pp. 510-521, 1953.
- [3] H. Ismail and H. Anuar, "Palm oil fatty acid as an activator in carbon black filled natural rubber compounds: Dynamic properties, curing characteristics, reversion and fatigue studies," *Polymer Testing*, vol. 19, no. 1, pp. 349-359, 2000.
- [4] Y. Singh, A. Sharma and A. Singla, "Non-edible vegetable oil-based feedstocks capable of bio-lubricant production for automotive sector applications—a review," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 15, pp. 14867-14882, 2019.
- [5] S. Fernandez, S. Kunchandy and S. Ghosh, "Linseed Oil Plasticizer Based Natural Rubber/Expandable Graphite Vulcanizates: Synthesis and Characterizations," *Journal of Environment Polymer Degradation*, vol. 23, no. 4, pp. 526-533, 2015.
- [6] C. Siri Wong, P. Khansawai, S. Boonchiangma, C. Sirisinha and P. Sae-Oui, "The influence of modified soybean oil as processing aids in tire application," *Polymer Bulletin*, vol. 78, no. 7, pp. 3589-3606, 2021.
- [7] S. Boonrasri, P. Sae-Oui, A. Reungsang and P. Rachtanapun, "New Vegetable Oils with Different Fatty Acids on Natural Rubber Composite Properties," *Polymers*, vol. 13, no. 7, pp. 1108, 2021.
- [8] A. Saetung, P. Patya and A. Rungvichaniwit, "Using Vegetable Oil Replaced Aromatic Oil in

- Rubber Compounds, Full research report, The Thailand Research Fund (TRF) 2005.
- [9] B. Saad, C. W. Ling, M. S. Jab, B. P. Lim, A. S. M. Ali, W. T. Wai and M. I. Saleh, "Determination of free fatty acids in palm oil samples using non-aqueous flow injection titrimetric method," *Food Chemistry*, vol. 102 no. 4, pp. 1407-1414, 2007.
- [10] I. M. Atadashi, M. K. Aroua, A. R. A. Aziz and N. M. N. Sulaiman, "Production of biodiesel using high free fatty acid feedstocks," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 3275-3285, 2012.
- [11] A. K. Tiwari, A. Kumar, and H. Raheman, "Biodiesel production from jatropha oil (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: An optimized process," *Biomass and Bioenergy*, vol. 31, no. 8, pp. 569-575, 2007.
- [12] X. Sun, and A. I. Isayev, "Cure Kinetics Study of Unfilled and Carbon Black Filled Synthetic Isoprene Rubber," *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 82, no. 2, pp. 149-169, 2009.
- [13] C. T. Loo "High temperature vulcanization of elastomers: 2. Network structures in conventional sulphenamide - sulphur natural rubber vulcanizates." *Polymer*, vol. 15, no. 6, pp. 357-365, 1974.
- [14] T. R. Kukreja, R. C. Chauhan, S. Choe and P. P. Kundu, "Effect of the doses and nature of vegetable oil on carbon black/rubber interactions: Studies on castor oil and other vegetable oils," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 87, no. 10, pp. 1574-1578, 2003.
- [15] G. Fard-Zolfaghari, A. Abbasian and M. Razzaghi-Kashani, "Insights into the compatibility of vegetable-based plasticizers on the performance of filled rubber vulcanizates," *Polymer Engineering and Science*, vol. 61, no. 5, pp. 1379-1391, 2021.
- [16] R. Mohamed, N. Mohd Nurazzi and M. Huzaifah, "Effect of carbon black composition with sludge palm oil on the curing characteristic and mechanical properties of natural rubber/styrene butadiene rubber compound," In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, Malaysia vol. 223, 2017, pp. 1-9.
- [17] S. H. Song, "The Effect of Palm Oil-Based Hybrid Oils as Green Multifunctional Oils on the Properties of Elastomer Composites," *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 9, pp. 1045, 2018.
- [18] J. Li and A. I. Isayev, "Recent development in application of bio-based oils in elastomers," *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 91, no. 4, pp. 719-728, 2018.
- [19] P. Intharapat, A. Kongnoo and P. Maiwat, "Bio-processing aids based on jatropha seed oil and its epoxidized derivatives in carbon black-reinforced natural rubber," *Journal of Vinyl and Additive Technology*, vol. 26, no. 1, pp. 62-76, 2020.

- [20] N. Sovtic, K. S. Predrag, O. J. Bera, J. M. Pavlicevic, O. M. Govedarica and M. C. Jovicic, "A review of environmentally friendly rubber production using different vegetable oils," *Polymer Engineering and Science*, vol. 60, no. 6, pp. 1097-1117, 2020.
- [21] C. K. Lee, J. G. Seo, H. J. Kim and S. H. Song, "Novel green composites from styrene butadiene rubber and palm oil derivatives for high performance tires," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 136, no. 25, p. 47672, 2019.
- [22] C. Yan, A. D. Sarma, E. Moretto, J.-S. Thomann, P. Verge, D. Schmidt, F. Kayser and R. Dieden. "Semiquantitative Solid-State NMR Study of the Adsorption of Soybean Oils on Silica and Its Significance for Rubber Processing," *Langmuir*, vol. 37, no. 34, pp. 10298-10307, 2021.

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

ผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบ

นราธร สัตย์ซื่อ¹ และ น้อมจิตต์ สุธิบุตร^{2*}

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

² คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

¹ 38 หมู่ 8 ถนนหาดเจ้าสำราญ ตำบลนาวิ่ง อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี 76000

² 168 ถนนศรีอยุธยา แขวงวิชิตฤทัย เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

รับบทความ 15 มิถุนายน 2564 แก้ไขบทความ 22 กันยายน 2565 ตอรับบทความ 30 พฤศจิกายน 2565

บทคัดย่อ

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสูตรและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการศึกษา และศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบ ผลการศึกษาพบว่าปริมาณน้ำที่ใช้ปั่นผสมกับกระเจี๊ยบมากขึ้นมีผลทำให้ปริมาณโปรตีนและความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลง โดยปริมาณกระเจี๊ยบต่อน้ำที่เหมาะสมคืออัตราส่วน 1:2.5 (น้ำหนัก : น้ำหนัก) ผลิตภัณฑ์มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 3.03 ผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบที่เสริมแซนแทนกัมในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้มีค่าความชื้นเพิ่มขึ้น โดยปริมาณแซนแทนกัมที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 0.1 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันไม่เกิดการแยกชั้น และการพาสเจอร์ไรซ์ผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบที่อุณหภูมิ 64 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์สามารถเก็บรักษาได้ 9 วัน ที่อุณหภูมิ 5±1 องศาเซลเซียส โดยจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของนมพาสเจอร์ไรซ์ปลอดภัยต่อการบริโภค ผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบปริมาณ 100 กรัม ให้พลังงาน 29.22 กิโลแคลอรี มีโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต ปริมาณร้อยละ 3.37 0.22 และ 3.42 ตามลำดับ

คำสำคัญ : กระเจี๊ยบ; ผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมัน; แซนแทนกัม

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6368 3487, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: nomjit.s@mutp.ac.th

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

Imitation Milk Product from Water Caltrop

Narathorn Satsue¹ and Nomjit Suteebut^{2*}

¹ Faculty of Science and Technology, Phetchaburi Rajabhat University

² Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

¹ 38 Moo 8 Na Vung, Had Chao Samran Road, Mueang Phetchaburi District, Phetchaburi 76000

² 168 Sri Ayutthaya Road, Dusit, Wachira Hospital, Bangkok 10300

Received 15 June 2021; Revised 22 September 2022; Accepted 30 November 2022

Abstract

The development of imitation milk products from Water Caltrop was aimed to study the recipes and production processes of imitation milk products from Water Caltrop, to study the changing quality during storage, and to study the nutritional value of this product. The study found that the more significant amount of water used to blend with the Water Caltrop reduced the product's protein content and viscousness. The appropriate amount of Water Caltrop per water was 1: 2.5 (weight: weight). The product has a protein content of 3.03%. The imitation milk from Water Caltrop with a higher amount of xanthan gum results in increased viscousness. The suitable amount of xanthan gum was 0.1 % of the total ingredient. As a result, the product is homogeneous, not separate in layers. Imitation milk product from Water Caltrop was pasteurized at a temperature of 64 ° C for 30 min. As a result, the product can be stored for 9 days at 5±1°C, and the total viable count of microorganisms also passes according to the standard of pasteurized milk. Safe to consume. The developed imitation milk product from Water Caltrop provides 29.22 kcal/100g and the protein, fat, and carbohydrate content were 3.37%, 0.22%, and 3.42%, respectively.

Keywords: Water Caltrop; Imitation Milk; Xanthan Gum

* Corresponding Author. Tel.: +668 6368 3487, E-mail Address: nomjit.s@rmutp.ac.th

1. บทนำ

ประเทศไทยมีผลิตภัณฑ์นมจากสัตว์เป็นแหล่งโปรตีนและแคลเซียมแต่มีผู้บริโภคบางกลุ่มที่มีปัญหาแพ้โปรตีนจากนมวัวหรือมีข้อจำกัดในการดื่มนมวัว ซึ่งเกิดจากร่างกายย่อยน้ำตาลแล็กโทสในนมผิดปกติจากสถิติพบในคนไทยประมาณร้อยละ 3 [1] [2] ดังนั้นผลิตภัณฑ์นมจากพืชจึงได้เข้ามาเป็นผลิตภัณฑ์นมทางเลือกให้แก่ผู้บริโภคหลากหลายชนิด เช่น นมจากถั่วเหลือง นมจากอัลมอนต์ นมจากข้าวโพด และนมจากข้าว คุณสมบัติของนมจากพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันตามชนิด คุณภาพของวัตถุดิบ และกระบวนการผลิต [3] การใช้วัตถุดิบจากพืช อาจใช้ในรูปของการใช้เมล็ดพืชมาผลิตโดยตรง หรืออาจใช้ในรูปของโปรตีนสกัดจากเมล็ดพืชและใบพืช แต่ยังมีปัญหาด้านกลิ่นและรสชาติทำให้ผู้บริโภคบางกลุ่มไม่ยอมรับ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความหลากหลายในการบริโภคผลิตภัณฑ์นม ทำให้เกิดการศึกษาการใช้พืชชนิดอื่น ๆ มาเป็นวัตถุดิบในการผลิต [4] และพัฒนาคุณภาพด้านกลิ่นรสเพื่อให้ผู้บริโภคยอมรับมากขึ้น

กระจับ (Water Caltrop) ชื่อวิทยาศาสตร์ *Trapa bicornis* จัดเป็นพืชพื้นน้ำ ลักษณะของผลหรือฝักเป็นสีดำ เปลือกหนาคล้ายเขาควาง ในประเทศไทยพบในพื้นที่ภาคกลางตามแหล่งน้ำ [5] ในจังหวัดอยุธยา อ่างทอง สุพรรณบุรี และสิงห์บุรี มีทั้งหมด 4 ชนิด คือ กระจับที่มีสองเขา ได้แก่ กระจับเขาแหลมและกระจับเขาทุ่ กระจับที่มีสี่เขา ได้แก่ กระจับและกระจ่อม ทั้งนี้กระจับอุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการและสารอาหาร เช่น วิตามิน โปรตีน ฟอสฟอรัส และแคลเซียม [6] นอกจากนี้กระจับมีคุณสมบัติหวาน เป็นอาหารธาตุเย็น ช่วยบำรุงทารกในครรภ์และบำรุงน้ำนมของมารดาหลังคลอด ทำให้ทารกเจริญเติบโตได้ดี [5] โดยบางพื้นที่จะใช้กระจับแทนหัวและแป้งของถั่วเขียวได้ [6] อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับกระจับ เช่น การศึกษาผลิตภัณฑ์กระจับทอดกรอบและข้าวเกรียบ

จากกระจับ [7] และวิธีการหมักต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งจากกระจับ และมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตเครื่องดื่มจากธัญพืชหลายชนิด เช่น เครื่องดื่มน้ำถั่ว ธัญพืชเสริมปลายข้าวสังขยัด เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากข้าวหอมนิล และน้ำนมถั่วดาวอินคา เป็นต้น

งานวิจัยนี้เล็งเห็นความสำคัญของกระจับ ซึ่งเป็นพืชพื้นบ้าน โดยผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำนมจากกระจับเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ที่อุดมด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์ โดยทำการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำนมจากกระจับ ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการ และศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำนมจากกระจับ เพื่อเป็นองค์ความรู้เผยแพร่สู่ชุมชนโดยเฉพาะในท้องถิ่นที่มีกระจับและผู้สนใจที่จะผลิตเพื่อดื่มภายในครอบครัว อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของกระจับและส่งเสริมให้กระจับมีบทบาทในอุตสาหกรรมอาหารมากขึ้น

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกระจับ

เตรียมกระจับพันธุ์เขาล้อม จากฟาร์มลัดดาการ์เด็น จังหวัดอ่างทอง อายุ 5 เดือน นำกระจับมาปอกเปลือกใช้บริเวณส่วนเนื้อสีขาว หั่นให้มีขนาดเล็ก 3-5 mm จากนั้นนำกระจับดิบมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้าและคาร์โบไฮเดรต (AOAC, 2012) [8] เพื่อประเมินคุณภาพเบื้องต้นในวัตถุดิบ

2.2 ศึกษาอัตราส่วนน้ำกับกระจับในการผลิตผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำนมจากกระจับ

การเตรียมกระจับ นำกระจับ 500 กรัม ไปนึ่งด้วยไอน้ำอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที ปอกเปลือกกระจับส่วนสีดำออกใช้บริเวณส่วนเนื้อสีขาว จากนั้นนำกระจับปั่นผสมกับน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้กระจับต่อน้ำในอัตราส่วน 1:2.0

1:2.5 และ 1:3.0 โดยน้ำหนัก ปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าความเร็วสูง เครื่องหมายการค้า OTTO รุ่น BE-127/127A ประเทศไทยโดยใช้ความเร็วระดับ 3 เวลา 30 วินาที แล้วกรองด้วยผ้าขาวบาง 2 ชั้น นำน้ำกระเจบที่ได้นำไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมี ทำการตรวจวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดค่าสี (Colorimeter) โดยระบบ Hunter Lab (รุ่น CM-3500d ประเทศญี่ปุ่น) แสดงผลในรูปค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) วัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ โดยใช้เครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ (Atago Pocket Refractometer, ประเทศญี่ปุ่น) และความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่อง pH meter (รุ่น PB10 ประเทศเยอรมัน) และวัดค่าความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer (รุ่น RVDV-II+Pro ประเทศสหรัฐอเมริกา) ความเร็วรอบ 50 rpm หัวเข็มเบอร์ 1 และวัดค่าดัชนีการแยกชั้น ตัดแปลงจาก Omuetti and Ajomale (2005) [9] วิเคราะห์โดยเทพลิตภัณฑ์ เลียนแบบน้ำมันจากกระเจบปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ผ่านการปั่นเข้ากันดีในกระบอกตวง แล้วตั้งไว้ในตู้เย็น (4°C) สังเกตการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ในระยะเวลา 3 ชั่วโมง โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomized Design, CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan' New Multiple Range Test (DMRT) กำหนดนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS (IBM Statistics 28) และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการชิมตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่จัดเสิร์ฟในถ้วยชิม แล้วให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-point Hedonic scale) ประเมินผลทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส (ความรู้สึกลิ้นปาก) และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน

จำนวน 50 คน วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ และเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan' New Multiple Range Test (DMRT) กำหนด นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS

2.3 ศึกษาปริมาณแซนแทนกัมที่เหมาะสมต่อการผลิตผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจบ

นำผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจบที่ผ่านการคัดเลือกอัตราส่วนน้ำต่อกระเจบไปทำการศึกษาปริมาณการเสริมแซนแทนกัมเพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันในปริมาณร้อยละ 0 0.1 0.2 และ 0.3 (โดยน้ำหนัก) สังเกตการแยกชั้น และคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะปรากฏเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เกิดการแยกชั้น จากนั้นนำผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจบที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส เช่นเดียวกับข้อ 2.2 โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomized Design, CRD) นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan' New Multiple Range Test (DMRT) กำหนดนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS

2.4 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจบ

นำผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจบสูตรมาตรฐานที่พัฒนาได้มาศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางด้านจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์ โดยการนำน้ำมันจากกระเจบ

บรรจุขณะร้อนในขวดแก้วใสขนาด 180 มิลลิลิตร ปิดฝา แล้วนำไปพาสเจอร์ไรซ์ ที่อุณหภูมิ 64 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที จากนั้นนำไปปรับลดอุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างที่บรรจุในขวดไว้ที่อุณหภูมิ $5 \pm 1^{\circ}$ เซลเซียส ระยะเวลา 15 วัน ทำการสุ่มตัวอย่างมาตรวจสอบทุก ๆ 3 วัน โดยตรวจหาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ปริมาณยีสต์รา และปริมาณโคลิฟอร์ม

2.5 ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการ

นำผลิตภัณฑ์นํ้านมจากกระเจับมาวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต (AOAC, 2012) [8]

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกระเจับ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกระเจับดิบ ได้ผลตามตารางที่ 1 พบว่ากระเจับดิบมีปริมาณความชื้น ร้อยละ 59.71 ไขมัน ร้อยละ 0.30 โปรตีน ร้อยละ 8.87 เถ้า ร้อยละ 1.58 และคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดร้อยละ 27.17 จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบในตัวอย่างพบว่ากระเจับดิบที่มีระยะเวลาเก็บเกี่ยว 5 เดือน นั้น มีปริมาณโปรตีนค่อนข้างสูง โดยมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 3.03 ± 0.22 สอดคล้องกับข้อมูลในงานวิจัยอื่นๆ ที่แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบด้านโปรตีนของกระเจับมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุของระยะเวลาเก็บเกี่ยวที่นานขึ้น กระเจับเป็นพืชน้ำกลุ่มเดียวกับหัว ซึ่งได้มีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย [9] ที่ได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางเคมีและกายภาพของแปงฟลาวร์ และ สตาร์ชจากหัวจิน พบว่านอกจากปริมาณโปรตีนสูงแล้ว ยังมีปริมาณเส้นใย (Crude Fiber) และเถ้ามีปริมาณสูงด้วยเช่นเดียวกัน โดยปริมาณโปรตีนของหัวมีแนวโน้มสูงขึ้นจากอายุการเก็บเกี่ยวที่นานขึ้น

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของกระเจับ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	กระเจับดิบ (ระยะเวลาเก็บ 5 เดือน)
พลังงาน (Kcal)	146.86 $\pm$ 3.08
ความชื้น	59.71 $\pm$ 0.32
ไขมัน	0.30 $\pm$ 0.17
โปรตีน	8.87 $\pm$ 0.05
คาร์โบไฮเดรต	27.17 $\pm$ 0.53
เถ้า	1.58 $\pm$ 0.02

3.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนกระเจับกับน้ำเปล่าในการผลิตผลิตภัณฑ์เลียนแบบนํ้านมจากกระเจับ

จากการศึกษาอัตราส่วนกระเจับกับน้ำเปล่าในการผลิตผลิตภัณฑ์เลียนแบบนํ้านมจากกระเจับ โดยใช้กระเจับต่อนํ้าในอัตราส่วน 1:2.0 1:2.5 และ 1:3.0 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์เลียนแบบนํ้านมจากกระเจับที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวข้นสีขาวแกมเทา ความเข้มข้นจะลดลงเมื่อใช้นํ้าผสมในปริมาณมากขึ้น จากการสังเกตพบว่าเมื่อวางผลิตภัณฑ์เลียนแบบนํ้านมจากกระเจับทิ้งไว้ จะสังเกตเห็นการแยกชั้นออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนบนเป็นสีขาวค่อนข้างใส และส่วนล่างเป็นตะกอนสีขาวแกมเทา (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ผลิตภัณฑ์เลียนแบบนํ้านมจากกระเจับที่ใช้อัตราส่วนกระเจับต่อนํ้า 1:2.0 1:2.5 1:3.0

ผลการศึกษาและคำนวณค่าดัชนีการแยกชั้น (%) พบว่าผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบมีการแยกชั้นในทุกตัวอย่างโดยในอัตราส่วนกระเจี๊ยบต่อน้ำ 1:2.0 มีการแยกชั้นตกตะกอนร้อยละ 1 อัตราส่วนกระเจี๊ยบต่อน้ำ 1:2.5 มีการแยกชั้นตกตะกอนร้อยละ 2 และในอัตราส่วนกระเจี๊ยบต่อน้ำ 1:3.0 มีการแยกชั้นตกตะกอนร้อยละ 5 (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 คุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบที่ใช้อัตราส่วนกระเจี๊ยบต่อน้ำต่างกัน

คุณภาพ	น้ำมันกระเจี๊ยบที่ใช้อัตราส่วนกระเจี๊ยบต่อน้ำต่างกัน (น้ำหนัก:น้ำหนัก)		
	1:2.0	1:2.5	1:3.0
ค่าสี L*	61.64±1.03 ^b	62.37±1.02 ^{ab}	63.80±0.80 ^a
a* ^{ns}	4.76±0.17	4.62±0.10	4.62±0.21
b* ^{ns}	6.39±0.14	6.28±0.11	6.22±0.13
pH	6.45±0.01 ^b	6.52±0.02 ^a	6.53±0.02 ^a
Viscosity (cP)	57.83±2.25 ^a	18.50±0.41 ^b	11.50±0.4 ^c
TSS (Brix)	5.28±0.02 ^a	5.22±0.02 ^b	5.14±0.02 ^c
Separation index (%)	1.00±0.00 ^c	2.00±0.01 ^b	5.00±0.01 ^a
ค่าโปรตีน (%)	3.98±0.07 ^a	3.03±0.22 ^b	2.22±0.17 ^c

หมายเหตุ : ตัวอักษร ^{a b c} ที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน หมายถึงค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบพบว่าปริมาณน้ำที่ต่างกันมีผลทำให้ค่าความสว่าง (L*) มีความต่างกัน โดยเมื่อใช้ปริมาณสกัดมากขึ้น ค่าความสว่าง (L*) จะสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ [10] ที่ได้ศึกษาเรื่องการผลิตเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากข้าวหอมนิล พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้น จะทำให้ค่า L* เพิ่มขึ้น และ [11] ที่ได้ศึกษาน้ำชะครามพร้อมดื่ม พบว่าการใช้น้ำในปริมาณที่มากมีผลทำให้ค่า L* เพิ่มขึ้น ในด้านค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) ไม่มีความแตกต่างกัน ($p > 0.05$) แต่ในด้านค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความข้นหนืด ปริมาณ

ของแข็งที่ละลายในน้ำ และปริมาณโปรตีนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยอัตราส่วนกระเจี๊ยบต่อน้ำที่ 1:2.5 ปริมาณโปรตีนร้อยละ 3.03 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์น้ำมันพาสเจอร์ไรซ์ 2547 ควรมีปริมาณโปรตีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 3.00

ด้านความข้นหนืด และด้านของแข็งที่ละลายน้ำ พบว่าการใช้น้ำที่อัตราส่วนกระเจี๊ยบต่อน้ำ ที่ 1:2.0 มีผลทำให้ค่าความข้นหนืดและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มากที่สุด คือ มีค่าความข้นหนืด 57.83 เซนติพอยต์ และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ 5.28 องศาบริกซ์ ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้น้ำในการสกัดน้ำมันจากกระเจี๊ยบ โดยถ้าใช้น้ำปริมาณน้อยมีผลทำให้ให้น้ำมันจากกระเจี๊ยบที่ได้มีความเข้มข้นสูง ซึ่งมีผลทำให้ค่าความข้นหนืด และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำมีปริมาณสูง ความหนืดของผลิตภัณฑ์มาจากส่วนผสมของกระเจี๊ยบที่ปั่นผสมรวมกันกับน้ำ และมีผลต่อความข้นหนืด ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในกระเจี๊ยบ มีคุณสมบัติที่ช่วยในด้านความหนืดและความคงตัวของแป้ง [12] โดยถ้าใช้น้ำในปริมาณน้อยส่งผลให้ได้ค่าความข้นหนืดสูง และการใช้น้ำในปริมาณมากส่งผลให้มีแนวโน้มของความข้นหนืดลดลง จึงทำให้มีผลต่อความหนืดของกระเจี๊ยบต่อน้ำในอัตราส่วนที่ต่างกัน

ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของน้ำมันกระเจี๊ยบตารางที่ 3 พบว่าปริมาณน้ำที่แตกต่างกันมีผลทำให้คุณภาพทางประสาทสัมผัสมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าสูตรที่ใช้น้ำในอัตราส่วน 1:2.5 ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบเฉลี่ยสูงสุดในด้านลักษณะปรากฏ และเนื้อสัมผัส ($p \leq 0.05$) ค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับความชอบปานกลาง โดยรวมแสดงว่า ลักษณะความข้นหนืดของน้ำมันกระเจี๊ยบที่ได้จากการใช้น้ำในอัตราส่วน 1:2.5 สามารถกลืนได้คล่องคออยู่ในระดับที่ผู้บริโภคยอมรับได้ อีกทั้งการใช้น้ำในอัตราส่วน 1:2.0 นั้น มีผู้ทดสอบได้ให้ข้อเสนอแนะว่า ดื่มแล้วรู้สึก

ขึ้นเกินไป ทำให้รู้สึกฝืดคอ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [13] ซึ่งได้ทำการศึกษาเรื่องการผลิตเครื่องดื่มจากแมคคาเดเมีย พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแมคคาเดเมียสูงขึ้น จะทำให้มี ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำและมีการแขวนลอยมากเกินไป มีความข้น ต้มยากขึ้น และผลิตภัณฑ์เกิดการแยกชั้นได้ง่าย

ตารางที่ 3 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของน้ำนมกระเจับที่มีอัตราส่วนกระเจับต่อน้ำต่างกัน

คุณภาพ	คะแนนความชอบของน้ำนมกระเจับที่มีอัตราส่วนกระเจับ:น้ำ ต่างกัน		
	1:2.0	1:2.5	1:3.0
ลักษณะปรากฏ	6.94±1.36 ^b	7.82±0.75 ^a	7.32±1.13 ^b
สี	7.58±1.00	7.82±0.72	7.86±0.88
กลิ่นรส	7.66±1.06 ^b	7.96±0.81 ^a	7.94±0.87 ^a
รสชาติ	7.00±1.03 ^b	7.76±0.87 ^a	7.48±1.07 ^a
เนื้อสัมผัส	6.58±0.88 ^c	7.86±0.73 ^a	7.24±1.19 ^b
ความชอบรวม	6.66±0.85 ^b	7.84±1.00 ^a	7.72±0.90 ^a

หมายเหตุ : ตัวอักษร ^{a b c} ที่แตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน หมายถึงค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ด้านกลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม การใช้น้ำที่อัตราส่วน 1:2.5 และ 1:3.0 ได้รับการยอมรับมากที่สุด ซึ่งอาจเป็นเพราะผู้ทดสอบชอบน้ำกระเจับที่มีรสชาติไม่เข้มข้นมาก สามารถกลืนได้คล่องคอ และมีกลิ่นรสเฉพาะของกระเจับ ที่เป็นธรรมชาติ ด้านสีพบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบของน้ำนมกระเจับทั้ง 3 สูตร ที่ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) เนื่องจากสีของน้ำนมกระเจับมีสีขาวแกมเทาที่ได้จากสีของกระเจับที่ใช้เป็นส่วนผสม

3.3 ผลการศึกษาปริมาณสารให้ความคงตัวที่เหมาะสมต่อการผลิตผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำนมจากกระเจับ

ผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำนมมักเกิดการแยกชั้นระหว่างส่วนที่เป็นของเหลวและของแข็ง ซึ่งจะสังเกตได้

ชัดเจนมากขึ้นในระหว่างการเก็บ การใส่สารให้ความคงตัวจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ไม่เกิดการแยกชั้น และมีลักษณะปรากฏที่ดีขึ้น และการใส่สารให้ความคงตัวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพทางประสาทสัมผัสให้กับผลิตภัณฑ์อีกด้วย [14]



รูปที่ 2 น้ำนมกระเจับที่เสริมแซนแทนกัมร้อยละ 0 0.1 0.2 และ 0.3

จากการวัดคุณภาพ (ตารางที่ 4) พบว่านมวัวนั้นมีสีขาว จากค่าความสว่าง L^* 94.52 ส่วนผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำนมจากกระเจับมีสีขาวแกมเทา จากการใส่แซนแทนกัมเป็นสารให้ความคงตัวในปริมาณต่างกัน 4 ระดับในผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำนมจากกระเจับ พบว่าส่งผลต่อลักษณะปรากฏด้านสีแตกต่างกันเล็กน้อย โดยผลการวัดค่าสีแดง (+a) และค่าสีเหลือง (+b) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ค่าความสว่าง (L^*) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [15] ที่ได้ศึกษาเรื่องการพัฒนาผลิตภัณฑ์นมถั่วเหลืองผสมน้ำมะม่วงสเตอริไลซ์ พบว่า การเพิ่มปริมาณแซนแทนกัมมากขึ้น ไม่มีผลให้ค่าความสว่างแตกต่างแตกต่างกัน ($p > 0.05$) ส่วนในด้านความเป็น กรด-ด่าง (pH) ด้านปริมาณของแข็งที่ละลายได้พบว่าแต่ละตัวอย่างไม่มีความแตกต่างกัน ในด้านความข้นหนืด ตัวอย่างผลิตภัณฑ์นมวัวมีค่า 7.50 เซนติพอยต์ (cP) ส่วนผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำนมจากกระเจับนั้นค่าความหนืดมีแนวโน้ม

เพิ่มขึ้นตามระดับปริมาณแซนแทนกัมที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับ [15] ที่พัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำนมถั่วเหลืองผสมน้ำมะม่วง สเตอร์ไรซ์พบว่าความหนืดของนมถั่วเหลืองผสมมะม่วงเพิ่มขึ้นจากชุดควบคุม หลังจากการเติมแซนแทนกัม ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างของทุกชุดทดลองไม่มีความแตกต่างกัน สอดคล้องกับ [16] ได้ศึกษาการใช้สารให้ความคงตัวในไอศกรีมนมถั่วเหลือง พบว่าสูตรที่ใช้แซนแทนกัมซึ่งเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่มีคุณสมบัติจับกับน้ำได้ดี ส่งผลให้มี

ความหนืดสูงกว่าชุดควบคุม และการใช้แซนแทนกัมไม่ได้ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง เนื่องจากแซนแทนกัมเป็นไฮโดรคอลลอยด์ชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้ค่อนข้างมาก มีโครงสร้างเป็น Long Chain Polymer ที่ละลายน้ำได้ดีทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็นและพองหรือขยายตัวได้ ทำให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น [17] [18] มีความคงตัวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างและอุณหภูมิ และมีค่าความหนืดสูงเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น ๆ [19] นอกจากนี้การใช้

ตารางที่ 4 คุณภาพทางกายภาพและเคมีของน้ำนมกระเจี๊ยบเสริมแซนแทนกัมปริมาณต่างกัน

คุณภาพ	นมวัว	น้ำนมกระเจี๊ยบที่เสริมแซนแทนกัมปริมาณต่างกัน			
		ร้อยละ 0	ร้อยละ 0.1	ร้อยละ 0.2	ร้อยละ 0.3
Color L ^{*ns}	94.52±0.06	62.74±0.78	63.28±0.77	62.19±0.79	63.53±0.60
a [*]	-3.25±0.01	4.73±0.17 ^a	4.32±0.16 ^b	4.85±0.18 ^a	4.23±0.16 ^b
b [*]	6.07±0.02	6.29±0.13 ^b	6.48±0.11 ^{ab}	6.26±0.13 ^b	6.63±0.08 ^a
pH ^{ns}	6.65±0.01	6.50±0.04	6.49±0.01	6.47±0.01	6.50±0.00
Viscosity (cP)	7.50±0.15	18.50±0.50 ^d	37.33±1.52 ^c	68.90±1.73 ^b	115.33±4.73 ^a
TSS (Brix) ^{ns}	12.87±0.11	5.12±0.08	5.18±0.03	5.20±0.00	5.20±0.09

หมายเหตุ : ตัวอักษร ^{a b c} ที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตัวอักษร ^{ns} ที่กำกับในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 5 คะแนนความชอบเฉลี่ยของน้ำนมกระเจี๊ยบที่ใช้แซนแทนกัมปริมาณต่างกัน

คุณลักษณะ	คะแนนความชอบของน้ำนมกระเจี๊ยบที่เสริมแซนแทนกัมปริมาณต่างกัน			
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 0.1	ร้อยละ 0.2	ร้อยละ 0.3
ลักษณะปรากฏ	6.84±1.09 ^b	7.64±0.75 ^a	7.56±0.70 ^a	6.68±1.02 ^b
สี	7.56±0.99 ^{ab}	7.72±0.78 ^a	7.68±0.87 ^a	7.30±0.89 ^b
กลิ่นรส ^{ns}	7.66±1.06	7.90±0.84	7.78±0.97	7.56±0.95
รสชาติ	6.96±0.95 ^b	7.86±0.73 ^a	7.52±1.13 ^a	6.90±1.20 ^b
เนื้อสัมผัส (ความข้นหนืด)	6.80±0.81 ^c	7.76±0.77 ^a	7.28±1.21 ^b	6.68±1.15 ^c
ความชอบโดยรวม	6.42±0.70 ^c	7.80±1.03 ^a	7.30±0.93 ^b	6.58±0.81 ^c

หมายเหตุ : ตัวอักษร ^{a b c} ที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตัวอักษร ^{ns} ที่กำกับในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ความร้อนทำให้ค่าความหนืดของแซนแทนกัมเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนืดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ พีเอช เวลา ความเข้มข้น และการคน

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส (ตารางที่ 5) พบว่าด้านลักษณะปรากฏ สี และรสชาติ สูตรที่ใช้แซนแทนกัมในปริมาณร้อยละ 0.1 และ 0.2 ได้รับการยอมรับมากที่สุด น้ำนมจากกระเจบที่ให้มีลักษณะปรากฏเป็นสีขาวแกมเทาที่ได้จากสีของกระเจบที่ใช้เป็นส่วนผสม และด้านรสชาติผู้ทดสอบชอบน้ำนมจากกระเจบที่ขึ้นไม่มาก สามารถกลืนได้คล่องคอในระดับผู้บริโภคยอมรับได้ ด้านกลิ่นรสพบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบน้ำนมกระเจบทั้ง 4 สูตรไม่แตกต่างกัน เนื่องจากยังคงมีกลิ่นรสเฉพาะ (กระเจบ) ตามธรรมชาติ

ปริมาณสารให้ความคงตัวแซนแทนกัมมีผลต่อคะแนนด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบโดยรวมสูตรที่ใช้แซนแทนกัมในปริมาณร้อยละ 0.1 สูงที่สุด แต่เมื่อปริมาณแซนแทนกัมเพิ่มขึ้น คะแนนด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมลดลง เนื่องจากผู้ทดสอบรู้สึกว่ามี ความหนืดมากเกินไปเมื่อเพิ่มปริมาณแซนแทนกัม จึงทำให้คะแนนความชอบด้านความหนืดและความชอบโดยรวมลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [20] ซึ่งได้ทำการศึกษาเรื่องการพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำลูกเต๋อย พบว่าเมื่อปริมาณสารให้ความคงตัวคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดและความคงตัวจะเพิ่มขึ้นตาม เช่นเดียวกับผลการวิจัย [21] ซึ่งได้พัฒนาเครื่องดื่มเลียนแบบนมจากแมคคาเดเมีย เมื่อปริมาณแซนแทนกัมเพิ่มขึ้น ทำให้ผู้ทดสอบให้คะแนนการยอมรับลดลง เนื่องจากมีลักษณะความข้นหนืดมากเกินไป

3.4 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำนมจากกระเจบ

นำผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำนมจากกระเจบที่ได้บรรจุขณะร้อนในขวดแก้วใสขนาด 180 มิลลิลิตร ปิดฝา

แล้วนำไปพาสเจอร์ไรซ์ ที่อุณหภูมิ 64 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที จากนั้นนำไปปรับลดอุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส และนำไปเก็บรักษาไว้ที่ตู้เย็น (อุณหภูมิ 5 ± 1 องศาเซลเซียส) จากผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (TPC) และปริมาณยีสต์และราของผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำนมจากกระเจบ ในระยะเวลา 15 วัน ทำการสุ่มตัวอย่างสำหรับตรวจสอบคุณภาพทุก ๆ 3 วัน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ปริมาณของจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์ รา และโคลิฟอร์มในผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำนมจากกระเจบ

ระยะเวลา การเก็บ (วัน)	ปริมาณจุลินทรีย์		
	จุลินทรีย์ ทั้งหมด CFU/ml	ยีสต์ รา CFU/ml	Coliform MPN/100 ml
0	2.11×10^2	< 10	< 1.8
3	3.23×10^3	< 10	< 1.8
6	6.40×10^3	< 10	< 1.8
9	8.89×10^3	< 10	< 1.8
12	3.01×10^4	< 10	< 1.8
15	1.45×10^5	< 10	< 1.8

จากผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (TPC) ปริมาณยีสต์ รา และโคลิฟอร์มของผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำนมจากกระเจบที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ $5\pm 1^\circ\text{C}$ ทุก ๆ 3 วัน (ตารางที่ 6) พบว่าเมื่อเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 9 วัน ตรวจพบปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด 8.89×10^3 CFU/ml ตรวจพบปริมาณยีสต์ รา มีจำนวนน้อยกว่า 10 CFU/ml และปริมาณโคลิฟอร์มมีจำนวนน้อยกว่า 1.8 MPN/100 ml ซึ่งน้อยกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเรื่องน้ำข้าวกล้อง 281/2558 [22] ที่กำหนดให้ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดต้องไม่เกิน 1×10^4 CFU/ml ปริมาณยีสต์ รา ต้องไม่เกิน 100 CFU/ml และปริมาณโคลิฟอร์มต้องไม่เกิน 2.2

MPN/100 ml แต่ในวันที่ 12 ของการเก็บรักษา ตรวจพบปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด 3.01×10^4 CFU/ml เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด จึงได้ยุติการตรวจสอบปริมาณจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบที่เก็บรักษาไว้ 9 วัน ที่อุณหภูมิ 5 ± 1 องศาเซลเซียส ยังคงมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคและไม่นำให้บริโภคภายหลังการเก็บรักษาเกินกว่า 9 วัน

3.5 ผลการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการ

นำผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบที่ผลิตจากอัตราส่วนของกระเจี๊ยบต่อน้ำที่ 1 : 2.5 เสริมปริมาณแซนแทนกัม ร้อยละ 0.1 ไปวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ ปริมาณไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต (ตารางที่ 7) ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบพบว่ามีปริมาณโปรตีนร้อยละ 3.37 เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำมันพาสเจอร์ไรส์ (2547) ที่ควรมีปริมาณโปรตีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 3.00 [23] ผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบมีปริมาณไขมันและคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 0.22 และ 3.42 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าผลิตภัณฑ์นมสดพว่องมันเนยทางการค้า

