

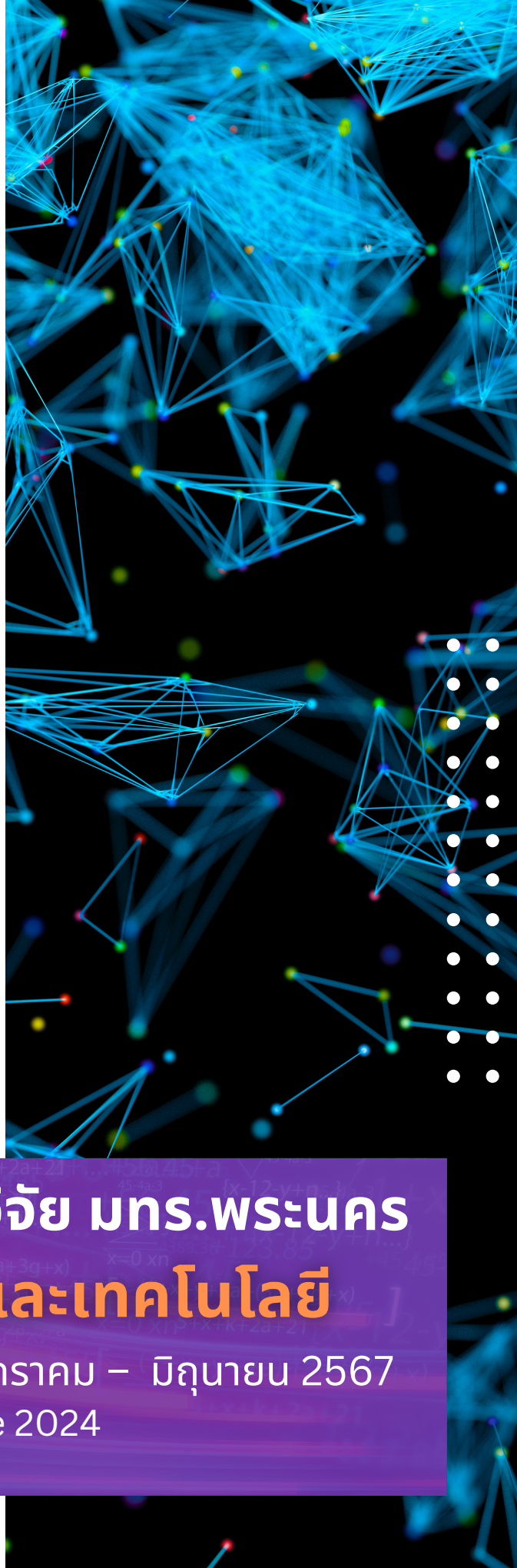
RMUTP

RESEARCH JOURNAL
Sciences and Technology

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม – มิถุนายน 2567
Vol. 18 No. 1 January - June 2024

E-ISSN : 3027-8260



วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร
RMUTP RESEARCH JOURNAL

ที่ปรึกษา

ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา บุญกนิษฐ

รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร วิจัยและพัฒนานวัตกรรม

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วาทีเรื้อตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี

กองบรรณาธิการ จากหน่วยงานภายนอก

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

กองบรรณาธิการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งอรุณ พรเจริญ	รองศาสตราจารย์ ดร.รัตนพล มงคลรัตนาสีทิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรลักษณ์ ปัญญาธิติพงศ์
ดร.ชลากร อุดมรักษาสกุล	ดร.สิงห์แก้ว ป็อกเท็ง
ดร.วราพร ทองจัน	นางสาวพัชรนันท์ ยั่งรวริเชียร

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)
ประจำปี 18 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2567

ศาสตราจารย์ ดร.วีระ หอสกุลไท	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ ชัยมูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤตพล สมมาตย์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.กัณวรัช พลุปราชญ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติวุฒิ ศุทธิวิโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ เจาจารีก	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ แสงประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล กลิ่นบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ มदनาค	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.บวรศักดิ์ ลีนานนท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ จัยเจิม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ ปิ่นศิริโรตม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วรัญญู ศรีเดช	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วิราวรรณ ชินวิริยสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.วีระเวทย์ อุทโธ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ อัสววงศ์อารยะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.สิริชัย ส่งเสริมพงษ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรณก อรรถนิตย	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิการ์ กุลยะณี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤติยา เพ็ญเพชร	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กันตภณ คูหาพัฒนกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ธา วงษ์อุทอง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุท อ้าช้าง	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิตา ถิรวัฒน์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีราพร จุลยุแสน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรารัตน์ อิทธิโสภณกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทวัฒน์ วีระยุทธ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรมล ปัญญาบุศยกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศิริวงศ์ไผ่ชาติ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา ปราบภูมิก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาศิลา ตระกูลยิ่งเจริญ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ วงศ์พุทธิสิน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภก.บรรลือ สังข์ทอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทรา ปฐมรังษิยังกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เยาวภา หล่อเจริญผล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สวามินี นวลแขกกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธิดา ชูสว่าง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธีรา วัฒนกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภา แคนสี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอน จักกะพาก จันทรประสาทสุข

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กุลพร พุทธิมี

ดร.ประทุมพร ยิ่งธงชัย

ดร.วราภรณ์ ประเสริฐ

มหาวิทยาลัยบูรพา

มหาวิทยาลัยศิลปากร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

มหาวิทยาลัยบูรพา

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สถาบันคั่นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร

สารบัญ
วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร
ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2567 ISSN 3027-8260 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

การพัฒนาอัฐบล็อกประสานจากฝุ่นหินเหลือทิ้งและเถ้าเฝ้ายางพารา ขวัญชีวา หยงสตาร์ นุอนันท์ คุระแก้ว ชูเกียรติ ชูสกุล และ สุนันท์ มนต์แก้ว	1
ผลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนต่อคุณภาพ ของเนื้อลำไย ไผ่แดง ขวัญใจ และ สุวลี พองอินทร์	12
ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและสมบัติการต้านออกซิเดชันของไวน์ผลไม้ เมืองหนาวที่ปลูกในประเทศไทย รุ่งทิพา วงศ์ไพศาลฤทธิ์ และ วิชาญ พงษ์สานต์ศิริ	25
Computational Efficiency for Calculating Determinants of Block Matrices Puttha Sakkaplangkul and Nattaporn Chuenjarern	38
การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไอศกรีมเสริมใยอาหารจากเพียวเร่ส้มโอ จารุพัฒน์ กาญจนรงค์ และ วิจิตรา ปล่องบรรจง	47
ผลของอัตราส่วนสับปะรดภูเก็ตต่อสับปะรดนางแลที่มีต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสในข้าวเกรียบสับปะรด กฤษณกัณฑ์ ภาโพธิรัตน์ ชญานิน วังตาล และ รักชนก อินจันทร์	57
ผลของระดับอุณหภูมิอบแห้งต่อการอบแห้งกระเจี๊ยบเขียวแบบสุญญากาศร่วมกับ รังสีอินฟราเรดไกล ปิยบุตร อินนุ ญัฐพงศ์ สมพันธ์ ศิริชัย วิเวก สมหญิง พงศ์พิมล และ ภูมิใจ สอาดโฉม	67

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2567 ISSN 3027-8260 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวมจากสารสกัด ยาอายุวัฒนะ	79
จิรภัทร เล่ห์สิงห์ ธัญญะ พรหมศร กริยาภา หลายรุ่งเรือง และ เจมส์ พิงผล	
การพัฒนาผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนมถั่วเหลืองพร้อมดื่มแคลอรีต่ำเสริมงาดำสำหรับผู้สูงอายุ	92
อัจฉรา ดลวิทยาคูณ เกษวรารักษ์ ทะปะละ รัชชนา ดิษฐา และ ปริญญา พุฒนา	
การพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด	105
บุญทริกา ศิลา กระวี ตรีอำนาจ และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ	
อิทธิพลของอัตราการให้น้ำต่อผลผลิตและคุณภาพพญานาเปียร์ปากช่อง 1 โดยใช้เครื่องรับรู้สำหรับตรวจวัดค่าความชื้นในดิน	117
กิตติศักดิ์ วสันตวิทย์ จิรณ กิ่งแก้ว และ วีรวัฒน์ ปัญญาภิวัฒน์	
การเลือกที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าประเภทเครื่องดื่มโดยใช้ตัวแบบคณิตศาสตร์โดย พิจารณาต้นทุนโลจิสติกส์การขนส่ง	128
พรพิมล ชัยวุฒิศักดิ์	
การประเมินสมรรถนะของระบบปรับอากาศแบบไฮบริดระหว่างเครื่องทำความเย็น แบบน้ำระเหยและเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอ	143
ณัฐพล อำไพ และ อาทิตย์ คุณศรีสุข	
การพัฒนาผลิตภัณฑ์หมั่นโถวทอดแทนแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวเก่า	160
นิตยา งามาม ปัญญา ห่อทอง โสรยา พูนสวัสดิ์ และ และ ณัฏฐาณิล เศรษฐพรโมทย์	

สารบัญ
วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร
ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2567 ISSN 3027-8260 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

การพัฒนาผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้าพ้งา จรรยา คงแก้ว พิศมัย กรุดพิสมัย และ น้อมจิตต์ สุธิบุตร	172
--	-----

บทความวิชาการ:

บทความวิชาการ: กระบวนการสเฟียรรอยไคซิงและการนำไปใช้กับกระบวนการ แพ็กคาร์เบอร์ไรซิง วรรณา หอมจะบก กนกอร น้อยเล็ก นัยนา โปะสูงเนิน และ หทัยชนก หุ้มไธสง	186
---	-----

การพัฒนาอิฐบล็อกประสานจากฝุ่นหินเหลือทิ้งและเถ้าเฝ้ายางพารา

ขวัญชีวา หยงสตาร์¹ นูอนันท์ คุระแก้ว^{1*} ชูเกียรติ ชูสกุล² และ สุนันท์ มนต์แก้ว³