ตารางที่ 7 คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	นมสด ¹ พว่องมันเนย	นมสด ² พว่องมันเนย	น้ำมันจากกระเจี๊ยบ
พลังงาน (Kcal)	45.00	55.00	29.21
โปรตีน	3.00	3.50	3.37
คาร์โบไฮเดรต	5.50	5.50	3.42
ไขมัน	1.25	2.25	0.22

หมายเหตุ: *อ้างอิงตามฉลากคุณค่าโภชนาการของนมสดทางการค้า ¹ตราฟาร์มัส ²ตราโชคชัย

ผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบให้พลังงานน้อยกว่าผลิตภัณฑ์นมพว่องมันเนยทางการค้า และมีรายงานการวิจัยว่าน้ำมันเลียนแบบสามารถทดแทนนมวัวในด้านคุณค่าทางโภชนาการได้ ด้วยมีโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และ โยอาหาร ต็มแล้วไม่ทำให้เกิดผลข้างเคียง เหมาะสำหรับผู้บริโภคทุกเพศทุกวัย และผู้ที่มีอาการแพ้นมวัวก็สามารถรับประทานได้ [24]

4. สรุป

องค์ประกอบทางเคมีของกระเจี๊ยบดิบมีปริมาณความชื้น ร้อยละ 59.71 ไขมัน ร้อยละ 0.30 โปรตีน ร้อยละ 8.87 เถ้า ร้อยละ 1.58 และคาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 27.17 อัตราส่วนกระเจี๊ยบต่อน้ำที่เหมาะสมในการผลิตคือ 1:2.5 ด้วยมีปริมาณโปรตีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 3.00 การใช้แซนแทนกัมมีผลต่อการเพิ่มความข้นหนืดและเกิดตะกอนแยกชั้นน้อยลง โดยผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบที่เสริมแซนแทนกัมปริมาณร้อยละ 0.1 ได้รับคะแนนความชอบด้านประสาทสัมผัสจากผู้ทดสอบชิมมากที่สุดในทุกด้าน องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบในปริมาณ 100 กรัม ให้พลังงาน 29.21 กิโลแคลอรี มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 3.42 โปรตีน ร้อยละ 3.37 และไขมันร้อยละ 0.22 ผลิตภัณฑ์เลียนแบบน้ำมันจากกระเจี๊ยบเก็บรักษาได้ 9 วัน ที่อุณหภูมิ 5 ± 1 องศาเซลเซียส ยังคงมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่เครื่องมืออุปกรณ์ทำการวิจัย ขอขอบคุณผู้ทดสอบชิมที่สละเวลาและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Che, "Cow milk protein allergy," CMPA, The Pharmaceutical Association of Thailand under Royal Patronage. Bangkok: Mahidol University, 2018.
- [2] Market Thing, Cow's milk allergy, Market thing All right, 2020.
- [3] T. Kitisripanya, "Dairy from plants and the use of sour milk products," 1st ed. Bangkok: Mahidol University, 2018.
- [4] A. Rinphol, N. Luangsang and P. Donmon, "Product development of cereal drink," in *proceedings of 49th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry*, Kasatsart University: Bangkok, 2011, pp. 141-147.
- [5] S. Piti, Body happiness society, 1st Ed. *happy book*: Thailand. 2014.
- [6] Bureau of Nutrition Department of Health Ministry of Public Health. Nutritive Values of Thai food, 3rd ed. Nonthaburi: Ministry of Public Health, 2001.
- [7] P. Karpilanondh, S. Ruthathip and U. Chikhantod, "Frying and crisp crackers products from Water Chestnut," *Agricultural Journal*, vol. 49, no. 2 (Suppl), pp. 257-260, 2018.
- [8] AOAC, Official Methods of Analysis of AOAC International, 19th edition, Association of Analytical Communities: Maryland, 2012.
- [9] O. Omueti and K. Ajmale, "Chemical and sensory attributes of soy-corn milk beverage," *Journal of Biotechnology*, vol. 4, no. 6, pp. 847-851, 2005.
- [10] P. Rujirapisit, "Chemical composition and physio chemical properties of Chinese water Chestnut (Eleocharis Dulcis Trin) Flour," *University of the Thai Chamber of Commerce Journal*, vol. 28 no. 1, pp. 168-178, Jan-Mar. 2008.
- [11] J. Tirasarat and C. Thanomwong, "Production of healthy beverage from Homnil rice," *KKU Science Journal*, vol. 43, no. 3, pp. 395-402, 2015.
- [12] R. Ongsaranakom, "Product development Suaeda maritima ready to drink," M.S. Thesis, Department of Home Economics, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand, 2016.
- [13] K. Sriroth and K. Piyachomkwan, *Flour of technology*, 3rd ed. Bangkok: Kasetsart University, 2003.
- [14] M. Ongsaranakom, S. Subhimaras and N. Chinrahast, "Production of non-dairy beverage from pressed Macadamia nut," *National Graduate Research Conference*, vol. 12, no. 1, pp. 1534-1544, Feb. 2009.
- [15] D. T. Rusch, "Vegetable fat based dairy substitutes," *Food Technology*, vol. 25, 1971, pp. 486-490.
- [16] T. Paseephol, N. Injun and S. Sukrk, "Development of sterilized soy milk mixed with mango juice," *MSU Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 465-471, 2017.
- [17] C. Hongchai and W. Bunchoo. "Effect of stabilizers on the physiochemical properties of soy milk ice cream,"

- Agricultural Science Journal*, vol. 46, no. 3, (Suppl), pp. 405-408, 2015.
- [18] H.D. Graham, *Food Hydrocolloids*, 1st ed. United Kingdom: AVI Publishing company, Inc, 1997.
- [19] E. Dickinson, "Stability and rheological implications of electrostatic milk protein-polysaccharide interaction." *Trend in food science & Technology*. no. 9, pp. 347-354, 1998.
- [20] A. Nusinovitch, *Hydrocolloid application*, 1st ed. New York: blackie academic and Professional, 1997.
- [21] S. Tanopanuwat, Development of pearl beverage, Thesis, Department of Product Development. Kasatsart University, Bangkok, Thailand, 2005.
- [22] THAI Industrial Standards Institute, TISI Standard 738, 2547.
- [23] THAI Community Product Standard, TCPS Standard 281, 2015.
- [24] R. Surakarnkul, P. Unprasert and C. Charoenroongruang, "Production of nutritious rice milk," *food Journal*, vol. 36, pp. 75-84, 2006.

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

การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียของสับฐานสกัดชาใบหม่อนและสับฐานสกัดชาใบหม่อนผสมขมิ้น

ปิยวรรณ พันสี* เจนจิรา สุระ และ กัลย์สุตา ดวงศรีแก้ว

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

321 ถนนนารายณ์มหาราช ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000

รับบทความ 29 มีนาคม 2565 แก้ไขบทความ 3 ตุลาคม 2565 ตอรับบทความ 30 พฤศจิกายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์สับฐานสกัดชาใบหม่อนที่มีส่วนผสมของสมุนไพรในท้องถิ่นจังหวัดลพบุรี ได้แก่ สับฐานสกัดชาใบหม่อน และสับฐานสกัดชาใบหม่อนผสมขมิ้น แล้วศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสับฐาน รวมถึงศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสับฐานด้วยวิธีดีพีพีเอชและฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย ในการทดลองศึกษาเปรียบเทียบสับฐาน 6 สูตร โดยแต่ละสูตรมีส่วนประกอบของเบสสับฐานสกัดชาใบหม่อน 25 กรัม ได้แก่ สับฐานที่มีการเติมสารสกัดชาใบหม่อนที่ได้จากการสกัดชา 10 กรัม ต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร ในปริมาณที่ต่างกันจำนวน 3 สูตร สับฐานผสมขมิ้น สับฐานสกัดชาใบหม่อนและผสมขมิ้น และสับฐานที่ไม่มีการเติมสมุนไพร (ชุดควบคุม) จากผลการทดลองพบว่าสับฐานไม่มีสิ่งแปลกปลอม ค่าสีของสับฐานที่มีส่วนผสมของสารสกัดชาใบหม่อนมีค่า L^* a^* และ b^* เท่ากับ 14.07 ± 1.44 ถึง 19.47 ± 0.14 , -0.05 ± 0.14 ถึง 0.80 ± 0.12 และ 2.13 ± 0.08 ถึง 3.25 ± 0.40 ตามลำดับ ในขณะที่สับฐานที่เติมผงขมิ้นมีค่า L^* a^* และ b^* เท่ากับ 20.06 ± 1.01 , 4.98 ± 0.29 และ 6.52 ± 0.26 ตามลำดับ สับฐานมีค่า pH 9.36 - 9.83 ปริมาตรฟอง 66.33 - 76.67 มิลลิลิตร ความคงทนของฟอง 62.33 - 70.67 มิลลิลิตร ค่าร้อยละการสีก่อน 23.09 $\pm$ 2.15 ถึง 25.08 $\pm$ 1.23 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสับฐานมีค่าร้อยละการยับยั้ง 18.38 $\pm$ 0.93 ถึง 53.36 $\pm$ 0.39 และเทียบกับสารมาตรฐานกรดแอสคอร์บิก คือ 1.25 $\pm$ 0.01 ถึง 3.45 $\pm$ 0.11 AAE/สับฐาน 1 กรัม โดยสับฐานที่มีส่วนผสมของสมุนไพรมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากกว่าสับฐานที่ไม่เติมสมุนไพร และสับฐานสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก *Bacillus cereus* และ *Staphylococcus aureus*

คำสำคัญ : สับฐาน; ชาใบหม่อน; ขมิ้น; ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ; ฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย

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

Study on Antioxidant and Antibacterial Activity of Mulberry Leaf Tea Extract Soap and Mulberry Leaf Tea Extract Mixed with Turmeric Soap

Piyawan Phansi* Janejira Sura and Kansuda Duangsrikaew

Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University

321 Naraimaharat Road, Muang District, Lopburi, 15000, Thailand

Received 29 March 2022; Revised 3 October 2022; Accepted 30 November 2022

Abstract

The objective of this research was to develop glycerin soap products, mulberry leaf tea extract and mulberry leaf tea extract mixed with turmeric soaps, containing herbs of Lopburi province. The physical and other chemical properties of soaps, antioxidant activity tested using DPPH method, and antibacterial activity were studied. Six soap formulations, each of which contained 25 g glycerin soap base, were compared. Three soaps contained varied amount of 10 g/100 mL mulberry tea extract while the others were turmeric powder soap, mulberry tea extract and turmeric powder soap, and the non-herbal soap (control). From the results of the experiment, it was found that the soap had no foreign matter. The color values expressed as L^* , a^* and b^* of the soaps containing mulberry extract were 14.07 ± 1.44 to 19.47 ± 0.14 , -0.05 ± 0.14 to 0.80 ± 0.12 , and 2.13 ± 0.08 to 3.25 ± 0.40 , respectively, while those values of the soap containing turmeric powder were 20.06 ± 1.01 , 4.98 ± 0.29 , and 6.52 ± 0.26 , respectively. The properties of all soaps; pH (9.36 – 9.83), bubble volume (66.33 to 76.67 mL), durability of the bubble (62.33 - 70.67 mL), and erosion percentage (23.09 ± 2.15 to 25.08 ± 1.23 %), were evaluated. The antioxidant activity values of the soaps were in the range of 18.38 ± 0.93 to 53.36 ± 0.39 %, and also expressed as 1.25 ± 0.01 to 3.45 ± 0.11 ascorbic acid equivalents (AAE)/g soap. The herbal-containing soaps had higher antioxidant activity than the non-herbal soap. The soap could inhibit gram-positive bacteria; *Bacillus cereus* and *Staphylococcus aureus*.

Keywords : Soap; Mulberry Leaf Tea; Turmeric; Antioxidant Activity; Antibacterial Activity

* *Corresponding Author. Tel.: +668 3187 0971, E-mail Address: pphansi@gmail.com*

1. บทนำ

สบู่เป็นเครื่องสำอางชนิดหนึ่งที่ใช้ในการทำ ความสะอาดร่างกาย ซึ่งในกระบวนการผลิตสบู่อาจมี การเพิ่มส่วนผสมอื่น ๆ เพื่อให้สบู่มีสรรพคุณตรงตาม ความต้องการของผู้บริโภคมากขึ้น โดยปัจจุบันนิยมใช้ พืชสมุนไพรที่มีอยู่ในธรรมชาติมาเป็นส่วนผสมเพิ่มเติม ในสบู่แทนการใช้สารเคมีสังเคราะห์ พืชสมุนไพรที่ใช้มี สารสำคัญและมีสรรพคุณทางยา รวมถึงมีองค์ประกอบ ของน้ำมันหอมระเหยที่มีกลิ่นเฉพาะ ใช้ในการบำบัดโรค และยังทำให้สบู่มีสีสันสวยงาม นอกจากนี้การล้างมือ ด้วยสบู่ยังช่วยป้องกันโรคได้อีกด้วย [1] เช่น โรค ทางเดินอาหาร และไวรัสโคโรนา 2019 (Coronavirus disease 2019 หรือ COVID-19) เป็นต้น ซึ่งไวรัสโคโรนา 2019 เป็นเชื้อที่ทำอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ มนุษย์และสามารถแพร่จากคนสู่คนได้ ด้วยสถานการณ์ การระบาดของโรค COVID-19 ในปัจจุบันกระจายเป็น วงกว้างมากขึ้นทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ ดังนั้นกระทรวงสาธารณสุขจึงมีมาตรการป้องกันการติด เชื้อและการแพร่ระบาดของเชื้อ เช่น การสวมหน้ากากอนามัย การหลีกเลี่ยงเดินทางไปในพื้นที่เสี่ยง และการ ล้างมือด้วยสบู่อย่างสม่ำเสมอ เป็นต้น [2]-[4] โครงสร้างของสบู่ประกอบด้วยโมเลกุล 2 ส่วน คือ ส่วน ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เมื่อสบู่ละลายในน้ำจะเห็นโครงสร้าง ส่วนที่ชอบน้ำเข้าหาโมเลกุลของน้ำที่ล้อมรอบ ส่วนด้าน ที่ไม่ชอบน้ำจะล้อมรอบไขมันและสิ่งสกปรก ทำให้สิ่ง สกปรกหลุดออกมาและแพร่กระจายอยู่ในน้ำในรูปของ อิมัลชัน (Emulsion) การล้างมือด้วยสบู่และน้ำจึงช่วย ขจัดสิ่งสกปรกและสารคัดหลั่งออกจากบริเวณผิวหนัง ได้ ดังนั้นผลิตภัณฑ์สบู่จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับทุก ครว์เรือน รวมถึงร้านอาหาร ตลาด ห้างสรรพสินค้าต่าง ๆ และการพัฒนาผลิตภัณฑ์สบู่ที่มีส่วนผสมของสมุนไพรใน ท้องถิ่นเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

ต้นหม่อน (*Morus alba* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจ ชนิดหนึ่งของไทยที่นิยมนำมาปลูกเพื่อเลี้ยงไหม ปัจจุบัน

กรมหม่อนไหม กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ซึ่งก่อตั้ง โดยพระราชดำริในสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ ในรัชกาลที่ 9 ได้มีการส่งเสริมการ ปลูกหม่อนมากขึ้นเพราะหม่อนนอกจากจะใช้ในการ เลี้ยงไหมแล้ว ใบหม่อนและผลหม่อนยังสามารถแปรรูป เป็นอาหารเพื่อสุขภาพได้ ซึ่งสารสกัดของใบหม่อนมี องค์ประกอบของสารโพลีฟีนอล มีคุณสมบัติต้านอนุมูล อิสระ [5], [6] ด้านการอักเสบ ป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง และเบาหวาน [7] การแปรรูปใบหม่อนเป็นผลิตภัณฑ์ชา ทำให้สามารถเก็บไว้ได้นานและยังคงคุณค่าทาง โภชนาการสูง ซึ่งผลิตภัณฑ์ชาเป็นที่นิยมบริโภคทั่วโลก เนื่องจากชาแต่ละชนิดมีรสชาติเฉพาะตัวและมี ประโยชน์ต่อสุขภาพ

ปัจจุบันในจังหวัดลพบุรีมีพื้นที่ปลูกหม่อนหลาย พื้นที่ เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มแก่ผลผลิตใบหม่อน จึงได้นำมา แปรรูปเป็นชาใบหม่อนซึ่งสามารถใช้ในการบริโภคและ สกัดเพื่อใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง ในงานวิจัยนี้จึงนำสารสกัดชาใบหม่อนมาเป็นส่วนผสม สบู่ซึ่งจะทำให้ได้สบู่ที่มีส่วนผสมของสมุนไพรที่มีฤทธิ์ ด้านอนุมูลอิสระสูง นอกจากนี้ยังมีสูตรสบู่ที่เติมสารสกัด ชาใบหม่อนและผงขมิ้น เนื่องจากขมิ้นมีองค์ประกอบ ด้วยสารกลุ่มเคอร์คิวมินอยด์ (Curcuminoids) ที่มี การรายงานถึงสรรพคุณรักษาผิว และบำรุงผิว มีฤทธิ์ ด้านอนุมูลอิสระ [8]-[10] ด้านการอักเสบ ด้านเชื้อไวรัส และแบคทีเรีย [10] ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การพัฒนาผลิตภัณฑ์สบู่กลีเซอรินที่มีการเติมสมุนไพร ที่มีในท้องถิ่นจังหวัดลพบุรี ได้แก่ สารสกัดชาใบหม่อนที่มี กลิ่นและสีเฉพาะตัว และสูตรสบู่ชาใบหม่อนผสมผงขมิ้น เพื่อเพิ่มความหลากหลายของสูตรสบู่ หลังจากนั้น ทำการศึกษาคุณสมบัติด้านกายภาพและเคมีของสบู่ ศึกษาฤทธิ์ด้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ด้านเชื้อแบคทีเรีย ของสบู่ที่พัฒนาขึ้น เพื่อเป็นการผลิตสบู่ทางเลือกสำหรับ ใช้ในครัวเรือนและสามารถต่อยอดสร้างรายได้ให้แก่ ชุมชนในอนาคต

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมสารสกัดชาใบหม่อนและขมิ้น

การทำชาใบหม่อนปรับจากวิธีการทำชาใบหม่อนของกรมหม่อนไหม [11] โดยใช้ใบหม่อนออร์แกนิกพันธุ์สกลนคร (*Morus alba* L.) ที่ปลูกในพื้นที่จังหวัดลพบุรี นำมาล้างให้สะอาด หั่นใบหม่อนตามความกว้างของใบเป็นเส้นยาว 2 นิ้ว แล้วนำมาคั่ว หลังจากนั้นนำไปอบด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทดสอบว่าชาใบหม่อนมีความชื้นไม่เกิน 7 % แล้วเก็บในภาชนะที่ปิดสนิทเพื่อป้องกันความชื้น การสกัดชาใบหม่อนทำโดยชั่งชาใบหม่อน 10 กรัม สกัดในน้ำปราศจากไอออน (Sartorius, arium® advance EDI, สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน) 100 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที โดยใช้เตาให้ความร้อนพร้อมกวนสารที่มีโพรบเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิของตัวอย่าง (Hot plate magnetic stirrer, IKA C-MAG HS 7, สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน) หลังจากนั้นกรองด้วยผ้าขาวบางและกระดาษกรอง (Whatman No.1, สหราชอาณาจักร)

ผงขมิ้น (*Curcuma longa* L.) ชี้จากร้านที่จำหน่ายในจังหวัดลพบุรี มีลักษณะแห้งและสีเหลืองเข้ม

2.2 วิธีการทำสบู่

การในงานวิจัยนี้ใช้เบสสบู่กลีเซอรีนชนิดใสในการเตรียมสบู่ 6 สูตร โดยแต่ละสูตรมีส่วนประกอบของเบสสบู่กลีเซอรีน 25 กรัม (ตารางที่ 1) สูตร T1 คือชุดควบคุมประกอบด้วยเบสสบู่กลีเซอรีนที่ไม่มีการเติมสมุนไพร สูตร T2 - T4 คือสบู่ที่มีการเติมสารสกัดชาใบหม่อนปริมาตร 1 มิลลิลิตร 2 มิลลิลิตร และ 3 มิลลิลิตร ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 4, 8 และ 12 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักเบสสบู่กลีเซอรีน ตามลำดับ สูตร T5 คือสบู่เติมผงขมิ้น 0.05 กรัม และสูตร T6 คือสบู่เติมสารสกัดชาใบหม่อน 2 มิลลิลิตร และผงขมิ้น 0.05 กรัม การทำสบู่ทำโดยนำกลีเซอรีนมาหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วละลายกลีเซอรีนด้วย

ไฟอ่อน จากนั้นเติมสมุนไพรที่เตรียมไว้ แล้วคนให้เป็นเนื้อเดียวกัน เทสบู่ลงในแม่พิมพ์สบู่แบบซิลิโคนรูปวงรี ขนาดกว้าง 3.4 เซนติเมตร ยาว 5.5 เซนติเมตร ลึก 2.0 เซนติเมตร รอจนสบู่แห้งแล้วแกะสบู่ออกจากแม่พิมพ์ โดยสบู่แต่ละสูตรทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสบู่

2.3.1 การวิเคราะห์สิ่งแปลกปลอม

การทดสอบสิ่งแปลกปลอมทำโดยการตรวจวินิจฉัยโดยในงานวิจัยนี้จะสังเกตลักษณะของสบู่ด้วยสายตา [12], [13] และส่องด้วยกล้องกล้องสเตอริโอไมโครสโคป (Stereo microscope) (MDX503, Nikon, Japan) กำลังขยาย 10 เท่า

2.3.2 การวิเคราะห์ค่าสีของสบู่

วัดค่าสีของสบู่ทั้งก้อนด้วยเครื่องวัดค่าสี (HunterLab, ColorFlex EZ, สหรัฐอเมริกา)

2.3.3 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ชั่งสบู่ 1 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน เติมน้ำปราศจากไอออนลงในบีกเกอร์ 100 มิลลิลิตร ใส่สบู่ที่ชั่งลงในบีกเกอร์ คนสบู่ให้ละลาย แล้ววัดค่า pH ด้วยเครื่องวัดค่า pH (pH meter) (OHAUS, ST3100-F, สหรัฐอเมริกา) [12], [13]

2.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณฟองและความคงทนของฟอง

ชั่งสบู่ 1 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน เติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 20 มิลลิลิตร ละลายสบู่ จากนั้นเทลงในกระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร ปิดปากกระบอกตวงด้วยพาราฟิล์มเขย่าขึ้นลง 40 ครั้ง บันทึกผลทันที ที่ทิ้งไว้ 5 นาที บันทึกผล [12], [13] โดยคำนวณปริมาณฟองสบู่และความคงทนของฟองสบู่ ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$V_{\text{ฟองสบู่}} = V_{\text{ฟองสบู่ (หลังเขย่าทันที)}} - V_{\text{น้ำ}} \quad (1)$$

ความคงทนของฟองสปู่ (มิลลิลิตร) = $V_{\text{ฟองสปู่ (5 นาที)}} - V_{\text{น้ำ}}$ (2)
โดยที่ V = ปริมาตร (มิลลิลิตร)

2.3.5 การวิเคราะห์การสีกกร่อน

ชั่งสปู่ 10 กรัม บันทึกรับน้ำหนักที่แน่นอน แช่สปู่ลงในน้ำอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที แล้วนำสปู่มาหมุนบริเวณบนฝ่ามือ 40 รอบ หลังจากนั้นล้างฟองทิ้งด้วยน้ำสะอาด 1 ครั้ง ทำซ้ำอีก 3 ครั้ง จากนั้นต้อนแช่สปู่ในน้ำจนถึงการล้างฟองสปู่ แล้วชั่งน้ำหนักสปู่หลังการใช้ [12], [13] คำนวณการสีกกร่อนของสปู่จำนวนโดยสมการที่ 3 ดังนี้

$$\text{การสีกกร่อน (\%)} = [(W_{\text{ก่อน}} - W_{\text{หลัง}})/W_{\text{ก่อน}}] \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ W = น้ำหนักสปู่ (กรัม)

2.4 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสปู่ด้วยวิธีดีพีพีเอช

ชั่งสปู่ 5 กรัม บดให้ละเอียด แล้วเติมเอทานอล (Lab Scan, ประเทศไอร์แลนด์) 10 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง [14] หลังจากนั้นกรองสารละลายด้วยแผ่นเยื่อกรองที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร (Cellulose acetate membrane, Satorious stedim biotech, สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน) แล้วนำสารละลายที่กรองได้วัดฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีดีพีพีเอช (DPPH method) การเตรียมสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อลิตร ทำโดยชั่ง DPPH (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) (Sigma-Aldrich, สหรัฐอเมริกา) 1.96 มิลลิกรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยเมทานอล (Lab Scan, ประเทศไอร์แลนด์) จนครบ 50 มิลลิลิตร ในการทดลอง เติมสารละลาย DPPH ปริมาตร 200 ไมโครลิตร และเติมสารมาตรฐานหรือสารละลายสปู่ หลังจากนั้นปรับปริมาตรเป็น 3 มิลลิลิตร ด้วยเมทานอล เก็บสารละลายไว้ในมืดเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Thermo Scientific, Evolution 201 UV-Visible Spectrophotometer, สหรัฐอเมริกา) ที่ความยาวคลื่น

517 นาโนเมตร คำนวณค่าร้อยละการต้านอนุมูลอิสระ (% Radical scavenging) โดยใช้สมการที่ (4)

$$\text{Radical scavenging (\%)} = [(A_0 - A_s)/A_0] \times 100 \quad (4)$$

โดยที่ A_0 = ค่าการดูดกลืนแสงตั้งต้น

A_s = ค่าการดูดกลืนแสงหลังจากเติมสารตัวอย่าง

หลังจากนั้นเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับกราฟมาตรฐานการต้านอนุมูลอิสระของกรดแอสคอร์บิก (Chem-Supply, เครือรัฐออสเตรเลีย) โดยเตรียมความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก 1 - 6 มิลลิกรัมต่อลิตร รายงานผลฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเป็นค่า ascorbic acid equivalents (AAE) ต่อน้ำหนักสปู่ 1 กรัม [15], [16]

2.5 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียของสปู่ 5 ชนิด ด้วยวิธี Agar diffusion แบ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก 2 ชนิด ได้แก่ *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus* และแบคทีเรียแกรมลบ 3 ชนิด ได้แก่ *Escherichia coli*, *Salmonella Typhimurium* และ *Pseudomonas aeruginosa* การเตรียมสารละลายสปู่เตรียมโดยชั่งสปู่ 0.4 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 9.6 มิลลิลิตร การทดสอบความสามารถในการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียด้วยสารละลายสปู่ ทดสอบโดยการเชื่อมเชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิดที่เพาะเลี้ยงเป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง ละลายในสารละลายน้ำเกลือ 0.85 % ปรับความขุ่นให้ได้เท่ากับ 0.5 McFarland Standard จากนั้นใช้ไม้พ่นสำลีปลอดเชื้อแตะในสารละลายแบคทีเรียแล้วเชื่อมเชื้อลงบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ Trypticase soy agar (TSA) แล้วเจาะอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยที่เจาะจุกก๊อก (Cork borer) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ปิเปิดน้ำกลั่น (ชุดควบคุม) และสารละลายสปู่ที่เตรียมไว้ลงในหลุม หลุมละ 20 ไมโครลิตร หลังจากนั้นนำไปบ่มเพาะเชื้อในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ววัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวงใส (Mean

diameter of clear zone) [17] ด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์โดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ตำแหน่ง

2.6 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA analysis) เปรียบเทียบสิ่งทดลองทั้งหมดที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Duncan's test โดยใช้โปรแกรม SPSS Statistics 25 (IBM, สหรัฐอเมริกา)

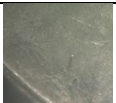
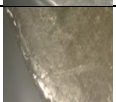
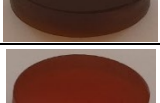
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสบู่

3.3.1 ผลการวิเคราะห์สิ่งแปลกปลอม

ลักษณะของสบู่ทั้ง 6 สูตร (T1 - T6) แสดงในตารางที่ 1 จากการสังเกตด้วยการตรวจพินิจด้วยสายตาแล้วถ่ายรูปด้วยกล้องมือถือ (Samsung, Galaxy A30s, เกาหลี) และรูปจากกล้องสเตอริโอไมโครสโคปกำลังขยาย 10 เท่า สามารถเห็นรายละเอียดของก้อนสบู่มากขึ้น พบว่าสบู่ทั้ง 6 สูตร ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของสบู่และลักษณะของสบู่

สูตรสบู่	กลีเซอริน (กรัม)	สารสกัดชาใบหม่อน (มิลลิลิตร)	ไขมัน (กรัม)	ลักษณะสบู่จากกล้องมือถือ	ลักษณะสบู่จากกล้องสเตอริโอไมโครสโคป
T1	25	-	-		
T2	25	1	-		
T3	25	2	-		
T4	25	3	-		
T5	25	-	0.05		
T6	25	2	0.05		

ที่ไม่ใช่ส่วนประกอบของสบู่ ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน สบู่ก้อนกลีเซอริน มพข 665/2553 [18] และจากสังเกตด้วยกล้องสเตอริโอไมโครสโคปพบฟองเล็ก ๆ ปริมาณเล็กน้อยแทรกบางจุดที่ผิวสบู่ เกิดจากขั้นตอนการละลายสบู่กลีเซอรินและ

การคนกลีเซอรินกับสบู่นำไปให้เข้ากัน ซึ่งการเกิดฟองลดได้โดยการละลายสบู่ด้วยไฟอ่อน ๆ และคนเบา ๆ อย่างไรก็ตามฟองที่แทรกในปริมาณน้อยนี้ไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสบู่

3.3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าสีของสบู

วัดค่าสีของสบู่ด้วยเครื่องวัดค่าสี (Colorimeter) บันทึกค่า L^* , a^* , b^* ($n = 3$) ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าสบู่ที่เติมสมสารสกัดชาใบหม่อนทั้ง 3 สูตร (T2 – T4) สูตรมีค่า L^* อยู่ระหว่าง 14.07 ± 1.44 ถึง 19.47 ± 0.14 ค่า a^* อยู่ระหว่าง -0.05 ± 0.14 ถึง 0.80 ± 0.12 และค่า b^* อยู่ระหว่าง 2.13 ± 0.08 ถึง 3.25 ± 0.40 แสดงว่าสบู่มีความสว่างเนื่องจากเป็นสบู่ใสและมีสีออกทั้งโทนสีแดง เขียว และเหลือง ในขณะที่สบู่ที่มีการเติมผงขมิ้นอย่างเดียว (T5) จะได้สบู่ออกโทนสีแดงเหลือง ($L^* = 20.06 \pm 1.01$, $a^* = 4.98 \pm 0.29$, $b^* = 6.52 \pm 0.26$) และสบู่สูตร T6 ที่มีการเติมผงขมิ้น 0.05 กรัม และสารสกัดชาใบหม่อน 2 มิลลิลิตร ได้โทนสีสบู่แดงเหลืองที่ลดลง ($L^* = 14.74 \pm 0.74$, $a^* = 0.82 \pm 0.04$, $b^* = 2.01 \pm 0.31$) ในขณะที่สบู่กลีเซอรินที่เป็นชุดควบคุมซึ่งเป็นสบู่ใสมีค่า $L^* = 37.34 \pm 1.05$, $a^* = -0.88 \pm 0.14$ $b^* = -1.31 \pm 0.56$

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าสีของสบู่

สูตร สบู่	$L^* \pm SD$	$a^* \pm SD$	$b^* \pm SD$
T1	37.34 ± 1.05	-0.88 ± 0.14	-1.31 ± 0.56
T2	19.47 ± 0.14	0.80 ± 0.12	3.25 ± 0.40
T3	14.07 ± 1.44	0.49 ± 0.20	2.62 ± 0.43
T4	14.97 ± 1.39	-0.05 ± 0.14	2.13 ± 0.08
T5	20.06 ± 1.01	4.98 ± 0.29	6.52 ± 0.26
T6	14.74 ± 0.74	0.82 ± 0.04	2.01 ± 0.31

3.3.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

จากการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือ pH โดยใช้เครื่องวัดค่า pH วัดพบว่าค่า pH ของผลิตภัณฑ์สบู่มีค่า 9.36 -9.83 (ตารางที่ 3) ซึ่งอยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์สบู่ที่ควรมีค่า pH อยู่ระหว่าง 8.00 - 10.00 เช่น มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 94/2552 [12], [13] และยังสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ เช่น รุ่งเรือง งาหอม และคณะ [12] ทดสอบค่า pH ของ

สบู่ที่มีส่วนผสมของดาวเรือง ดินภูเขาไฟ และหินภูเขาไฟ มีค่า pH 9.29 - 9.53 พัชราภรณ์ ฐิตินวงศ์เศวต และคณะ [17] พัฒนาผลิตภัณฑ์สบู่ที่มีส่วนผสมของสารสกัดหยาบจากผลมะขามป้อม สบู่มีค่า pH 8.00 - 8.70 และสอดคล้องกับงานวิจัยของสมฤดี สังขานและคณะ [14] พัฒนาผลิตภัณฑ์สบู่ที่มีส่วนผสมของว่านหางจระเข้และน้ำผึ้งพบว่าสบู่มีค่า pH 9.23

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่า pH ปริมาตรฟอง ความคงทนของฟอง และค่าร้อยละการสีกกร่อนของสบู่

สูตร สบู่	pH $\pm$ SD	ปริมาตร ฟอง (มิลลิลิตร) $\pm$ SD	ความคงทน ของฟอง (มิลลิลิตร) $\pm$ SD	การสีก กร่อน (ร้อยละ) $\pm$ SD
T1	9.36 ± 0.02	76.67 ± 1.53	70.67 ± 1.15	25.08 ± 1.23
T2	9.63 ± 0.05	70.67 ± 6.11	63.33 ± 1.53	23.09 ± 2.15
T3	9.83 ± 0.07	71.67 ± 4.16	63.00 ± 1.00	24.90 ± 2.38
T4	9.83 ± 0.12	66.33 ± 1.15	62.33 ± 2.08	23.17 ± 1.53
T5	9.75 ± 0.08	73.33 ± 1.53	68.00 ± 2.65	24.09 ± 2.33
T6	9.67 ± 0.04	70.33 ± 0.58	63.67 ± 1.53	23.19 ± 1.34

3.3.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาตรฟองและความคงทนของฟอง

ผลการทดสอบปริมาตรฟองและความคงทนของฟองของสบู่พบว่าปริมาตรฟองสบู่ทั้ง 6 สูตร คือ 66.33 - 76.67 มิลลิลิตร และความคงทนของฟอง คือ 62.33 - 70.67 มิลลิลิตร (ตารางที่ 3) ซึ่งสบู่กลีเซอรินชุดควบคุมที่ไม่ได้เติมสมุนไพรมีค่าปริมาตรฟองและความคงทนของฟองสูงที่สุด และสบู่กลีเซอรินที่มีการเติมสารสกัดชาใบหม่อน 3 มิลลิลิตร มีค่าปริมาตรฟองและความ

คงทนของฟองต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามปริมาณฟองและความคงทนของฟองของสบู่ทั้ง 6 สูตรถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ เช่น รุ่งเรือง จาหอม และคณะ รายงานค่าปริมาตรฟองของสบู่ถ่านกะลามะพร้าวร่วมกับว่านตาลเดี่ยวและย่านาง อยู่ระหว่าง 68.33 - 80.67 มิลลิลิตร และค่าความคงทนของฟอง 64.67 - 75.00 มิลลิลิตร [13] และงานวิจัยของพัชรภรณ์ ฐิตวิเศษเสวต และคณะ [17] พบว่าสบู่ผสมการสกัดผลมะขามป้อมมีปริมาตรของฟองสบู่ที่ผสมสารสกัดชั้นเอทิลอะซิเตตเท่ากับ 60 มิลลิลิตร และสบู่ที่ผสมสารสกัดชั้นบิวทานอลมีปริมาตรของฟองเท่ากับ 75 มิลลิลิตร

3.3.5 ผลการวิเคราะห์การสีกร่อน

ค่าร้อยละการสีกร่อนของสบู่ทั้ง 6 สูตร มีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ระหว่างร้อยละ 23.09 - 24.90 ดังแสดงในตารางที่ 3 ค่าร้อยละการสีกร่อนของสบู่ใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น ๆ เช่น สบู่ที่มีส่วนผสมของดาวเรือง ดินภูเขาไฟ และหินภูเขาไฟ มีค่าร้อยละการสีกร่อน 11.25 - 15.09 [12] สบู่ถ่านกะลามะพร้าวร่วมกับว่านตาลเดี่ยวและย่านางมีค่าร้อยละการสีกร่อน 40.65 - 47.01 [13]

3.2 ผลการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสบู่ด้วยวิธีดีพีพีเอช

จากการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสบู่ด้วยวิธีดีพีพีเอช และจากการเปรียบเทียบร้อยละฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสบู่ทั้ง 6 สูตร โดยใช้ ANOVA analysis พบว่าสบู่ทั้ง 6 สูตร มีความแตกต่างทางสถิติ ($p < 0.05$) และจาก Duncan's test พบว่าสามารถจัดความแตกต่างของสบู่ได้ทั้งหมด 6 กลุ่ม (อักษร a-f) สบู่ที่มีการเติมสมุนไพรสารสกัดชาใบหม่อนและขมิ้นมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าสบู่ชุดควบคุม โดยสบู่ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากที่สุดคือสูตรสบู่ที่เติมสารสกัดชาใบ

หม่อน 2 มิลลิลิตร และผงขมิ้น 0.05 กรัม (T6) และจากผลการทดลองในตารางที่ 4 พบว่าเมื่อเติมสารสกัดชาใบหม่อนในปริมาณมากขึ้น สบู่จะมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากขึ้น (T2 - T4) และสบู่ที่มีการเติมผงขมิ้นลงในสบู่ช่วยเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสบู่ (T6) เมื่อเปรียบเทียบกับสบู่ที่มีการเติมเฉพาะสารสกัดชาใบหม่อนในปริมาณที่เท่ากัน (T3) ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของชุดควบคุม (T1) อาจมาจากส่วนผสมของเบสสบู่กลีเซอรีนซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือกลีเซอรีนและน้ำมันจากพืชที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ สามารถให้โปรตอนแก่อนุมูลอิสระ DPPH[•] ได้ [1]

ตารางที่ 4 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสบู่

สูตรสบู่	% Radical scavenging $\pm$ SD	AAE/สบู่ 1 กรัม $\pm$ SD
T1	18.38 $\pm$ 0.93 ^f	1.25 $\pm$ 0.01
T2	23.29 $\pm$ 0.40 ^e	1.63 $\pm$ 0.05
T3	26.13 $\pm$ 0.23 ^d	1.69 $\pm$ 0.10
T4	32.28 $\pm$ 0.82 ^b	2.11 $\pm$ 0.07
T5	30.39 $\pm$ 0.96 ^c	2.10 $\pm$ 0.16
T6	53.36 $\pm$ 0.39 ^a	3.45 $\pm$ 0.11

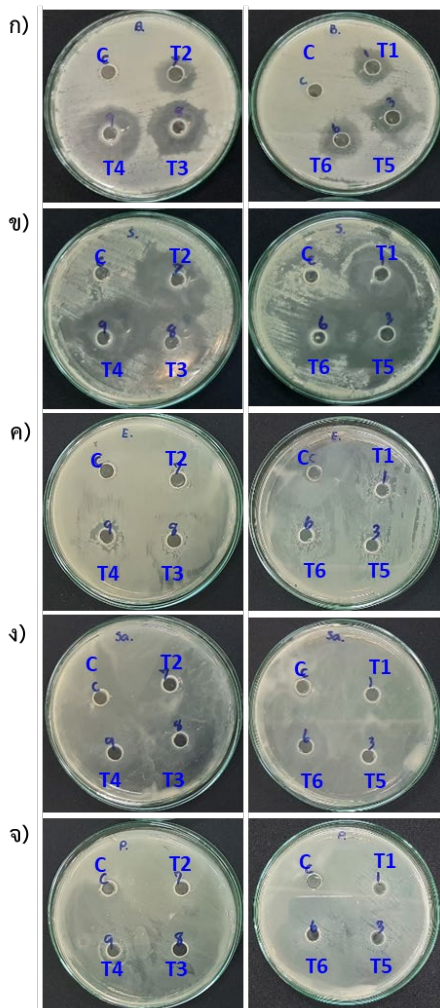
ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 3)

^{a-f} แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ของค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกัน

3.3 ผลการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย

จากผลการทดลองพบว่าสบู่กลีเซอรีนทั้ง 6 สูตร (T1 - T6) สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *B. cereus* และ *S. aureus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวกแต่ไม่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมลบทั้ง 3 ชนิด โดยสังเกตจากการเกิดโซนใสรอบหลุมสารละลายสบู่แต่ละชนิด ถ้าสารละลายสบู่ชนิดใดมีโซนใสเกิดขึ้น แสดงว่าสบู่ชนิดนั้นสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่ทดสอบได้ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ

พัชรารณ ฐิตินวงศ์เสวต และคณะ [17] ที่ศึกษาฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียของสบู่ที่มีส่วนผสมของสารสกัดหยาบจากผลมะขามป้อม พบว่าสบู่สามารถต้านเชื้อแบคทีเรีย แกรมบวก (*S. aureus*) ได้ดีกว่าเชื้อแบคทีเรีย แกรมลบ (*E. coli*) เนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบมีเนื้อเยื่อหุ้มชั้นนอกที่สามารถกั้นการซึมผ่านของสารได้ดี ขณะที่แบคทีเรียแกรมบวกไม่มีเนื้อเยื่อหุ้มชั้นนอก จึงมีฤทธิ์ต้านทานสาร ต่าง ๆ ได้น้อยกว่าแบคทีเรียแกรมลบ [19]



รูปที่ 1 ฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียของสบู่ ก) *B. Cereus* ข) *S. aureus* ค) *E. coli* ง) *S. Typhimurium* จ) *P. aeruginosa* โดยที่ C คือน้ำกลั่น และ T1 – T6 คือสารละลายสบู่

จากข้อมูลในตารางที่ 5 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงใสในการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกของสบู่แต่ละสูตร จากการเปรียบเทียบความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียของสบู่ทั้ง 6 สูตร โดยใช้ ANOVA analysis และวิเคราะห์ความต่างด้วย Duncan's test พบว่าสบู่ที่มีส่วนผสมของสารสกัดชาใบหม่อนมีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกสูงกว่า สบู่กลีเซอรินใสที่ไม่เติมสมุนไพร โดยสบู่สูตร T4 ซึ่งเติมสารสกัดชาใบหม่อนมากที่สุดมีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียทั้ง *B. Cereus* และ *S. aureus* มากที่สุด

ตารางที่ 5 ฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกของสบู่

สูตรสบู่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวงใส (มิลลิเมตร $\pm$ SD)	
	<i>B. cereus</i>	<i>S. aureus</i>
T1	17.31 $\pm$ 0.50 ^d	19.30 $\pm$ 1.80 ^d
T2	21.47 $\pm$ 3.09 ^c	24.56 $\pm$ 2.09 ^b
T3	25.19 $\pm$ 0.98 ^b	23.04 $\pm$ 2.04 ^{cd}
T4	27.27 $\pm$ 2.31 ^a	28.90 $\pm$ 1.00 ^a
T5	19.38 $\pm$ 0.27 ^{cd}	22.07 $\pm$ 1.72 ^{bcd}
T6	19.10 $\pm$ 0.58 ^{cd}	20.88 $\pm$ 1.22 ^{cd}

ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 3)

^{a-d} แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ของค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกัน

4. สรุป

สบู่กลีเซอรินที่มีส่วนผสมของสมุนไพร ได้แก่ สบู่ผสมสารสกัดชาใบหม่อน สบู่ผสมผงขมิ้น และสบู่ผสมสารสกัดชาใบหม่อนและผงขมิ้น เป็นสบู่ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าสบู่ที่ไม่มีการเติมสมุนไพร โดยสบู่ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากที่สุดคือสูตรสบู่ที่เติมสารสกัดชาใบหม่อน 2 มิลลิลิตร และผงขมิ้นชั้น 0.05 กรัม (T6) มีค่าร้อยละการต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ 53.36 ± 0.39 และเมื่อเทียบกับสารมาตรฐานกรดแอสคอร์บิกมีค่าเท่ากับ 3.45 ± 0.11 AAE ต่อสบู่ 1 กรัม และสบู่ทุกสูตรมีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก ได้แก่ *B. cereus*

และ *S. aureus* โดยที่สปู่สูตรเดิมสารสกัดชาใบหม่อน 3 มิลลิกรัม (T4) มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียมากที่สุด สปู่เหล่านี้ที่ไม่มีสิ่งแปลกปลอม มีค่าปริมาณฟอง ความคงทนของฟอง และร้อยละการสีกกร่อน และค่า pH อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของสปู่ก่อน นอกจากนี้การเติมสมุนไพรในสปู่ในอัตราส่วนที่ต่างกันยังได้ทำให้ได้เอนไซม์ของสปู่ที่หลากหลาย เป็นการเพิ่มสีสันและความหลากหลายให้แก่ผู้บริโภค ดังนั้นสปู่สมุนไพรที่มีการเติมสารสกัดชาใบหม่อนและผงขมิ้นซึ่งเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น จึงเป็นสปู่ทางเลือกที่มีคุณภาพที่ควรส่งเสริมให้มีการผลิตใช้ในครัวเรือนและยังสามารถต่อยอดทำจำหน่ายในอนาคตได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนวิจัยจาก มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี (ปีงบประมาณ 2565) ที่ให้แก่ ผศ.ดร.ปิยวรรณ พันสี และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรีที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. R. Chirani, E. Kowsari, T. Teymourian and S. Ramakrishna, "Environmental impact of increased soap consumption during COVID-19 pandemic: Biodegradable soap production and sustainable packaging", *Science of the Total Environment*, vol. 796, no. 149013, pp. 1-11, 2021.
- [2] J. Siriboriruk and S. Prueksaritanond, "COVID-19," *BJM*, vol. 7, no. 1, pp. 89-95, Jan. – Jun. 2020.
- [3] N. Chaitiang, "Preventive measures for newly emerging COVID 19 infection," *Public Health Policy & Law Journal*, vol.7, no. 3, pp. 541-553, Sep. - Dec. 2021.
- [4] N. Chamchoi, A. Bulsathaporn and C. Bunyagidj, "COVID-19: Prevention under Environmental Health Perspective" *Journal of Health Science*, vol. 30, pp. 376-388, Jul. – Aug. 2021.
- [5] N. Methaakkharadecha and A. Srisopa, "Phenolic contents and antioxidant activities of mulberry leaf tea and water soluble mulberry leaf tea powder," *Thai Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 230-242, Mar. – Apr. 2020.
- [6] C. Thongkham, T. Techakriengkrai, R. Kongkachuichai, and R. Charoensiri, "Antioxidant activities and polyphenol compounds in snack products fortified with mulberry leaf powder," *RMUTP Research Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 57-71, Jul.-Dec. 2020.
- [7] X. He, J. Fang, Y. Ruan, X. Wang, Y. Sun, N. Wu, Z. Zhao, Y. Chang, N. Ning, H. Guo, and L. Huang, "Structures, bioactivities and future prospective of polysaccharides from *Morus alba* (white mulberry): A review," *Food Chemistry*, vol. 245, pp. 899-910, 2018.
- [8] P. Thammapat, W. Saenmahachai, S. Boryai and K. Ponkham, "Effects of far-infrared and hot air drying methods on physical chemical and antioxidant properties of turmeric (*Curcuma longa* L.)," *Prawarun Agricultural Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 8-15, 2021.

- [9] Z. Stanić, "Curcumin, a Compound from Natural Sources, a True Scientific Challenge –A Review," *Plant Foods for Human Nutrition*, vol. 72, no. 1, pp. 1-12, 2017.
- [10] Z. Rafiee, M. Nejatian, M. Daeihamed, S. M. Jafaria, "Application of curcumin-loaded nanocarriers for food, drug and cosmetic purposes," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 88, pp. 445-458, 2019.
- [11] *The queen sirikit institute of sericulture office of the permanent secretary, "Mulberry leaf tea for industrial production," Ministry of agriculture and cooperatives*, 2014.
- [12] R. Ngahom, M. Namussika and S. Boonshoo, "Producing marigold, volcanic soil, and rock soap," *journal of science and technology*, vol. 4, no. 2, pp. 27-39, Jul. - Dec. 2020.
- [13] R. Ngahom and J. Suebkumpet, "Coconut shell charcoal soap mixed with *Hypoxis aurea* and *Tiliacora triandra*," *journal of science and technology*, vol. 2, no. 2, pp. 37-50, Jul. - Dec. 2018.
- [14] S. Sangkao, A. Khwanwong, N. Khonthong, K. Jaidee, N. Chumruay, A. Pachai, M. Meepriruk and N. Buadee, "Antioxidant activity, ascorbic acid content and the consumer satisfaction of aloe vera mixed honey soap : Phayaprai herbs Amphoe Muang," *The Golden Teak : Science and Technology Journal*, vol. 4, pp. 119-126, Jan. – Jun. 2017.
- [15] P. Phansi, M. Som-am and P. Sanosalung, "A Study on free radical scavenging activity of local vegetables in Lopburi province by DPPH assay," *Sri-Ayutthaya Cluster 9th, Rajabhat University National Conference*, pp. 387-396, 18-19 Oct. 2018.
- [16] P. Phansi, P. Tumma, C. Thuankhunthod, K. Danchana and V. Cerdà, "Development of a digital microscope spectrophotometric system for determination of the antioxidant activity and total phenolic content in teas," *Analytical Letters*, vol. 54, no. 7, pp. 2727–2735, 2021.
- [17] P. Thitiwongsawet, S. Wongjanla and W. Jandawong, "Antibacterial soaps containing the crude extracts of *Phyllanthus Emblica* Linn. fruits.," *Srinakarinwirot University (Journal of Science and Technology)*, vol. 8, no. 15, pp. 27-39, Jan. – Jun. 2016.
- [18] Thai Industrial standard Institute, "glycerin bar soap (665/2553)," *Ministry of Industry*, pp. 1-5, 2010.
- [19] X. Liu, M. Zhao, W. Luo, B. Yang and Y. Jiang, "Identification of volatile components in *Phyllanthus emblica* L. and their antimicrobial activity," *Journal of Medicinal Food*, vol. 2, no. 12, pp. 423–428, 2009.

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

การออกแบบและประเมินสมรรถนะชุดทำน้ำร้อนและน้ำเย็นแบบเคลื่อนที่

นัทธีธนนท์ พงษ์พานิช และ สิทธิเดช เพชรราช*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยพะเยา

19 ตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

รับบทความ 7 มีนาคม 2565 แก้ไขบทความ 10 ตุลาคม 2565 ตอรับบทความ 30 พฤศจิกายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและทดสอบสมรรถนะของเครื่องทำน้ำร้อนและน้ำเย็นต้นแบบ โดยมุ่งเน้นการใช้ประโยชน์จากด้านร้อน (คอนเดนเซอร์) และด้านเย็น (อีวาพอเรเตอร์) ในการทำน้ำร้อนและน้ำเย็นด้วยระบบอัดไอ ที่ใช้สารทำความเย็น R22 โดยการออกแบบคำนึงถึงน้ำหนักและความสามารถในการเคลื่อนที่ของชุดอุปกรณ์เพื่อใช้งาน จึงกำหนดให้ชุดอุปกรณ์มีน้ำหนักรวมไม่เกิน 100 กิโลกรัม เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย และออกแบบให้ชุดอุปกรณ์สามารถทำน้ำร้อนและน้ำเย็นได้ไม่ต่ำกว่า 20 ลิตร โดยทำน้ำร้อนได้ที่อุณหภูมิสูงสุดไม่ต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส และทำน้ำเย็นได้ที่อุณหภูมิต่ำสุดอย่างน้อยไม่เกิน 7 องศาเซลเซียส ผลจากการทดสอบชุดอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถทำน้ำร้อนและน้ำเย็นได้ตามข้อกำหนด โดยมีน้ำหนักรวมประมาณ 85 กิโลกรัม สำหรับการทดสอบสมรรถนะของเครื่องต้นแบบเพื่อประเมินจากรูปแบบการใช้ประโยชน์ของน้ำร้อนและน้ำเย็น โดยทดสอบในอัตราส่วนใช้งานน้ำร้อนต่อน้ำเย็น 10 ลิตร/10 ลิตร, 20 ลิตร/20 ลิตร, 20 ลิตร/30 ลิตร และ 20 ลิตร/40 ลิตร พบว่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) รวมของการใช้ประโยชน์ของอุปกรณ์เฉลี่ยสูงสุด 3.85 ที่สัดส่วนน้ำร้อนต่อน้ำเย็น 20:20 ลิตร โดยได้น้ำร้อนและน้ำเย็นตามอุณหภูมิกำหนด เครื่องต้นแบบมีอัตราการทำน้ำร้อนสูงสุด 0.99 ลิตร/นาที่ และอัตราทำน้ำเย็นสูงสุด 0.73 ลิตร/นาที่ มีต้นทุนพลังงานต่ำสุด 0.028 บาท/ลิตร

คำสำคัญ : ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ; น้ำร้อนและน้ำเย็น; สารทำความเย็น; สัมประสิทธิ์สมรรถนะ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 1297 4004, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: sittidech.pe@gmail.com

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

A Design and Performance Assessment of Mobile Hot and Chill Water Set

Nuttanon Pongpanit and Sittidech Petcharat*

Faculty of Mechanical Engineering, University of Phayao

19 Mae Ka, Mueang District, Phayao 56000

Received 7 March 2022; Revised 10 October 2022; Accepted 30 November 2022

Abstract

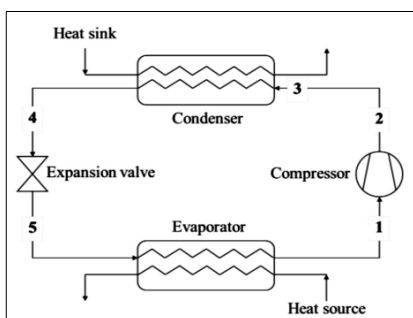
This paper aimed to design and test the efficiency of a hot and chill water machine using a condenser and evaporator to make hot and chill water by vapor compression system of which type of refrigerant is R-22. The weight and maneuverability of the machine have been taken into consideration with a total weight of not more than 100 kilograms for ease of movement. The machine is designed to heat no less than 20 liters of hot and chilly water; hot water at a maximum temperature of not less than 50 degrees Celsius, and cold water at a minimum temperature of at least 7 degrees Celsius. The result of the test revealed that the machine can make twenty liters of hot water and 40 liters of cold water as required with a total weight of approximately 85 kilograms. For the performance testing of the prototype to evaluate the utilization patterns of hot and cold water by testing in hot water to cold water ratio of 10 liters/10 liters, 20 /20, 20 /30, and 20 /40 respectively, it was found that the total coefficient of performance (COP) of the average equipment utilization was up to 3.85 at a ratio of 20:20 liters of hot water to cold water. Hot and cold water is obtained at the specified temperature. The prototype has a maximum water heating rate of 0.99 /min. and a water chilling rate of up to 0.73 /min. The minimum energy cost is 0.028 baht/liter.

Keywords : Vaper Compression System; Hot and Chill Water; Refrigerant; COP

* Corresponding Author. Tel.: +66 1297 4004, E-mail Address: sittidech.pe@gmail.com

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากน้ำร้อนและน้ำเย็น ทั้งในภาคธุรกิจ ภาคอุตสาหกรรม [1] โดยเฉพาะในภาคครัวเรือนที่ผู้บริโภคส่วนใหญ่เห็นถึงความสะดวกสบายจากการใช้น้ำร้อน การผลิตน้ำร้อนที่นิยมมักจะใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก โดยเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้ทั่วไปจะมีขนาด 2-5 กิโลวัตต์ ทำน้ำที่อุณหภูมิสูงสุด 45 องศาเซลเซียส [2] ขณะเดียวกันมีเทคนิคการใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาผลิตน้ำร้อน (Solar Collector) โดยสามารถทำน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 50 องศาเซลเซียส [3] แต่ก็มีข้อจำกัดด้านเสถียรภาพของสภาวะอากาศ ทำให้สูญเสียโอกาสในการใช้งาน [4] ขณะเดียวกันแนวคิดการผลิตน้ำร้อนโดยใช้ปั๊มความร้อน (heat pump) ได้รับความนิยมมากขึ้น [5] การทำงานของปั๊มความร้อนอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำ (heat source) ไปยังแหล่งที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิให้สูง (heat sink) โดยใช้อุปกรณ์ที่เหมือนกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอ [6] ส่วนผลพลอยได้จากด้าน evaporator สามารถนำไปใช้ในการปรับอากาศ หรือนำไปใช้ในการผลิตน้ำเย็น จากหลักการเบื้องต้นสามารถนำปั๊มความร้อนมาประยุกต์ใช้ในการผลิตน้ำร้อนและน้ำเย็นพร้อมกัน โดยแสดงภาพกระบวนการทั่วไปของปั๊มความร้อนดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานของปั๊มความร้อน [7]

โดยในส่วน condenser เดิมที่ใช้ในการระบายความร้อนด้วยอากาศจะถูกแทนที่ด้วย heat

exchanger และระบายความร้อนด้วยน้ำ ทำให้ได้น้ำร้อนมาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ในด้านการปฐมพยาบาลมีการใช้ประโยชน์จากน้ำร้อนและน้ำเย็นในการแช่แผ่นเจลเพื่อนำมาประคบร้อนหรือเย็นในการปฐมพยาบาลเบื้องต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและทดสอบชุดอุปกรณ์ที่ใช้ระบบของปั๊มความร้อนในการผลิตน้ำร้อน และใช้การดึงความร้อนจากด้าน evaporator ในการผลิตน้ำเย็น ซึ่งออกแบบเพื่อใช้ในการทางการแพทย์ เพื่อแช่แผ่นเจลในการประคบร้อนและเย็น โดยที่ชุดอุปกรณ์สามารถเคลื่อนย้ายได้เพื่อความสะดวกในกรณีที่ใช้ในภาคสนาม ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance: COP) ในการทำงานของระบบ เพื่อทำการวิเคราะห์เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาชุดอุปกรณ์ต้นแบบต่อไป

2. ทฤษฎี

2.1 การถ่ายเทความร้อน

สำหรับการคำนวณเพื่อหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของ evaporator และส่วนของ condenser ในอุปกรณ์ทำน้ำเย็นและน้ำร้อน ได้แก่

1) การนำความร้อนคือวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่อุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตัวกลางเดียวกันหรือเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกันแต่อุณหภูมิแตกต่างกันจากสมการต่อไปนี้

$$q = KA \frac{(t_2 - t_1)}{L} \quad (1)$$

โดยที่

q คือ อัตราถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (วัตต์)

t_2 คือ อุณหภูมิของของไหลด้านในท่อ (เคลวิน)

t_1 คือ อุณหภูมิของของไหลด้านนอกท่อ (เคลวิน)

K คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อทองแดง
(วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อทองแดง (ตารางเมตร)

L คือ ความยาวของท่อทองแดง (เมตร)

2) กลไกการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนจะต่างจากการนำความร้อนตรงที่ว่าในขณะที่ถ่ายเทความร้อนจะมีการเคลื่อนที่ของมวลตัวกลางและเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางที่เป็นของไหลกับผิวของแข็ง อัตราถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวของแข็ง พิจารณาได้จากสมการต่อไปนี้

$$q = \frac{hA(t_2 - t_1)}{L} \quad (2)$$

โดยที่

q คือ อัตราถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (วัตต์)

t_2 คือ อุณหภูมิของของไหลด้านในท่อ (เคลวิน)

t_1 คือ อุณหภูมิของของไหลด้านนอกท่อ (เคลวิน)

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อทองแดง
(วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อทองแดง (ตารางเมตร)

L คือ ความยาวของท่อทองแดง (เมตร)

2.2 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance: COP)

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance, COP) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$COP = Q / W \quad (3)$$

โดยที่

COP คือ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ

Q คือ พลังงานความร้อน (วัตต์)

W คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
(วัตต์)

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง COP_R และ COP_{HP}

โดยทั่วไปแล้วค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของเครื่องทำความเย็นจะแทนด้วยสัญลักษณ์ COP_R และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนจะแทนด้วยสัญลักษณ์ COP_{HP} โดยทั้งสองค่ามีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4)

$$COP_{HP} = COP_R + 1 \quad (4)$$

2.4 ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression Refrigeration System)

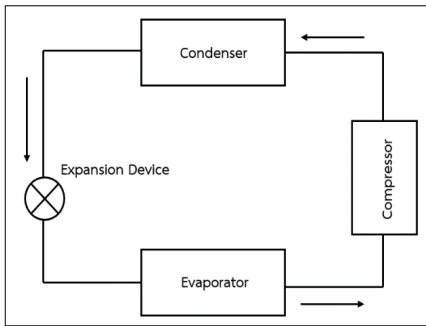
หลักการทำงานของระบบการถ่ายเทความร้อนรูปแบบหนึ่ง โดยปัจจุบันระบบทำความเย็นและปรับอากาศอาศัยการทำงานที่อัดสารทำความเย็นด้วยคอมเพรสเซอร์ ซึ่งมีการทำงานเป็นระบบปิด โดยมีการนำสารทำความเย็นกลับมาใช้ซ้ำวนเวียนในระบบ โดยแสดงแผนภาพการทำงานของระบบอัดไอดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักดังต่อไปนี้

2.4.1 คอยล์เย็น (Evaporator) ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนจากบริเวณที่ต้องการทำความเย็น โดยทำหน้าที่ควบคู่ไปกับสารทำความเย็น โดยทำให้สารทำความเย็นเดือดจนมีสถานะกลายเป็นไอ ซึ่งสามารถดูดความร้อนจากพื้นผิวของคอยล์เย็นได้

2.4.2 เครื่องอัดไอ (Compressor) ทำหน้าที่ดูดสารทำความเย็นที่สถานะเป็นไอและอัดให้มีความดันสูงขึ้นก่อนจะส่งไปควบแน่นที่คอยล์ร้อน

2.4.3 คอยล์ร้อน (Condenser) ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากสารทำความเย็นเพื่อให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะจากไอไปเป็นของเหลว

2.4.4 วาล์วลดความดัน (Expansion valve) ทำหน้าที่ปรับลดความดันให้สารทำความเย็นมีความดันต่ำ ส่งผลให้สารทำความเย็นสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ

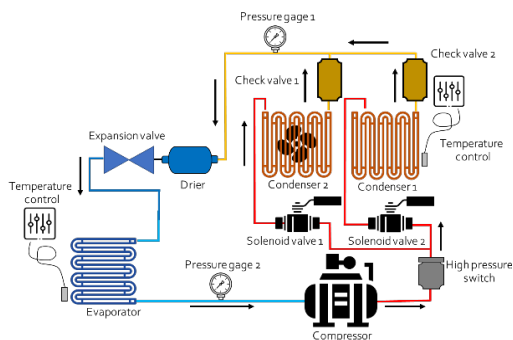


รูปที่ 2 แผนภาพระบบทำความเย็นแบบอัดไอ

3. การออกแบบและวัสดุอุปกรณ์

3.1 การออกแบบ

แนวทางในการออกแบบชุดอุปกรณ์ทำน้ำร้อนและน้ำเย็น เริ่มจากกำหนดความต้องการของระบบ โดยทำน้ำร้อนที่อุณหภูมิใช้งานไม่ต่ำกว่า 50°C และน้ำเย็นที่อุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 7°C โดยสอดคล้องกับการเลือกใช้สารทำความเย็นได้หลายชนิด ซึ่งการออกแบบครั้งนี้ได้เลือกใช้ R22 เป็นสารทำความเย็น โดยระบบทำความเย็นแบบอัดไอของชุดอุปกรณ์นี้มีคอนเดนเซอร์ทั้งหมด 2 ชุด แบ่งออกเป็นชุดคอนเดนเซอร์ 1 ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ และชุดคอนเดนเซอร์ 2 ที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิทำน้ำร้อนและน้ำเย็น เพื่อให้สามารถควบคุมการระบายความร้อนสลับไปมาระหว่างชุดคอนเดนเซอร์ 1 และชุดคอนเดนเซอร์ 2 โดยแสดงแผนผังการทำงานของระบบในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพการทำงานของชุดอุปกรณ์ทำน้ำร้อนและน้ำเย็น

จากแผนภาพการทำงานในรูปที่ 3 สามารถอธิบายหลักการทำงานได้ดังต่อไปนี้

3.1.1 ในการทำน้ำเย็นจะเกิดขึ้นที่ส่วนของ evaporator โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำในถังและคอยล์เย็น จนได้น้ำเย็นที่มีอุณหภูมิตามข้อกำหนด โดยแสดงลักษณะของถังน้ำและคอยล์เย็นไว้ดังรูปที่ 5(ก)

3.1.2 ในการทำน้ำร้อนจะอาศัยความร้อนที่นำมาทิ้งที่ส่วนของ condenser1 จนได้น้ำร้อนที่มีอุณหภูมิตามข้อกำหนด แต่ในกรณีที่อุณหภูมิทำน้ำร้อนได้ตามข้อกำหนด ในขณะที่อุณหภูมิทำน้ำเย็นยังไม่ถึงตามข้อกำหนด จะทำให้ระบบไม่สามารถระบายความร้อนต่อได้ ดังนั้นชุดควบคุมอุณหภูมิที่ติดตั้งไว้จะสั่งงานให้ปิด solenoid valve2 และเปิด solenoid valve1 เพื่อเปลี่ยนให้ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศแทนการระบายความร้อนด้วยน้ำระหว่างการทำน้ำเย็นให้ได้ตามข้อกำหนด โดยแสดงลักษณะของถังน้ำและคอยล์ร้อนไว้ดังรูปที่ 5 (ข)

เบื้องต้นกำหนดให้เครื่องต้นแบบสามารถทำน้ำร้อนและน้ำเย็นได้ไม่ต่ำกว่า 20 ลิตร โดยมีอุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ จากข้อมูลการออกแบบสอดคล้องกับคุณลักษณะของ compressor ขนาดไม่เกิน 1/2 HP และจากขนาดของ compressor สามารถประเมินระยะเวลาในการทำน้ำร้อนและน้ำเย็นได้ที่ประมาณ 13.8 นาที โดยอ้างอิงจากคุณลักษณะบน nameplate ของอุปกรณ์ compressor โดยการออกแบบต้องคำนึงถึงน้ำหนัก และขนาดของตัวเครื่อง เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย ดังนั้นในการเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งจึงพิจารณาจากข้อกำหนดนี้

3.2 วัสดุอุปกรณ์

จากแผนภาพระบบในรูปที่ 3 และข้อกำหนดที่ได้จากการออกแบบไว้ข้างต้น สามารถเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสม โดยแสดงรายละเอียดดังนี้

3.2.1 compressor รุ่น AE7440EK ปริมาตรบรรจุ 14.14 ซีซี ขนาด 1/2 HP Cooling watt 1010 วัตต์ เป็นชนิด MBP (Medium Back Pressure) จำนวน 1 ลูก

3.2.2 ชุดท่อทองแดงสำหรับ condenser 1 ขนาด 1/4 นิ้ว ยาว 12.26 เมตร และ condenser 2 เป็นชุดสำเร็จรูปที่มีขนาดการระบายความร้อนด้วยอากาศที่ 1383 วัตต์ ทำงานพร้อมพัดลม ขนาด 60 วัตต์ (เป็นส่วน bypass เพื่อระบายความร้อนส่วนเกินขณะทำน้ำเย็น)

3.2.3 ส่วนของ evaporator ใช้ท่อทองแดง ขนาด 3/8 นิ้ว ความยาว 4.6 เมตร

3.2.4 expansion valve รุ่น TED/1/R/22 ขนาด 3600 บีทียู/ชั่วโมง

3.2.5 check valve 1 และ 2 (ติดตั้งเพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของสารทำความเย็น)

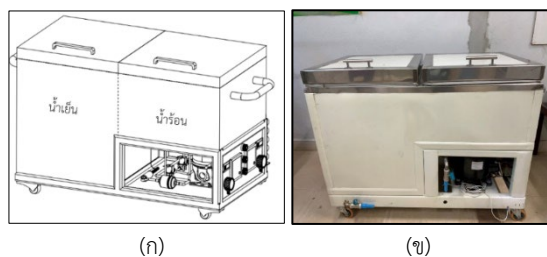
3.2.6 filter, drier และ sight glass ขนาด 1/4 นิ้ว

3.2.7 high & low pressure switch (เพื่อป้องกันความเสียหายของชุดอุปกรณ์ขณะทำงาน)

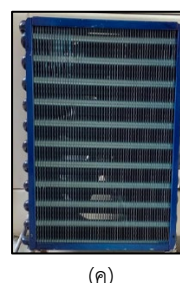
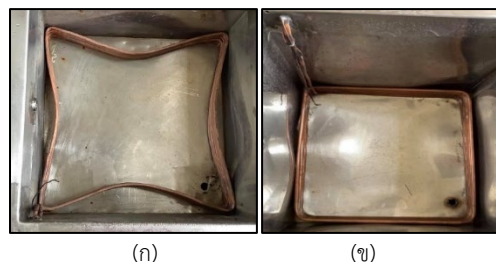
3.2.8 ชุดควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อนและน้ำเย็น

หลังจากกำหนดอุปกรณ์ใช้งาน ประกอบเป็นชุดอุปกรณ์ทำน้ำร้อนและน้ำเย็นที่มีขนาดความกว้าง 65.7 เซนติเมตร ความยาว 100.2 เซนติเมตร และความสูง 52.5 เซนติเมตร โดยใช้แผ่น Polyurethane Foam เป็นวัสดุผิวข้างของเครื่องต้นแบบ ซึ่งเป็นแผ่นฉนวน ที่มีคุณสมบัติสามารถควบคุมอุณหภูมิ ป้องกันความชื้น และมีน้ำหนักที่เบา ด้วยขนาดและพื้นที่จัดวางอุปกรณ์มีข้อจำกัดทำให้ถังบรรจุน้ำมีขนาดที่ 40 ลิตร และ 20 ลิตร โดยออกแบบให้ด้านทำน้ำเย็นมีปริมาตรบรรจุน้ำที่ 40 ลิตร และด้านทำน้ำร้อนมีปริมาตรบรรจุน้ำที่ 20 ลิตร เนื่องจากในทางการแพทย์นิยมใช้การประคบเย็นมากกว่าการประคบร้อนในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุต่างๆ

ทั้งนี้ได้ออกแบบให้มี condenser จำนวน 2 เครื่อง สำหรับกรณีที่ต้องการทำน้ำเย็นให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าที่กำหนด โดยมีน้ำหนักขณะที่มีการบรรจุน้ำจนเต็มประมาณ 85 กิโลกรัม ทั้งนี้มีการติดตั้งล้อเลื่อนบริเวณด้านล่างของตัวเครื่อง เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างตัวเครื่องกับพื้นในขณะเคลื่อนย้าย โดยใช้ไม่เกิน 2 คน ในการเคลื่อนย้ายชุดอุปกรณ์ดังกล่าว จากการออกแบบมีต้นทุนค่าอุปกรณ์ และค่าในการดำเนินงานทั้งหมดประมาณ 12,000 บาท โดยชุดอุปกรณ์ที่ทำการติดตั้งเสร็จสมบูรณ์ในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ก) ชุดอุปกรณ์จากการออกแบบ ข) ชุดอุปกรณ์ที่ประกอบแล้วเสร็จ



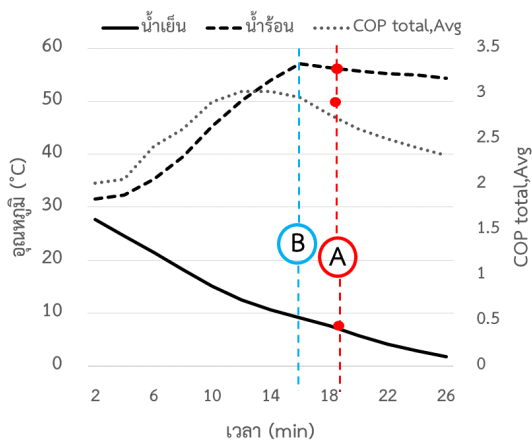
รูปที่ 5 ก) คอยล์ทำน้ำเย็น ข) คอยล์ทำน้ำร้อน
(Condenser 1) ค) Condenser 2

4. ผลการทดสอบ

การทดสอบของชุดทำน้ำร้อนและน้ำเย็น เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นและระยะเวลาในการทำน้ำร้อนและน้ำเย็น แบ่งออกเป็น 4 การทดสอบ โดยแบ่งตามอัตราส่วนการผลิตน้ำร้อนต่อน้ำเย็น 10:10 ลิตร 20:20 ลิตร 20:30 ลิตร และ 20:40 ลิตร โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การทดสอบที่อัตราส่วนน้ำร้อนต่อน้ำเย็น 10 ลิตร/10 ลิตร

จากการทดสอบชุดอุปกรณ์ มี $COP_{total,Avg}$ สูงสุด 3.02 ซึ่งเป็นผลรวมของค่า COP ด้านร้อนและด้านเย็นเฉลี่ยในช่วงเวลาเริ่มต้นถึงเวลา ณ ขณะนั้น โดยชุดอุปกรณ์สามารถทำน้ำเย็นและน้ำร้อนได้อุณหภูมิตามข้อกำหนด ณ ตำแหน่ง A ใช้ระยะเวลา 18.7 นาที โดยน้ำร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 56 องศาเซลเซียส และน้ำเย็นมีอุณหภูมิประมาณ 7 องศาเซลเซียส และมี $COP_{total,Avg}$ ขณะนั้นเท่ากับ 2.72 โดยหลังจากเวลาผ่านไป 16 นาที ณ ตำแหน่งจากจุด B น้ำร้อนเริ่มมีอุณหภูมิสูงเกินจากที่กำหนดไว้ในชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ทำ



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และ $COP_{total,Avg}$ ของการทำน้ำเย็น และน้ำร้อน อย่างละ 10 ลิตร

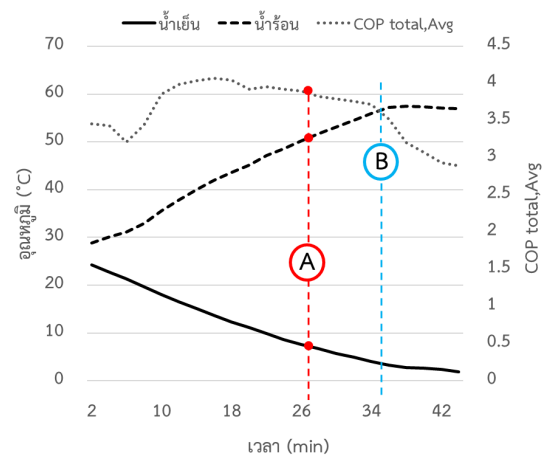
ให้ระบบเปลี่ยนมาระบายความร้อนด้วยอากาศแทนการระบายความร้อนด้วยน้ำ ส่งผลให้ค่า $COP_{total,Avg}$ มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากระบบไม่สามารถระบายความร้อนได้อย่างต่อเนื่องในขณะที่ทำน้ำเย็นให้มีอุณหภูมิตามข้อกำหนด โดยแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 6 และสรุปผลการทดสอบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลอุณหภูมิใช้งานของการทำน้ำเย็นและน้ำร้อน 10 ลิตร

การทดสอบ	เวลา (นาที)	COP รวมเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำเย็นใช้งาน 7°C	18.66	2.72
อุณหภูมิน้ำร้อนใช้ งาน 50°C	11.94	3.02

4.2 การทดสอบที่อัตราส่วนน้ำร้อนต่อน้ำเย็น 20 ลิตร/20 ลิตร

ในการทดสอบนี้มีปริมาณน้ำในถังของชุดอุปกรณ์เพิ่มมากขึ้นในสัดส่วนการทำน้ำร้อนและน้ำเย็นเท่าเดิม ส่งผลให้ระบบสามารถระบายความร้อนได้อย่างต่อเนื่องมากกว่าการทดสอบที่ 4.1 โดยมี $COP_{total,Avg}$



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และ $COP_{total,Avg}$ ของการทำน้ำเย็นและน้ำร้อน อย่างละ 20 ลิตร

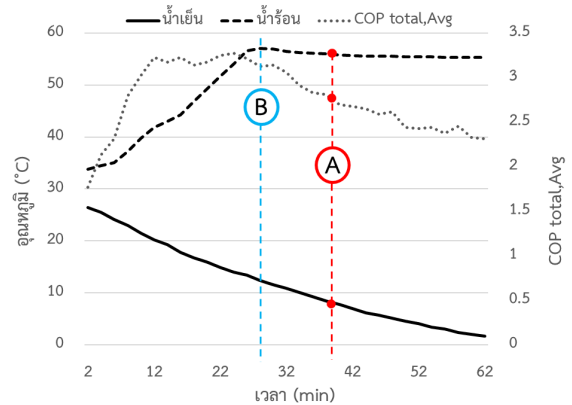
สูงสุดเท่ากับ 3.85 ซึ่งมีค่าสูงกว่าการทดสอบที่ 4.1 โดยใช้ระยะเวลา 27.3 นาที ในการทำน้ำเย็นและน้ำร้อนให้ได้อุณหภูมิตามที่กำหนดดังแสดงไว้ที่จุด A โดยน้ำร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 51 องศาเซลเซียส และน้ำเย็นมีอุณหภูมิประมาณ 7 องศาเซลเซียส และจากการทดสอบพบว่าระบบเปลี่ยนมาระบายความร้อนด้วยอากาศแทนการระบายความร้อนด้วยน้ำหลังจากเวลาผ่านไป 35 นาที (ตำแหน่ง B) โดยแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 7 และสรุปผลการทดสอบดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลอุณหภูมิใช้งานของการทำน้ำเย็นและน้ำร้อน 20 ลิตร