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

²วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

³คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

¹179 หมู่ 3 ตำบลไม้ฝาด อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง 92150

²99 หมู่ 4 ตำบลทองเนียน อำเภอนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช 80210

³1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 4 ธันวาคม 2564 แก้ไขบทความ 15 พฤศจิกายน 2565 ตอรับบทความ 20 มกราคม 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาอิฐบล็อกประสานจากฝุ่นหินเหลือทิ้ง และเถ้าเฝ้ายางพารา กำหนดให้อัตราส่วนวัสดุประสาน : มวลรวม เท่ากับ 1 : 7 โดยอัตราส่วนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้ง และเถ้าเฝ้ายางพาราร้อยละ 0, 25, 50 และ 75 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเท่ากับร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ศึกษาคุณสมบัติของอิฐบล็อกประสาน ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน (มผช. 602/2547) ชนิดไม่รับน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่า ความต้านทานแรงอัดและความหนาแน่นของอิฐบล็อกประสานมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของฝุ่นหินเหลือทิ้ง และเถ้าเฝ้ายางพาราแทนที่ปูนซีเมนต์ ส่วนค่าการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานเพิ่มขึ้นตามวัสดุที่แทนที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนของอิฐบล็อกประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งร้อยละ 25 ดีที่สุดโดยมีความหนาแน่น 1825 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การดูดกลืนน้ำ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความต้านทานอัด 3.47 เมกะพาสกาล และอัตราส่วนของอิฐบล็อกประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าเฝ้ายางพาราร้อยละ 25 ดีที่สุดโดยมีความหนาแน่น 1836 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การดูดกลืนน้ำ 256 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความต้านทานแรงอัด 3.28 เมกะพาสกาล เมื่อพิจารณาที่อายุ 28 วัน

คำสำคัญ : อิฐบล็อกประสาน; ฝุ่นหินเหลือทิ้ง; เถ้าเฝ้ายางพารา

Development of Interlocking Block Mixed with Waste Stone Dust and Para Rubber Wood Fly Ash

Khwanchiwa Yongsata¹ Nuanan Kurakaew^{1*} Chookiat Choosakul² and Sunun Monkaew³

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

²College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya

³Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

¹179 Moo 3, Tambol Maifad, Sikao, Trang 92150

²99 Moo 4, Tambol Tongnien, Khanom, Nokhon Si Thammarat 80210

³1381 Pibul Songkhram Road, Bangsue, Bangkok 10800

Received 4 December 2021; Revised 15 November 2022; Accepted 20 January 2023

Abstract

This research has the objective to develop interlocking block with waste stone dusts and para rubber wood fly ash. This research used the solder material ratio: gross which equals to 1:7 by the weight. The cement displacement ratio with waste stone dusts and para rubber wood fly ash was at the percentage of 0, 25, 50 and 75 by the weight. The water to material ratio was equal to 12% by the weight. The qualities of interlocking blocks were investigated after curing for 7, 14 and 28 days by comparing with the standard of community products of interlocking block (TCPS 602/2547) non-load-bearing type. The results showed that the compressive strength and the density of interlocking block tended to decrease with increasing the waste stone dusts and para rubber wood fly ash. The water absorption value of interlocking block tended to increase with increasing quantity of replacement materials. The best ratio of interlocking block replacing the cement waste stone dust was at 25% by the time that the density, water absorption, and compressive resistance were 1825 kgs per cubic meters, 250 kgs per cubic meters, and 3.47 megapascal, respectively. The best ratio of interlocking bricks replacing the cement with waste stone dusts and para rubber wood fly ash was at 25% considered at the age of 28 days by the time that the density, water absorption, and compressive resistance were 1,836 kgs per cubic meters, 256 kgs per cubic meters, and 3.28 megapascal, respectively.

Keywords : Interlocking Block; Waste Stone Dust; Para Rubber Wood Fly Ash

** Corresponding Author. Tel.: +668 9872 2069, E-mail Address: Nuanan.k@rmutsv.ac.th*

1. บทนำ

อิฐบล็อกประสาน (Interlocking Block) เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีความสำคัญชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งเป็นวัสดุก่อรับน้ำหนักที่ได้ทำการพัฒนา รูปแบบให้มีรูและเดือยบนตัวบล็อก เพื่อให้สะดวกในการก่อสร้างก่อให้เกิดความสวยงามคงทน และยังมีรูปแบบการจัดวางที่หลากหลายตามแต่ผู้ออกแบบ การผลิตนั้นเน้นการใช้วัตถุดิบในพื้นที่ เช่น ดินลูกรัง หินปูนทรายหรือวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ ที่มีความเหมาะสมผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำในสัดส่วนที่เหมาะสม นำมาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแท่งด้วยความชื้นให้แข็งตัวจะได้อิฐบล็อกประสานที่มีความแข็งแรงสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างอาคารในระบบผนังรับน้ำหนักหรือก่อสร้างในรูปแบบอื่นๆ [1]

ประเทศไทยมีโรงงานผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตที่จดทะเบียนในปี พ.ศ. 2564 กว่า 600 โรงงาน [2] โดยโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะสร้างบ่อตกฝุ่นเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายออกสู่ชั้นบรรยากาศ แต่มีฝุ่นบางส่วนที่ฟุ้งกระจายออกไป ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดทิ้งและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมบริเวณข้างเคียง ซึ่งฝุ่นหินเหลือทิ้งที่เหลือจากการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) และไม่สามารถนำมาผสมกับยางมะตอยได้ จากงานวิจัยของชูเกียรติและคณะ [3] พบว่าฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์ได้ไม่เกินร้อยละ 20

การผลิตไม้อย่างพาราแปรรูป เริ่มจากการนำไม้อย่างพาราไปทำการเลื่อยให้ได้ขนาดตามความต้องการ ซึ่งจะได้ไม้อย่างพาราแปรรูปร้อยละ 32 ที่พร้อมเข้าสู่กระบวนการอบและอาบน้ำยาเพื่อรักษาเนื้อไม้ ส่วนที่เหลือเป็นเศษไม้และขี้เลื่อยร้อยละ 68 ที่เป็นของเหลือจากกระบวนการเลื่อยไม้อย่างพาราภายในโรงเลื่อย ซึ่งของเหลืดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านเชื้อเพลิงร้อยละ 70 และเข้าสู่กระบวนการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดร้อยละ 30 ทำให้มีไม้อย่างพาราเหลือทิ้งจากการนำไม้อย่างพาราไปใช้ทางด้านเชื้อเพลิงเป็นจำนวนมาก

โดยโรงงานแปรรูปไม้อย่างพาราส่วนมากอยู่ในภาคใต้ [4] ถ้าไม้อย่างพาราเมืองค้ประกอบทางเคมีคล้ายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กล่าวคือ มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อนำไปผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำจะมีสมบัติในการช่วยเพิ่มการเชื่อมประสาน [5] ปัจจุบันมีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาการใช้ไม้อย่างพาราแทนที่ปูนซีเมนต์ เช่น ชินวิญญ์และปารเมศ [6] ได้นำเถ้าชีวมวลไม้อย่างพารากับเส้นใยผักตบชวา มาพัฒนาผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักซึ่งพบว่าเถ้าชีวมวลไม้อย่างพาราร้อยละ 15 และเส้นใยผักตบชวาร้อยละ 0.5 เป็นส่วนผสมที่แข็งแรงที่สุด ทวิขและคณะ [7] ศึกษาการใช้ประโยชน์จากเถ้าไม้อย่างพาราในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น โดยพบว่าการใช้เถ้าไม้อย่างพาราที่ร้อยละ 10 และ 20 ผ่านเกณฑ์มาตรฐานบล็อกประสานปูพื้น ดนพลและมาลัยวัลย์ [8] พบว่าการผสมเถ้าไม้อย่างพาราไม่เกินร้อยละ 20 มีผลให้ค่าความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์มวลรวมหินเพิ่มมากขึ้น

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาสมบัติของอิฐบล็อกประสานโดยใช้ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต และเถ้าไม้อย่างพาราจากโรงงานแปรรูปไม้มาแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ในการผลิตอิฐบล็อกประสานเพื่อเป็นแนวทางในการลดปริมาณปูนซีเมนต์และลดต้นทุนการผลิต ทั้งนี้เพื่อประโยชน์สูงสุดในการนำทรัพยากรธรรมชาติที่เหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ในงานวัสดุก่อสร้าง และลดสถานะปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement, OPC) โดยมีสมบัติตามมอก. 15 เล่ม 1 [9] มีค่าความถ่วงจำเพาะจากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188 [10] เท่ากับ 3.18

2) ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต (Waste Stone Dust, WSD) ของห้างหุ้นส่วนจำกัดโล่ทองการโยธา อำเภอย่านตาขาว จังหวัดตรัง ดังรูปที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะจากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188 เท่ากับ 2.71



รูปที่ 1 ฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต



รูปที่ 2 ถ้ำไม้ยางพารา

3) ถ้ำไม้ยางพารา (Para Rubber Wood Fly Ash, PRWFA) ของบริษัท ศรีสุภาพพาราฟู้ด จำกัด ตำบลคลองเต็ง อำเภอเมืองตรัง จังหวัดตรัง ดังแสดงในรูปที่ 2 มีค่าความถ่วงจำเพาะจากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188 เท่ากับ 2.74

4) ดินลูกรัง จากบ่อดินในพื้นที่ตำบลไม้ฝาด อำเภอสีเกา จังหวัดตรัง ดังแสดงในรูปที่ 3 นำมาผึ่งแดดให้แห้ง แล้วนำดินไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ โดยทดสอบหาค่าปริมาณความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D2216 [11] ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM D854 [12] ทดสอบหาขนาดคละของเม็ดดินโดยใช้ตะแกรงมาตรฐานตามมาตรฐาน ASTM D422 [13] และทดสอบหาค่าขีดจำกัดอัตราบีร์ก (Atterberg's Limits) ตามมาตรฐาน ASTM D4318 [14]