การทดสอบ	เวลา (นาที)	COP รวมเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำเย็นใช้งาน 7°C	27.33	3.85
อุณหภูมิน้ำร้อนใช้งาน 50°C	25.75	3.90

4.3 การทดสอบที่อัตราส่วนน้ำร้อนต่อน้ำเย็น 20 ลิตร/30 ลิตร

ในการทดสอบนี้มีการใช้ปริมาณน้ำเย็นมากขึ้นในสัดส่วนน้ำร้อนต่อน้ำเย็น 20:30 ลิตร จากการทดสอบพบว่าการทำงานน้ำร้อนและน้ำเย็นให้ได้อุณหภูมิตามข้อกำหนดใช้ระยะเวลามากกว่าหัวข้อ 4.1 และ 4.2 ซึ่งใช้เวลา 39 นาที โดยน้ำร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 56 องศาเซลเซียส และน้ำเย็นมีอุณหภูมิประมาณ 7 องศาเซลเซียส มี $COP_{total,Avg}$ ขณะนั้น 2.75 (ตำแหน่ง A) โดยช่วงระยะเวลาที่ 30 (ตำแหน่ง B) ระบบมีการเปลี่ยนมาระบายความร้อนด้วยอากาศแทนการระบายความร้อนด้วยน้ำ ส่งผลให้เกิดการระบายความร้อนได้ไม่ต่อเนื่องในขณะที่ทำให้น้ำเย็นมีอุณหภูมิตามข้อกำหนด ทำให้ค่า $COP_{total,Avg}$ มีแนวโน้มลดลง ซึ่งเกิดจากสัดส่วนของน้ำเย็นที่มีมากกว่าน้ำร้อน โดยแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 8 และสรุปผลการทดสอบดังตารางที่ 3



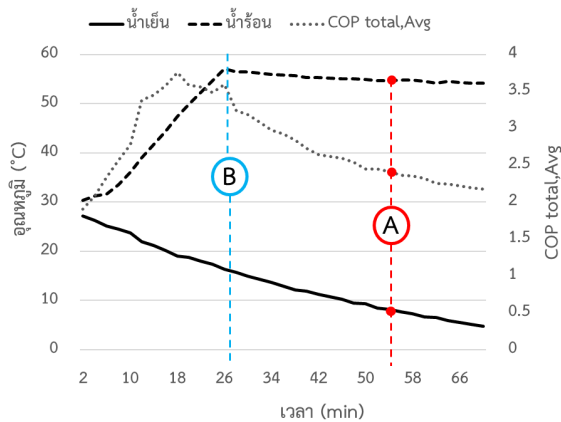
รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และ $COP_{total,Avg}$ ของการทำน้ำเย็นและน้ำร้อนที่อัตราส่วนน้ำร้อนต่อน้ำเย็น 20 ลิตร/30 ลิตร

ตารางที่ 3 ผลอุณหภูมิใช้งานของการทำน้ำร้อนต่อน้ำเย็น 20 ลิตร/30 ลิตร

การทดสอบ	เวลา (นาที)	COP รวมเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำเย็นใช้งาน 7°C	41.75	2.75
อุณหภูมิน้ำร้อนใช้งาน 50°C	20.67	3.20

4.4 การทดสอบที่อัตราส่วนน้ำร้อนต่อน้ำเย็น 20 ลิตร/40 ลิตร

ในการทดสอบนี้ระบบมีการเปลี่ยนมาระบายความร้อนด้วยอากาศแทนการระบายความร้อนด้วยน้ำ ตั้งแต่ระยะเวลาที่ 27 (ตำแหน่ง B) ทำให้ค่า $COP_{total,Avg}$ มีแนวโน้มลดลง โดยการทดสอบนี้มีส่วนของน้ำเย็นเป็นสองเท่าของน้ำร้อน ส่งผลให้ใช้เวลานานที่สุดในการทำร้อนและน้ำเย็นให้มีอุณหภูมิตามข้อกำหนด โดยใช้เวลา 55 นาที ทำให้น้ำร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 55 องศาเซลเซียส และน้ำเย็นมีอุณหภูมิประมาณ 7 องศาเซลเซียส มี $COP_{total,Avg}$ ขณะนั้น 2.36 (ตำแหน่ง A) ซึ่งแสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 9 และสรุปผลการทดสอบดังตารางที่ 4



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และ $COP_{total,Avg}$ ของการทำน้ำเย็นและน้ำร้อนที่อัตราส่วน น้ำร้อนต่อน้ำเย็น 20 ลิตร/40 ลิตร

ตารางที่ 4 ผลอุณหภูมิใช้งานของการทำน้ำร้อนต่อน้ำเย็น 20 ลิตร/40 ลิตร

การทดสอบ	เวลา (นาที)	COP รวมเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำเย็นใช้ งาน 7°C	41.75	2.67
อุณหภูมิน้ำร้อนใช้ งาน 50°C	20.67	3.20

ตารางที่ 5 แสดงผลเปรียบเทียบอัตราส่วนในการทำน้ำร้อนและน้ำเย็น

รายละเอียด	สัดส่วนการทำน้ำร้อนและน้ำเย็น			
	10:10	20:20	20:30	20:40
$COP_{total,Avg}$	2.72	3.85	2.75	2.36
อัตราการผลิตน้ำเย็น (ลิตร/นาที)	0.53	0.73	0.72	0.68
อัตราการผลิตน้ำร้อน (ลิตร/นาที)	0.84	0.78	0.97	0.99

จากการทดสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์ในหัวข้อ 4.1-4.4 สามารถประเมินหาอัตราการผลิตน้ำเย็นและน้ำร้อน ได้ดังตารางที่ 5 โดยอัตราการผลิตน้ำเย็นจะคิดจากระยะเวลาในการทำให้น้ำเย็นมีอุณหภูมิตามที่กำหนด ณ สัดส่วนของน้ำเย็นขณะนั้น และอัตราการ

ผลิตน้ำร้อนจะคิดจากระยะเวลาในการทำให้น้ำร้อนมีอุณหภูมิตามที่กำหนด ณ สัดส่วนของน้ำร้อนขณะนั้น

จากข้อมูลตารางที่ 5 เมื่อมีสัดส่วนของการทำน้ำร้อนและน้ำเย็นที่ต่างกันมากส่งผลให้ $COP_{total,Avg}$ ของระบบมีค่าลดลง เนื่องจากช่วงแรกมีการระบายความร้อนผ่านทาง condenser 1 ในส่วนของการทำน้ำร้อน ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดประโยชน์จากการใช้งาน แต่เมื่ออุณหภูมิของน้ำร้อนมีค่าสูงกว่าที่กำหนดไว้ ระบบจะเปลี่ยนมาระบายความร้อนด้วยอากาศผ่านทาง condenser 2 ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่เกิดประโยชน์จากการใช้งาน โดยสัดส่วน 20:20 ลิตร มีค่า $COP_{total,Avg}$ สูงที่สุด ทั้งนี้การเปิดใช้งานชุดอุปกรณ์มีชั้นน้ำแข็งเกาะที่บริเวณคอยล์ทำน้ำเย็นส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างคอยล์เย็นและน้ำลดลง โดยแสดงชั้นน้ำแข็งที่เกาะคอยล์ทำน้ำเย็นดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ชั้นน้ำแข็งที่เกาะบริเวณคอยล์ทำน้ำเย็น

การทำน้ำร้อนและน้ำเย็นที่สัดส่วน 20:30 ลิตร และ 20:40 ลิตร มีระดับความสูงระหว่างผิวหน้าและคอยล์เย็นต่างกันค่อนข้างมาก จึงส่งผลให้ใช้ระยะเวลามากพอสมควรในการแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการทำน้ำเย็นให้ได้ตามข้อกำหนด และประสิทธิภาพในการทำงานของชุดอุปกรณ์มีค่ามากสุดในการทำน้ำร้อนและน้ำเย็นที่อัตราส่วน 20:20 ลิตร โดยจากการทดสอบยังพบว่าเมื่อน้ำเย็นมีสัดส่วนมากกว่าน้ำร้อนจะส่งผลให้มีอัตราการผลิตน้ำร้อนที่สูงขึ้น เนื่องจากการดึงความร้อนในส่วน of evaporator จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำในถังน้ำเย็น ส่งผลให้การระบายความร้อนใน

ส่วนของ condenser1 มีปริมาณเพิ่มขึ้นตาม โดยมีอัตราการทำความร้อนสูงสุดที่ 0.99 ลิตร/นาที่ ที่อัตราส่วน 20:40 ลิตร และมีอัตราการทำน้ำเย็นสูงสุดที่ 0.73 ลิตร/นาที่ ที่อัตราส่วน 20:20 ลิตร

จากการทดสอบในหัวข้อที่ 4.1-4.4 สามารถประเมินหาอัตราการผลิตรวมและต้นทุนในการผลิตได้ดังตารางที่ 6 โดยอัตราการผลิตรวมจะประเมินจากสัดส่วนของน้ำร้อนและน้ำเย็นรวมกันหารด้วยระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้้ำเย็นและน้ำร้อนให้มีอุณหภูมิตามที่กำหนดดังตัวอย่างที่ 1a และต้นทุนพลังงานจะประเมินได้ดังตัวอย่างที่ 2a

ตัวอย่างที่ 1a ประเมินหาอัตราการผลิตรวมที่สัดส่วนน้ำร้อนต่อน้ำเย็น 10 ลิตร/ 10 ลิตร

$$\begin{aligned}\text{อัตราการผลิตรวม} &= 10 + 10 \text{ ลิตร} / 18.7 \text{ นาที} \\ &= 1.069 \text{ ลิตร} / \text{นาที่}\end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2a ประเมินหาต้นทุนพลังงานที่สัดส่วนน้ำร้อนต่อน้ำเย็น 10 ลิตร/ 10 ลิตร

$$\begin{aligned}\text{ต้นทุนพลังงาน} &= \text{kWh} \times 4 / \text{ปริมาณน้ำรวม} \\ &= 0.203 \times 4 / 20 \\ &= 0.0406 \text{ บาท} / \text{ลิตร}\end{aligned}$$

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ต้นทุนพลังงาน

ลำดับ	สัดส่วนการผลิตน้ำร้อนและน้ำเย็น	อัตราการผลิตรวม (ลิตร/นาที่)	พลังงานไฟฟ้ารวม (kWh)	ต้นทุนพลังงาน (บาท/ลิตร)
1	10 ลิตร/10 ลิตร	1.069	0.203	0.0406
2	20 ลิตร/20 ลิตร	1.465	0.280	0.028
3	20 ลิตร/30 ลิตร	1.282	0.458	0.037
4	20 ลิตร/40 ลิตร	1.091	0.644	0.043

*หมายเหตุประเมินค่าไฟฟ้าหน่วยละ 4 บาท

จากตารางที่ 6 ต้นทุนที่ถูกต่ำสุดในการผลิตน้ำร้อนและน้ำเย็นคือ 0.028 บาท/ลิตร ที่อัตราส่วน 20:20 ลิตร โดยต้นทุนพลังงานที่อัตราส่วนอื่นอาจมีความเหมาะสมขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการนำน้ำไปใช้ประโยชน์หรือสร้างมูลค่าเพิ่มในทางอื่นๆ

5. สรุปผลการทดสอบ

จากงานวิจัยนี้สามารถออกแบบชุดอุปกรณ์ทำน้ำเย็นและน้ำร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ตามความต้องการของผู้ใช้ โดยชุดอุปกรณ์สามารถทำน้ำเย็นได้สูงสุดครั้งละ 40 ลิตร และทำน้ำร้อนได้สูงสุดครั้งละ 20 ลิตร ซึ่งมีน้ำหนักสูงสุดขณะบรรจุน้ำจนเต็ม 85 กิโลกรัม โดยใช้คนมากที่สุดไม่เกิน 2 คนในการเคลื่อนย้าย ซึ่งการทดสอบทั้งหมด พบว่าค่า การทำน้ำร้อนและน้ำเย็นที่อัตราส่วน 20 ลิตร/ 20 ลิตร มีความเหมาะสมที่สุดในเรื่องของปริมาณและต้นทุนการผลิต

6. ข้อเสนอแนะ

1. ในการออกแบบทั่วไปควรออกแบบให้ฝั่งทำน้ำร้อนมีปริมาตรมากกว่าฝั่งทำน้ำเย็น เนื่องจากความร้อนที่ดึงออกในส่วนของ evaporator จะน้อยกว่าความร้อนที่ถูกทิ้งที่ส่วน condenser
2. ในส่วนของการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ระดับผิวน้ำและท่อทองแดงมีความต่างกันมาก แนะนำให้มีการติดตั้งใบพัดช่วยกวนจะทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพดีขึ้น ซึ่งส่งผลต่อ COP ของระบบที่เพิ่มขึ้น

3. การใช้งานอย่างต่อเนื่องสามารถลดการสูญเสียความร้อนจากมวลอุณหภูมิที่เกิดจากวัสดุฉนวน

4. เนื่องจากชุดอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นเครื่องต้นแบบดังนั้นต้นทุนในการผลิตและดำเนินงานอาจสูงในช่วงแรกของการพัฒนา ซึ่งในอนาคตอาจลดต้นทุนการผลิตให้ถูกลงได้

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การออกแบบและประเมินสมรรถนะชุดทำน้ำร้อนและน้ำเย็นแบบเคลื่อนที่ โดยมหาวิทยาลัยพะเยาได้รับการสนับสนุนจาก กองทุนส่งเสริม ววน. ภายใต้โครงการวิจัย “ต้นแบบการพัฒนา ระบบเพื่อส่งเสริมทักษะอาชีพสำหรับเทคโนโลยี

อุตสาหกรรม ตามบริบทภาคเหนือตอนบน” ทั้งนี้จึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูง

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Wittaya and M. Tawat, “Comparison of the Performance of Hot Water System using Flat Plate and Heat Pipe Solar Collector,” *Energy Research Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 64-72, 2011.
- [2] M. Kunpong, A. Jadetapon and M. Sulaksana, “LOW-COST SOLAR WATER HEATING SYSTEM FOR USING IN RESIDENTIAL HOME” in *Proceeding of 15th on L Resort Hotel*, Surat Thani, Thailand, 2016.
- [3] P. Rungtawee and R. Surachai, “A study of the factors that affect the efficiency of hot water systems,” *Kasetsart Engineering Journal*, vol. 22, no. 70, pp. 96-109, 2010.
- [4] D. Khoreeyoh, S. Suraida and K. Sulkiplee, “Solar Water Heater Hybrid with Electric,” *YRU Journal of Science and Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 65-75, 2017.
- [5] T. Sathit and S. Denpong, “Mathematical Modeling of Heat Pump Hot Water Generation System with Combination of Waste Heat Recovery of Air Conditioning System: Case Study,” in *Proceeding of 21th Mechanical Engineering of Thailand*, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy, 2016.
- [6] H. Tanit, S. Teerapat and K. Arthit, “Performance assessment of a heat pump water heating system for a new dormitory of Suranaree University of Technology,” in *Proceeding of 30th Mechanical Engineering of Thailand*, Prince of Songkla University, 2016.
- [7] P. Parith, A. Attakorn and D. Thoranis, “Use of Figure of Merit as a Quick Method for Finding Performance of Heat Pump with Zeotropic Mixtures,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 3, pp. 395-405, 2021.

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

ผลของวิธีการแปรรูปที่แตกต่างกันต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และการยอมรับจากผู้บริโภคของชาใบชาวก่ำดอยสะเก็ด

สุริวรรณ ราชสม* จรรย์วรรณ ตัณฑ์เจริญรัตน์ วุฒิจำนงค์ และ พรสวรรค์ สมบัตินันท์

วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50300

รับบทความ 21 มกราคม 2565 แก้ไขบทความ 3 พฤศจิกายน 2565 ตอรับบทความ 30 พฤศจิกายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปชาจากใบชาวก่ำดอยสะเก็ดที่มีต่อความสามารถในการออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและการยอมรับของผู้บริโภคของชาใบชาวก่ำ โดยศึกษากรรมวิธีการแปรรูปชาใบชาวก่ำทั้งหมด 4 กรรมวิธี ได้แก่ กรรมวิธีแปรรูปชาแบบชาเขียว ชาฝรั่ง ชาจีน และชาอู่หลง จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่าสี L^* , a^* และ b^* (ระบบสี CIE) และคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และทดสอบทางประสาทสัมผัส ผลการศึกษาพบว่าชาใบชาวก่ำทั้ง 4 กรรมวิธีมีค่าความชื้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชา (ค่าความชื้นมาตรฐานต้องไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก) โดยตัวอย่างทั้งหมดมีค่าความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 6.46-7.59 สำหรับค่าสีพบว่ากรรมวิธีที่แตกต่างมีผลต่อสีของชาใบชาวก่ำและน้ำชาใบชาวก่ำอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่อย่างไรก็ตามชาใบชาวก่ำที่แปรรูปด้วยกรรมวิธีชาอู่หลงมีค่าร้อยละการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดเท่ากับ ร้อยละ 82.27 ± 1.90 รองลงมาได้แก่ ชาเขียว ชาฝรั่ง และชาจีน โดยมีร้อยละการต้านอนุมูลอิสระ เท่ากับ 81.99 ± 0.00 , 81.78 ± 0.76 และ 80.79 ± 0.61 ตามลำดับ จากนั้นทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคโดยวิธีการทางประสาทสัมผัส ด้านสี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบ จำนวน 50 คน พบว่าชาใบชาวก่ำทั้ง 4 กรรมวิธีได้รับคะแนนความชอบในทุกด้านอยู่ในระดับความชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง (6.48-7.16 คะแนน) โดยกรรมวิธีการแปรรูปชาแบบชาอู่หลงได้คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมมากที่สุด คือ 7.08 ± 1.21 , 6.76 ± 1.53 , 6.56 ± 1.76 และ 6.78 ± 1.54 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ชาใบชาวก่ำ; คุณสมบัติทางกายภาพ; ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ; การยอมรับของผู้บริโภค

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

Effect of Different Tea Process on Antioxidant Capacity and Consumer Acceptance of Doi Saket Purple Rice Leaf Tea

Sureewan Rajchasom* Janyawat Tancharoenrat Vuthijumnonk and Pornsawan Sombatnan

College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University Technology of Lanna
128 Huay Kaew Road, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50300

Received 21 January 2022; Revised 3 November 2022; Accepted 30 November 2022

Abstract

The aim of this research is to study the effect of different tea process of Doi saket purple rice leaf tea on antioxidant capacity and the consumer acceptance. Doi saket purple rice leaf tea were processed in 4 different tea processes which were green tea process, English tea process, Chinese tea process and Oolong tea process. After that, the physical (moisture content and colour (L^* , a^* and b^*) in CIE system, chemical properties (antioxidant capacity) and sensory test of the products were analyzed. The results showed that the moisture content of Doi saket purple rice leaf tea samples from 4 different processes were not over than the standard value (the standard value of moisture content of tea was indicated as 8% by Thai industrial standards institute (TISI)), their moisture content were between 6.46 and 7.59%. It also was found that the different tea processes had a significant effect on the color of both of purple rice leaf tea and tea in term of L^* , a^* and b^* colour at the confidence level of 95% ($p < 0.05$). However, the different tea processes had no significant effect on antioxidant capacity. Purple rice Oolong tea leaf had the highest antioxidant capacity ($82.27 \pm 1.90\%$) following by purple rice Green tea leaf, purple rice English tea leaf and purple rice Chinese tea leaf ($81.99 \pm 0.00\%$, $81.78 \pm 0.76\%$ and $80.79 \pm 0.61\%$, respectively). The customer acceptance was evaluated by sensory test in 4 attributes which were colour, flavour, taste and overall. The sensory analysis result showed that the score of all sample from difference 4 tea processes were slightly to moderately like in all attributes. However, the highest score was found in Oolong tea process which had the score of 7.08 ± 1.21 , 6.76 ± 1.53 , 6.56 ± 1.76 and 6.78 ± 1.54 in color, odor, taste and overall, respectively.

Keywords : Purple rice leaf tea; Physical property; Antioxidant capacity; Customer acceptance

* Corresponding Author. Tel.: +66939541462, E-mail Address: sureewan@rmutl.ac.th

1. บทนำ

ชา (*Camellia sinensis*) มีต้นกำเนิดมาจากทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และแพร่หลายออกไปยังทวีปต่าง ๆ ทั่วโลก [1] สารประกอบหลักในใบชา ได้แก่ ทีอะฟลาวิน (Theaflavin) อยู่ในกลุ่มสารประกอบฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) ซึ่งได้จากใบชาที่ผ่านกระบวนการแปรรูปต่าง ๆ โดยสารทีอะฟลาวินมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) และมีคุณสมบัติสามารถยับยั้งการเกิดโรคมะเร็งที่อวัยวะต่าง ๆ ลดความเสี่ยงการเกิดโรคหัวใจ อีกทั้งเป็นสารให้รสชาติและสีของใบชา [2] โดยทั่วไปชาสามารถแบ่งได้หลากหลายรูปแบบ ได้แก่ ชาดำ ชาเขียว ชาอู่หลง ชาเหลือง และชาขาว โดยจำแนกความแตกต่างจากกรรมวิธีกระบวนการแปรรูปใบชา [3] ณ ภาคเหนือของประเทศไทยเป็นแหล่งกำเนิดชาและนิยมเพาะปลูกชาอย่างแพร่หลาย โดยกระจายตามจังหวัดต่าง ๆ ได้แก่ เชียงใหม่ เชียงราย แม่ฮ่องสอน แพร่ น่าน ลำปางและตาก [4]

ชาวก่ำ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryzasativa L. indica* คือข้าวเหนียวที่มีลักษณะเมล็ดเป็นสีม่วงเข้มถึงดำเนื่องจากมีสารสีม่วงแดงห่อหุ้มเมล็ด คือ แอนโทไซยานิน (Anthocyanin) และแกมมาโอไรซานอล (Gamma-oryzanol) [5] ซึ่งเป็นข้าวที่มีรงควัตถุไวต่อแสง โดยทางแถบภาคเหนือมีพันธุ์ชาวก่ำ ได้แก่ ชาวก่ำพันธุ์ดอยสะเก็ด ชาวก่ำพันธุ์อมก๋อย ชาวก่ำพันธุ์พะเยา และชาวก่ำพันธุ์พื้นเมือง มักปลูกในฤดูนาปี ในจังหวัดภาคเหนือตอนบนที่มีการเพาะปลูกชาวก่ำทั้งหมด 8 จังหวัด คือ จังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย ลำปาง ลำพูน แพร่ น่าน พะเยา และแม่ฮ่องสอน ชาวก่ำหรือข้าวเหนียวก่ำมักจะถูกนำมาใช้บริโภคเป็นอาหาร อีกทั้งยังนิยมใช้เป็นส่วนผสมหลักในการทำขนมต่าง ๆ และนำไปใช้เป็นสมุนไพร เช่น ใช้ทำเป็นชาหลามรักษาโรคท้องร่วง หรือใช้รักษาอาการตกเลือดของหญิงคลอดลูก จึงนับว่าเป็นภูมิปัญญาท้องถิ่นล้ำนาทางโภชนาการของเกษตรและเภสัชศาสตร์ สำหรับคุณค่าทางโภชนาการของชาวก่ำดอยสะเก็ดนั้น พบว่านอกจากจะมีทั้งสารอาหาร

สำคัญ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน วิตามินเอ วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 วิตามินอี รวมทั้งแคลเซียมและเหล็กสูงแล้ว ชาวก่ำดอยสะเก็ดยังมีสารสำคัญที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระประเภทฟลาโวนอยด์ ที่สูงกว่าชาขาวทั่วไป [6]

ชาวก่ำดอยสะเก็ดมีลักษณะทางกายภาพ คือมีลำต้นและใบสีม่วงเข้มหรือสีดำ เปลือกเมล็ดมีสีม่วง โดยเฉพาะอย่างยิ่งชาวก่ำดอยสะเก็ดสามารถสังเคราะห์แอนโทไซยานินได้อีกด้วย ซึ่งสารแอนโทไซยานินเป็นกลุ่มของรงควัตถุที่มีสีแดงไปจนถึงสีม่วงหรือสีน้ำเงิน พบในผักผลไม้ และดอกไม้ ละลายอยู่ในแซปแวคิวโอล (Sap Vacuole) ในเซลล์ของพืช เช่น มะเขือม่วง กะหล่ำปลีสีม่วง แอปเปิ้ล กระจับปี่ องุ่น และผลไม้ประเภทเบอร์รี่ เป็นต้น แอนโทไซยานินสามารถละลายน้ำได้แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายประเภท นอนไฮดรอกซิล (Non-hydroxyl) เช่น อะซิโตน (Acetone), คลอโรฟอร์ม (Chloroform) และ อีเธอร์ (Ether) แอนโทไซยานินจัดอยู่ในกลุ่มของรงควัตถุฟลาโวนอยด์ โดยความสามารถของสารแอนโทไซยานินนั้นมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ ช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน และโรคมะเร็ง [7]

ปัจจุบันการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากประโยชน์ที่ได้รับจากการดื่มชา โดยชาที่นิยมบริโภคส่วนใหญ่ได้จากพืชตระกูล *Camellia sinensis* แต่นอกจากนี้ผู้ผลิตได้สร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ชาจากพืชต่าง ๆ มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชาในรูปแบบใหม่ เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ให้แก่ผู้บริโภคได้มากยิ่งขึ้น เช่น ชาคาโมมายด์ ชามินท์ ชาดอกคำฝอย ชาฟาง ชาชิง และชาที่แปรรูปจากธัญพืช เช่น ชาบาร์เลย์ ใบอ่อนข้าว [8] แต่อย่างไรก็ตามการใช้ชาวก่ำหรือใบชาวก่ำที่เหลืจากการเก็บเกี่ยวที่มีสีม่วงเข้มตามลักษณะเดียวกันกับเมล็ดชาวก่ำ ยังคงพบว่าการศึกษาในการแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ชาทางเลือกอยู่น้อยมาก ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชาจากใบชาวก่ำที่เหลืจากการเก็บเกี่ยว โดยศึกษากระบวนการแปรรูปที่เหมาะสม

สำหรับขาใบข้าวเก่า ได้แก่ กรรมวิธีแปรรูปแบบชาเขียว ชาฝรั่ง ชาจีน และชาอู่หลง ที่มีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์ขาใบข้าวเก่าและการยอมรับของผู้บริโภค

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัย (Research Methodology) สำหรับศึกษานี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การแปรรูปชาจากใบข้าวเก่าทั้ง 4 กรรมวิธี การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณความชื้น และ ค่าสี L^* , a^* และ b^* และคุณสมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์ชาจากใบข้าวเก่า ได้แก่ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และการวิเคราะห์การยอมรับของผู้บริโภคของผลิตภัณฑ์ชาจากใบข้าวเก่า

2.1 การเตรียมใบข้าวเก่าเพื่อนำมาแปรรูปชา

ใบข้าวเก่าที่ใช้ในการศึกษานี้ได้รับมาจากวิสาหกิจชุมชนข้าวเก่าสายพันธุ์ดอยสะเก็ด ตำบลลวงใต้ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ และได้รับการรับรองพันธุ์ตาม พ.ร.บ.พันธุ์พืช พ.ศ.2518 จากกองคุ้มครองพันธุ์พืช กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์การเกษตร ซึ่งได้ทำการเก็บเกี่ยวใบข้าวเก่าในช่วงระยะการปลูกที่ 60 วัน ซึ่งมีลักษณะเป็นใบข้าวเก่ามีสีเขียวปนม่วงเข้ม มีความยาวประมาณ 45-60 เซนติเมตร กว้างประมาณ 5-7 เซนติเมตร โดยนำใบข้าวเก่ามาล้างให้สะอาดด้วยน้ำเปล่า 3 รอบเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน แล้วผึ่งลมในที่ร่มอุณหภูมิห้องให้แห้ง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.2 กรรมวิธีการแปรรูปชาจากใบข้าวเก่า

กรรมวิธีในการแปรรูปชาจากใบข้าวเก่า มีทั้งหมด 4 กรรมวิธี ได้แก่ ชาเขียว ชาฝรั่ง ชาจีน และชาอู่หลง โดยแต่ละกรรมวิธีใช้ใบข้าวเก่าสดปริมาณ 50 กรัม ต่อกรรมวิธี รายละเอียดกรรมวิธีแปรรูปชามีดังนี้ [9]

2.2.1 กรรมวิธีแปรรูปชาแบบชาเขียว

ตัดใบข้าวเก่าให้มีความยาวประมาณ 4 เซนติเมตร จากนั้นลวกใบข้าวเก่าด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 วินาทีแล้วนำขึ้นผึ่งลมให้แห้งหมาด ๆ จากนั้นคั่วในกระทะที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที และอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องอบลมร้อน (Hot air oven, UNB100 Memmert, Germany) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง [9]

2.2.2 กรรมวิธีแปรรูปชาแบบชาฝรั่ง

ตัดใบข้าวเก่าให้มีความยาวประมาณ 5 เซนติเมตร แล้วคั่วในกระทะที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสด้วยเครื่องอบลมร้อน (Hot air oven, UNB100 Memmert, Germany) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง [9]

2.2.3 กรรมวิธีแปรรูปชาแบบชาจีน

ตัดใบข้าวเก่าให้มีความยาวประมาณ 4 เซนติเมตร แล้วคั่วในกระทะที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสด้วยเครื่องอบลมร้อน (Hot air oven, UNB100 Memmert, Germany) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง [9]

2.2.4 กรรมวิธีแปรรูปชาแบบชาอู่หลง

ตัดใบข้าวเก่าให้มีความยาวประมาณ 4 เซนติเมตร แล้วคั่วในกระทะที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสด้วยเครื่องอบลมร้อน (Hot air oven, UNB100 Memmert, Germany) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง [9]

เมื่อชาจากใบข้าวเก่าผ่านกรรมวิธีแปรรูปชาเสร็จสมบูรณ์แล้ว ให้เก็บไว้ในกล่องเก็บอาหารสุญญากาศ บรรจุสารดูดความชื้น เพื่อป้องกันความชื้นและนำตัวอย่างชาไปใช้ในการทดลองต่อไป [9]

2.3 การเตรียมตัวอย่างน้ำชา

2.3.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำชาใบชาเก่าสำหรับการทดสอบทางเคมีและกายภาพ

นำตัวอย่างชาใบชาเก่าที่ผ่านกรรมวิธีแปรรูปชาทั้ง 4 กรรมวิธี มาเตรียมน้ำชาใบชาเก่าโดยมีวิธีการดังนี้ ชั่งตัวอย่างชาใบชาเก่าตัวอย่างละ 5 กรัม เติมน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ปริมาตร 75 มิลลิลิตร ปิดไว้เป็นเวลา 1 นาที แล้วเทน้ำออกเพื่อเป็นการล้างชาใบชาเก่า จากนั้นเติมน้ำร้อนปริมาตร 75 มิลลิลิตรและปิดไว้เป็นเวลา 2 นาที เทตัวอย่างน้ำชาลงในขวดพลาสติกเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีต่อไป [9]

2.3.2 การเตรียมตัวอย่างน้ำชาใบชาเก่าสำหรับการทดสอบทางประสาทสัมผัส

เตรียมน้ำชาใบชาเก่าปริมาณ 10 กรัมลงในภาชนะ จากนั้นเติมน้ำร้อนให้ท่วมใบชาเก่าและพักไว้เป็นเวลา 1 นาที แล้วรินน้ำชาออกเพื่อเป็นการชะล้างใบชา หลังจากนั้นเติมน้ำร้อนให้ท่วมชาใบชาเก่าและพักไว้เป็นเวลา 2 นาที และนำไปให้ผู้เข้าร่วมทดสอบทางประสาทสัมผัสชิมเป็นลำดับถัดไป [9]

2.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

2.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก) ทำการทดลองโดยใช้เครื่องวัดความชื้น (Moisture Analyzer, MB54, OHAUS, Switzerland) โดยปรับตั้งค่าการวัดความชื้นที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และชั่งตัวอย่างชาใบชาเก่าจำนวน 2.5 กรัมบนถาดสแตนเลสสตีล จากนั้นอ่านค่าและทำการบันทึกผลปริมาณความชื้นที่ได้ โดยทำการวัดทั้งหมด 3 ซ้ำ ต่อหนึ่งตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างชาจากใบชาเก่าต้องไม่มีค่าความชื้นเกินมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (ความชื้นมาตรฐานต้องไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก) [10]

2.4.2 การวิเคราะห์ค่าสี

การวิเคราะห์ค่าสีของชาใบชาเก่า ทำการทดลองโดยใช้ตัวอย่างชาใบชาเก่า 2 กรัม และน้ำชาใบชาเก่าปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นทำการทดลองวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี HunterLab, ColorFlex Ex โดยทำการวัดสีด้วยระบบ CIE โดยวิเคราะห์ค่าสี L^* , a^* และ b^* ทำการวัดทั้งหมด 3 ซ้ำ ต่อหนึ่งตัวอย่าง

2.4.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

นำตัวอย่างน้ำชาจากใบชาเก่า มาวิเคราะห์หาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging assay โดยเตรียมสารละลายมาตรฐาน 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ที่ความเข้มข้น 0.12 มิลลิโมลาร์ สำหรับการทำตัวอย่างทดสอบ นำตัวอย่างมา 200 ไมโครลิตร เติมนีเมทานอลปริมาตร 1.8 มิลลิลิตร และเติมสารละลาย DPPH ปริมาตร 2 มิลลิลิตร สำหรับตัวอย่างควบคุมใช้นีเมทานอลปริมาตร 2 มิลลิลิตรและเติมสารละลาย DPPH ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และนีเมทานอลปริมาตร 4 มิลลิลิตร สำหรับ Blank และตั้งตัวอย่างการทดลองทิ้งไว้ในที่มืดแสงเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นหาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร [11] และคำนวณร้อยละการต้านอนุมูลอิสระ (%DPPH inhibition) ดังสมการที่ (1)

$$\frac{(Abs_{control} - Abs_{sample})}{Abs_{control}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

$Abs_{control}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร ของตัวอย่างควบคุม (Control DPPH)

Abs_{sample} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ นาโนเมตร ของตัวอย่างทดลอง

2.5 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

ทำการทดสอบทางประสาทสัมผัส เพื่อศึกษาการยอมรับผลิตภัณฑ์ โดยนำตัวอย่างน้ำชาจากใบชาเก่ามาประเมินทางด้านประสาทสัมผัส ได้แก่ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม ใช้จำนวนผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนทั้งหมด 50 คน ที่มีอายุอยู่ในช่วงระหว่าง 18 – 60 ปี ใช้แบบทดสอบ แบบ 9 Point Hedonic Scale โดยกำหนดระดับการทดสอบทางประสาทสัมผัสออกเป็น 9 ระดับคือ 1 คะแนน หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด 2 คะแนน หมายถึง ไม่ชอบมาก 3 คะแนน หมายถึง ไม่ชอบปานกลาง 4 คะแนน หมายถึง ไม่ชอบเล็กน้อย 5 คะแนน หมายถึง บอกไม่ได้ว่าชอบหรือไม่ชอบ 6 คะแนน หมายถึง ชอบเล็กน้อย 7 คะแนน หมายถึง ชอบปานกลาง 8 คะแนน หมายถึง ชอบมาก และ 9 คะแนน หมายถึง ชอบมากที่สุด จากนั้นนำข้อมูลผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสที่ได้ไปประมวลผลความชอบและความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมคำนวณสำเร็จรูป Minitab Statistic Software version 20 ช่วยในการคำนวณ

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจากข้อมูลผลการวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมี ที่ออกแบบการทดลองแบบ The Randomized Pretest-Posttest Control Group Design และผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบการทดสอบความชอบหรือการยอมรับ (Preference Tests/Acceptance Tests) แสดงผลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SD วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Minitab Statistic Software Version 20 วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey's test

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการศึกษาแสดงเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความชื้นของชาใบชาเก่า และสีของชาใบชาเก่า และน้ำชาใบชาเก่า ผลของกรรมวิธีการแปรรูปชาใบชาเก่าต่อคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ชาใบชาเก่าทั้ง 4 กรรมวิธี

3.1 ผลของกระบวนการแปรรูปต่อความชื้นและสีของชาใบชาเก่า และน้ำชาใบชาเก่า

3.1.1 ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นของชาใบชาเก่าที่ผ่านกระบวนการแปรรูปทั้ง 4 กรรมวิธี แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความชื้นของชาใบชาเก่าที่ผ่านกระบวนการแปรรูปชาทั้ง 4 กรรมวิธี

กรรมวิธีแปรรูปชา	ร้อยละความชื้น (ฐานเปียก) ^{ns}
ชาเขียว	6.88 $\pm$ 0.50
ชาฝรั่ง	7.59 $\pm$ 0.84
ชาจีน	6.97 $\pm$ 0.76
ชาอู่หลง	6.46 $\pm$ 0.67

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

จากตารางที่ 1 พบว่า กระบวนการแปรรูปชาทั้ง 4 กรรมวิธีให้ผลร้อยละของค่าความชื้นของตัวอย่างไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) Thai Community Product Standard [10] โดยตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทั้งหมดมีความชื้นระหว่างร้อยละ 6.46-7.59 และจากการคำนวณทางสถิติพบว่าค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแปรรูปชาทั้ง 4 กรรมวิธี ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เนื่องจากในแต่ละระยะเวลาในการคั่วชา นั้นมีความใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และจาก

ระยะเวลาในการคั่วและอบที่ใกล้เคียงกันจึงทำให้ปริมาณน้ำใบข้าวกำระเหยออกมาได้ใกล้เคียงกัน [12]