รูปที่ 3 บ่อดินลูกรัง

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของดินลูกรัง

สมบัติทางกายภาพ	ผลการทดสอบ
ค่าปริมาณความชื้น	3.15%
ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.70
Liquid Limit (LL)	26.32%
Plastic Limit (PL)	18.27%
Plastic Index (PI)	8.05
ร้อยละผ่านตะแกรงเบอร์ 4	74.70
ร้อยละผ่านตะแกรงเบอร์ 200	11.68

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของดินลูกรัง ดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาค่าความชื้นของดินลูกรังพบว่าผ่านตามการแบ่งคุณภาพชั้นดินโดยมาตรฐาน ASTM D3282 [15] ซึ่งกำหนดให้ดินลูกรังมีค่าปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 4 เมื่อจำแนกชนิดของดินพบว่าจัดอยู่ในชั้นคุณภาพ A-2-4 จะเป็นดินเม็ดหยาบตามระบบ AASHTO และ CL-ML (Silty Clay) ตามระบบ Unified Soil Classification System (USCS) โดยดินจะมีลักษณะเป็นดินตะกอนทรายอนินทรีย์ที่มีความเหนียวต่ำถึงปานกลาง ดินเหนียวปนกรวด ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนตะกอนทราย และดินล้วน สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงเป็นของเหลวได้ค่อนข้างสูง กล่าวคือหากมีการผสมน้ำในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ดินลูกรังชนิดนี้ไม่สามารถขึ้นรูปได้

5) ทรายหยาบ จากโรงงานผลิตอิฐบล็อกประสาน

6) น้ำประปา จากโรงงานผลิตอิฐบล็อกประสาน

2.2 ออกแบบอัตราส่วนผสม และการผลิตตัวอย่างอิฐบล็อกประสาน

งานวิจัยนี้ ในการออกแบบอัตราส่วนการผสมของอิฐบล็อกประสาน กำหนดอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมเท่ากับ 1: 7 โดยน้ำหนัก [16], [17] (ปูนซีเมนต์: ดินลูกรัง: ทรายหยาบ เท่ากับ 1: 5.25: 1.75) เติมทราย

หยาบตามสูตรของโรงงานผลิตอิฐบล็อกประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ซึ่งได้จากการทดลองอัดอิฐบล็อกประสานจริง แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งและเถ้าเถ้าอย่างพาราในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50 และ 75 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนผสมของอิฐบล็อกประสานทั้ง 7 สูตรต่อจำนวนการผลิต 25 ก้อน ดังแสดงในตารางที่ 2

การผลิตตัวอย่างอิฐบล็อกประสาน ใช้แบบหล่อขนาด 12.5 x 25.0 x 10.0 เซนติเมตร (กว้าง x ยาว x สูง) แบบตรง มีรูและเดือยเป็นแบบดอกกลมกลวง โดยเริ่มจากการตวงอัตราส่วนผสมตามตารางที่ 2 จากนั้นผสมปูนซีเมนต์กับฝุ่นหินเหลือทิ้งหรือเถ้าเถ้าอย่างพาราก่อน แล้วนำดินลูกรัง และทรายหยาบ มาผสมให้เข้ากันในเครื่องผสมแบบกระทะ แล้วค่อยๆ เติมน้ำลงในเครื่องผสม เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้วนำวัสดุส่วนผสมลงในเครื่องอัดขึ้นรูปอิฐบล็อกประสานแบบไฮดรอลิก ดังแสดงในรูปที่ 4 นำอิฐบล็อกประสานที่ได้ไปบ่มในที่ร่มเป็นเวลา 1 วัน เมื่อครบ 1 วัน ทำการหยอดมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์: ทรายเท่ากับ 1: 2.75 และ W/C เท่ากับ 0.75 ในช่องว่างของอิฐให้เต็มทุกรู แล้วทำการฉีดพรมน้ำเป็นละอองให้ชุ่มบริเวณด้านบนของอิฐบล็อกประสาน แล้วคลุมด้วยผ้าพลาสติกเพื่อไม่ให้ไอน้ำระเหยออก ทั้งไว้จนมีอายุครบตามระยะเวลาที่ต้องการทดสอบสมบัติต่าง

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของอิฐบล็อกประสาน

อัตราส่วน	อัตราส่วนผสม (กิโลกรัม)					
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ฝุ่นหินเหลือทิ้ง	เถ้าเถ้าอย่างพารา	ดินลูกรัง	ทรายหยาบ	น้ำ
Control	15.625	0	0	82	27.375	15
WSD25	11.725	3.900	0	82	27.375	15
WSD50	7.812	7.812	0	82	27.375	15
WSD75	3.900	11.725	0	82	27.375	15
PRWFA25	11.725	0	3.900	82	27.375	15
PRWFA50	7.812	0	7.812	82	27.375	15
PRWFA75	3.900	0	11.725	82	27.375	15



รูปที่ 4 การผลิตอิฐบล็อกประสาน

2.3 การทดสอบสมบัติ

ทดสอบสมบัติของฝุ่นหินเหลือทิ้งและเถ้าไม้
ยางพารา

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยวิธีการ
วาวแสง (X-ray fluorescence; XRF) แบบกึ่งปริมาณ
(semi-qualitative) รวมทั้งการสูญเสียน้ำหนัก
เนื่องจากการเผา (LOI)

ทดสอบสมบัติทางกายภาพ และทางกลของ
อิฐบล็อกประสาน

(ก) ลักษณะทั่วไปและมิติ ที่อายุการบ่ม 28 วัน
ตาม มผช. 602/2547 [18]

(ข) ความหนาแน่นแห้งและการดูดกลืนน้ำ
ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตาม ASTM C67 [19] โดยการ
นำก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานแช่จมน้ำเป็นเวลา
24 ชั่วโมง แล้วนำก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานเข้า
ตู้อบที่อุณหภูมิ 110-115 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักและวัดขนาดเพื่อหาความ
หนาแน่นแห้งและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน

(ค) ความต้านทานแรงอัด ที่อายุการบ่ม 7, 14
และ 28 วัน โดยนำก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานมา
ตัดเตี๋ยออก แล้วเคลือบผิวด้วยปูนพลาสติก ทิ้งไว้
2 ชั่วโมง จึงนำไปทดสอบตาม ASTM C170 [20]
ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การทดสอบความต้านทานแรงอัดของอิฐบล็อก

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นหินเหลือทิ้ง และเถ้าไม้ยางพารา

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในตารางที่ 3
พบว่า ฝุ่นหินเหลือทิ้งและเถ้าไม้ยางพาราไม่จัดเป็นวัสดุ
ปอซโซลาน Class N เนื่องจากผลรวมของซิลิกอน
ไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ

เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ต่ำกว่าร้อยละ 70 และมีค่า
LOI เกินร้อยละ 10 ตามมาตรฐาน ASTM C618 [21]
แต่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มากที่สุด ซึ่งถือ
ว่าเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะช่วย
ในการยึดประสานคล้ายกับปูนซีเมนต์ สำหรับค่า LOI
ของฝุ่นหินเหลือทิ้ง และเถ้าไม้ยางพารามีค่าเท่ากับ
ร้อยละ 38.88 และ 27.18 ตามลำดับ ซึ่งค่า LOI เป็น
ปัจจัยที่ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานแรงอัดที่ต่ำลงด้วย

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของ WSD และ PRWFA

Chemical compositions (%)	OPC [8]	WSD	PRWFA
CaO	64.89	34.65	32.71
SiO ₂	20.67	4.15	21.96
Al ₂ O ₃	3.06	3.40	2.14
Fe ₂ O ₃	6.21	0.97	1.46
MgO	0.82	15.96	4.32
K ₂ O	0.53	0.08	6.28
SO ₃	2.71	1.60	1.26
MnO	-	0.10	0.46
P ₂ O ₅	-	0.09	1.68
LOI	1.05	38.88	27.18

3.2 ลักษณะทั่วไปและมิติของอิฐบล็อกประสาน

จากการขึ้นรูปและบ่มอิฐบล็อกประสานทั้ง 7 อัตราส่วน ที่อายุการบ่ม 28 วัน ลักษณะทั่วไปจากการตรวจพินิจและมิติจากการวัดของอิฐบล็อกประสาน ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าอิฐบล็อกประสานทุกอัตราส่วนผสมมีมิติเป็นไปตาม มผช.602/2547 (ระบุคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 2 มิลลิเมตร) เมื่อพิจารณา ลักษณะทั่วไปของอิฐบล็อกประสานพบว่า เมื่อผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งและเถ้าเถ้าขี้เถ้าที่อัตราส่วนร้อยละ 75 ขอบและมุมของอิฐบล็อกประสานจะมีการบิ่นเล็กน้อย และแตกง่ายเมื่อมีการกระแทก เนื่องจากวัสดุประสานที่ทำหน้าที่ยึดเกาะมวลรวมมีปริมาณไม่เพียงพอ

ตารางที่ 4 ลักษณะและมิติโดยทั่วไปของอิฐบล็อกประสาน

อัตราส่วน	ลักษณะทั่วไป	มิติ
Control	ปกติ	-1.0 มม.
WSD25	ปกติ	-1.0 มม.
WSD50	ปกติ	-1.5 มม.
WSD75	มีรอยบิ่นเล็กน้อย	-1.8 มม.
PRWFA25	ปกติ	-1.3 มม.
PRWFA50	ปกติ	-1.8 มม.
PRWFA75	มีรอยบิ่นเล็กน้อย	-2.0 มม.

3.3 ความหนาแน่นแห้ง และการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน

ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าความหนาแน่นของอิฐบล็อกประสานควบคุมมีค่าเท่ากับ 1,903 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นของอิฐบล็อกประสานจะลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งและเถ้าเถ้าขี้เถ้า เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์มีค่าสูงกว่า โดยที่น้ำหนักเท่ากันปริมาตรของฝุ่นหินเหลือทิ้งและเถ้าเถ้าขี้เถ้าจะมากกว่าปริมาตรของปูนซีเมนต์ เพราะมีความหนาแน่นน้อยกว่าปูนซีเมนต์ เมื่ออัดขึ้นรูปอิฐบล็อกประสานจึงมีความหนาแน่นแห้งต่ำ โดยอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าเถ้าขี้เถ้าจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าอิฐบล็อกประสานผสมฝุ่นหินเหลือทิ้ง เพราะค่าความถ่วงจำเพาะของฝุ่นหินเหลือทิ้ง (2.71) มีค่าต่ำกว่าเถ้าเถ้าขี้เถ้า (2.74) ซึ่งหากนำอิฐบล็อกประสานผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งและเถ้าเถ้าขี้เถ้าไปใช้ในการก่อผนังอาคารจะทำให้น้ำหนักกระทำต่อโครงสร้างอาคารลดลงต่ำกว่าผนังก่อด้วยอิฐบล็อกประสานทั่วไป

ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานพบว่าค่าการดูดกลืนน้ำแปรผกผันตามสัดส่วนของค่าความหนาแน่นแห้ง โดยการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานแปรผันตามปริมาณส่วนผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งและเถ้าเถ้าขี้เถ้าที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของกิตติชาติและคณะ [22] ที่พบว่าลักษณะอนุภาคของเถ้าชีวมวลมีความพรุนเมื่อผสมในอิฐบล็อกประสานทำให้อิฐบล็อกประสานมีความพรุนเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้อิฐบล็อกประสานมีการดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้นด้วย และสอดคล้องกับงานวิจัยของธนพลและคณะ [23] ที่พบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดจาก CaO ที่มาจาก CaCO₃ (หยดเกลือเจือจางเกิดฟองฟู)

ในเถาไม้ยางพาราส่งผลให้การดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อ นำการดูดกลืนน้ำที่ได้มาเปรียบเทียบกับ มผช. 602/2547 พบว่าอิฐบล็อกประสานควบคุม อิฐบล็อก ประสานผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งร้อยละ 25, 75 และอิฐ บล็อกประสานผสมเถาไม้ยางพาราร้อยละ 25 ผ่าน เกณฑ์ แต่อิฐบล็อกประสานผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งร้อยละ 50 ผสมเถาไม้ยางพาราร้อยละ 50 และ 75 ไม่ผ่าน เกณฑ์มาตรฐานดังกล่าว (กำหนดการดูดกลืนน้ำไม่เกิน 208-288 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขึ้นกับความ หนาแน่นของอิฐบล็อกประสาน)

ตารางที่ 5 ค่าความหนาแน่นแห้งและค่าการดูดกลืน น้ำของอิฐบล็อกประสาน

อัตราส่วน	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	การดูดกลืนน้ำ (กก./ลบ.ม.)
Control	1,903	238
WSD25	1,825	250
WSD50	1,790	261
WSD75	1,754	270
PRWFA25	1,838	256
PRWFA50	1,822	266
PRWFA75	1,795	275

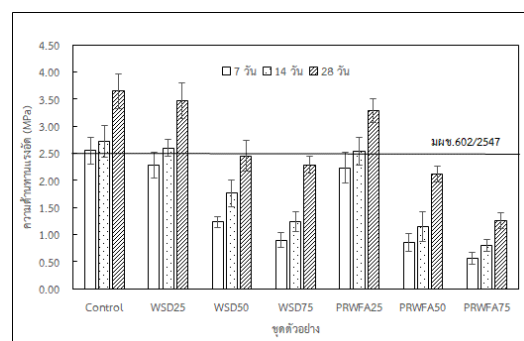
3.4 ความต้านทานแรงอัดของอิฐบล็อก ประสาน

จากผลการทดสอบความต้านทานแรงอัดของ อิฐบล็อกประสานที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่า ความต้านทานแรงอัดอิฐ บล็อกประสานควบคุมมีค่าสูงที่สุด ความต้านทาน แรงอัดของอิฐบล็อกประสานมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้น ของอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยเมื่อแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งส่งผลให้ความต้านทาน แรงอัดลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของชูเกียรติและ คณะ [3] ที่พบว่าค่า LOI ของฝุ่นหินเหลือทิ้งมีค่าสูงทำ ให้ความต้านทานแรงอัดต่ำลง และเมื่อแทนที่

ปูนซีเมนต์ด้วยเถาไม้ยางพาราก็ส่งผลให้ความต้านทาน แรงอัดลดลงเช่นกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของอาปีติน และคณะ [4] ที่พบว่าเถาไม้ยางพารามี SiO_2 และ Al_2O_3 น้อย ทำให้ลดการเกิดของปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่สร้างความแข็งแรงให้กับอิฐ

ตารางที่ 6 ค่าความต้านทานแรงอัดของอิฐบล็อก ประสาน

อัตราส่วน	ความต้านทานแรงอัด (เมกะพาสคาล)		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
Control	2.55	2.72	3.65
A-25	2.38	2.60	3.47
A-50	1.23	1.76	2.91
A-75	0.90	1.24	2.29
P-25	2.23	2.53	3.28
P-50	0.86	1.15	2.12
P-75	0.56	0.80	1.25



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัด และอายุการบ่มของอิฐบล็อกประสาน

จากรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานแรงอัดกับอายุการบ่มของอิฐบล็อก ประสาน พบว่าความต้านทานแรงอัดของอิฐบล็อก ประสานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่ เพิ่มขึ้น ซึ่งระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้น อย่างต่อเนื่อง เกิดเป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกต

ไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างแข็งแรงขึ้น [24] และเมื่อนำค่าความต้านทานแรงอัดของอิฐบล็อกประสานมาเปรียบเทียบกับ มผช. 602/2547 ชนิดไม่รับน้ำหนัก พบว่าอิฐบล็อกประสานควบคุมผ่านมาตรฐานทุกอายุการบ่ม อิฐบล็อกประสานผสมฝุ่นหินเหลือทิ้งและเถ้าเถ้าอย่างพาราร้อยละ 25 ผ่านมาตรฐานดังกล่าวที่อายุการบ่ม 14 และ 28 วัน (กำหนดไม่น้อยกว่า 2.50 เมกะพาสกาล)

4. สรุป

จากการศึกษาการพัฒนาอิฐบล็อกประสานจากฝุ่นหินเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตและเถ้าเถ้าอย่างพารา ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1: 7 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ใช้ฝุ่นหินเหลือทิ้งและเถ้าเถ้าอย่างพาราแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25, 50 และ 70 โดยน้ำหนัก ในครั้งนี้สรุปได้ว่า

1) การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งและเถ้าเถ้าอย่างพารา มีผลให้น้ำหนักต่อน้ำหนักของอิฐบล็อกประสานเบาลงโดยประมาณร้อยละ 4 และ 6 ตามลำดับ

2) การดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งและเถ้าเถ้าอย่างพารา

3) ความต้านทานแรงอัดของอิฐบล็อกประสานมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นหินเหลือทิ้งและเถ้าเถ้าอย่างพารา

4) อัตราส่วนการแทนที่ของฝุ่นหินเหลือทิ้งที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตอิฐบล็อกประสานตาม มผช. 602/2547 ชนิดไม่รับน้ำหนัก คือร้อยละ 25 โดยมีความต้านทานแรงอัดเท่ากับ 3.47 เมกะพาสกาล ความหนาแน่นแห้ง 1,825 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และการดูดกลืนน้ำ 250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน

5) อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าเถ้าอย่างพาราที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตอิฐบล็อกประสานตาม มผช. 602/2547 ชนิดไม่รับน้ำหนัก คือร้อยละ 25 โดยมีความต้านทานแรงอัดเท่ากับ 3.28 เมกะพาสกาล ความหนาแน่นแห้ง 1,838 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และการดูดกลืนน้ำ 256 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี โดยได้รับการสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ และห้องทดสอบ จากสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง และใคร่ขอบคุณนายปฏิพัทธ์ ชัยชนะ นายนภดล ยางซ้อ และนางสาวอรพรัตน์ รัตนพันธ์ ที่ช่วยเก็บข้อมูลงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR). (2021, January 8). What is interlocking block. [Online]. Available: <https://tistrinterlockingblock.com/863/>
- [2] Department of Industrial Works. (2021, May 8). Factory Information. [Online]. Available: <https://userdb.diw.go.th/results1.asp>
- [3] C. Choosakul, D. Chupan and K. Yongsata, "Mortar Mixed with Waste Stone Dust from Asphalt Concrete Mixing Plant," in *Proceeding of 9th Phayao Research Conference, Thailand, 2020*, pp. 2068-2079.