3.1.2 ค่าสีของชาใบข้าวกำ และน้ำชาใบข้าวกำ

ชาใบข้าวกำที่ผ่านกระบวนการแปรรูปทั้ง 4 มีลักษณะเป็นใบแห้ง เป็นเส้นยาวขนาด 4-5 เซนติเมตร แต่มีความกว้างของใบลดลงเนื่องจากผ่านกระบวนการให้ความร้อนลดความชื้น จึงทำให้ชาใบข้าวกำหดตัว สีของตัวชาใบข้าวกำที่ได้มีสีเขียวเข้มปนเหลืองและม่วงเข้มแซม แสดงดังรูปที่ 1 และผลวิเคราะห์ค่าสีของชาใบข้าวกำหลังจากผ่านกรรมวิธีทั้ง 4 กรรมวิธี แสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) ชาใบข้าวกำทั้ง 4 กรรมวิธีมีค่าความสว่างค่อนข้างต่ำ และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 4 กรรมวิธี โดยชาใบข้าวกำที่มีความสว่างน้อยที่สุด ได้แก่ ชาใบข้าวกำชาฝรั่ง ($L^* = 10.92 \pm 6.94$) รองลงมา ได้แก่ ชาใบข้าวกำชาเขียว ($L^* = 14.18 \pm 0.63$) ชาใบข้าวกำชาจีน ($L^* = 18.29 \pm 0.70$) และชาใบข้าวกำชาอู่หลง ($L^* = 22.17 \pm 0.60$) โดยความร้อนจากกรรมวิธีแปรรูประหว่างการแปรรูปชาใบข้าวกำเปลี่ยนคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) เป็น ฟิโอฟิติน (Pheophytin) และเนื่องจากระยะเวลาในการคั่วชาใบข้าวกำในแต่ละกรรมวิธีแตกต่างกัน [13] จึงทำให้มีค่าความสว่างที่แตกต่างกัน โดยชาใบข้าวกำชาอู่หลงได้รับความร้อนจากการคั่วและการอบนานที่สุดจึงส่งผลให้มีค่าความสว่างสูงที่สุด ในส่วนของค่า a^* (บ่งบอกค่าความเป็นสีเขียว ($-a^*$) -สีแดง ($+a^*$)) ซึ่งทุกกรรมวิธีใช้เวลาในการคั่วที่แตกต่างกัน จึงทำให้สีของชาใบข้าวกำที่ได้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เช่นกัน โดยสีที่ได้ของชาใบข้าวกำจะมีสีเขียวอมม่วง ชาใบข้าวกำชาจีนมีค่า a^* สูงที่สุด (-0.75 ± 0.20) รองลงมา ได้แก่ ชาใบข้าวกำชาอู่หลง ชาใบข้าวกำชาฝรั่ง และชาใบข้าวกำชาเขียว (-1.46 ± 0.11 , -1.92 ± 0.43 และ -2.22 ± 0.05 ตามลำดับ) จะเห็นว่าชาจีนมีความเป็นสีเขียวน้อยที่สุดและมีสีค่อนข้าง



รูปที่ 1 ก) ใบข้าวกำชาเขียว ข) ใบข้าวกำชาฝรั่ง ค) ใบข้าวกำชาจีน ง) ใบข้าวกำชาอู่หลง

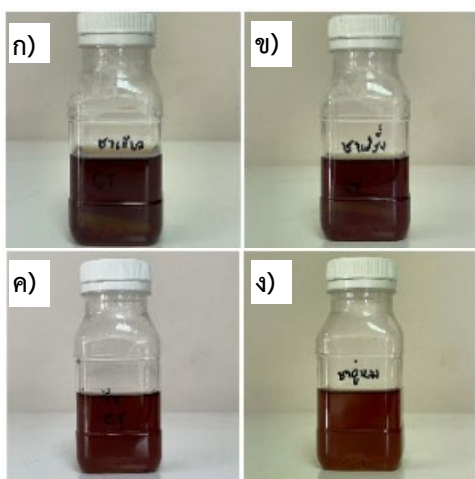
ตารางที่ 2 ค่าสีของชาใบข้าวกำที่ผ่านกระบวนการแปรรูปชาทั้ง 4 กรรมวิธี

กรรมวิธีแปรรูปชา	L^*	ค่าสี a^*	b^*
ชาเขียว	14.18 ± 0.63^{ab}	-2.22 ± 0.05^c	6.97 ± 0.11^c
ชาฝรั่ง	10.92 ± 6.94^b	-1.92 ± 0.43^{bc}	6.54 ± 0.39^c
ชาจีน	18.29 ± 0.70^{ab}	-0.75 ± 0.20^a	8.54 ± 0.29^b
ชาอู่หลง	22.17 ± 0.60^a	-1.46 ± 0.11^b	10.22 ± 0.50^a

L^* คือความสว่าง (มีค่าระหว่าง 0-100 โดย 0 หมายถึงสีดำ และ 100 หมายถึงสีขาว), a^* คือสีแดง-เขียว ($-a^*$ คือสีเขียว, $+a^*$ คือสีแดง), b^* คือสีเหลือง-น้ำเงิน ($-b^*$ คือสีน้ำเงิน, $+b^*$ คือสีเหลือง)

มาทางสีแดง เนื่องจากชาจีนมีระยะเวลาในการคั่วในกระโถนนานที่สุดส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Enzymatic Browning Reaction) และชาเขียวมีความเป็นสีเขียวสูงที่สุด เนื่องจากกรรมวิธีการแปรรูปชาเขียวผ่านการลวก (Blanching) การคั่ว (Pan-frying) คือกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบ (Pretreatment) [14] ซึ่งเป็นวิธีช่วยยับยั้งเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (Polyphenol Oxidase) เป็นสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาสี

น้ำตาล (Enzymatic Browning Reaction) ซึ่งมีผลทำให้สีใบชาคล้ำลง และเมื่อเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสถูกทำลายจึงทำให้ผลิตภัณฑ์คงสีเขียวสดไว้ ดังนั้นชาใบชาวก่ำชาเขียวจึงมีสีเขียวมากกว่าชาจากกรรมวิธีแปรรูปวิธีอื่น [15] และค่าของ b^* (บ่งบอกค่าความเป็นสีน้ำเงิน ($-b^*$) - สีเหลือง ($+b^*$)) เนื่องจากในใบชาวก่ำมีสารควิตุหลักเป็นแอนโทไซยานิน ซึ่งให้สีม่วงแก่ชาใบชาวก่ำ โดยชาใบชาวก่ำที่มีค่า b^* สูงที่สุดได้แก่ ชาใบชาวก่ำชาอุ๋หลง ($+10.22 \pm 0.50$) รองลงมาได้แก่ ชาใบชาวก่ำชาจีน ชาใบชาวก่ำชาเขียว และชาใบชาวก่ำชาฝรั่ง ($+8.54 \pm 0.29$, $+6.97 \pm 0.11$ และ $+6.54 \pm 0.39$ ตามลำดับ) แสดงว่าชาใบชาวก่ำชาอุ๋หลงมีค่าความเป็นสีเหลืองสูงสุดและชาใบชาวก่ำชาฝรั่งมีค่าความเป็นสีเหลืองน้อยสุด โดยมีความแตกต่างของค่าสีสำหรับผลิตภัณฑ์ชาของทั้ง 4 กรรมวิธีอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องจากแอนโทไซยานินเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจากความร้อนในการคั่วและอบ โดยที่แอนโทไซยานินจะถูกเปลี่ยนเป็นชาลโคน (Chalcone) หรือ สลายกลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลงจึงทำให้สีม่วงของชาใบชาวก่ำซีดลง [16] ซึ่งชาใบชาวก่ำชาอุ๋หลงมีระยะเวลาให้ความร้อนจากการคั่วและการอบมากที่สุด จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านสีมากที่สุด



รูปที่ 2 ก) น้ำชาใบชาวก่ำชาเขียว ข) น้ำชาใบชาวก่ำชาฝรั่ง ค) น้ำชาใบชาวก่ำชาจีน ง) น้ำชาใบชาวก่ำชาอุ๋หลง

ตารางที่ 3 ค่าสีของน้ำชาใบชาวก่ำที่ผ่านกระบวนการแปรรูปชาทั้ง 4 กรรมวิธี

น้ำชาใบชาวก่ำ	ค่าสี		
	L^*	a^*	b^*
ชาเขียว	8.73 ± 0.63^a	0.27 ± 0.04^d	0.17 ± 0.10^d
ชาฝรั่ง	6.17 ± 0.36^b	0.69 ± 0.03^c	0.64 ± 0.05^c
ชาจีน	4.71 ± 0.45^c	1.04 ± 0.02^a	1.92 ± 0.12^a
ชาอุ๋หลง	6.73 ± 0.16^b	0.81 ± 0.01^b	1.35 ± 0.09^b

L^* คือความสว่าง (มีค่าระหว่าง 0-100 โดย 0 หมายถึงสีดำ และ 100 หมายถึงสีขาว), a^* คือสีแดง-เขียว ($-a^*$ คือสีเขียว, $+a^*$ คือสีแดง), b^* คือสีเหลือง-น้ำเงิน ($-b^*$ คือสีน้ำเงิน, $+b^*$ คือสีเหลือง)

ในส่วนของน้ำชาใบชาวก่ำที่ผ่านกรรมวิธีแปรรูปทั้ง 4 กรรมวิธี พบว่าน้ำชาใบชาวก่ำที่ได้มีสีแดง-แดงคล้ำและสามารถมองเห็นสีเหลืองเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 2 และค่า L^* , a^* และ b^* ของน้ำชาจากใบชาวก่ำทั้ง 4 กรรมวิธีแสดงดังตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 พบว่าค่าสีของทุกตัวอย่างน้ำชามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับกรรมวิธีในการแปรรูปที่แตกต่างกันที่ใช้เวลาในการคั่วที่ต่างกัน โดยค่าสีของน้ำชาใบชาวก่ำที่ได้นั้นแตกต่างจากใบชาใบชาวก่ำเนื่องจากในใบของชาใบชาวก่ำเองนั้นมีรงควัตถุที่สามารถละลายน้ำได้ดีจึงส่งผลให้เกิดสีของน้ำชาที่แตกต่างจากใบชาใบชาวก่ำ [17] โดยค่าความสว่าง L^* น้ำชาเขียวมีค่าสูงที่สุดถึง 8.73 ± 0.63 เนื่องจากกรรมวิธีในการทำชาเขียวนั้นมีการลวกน้ำร้อนเป็นเวลา 30 วินาทีก่อนนำไปคั่วและอบ สอดคล้องกับค่า a^* ของกรรมวิธีชาเขียว ที่ได้ค่าใกล้เคียง $-a^*$ (สีเขียว) มากที่สุดคือ 0.27 ± 0.04 สอดคล้องกับค่า b^* ของกรรมวิธีแบบชาเขียวมีค่า $+b^*$ (สีน้ำเงิน) น้อยที่สุดคือ 0.17 ± 0.10 เป็นไปตามทิศทางเดียวกันกับผลของค่าสีชาใบชาวก่ำชาเขียว ดังจะเห็นได้ว่าน้ำชาจากใบชาใบชาวก่ำชาเขียวจึงมีสีอ่อนกว่าชาจากกรรมวิธีแปรรูปวิธีอื่น และกรรมวิธีแบบชาจีนมีค่า $+a^*$ (สีแดง) มากที่สุด คือ 1.04 ± 0.02 เนื่องจากเป็นกรรมวิธีที่ใช้เวลาในการคั่วและอบเป็นเวลานานที่สุด และกรรมวิธีแบบชาจีนได้ค่า $-b^*$ (สี

เหลือง) มากที่สุดคือ 1.92 ± 0.12 เนื่องจากกรรมวิธีแบบชาจีนผ่านกระบวนการแปรรูปนานที่สุดจึงสูญเสียคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) มากกว่ากรรมวิธีอื่น ซึ่งส่งผลให้เกิดสีแดงและเหลืองมากกว่ากรรมวิธีอื่นๆ [18]

3.2 ผลของกรรมวิธีการแปรรูปผลิตภัณฑ์ชาใบชาวก่ำต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

ร้อยละความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของชาใบจากชาวก่ำทั้ง 4 กรรมวิธี แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณร้อยละการต้านอนุมูลอิสระของชาใบชาวก่ำที่ผ่านกระบวนการแปรรูปชาทั้ง 4 กรรมวิธี

กรรมวิธีแปรรูปชา	%DPPH inhibition ^{ns}
ชาเขียว	81.99 $\pm$ 0.00
ชาฝรั่ง	81.78 $\pm$ 0.76
ชาจีน	80.79 $\pm$ 0.61
ชาอุหลง	82.27 $\pm$ 1.90

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

การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของชาใบชาวก่ำทั้ง 4 กรรมวิธี ด้วยวิธี 2,2-Diphenyl- 2- picryl- hydrazyl (DPPH) Radical Scavenging Activity Method จากตารางที่ 4 พบว่าชาใบชาวก่ำที่ผ่านกรรมวิธีการแปรรูปทั้ง 4 กรรมวิธีให้ค่าการต้านอนุมูลอิสระ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงว่ากระบวนการแปรรูปชาที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ เนื่องจากมีการควบคุมวัตถุดิบการทดลองได้แก่ ใบชาวก่ำ แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเป็นไปตามปริมาณสารสำคัญในวัตถุดิบและจากการศึกษา ของ Chen et al. [19] ได้ศึกษาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระจากใบชาด้วยกรรมวิธีแปรรูปใบชาที่แตกต่างกัน ได้แก่ กรรมวิธีชาเขียว กรรมวิธีชาดำ (ชาจีน) กรรมวิธีชาอุหลง และ

กรรมวิธีชาจัสมิน (ชาฝรั่ง) พบว่าถึงแม้ว่ากรรมวิธีแปรรูปชาแตกต่างกัน ผลของความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ($p > 0.05$) ค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของชาใบชาวก่ำเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการศึกษาชาสมุนไพรจากใบย่านางและใบรางจืด พบว่าชาใบชาวก่ำมีปริมาณร้อยละการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่า โดยค่าร้อยละการต้านอนุมูลอิสระของชาใบชาวก่ำที่ได้อยู่ระหว่างร้อยละ 80.79-82.27 และ ค่าร้อยละการต้านอนุมูลอิสระของชาใบย่านางและชาใบรางจืดที่ได้อยู่ระหว่างร้อยละ 32.73-39.28 และ 66.35-52.61 ตามลำดับถึงแม้ว่าใช้ปริมาณความเข้มข้นของตัวอย่างในการทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (0.3 มิลลิลิตร/มิลลิลิตร) ซึ่งมากกว่า 5 เท่า ของตัวอย่างทดลองของชาใบชาวก่ำ (0.067 มิลลิลิตร/มิลลิลิตร) [9] เนื่องจากใบชาวก่ำที่มีสีเขียวเข้มแกมม่วงจากสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) อยู่ในกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ [20] และเป็นไปตามรายงานของ C. Somporn et al. [21] พบว่าในชาวก่ำมีสารนอกเหนือจากสารแอนโทไซยานินที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ ยังมีสารอื่น ๆ อีก ได้แก่ คลิโนโลน (Quinolone) อัลคาลอยด์ (Alkaloid) วิตามินอี (Vitamin E) ไฟเตต (Phytate) และสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic) อยู่ปริมาณมากและสารเหล่านี้มีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีเช่นกัน [22]

3.3 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ชาใบจากชาวก่ำทั้ง 4 กรรมวิธี

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ชาใบชาวก่ำทั้ง 4 กรรมวิธี จากผู้เข้าร่วมทดสอบทางประสาทสัมผัสจำนวน 50 คน แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของชาใบชาวก่ำที่ผ่านกรรมวิธีทั้ง 4 กรรมวิธี ไม่มีความแตกต่างอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยความชอบอยู่ในระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง โดยมีคะแนนเฉลี่ยอยู่ที่ 6.32-7.16 เนื่องจากทุกกรรมวิธีการแปรรูปนั้นมีการคั่วและอบที่อุณหภูมิเท่ากันแต่ใช้เวลาคั่วและอบที่แตกต่างกัน จึงอาจทำให้การทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้เข้าร่วมทดสอบให้คะแนนได้ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่จะพบว่าด้านสีของชาใบชาวก่ำที่แปรรูปโดยกรรมวิธีแบบชาฝรั่งได้คะแนนความชอบสูงสุด (7.16 ± 1.42) เมื่อเทียบกับชาชนิดอื่น ๆ เนื่องจากการตัดสินใจในด้านการมองเห็นของผู้บริโภคอาจให้คะแนนความชอบต่อสีที่เข้มกว่า ที่เป็นกลไกทางเคมีหรือกายภาพที่จะทำให้มนุษย์รับรู้ โดยมีผลกระทบทำให้เกิดความรู้สึกต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้ม (Intensity/strength) การแยกจากกัน (Extent/separation) ช่วงเวลา (Duration/retention) และความรู้สึกชอบหรือไม่ชอบ (Hedonics/like-dislike) โดยการมองเห็นของมนุษย์เป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อน ซึ่งการรับรู้และการมองเห็นอาจมีแหล่งกระตุ้นที่มีปฏิสัมพันธ์กับวัตถุตรงหน้า จึงทำให้การยอมรับค่าสีที่เข้มอาจจะมีค่าการยอมรับมากกว่าค่าสีที่มองเห็นที่อ่อนกว่า [23]

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบของลักษณะทางประสาทสัมผัสทางด้าน สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมของชาใบชาวก่ำที่ผ่านกระบวนการแปรรูปชาทั้ง 4 กรรมวิธี

กรรมวิธีแปรรูปชา	สี ^{ns}	กลิ่น ^{ns}	รสชาติ ^{ns}	ความชอบโดยรวม ^{ns}
ชาเขียว	6.60±1.70	6.48±1.63	6.48±1.74	6.78±1.30
ชาฝรั่ง	7.16±1.42	6.66±1.56	6.48±1.61	6.64±1.57
ชาจีน	6.94±1.41	6.64±1.74	6.44±1.86	6.48±1.81
ชาอู่หลง	7.08±1.21	6.76±1.53	6.56±1.76	6.78±1.54

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

ในส่วนของกลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมพบว่า ชาใบชาวก่ำที่ผลิตโดยกรรมวิธีแปรรูปชาแบบชาอู่หลงได้รับคะแนนความชอบสูงสุดซึ่งมีคะแนน

ความชอบมากกว่า ชาเขียว ชาฝรั่ง และชาจีน ในทุก ๆ ด้าน โดยผู้ทดสอบชิมมีความชื่นชอบและให้คะแนนชาอู่หลงมากที่สุด อาจเป็นเพราะพฤติกรรมการดื่มชาของคนไทยมักนิยมบริโภคชาอู่หลงซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์กลุ่มจากพันธุ์ชาจีน [24] โดยชาอู่หลงเป็นที่ได้รับความนิยมในการบริโภคมาเป็นเวลายาวนาน และมีคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายหลายด้าน เช่น สามารถลดระดับน้ำตาลในเลือด ด้านอนุมูลอิสระ อีกทั้งยังมีปริมาณสารกลุ่มโพลีฟีนอล (Polyphenol) และ OTPP (Oolong Tea Polymerized Polyphenol) ซึ่งมีผลต่อการลดและควบคุมไขมันในเส้นเลือดได้อีกด้วย [25] ทางผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสจึงมีความคุ้นเคยในทางด้านประสาทสัมผัสต่าง ๆ ของชาอู่หลงมากกว่าชาแบบอื่น ๆ

4. สรุป

จากการศึกษาผลของกรรมวิธีที่แตกต่างกันในการแปรรูปชาจากใบชาวก่ำดอยสะเก็ดพบว่า กรรมวิธีการแปรรูปทั้ง 4 กรรมวิธี ไม่มีผลต่อปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์สุดท้าย และได้ผลิตภัณฑ์ชาใบชาวก่ำมีลักษณะสีเขียวอมเหลืองซึ่งแตกต่างจากใบชาวก่ำสดที่มีสีเขียวอมม่วง และค่าสีของน้ำชาจากใบชาวก่ำมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ในแต่ละกรรมวิธี และชาใบชาวก่ำทุกกรรมวิธีมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าร้อยละ 80 โดยผลของกรรมวิธีการแปรรูปทั้ง 4 กรรมวิธีไม่มีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ แต่มีผลต่อการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการแปรรูปทั้ง 4 กรรมวิธีมีความเป็นไปได้ในการนำไปแปรรูปชาใบชาวก่ำดอยสะเก็ดได้ แต่อย่างไรก็ตามกรรมวิธีแปรรูปแบบชาอู่หลงได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคสูงสุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงบประมาณโครงการวิจัย ด้านวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม

(ววน.) ปีงบประมาณ 2564 จากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Hayat, H. Malik, U. Bilal and S. Mushtaq, "Tea and its consumption: benefits and risks," *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 55, no. 7, pp. 1-58, Sep. 2013.
- [2] V. S. P. Chaturvedula and I. Prakash, "The aroma, taste, color and bioactive constituents of tea," *Journal of Medicinal Plants Research*, vol. 5, no. 11, pp. 2110-2124, Jun. 2011.
- [3] Y. Liang, J. Zhang, S. Wu and Y. Wu, "Estimation of tea quality by infusion colour difference analysis," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 80, pp. 283-290, Jan. 2005.
- [4] A. Kattikrut and C. Saeyang. (2021, Jan 27). Knowledge Box Set: Cha DIY [Online]. Available: <https://www.okmd.or.th/knowledge-box-set/articles/local-business/362/green-tea-diy>
- [5] B. Leelawat, R. Tilokkul and M. Baikhunakon, "Development of kaimook from purple rice," *Thai Science and Technology Journal*, vol. 28, no.3, pp. 455-465, Mar. 2020.
- [6] N. Semsang, N. Kweawlangka and W. Jantachai. (2001). Flavonoid, total phenolic contents and antioxidant activities of Thai rice extracts [Online]. Available: <http://www.research.cmru.ac.th/research59/ris/view.php?no=545>
- [7] M. C. Lazze, M. Savio, R. Pizzala, O. Cazzalini, P. Perucca, A. I. Scovassi, L. A. Stivala and L. Bianchi, "Anthocyanins induce cell cycle perturbations and apoptosis in different human cell lines," *Carcinogenesis*, vol. 25, no. 8, pp. 1427-1433, Aug. 2004.
- [8] W. Jirarattanarangsri and P. Budprom, "Effect of different processing on phenolic content, anthocyanin content, antioxidant capacity and consumer acceptance of black glutinous rice leaf tea," *Srinakharinwirot University Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 17, Jan-Jun. 2017.
- [9] J. Pookang and K. Jamjang, "Production of tea with antioxidants from Jued and Yanang leaves," in *Proceeding of 3rd National Conference KPRU*, Kamphaengphet Rajabhat University, Thailand, 2016, pp. 599-607.
- [10] *Thai community product standard*. TCPS 120, 2015.
- [11] K. Sueaman, S. Paksee, A. Arpsuwan, R. Chalongsuppunyoo, P. Sam-ang, P. Jannoey and K. Pinwattana, "Determination of antioxidant capacity of riceberry and khao dok mali 105 cultivars," *PSRU Journal of Science and Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 95-108, Aug. 2019.
- [12] S. Waweekajornkeat and S. Chaitep, "Design and testing of continuous tea panner," in *Proceedings of 43rd Kasetsart University Annual Conference: Engineering, Architecture*, Bangkok, Thailand, 2005, pp. 222-229.

- [13] S. Inchuen, S. Simla, P. Phianjam and P. Asanok, "Color and antioxidant property of Caranda (*Carissa carandas* L.) leaves tea as affected by leaf positions and tea processing," *Khon Kean Agriculture Journal*, vol. 45, no. 1, pp. 1247-1252, 2017.
- [14] J. Dutoit and E. Joubert, "The Effect of Pretreatment on the Fermentation of Honeybush Tea (*Cyclopia maculata*)," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 76, pp. 537-545. 1998.
- [15] R. Maliepaard, "Inactivation of polyphenol oxidase in *Camellia sinensis* for the production of high quality instant green tea," Ph.D. dissertation, Dept. BCHM., Pretoria Univ., South Africa, 2009.
- [16] F. C. Stintzing, A. S. Stintzing, B. Frei and R. Carle, "Color and Antioxidant Properties of Cyanidin-Based Anthocyanin Pigments," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 50, pp. 6172-6181. 2002.
- [17] A. Patras, N. P. Brunton, C. O'Donnell and B. K. Tiwari, "Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation," *Trends in Food Science and Technology*, vol. 21, no. 1, pp.3-11, Jan. 2010.
- [18] Y. Liang, J. Lu, L. Zhang, S. Wu and Y. Wu, "Estimation of tea quality by infusion colour difference analysis," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 85, pp. 286-292, 2005.
- [19] Y. Chen, J.Y. Huang, Y. Lin, I.F. Lin, Y.R. Lu, L.H. Liu and H.M.D. Wang, "Antioxidative and Antimelanoma Effects of Various Tea Extracts via a Green Extraction Method," *Journal of Food Quality*, vol. 2018, pp. 1-6, 2018.
- [20] M. Ciulu, M.L. Cádiz-Gurrea and A. Segura-Carretero, "Extraction and Analysis of Phenolic Compounds in Rice: A Review," *Molecules*, vol. 23, no. 11, pp. 1-20, 2018.
- [21] C. Somporn, C. Krainart and J. Tobuch, "The study of antioxidant capacity of green tea from rice seedling," *Rajabhat Agriculture Journal*, vol. 17, no. 1, pp. 21-33, 2018.
- [22] S. Wongpornchai, "Analysis of flavonoids in Thai pigmented rice," *Thailand Science Research and Innovation*, 2005.
- [23] O. Sakkongnantakul, "Development of mocktail drink from rice milk," Thesis, B. Tech., NCIVS 1., Chiangmai, Thailand, 2019.
- [24] K. Ploysri. "10th Anniversary issue," *Tea newsletter*, Tea Institute Mae Fah Luang University, vol. 4, no. 14, Jan-Mar 2014, p. 13. [Online]. Available: <http://archives.mfu.ac.th/database/files/original/30854b174e52bb771394de21b7f58139.pdf>
- [25] V. Nukoolkarn, T. Puksasook and P. Charoenkitviwat, "Hypolipidemic and anti-obesity effects of Oolong tea," *Food Journal Thailand*, vol. 43, no. 3, pp. 37-40, Jul-Sep. 2013.

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

Tyrosinase Inhibitory Efficiency and Antioxidant Activity of Gac Fruit (*Momordica cochinchinensis* Spreng.) Extract

Pornsinee Darapong¹ Sirichan Tachai¹ Jetchan Atthaisong² Nanthawan Jaikla³ Buranee Rabiab¹ and Rawinipa Srimoon^{1*}

¹ Faculty of Agro-Industrial Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok Chanthaburi Campus

² Faculty of Social Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok Chanthaburi Campus

³ Phrapokklao Chanthaburi Nursing Collage

^{1,2} 131 Pluang, Khao Kitchakut, Chanthaburi 22110

³ 36 Leab Noen Rd., Wat Mai, Muang, Chanthaburi 22000

Received 18 March 2022; Revised 3 November 2022; Accepted 30 November 2022

Abstract

This research evaluated the inhibitory efficiency of gac fruit (*Momordica cochinchinensis* Spreng.) extracts on tyrosinase and antioxidant activity. The results showed that ethanolic extract of aril had the highest tyrosinase inhibitory efficiency ($80.57 \pm 0.50\%$), followed by peel extract and seed extract ($p < 0.05$), respectively. The ethanolic extract of aril possessed the strongest tyrosinase inhibition of 1.28 fold compared with that of a standard inhibitor, kojic acid. Water extract of aril revealed the highest content of total phenolic compounds (1.291 ± 0.011 mg GAE/g) and ethanolic extract of seed coat showed the strongest DPPH radical scavenging activity ($63.18 \pm 0.34\%$). The inhibitory efficiency on tyrosinase associated with total phenolic content and antioxidant activity of the extract, especially in the ethanolic fraction. Our results can support the development of gac fruit extract for natural whitening products with further clinical study to confirm the efficiency and safety of the extract. It also enhances the economic value and reduces wastes of gac fruit, particularly peel and seed which were underutilized parts of fruit.

Keywords : Antioxidant Activity; Gac fruit (*Momordica cochinchinensis* Spreng.); Tyrosinase.

* Corresponding Author. Tel.: +66 8171 5329, E-mail Address: rawinipa_sr@rmutto.ac.th

1. Introduction

Nowadays, natural extracts are increasingly being used instead of synthetic substances in various industries, especially those related to health and cosmetic product development. Natural extracts are full of phenolic compounds which have many properties, such as antioxidant activity, anti-aging, anti-wrinkles, anti-inflammatory and anti-chronic diseases [1]-[3]. It is interesting that phenolic compounds exhibit tyrosinase enzyme inhibitory properties because of aromatic rings in their molecules. This structure is similar to tyrosine, the substrate that hydroxylated to L-DOPA (3,4-dihydroxyphenylalanine), dopaquinone and melanin, respectively [4]. This process is catalyzed by tyrosinase enzyme. Tyrosinase inhibitor can bind to copper at active site causes the competitive inhibition, leads the reduction of melanin synthesis in melanocyte [5]-[7].

Gac fruit or Fak-Khao (in Thai) (*Momordica cochinchinensis* Spreng.) is in the Cucurbitaceae family, commonly found in Southeast Asia such as Thailand, Vietnam and Malaysia. Immature fruit is yellowish-green, and turns to reddish-orange with yellow pulp and red aril during ripening. Gac fruit enriches with carotenoids, polyunsaturated fatty acids, α -tocopherol (Vitamin E), phenolic and flavonoid compounds, mainly in aril part [8]. Phenolic acids and flavonoids found in gac are gallic acid, *p*-hydroxy benzoic acid, ferulic acid, synapic acid, myricetin, epigenin, quercetin, rutin, luteolin and hesperidin [9]-[10]. These compounds

play an important role in the ultraviolet protection and tyrosinase inhibition properties [11], [12].

Therefore, this research was focused on tyrosinase inhibitory efficiency and antioxidant properties of gac fruit extracts for the skin lightening product development. It also reduces wastes of gac fruit, especially peel and seed, and enhances the fruit economic value.

2. Research Methodology

2.1 Materials and Methods

2.1.1 Chemicals

Chemicals used in this research were analytical reagent grade: DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl), gallic acid, kojic acid, L-DOPA (3,4-dihydroxy-L-phenylalanine) and tyrosinase from mushroom (2,150 units/ml) were obtained from Sigma-Aldrich (USA). Ethanol was product of BDH (Germany). Ascorbic acid was product of Fisher-Scientific (UK). Disodium hydrogen phosphate and Folin-Ciocalteu phenol reagent were purchased from Loba chemie (India). Sodium dihydrogen phosphate and sodium carbonate were purchased from Univar Ajax Finechem (Australia).

2.1.2 Sample Extraction

Gac fruit samples in ripening period (orange-red peel and yellow pulp) were obtained from Khao Kitchakut, Chanthaburi, Thailand during harvest season in August. Samples were identified by the Department of Plant Science and Landscape, Faculty of Agro-Industrial Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok Chanthaburi

Campus, Chanthaburi, Thailand. Ripe samples were cleaned, separated into five parts (**Fig. 1.**): peel, pulp, aril, seed coat and seed, and cut into small pieces. Each part was macerated overnight at room temperature using two solvents: water and 70% v/v ethanol (10 g of sample macerated with 20 ml of the solvent) according to A. Abdulqader et al. [10]. The mixture was filtered and centrifuged at 5,000 rpm for 30 min. Supernatant was collected and evaporated using rotary evaporator. Crude extracts were kept in 4 °C before analysis.

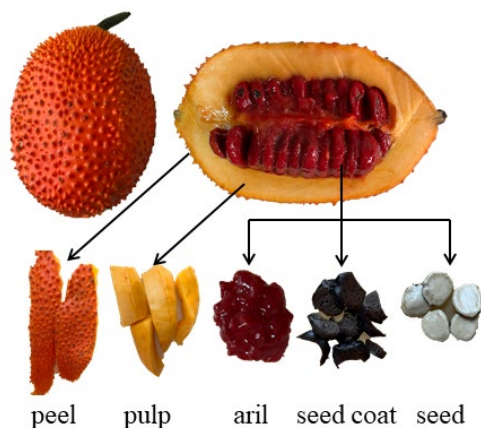


Fig. 1 Gac fruit (*Momordica cochinchinensis* Spreng.) samples (peel, pulp, aril, seed coat and seed)

2.1.3 Tyrosinase Inhibitory Efficiency

The tyrosinase inhibitory efficiency was analyzed by DOPAchrome method modified from A. Manosroi et al. [13]. Briefly, the 0.1 ml of the extract (0.01 mg/ml) or standard kojic acid (0.01 mg/ml) was mixed with 1.8 ml of 20 mM phosphate buffer pH 6.8 (PBS) and 0.1 ml of tyrosinase (100 units/ml). After standing at room temperature for 10 min, the 1 ml of 0.25 mM of L-DOPA was

added and left for 20 min. The absorbance at 492 nm was measured and the percentage of tyrosinase inhibition was calculated from the equation (1) compared with standard kojic acid.

$$\% \text{ Tyrosinase Inhibition} = \frac{(A-B)-(C-D) \times 100}{(A-B)} \quad (1)$$

When

A = The absorbance of the solution with the enzyme but without the extract or standard kojic acid

B = The absorbance of the solution without the enzyme, extract or standard kojic acid

C = The absorbance of the solution with the enzyme, extract and standard kojic acid

D = The absorbance of the extract and standard kojic acid without the enzyme

2.1.4 Total Phenolic Content and DPPH Radical Scavenging Activity

Total phenolic content was performed using Folin-Ciocalteu phenol reagent as described by M. P. Kähkönen et al. [14] and A. Chanwitheesuk et al. [15]. Briefly, the 1.0 ml of the extract or standard gallic acid was mixed with 5.0 ml of 10%v/v Folin-Ciocalteu phenol reagent and left for 5 min in the dark. Then, 2.0 ml of Na₂CO₃ was added and maintained for 30 min in the dark. The absorbance at 765 nm was determined and total phenolic content was expressed as mg gallic acid equivalent per g of the extract (mg GAE/g extract).

DPPH radical scavenging activity was performed using the method adapted from C. Sanchez-Moreno et al. [16]. The

0.5 ml of the extract or standard trolox (0.005, 0.01, 0.015, 0.02 and 0.025 mg/ml) was mixed with 3.0 ml of 0.05 mM DPPH solution. The mixture was shaken and left in the dark for 30 min. The absorbance was measured at 517 nm and the percentage of DPPH radical inhibition was calculated using the equation (2).

$$\% \text{ DPPH Inhibition} = \frac{\text{Actrl} - \text{Astd}/\text{ext} \times 100}{\text{Actrl}} \quad (2)$$

When

Actrl = The absorbance of control

Astd/ext = The absorbance of standard ascorbic acid/the absorbance of the extract

2.2 Statistical Analysis

The tyrosinase inhibition activity, total phenolic content and DPPH radical

scavenging activity were expressed as mean $\pm$ standard deviation of triplicate. The difference among data was analyzed via Duncan's multiple range test at 0.05 of significance ($p < 0.05$). Relationship between total phenolic and tyrosinase inhibitory, as well as DPPH radical scavenging activity and tyrosinase inhibitory efficiency, were determined using r^2 value of the linear regression method.

3. Results and Discussion

The tyrosinase inhibitory efficiency, total phenolic content and DPPH radical scavenging activity of the extracts are demonstrated in **Table 1**.

Table 1 Percentage of tyrosinase inhibition, total phenolic content and DPPH inhibition of gac fruit extract (n = 3)

Gac fruit part		% Tyrosinase inhibition	Total phenolic content (mg GAE/g)	% DPPH inhibition
peel (water extract)	PW	52.20 $\pm$ 0.88 ^a	0.379 $\pm$ 0.012 ^a	37.42 $\pm$ 0.68 ^a
peel (ethanol extract)	PE	73.66 $\pm$ 0.99 ^b	0.386 $\pm$ 0.014 ^a	58.24 $\pm$ 0.68 ^b
pulp (water extract)	PUW	55.18 $\pm$ 0.64 ^c	0.269 $\pm$ 0.009 ^b	18.04 $\pm$ 1.12 ^c
pulp (ethanol extract)	PUE	69.85 $\pm$ 0.32 ^d	0.270 $\pm$ 0.004 ^b	50.10 $\pm$ 2.15 ^d
aril (water extract)	AW	41.44 $\pm$ 1.46 ^c	1.291 $\pm$ 0.011 ^c	10.64 $\pm$ 1.17 ^c
aril (ethanol extract)	AE	80.57 $\pm$ 0.50 ^f	1.103 $\pm$ 0.012 ^d	29.24 $\pm$ 0.86 ^f
seed coat (water extract)	SCW	39.14 $\pm$ 0.55 ^g	0.338 $\pm$ 0.009 ^e	47.11 $\pm$ 1.05 ^g
seed coat (ethanol extract)	SCE	69.87 $\pm$ 1.31 ^d	0.458 $\pm$ 0.008 ^f	63.18 $\pm$ 0.34 ^h
seed (water extract)	SW	51.52 $\pm$ 0.18 ^a	0.259 $\pm$ 0.013 ^b	36.58 $\pm$ 0.54 ^a
seed (ethanol extract)	SE	70.89 $\pm$ 1.02 ^d	0.271 $\pm$ 0.010 ^b	54.81 $\pm$ 0.15 ⁱ
standard kojic acid (0.01 mg/ml)	-	62.88 $\pm$ 1.62 ^f	-	-

The superscript letters (^{a, b, c, ...}) in each column showed the significant difference ($p < 0.05$)

From the results, the ethanolic extract of aril (AE) showed the strongest

tyrosinase inhibition (80.57 $\pm$ 0.50%), followed by ethanolic extract of peel (PE)

and seed (SE), respectively. Ethanolic extract of seed coat (SCE) exhibited the highest DPPH radical scavenging activity ($63.18 \pm 0.34\%$), followed by peel (PE) and seed extract (SE), respectively. In the contrary, water extract of aril (AW) gave the highest content of total phenolic compounds (1.291 ± 0.011 mg GAE/g extract), followed by ethanolic extract of aril (AE) and seed coat (SCE), respectively ($p < 0.05$).

The tyrosinase inhibitory efficiency of different part of gac fruit extract (peel, pulp, aril, seed coat and seed) was conducted using two solvents; ethanol and water. Interestingly, enzyme inhibition, total phenolic content and DPPH radical scavenging activity of ethanolic extract were significantly larger than those of water extract ($p < 0.05$). B. B. Li et al. [17] noted that the combination of water with polar solvent such as ethanol or methanol gave to powerful extraction of phytochemical species. Our result is in agreement with I. Bakhouch et al. [18], who mentioned that tyrosinase inhibition in methanolic extract of *Limonium delicatulum* root was stronger than that of water extract and also gave high phenolics, flavonoids and tannins content, significantly ($p < 0.05$).