- [4] A. Dasaesamoh, H. Maha and H. Chebueraheng, "Properties of Interlocking Block from Para Rubber Wood Fly Ash Mixed Narathiwat Kolin," *J.Res. Unit Sci. Technol. Environ. Learning*, vol. 5, no. 2, pp. 202-208, 2014.
- [5] A. Dasaesamoh, P. Vaji, P. Salae and N. Naesae, "Para Rubber Wood Fly Ash Containing Interlocking Brick," *Journal of Yala Rajabhat University*, Vol. 10, No. 1, pp. 77-86, 2015
- [6] C. Watcharachin and P. Kamhangrittirong "Developing non-load bearing concrete block from Rubber Tree Ashes and Water Hyacinth Fiber," in *Proceeding of 3rd National RMUTR Conference*, Thailand, 2018, pp. 1-10.
- [7] T. Klathae, N. Sornpakdee, C. Buathongkhue and N. Deedard, "Utilization of Parawood Ash in Concrete Paving Blocks," *RMUTSV Research Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 36-48, 2020.
- [8] D. Tonnayopas and M. Thanomsirisilp, "Effects Used Engine Oil on Properties of Mortar Containing Pumice Blended Para Rubber Wood Ash," *RMUTP Research Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 53-63, 2018.
- [9] *Portland Cement Part 1 Specification*, TIS. 15 Part 1-2555, 2012.
- [10] *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*, ASTM C188, 2016.
- [11] *Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*, ASTM D2216, 1998.
- [12] *Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer Specific Gravity*, ASTM D854, 2014.
- [13] *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, ASTM D422, 1998.
- [14] *Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils*, ASTM D4318, 2010.
- [15] *Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*, ASTM D3282, 2015.
- [16] P. Khamput, "Interlocking Block Products from Tobacco Stem Waste," in *Proceeding of RSU National Conference 2019*, Thailand, 2019, pp. 231-240.
- [17] K. Amornfa and A. Sangwan, "Engineering Properties of Interlocking Blocks with Coatings," in *Proceeding of 3rd National RMUTR Conference*, Thailand, 2018, pp. 27-35.
- [18] *Thai Community Product Standard of Interlocking Blocks*, TCPS. 602-2547, 2004.
- [19] *Standard Test Method for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile*, ASTM C67, 2018.
- [20] *Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone*, ASTM C170, 2017.
- [21] *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM C618, 2015.
- [22] 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.
- [23] D. Tonnayopas, S. Chaisuriya and S. Chantaramanee, “Effect of Rubber Wood Fly Ash Addition on Properties of Lightweight Aggregate Produced from Clear Bottle Glass,” *Engineering Journal of Siam University*, vol. 15, no. 29, pp. 1-12, 2014.
- [24] P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, *Cement Pozzolan and Concrete*, 7th ed. Bangkok: Thai Concrete Association, 2013.

ผลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนต่อคุณภาพของเนื้อลำไย

ไผ่แดง ขวัญใจ* และ สุวลี พองอินทร์

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยพะเยา
19 หมู่ 2 ตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

รับบทความ 23 มีนาคม 2565 แก้ไขบทความ 20 ธันวาคม 2565 ตอรับบทความ 9 กุมภาพันธ์ 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 300 และ 450 วัตต์ เป็นเวลา 3.6 และ 9 นาที ตามลำดับ ตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 และ 8 ชั่วโมง ต่อคุณลักษณะทางกายภาพและเคมี รวมถึงคุณภาพทางประสาทสัมผัสของเนื้อลำไย พบว่าปริมาณความชื้นในเนื้อลำไยอบแห้งด้วยไมโครเวฟตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนลดลงได้รวดเร็วกว่าวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม (อบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง) เนื้อลำไยอบแห้งตัวอย่างควบคุม และเนื้อลำไยอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ เป็นเวลา 6 หรือ 9 นาที ตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 65 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานลำไยอบแห้ง ส่วนเนื้อลำไยผ่านการอบแห้งที่สภาวะอื่น ๆ จัดเป็นผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งแห้ง (IMF) การใช้กำลังไฟฟ้าไมโครเวฟที่ 450 วัตต์ ความแข็งของเนื้อลำไยสูงกว่าการใช้กำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์ และพบว่าการลดลงของค่าความสว่าง (L^*) หรือการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นสีแดง (a^*) และดัชนีการเกิดสีน้ำตาลในเนื้อลำไยอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ 450 วัตต์ เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ใช้เอนไซม์และไม่ใช้เอนไซม์หลังกระบวนการอบแห้ง นอกจากนี้ ผู้ทดสอบส่วนใหญ่พึงพอใจต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของเนื้อลำไยอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ 450 วัตต์ เป็นเวลา 9 นาที ที่ตามด้วยเวลาอบแห้งด้วยลมร้อนนาน 6 ชั่วโมง การอบแห้งด้วยกำลังไมโครเวฟ 450 วัตต์ (9 นาที) และตามด้วยอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง สามารถลดระยะเวลาอบแห้งลงได้ถึงร้อยละ 40 เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นาน 10 ชั่วโมง โดยที่ยังคงเป็นที่ยอมรับในการผลิตเนื้อลำไยผ่านการอบแห้ง

คำสำคัญ : ลำไย; ไมโครเวฟ; การอบแห้งด้วยลมร้อน; การยอมรับทางประสาทสัมผัส

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 9705 1849, อีเมล: paidaeng.kh@up.ac.th

Effect of Microwave Drying and then Hot-Air Drying on Quality of Longan Flesh

Paidaeng Khwanchai* and Suwalee Fong-In

Division of Food Science and Technology, School of Agriculture and Natural Resources,
University of Phayao

19 Moo 2 Tambon Maeka Amphur Muang Phayao 56000

Received 23 March 2022; Revised 20 December 2022; Accepted 9 February 2023

Abstract

The effect of microwave power at 300 and 450 W for 3, 6 and 9 min followed by hot air drying with temperature of 65 °C for 6 and 8 h on the physical and chemical properties as well as consumer acceptability of flesh longan was investigated. It was found that the moisture content in the dried longan flesh using microwave drying followed by hot air convective drying was faster than the hot air drying alone at 65 °C for 10 h. Longan flesh with hot air at 65 °C for 10 hours and longan flesh with microwave at 450 W for 6 or 9 min followed by hot air at 65 °C for 8 h were obtained the dried longan standard criteria, while other drying conditions of dried longan flesh products were in the range of intermediate moisture food (IMF). The hardness of longan flesh at 450 W was higher than that of dried longan flesh at 300 W. The loss of lightness (L^* parameter) or the increase of redness (a^* parameter) and browning index in dried longan flesh at 450 W could be associated with the increase of enzymatic and non-enzymatic browning reactions after drying process. Panelists were most satisfied with sensory qualities of the dried longan flesh using microwave power 450 W for 9 min followed by hot air drying for 6 h. It was indicated that drying at 450 W (for 9 min) and hot air drying for 6 h was acceptable for the production of dried longan flesh. Moreover, compared to the 65 °C hot air drying, microwave followed by hot air-drying process reduced drying time by 40%.

Keywords : Longan; Microwave; Hot air drying; Sensory acceptability

* Corresponding Author. Tel.: +668 9705 1849, E-mail Address: paidaeng.kh@up.ac.th

1. บทนำ

ลำไยจัดเป็นพืชในตระกูล Sapindaceae ปลูกแพร่หลายในประเทศไทย จีน พม่า เวียดนาม และฟิลิปปินส์ ลำไยเป็นที่นิยมบริโภคกันมากทั้งชาวไทยและชาวต่างประเทศ [1], [2] เป็นไม้ผลเศรษฐกิจของประเทศไทยที่เป็นสินค้าส่งออกของประเทศ ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร รายงานสถิติการส่งออกลำไยสดในปี พ.ศ.2564 มีมูลค่าถึง 23,133 ล้านบาท ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกรวมทั้งสิ้นประมาณ 1,581,590 ไร่ ให้ผลผลิตประมาณ 1,181,607 ตัน ความต้องการการใช้ลำไยของประเทศไทยแบ่งได้ 4 ลักษณะคือ การบริโภคสดภายในประเทศ ลำไยอบแห้ง ลำไยกระป๋อง และลำไยแช่แข็ง [3] การส่งออกผลิตภัณฑ์ลำไยปริมาณ 156,685 ตัน คิดเป็นมูลค่าถึง 7,417 ล้านบาท ของการส่งออกลำไยแปรรูปในปี 2564 ได้จากการส่งออกลำไยอบแห้ง [4] โดยตลาดส่งออกส่วนใหญ่ในแต่ละปีส่งออกไปยังประเทศในแถบเอเชีย เช่น จีน (รวมถึงฮ่องกง) พื้นที่เพาะปลูกหลักสำหรับลำไย (มากกว่าร้อยละ 90 ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด) อยู่ในเขตภาคเหนือของประเทศไทย เช่น จังหวัดเชียงใหม่และลำพูน พันธุ์ที่นิยมปลูกกันอย่างแพร่หลายคือ พันธุ์ดอ เพราะมีปริมาณผลผลิตที่สูงและมีฤดูการเก็บเกี่ยวยาว โดยเริ่มต้นเก็บเกี่ยวในต้นเดือนมิถุนายนและสิ้นสุดในเดือนสิงหาคม รองลงมาคือพันธุ์สีชมพู พันธุ์เปี้ยวเขียว และพันธุ์แก้ว [4] ปัญหาลำไยสดล้นตลาดเกือบทุกปีส่งผลให้มีราคาต่ำและลำไยสดมีอายุการเก็บรักษาสั้นและเน่าเสียได้ง่าย การอบแห้งจึงเป็นมาตรการหนึ่งที่ช่วยแก้ปัญหาลำไยสดล้นตลาด ปัจจุบันการผลิตและส่งออกลำไยอบแห้งได้ขยายตัวอย่างต่อเนื่องและกลายมาเป็นตลาดรองรับที่สำคัญสำหรับเกษตรกรผู้ปลูกลำไย สามารถช่วยเพิ่มมูลค่าของลำไยและสามารถเก็บไว้บริโภคคนนอกฤดูได้ กรรมวิธีการอบแห้งลำไยโดยทั่วไปมี 2 แบบคือ แบบแกะเปลือกอบเนื้อ และแบบอบทั้งเปลือก การอบแห้งลำไยที่อบเฉพาะเนื้อให้

คุณลักษณะที่ดีกว่าแบบที่อบทั้งเปลือก ทั้งทางด้านสี กลิ่น รูปร่าง ความสะอาด ความน่ารับประทาน สามารถรับประทานได้ทันที ประหยัดค่าใช้จ่ายในการอบแห้งและการขนส่ง เพราะใช้ระยะเวลาในการอบน้อยกว่า ได้น้ำหนักเนื้อมากกว่า [5]

การอบแห้งเนื้อลำไยด้วยลมร้อนโดยทั่วไปใช้เวลาค่อนข้างนานเนื่องจากใช้อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำเพื่อรักษาคุณภาพด้านสี กลิ่น และรูปร่าง ให้เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งจะอยู่ระหว่าง 60-70 องศาเซลเซียส [5] ในอดีตที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันมีงานวิจัยต่าง ๆ ที่ศึกษากรรมวิธีการอบแห้งลำไยด้วยเทคนิคอื่น ๆ ร่วมกับการใช้ลมร้อนเพื่อลดระยะเวลาในการอบแห้งลง และยังเป็นการช่วยลดความสิ้นเปลืองพลังงานในระหว่างกระบวนการอบแห้งลง สำหรับเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการอบแห้งลำไยร่วมกับลมร้อน ได้แก่ กระบวนการอบแห้งลำไยโดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน [6], [7] การอบแห้งลำไยด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วงแรกและตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อน [8] กระบวนการอบแห้งลำไยด้วยไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อน [9]-[11] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเหล่านี้ได้มุ่งเน้นศึกษาการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งลำไย โดยพัฒนาแบบจำลองให้สามารถทำนายการลดลงของความชื้น อุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งที่ออกจากเครื่องอบแห้ง และสมรรถนะการอบแห้ง แต่ยังขาดงานวิจัยที่ศึกษาผลของการใช้ไมโครเวฟอบแห้งก่อนตามด้วยลมร้อนต่อคุณภาพของเนื้อลำไย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาผลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่ลำไย ตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนต่อคุณภาพของเนื้อลำไย โดยทำการตรวจสอบคุณลักษณะทางเคมีกายภาพ ได้แก่ ความชื้น สี และเนื้อสัมผัส รวมถึงการทดสอบทางประสาทสัมผัส

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ลำไยสดพันธุ์ดอ (*Dimocarpus longan* Lour) ซึ่งได้จากสวนลำไยในอำเภอมะนัง จังหวัดยะลา เก็บเกี่ยวในช่วงเดือนมิถุนายนถึงสิงหาคม พ.ศ. 2564 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.0 ± 1 มิลลิเมตร นำมาแกะเปลือกแล้วควั่นเมล็ดออกเหลือแต่เนื้อ ล้างน้ำให้สะอาด เทน้ำออกโดยใช้ตะแกรง ทิ้งไว้เป็นเวลา 2-3 นาที

2.2 การศึกษาผลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนต่อคุณภาพของเนื้อลำไย

นำเนื้อลำไยซึ่งน้ำหนักก่อนการอบแห้งปริมาณรวมรอบละ 450 กรัม โดยแบ่งใส่จาน จำนวน 9 จาน จานละประมาณ 50 กรัม นำเนื้อลำไยไปให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟ (รุ่น NE-1353 ยี่ห้อ Panasonic ประเทศญี่ปุ่น) ใช้กำลังไฟฟ้า 2 ระดับ ได้แก่ 300 และ 450 วัตต์ และระยะเวลา 3 ระดับ ได้แก่ 3, 6 และ 9 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำลำไยที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมาอบแห้งต่อด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดใช้ไฟฟ้าเป็นเชื้อเพลิง (รุ่น UFE500 ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมนี) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.5 เมตร/วินาทีเป็นเวลา 6 และ 8 ชั่วโมง นำลำไยที่ผ่านการอบแห้งไปวิเคราะห์คุณภาพและคุณลักษณะต่างๆ เปรียบเทียบกับตัวอย่างลำไยอบแห้งชุดควบคุม (Control) ที่เตรียมโดยอบแห้งเนื้อลำไยที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยตู้อบลมร้อนไฟฟ้าเครื่องเดียวกัน ซึ่งดัดแปลงสถานะอบแห้งจากการศึกษาของ Somjai et al. [5] ทุกสถานะทำการทดลองอบแห้ง จำนวน 3 ซ้ำ

2.3 การวิเคราะห์คุณภาพเนื้อลำไย

2.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

วิเคราะห์ปริมาณความชื้นของเนื้อลำไยผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งเป็นตัวอย่างควบคุม และเนื้อลำไย

ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟตามด้วยลมร้อนที่สภาวะต่าง ๆ ตามวิธีการของ AOAC [12] และรายงานเป็นความชื้นมาตรฐานเปียก

2.3.2 การวิเคราะห์ห่อหุ้มเนื้อลำไย

ห่อหุ้มเนื้อลำไยของเนื้อลำไยโดยใช้เครื่อง Water Activity Meter (รุ่น Series 4 TE ยี่ห้อ AQUA LAB ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยนำตัวอย่างเนื้อลำไยบดละเอียด ประมาณ 2.5 กรัม นำมาวัดค่า a_w แต่ละการวิเคราะห์ทำการวัดทั้งหมดจำนวน 3 ซ้ำ

2.3.3 การวิเคราะห์ค่าสี

วัดค่าสีของเนื้อลำไยผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab รุ่น ColorQuest XE ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยค่า L^* คือค่าความสว่างของสี ซึ่งมีค่า 0 – 100 โดยที่ 0 แสดงถึง สีดำ และ 100 แสดงถึงสีขาว ค่า a^* แสดงถึง สีแดง-สีเขียว ค่า b^* แสดงถึง สีเหลือง – น้ำเงิน จากนั้นนำมาคำนวณหาดัชนีการเกิดสีน้ำตาล (Browning Index; BI) ดังสมการ $BI = [100 (x - 0.31)] / 0.17$ เมื่อ $x = (a^* + 1.75L^*) / (5.645L^* + a^* - 0.3012b^*)$ ตามวิธีการของ Kasim and Kasim [13]

2.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสหลังการอบแห้งเนื้อลำไย ได้แก่ ความแข็งและความยืดหยุ่น นำมาทดสอบโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA.XT.plus (Stable Microsystems Texture Technologies Inc., UK) ค่าความถูกต้อง 0.001 N ทำการทดสอบในลักษณะของแรงกด หัวกดเป็นเหล็กสแตนเลสทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm ความเร็วของหัวกด 30 mm/s และความเร็วยกกลับ 20 mm/s โดยทำการกดจนทะลุเนื้อลำไย บันทึกค่าแรงกดและการเปลี่ยนรูปด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Texture Exponent 32 อัตราการบันทึก 400 จุดต่อวินาที ค่าความแข็งหาได้จากค่าแรง

สูงสุดที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ ส่วนค่าความยืดหยุ่นหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเปลี่ยนรูป (Deformation) กับค่าแรงสูงสุด (Peak Force) ที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ

2.3.5 การทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส

ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีให้คะแนนความชอบแบบ 9 - Point Hedonic Scale โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน ประเมินความชอบต่อลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวม ที่มีต่อเนื้อลำไย โดยให้ผู้ทดสอบชิมแต่ละคนบันทึกระดับของความชอบของตัวเองอย่างเป็นคะแนนความชอบ 9 ระดับคือ ระดับที่ 9 ชอบมากที่สุด 8 ชอบมาก 7 ชอบปานกลาง 6 ชอบเล็กน้อย 5 รู้สึกเฉยๆ 4 ไม่ชอบเล็กน้อย 3 ไม่ชอบปานกลาง 2 ไม่ชอบมาก และ 1 ไม่ชอบมากที่สุด ตามลำดับ

2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีกายภาพ โดยวิเคราะห์คุณภาพด้านต่างๆ ของตัวอย่างทั้งหมด 3 ซ้ำ ส่วนการทดสอบทางประสาทสัมผัส วางแผนการทดลองแบบ Randomized Completed Block Design (RCBD) วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนด้วยวิธี ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญร้อยละ 95 จากนั้นเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) และ Paired t-test โดยใช้โปรแกรม SPSS รุ่นที่ 27.0

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนต่อปริมาณความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีของเนื้อลำไย

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของเนื้อลำไยผ่านการอบแห้ง พบว่าปริมาณความชื้นในแต่ละสภาวะการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ โดยปริมาณความชื้นของลำไยอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 15.22 ± 0.87 ถึง ร้อยละ 39.64 ± 0.65 (ตารางที่ 1) มาตรฐานลำไยอบแห้งโดยทั่วไปกำหนดปริมาณความชื้นของเนื้อลำไยอบแห้งไว้ไม่เกินร้อยละ 18 และวอเตอร์แอกติวิตีต้องไม่เกิน 0.6 [14] จากผลการทดลองพบว่า สภาวะอบแห้งที่ปริมาณความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด ได้แก่ 1) ตัวอย่างควบคุมที่อบแห้งด้วยลมร้อนนาน 10 ชั่วโมง 2) กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ นาน 6 นาที ตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนนาน 8 ชั่วโมง และ 3) กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ นาน 9 นาที ตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนนาน 8 ชั่วโมง วอเตอร์แอกติวิตีของเนื้อลำไยผ่านการอบแห้งสัมพันธ์กับความชื้นโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.581 ± 0.016 ถึง 0.870 ± 0.014 ปริมาณความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีของเนื้อลำไยผ่านการอบแห้งสอดคล้องกับ Somjai et al. [8] ที่มีค่าร้อยละ 16.42 และ 0.627 ตามลำดับ ขณะที่เนื้อลำไยสดมีปริมาณความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีประมาณร้อยละ 80 และ 0.940 ตามลำดับ [15]

การใช้สภาวะการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ นาน 9 นาที ตามด้วยอบแห้งด้วยลมร้อน 6 ชั่วโมง ให้ผลในการช่วยลดระยะเวลาอบแห้งได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะอื่น ๆ (ตารางที่ 1) ลำไยที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟตามด้วยอบแห้งด้วยลมร้อนทำให้เกิดการระเหยน้ำได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อลำไย ทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการสั่นสะเทือนและโมเลกุลเกิดการชนกันเกิดเป็นพลังงานจลน์แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในที่สุด ส่งผลให้ความชื้นในเนื้อลำไยระเหยออกมาอย่างรวดเร็ว [9] ดังนั้น การใช้ไมโครเวฟ