The relationships among tyrosinase inhibition, total phenolic content and DPPH radical scavenging activity of the extracts are demonstrated in **Fig. 2**. For the ethanolic extracts, quite good relationship between % tyrosinase inhibition and total phenolic content ($r^2 = 0.8574$), and between % tyrosinase inhibition and % DPPH inhibition ($r^2 = 0.7315$) were found. On the other hand,

there were no relationship between %

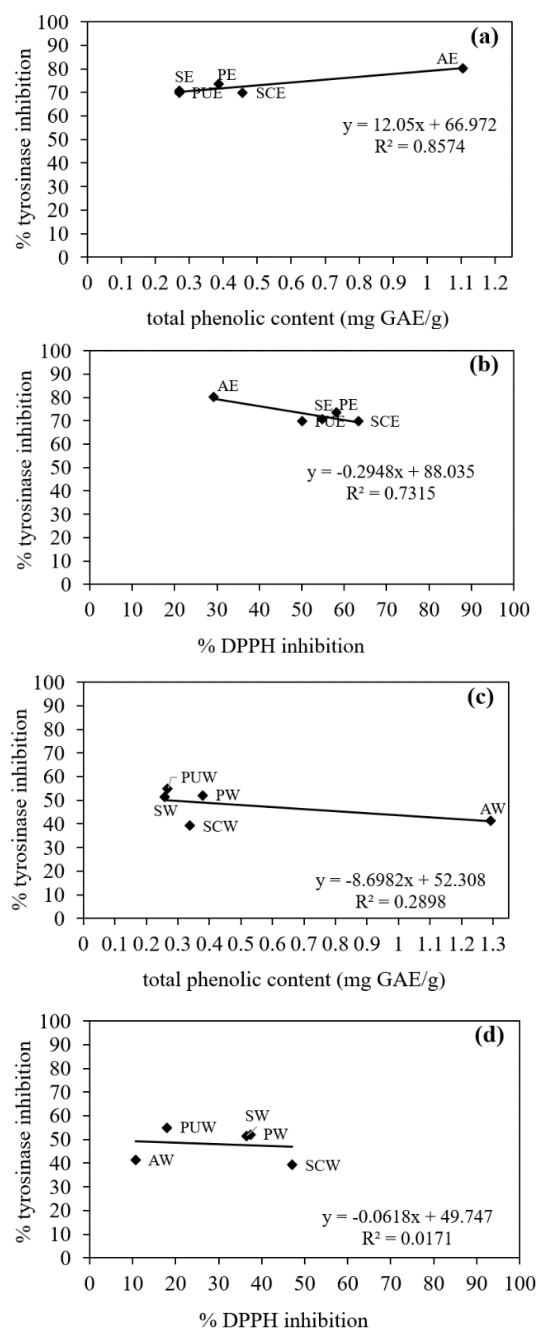


Fig. 2 Relationship between the percentage of tyrosinase inhibition and (a) total phenolic content, (b) percentage of DPPH inhibition in ethanolic extract. The percentage of tyrosinase inhibition and (c) total phenolic content, (d) percentage of DPPH inhibition in water extract.

tyrosinase inhibition and total phenolic content, and between % tyrosinase inhibition and % DPPH inhibition in water extracts ($r^2 = 0.2898$ and 0.0171 , respectively). It was concluded that the extract with high content of phenolic compounds and strong antioxidant activity would be high tyrosinase inhibitory efficiency. This result is in conformity with A. M. Muddathir et al. [19] who found the anti-tyrosinase of some Sudanese medicinal plants extracts had a significant correlation with total phenolic content and antioxidant activity.

The aril, seed and peel of gac fruit showed strong tyrosinase inhibitory efficiency. The ethanolic extract of aril possessed the strongest tyrosinase inhibition of 1.28 fold compared with that of a standard inhibitor, kojic acid (% tyrosinase inhibition = 62.88%). While the ethanolic extract of other parts were between 1.11-1.17 fold compared with standard kojic acid. These findings were correlated with the reports of J. Kubola and S. Siriamornpun [9] and A. Abdulqader et al. [10]. Their researches were noted that in the aril part of gac fruit was a rich source of flavonoids (rutin, myricetin and luteolin), carotenoids (lycopene and β -carotene) and phenolic acids (gallic acid and *p*-hydroxy benzoic acid). These compounds possessed the antioxidant and ultraviolet protection activities [11], [12].

J. Kim et al. [20] reported that pulp and aril extracts of gac fruit, which contained high concentration of phenolic and flavonoid compounds, had anti-

melanogenesis activity *in vitro*. The extracts demonstrated the inhibition of melanin synthesis in melan-A cells by inhibiting tyrosinase activity and suppressing p-PKC expression. The authors suggested that pulp and aril extracts of gac fruit could be used in whitening products. According to the researches of H. Baek et al. [21] and Y. Kim et al. [22], many hydroxyl groups in phenolic compounds made their structure similar to tyrosine, which is the substrate in melanin synthesis. Instead of tyrosine, phenolic compounds could bind with tyrosinase active site, resulting in the decrease of enzyme activity and melanin synthesis.

4. Conclusion

The extracts of gac fruit show the strong tyrosinase inhibitory efficiency, especially in the aril, seed and peel, with reference to standard kojic acid. It may be one of the potentially constituent in natural whitening products with further clinical study to confirm the efficiency and safety of the extract.

5. Acknowledgement

The authors would like to thank Rajamangala University of Technology Tawan-Ok for research grant and Phrapokklao Nursing Collage for the utilization of gac fruit.

6. References

- [1] B. Halliwell, M. A. Murcia, S. Chirico and O. I. Aruoma, "Free radical and antioxidants in food and *in vivo*: what

- they do and how they work?,” *Critical Review in Food Science and Nutrition*, vol. 35, pp. 7-20. 1995.
- [2] K. B. Pandey and S. I. Rizvi, “Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease,” *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, vol. 2, no. 5, pp. 270-278. 2009.
- [3] C. Valadez-Vega, L. Delgado-Olivares, J. A. M. González, E. A. García, J. R. V. Ibarra, E. R. Moreno, M. S. Gutiérrez, M. T. S. Martínez, Z. P. Clara and Z. C. Ramos, “Chapter 16: The role of natural antioxidants in cancer disease,” in *Oxidative Stress and Chronic Degenerative Disease-A Role for Antioxidants*, J. A. Morales-González, Ed., InTech Open, 2013, pp. 391-418.
- [4] Y. S. C. Bae-Harboe and H. Y. Park, “Tyrosinase: a central regulatory protein for cutaneous pigmentation,” *Journal of Investigative Dermatology*, vol. 132, no. 12, pp. 2678-2680. 2012.
- [5] C. K. Okoro, A. T. Bull, A. Mutreja, X. Rong, Y. Huang and M. Goodfellow, “*Lechevalieria atacamensis* sp. nov., *Lechevalieria deserti* sp. nov. and *Lechevalieria roselyniae* sp. nov. isolated from hyperarid soils,” *International Journal of Systematic and Evolutionary*, vol. 60, no. 2, pp. 296-300. 2010.
- [6] K. N. Yoon, N. Alam, K. R. Lee, P. G. Shin, J. C. Cheong, Y. B. Yoo and T. S. Lee, “Antioxidant and antityrosinase activities of various extracts from the fruiting bodies of *Lentinus lepideus*,” *Molecules*, vol. 16, pp. 2334-2347. 2010.
- [7] R. Srimoon, *Phenolic Compounds and Antioxidant Activity in Plants*. 1st ed. Bangkok: Odeonstore Publishing, 2020.
- [8] A. V. Le, T. T. Huynh, S. E. Parks, M. H. Nguyen and P. D. Roach, “Bioactive composition, antioxidant activity, and anticancer potential of freeze-dried extracts from defatted gac (*Momordica cochinchinensis* Spreng.) seeds,” *Medicines*, vol. 5, no. 3, pp. E104. 2018.
- [9] J. Kubola and S. Siriamornpun, “Phytochemicals and antioxidant activity of different fruit fractions (peel, pulp, aril and seed) of Thai gac (*Momordica cochinchinensis* Spreng),” *Food Chemistry*, vol. 127, no. 3, pp. 1138-1145. 2011.
- [10] A. Abdulqader, F. Ali, A. Ismail and N. M. Esam, “Antioxidant compounds and capacities of Gac (*Momordica cochinchinensis* Spreng) fruits,” *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, vol. 9, no. 4, pp. 158-167. 2019.
- [11] S. Oksana, B. Marian, R. Mahendra and S. H. Bo, “Plant phenolic compounds for food, pharmaceutical and cosmetics production,” *Journal of Medicinal Plants Research*, vol. 6, no. 13, pp. 2526-2539. 2012.
- [12] C. A. De Oliveira and M. F. Dario, “Bioactive Cosmetics,” in *Handbook of Ecomaterials*, L. M. T. Martínez, Ed. Springer International Publishing, 2018, pp. 1-23.
- [13] A. Manosroi, K. Kumguan, C. Chankhampan, W. Manosroi and J. Manosroi, “Nanoscale gelatinase A

- (MMP-2) inhibition on human skin fibroblast of Longkong (*Lansium domesticum*) Correa leaf extracts for anti-aging,” *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 12, pp. 1-11. 2012.
- [14] M. P. Kähkönen, A. I. Hopia, H. J. Vuorela, J. P. Rauha, K. Pihlaja, T. S. Kujala and M. Heinonen, “Antioxidant activity of plant extracts containing phenolic compounds,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 47, pp. 3954-3962. 1999.
- [15] A. Chanwitheesuk, A. Teerawut gulrag and N. Rakariyatham, “Screening of antioxidant activity and antioxidant compounds of some edible plants of Thailand,” *Food Chemistry*, vol. 92, pp. 491-497. 2004.
- [16] C. Sanchez-Moreno, J. A. Larrauri and F. Saura-Calixto, “A procedure to measure the antiradical efficiency of polyphenols,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 79, pp. 270-276. 1998.
- [17] B. B. Li, B. Smith and M. M. Hossain, “Extraction of phenolics form citrus peels I: solvent extraction method,” *Separation Science and Technology*, vol. 48, pp. 182-189. 2006.
- [18] I. Bakhouch, T. Aliat, T. Boubel louta, L. A. Gali and Y. Bellik, “Phenolic contents and *in vitro* antioxidant, antityrosinase, and anti-inflammatory effects of leaves and roots extracts of the halophyte *Limonium delicatulum*,” *South African Journal of Botany*, vol. 139, pp. 42-49. 2021.
- [19] A. M. Muddathir, K. Yamauchi, I. Batubara, E. A. M. Mohieldinc and T. Mitsunaga, “Anti-tyrosinase, total phenolic content and antioxidant activity of selected Sudanese medicinal plants,” *South African Journal of Botany*, vol. 109, pp. 9-15. 2017.
- [20] J. Kim, S. C. Hong, E. H. Lee, J. W. Lee, S. H. Yang and J. C. Kim. “Preventive effect of *M. cochinchinensis* on melanogenesis via tyrosinase activity inhibition and p-PKC signaling in melan-A cell,” *Nutrients*, vol. 13, no. 3894, pp. 1-11. 2021.
- [21] H. Baek, H. Rho, J. Yoo, S. Ahn, J. Lee and J. Lee, “The inhibitory effect of new hydroxamic acid derivatives on melanogenesis,” *Bulletin of the Korean Chemical Society*, vol. 29, pp. 43-46. 2008.
- [22] Y. Kim, K. Kang and T. Yokozawa, “The anti-melanogenic effect of pycnogenol by its anti-oxidative actions,” *Food and Chemical Toxicology*, vol. 46, pp. 2466-2471. 2008.

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

การพัฒนาสูตรซอสบ๊วยเจียวจากน้ำส้มโอและเปลือกส้มโอ

สุธิดา กิจจาวรเสถียร จิราภัทร โอทอง ลัดดาวัลย์ กลิ่นมัลย์ วรลักษณ์ ป้อมน้อย
และ วรธร ป้อมเย็น*

สาขาวิชาอาหารโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
168 ถนนศรีอยุธยา แขวงวรขิงยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300

รับบทความ 3 มิถุนายน 2566 แก้ไขบทความ 21 ตุลาคม 2566 ตอรับบทความ 30 พฤศจิกายน 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสูตรซอสบ๊วยเจียวจากน้ำส้มโอและเปลือกส้มโอ โดยศึกษาซอสบ๊วยเจียวสูตรพื้นฐาน เพื่อนำมาศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของน้ำส้มโอทดแทนน้ำเปล่าในซอสบ๊วยเจียว 4 สูตร ได้แก่ ปริมาณร้อยละ 0 (เป็นสูตรควบคุม) 25 50 75 ของน้ำหนักส่วนผสมน้ำเปล่าทั้งหมด จากนั้นนำมาศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของเปลือกส้มโอเสริมในซอสบ๊วยเจียว 4 สูตร ได้แก่ ปริมาณร้อยละ 0 10 15 และ 20 ของ น้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด และนำไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่า ปริมาณน้ำส้มโอทดแทนน้ำเปล่าในซอสบ๊วยเจียว คือ ปริมาณร้อยละ 50 และเปลือกส้มโอเสริมซอสบ๊วยเจียวปริมาณ คือ ปริมาณร้อยละ 15 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี พบว่า ในสูตรซอสบ๊วยเจียวที่พัฒนาใช้น้ำส้มโอและเปลือกส้มโอ พบว่า มีค่าความชื้นปริมาณร้อยละ 28.55 โปรตีนร้อยละ 0.27 ไขมันร้อยละ 0.71 เถ้าร้อยละ 1.57 คาร์โบไฮเดรตรวมร้อยละ 68.90 และใยอาหารร้อยละ 95 และ ค่า pH 3.11 ส่วนผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) มีค่าเท่ากับ 31.43 7.60 19.47 ตามลำดับ ค่าความขุ่นค่าความขุ่น มีค่าเท่ากับ 11.0 cP

คำสำคัญ : ซอสบ๊วยเจียว; น้ำส้มโอ; เปลือกส้มโอ

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

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

Formulation Development of Plum Sauce from Pomelo Juice and Pomelo Pulp

Suthida Kitjavorasatien Jiraphat Othong Laddawan Klinmalai Woralak Pomnoi and Vorathon Pomyen*

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 June 2023; Revised 21 October 2023; Accepted 30 November 2023

Abstract

The objective of this research was to develop a recipe for plum sauce from pomelo juice and pomelo pulp. By studying the basic recipe for plum sauce. To study the appropriate amount of pomelo juice in place of water in 4 formulas of plum sauce, namely 0 percent (a controlled formula) 25 50 75 of the total weight of the water ingredients. Then, the appropriate amount of added pomelo pulp in 4 formulas of plum sauce was studied, namely 0, 10, 15, and 20 percent of the total ingredient weight. Then it was evaluated for sensory quality. It was found that the best amount of pomelo juice to replace water in plum sauce was 50% and the best amount of pomelo peel to supplement plum sauce was 15 %. The chemical analysis shows that the developed plum sauce recipe using pomelo juice and pomelo pulp has a moisture content of 28.55%, protein content of 0.27%, fat content of 0.71%, ash content of 1.57%, carbohydrate content of 68.90%, and dietary fiber content of 95% and the pH value is 3.11. As for the physical quality analysis results, it was found that the brightness value (L*), red value (a*), and yellow value (b*) were equal to 31.43, 7.60, 19.47, respectively. The viscosity value Viscosity is equal to 11.0 cP.

Keywords: Plum Sauce; Pomelo Juice; Pomelo Pulp

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

1. บทนำ

ส้มโอเป็นผลไม้ที่ขึ้นชื่อของจังหวัดนครปฐม โดยสายพันธุ์ที่นิยมกันมาก คือ ขาวน้ำผึ้ง และด้วยรสชาติที่หวานอร่อย เป็นผลไม้ตระกูลส้ม และเป็นหนึ่งในผลไม้เศรษฐกิจที่นิยมปลูกกันอย่างแพร่หลาย ส้มโอสามารถให้ผลผลิตได้ตลอดทั้งปี เนื้อส้มโอเป็นแหล่งของสารอาหารที่สำคัญ มีสรรพคุณทางยา และวิตามินซีสูง จึงทำให้ผู้นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ ส่งผลให้ส้มโอกลายเป็นผลไม้เศรษฐกิจส่งออกที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย [1] ในปี 2565 มีปริมาณการส่งออกทั้งหมด 138,009 ตัน มูลค่า 123,499,728 ดอลลาร์สหรัฐ [2] โดยส่วนใหญ่นิยมบริโภคเนื้อของส้มโอเป็นหลัก ส่วนเปลือกนิยมนำมาแปรรูปโดยการแช่อิ่ม หรือเชื่อม แต่อย่างไรก็ตามเปลือกส้มโอก็ยังคงเป็นวัตถุดิบที่ถูกทิ้งในปริมาณมาก ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ ทั้งที่เปลือกของส้มโอสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่นกัน มีการศึกษาพบว่าเปลือกส้มโอส่วนขาวมีปริมาณใยอาหารสูงร้อยละ 16.05-21.87 และมีค่าประสิทธิภาพสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน เท่ากับ 1.27-1.46 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัม [3] มีทั้งใยอาหารที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ซึ่งใยอาหารนั้นมีส่วนช่วยในการควบคุมน้ำหนักตัว ชะลอการดูดซึมของระดับน้ำตาลในเลือด ป้องกันการท้องผูก และลดความเสี่ยงของการเกิดมะเร็งลำไส้ได้ นอกจากเปลือกส้มโอมีใยอาหารในปริมาณที่มากแล้ว เปลือกส้มโอยังมีสารสำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ นารินจิน (Naringin) ซึ่งเป็นสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) โดยสารชนิดนี้มีคุณสมบัติในการยับยั้งการแพร่กระจายของเซลล์มะเร็ง ลดระดับน้ำตาลในเลือด และป้องกันการเกิดโรคที่เกี่ยวข้องกับหลอดเลือดหัวใจ [4]

ในปี 2564 ตลาดซอสและเครื่องปรุงรสทั่วโลกมีมูลค่ากว่า 35,000 ล้านเหรียญสหรัฐฯ และคาดว่าจะจากปี 2565 ถึง 2573 จะมีอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปีร้อยละ 5.6 ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญที่ผลักดันการเติบโตของตลาดซอสและเครื่องปรุงรสนี้มาจากการรับรู้ถึงประโยชน์ของส่วนผสมที่เป็นเครื่องเทศและสมุนไพร แนวโน้มจำนวน

คนที่ทำอาหารที่บ้านที่เพิ่มขึ้น โดยมีเอเชียเป็นตลาดส่งออกหลัก [5] ซึ่งพฤติกรรมผู้บริโภคของมนุษย์ในปัจจุบันนี้ ส่วนใหญ่ไม่ต้องการความซ้ำซากและจำเจ ในปัจจุบัน สังคมเมืองเริ่มเข้าสู่วิถีชีวิตที่เร่งรีบ ต้องการอาหารที่รับประทานง่าย ใช้เวลาในการปรุงประกอบที่รวดเร็ว และเพื่อลดขั้นตอนการปรุงประกอบอาหารที่ยุ่งยาก ทำให้ผู้บริโภคหันมาพึ่งพาอาหารสำเร็จรูปเพิ่มมากขึ้น การพัฒนาซอสสำเร็จรูปมาใช้ในการปรุงอาหารเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งนอกจากจะช่วยลดเวลาการปรุงประกอบอาหารแล้ว ผลิตภัณฑ์ซอสสำเร็จรูปยังมีอายุการเก็บรักษาที่นานกว่าอาหารสดทั่วไป ซึ่งสะดวกต่อการขนส่ง และการจัดจำหน่าย เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่อุตสาหกรรมอาหารไทยในการส่งออกผลิตภัณฑ์ในอนาคตอีกด้วย ซอสบ๊วยเจียว เป็นผลิตภัณฑ์ประเภทหนึ่งที่ได้รับสเปรี้ยวหวาน ใช้ในอาหารจีน เป็นน้ำจิ้มสำหรับอาหารทอด เช่น เปาะเปี๊ยะ ไช้ผัดนึ่ง ฮ่อยจ๊อ ไก่ทอด กุ้งทอด ลูกชิ้นทอด เป็นสินค้าเครื่องปรุงรสอาหารได้รับความนิยมในตลาดอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีแนวโน้มเติบโตในระยะยาว

ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยสาขาวิชาอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จึงนำส้มโอมาแปรรูปในผลิตภัณฑ์ซอสบ๊วยเจียว เพื่อพัฒนาซอสบ๊วยเจียวให้มีรูปแบบใหม่ โดยใช้น้ำส้มโอและเปลือกส้มโอ ให้เป็นซอสอเนกประสงค์ใช้สำหรับเป็นเครื่องจิ้มอาหารประเภททอด นำซอสเป็นเครื่องต้มได้ หรือราดบนไอศกรีม เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่เปลือกส้มโอ และเพื่อเป็นแนวทางในการใช้น้ำส้มโอเป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ และเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้แก่ซอสบ๊วยเจียว

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัตถุดิบและการเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบในการทำซอสบ๊วยเจียว ได้แก่

- 1) เนื้อบ๊วยดอง (ตรามังกร, ประเทศไทย)
- 2) น้ำบ๊วยดอง (ตรามังกร, ประเทศไทย)

3) น้ำส้มสายชูกลั่น 5 % (ตรา อสร, ประเทศไทย)

4) น้ำตาลทราย (ตรามิตรผล, ประเทศไทย) และน้ำเปล่า

2.1.1 ขั้นตอนการเตรียมซอสบ๊วยเจี่ย

1) ชั่งส่วนผสมตามสูตร

2) ปั่นส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกัน โดยใช้เครื่องปั่นของเหลว (Cuizimate Rbsproben, ประเทศไทย) กำลังไฟ 1500 วัตต์ ความเร็วในการปั่น ระดับ 4 เป็นเวลา 2 นาที

3) ตั้งบนเตาแม่เหล็กไฟฟ้า (Electrolux, ประเทศไทย) กำลังไฟ 2,000 วัตต์ ใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วเคี่ยวเป็นเวลา 30 นาที จนขึ้นเหนียวออกจากเตา พักทิ้งไว้จนเย็น ตักใส่ภาชนะ

2.1.2 การเตรียมน้ำส้มโอ

น้ำส้มโอเตรียมจากเนื้อส้มโอส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง (Citrus Maxima Burm.f.) จังหวัดนครปฐม ปอกเปลือกส้มโอ แกะเมล็ดออก เอาเฉพาะส่วนเนื้อ นำเนื้อส้มโอมาแช่ในน้ำเกลือที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 (โดยน้ำหนัก) เป็นระยะเวลา 30 นาทีเพื่อลดความขม ล้างน้ำเปล่า 2 รอบ จากนั้นนำเนื้อส้มโอมาเข้าเครื่องปั่นของเหลว (Cuizimate Rbsproben, ประเทศไทย) กำลังไฟ 1500 วัตต์ ปั่นให้ละเอียดความเร็วในการปั่น ระดับ 5 เวลา 10 นาที

2.1.3 การเตรียมเปลือกส้มโอส่วนสีขาว

เตรียมส้มโอ ปอกเปลือกส่วนสีเขียวออก ใช้เฉพาะส่วนสีขาว (Albedo) โดยนำไปแช่กับเกลือความเข้มข้นร้อยละ 50 พักไว้เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลาล้างน้ำเปล่า 5 ลิตร ต่อเปลือกส้มโอ 1 กิโลกรัม เป็นเวลา 10 นาที ทำซ้ำ 5 รอบ เพื่อลดความขมและความเค็มของเกลือ นำเปลือกส้มโอห่อผ้าขาวบาง แล้วบิดน้ำออกจนแห้ง จากนั้นนำห่อน้ำเป็นชิ้นขนาด 2×2×2

มิลลิเมตร นำเข้าเตาอบลมร้อน (Dryer Machine O.V.D series 15 trays, ประเทศไทย) เพื่อไล่ความชื้นด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นปั่นให้ละเอียด โดยใช้เครื่องบดสับอาหาร (Robot coupe able-Top Cutter Mixer 2.9 ลิตร, ประเทศไทย) กำลังไฟ 550 วัตต์

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำส้มโอและเปลือกส้มโอที่ใช้ในการเตรียมซอส ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า คาร์โบไฮเดรต โยอาหาร และพลังงานทั้งหมด โดยวิธีของ AOAC (2019) [6]

2.2 การคัดเลือกซอสบ๊วยเจี่ยสูตรพื้นฐานที่เหมาะสม

คัดเลือกสูตรพื้นฐานซอสบ๊วยเจี่ยโดยทำซอสบ๊วยเจี่ยสูตรพื้นฐาน 3 สูตร ดังตารางที่ 1 เพื่อคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาใช้ในการพัฒนาน้ำส้มโอและเปลือกส้มโอในซอสบ๊วยเจี่ยต่อไป และทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของซอสบ๊วยเจี่ยทั้ง 3 สูตร

ตารางที่ 1 สูตรพื้นฐานของซอสบ๊วยเจี่ยจำนวน 3 สูตร

วัตถุดิบ	น้ำหนักวัตถุดิบ (กรัม)		
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
เนื้อบ๊วยดอง	16	64	6
น้ำตาลทรายขาว	200	187	100
น้ำส้มสายชู	50	114	-
น้ำเปล่า	150	45	60
น้ำบ๊วยดอง	12	12	-
เกลือ	-	3	-

โดยการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสทดสอบโดยนำสูตรซอสบ๊วยเจี่ยพื้นฐานที่ได้รับการคัดเลือกจำนวน 1 สูตร วางแผนการทดลองแบบสุ่มไม่บล็อกสมบูรณ์ Randomized Complete Block Design (RCBD) ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีการชิมแบบให้คะแนน

ความชอบ 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) ใช้ผู้ชิมที่เป็นอาจารย์และนักศึกษาศาखाวิชาอาหารและโภชนาการที่ผ่านการฝึกฝนในการชิม จำนวน 80 คน เพื่อคัดเลือกสูตรพื้นฐานสำหรับพัฒนาซอสบ๊วยเจียวเสริม น้ำส้มโอและเปลือกส้มโอต่อไป

2.3 การพัฒนาซอสบ๊วยเจียวเสริม น้ำส้มโอและเปลือกส้มโอ

2.3.1 การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของน้ำส้มโอทดแทนน้ำเปล่าในซอสบ๊วยเจียว

นำสูตรพื้นฐานที่ได้รับการคัดเลือกมาศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของน้ำส้มโอทดแทนน้ำเปล่าในซอสบ๊วยเจียว 4 สูตร คือ ซอสบ๊วยเจียวที่ใช้น้ำเปล่า (ร้อยละ 0) เป็นสูตรควบคุม และสูตรร้อยละ 25 50 75 ของน้ำหนักส่วนผสมน้ำเปล่าทั้งหมด จากนั้นนำไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส เพื่อนำไปศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของเปลือกส้มโอเสริมในซอสบ๊วยเจียวต่อไป

2.3.2 การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของเปลือกส้มโอเสริมในซอสบ๊วยเจียว

นำปริมาณที่เหมาะสมของน้ำส้มโอทดแทนน้ำเปล่าในซอสบ๊วยเจียวที่ได้รับการคัดเลือกมาศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของเปลือกส้มโอที่ใช้เสริมในซอสบ๊วยเจียว 4 สูตร คือ ร้อยละ 0 10 15 และ 20 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด จากนั้นนำไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีกายภาพและประสาทสัมผัสของซอสบ๊วยเจียวสูตรควบคุมกับสูตรที่พัฒนาซอสบ๊วยเจียวจากน้ำส้มโอและเปลือกส้มโอต่อไป

2.3.3 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี กายภาพและประสาทสัมผัสของซอสบ๊วยเจียวสูตรควบคุมกับสูตรที่พัฒนาซอสบ๊วยเจียวจากน้ำส้มโอและเปลือกส้มโอ

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซอสบ๊วยเจียวแต่ละสูตร ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้าคาร์โบไฮเดรต ใยอาหาร และพลังงานทั้งหมด โดยวิธีของ AOAC (2019) คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่

- ค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter (รุ่น PH 818 Smart Sensor, China)

- ค่าสีระบบ CIE (L^* , a^* , b^*) ด้วยเครื่องวัดสี (Colormeter) (ColorFlex EZ, Hunter Associates Laboratory Inc., USA)

- ค่าความหนืด (Viscosity) ด้วยเครื่องวัดค่าความหนืดที่มีหัวเข็ม Small Sample เบอร์ 21 ความเร็วรอบ 6 rpm ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (รุ่น LVDL-21 Brookfield, USA)

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสทดสอบโดยนำสูตรซอสบ๊วยเจียวพื้นฐานที่ใช้น้ำเปล่า (ร้อยละ 0) และสูตรที่พัฒนาซอสบ๊วยเจียวจากน้ำส้มโอและเปลือกส้มโอ วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ Randomized Complete Block Design (RCBD) ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีการชิมแบบให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) ใช้ผู้ชิมที่เป็นอาจารย์และนักศึกษาศาखाวิชาอาหารและโภชนาการที่ผ่านการฝึกฝนในการชิม จำนวน 80 คน

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

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

3. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของน้ำส้มโอและเปลือกส้มโอ

จากการทดสอบทางเคมีของน้ำส้มโอและเปลือกส้มโอที่ใช้ในการเตรียมทำซอส ในปริมาณ 100 กรัม

พบว่าปริมาณความชื้น โปรตีน เถ้า คาร์โบไฮเดรตรวม
ใยอาหาร พลังงานต่อ 100 กรัม มีความแตกต่างกัน
อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนไขมันไม่มีความ
แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)
โดยน้ำส้มโอมีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า
คาร์โบไฮเดรตรวม และใยอาหาร เท่ากับร้อยละ 89.80
0.53 0.00 0.60 9.04 และ 1.75 ตามลำดับ และให้

พลังงานต่อ 100 กรัมเท่ากับ 38.28 กิโลแคลอรี
ส่วนเปลือกส้มโอพบว่า มีปริมาณความชื้น โปรตีน
เถ้า คาร์โบไฮเดรตรวม และใยอาหาร เท่ากับร้อยละ
57.23 0.86 0.00 1.54 40.37 และ 21.39
ตามลำดับ และให้พลังงานต่อ 100 กรัมเท่ากับ
164.92 กิโลแคลอรี ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำส้มโอ และเปลือกส้มโอในปริมาณ 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมี	น้ำส้มโอ	เปลือกส้มโอ
ความชื้น (ร้อยละ)	89.80 ^a ±2.10	57.23 ^b ±1.21
โปรตีน (ร้อยละ)	0.53 ^b ±0.00	0.86 ^a ±0.01
ไขมัน (ร้อยละ) ^{ns}	0.00±0.00	0.00±0.00
เถ้า (ร้อยละ)	0.60 ^b ±0.02	1.54 ^a ±0.02
คาร์โบไฮเดรตรวม (ร้อยละ)	9.04 ^b ±0.02	40.37 ^a ±0.15
ใยอาหาร (ร้อยละ)	1.75 ^b ±0.01	21.39 ^a ±0.87
พลังงานต่อ 100 กรัม (กิโลแคลอรี)	38.28 ^b ±1.25	164.92 ^a ±3.69

หมายเหตุ : ^{a, b} หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

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

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยและค่าความแตกต่างคุณภาพทางประสาทสัมผัสของสูตรพื้นฐานซอสบ๊วยเจียว จำนวน 3 สูตร

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
ลักษณะปรากฏ	7.70 ^a ±0.85	6.85 ^b ±0.80	6.90 ^b ±0.90
สี	7.85 ^a ±0.80	7.20 ^b ±0.68	6.92 ^b ±0.79
กลิ่น	8.05 ^a ±0.87	7.25 ^{ab} ±0.70	6.82 ^b ±0.74
รสชาติ	7.47 ^a ±0.84	6.80 ^b ±0.72	6.75 ^b ±0.70
เนื้อสัมผัส	8.05 ^a ±0.87	7.25 ^{ab} ±0.70	6.90 ^b ±0.77
ความชอบโดยรวม	8.00 ^a ±0.64	7.02 ^b ±0.76	6.97 ^b ±0.8

หมายเหตุ : ^{a, b} หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.2 ผลการคัดเลือกซอสบ๊วยเจียวสูตรพื้นฐานที่เหมาะสม

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่าผู้ชิม
ให้การยอมรับสูงที่สุดในสูตรที่ 1 ในด้านลักษณะปรากฏ

สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม
โดยมีคะแนนเฉลี่ยที่ 7.70 7.85 8.05 7.47 8.05 และ
8.00 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3 ซึ่งอยู่ในระดับความชอบ

ปานกลางถึงชอบมาก มีลักษณะของซอสบ๊วยเจี่ยเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน [7] คือ ซอสต้องเป็นของเหลวข้น ไม่ตกผลึก มีเนื้อบ๊วยแขวนลอยสม่ำเสมอต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของซอสบ๊วยเจี่ยและส่วนประกอบที่ใช้ มีกลิ่นหอมของบ๊วยดอง ไม่มีกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นรสเปรี้ยวบูด ส่วนสูตรที่ 2 และ 3 มีความเหลวมากไม่ข้น เมื่อนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ พบว่าด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมมีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังนั้นจึงเลือกสูตรที่ 1 เป็นสูตรพื้นฐานในการศึกษาปริมาณการใช้น้ำส้มโอทดแทนน้ำเปล่าในซอสบ๊วยเจี่ยในขั้นตอนต่อไป ดังตารางที่ 3

3.3 ผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของน้ำส้มโอทดแทนน้ำเปล่าในซอสบ๊วยเจี่ย

จากตารางที่ 4 ผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของน้ำส้มโอทดแทนน้ำเปล่าในซอสบ๊วยเจี่ยพบว่า

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยและค่าความแตกต่างคุณภาพทางประสาทสัมผัสของน้ำส้มโอทดแทนน้ำเปล่าในซอสบ๊วยเจี่ยจำนวน 4 สูตร

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	สูตรที่ 1 (ร้อยละ 0)	สูตรที่ 2 (ร้อยละ 25)	สูตรที่ 3 (ร้อยละ 50)	สูตรที่ 4 (ร้อยละ 75)
ลักษณะปรากฏ	8.15 ^a ±0.78	8.10 ^a ±0.84	8.03 ^a ±0.80	7.65 ^b ±0.75
สี	7.97 ^a ±0.97	8.00 ^a ±0.92	7.89 ^a ±0.76	7.50 ^b ±0.99
กลิ่น	7.94 ^a ±0.95	7.99 ^a ±0.63	8.02 ^a ±0.68	7.50 ^b ±0.94
รสชาติ	8.09 ^a ±0.45	8.01 ^a ±0.58	7.97 ^a ±0.47	6.92 ^b ±0.65
เนื้อสัมผัส	8.15 ^a ±0.63	7.98 ^a ±0.89	7.98 ^a ±0.93	7.50 ^b ±0.78
ความชอบโดยรวม	8.18 ^a ±0.97	8.07 ^a ±0.67	8.00 ^a ±0.64	7.27 ^b ±0.69

หมายเหตุ : ^{a, b} หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.0$)

3.4 ผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของเปลือกส้มโอเสริมในซอสบ๊วยเจี่ย

ค่าเฉลี่ยและค่าความแตกต่างคุณภาพทางประสาทสัมผัสของการใช้เปลือกส้มโอเสริมซอสบ๊วยเจี่ย

ผู้ชิมให้การยอมรับการใช้น้ำส้มโอทดแทนน้ำเปล่าในซอสบ๊วยเจี่ยร้อยละ 50 ไม่แตกต่างจากสูตรร้อยละ 0 (สูตรควบคุม) ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.08 7.89 8.02 7.97 7.98 และ 8.00 ตามลำดับ โดยเมื่อปริมาณน้ำส้มโอเพิ่มมากขึ้น ซอสบ๊วยเจี่ยที่ได้จะมีสีที่เข้มขึ้น มีความขมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในส้มโอมีสารให้รสขมอยู่ตามธรรมชาติ เกิดจากนารินจิน[8] และสารประกอบลิโมนอยด์ ซึ่งก่อให้เกิดกลิ่นและรสชาติเฉพาะของส้มโอ [9] ทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำส้มโอมากขึ้นส่งผลให้ซอสบ๊วยเจี่ยมีกลิ่นรสที่ขมมากขึ้น ผู้ชิมจึงให้คะแนนความชอบลดลง นอกจากนี้ปริมาณน้ำส้มโอที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ซอสบ๊วยมีความหนืดเพิ่มขึ้นจากใยอาหารในน้ำส้มโอ โดยจากตารางที่ 2 น้ำส้มโอ 100 กรัม มีใยอาหารร้อยละ 1.75 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกสูตรร้อยละ 50 เป็นปริมาณ สูงสุดที่น้ำส้มโอสามารถใช้ทดแทนน้ำเปล่าในซอสบ๊วยเจี่ยและนำมาศึกษาการใช้เปลือกส้มโอเสริมในซอสบ๊วยเจี่ยในขั้นตอนต่อไป

จำนวน 4 สูตร พบว่าผู้ชิมให้การยอมรับสูตรร้อยละ 15 ไม่แตกต่างจากสูตรร้อยละ 0 (สูตรควบคุม) ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม โดยมีค่าเฉลี่ย 7.65 7.87 7.02 8.02 7.45 และ 8.00

ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับขอบปานกลางถึงขอบมาก เมื่อนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติพบว่า ด้านกลิ่นในทุกระดับไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเปลือกส้มโอในซอสบ๊วยเจียวมากขึ้นจะทำให้ซอสบ๊วยมีความข้นหนืดมากขึ้น เนื่องจากเพคตินที่ได้จากเปลือกส้มโอเป็นใยอาหารชนิดละลายน้ำ [10] เมื่อละลายน้ำหรือละลายในตัวทำละลายแล้วจะเกิดการขยายตัวของพอลิเมอร์ทำให้เกิดความหนืดขึ้น ทั้งในด้านการละลาย และการอุ้มน้ำ ทั้งนี้ ความหนืดของเพคตินจะมีความแตกต่างกันตามชนิดหรือวัตถุดิบที่ผลิต ความ

เข้มข้น และปริมาณแคลเซียม รวมถึงความเป็นกรดต่างเมื่อเพคตินในเปลือกส้มโอผสมรวมกับส่วนผสมซอสบ๊วยเจียว เพคตินจะเกิดการพองตัวและคลายตัวเมื่อได้รับความร้อนสูงขึ้น จึงทำให้เนื้อสัมผัสมีความข้นหนืดและเกิดเจล ในด้านรสชาติมีรสขมอยู่เล็กน้อย เนื่องจากในเปลือกส้มโอมีสารลิโมนีนและนารินจินที่ทำให้เกิดรสขมเหลืออยู่ เมื่อเพิ่มปริมาณเปลือกส้มโอมากจะทำให้มีรสขมที่มากขึ้น [11] จึงทำให้ผู้ชิมให้คะแนนการเสริมเปลือกส้มโอในซอสบ๊วยเจียวที่ ร้อยละ 20 ลดลง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกสูตรเปลือกส้มโอร้อยละ 15 เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดที่ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยและความแตกต่างคุณภาพทางประสาทสัมผัสของการเสริมเปลือกส้มโอในซอสบ๊วยเจียว จำนวน 4 สูตร

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	สูตรที่ 1 (ร้อยละ 0)	สูตรที่ 2 (ร้อยละ 10)	สูตรที่ 3 (ร้อยละ 15)	สูตรที่ 4 (ร้อยละ 20)
ลักษณะปรากฏ	7.72 ^a ±0.89	7.69 ^a ±0.83	7.65^a±0.89	6.85 ^b ±0.80
สี	7.60 ^a ±0.65	7.62 ^a ±0.87	7.87^a±0.79	7.32 ^b ±0.68
กลิ่น ^{ns}	7.20±0.82	7.25±0.89	7.02±0.83	6.97±0.76
รสชาติ	8.05 ^a ±0.89	8.00 ^a ±0.95	8.02^a±0.86	7.30 ^b ±0.75
เนื้อสัมผัส	7.50 ^a ±0.82	7.42 ^a ±0.89	7.45^a±0.87	6.80 ^b ±0.72
ความชอบโดยรวม	8.02 ^a ±0.86	7.96 ^a ±0.97	8.00^a±0.64	7.27 ^b ±0.71