อบแห้งลำไยจึงช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้มากถึงร้อยละ 40 โดยที่ผลิตภัณฑ์ลำไยผ่านการอบแห้งไม่สูญเสียลักษณะที่ดีของเนื้อลำไย

สำหรับเนื้อลำไยผ่านการอบแห้งที่ไม่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานลำไยอบแห้ง [14] กล่าวคือปริมาณความชื้นของเนื้อลำไยอบแห้งเกินร้อยละ 18 และวอเตอร์แอคทิวิตีเกิน 0.6 Taoukis and Richardson [16] รายงานว่าผลิตภัณฑ์ผลไม้อบแห้งที่มีปริมาณความชื้นร้อยละ 15-40 และวอเตอร์แอคทิวิตีระหว่าง 0.6-0.8 นิยามว่าเป็นผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งแห้ง (Intermediate Moisture Food; IMF) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้เทคนิคทำให้แห้งบางส่วนสำหรับผลไม้ที่

มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบอยู่มาก (ลูกเกด ลูกพรุน มะเดื่อ แอปริคอต พิช อินทผลัม และแอปเปิล) โดยที่วัตถุดิบมีความชื้นตามธรรมชาติ และสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ดังกล่าวไว้ที่อุณหภูมิห้องได้ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเนื้อลำไยอบแห้งในทุกสภาวะในการศึกษานี้จัดเป็นผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งแห้ง (เนื้อลำไยที่จัดเป็น IMF) ยกเว้น เนื้อลำไยอบแห้งชุดตัวอย่างควบคุม เนื้อลำไยอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ เป็นเวลา 6 หรือ 9 นาที ตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 65 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง ที่จัดว่าเป็นผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง เนื่องจากอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานเนื้อลำไยอบแห้ง [14]

ตารางที่ 1 ปริมาณความชื้นและวอเตอร์แอคทิวิตีของเนื้อลำไยอบแห้งที่สภาวะการใช้กำลังไมโครเวฟตามด้วยลมร้อนแตกต่างกัน

กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลาในการให้ความร้อนด้วย MW (นาที)	เวลาในการให้ความร้อนด้วยลมร้อน (ชั่วโมง)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	วอเตอร์แอคทิวิตี; a_w
300	Control	10	15.43±0.38 ^f	0.589±0.003 ^s
	3	6	39.64±0.65 ^a	0.870±0.014 ^a
	6	6	38.47±0.50 ^a	0.867±0.018 ^a
	9	6	32.28±0.55 ^b	0.858±0.005 ^a
300	3	8	20.57±0.44 ^{def}	0.785±0.021 ^c
	6	8	21.36±0.79 ^{de}	0.796±0.014 ^c
	9	8	17.52±0.69 ^{def}	0.692±0.020 ^e
	3	6	27.25±0.82 ^{bc}	0.843±0.004 ^b
450	3	6	22.57±0.34 ^{cd}	0.822±0.007 ^b
	6	6	18.16±0.42 ^{def}	0.722±0.008 ^d
	3	8	16.73±0.78 ^{ef}	0.634±0.006 ^f
	6	8	15.58±0.56 ^{ef}	0.595±0.009 ^s
450	3	8	15.22±0.87 ^f	0.581±0.016 ^s
	6	8		
	9	8		

หมายเหตุ: MW หมายถึงไมโครเวฟ; เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งในแต่ละสภาวะการทดลอง ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

3.2 ผลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนต่อค่าสีของเนื้อลำไย

สีเป็นลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์อาหารที่ส่งผลกระทบต่อกรยอมรับของผู้บริโภค ค่าสีของเนื้อลำไยอบแห้งจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสีด้วยระบบ CIELAB ซึ่งแสดงด้วยค่า L^* , a^* และ b^* พบว่าค่าสีในแต่ละสถานะที่ใช้อบแห้งมีความแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) และมีความแตกต่างกันกับตัวอย่างควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเนื้อลำไยอบแห้งด้วยไมโครเวฟตามด้วยลมร้อนที่

300 วัตต์ 3 6 และ 9 นาที และลมร้อนเป็นเวลา 6 และ 8 ชั่วโมง ให้ค่าสีแดง (a^*) ที่ต่ำกว่า แต่มีค่าความสว่าง (L^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ส่วนเนื้อลำไยอบแห้งด้วยไมโครเวฟตามด้วยลมร้อนที่ 450 วัตต์ 3 6 และ 9 นาที และลมร้อนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ให้ค่าสีแดง (a^*) ที่ต่ำกว่า แต่มีค่าความสว่าง (L^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ที่สูงกว่า นอกจากนี้ ค่าความสว่างของสี (L^*) สำหรับเนื้อลำไยอบแห้งด้วยไมโครเวฟตามด้วยลมร้อนมีความสว่างที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 ค่าสีของเนื้อลำไยอบแห้งที่สภาวะการใช้กำลังไมโครเวฟตามด้วยลมร้อนแตกต่างกัน

กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลาในการให้ความร้อนด้วย MW (นาที)	เวลาในการให้ความร้อนด้วยลมร้อน (ชั่วโมง)	ค่าสี			ดัชนีการเกิดสีน้ำตาล
			L^*	a^*	b^*	
	Control	10	35.26±1.05 ^c	8.93±0.42 ^{ab}	16.88±0.28 ^{bc}	22.18±0.96 ^a
300	3	6	47.55±1.36 ^a	4.80±0.56 ^e	20.04±0.32 ^c	11.28±0.82 ^d
	6	6	46.21±1.43 ^a	4.00±0.28 ^e	18.73±0.43 ^{ab}	10.12±1.18 ^d
	9	6	39.15±1.14 ^b	4.38±0.36 ^e	15.64±0.36 ^{cd}	11.82±0.72 ^d
300	3	8	39.20±0.87 ^b	7.84±0.18 ^{bcd}	20.05±0.19 ^a	18.98±0.88 ^b
	6	8	39.66±1.68 ^b	8.31±0.64 ^{bc}	20.28±0.22 ^a	19.62±1.06 ^b
	9	8	37.17±1.87 ^{bc}	7.86±0.42 ^{bcd}	17.29±0.26 ^{bc}	19.23±1.15 ^b
450	3	6	39.52±1.56 ^b	7.14±0.27 ^{cd}	20.21±0.48 ^a	17.68±0.94 ^c
	6	6	39.44±0.76 ^b	6.63±0.16 ^d	20.95±0.34 ^a	17.04±1.02 ^c
	9	6	39.08±0.98 ^b	7.58±0.46 ^{bcd}	20.07±0.21 ^a	18.60±1.14 ^b
450	3	8	36.85±1.29 ^{bc}	9.00±0.34 ^{ab}	12.34±0.18 ^e	20.07±1.08 ^{ab}
	6	8	34.72±1.12 ^c	8.71±0.52 ^{ab}	14.41±0.24 ^{de}	21.27±0.86 ^a
	9	8	34.36±1.73 ^c	9.03±0.42 ^{ab}	15.24±0.33 ^{cd}	22.40±1.22 ^a

หมายเหตุ: MW หมายถึงไมโครเวฟ; เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งในแต่ละสภาวะการทดลอง ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลของเนื้อลำไยผ่านการอบแห้งมีค่าอยู่ระหว่าง 10.12±1.18 ถึง 22.40±1.22 เนื้อลำไยอบด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ 3 6 และ 9 นาที ตามด้วยอบแห้งด้วยลมร้อนนาน 8 ชั่วโมง มีค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อเทียบกับเนื้อ

ลำไยอบแห้งด้วยลมร้อนนาน 10 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการอบแห้งด้วยลมร้อน พบว่าการใช้เวลาในการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นเวลานาน (8 ชั่วโมง และตัวอย่างควบคุม) ให้ค่าสี a^* ที่สูงกว่าการใช้เวลาในการอบแห้งด้วยลมร้อนที่สั้นกว่า (6 ชั่วโมง) ดังแสดงในตารางที่ 2 แสดงว่าผลิตภัณฑ์ลำไยผ่านการอบแห้งมีความเป็นสี

แดงเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าในกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นเวลานานอาจเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Enzymatic Browning Reaction) และที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Maillard Reaction) และปฏิกิริยาการเกิดคาราเมล (Caramelization Reaction) จึงทำให้สีของผลิตภัณฑ์เข้มข้น [8], [17]-[20] นอกจากนี้ ความสว่างของเนื้อลำไยผ่านการอบแห้งมีค่าลดลงซึ่งเกิดจากผลของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ในขณะเดียวกันช่วยให้เกิดความเป็นสีแดงและสีเหลืองเพิ่มขึ้น ค่าความสว่างที่ลดลงสัมพันธ์กับค่าดัชนีการเกิดสีน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ [21], [22]

สีน้ำตาลที่เกิดขึ้นของเนื้อลำไยในระหว่างกระบวนการอบแห้งทำให้ได้เนื้อลำไยมีสีเหลืองทอง คุณลักษณะดังกล่าวนี้เป็นที่นิยมของผู้บริโภคในประเทศไทยโดยทั่วไป [5], [19], [23] ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ ได้แก่ สารตั้งต้น (Substrate) คือสารประกอบฟีนอล (Phenolic Compounds) เอนไซม์ในกลุ่มฟีนอกเลส (Phenolase) เช่น polyphenol oxidase (PPO) และออกซิเจน ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาการเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลที่ไม่ใช่เอนไซม์ ได้แก่ อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส แรงการเกิดปฏิกิริยา pH (ระหว่าง 6-10) วอเตอร์แอคทิวิตี (a_w 0.3-0.7) และอัตราส่วนความเข้มข้นของกรดแอมิโนต่อน้ำตาล [21], [22] นอกจากนี้การที่มีน้ำตาลรีดิวซ์มากกว่าปริมาณกรดแอมิโนช่วยให้เกิดสีน้ำตาลในระบบอาหารได้มากขึ้น ดังนั้น จึงทำให้เนื้อลำไยผ่านการอบแห้งมีสีคล้ำลง และเกิดสีแดงมากขึ้น [24] นอกจากนี้ ค่าความเป็นสีเหลือง b^* ที่มากกว่าของเนื้อลำไยผ่านการอบแห้งร่วมกับการใช้ไมโครเวฟบ่มอบถึงเนื้อลำไยที่มีคุณภาพดีเนื่องด้วยคุณลักษณะที่มีสีเหลืองทอง [25] ในการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าความเป็นสีเหลือง b^* ที่มากกว่าพบในสภาวะของอบแห้งที่ได้รับเนื้อลำไยที่จัดเป็นผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งแห้ง (IMF)