หมายเหตุ : ^{a, b} หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

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

3.5 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี กายภาพและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของซอสบ๊วยเจียวสูตรควบคุม และสูตรที่พัฒนาซอสบ๊วยเจียวจากน้ำส้มโอและเปลือกส้มโอ

นำซอสบ๊วยเจียวสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) และสูตรที่พัฒนาซอสบ๊วยเจียวจากน้ำส้มโอ (ร้อยละ 50) และเปลือกส้มโอ (ร้อยละ 15) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่า การใส่น้ำส้มโอและเปลือกส้มโอทำให้ซอสมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นกว่าสูตรควบคุมที่ร้อยละ

36.17 ส่วนโปรตีน ไขมัน เถ้า คาร์โบไฮเดรตรวม และใยอาหาร มีปริมาณเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 0.27 0.71 1.57 68.90 และ 1.95 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเปลือกส้มโอมีคุณสมบัติเป็นใยอาหาร จึงส่งผลทำให้ปริมาณใยอาหารในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ส่วนโปรตีนและไขมันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังตารางที่ 6 มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ [12] การศึกษาทางเคมีระหว่างแป้งขนมเทียนสูตรพื้นฐาน

และแบ่งขนมเทียนเสริมผงเปลือกส้มโอ พบว่าสูตรที่เสริมผงเปลือกส้มโอมีความชื้นมากขึ้นเนื่องจากเปลือกส้มโอมีความสามารถในการอุ้มน้ำอยู่มากของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ ปริมาณไขมันลดลง มีโปรตีนลดลง ปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้นเนื่องจากผงเปลือกส้มโอมีใยอาหารจำนวนมาก ส่วนค่า pH เพิ่มขึ้น อยู่ที่ 11.0 cP และสอดคล้องกับงานวิจัยของ [13] เมื่อเพิ่มปริมาณเปลือกทุเรียนผง ส่งผลให้ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น และมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อาจเนื่องมาจากอนุภาคของเปลือกทุเรียนขัดขวางการไหลของน้ำมั่งคุด จึงทำให้ความหนืดของน้ำ

มั่งคุดเพิ่มขึ้น

ส่วนผลการศึกษาคูณภาพทางกายภาพของซอสบ๊วยเจียวสูตรพื้นฐาน และซอสบ๊วยเจียวจากน้ำส้มโอและเปลือกส้มโอ พบว่าการใส่น้ำส้มโอและเปลือกส้มโอทำให้ค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ส้มโอ ค่าความขุ่นหนืดเพิ่มขึ้นอยู่ที่ร้อยละ 31.43 7.60 19.47 และ 3.11 ตามลำดับ [14] ซึ่งเปลือกส้มโอต้มมีพีเอชสูงกว่าเปลือกส้มโอดิบ เนื่องจากการต้มทำสูญเสียกรดอินทรีย์เปลือกส้มโอต้มจะมีสีซีดลงสีความสว่าง (L^*) เพิ่มขึ้น และเพคตินสกัดจากเปลือกส้มโอเมื่อผสมกับส่วนผสมที่มีสภาพเป็นกรดจากน้ำส้มโอและน้ำส้มสายชูต่างจากเกลือจึงทำให้เกิดความหนืดขึ้นมากขึ้นส่งผลให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คุณภาพทางเคมี กายภาพของซอสบ๊วยเจียวสูตรควบคุม และซอสบ๊วยเจียวสูตรที่ใช้น้ำส้มโอและเสริมเปลือกส้มโอ

คุณสมบัติ	สูตรควบคุม	ซอสบ๊วยเจียวสูตรที่ใช้น้ำส้มโอ (ร้อยละ 50) และเสริมเปลือกส้มโอ (ร้อยละ 15)
คุณภาพทางเคมี		
ความชื้น (ร้อยละ)	28.55 ^b ±0.5	36.17 ^a ±0.2
โปรตีน (ร้อยละ) ^{ns}	0.22±0.01	0.27±0.01
ไขมัน (ร้อยละ) ^{ns}	0.72±0.01	0.71±0.00
เถ้า (ร้อยละ)	1.36 ^b ±0.02	1.57 ^a ±0.01
คาร์โบไฮเดรตรวม (ร้อยละ)	61.53 ^b ±0.1	68.90 ^a ±0.5
ใยอาหาร (ร้อยละ)	1.21 ^b ±0.03	1.95 ^a ±0.01
ค่า pH	2.16 ^b ±0.02	3.11 ^a ±0.01
คุณภาพทางกายภาพ		
ค่าสี		
L^*	16.31 ^b ±0.05	31.43 ^a ±0.02
a^*	2.08 ^b ±0.06	7.60 ^a ±0.06
b^*	11.43 ^b ±0.08	19.47 ^a ±0.08
ค่าความขุ่นหนืด (cP)	4.5 ^b	11.0 ^a

หมายเหตุ : ^{a, b} หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

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

4. สรุป

ส้มโอเป็นผลไม้ที่ถูกนำไปใช้ในอาหารที่ยังไม่หลากหลาย เนื่องจากมีรสชาติที่ขม ทำให้ผู้บริโภคไม่ให้การยอมรับ นอกจากนี้เปลือกส้มโอยังเป็นของเหลือทิ้งซึ่งเปลือกส้มโอมีใยอาหารประเภทเพคตินจำนวนมาก จึงมีการนำน้ำส้มโอและเปลือกส้มโอส่วนสีขาวมาใส่ในซอสบ๊วยเจ๋ง โดยมีส่วนผสมดังนี้ เนื้อบ๊วยดองร้อยละ 3.5 น้ำตาลทรายร้อยละ 46 น้ำส้มสายชูร้อยละ 47 น้ำเปล่าร้อยละ 1.1 น้ำบ๊วยดองร้อยละ 2 และเกลือร้อยละ 0.4 โดยใช้ น้ำส้มโอทดแทนน้ำเปล่าที่ระดับร้อยละ 50 และเสริมใยอาหารจากเปลือกส้มโอที่ระดับร้อยละ 15 เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ซอสบ๊วยเจ๋งที่มีปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้น และมีกลิ่นรสของส้มโอซึ่งก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ซอสชนิดใหม่ที่สามารถใส่ในอาหารที่หลากหลายมากขึ้น แต่การนำส้มโอมาใช้ในอาหารยังมีข้อจำกัดในด้านรสชาติที่ขม ทำให้ใส่ในผลิตภัณฑ์อาหารได้น้อย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ch. Nipawan, U. Thirasak and S. Narin. "A Study of Wisdom, and Conservation and Revival of the Way of Life of Pomelo Farmers in the Nakhon Chai Si River Basin," *The Golden Teak: Humanity and Social Science Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 181-198, 2018.
- [2] S. Wanpen, L. Montra and S. Paweena, "Pork Stick Supplemented with Pomelo Albedo Fiber," *VRU Research and Development Journal Science and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 8-18, 2014.
- [3] Ch. Saowapa, Th. Thiraphong, S. Sujarit j, Ch. Romran and Kh. Uraiwan, "Evaluation of Active Ingredients in the Flavonoids and Anthocyanins Group of Tongdee Pomelo. Honey White White Cucumber Varieties big white breed and Siamese ruby varieties grown in Thailand: a complete report. Office of the Science Promotion Commission Research and Innovation," National Research Council of Thailand, 2010.
- [4] S. Phinsuda and M. Wachirawadee. "Effect of Naringin on Hepatic Oxidative Stress in High-fructose Fed-rats," *Thai Science and Technology Journal (TSTJ)*, vol. 29, no. 2, pp. 341-350, 2021.
- [5] Food Intelligent Center (2022 May, 4). Market Intelligence. [Online]. Available: <https://fic.nfi.or.th>
- [6] The Association of Official Analytical Chemists, 17th ed. , Official Method of Analysis of AOAC International, 2019.
- [7] Thai Industrial Standards Institute 291, "Sweet and sour plum sauce," TISI Library, pp. 1-15, 2004.
- [8] S. Umaporn, R. Benjamas and J. Anuvat, "Pomelo juice debittering," *Agricultural Science Journal*, vol. 34, no. 4-6, pp. 100-103, 2003.
- [9] S. Wanpen, "Supplementation of Fiber from Pomelo Albedo in Moo-Yaw." Food Science and Technology Program, Faculty of Science

- and Technology, Nakhon Pathom Rajhabhat University, pp. 1-8, 2000.
- [10] J. Ronnachai, S. Sarun and D. Wichittra, "Product development of cookies supplemented with extracted pomelo peel pectin, " *Journal of Roi Et Rajabhat University: Science and Technology*, vol. 1, no. 2, 2020.
- [11] T. Janya. "Development of Kkanom Sommanat Supplemented with Pomelo Albedo Fibers." *Research and Development Journal Science and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 1-15, 2021.
- [12] P. Rangsim, T. Pheerapong, S. Kunchaya and I. Wirachaya, "Using the Pomelo Albedo as Hydrocolloid Substance in Frozen Kha – Nom Thien Flour," Research and development institute Kamphaeng Phet Rajabhat University Kamphaeng Phet: Kamphaeng Phet Rajabhat University, no. 4, pp. 986-993, 2017.
- [13] J. Ronnachai, S. Sarun and D. Wichittra, "Product development of cookies supplemented with extracted pomelo peel pectin," *Journal of Roi Et Rajabhat University: Science and Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 27-35, 2020.
- [14] J. Ronnachai, S. Sarun and D. Wichittra, "Development of mangosteen juice mixed with durian rind powder," *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, vol. 1, no. 42, pp. 1-9, 2023.

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

Effect of Stone Dust on the Properties of Interlocking Block

Chookiat Choosakul¹ Tawich Klathae¹ Suporn Rittipakdee¹ Khwanchiwa Yongsata²
Sunun Monkaew^{3*} and Saravut Jaritngam⁴

¹College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya

²Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya

³Faculty of Engineering, Rajamanagala University of Technology Phra Nakhon

⁴Faculty of Engineering, Prince of Songkhla University

¹99 Moo 4, Tambol Tongnien, Khanom, Nokhon Si Thammarat 80210

²179 Moo 3, Tambol Maifad, Sikao, Trang 92150

³1381 Pibul Songkhram Road, Bangsue, Bangkok 10800

⁴15 Karnjanavanich Road, Hat Yai, Songkhla 90110

Received 27 February 2023; Revised 1 November 2023; Accepted 30 November 2023

Abstract

This research aimed to study the properties of interlocking block mixed with stone dust in the ratio of 0, 10, 20 and 30 by weight of cement. The ratio of cement to lateritic soil was 1: 6 by weight. The optimum moisture content (OMC) was obtained from the Standard Proctor Test. Square interlocking block formwork of round-flowered type with holes, size 12.5 x 10 x 25 centimeters, was formed by a manual compression molding machine. Conduct tests for the compressive strength, density, and water absorption of interlocking block mixed with stone dust in compliance with the Thai community product standard of interlocking block (TCPS 602-2004). The results of the study found that the use of stone dust of cement in the production of interlocking block resulting in increased the water absorption and density, but the compressive strength were decreased. All mixing ratios of interlocking block have the measured properties in accordance with the TCPS 602-2004 for non-load bearing type. The percentage of displacement of stone dust suitable for the production of interlocking block this time is 30% with compressive strength of 4.36 MPa, density of 1,707 kilograms per cubic meter and absorption of water 253 kilograms per cubic meter, respectively, at a curing life of 28 days.

Keywords : Interlocking Block; Lateritic Soil; Stone Dust

* Corresponding Author. Tel.: +668 9213 9943, E-mail Address: Sunun.m@rmutp.ac.th

1. Introduction

Interlocking block is a brick that has been developed to be strong, convenient and quick to use in construction. It also has a beautiful form. Moreover, the form with holes, grooves and tenons make it can be cemented both horizontal and vertical without mortar blocks one by one. It can be stacked and then, a mortar can be filled into the groove, with compaction. That is an easy way to lay brick, resulting in a quick construction and a strong stability of the building [1]. Interlocking block have many advantages: such as reductions in cost and construction time, attractive form and ingredients that can be found locally. It also reduces the use of high technology and imported materials. Buildings constructed with interlocking block are classified as non-permanent buildings, which cannot be built more than 2 floors according to the Building Regulations, Bangkok Metropolitan Administration [2].

Interlocking block require Portland cement as the main mixture. The excessive utilization and rising cost of limestone, the essential component in cement production, could result in the likelihood of future shortages and elevated cement prices. The Portland cement production process requires up to 1,400°C, and to produce 1 ton of Portland cement, 0.96 tons of carbon dioxide (CO₂) is generated into the atmosphere [3]. The cement industry also emits sulfur oxides (SO₃) and nitrogen oxides (NO_x), which are part of the greenhouse effect and acid rain [4]. If you look at global production, it accounts for 8% of total greenhouse gas emissions per year [5]. In Thailand, the average cement production is 30.57 million tons per year (2017-2020) [6]. Therefore, it is necessary to explore substituting or reducing the quantity of Portland cement with other materials. It

can help reduce the amount of CO₂ production, which contributes to the greenhouse effect.

In the past research, there are other materials that have been used to replace cement in the production of interlocking block such as bagasse ash, chaff and diatomaceous earth [7], biomass ash [8] and crushed oyster shells [9]. In addition, the result of [10] shows that the chemical composition of stone dust as shown in **Table 1** contained the amount of SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ at 36.07, 19.86 and 13.67 respectively. Sum of SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ was 70% which had LOI less than a 10% including SO₃ less than a 4%. Considering the chemical composition of decomposed stone dust, the chemical composition of stone dust can be classified as pozzolanic material Class N, according to the standard of ASTM C 618 [11]. According to the study of Imrose et al. [12]. It was found that replacing cement with 3% stone dust resulted in an increase in compressive strength of 22.76% and an increase in tensile strength of 13.47%.

Table 1 The chemical composition of Portland cement type 1 and stone dust [10]

Chemical Composition (%)	OPC	Stone dust
SiO ₂	20.62	36.07
Al ₂ O ₃	5.22	19.86
Fe ₂ O ₃	3.10	13.67
SO ₃	2.70	3.29
MgO	0.91	2.47
Na ₂ O	0.07	1.31
K ₂ O	0.50	2.12
CaO	64.99	16.78
P ₂ O ₅	-	0.21
LOI	1.13	5.80

From the data on the amount of stone wells in Nakhon Si Thammarat and Surat Thani provinces, there are many

sources [13]. Consequently, the study of the possible use of stone dust to replacement of Portland cement type 1 would reduce the amount of cement in an appropriate proportion to produce of interlocking block in order to use natural waste materials as mixture to make benefits and increase the value.

2. Research Methodology

2.1 Research Materials

This research uses Ordinary Portland Cement (OPC) qualified according to TIS 15-2004 [14], with the specific gravity of equal to 3.13 and stone

dust (SD) from a stone well in Khanom District, Nakhon Si Thammarat Province, as shown in Figure 1(a). The stone dust is crushed thoroughly, baked at 105 ± 5 °C for 24 hours and sieved through ASTM sieve No. 200 (aperture 75 μ m) to obtain stone dust as shown in Figure 1(b), with the value of specific gravity of 3.16. Laterite soil (LS) was obtained from Ban Nam Phut laterite ponds, Khuan Thong Sub-District, Khanom District, Nakhon Si Thammarat Province. The laterite soil samples were reddish colour as shown in Figure 1(c). It was passed through ASTM sieve No. 4 (aperture 4.75 mm). The specific gravity is 2.73.



(a) Stone dust before crushing

(b) Stone dust crushed

(c) Laterite soil

Fig. 1 Raw materials

2.2 Mixture design and sample preparation

Design of interlocking block mixture proportion by using cement per lateral soil is 1:6 by weight [15]-[17]. The stone dust replacement with the percentage of the proportion of 10, 20 and

30 to the weight of Ordinary Portland Cement were utilized in this study by using water according to the optimum moisture content (OMC) from compaction test by standard proctor test method in accordance with ASTM D698 [18] of each mixing ratio. The mixing proportion is described in **Table 2**.

Table 2 Mix proportion of interlocking block of 6 sample bricks

Mixes	Cement kg	Stone Dust kg	Laterite soil kg	Water kg	Total Kg	OMC %
OPC	4.285	0	25.715	6.801	36.801	20.27
SD10	3.875	0.428	25.715	6.999	36.999	23.33
SD20	3.428	0.857	25.715	7.701	37.701	25.67
SD30	3.000	1.285	25.715	8.601	38.601	28.67

In the production of interlocking block specimen, mixed with stone dust replacement of the cement, the total weight of the mixture between the cement and the stone dust will be used. Each time, the quantity of laterite soil is consistently 30 kilograms. The weight of the mixture to put into the compactor is 5.8 kilograms per batch of production. The sample block formwork is a straight interlocking block. It has holes and spikes as hollow rounded flowers. It measures 12.5 centimeters wide, 10 centimeters high, and 25 centimeters long. The specimen was formed with a manual compression molding machine (Cinva-Ram), as shown in **Fig. 2**. It was then compressed by a hand operated toggle level and piston system, which exerted a minimum compacting pressure of about 2 MN/m².



Fig. 2 Cinva-Ram machine

In addition, the mixture should be compacted within 30 minutes after mixing with water to prevent the cement mixture from hardening before extrusion. Once extruded, the specimen is removed and stored in the shade for at least 1 day. Mortar is then filled into the specimen's holes with cement to sand ratio of 1: 2 and watered with a shower or aerosol spray. The specimen is cured by plastic cladding, as shown in **Fig. 3**, to prevent water from evaporating. Testing is conducted after curing until the desired age is reached.



Fig. 3 Curing interlocking block with plastic bags

2.3 Test Method

2.3.1 Testing the basic engineering properties of laterite soils

This is an initial property test conducted on laterite soil with the objective of using the acquired data for soil classification. The test details are outlined below:

- Specific gravity according to standard ASTM D 854 [19]
- Gradation according to standard ASTM D 2487 [20] and standard ASTM D 422 [21]
- Atterberg's Limit such as Liquid Limit (LL), Plastic Limit (PL) and Plasticity Index (PI) according to standard ASTM D 4318 [22]

2.3.2 The amount of water

Calculate the required water quantity for sample formation, adhering to the Standard Proctor Test (Optimum Moisture Content, OMC) in accordance with ASTM D698 [18].

2.3.3 Testing properties of interlocking block

This test assesses the physical and mechanical characteristics of interlocking block made with a stone dust mixture in comparison to interlocking blocks control and TCPS 602- 2004 standard [23]. The test details are outlined below:

- Water absorption and density according to standard TIS 57-2017 [24] at the incubation period of 28 days.

- Compressive strength according to standard ASTM C67 [25]. The blocks are tested at the curing ages of 7, 14 and 28 days. The specimen under test is shown in Fig. 4.



Fig. 4 Compressive strength test of interlocking block

3. Results and discussion

3.1 Basic engineering properties of laterite soil

Table 3 shows physical properties of laterite soil. It was found that this type of laterite soil had a specific gravity of 2.73. In general, laterite soil has a specific gravity between 2.55 and 3.0 [26] while laterite soil had a liquid limit of 39.28%, a plastic limit of 34.27% and a plastic Index of 5.01%. According to the tested results, the laterite soil had a relatively high ability to transform into a liquid. In other words, this type of laterite soil was in the state of too much water content and cannot be molded. According to the test results, the laterite soil used in this study was classified as quality class A-4 clay or silt according to the AASHTO system [27]. In contrast, according to the Unified Soil Classification System (USCS) [19], the value showed that the mixed size of laterite soil passing sieve No. 200 was 84.97%, liquid limit was 39.28% and

plastic rating was 5.01%. It was considered that laterite soils classified as ML-OL were inorganic sand sediments and very fine sand, rock dust, fine sand, sand or clay sediment with a slightly sticky or inorganic sand sediment and clay soil mixed with organic sand sediment low toughness.

Table 3 physical properties of laterite soil

Physical Property	Results
Specific gravity	2.73
Moisture (%)	3.37
Percentage passing sieve No.4	94.70
Percentage passing sieve No.200	84.97
Liquid Limit; LL (%)	39.28
Plastic Limit; PL (%)	34.27
Plasticity Index; PI (%)	5.01

Laterite soil moisture content is 3.37%, which was acceptable in accordance with soil grade classification by ASTM 3282 standard [28]. Limited the moisture content of laterite soil it was less than 4%.

3.2 The results of the test for the optimum amount of water and dry density

Fig. 5 shows that the optimum water content tended to increase when the amount of stone dust increased. This scenario may occur due to the heightened water requirements associated with the use of stone dust. This is evident when the stone dust content exceeds that of cement, leading to an increased need for water to achieve surface glazing.

As the displacement ratio of stone dust increases, the demand of water also increases. When dry densities were considered, the stone dust 10% had the dry density higher than OPC. In contrast,

the proportion of stone dust at 20% and 30% resulted in the lower dry densities.

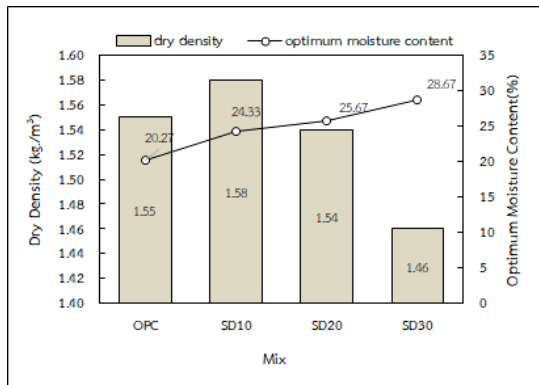


Fig. 5 The relationship between dry density and optimum moisture content

3.3 The results of interlocking block properties

3.3.1 General characteristics

The results of the general examination of the interlocking block mixed with stone dust revealed that all interlocking block, regardless of the proportion, displayed the reddish-brown color characteristic of laterite soil. The sample cube sizes or dimensions in accordance with the requirement [23] without blistering, expanding or contracting as shown in **Fig. 6**.

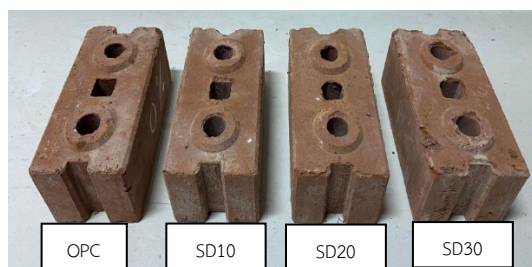


Fig. 6 Sample of interlocking block

For the mix SD30, the upper edge of the interlocking block was chipped. The result appeared consistent with the findings of [29], who found that it was

easy to chip off the edges of interlocking block due to an insufficient amount of cement to bind the aggregate, which led to the less adhesive area around the edges of the blocks. Moreover, the flow of the ingredients into the mold was not smooth.

3.3.2 Water absorption and density

Fig.7 shows the results of the water absorption and density of the interlocking block. It can be seen that the water absorption decreased with the increasing in the amount of stone dust. As for the density of interlocking bricks, it revealed that interlocking block mixed with stone dust at 10% were higher than OPC, while an increase in stone dust at 20% and 30% generated the decreasing, which corresponds to the density of the designed mixture ratios. Relation between density and water absorption of interlocking block showed that the higher density caused the lower water absorption. It represented the low block's porosity, which had a low void ratio. In the meanwhile, the lower density of the interlocking block led to the higher void (Void Ratio). That induced the higher water absorption, which conformed to the findings of [30]. Their argument was that a reduced gap ratio resulted in a lower water absorption rate.

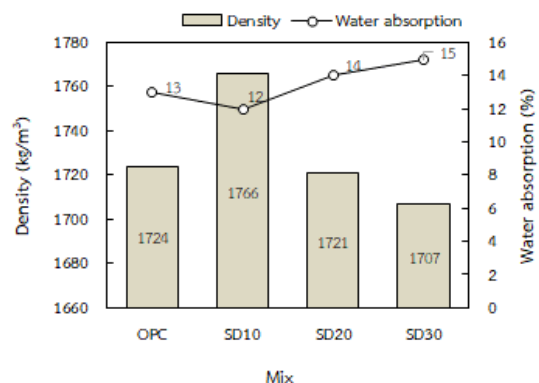


Fig. 7 The relationship between the density and water absorption of interlocking block

However, the water absorption in this study is lower than that specified in TCPS 602-2004 [23], which specifies that the water absorption must be less of 25%.

3.3.3 Compressive strength

As shown in **Fig. 8**, the compressive strength increased with increasing of the curing age due to the hydration reaction occurring continuously over the curing period [31], which were in line with the results of [32]. They showed that the rate of hydration in the interlocking block affected the brick strength and stability.

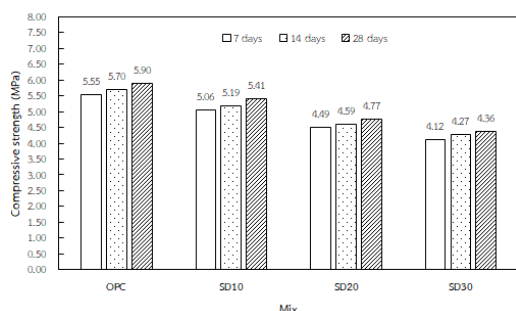


Fig. 8 Compressive strength test results of interlocking block

The compressive strength tended to decrease with an increase in the amount of stone dust. The increase in stone dust by 10% decreased the compressive strength around 8%, which is consistent with the research results of [10]. The analysis of the substitution of stone dust for cement displayed that the chemical compounds which strengthen the concrete were reduced. The compressive strength of interlocking block was compared to the TCPS 602-2004 [23], which describes that the average load-bearing interlocking block must not be less than 7.0 MPa and the average non-load bearing type must not be less than 2.5 MPa at the test ages of 7, 14 and 28 days. The comparison showed that the interlocking block in all mix ratios and all curing ages meet the above standard.

4. Conclusions

In this study, the investigation of interlocking block mixed with stone dust focused on a mixture ratio of 1 part Portland cement type 1 to 6 parts laterite soil by weight. The stone dust content in the interlocking block varied at 0, 10, 20, and 30 percent by weight of the cement. The results of the research can be summarized as follows.

1. The amount of stone dust affects the water demand of the interlocking block; increasing the amount of stone dust increases the water demand of the interlocking block.

2. The amount of stone dust in place of cement at less than 10% caused the density of interlocking block to be greater than that of OPC. In contrast, if the amount of stone dust is increased to 20% and 30%, the density of interlocking block is reduced and lower than that of OPC.

3. The higher the amount of stone dust is, the lower the compressive strength of the interlocking block and the higher the water absorption value are.

4. From the results of this research, the optimum ratio of stone dust contents is 30%, which had the required properties as specified in TCPS 602-2004 [23], non-load bearing type. It has lower density properties than OPC and will benefit its application in construction. It is convenient to move by workers and reduces the weight the exerted on the structure. Finally, the further studies should be done on the heat transfer properties, corrosion and shrinkage of interlocking block.

5. Acknowledgements

The researcher would like to thank Rajamangala University of Technology Srivijaya for supporting the research fund for the fiscal year's income statement for the year 2020. Including, thank you for the

Division of Engineer, College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya that support the use of the equipment.

6. References

- [1] Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR). (2020, Jan 9). Interlocking block technology. [Online]. Available: <https://technologyblockprasan.com/803/>
- [2] K. Chaimoon, "Compressive Strength and Behavior of Interlocking Block Masonry under Eccentric Loading" Research and Development Journal, vol. 21, no. 2, pp. 6-14, 2010.
- [3] E. Gartner, "Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements," *Cement and Concrete research*, vol. 34, no. 9, pp. 1489-1498, 2004.
- [4] A. M. Rashad. and S. R. Zeedan, "The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 7, pp. 3098-3107, 2011.
- [5] Breakthrough Energy. (2022, Aug 12). Chement's patent-pending technology eliminates all CO₂ emissions in cement production. [Online]. Available: <https://breakthroughenergy.org/fellowship-project/chement/>; 2022
- [6] The Office of Industrial Economics. (2021, Jan 29). Industry statistics report. [Online]. Available: <https://i.index.oie.go.th/industrialStatisticsReport.aspx>; 2021
- [7] A. Leeanansaksiri, W. Phochan and T. Pongnum, "Development of Interlocking Lightweight Cement Blocks from Sludge Mixed Pozzolan Material," *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 31, no. 1, pp. 135-143, 2020.
- [8] K. Paopongpaiboon, K. Boonserm, V. Horsakulthai and P. Chindaprasirt, "Development of Interlocking Block Blended with Biomass Ash for Using As a Insulating Material," *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 30, no. 2, pp. 95-105, 2019.
- [9] T. Klathae, "Utilization of crushed oyster shell on interlocking block," *RMUTP research Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 167-177, 2017.
- [10] C. Choosakul and K. Yongsata, "High Strength Concrete Using Decomposed-Stone Dust," in *Proceeding of the Annual Concrete Conference 12*, Thailand, 2018, pp. MAT01-MAT06.
- [11] *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*, ASTM C 618, 2003.
- [12] I. B. Muhit, M. T. Raihan and MD. Nuruzzaman, "Determination of mortar strength using stone dust as a partially replaced material for cement and sand," *Advance in Concrete Construction*, vol. 2, no. 4, pp. 249-259, 2014.
- [13] Department of Industrial Works. (2021, Feb 3). Factory information. [Online]. Available: <https://userdb.diw.go.th/results1.asp>.
- [14] *Standard specification for Type 1 Portland cement*, TIS 15, 2004.
- [15] S. Assiamah and H. Danso, "Effects of Sand on The Properties of Cement-Laterite Interlocking Blocks," in *Proceeding of the West Africa Built Environment Research (WABER) Conference*, Ghana, 2021, pp. 569-578.
- [16] P. Khamput, "Development of Lightweight Interlocking Block Product

- form EVA Plastic Wastes,” *Thai Environmental Engineering Journal*, vol. 30, no. 3, pp. 57-64, 2016.
- [17] N. Intaboot, “Innovation of Interlocking Block Mixing with Biomass for Sound Absorption and Thermal Conductivity in Thailand,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 18, no. 8, pp. 473-480, 2020.
- [18] *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*, ASTM D 698, 2006.
- [19] *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, ASTM D 854, 2006.
- [20] *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, ASTM D 2487, 2017.
- [21] *Standard Test Methods for Particle - Size Analysis of Soils*, ASTM D 422, 2007.
- [22] *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, ASTM D 4318, 2005.
- [23] *Thai community product standard of interlocking block*, TCPS 602, 2004.
- [24] *Hollow Loadbearing Concrete Masonry Units*, TIS 57, 2017.
- [25] *Standard methods of sampling and testing brick and structural clay tile*, ASTM C67, 2007.
- [26] M. Gidigasu, “Laterite Soil Engineering: Pedogenesis and Engineering Principles,” 2nd ed., Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [27] *Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*, AASHTO M145-91, 2012.
- [28] *Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*, ASTM D 3282, 2015.
- [29] A. Boksuwan and P. Khamput, “Interlocking Block Product for Community Enterprises from Anhydrite Rock Fragments,” in *Proceedings of 3rd National RMUTR Conference*. Thailand, 2018, pp. 19-26.
- [30] N. Janpetch and W. Kokkamhaeng, “The Test of The Compressive Strength of an Interlocking Block of Thailand,” *RMUTSB ACADEMIC JOURNAL*, vol. 4, no. 2, pp. 196-206, 2016.
- [31] P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, “Cement pozzolan and concrete,” 7th ed., Bangkok: Thailand Concrete Association, 2008.
- [32] P.O. Awoyera and I.I. Akinwumi, “Compressive strength development for cement, lime and termite-hill stabilized lateritic bricks,” *The International Journal of Engineering and Science*, vol. 3, no. 2, pp. 37-43, 2014.

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

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง

เชาวลิต อุปฐาก* ปรัชญีย์ ทับใบแย้ม สุภภา เทิดขวัญชัย สุธิดา กิจจาวรเสถียร
วรรธ ป้อมเย็น วรลักษณ์ ป้อมน้อย ลัดดาวัลย์ กลิ่นมาลัย จิราภัทร โอทอง และ
เปรมระพี อยูมาวีรหิรัญ

คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

168 ถนนศรีอยุธยา แขวงวรชัยยบาล เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

รับบทความ 11 พฤษภาคม 2566 แก้ไขบทความ 29 พฤศจิกายน 2566 ตอรับบทความ 30 พฤศจิกายน 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากรรมวิธีการผลิตผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง พันธุ์ระยอง 90 ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ ศึกษาการทดสอบผู้บริโภคร และถ่ายทอดเทคโนโลยีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง ผลการศึกษากกรรมวิธีการผลิตผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง ที่ระดับร้อยละ 0 20 30 และ 40 ของส่วนผสมทั้งหมด พบว่า ผู้ทดสอบให้การยอมรับที่ระดับร้อยละ 20 ซึ่งอยู่ในระดับความชอบมากที่สุด ด้านคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ พบว่า ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลังแบบเปียก ที่ระดับร้อยละ 20 พบว่า มีค่า aw เท่ากับ 0.97 ± 0.00 มีค่าความสว่าง (L^*) 31.72 ± 0.58 ค่าสีเขียว (a^*) 2.17 ± 0.18 และค่าสีเหลือง (b^*) 3.28 ± 0.97 และมีค่าความชื้นร้อยละ 78.66 ค่าไขมันร้อยละ 1.08 เยื่อใยร้อยละ 1.36 เถ้าร้อยละ 2.29 และโปรตีนร้อยละ 3.34 จากการทดสอบของผู้บริโภค (Consumer test) จำนวน 100 คน พบว่า ความชอบต่อผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง ในระดับความชอบปานกลาง โดยให้คะแนนความชอบต่อลักษณะผลิตภัณฑ์ ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นและรสชาติ อยู่ในระดับความชอบปานกลาง และผลการดำเนินการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนชาวไร่มันสำปะหลัง 480 อำเภอครบุรี และอำเภอหนองบุญมาก จังหวัดนครราชสีมา ผู้เข้าอบรมจำนวน 45 คน พบว่า มีการนำความรู้ไปใช้ประโยชน์ และมีความพึงพอใจของผู้รับบริการคิดเป็นร้อยละ 100

คำสำคัญ : การพัฒนา; มันสำปะหลัง; ซอสเทอริยากิ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +664 554 5691, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: chaowalit.a@rmutp.ac.th

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

Product Development of Teriyaki Sauce Fortified with Cassava

Chaowalit Auppathak* Prassanee Tubbaiyam Sumapar Thedkwanchai
Suthida Kitjavorasatien Vorathon Pomyen Woralak Pomnoi
Laddawan Klinmalai Jirapat Othong and Premraphi Ooaymaweerahirun

Faculty of Home Economics Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
168 Sri Ayudhya Road, Vajira Hospital Dusit District, Bangkok 10300

Received 11 May 2023; Revised 29 November 2023; Accepted 30 November 2023

Abstract

The objective of this research was to study the production process of teriyaki sauce fortified with cassava, Rayong 90 variety, to study the physicochemical properties. Study consumer testing and transfer of technology in the development of teri sauce products Yaki fortified with cassava Results of a study of the production process of teriyaki sauce fortified with cassava. At the 0, 20, 30, and 40 percent levels of all ingredients, it was found that the testers accepted the 20 percent level, which is the highest level of liking. Regarding the nutritional value of the product, it was found that teriyaki sauce was fortified with wet tapioca. At the 20 percent level, it was found to have an aw value of 0.97 ± 0.00 , a brightness value (L^*) of 31.72 ± 0.58 , a green value (a^*) of 2.17 ± 0.18 and a yellow value (b^*) of 3.28 ± 0.97 and a humidity value. 78.66 percent, 1.08 percent fat, 1.36 percent fiber, 2.29 percent ash, and 3.34 percent protein. From a consumer test of 100 people, it was found that the liking for the product Teriyaki Sauce with Tapioca was added. At the moderate level of liking By rating their preferences for product characteristics. Appearance, color, smell, smell and taste At the moderate level of liking and the results of the technology transfer operation to the 480 cassava farmer community enterprise groups in Khon Buri District and Nong Bun Mak District. Nakhon Ratchasima Province The 45 participants in the training were found to have put their knowledge to good use. and there is satisfaction of service recipients Calculated as 100 percent.

Keywords : Development; Cassava; Teriyaki Sauce

**Corresponding Author. Tel.: +664 554 5691, E-mail Address: chaowalit.a@rmutp.ac.th*

1. บทนำ

ในการปรุงอาหารของครอบครัวต่าง ๆ ต้องมีการใช้ซอสเข้ามาช่วยในเรื่องรสชาติ ไม่ว่าจะเป็นซอสที่เป็นเครื่องปรุงรสหรือซอสที่ใช้หมักหรือราดขึ้นเนื้อต่าง ๆ อาหารบางประเภทเมื่อจะรับประทานต้องมีซอสเสิร์ฟควบคู่ ซอสเป็นเครื่องปรุงรสที่มีลักษณะเหลวหรือค่อนข้างข้นใช้ในการปรุงอาหาร เพื่อให้อาหารมีรสชาติดีขึ้นหรือใช้รับประทานคู่กับอาหารชนิดต่าง ๆ ซอสจึงเป็นส่วนประกอบสำคัญในการทำอาหาร แบบใช้เป็นน้ำซอสราดบนอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาหารอาหารคาวที่จะให้ความสำคัญกับซอสว่าเป็นหัวใจของอาหารนั้น ๆ โดยซอสอเนกประสงค์ ได้ขยายบทบาทเพิ่มมากขึ้นตามการขยายตัวของอุตสาหกรรมอาหาร

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทย เป็นพืชที่ปลูกง่าย ทนต่อความแห้งแล้งและสภาพอากาศที่แปรปรวนได้ดี พื้นที่ปลูกมันสำปะหลังกระจายอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก ภาคตะวันตก ภาคกลาง และภาคเหนือของประเทศ มันสำปะหลังเป็นพืชที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางทั้งทางตรงและทางอ้อมทั้งด้านอุตสาหกรรม และเป็นอาหารของมนุษย์ และสัตว์ ทุกส่วนของต้นมันสำปะหลังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งสิ้น ไม่ว่าจะเป็นส่วนของใบ ลำต้น ตลอดจนถึงหัว ซึ่งเป็นส่วนของราก ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมมันเส้น มันอัดเม็ด และแป้งมันสำปะหลัง ตลอดจนการแปรรูปแป้งเพื่อการส่งออก นอกจากนี้มันสำปะหลังยังเป็นพืชที่มีศักยภาพในการผลิตเอทานอลเพื่อทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิง มันสำปะหลังในประเทศไทยมักถูกจำกัดอยู่เพียงอุตสาหกรรมแป้งและอาหารสัตว์ การปรับปรุงพันธุ์จึงมุ่งเน้นที่จะให้ได้พันธุ์ที่มีผลผลิตและแป้งสูงเป็นหลัก [1] คณะผู้วิจัยได้สอบถามถึงปัญหาของมันสำปะหลังกับ คุณธีระชาติ เสยกระโทก ตำแหน่ง เลขาธิการสมาพันธ์ชาวไร่มันสำปะหลังแห่งประเทศไทย และกลุ่มวิสาหกิจชุมชนชาวไร่มัน

สำปะหลังอำเภอไทรโยค คุณรังสี ไม้สะอาด จังหวัดกาญจนบุรี ว่าทางกลุ่มวิสาหกิจชุมชนชาวไร่มันสำปะหลังอำเภอไทรโยค มีการปลูกมันสำปะหลังประมาณ 8,778 ไร่ และมีผลผลิตเฉลี่ย 4 ตันต่อไร่ โดยมีการปลูกอยู่ 5 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 พันธุ์ห้วยบง 60 พันธุ์ปละ 80 พันธุ์ระยอง 72 และพันธุ์ระยอง 11 และพันธุ์ระยอง 90 มีจำนวนมากในจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งมันสำปะหลังทุกสายพันธุ์ที่ได้กล่าวมา ได้มีการปลูกเป็นจำนวนมากและมีผลกระทบในช่วงที่มันสำปะหลังราคาตกต่ำและล้นตลาด จึงอยากให้ทางคณะผู้วิจัยได้คิดค้นผลิตภัณฑ์ในการแปรรูปอาหารจากมันสำปะหลังเพื่อเป็นการช่วยให้เกษตรกรมีรายได้เสริมและส่งเสริมเกษตรกรชาวไร่มันสำปะหลังให้มีผลิตภัณฑ์ OTOP ของชุมชนด้วย [2] มันสำปะหลังเป็นพืชหัวเขตร้อนที่สำคัญที่สุดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ ไนจีเรีย ไทย และอินโดนีเซีย เป็นประเทศผู้ผลิตมันสำปะหลังรายใหญ่ เป็นรากผักที่ใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง บริโภคในหลายส่วนของโลก มีสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย ทั้งนี้ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลังเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เกิดจากแนวคิดการแปรรูปมันสำปะหลังที่อยู่ในช่วงราคาตกต่ำมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการพัฒนาสูตร และกรรมวิธีในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อยู่ตามอ้างอิงมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค

ดังนั้นคณะผู้วิจัยร่วมกับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนชาวไร่มันสำปะหลังอำเภอไทรโยค และสมาพันธ์ชาวไร่มันสำปะหลังแห่งประเทศไทย ต้องการแปรรูปมันสำปะหลัง รวมทั้งเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากรรมวิธีการผลิตผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ ศึกษาการทดสอบผู้บริโภค และถ่ายทอดเทคโนโลยีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลังสู่ชุมชน ทั้งนี้เพื่อทำให้เกิดอาหารแปรรูปแบบ

ใหม่ ให้ทันสมัยมากขึ้น พัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารในเชิงธุรกิจ ซึ่งสามารถวางจำหน่ายได้ทั้งภายในประเทศส่งออกไปยังต่างประเทศ เพื่อเป็นการลดปัญหาการขาดทุน ในช่วงที่มันสำปะหลังล้นตลาดหรือราคาตกต่ำ และเป็นการช่วยเหลือเกษตรกร ให้มีการเพิ่มรายได้ อีกทั้งสนองนโยบายของภาครัฐในเรื่องของการผลิตเพื่อเพิ่มผลผลิตที่มีคุณภาพ และคุณค่าของสินค้าและบริการ บนฐานความรู้และความเป็นไทย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของมันสำปะหลัง โดยวิธีการเสริมลงในผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิ

การทดลองครั้งนี้ได้นำตำรับมาตรฐานซอสเทอริยากิ มาพัฒนาตำรับซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง พันธุ์ระยอง 90 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง 4 ระดับ คือ

ร้อยละ 0 20 30 และ 40 โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ RCBD (Randomized Complete Block Design) นำไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านสี กลิ่น รสชาติ กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 40 คน ซึ่งเป็นอาจารย์สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ และสาขาวิชาอุตสาหกรรมบริการอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่มีความเชี่ยวชาญทางด้านอาหาร โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ด้วยวิธีการทดสอบแบบให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) [3] นำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบหาความแตกต่าง (Duncan's New Multiple's Range Test, DMRT) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป [4]



(ก) ส่วนผสมซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง



(ข) เติมน้ำมันสำปะหลังในน้ำเดือด



(ค) เทส่วนผสมของเหลวที่รวมกันแล้วลงในหม้อต้มมันสำปะหลัง



(ง) เคี่ยวจนมันสำปะหลังเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน



(จ) ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง ที่ 4 ระดับ



(ฉ) ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลังที่ระดับร้อยละ 20

รูปที่ 1 ขั้นตอนการทำซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลังเรียงลำดับจาก (ก)-(ฉ)

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณการใช้มันสำปะหลังเสริมใน
ซอสเทอริยากิ

วัตถุดิบ	ปริมาณการใช้มันสำปะหลังเสริมในซอสเทอริยากิ			
	สูตรที่ 1 (ร้อยละ 0) (กรัม)	สูตรที่ 2 (ร้อยละ 20) (กรัม)	สูตรที่ 3 (ร้อยละ 30) (กรัม)	สูตรที่ 4 (ร้อยละ 40) (กรัม)
น้ำสะอาด	1,500	1,500	1,500	1,500
ซีอิ๊วญี่ปุ่น (โชยุ)	200	200	200	200
เหล้าหวานมิ ริน	100	100	100	100
น้ำตาลทราย	50	50	50	50
ขิง	30	30	30	30
หอมใหญ่	100	100	100	100
มัน สำปะหลัง	0	396	594	792
สด พันธุ์ ระยอง 90				

ตารางที่ 2 รายการวิเคราะห์ และวิธีที่ใช้การทดสอบ

รายการวิเคราะห์	วิธีทดสอบ/อ้างอิง
ค่า Water activity (a_w)	วัดโดยให้เครื่องวัดค่า a_w (Aqua Lab รุ่น CX3TE)
ค่าสี	วัดด้วยเครื่องวัดค่าสี Spectrophotometer (CONICA MINOLTA รุ่น CM-3500d) แสดงผลการวัดค่า L^* ความสว่าง (0 = มืด, 100 = สว่าง) a^* + = สีแดง, - = สีเขียว b^* + = สีเหลือง, - = สีนํ้าเงิน
ความชื้น	In-house method STM No.03-118 based on AOAC (2012), 95.45A
ไขมัน	Method of Analysis for Nutrition
กากใยอาหาร	In-house method STM No.03-008 based on AOAC (2012), 985.29
เถ้า	In-house method STM No.03-114 based on AOAC (2012), 923.03
โปรตีน	in-house method STM No.03-017 based on AOAC (2012), 981.10

2.2 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง

วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของผลิตภัณฑ์ ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง ที่พัฒนามาจากตำรับมาตรฐานจากการผู้ทดสอบชิมจำนวน 40 คน และนำมาวิเคราะห์ และวิธีการที่ใช้ทดสอบในแต่ละรายการ ใช้วิธีทดสอบอ้างอิง ดังตารางที่ 2

2.3 การศึกษาการยอมรับของผู้บริโภค (Cosumer test) ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง

ทำการทดสอบผู้บริโภคจำนวน 100 คน เพื่อศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง โดยผู้ทดสอบจะได้รับตัวอย่างพร้อมกับแบบสอบถามการยอมรับผลิตภัณฑ์ โดยใช้แบบสอบถามแบบสุ่มบังเอิญที่คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และตลาดเทเวศร์ นำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาร้อยละ ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค สำหรับตัวอย่างซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง บรรจุในถ้วยพลาสติกใสที่มีฝาปิด พร้อมทั้งทำการติดรหัสตัวอย่างจากการสุ่มหมายเลข จำนวน 3 หลัก จากนั้นทำการเสิร์ฟให้กับผู้ทดสอบพร้อมทั้งน้ำดื่มสำหรับล้างปาก

2.4 การถ่ายทอดเทคโนโลยีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง

โดยจัดอบรมเชิงปฏิบัติการ จำนวน 1 ครั้ง ผู้เข้าอบรมจำนวน 45 คน ณ กลุ่มวิสาหกิจชุมชนชาวไร่มันสำปะหลัง 480 อำเภอครบุรี และอำเภอหนองบุญมาก จังหวัดนครราชสีมา

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของมันสำปะหลัง โดยวิธีการเสริมลงในผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิ

ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิ ที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 20 30 และ 40 เมื่อนำไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่าผู้ชิมให้คะแนนความชอบ สูตรที่ 2 ปริมาณการเสริมมันสำปะหลังในซอสเทอริยากิ ที่ระดับร้อยละ 20 มากที่สุดในด้าน สี รสชาติ กลิ่นรส และความชอบโดยรวม อยู่ในระดับชอบมาก มีค่าเฉลี่ย 8.42 7.92 7.92 8.30 7.95 และ 8.52 ตามลำดับ เมื่อนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ พบว่า ด้านสี รสชาติ กลิ่นรส และความชอบโดยรวม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนด้านกลิ่น และเนื้อสัมผัสไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เนื่องจากผู้ชิมให้คะแนนความชอบ สูตรที่ 2 มากที่สุดเนื่องจากมีลักษณะด้าน สี กลิ่น และรสชาติคล้ายกับซอสเทอริยากิที่มีขายตามตลาดทั่วไป ดังนั้นจึงคัดเลือกสูตรที่ 2 เป็นสูตรตำรับซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลังต่อไป สอดคล้องกับงานวิจัยของ [4] การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมเปลือกแดงโมที่เหลือใช้ โดยวิธีการเสริมลงในผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่แตกต่างกันของ ซอสมะเขือเทศ ซอสพริก ซอสพืชมะเขือเทศเสริมเปลือกแดงโมที่เหลือใช้ ที่ระดับร้อยละ 15 ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยมีคะแนนเฉลี่ย 8.07 8.07 8.10 8.10 8.00 และ 8.13 ตามลำดับ อยู่ในระดับความชอบมาก เมื่อนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน และหาความแตกต่างทางสถิติ พบว่าคุณลักษณะ ด้านสี กลิ่น และรสชาติ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 ส่วน

ด้านลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังตารางที่ 3 สอดคล้องกับงานวิจัยของ [5] การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสสำเร็จรูปจากเปลือกแดงโมเหลือใช้ การเสริมเปลือกแดงโมลงในผลิตภัณฑ์ซอสทั้ง 4 ชนิด สามารถเสริมได้แต่ควรคำนึงถึงองค์ประกอบทางเคมีของส่วนประกอบเริ่มต้น เช่น ปริมาณความชื้น และคาร์โบไฮเดรต ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้อาจมีผลกระทบต่อคุณลักษณะทางกายภาพ เช่น กลิ่นรส และลักษณะเนื้อสัมผัส ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้มีผลกระทบต่อกรยอมรับผลิตภัณฑ์ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ [6] การศึกษาปริมาณถั่วลิสงที่เติมลงในผลิตภัณฑ์ซอสถั่วลิสงเป็นผลจากความต้องการของผู้บริโภคที่อยากให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสที่ดี นอกจากนั้นการเติมถั่วลิสงบดยังช่วยเพิ่มเนื้อสัมผัสและสร้างความแตกต่างให้กับผลิตภัณฑ์ ตอบโจทย์การใช้ผลิตภัณฑ์ในลักษณะ Multi function คือ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในหลากหลายรูปแบบ (ซอสผัด และซอสจิ้ม) ผลิตภัณฑ์ผลิตโดยใช้วัตถุดิบที่มีความปลอดภัยซึ่งได้ผ่านการตรวจปริมาณอะฟลาทอกซินและไม่พบปริมาณอะฟลาทอกซินที่จะก่อให้เกิดอันตรายกับผู้บริโภค ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงมากที่ผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง จากมันสำปะหลังจะได้รับการพัฒนา และต่อยอดการผลิตเพื่อประโยชน์เชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของมันสำปะหลัง โดยวิธีการเสริมลงในผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิ

ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิ ที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 20 30 และ 40 เมื่อนำไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่าผู้ชิมให้คะแนนความชอบ สูตรที่ 2 ปริมาณการเสริมมันสำปะหลังในซอสเทอริยากิ ที่ระดับ

ร้อยละ 20 มากที่สุด ในด้าน สี รสชาติ กลิ่นรส และความชอบโดยรวม อยู่ในระดับชอบมาก มีค่าเฉลี่ย 8.42 7.92 7.92 8.30 7.95 และ 8.52 ตามลำดับ เมื่อนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ พบว่า ด้านสี รสชาติ กลิ่นรส และความชอบโดยรวม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนด้านกลิ่น และเนื้อสัมผัสไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เนื่องจากผู้ชิมให้คะแนนความชอบ สูตรที่ 2 มากที่สุด เนื่องจากมีลักษณะด้าน สี กลิ่น และรสชาติคล้ายกับซอสเทอริยากิที่มีขายตามตลาดทั่วไป ดังนั้นจึงคัดเลือกสูตรที่ 2 เป็นสูตรตำรับซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลังต่อไป สอดคล้องกับงานวิจัยของ [4] การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมเพื่อเลือกแต่งโมที่เลือกใช้ โดยวิธีการเสริมลงในผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่แตกต่างกันของ ซอสมะเขือเทศ ซอสพริก ซอสพิซซา และซอสชีฟูดส์ ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่า ผู้ชิมให้การยอมรับในผลิตภัณฑ์ซอสมะเขือเทศเสริมเปลือกแต่งโมที่เลือกใช้ ที่ระดับร้อยละ 15 ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยมีคะแนนเฉลี่ย 8.07 8.07 8.10 8.10 8.00 และ 8.13 ตามลำดับ อยู่ในระดับความชอบมาก เมื่อนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน และหาความแตกต่างทางสถิติ พบว่าคุณลักษณะ ด้านสี กลิ่น และรสชาติ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 ส่วน

ด้านลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังตารางที่ 3 สอดคล้องกับงานวิจัยของ [5] การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสสำเร็จรูปจากเปลือกแต่งโมเหลือใช้ การเสริมเปลือกแต่งโมลงในผลิตภัณฑ์ซอสทั้ง 4 ชนิด สามารถเสริมได้แต่ควรคำนึงถึงองค์ประกอบทางเคมีของส่วนประกอบเริ่มต้น เช่น ปริมาณความชื้น และคาร์โบไฮเดรต ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้อาจมีผลกระทบต่อคุณลักษณะทางกายภาพ เช่น กลิ่นรส และลักษณะเนื้อสัมผัส ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้มีผลกระทบต่อการยอมรับผลิตภัณฑ์ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ [6] การศึกษาปริมาณถั่วลิสงที่เติมลงในผลิตภัณฑ์ซอสถั่วลิสงเป็นผลจากความต้องการของผู้บริโภคที่อยากให้มีผลิตภัณฑ์ที่มีกลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสที่ดี นอกจากนั้นการเติมถั่วลิสงบดยังช่วยเพิ่มเนื้อสัมผัสและสร้างความแตกต่างให้กับผลิตภัณฑ์ ตอบโจทย์การใช้ผลิตภัณฑ์ในลักษณะ multi function คือ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในหลากหลายรูปแบบ (ซอสผัดและซอสจิ้ม) ผลิตภัณฑ์ผลิตโดยใช้วัตถุดิบที่มีความปลอดภัยซึ่งได้ผ่านการตรวจปริมาณอะฟลาทอกซินและไม่พบปริมาณอะฟลาทอกซินที่จะก่อให้เกิดอันตรายกับผู้บริโภค ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงมากที่ผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง จากมันสำปะหลังจะได้รับการพัฒนา และต่อยอดการผลิตเพื่อประโยชน์เชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 3 แสดงคุณภาพทางประสาทสัมผัสของซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง จำนวน 4 สูตร

คุณลักษณะ	ปริมาณมันสำปะหลังเสริมซอสเทอริยากิ			
	สูตรที่ 1 (ร้อยละ 0) (กรัม)	สูตรที่ 2 (ร้อยละ 20) (กรัม)	สูตรที่ 3 (ร้อยละ 30) (กรัม)	สูตรที่ 4 (ร้อยละ 40) (กรัม)
สี	7.65±0.57 ^b	8.42±0.59 ^a	7.77±0.59 ^b	7.72±0.59 ^b
กลิ่น ^{ns}	7.95±0.71	7.92±0.47	7.95±0.55	7.90±0.49
รสชาติ	7.47±0.64 ^b	7.92±0.47 ^a	7.95±0.55 ^a	7.90±0.49 ^a
กลิ่นรส	7.97±0.64 ^a	8.30±0.72 ^a	8.25±0.86 ^a	7.47±0.64 ^b
เนื้อสัมผัส ^{ns}	7.85±0.53	7.95±0.50	7.82±0.50	7.77±0.47
ความชอบโดยรวม	7.77±0.47 ^b	8.52±0.50 ^a	7.70±0.46 ^b	7.75±0.43 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรในแนวนอนที่ต่างกัน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ns หมายถึง ค่าที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3.2 ผลการศึกษาคุณภาพทางกายภาพ และทางเคมีของผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิ เสริมมันสำปะหลัง

ผลการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ซอส เทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง ที่มีการเสริมมันสำปะหลังในปริมาณร้อยละ 20 แสดงดังตารางที่ 4 และตาราง ที่ 5

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง

คุณภาพทางกายภาพ	สูตรที่ 2 (ร้อยละ 20)
ค่า a_w	0.97 ± 0.00
ค่าสี L^*	31.72 ± 0.58
a^*	2.17 ± 0.18
b^*	3.28 ± 0.97

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลังแบบน้ำ

คุณภาพทางเคมี	สูตรที่ 2 (ร้อยละ 20)
ค่าความชื้น	78.66 ± 0.91
ไขมัน	1.08 ± 0.39
กากใยอาหาร	1.36 ± 0.00
เถ้า	2.29 ± 0.01
โปรตีน	3.34 ± 0.06

ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง ที่ระดับร้อยละ 20 พบว่า มีค่า a_w เท่ากับ 0.97 ± 0.00 มีค่าความสว่าง (L^*) 31.72 ± 0.58 ค่าสีเขียว (a^*) 2.17 ± 0.18 และค่าสีเหลือง (b^*) 3.28 ± 0.97 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [7] การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสมะเขือเทศโดยเสริมผักข้าว 5 ระดับ ในด้านค่าสี พบว่า เมื่อเสริมผักข้าวในซอสมะเขือเทศปริมาณมากขึ้น แนวโน้มค่าสีมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*)

ทั้งนี้เนื่องจากในผักข้าวที่เสริมลงไปมีทั้งเนื้อผักข้าวและเยื่อผักข้าว ในอัตราส่วน 1:1 ซึ่งในผักข้าวมีปริมาณของเบต้าแคโรทีน และไลโคปีนอยู่สูง และสอดคล้องกับงานวิจัยของ [8] ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพตามเกณฑ์และไม่แตกต่างกับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเดียวกัน

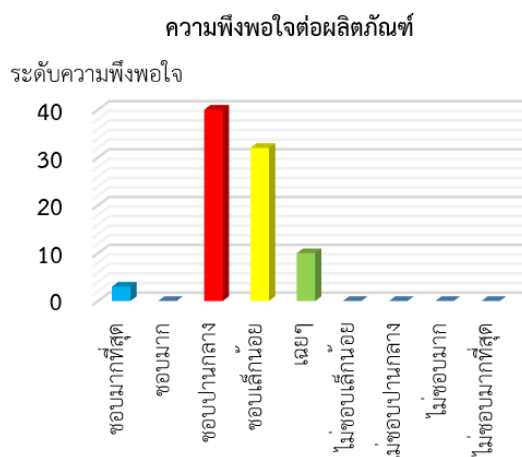
ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลังแบบน้ำ ที่ระดับร้อยละ 20 พบว่า มีค่าความชื้น ร้อยละ 78.66 ± 0.91 ค่าไขมัน ร้อยละ 1.08 ± 0.39 กากใยอาหาร ร้อยละ 1.36 ± 0.00 เถ้า ร้อยละ 2.29 ± 0.01 และโปรตีน ร้อยละ 3.44 ± 0.06 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [7] การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสมะเขือเทศโดยเสริมผักข้าว 5 ระดับ คุณภาพทางเคมี พบว่า มีค่าความชื้น ร้อยละ 78.66 ± 0.91 ค่าไขมัน ร้อยละ 1.08 ± 0.39 กากใย ร้อยละ 1.36 ± 0.00 เถ้า ร้อยละ 2.29 ± 0.01 และโปรตีน ร้อยละ 3.44 ± 0.06 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [8] ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพตามเกณฑ์ และไม่แตกต่างกับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเดียวกัน

3.3 ผลการศึกษการยอมรับของผู้บริโภค (Consumer test) ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง

จากคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านความชอบ สี รสชาติ กลิ่นรส และความชอบโดยรวมของผู้ทดสอบที่มีต่อซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง โดยใช้แบบสอบถามแบบสุ่มบังเอิญที่คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และตลาดเทเวศร์ ซึ่งกลุ่มเป้าหมาย จำนวน 100 คน พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง คิดเป็นร้อยละ 67 ส่วนใหญ่มีอายุอยู่ในช่วงน้อยกว่า 25 ปี คิดเป็น 45 ร้อยละ ส่วนใหญ่ประกอบอาชีพนักเรียน นักศึกษา คิดเป็น 30 ร้อยละ และส่วนใหญ่มีรายได้เฉลี่ยต่อเดือน 10,001-15,000 บาท แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 6 และรูปที่ 2

ตารางที่ 6 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม
ผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิมันสำปะหลัง

ข้อมูล	ร้อยละ
1. เพศ	
หญิง	67
ชาย	33
2. อายุ	
น้อยกว่า 25 ปี	45
26-35 ปี	28
36-45 ปี	12
46-55 ปี	10
มากกว่า 55 ปี	5
3. อาชีพ	
บุคคลทั่วไป	23
นักเรียน/นักศึกษา	30
คนงาน/ลูกจ้าง	5
พ่อบ้าน/แม่บ้าน	20
พนักงานเอกชน	5
ธุรกิจส่วนตัว	5
อื่นๆ	-
4. รายได้ต่อเดือน	
น้อยกว่า 10,000 บาท	28
10,001-15,000 บาท	30
15,001-20,000 บาท	15
20,001-25,000 บาท	10
มากกว่า 25,000 บาท	17



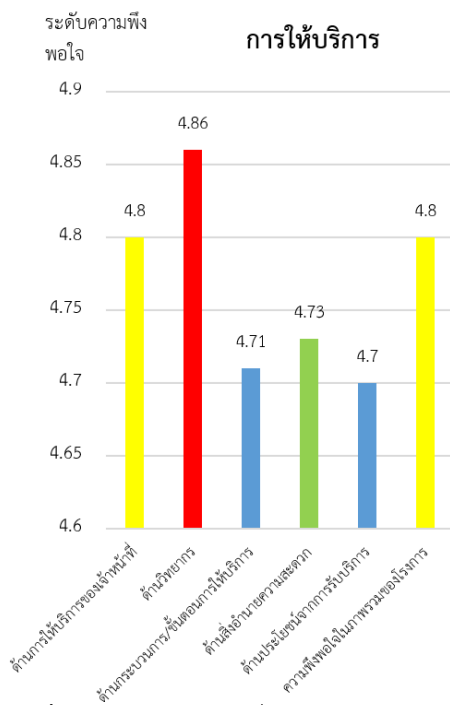
รูปที่ 2 กราฟแสดงความชอบที่มีต่อผลิตภัณฑ์ซอสเทอริ
ยากิเสริมมันสำปะหลัง

จากตารางที่ 6 การวิเคราะห์ข้อมูลการยอมรับของผู้ทดสอบที่มีต่อผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง ทางด้านความชอบที่มีต่อลักษณะต่าง ๆ ของตัวอย่าง พบว่า ผู้บริโภคให้ความชอบต่อผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิ ในระดับความชอบปานกลาง โดยให้ความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นและรสชาติ อยู่ในระดับความชอบปานกลาง

3.4 การถ่ายทอดเทคโนโลยีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง

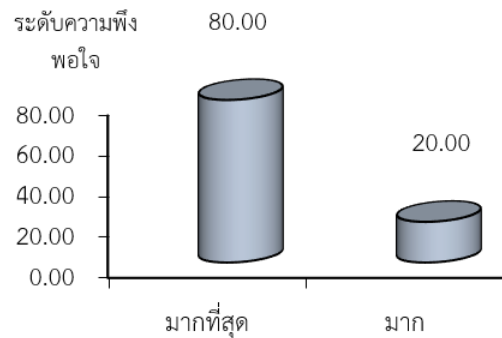
ดำเนินการถ่ายทอดเทคโนโลยีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง ระหว่างวันที่ 10 - 11 สิงหาคม 2562 ณ กลุ่มวิสาหกิจชุมชนชาวไร่มันสำปะหลัง 480 อำเภอครบุรี และอำเภอหนองบุญมาก จังหวัดนครราชสีมา ผู้เข้าอบรมจำนวน 45 คน ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง คิดเป็นร้อยละ 84.44 มีอายุ 36-45 ปี คิดเป็นร้อยละ 66.67 พบว่า ความพึงพอใจของการรับบริการในกระบวนการให้บริการโครงการฯ ในระดับมาก-มากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.76 ระดับมาก - มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 100 ดังรูปที่ 3 และ รูปที่ 4 สอดคล้องกับงานวิจัยของ [9] การแปรรูปซอสพริกข้าวหมากสำเร็จรูปสำหรับผลิตภัณฑ์ชุมชน ในเขตเทศบาลตำบลบางเสาธง จังหวัดสมุทรปราการ เมื่อนำความรู้การแปรรูปซอสพริกข้าวหมากไปถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับชุมชนในเขตเทศบาลตำบลบางเสาธง จังหวัดสมุทรปราการ โดยการจัดโครงการฝึกอบรม พบว่าผู้เข้ารับการอบรมมีความพึงพอใจในระดับมาก ได้รับความรู้เพิ่มขึ้น และสามารถนำความรู้ไปใช้ในการประกอบอาชีพได้ในระดับมาก ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้สามารถนำไปต่อยอดผลิตในเชิงการค้าของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนชาวไร่มันสำปะหลัง 480 อำเภอครบุรี และอำเภอหนองบุญมาก จังหวัดนครราชสีมา เพื่อจำหน่ายต่อไป เนื่องจากมีการปลูกมันสำปะหลังเป็นจำนวนมาก และมีผลกระทบในช่วงที่มันสำปะหลังราคาตกต่ำและล้น

ตลาด อีกทั้งในปัจจุบันการดำเนินชีวิตในการปรุงอาหารของครอบครัวต่าง ๆ ต้องมีส่วนผสมของซอสเข้ามาช่วยในเรื่องรสชาติให้อาหารดียิ่งขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ [10] การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงปรุงรสและผงโรยข้าวจากถั่วเหลืองหมักพื้นบ้าน พบว่า ถั่วเหลืองหมักแบบแผ่นที่เป็นภูมิปัญญาของชาวบ้านพื้นถิ่นในภาคเหนือสามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ทันสมัยสนองต่อความต้องการที่เปลี่ยนแปลงของผู้บริโภคในยุคปัจจุบันได้ 2 ผลิตภัณฑ์ได้แก่ผลิตภัณฑ์ผงปรุงรสและผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวซึ่งจากการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว 2 รสชาติ ได้แก่ รสเงาะ-สาหร่ายและรสหอม-กระเทียมพบว่าผู้บริโภคให้คะแนนความชอบอยู่ในระดับความชอบปานกลางถึงชอบมากและมีคุณสมบัติทางโภชนาการด้านโปรตีน ไขมันและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอยู่ในระดับสูงซึ่งเกิดจากการผ่านกระบวนการหมักจึงมีประโยชน์ต่อผู้บริโภค



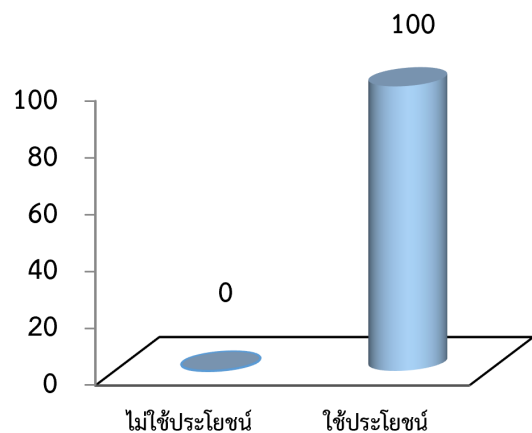
รูปที่ 3 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความพึงพอใจของผู้รับบริการความพึงพอใจของผู้รับบริการในกระบวนการให้บริการ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง

ความพึงพอใจของผู้รับบริการในกระบวนการให้บริการ



รูปที่ 4 กราฟแสดงค่าร้อยละความพึงพอใจของผู้รับบริการในกระบวนการให้บริการ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง

ผู้เข้าร่วมบริการนำความรู้ไปใช้ประโยชน์



รูปที่ 5 กราฟแสดงจำนวนผู้เข้าอบรมได้นำความรู้ไปใช้ประโยชน์

4. สรุป

4.1 จากผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิ ที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 20 30 และ 40 พบว่า ปริมาณการเสริมมันสำปะหลังในซอสเทอริยากิ ที่ระดับร้อยละ 20 ผู้ชิมให้คะแนนความชอบมากที่สุดในด้าน สี กลิ่น รสชาติ กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม อยู่ใน

ระดับชอบมาก มีค่าเฉลี่ย 8.42 7.92 7.92 8.30 7.95 และ 8.52 ตามลำดับ เมื่อนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติพบว่า ด้านสี รสชาติ กลิ่นรส และความชอบโดยรวม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนด้านกลิ่น และเนื้อสัมผัสไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4.2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพของซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง ที่ระดับร้อยละ 20 คุณภาพทางกายภาพ พบว่า มีค่า a_w เท่ากับ 0.97 ± 0.00 มีค่าความสว่าง (L^*) 31.72 ± 0.58 ค่าสีเขียว (a^*) 2.17 ± 0.18 และค่าสีเหลือง (b^*) 3.28 ± 0.97

ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลังแบบน้ำ ที่ระดับร้อยละ 20 พบว่า มีค่าความชื้น ร้อยละ 78.66 ± 0.91 ค่าไขมัน ร้อยละ 1.08 ± 0.39 คากใยอาหาร ร้อยละ 1.36 ± 0.00 เถ้า ร้อยละ 2.29 ± 0.01 และโปรตีน ร้อยละ 3.44 ± 0.06

4.3 ข้อมูลการทดสอบผู้บริโภค (Consumer test) ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลังของผลิตภัณฑ์ พบว่า ผู้บริโภคชอบผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิ ในระดับความชอบปานกลาง โดยให้คะแนนความชอบผลิตภัณฑ์ ด้าน ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น และรสชาติ อยู่ในระดับความชอบปานกลาง

4.4 การถ่ายทอดเทคโนโลยีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ซอสเทอริยากิเสริมมันสำปะหลัง วันที่ 10 - 11 สิงหาคม 2562 ณ กลุ่มวิสาหกิจชุมชนชาวไร่มันสำปะหลัง 480 อำเภอครบุรี และอำเภอหนองบุญมาก จังหวัดนครราชสีมา ผู้เข้าอบรมจำนวน 45 คน ส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง คิดเป็นร้อยละ 84.44 มีอายุ 36-45 ปี คิดเป็นร้อยละ 66.67 พบว่า ความพึงพอใจของการรับบริการในกระบวนการให้บริการโครงการฯ ในระดับมาก-มากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.76 คิดเป็นร้อยละ 100 การประเมินผลการติดตามหลักการฝึกอบรม พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามมีการนำความรู้ไปใช้ประโยชน์จำนวน 45 คน คิดเป็นร้อยละ 100

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายจ่าย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เลขที่สัญญา 62-2102-04

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Sarawat, "Inbreeding cassava", in *Proceedings of annual conference 2009 : Research of agronomy and renewable energy plants*, 7 - 9 September 2009, Department of Agriculture, Bangkok (Thailand). Field Crops Research Institute, 2009, pp. 71-82.
- [2] R. Verma, N. Chauhan, BR Singh, Samsheer, S. Chandra and RS Sengar, "Cassava processing and its food application: A review," *The Pharma Innovation Journal*, pp. 415-422, 2022.
- [3] L. Nicolas, C. Marquilly and M. O Mahony, "The 9-point hedonic scale: Are words and numbers compatible?," *Food Quality and Preference*. 2010, vol. 21, no. 8, pp. 1008-1015.
- [4] The Association of Official Analytical Chemists, 17th ed., *Official Method of Analysis of AOAC International*, 2000.
- [5] Ch. Auppathak. "Development of Readymade Sauce Product from Watermelon Rinds waste," Research report. Food and Nutrition, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, 2014-2015.

- [6] N. Ruchikachorn, P. Chompreeda, V. Haruthaithanasan and S. Chuenput, "Formulation and process optimization of peanut sauce," in *Proceedings of 43rd Kasetsart University Annual Conference Animals, Agro-Industry*, 1-4 February 2005, Bangkok, 2005, vol. 43, pp. 435-443.
- [7] P. Jangphonak, Development of Ketchup Supplemented with Gac Fruit. (*Momordica cochinchinensis* (Lour.) Spreng.) in Document of the Friday and International Academic Conference," The 4th Rajabhat Research" (Science and Technology Group), Buriram Rajabhat University, 2017, pp. 442-450.
- [8] Thai Industrial Standards Institute. Oyster Sauce Industrial Product Standard. TIS 1317 - 2538, 1995.
- [9] A. Chanchaichaovivat, S. Kirdtabtim and U. Nilkrawat. "The Processing of Instant Kaomark-Chilli Sauce for Community Products in Bang SaoThong Municipality, Samut Prakan Province," Research report. Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Thailand, 2560.
- [10] S. Rajchasom, N. Seelum and S. Takonkeaw. "Development of Seasoning Powder and Furikake-rice Seasoning from Fermented Soy Bean," *RMUTP Research Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 173-182, Jul.-Dec. 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 SarabanPSK ขนาด 22 ตัวตรงหนา จัดชิดขอบ ซ้ายหน้ากระดาษ	ชื่อภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 16 ตัวตรงหนา จัดชิดขอบซ้าย หน้ากระดาษ
ชื่อผู้เขียน	ทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH SarabanPSK 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 SarabanPSK ขนาดตัวอักษร 14	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาดตัวอักษร 11

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
ชื่อบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 20 (ตัวตรงหนา) จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 14 (ตัวตรงหนา) 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)
ชื่อหัวข้อใหญ่	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 จะต้องมรูปแบบเดียวกันกับสัญลักษณ์หรือตัวแปรที่อยู่ในคำอธิบายหรือในเนื้อหา และให้จัดชิดขอบซ้ายสุดเสมอ ส่วนเลขบอกลำดับสมการ ให้เขียนลำดับเลขไว้ในวงเล็บ และจัดชิดขวาสุด	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 สัญลักษณ์หรือตัวแปรที่เขียนในสมการ จะต้องมรูปแบบเดียวกันกับสัญลักษณ์หรือตัวแปรที่อยู่ในคำอธิบายหรือในเนื้อหา 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. Süßer, 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

- ◆ **Effects of Hot Water Blanching and Puffing Temperature Level on Qualities of Namwa- and Homtong-Banana Chips**
Surapit Tabtiang
- ◆ **Effects of Drying with Heat pump, Heater and Heat pump in Combination with Heater on Quality of Kaffir Lime Leaves and Energy Consumption**
Poonyaporn Sanpang Yardfon Tanongkankit and Parin Khongkrapan
- ◆ **The Product development of Koranda (*Carissa carandas* Linn) juice mixed with Nata de Coco and physiochemical properties**
Janpen Butsai Wanpa Wongsangtham and Wijitra Liaotrakoon
- ◆ **Multi-compartment Fuel Delivery with Network flow model of transportation**
Manop Donmuen and Komkrit Pitirerk
- ◆ **Free and Forced Vibration Analysis by n-Sided Polygonal Edge-based Strain Smoothed Finite Element for 2D Problem**
Kamtornkiat Musiket Boonchai Phungpaingam and Suthee Piyaphipat
- ◆ **Effects of dyeing conditions on the color Value and colorfastness of cotton yarn dyed with the mud from Khon Kaen Province**
Suthawadee Wewa Kajijarus Phiomthamsiri and Suteeluk Kraisuwan
- ◆ **Performance Evaluation of Electrical-Solar Combined Energy Dryer for Nam Dok Mai Mango drying**
Jantana Seelanamtiang Tawarat Treeamnuk Krawee Treeamnuk and Kaittisak Jaito
- ◆ **Effect of Free fatty Acid Added in Palm Oil on Viscosity, Cure Characteristics and Mechanical Properties of Carbon Black Filled Natural Rubber Compounds**
Siwarote Boonrasri Chanchira Laorach and Pornchai Rachtanapun
- ◆ **Imitation Milk Product from Water Caltrop**
Narathorn Satsue and Nomjit Suteebut
- ◆ **Study on Antioxidant and Antibacterial Activity of Mulberry Leaf Tea Extract Soap and Mulberry Leaf Tea Extract Mixed with Turmeric Soap**
Piyawan Phansi Janejira Sura and Kansuda Duangsrikaew
- ◆ **A design and performance assessment of mobile hot and chill water set**
Nuttanon Pongpanit and Sittidech Petcharat
- ◆ **Effect of Different Tea Process on Antioxidant Capacity and Consumer Acceptance of Doi Saket Purple Rice Leaf Tea**
Sureewan Rajchasom Janyawat Tancharoenrat Vuthijumnonk and Pornsawan Sombatnan
- ◆ **Tyrosinase Inhibitory Efficiency and Antioxidant Activity of Gac fruit (*Momordica cochinchinensis* Spreng.) Extract**
Pornsinee Darapong Sirichan Tachai Jetchan Atthaisong Nanthawan Jaikla Buranee Rabiab and Rawinipa Srimoon
- ◆ **Formulation Development of Plum Sauce from Pomelo Juice and Pomelo Pulp**
Suthida Kitjavorasatien Jiraphat Othong Laddawan Klinmalai Woralak Pomnoi and Vorathon Pomyen
- ◆ **Effect of Stone Dust on the Properties of Interlocking Block**
Chookiat Choosakul Tawich Klathae Suporn Rittipukdee Khwanchiwa Yongsata Sunun Monkaew and Saravut Jaritngam
- ◆ **Product Development of Teriyaki Sauce Fortified with Cassava**
Chaowalit Auppathak Prassanee Tubbaiyam Sumapar Thedkwanchai Suthida Kitjavorasatien Vorathon Pomyen Woralak Pomnoi Laddawan Klinmalai Jirapat Othong and Premraphi Ooaymaweerahirun