3.3 ผลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนต่อคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อลำไย

เนื้อสัมผัสของเนื้อลำไยอบแห้งในการทดลองนี้มีการตรวจสอบ 2 ค่า ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.18 ± 0.03 ถึง 1.75 ± 0.03 กิโลกรัมแรง และความยืดหยุ่น (Toughness) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.10 ± 0.00 ถึง 0.49 ± 0.05 กิโลกรัมแรง.มิลลิเมตร ความแข็งและความยืดหยุ่นของเนื้อลำไยอบแห้งแต่ละสภาวะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยขึ้นอยู่กับสภาวะอบแห้งที่ใช้ (ตารางที่ 3)

การใช้ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ ที่เวลาต่าง ๆ ตามด้วยอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ได้รับค่าความแข็งและความยืดหยุ่นที่สูงกว่าที่สภาวะอื่น ๆ (ตารางที่ 3) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการใช้ระยะเวลาในการอบแห้งด้วยลมร้อนที่นานกว่า ประกอบกับการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟสูงกว่า ทำให้น้ำอิสระในเนื้อลำไยเปลี่ยนเป็นไอน้ำระเหยออกมาจากเนื้อลำไยอย่างรวดเร็ว จึงเหลือน้ำอิสระในเนื้อลำไยแห้งน้อยลง และเนื้อลำไยจะหดตัว (Shrinkage) ลงอย่างรวดเร็ว [11], [20] ทำให้ผลิตภัณฑ์เนื้อลำไยอบแห้งที่สภาวะดังกล่าวมีความแข็งแรงมากกว่า ผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Somjai et al. [8] ในการอบแห้งลำไยด้วยลมร้อน อย่างไรก็ตาม เมื่ออบแห้งเนื้อลำไยด้วยไมโครเวฟตามด้วยลมร้อนช่วยให้ผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัวลดลง อันเป็นผลมาจากการใช้ไมโครเวฟช่วยในการอบแห้งในเบื้องต้นทำให้โครงสร้างพองขยายตัวและเมื่ออบแห้งด้วยลมร้อนทำให้โครงสร้างหดตัว สำหรับค่าความแข็งของเนื้อลำไยที่อบด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวในตัวอย่างควบคุม รวมถึงอบแห้งที่กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ แล้วตามด้วยอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีความแข็งแรงมากกว่าสภาวะอื่น ๆ อาจเป็นผลมาจากการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยลมร้อนเป็นระยะเวลานานกว่านั่นเอง ทำให้โครงสร้างยุบตัว

ส่งผลให้น้ำสัมผัสแข็งและเหนียวมากกว่า ส่วนการรอบอบแห้งที่กําลังไฟฟ้า 300 วัตต์ แล้วตามด้วยอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นเวลา 8 ถึงแม้จะใช้เวลาในการอบแห้งด้วยลม

ร้อนเป็นเวลานานเช่นกัน แต่การใช้กําลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่าส่งผลให้น้ำสัมผัสมีความแข็งต่ำกว่านั่นเอง

ตารางที่ 3 เนื้อสัมผัสของเนื้อลำไยอบแห้งที่สภาวะการใช้กําลังไมโครเวฟตามด้วยลมร้อนแตกต่างกัน

กําลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลาในการให้ความร้อนด้วย MW (นาท)	เวลาในการให้ความร้อนด้วยลมร้อน (ชั่วโมง)	ความแข็ง (กิโลกรัมแรง)	ความยืดหยุ่น (กิโลกรัมแรง. มิลลิเมตร)
Control		10	1.45±0.08 ^b	0.39±0.04 ^b
300	3	6	0.18±0.03 ^d	0.10±0.00 ^f
	6	6	0.21±0.04 ^d	0.11±0.00 ^{ef}
	9	6	0.29±0.07 ^d	0.12±0.01 ^f
300	3	8	0.54±0.05 ^c	0.17±0.01 ^{def}
	6	8	0.58±0.02 ^c	0.20±0.03 ^{de}
	9	8	0.68±0.04 ^c	0.22±0.03 ^d
450	3	6	0.23±0.04 ^d	0.16±0.01 ^{def}
	6	6	0.26±0.02 ^d	0.12±0.02 ^{def}
	9	6	0.70±0.07 ^c	0.30±0.06 ^c
450	3	8	1.28±0.06 ^b	0.40±0.07 ^b
	6	8	1.65±0.04 ^a	0.41±0.08 ^{ab}
	9	8	1.75±0.03 ^a	0.49±0.05 ^a

หมายเหตุ: MW หมายถึงไมโครเวฟ; เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งในแต่ละสภาวะการทดลอง ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดง ความแตกต่างทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

3.4 ผลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟตามด้วยการอบแห้งลมร้อนต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของเนื้อลำไย

สภาวะในการอบแห้งที่เลือกมาทำการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสคือ อบแห้งด้วยไมโครเวฟที่กําลังไฟฟ้า 450 วัตต์ เป็นเวลา 9 นาที ตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง (เนื้อลำไยที่จัดเป็น IMF) และอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่กําลังไฟฟ้า 450 วัตต์ เป็นเวลา 6 นาที ตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็น

เวลา 8 ชั่วโมง (เนื้อลำไยอบแห้ง) เปรียบเทียบกับลำไยอบแห้งด้วยลมร้อนนาน 10 ชั่วโมง (ตัวอย่างชุดควบคุม) เมื่อนำผลิตภัณฑ์ผ่านการอบแห้งทั้งสามสภาวะมาทดสอบทางประสาทสัมผัสในด้าน ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบชิมทั้งหมด 30 คน ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่าเนื้อลำไยที่จัดเป็น IMF และเนื้อลำไยอบแห้งตัวอย่างชุดควบคุมได้รับคะแนนในทุกๆ ด้านไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีระดับความชอบส่วนใหญ่จากผู้ทดสอบชิมอยู่ที่

ระดับ 6 ถึง 7 ซึ่งมีความชอบเล็กน้อย และชอบปานกลางตามลำดับ ในขณะที่เนื้อลำไยอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ เป็นเวลา 6 นาที ตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ได้รับคะแนนในด้านลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวมต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของเนื้อลำไยอบแห้งที่สภาวะการใช้กำลังไมโครเวฟตามด้วยลมร้อนแตกต่างกัน

กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลาในการให้ความร้อนด้วย MW (นาที)	เวลาในการให้ความร้อนด้วยลมร้อน (ชั่วโมง)	ลักษณะปรากฏ	สี ^{ns}	กลิ่น ^{ns}	รสชาติ ^{ns}	เนื้อสัมผัส	การยอมรับโดยรวม
Control		10	6.68±0.52 ^a	6.80±0.44	6.96±0.49	6.68±0.45	6.70±0.36 ^a	6.94±0.43 ^a
450	9	6	6.74±0.39 ^a	7.10±0.50	7.12±0.55	6.87±0.42	6.93±0.38 ^a	7.20±0.39 ^a
450	6	8	6.57±0.39 ^b	6.60±0.50	6.82±0.55	6.57±0.42	6.23±0.38 ^b	6.30±0.39 ^b

หมายเหตุ: MW หมายถึงไมโครเวฟ; ^{ns} สิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ในการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสสำหรับการใช้ไมโครเวฟตามด้วยอบแห้งด้วยลมร้อนในการอบแห้งเนื้อลำไย เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ร่วมกับคุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์เนื้อลำไย พบว่าสภาวะการอบแห้งด้วยไมโครเวฟตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ดีที่สุด ได้แก่สภาวะที่ใช้ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ เป็นเวลา 9 นาที ตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด (6 ชั่วโมง) และได้ผลิตภัณฑ์เนื้อลำไยอบแห้งที่มีสีเหลืองทอง มีความแข็งน้อย มีความชื้นที่จัดเป็นผลิตภัณฑ์ IMF ซึ่งสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้ และได้รับการยอมรับจากผู้ทดสอบชิมในเกณฑ์ที่ชอบปานกลาง (ตารางที่ 4)

4. สรุป

ในการศึกษาการอบแห้งเนื้อลำไยโดยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟก่อนนำไปอบแห้งด้วยลมร้อนต่อ คุณลักษณะทางเคมีกายภาพและคุณภาพของเนื้อลำไย โดยศึกษาการใช้ไมโครเวฟที่กำลังไฟ 2 ระดับ คือ 300

และ 450 วัตต์ ด้วยระยะเวลาในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่ 3 ระดับ คือ 3 6 และ 9 นาที แล้วนำไปอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลานาน 6 และ 8 ชั่วโมง โดยนำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่มีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิเดียวกันเป็นเวลานาน 10 ชั่วโมง พบว่าที่กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์ เป็นเวลา 9 นาที แล้วนำมาอบด้วยลมร้อนที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ลำไยอบแห้งที่ได้มีความชื้นและวอเตอร์แอคติวิตีที่จัดเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร IMF และให้คุณลักษณะทางกายภาพของเนื้อลำไยที่ดี และยังเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค นอกจากนี้ยังช่วยลดระยะเวลาอบแห้งลงได้ถึงร้อยละ 40 เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การอาหาร คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ รวมถึงเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Gan, C. Feng, H. Lan, R. Yang, J. Zhang, C. Li and W. Li, “ Comparison of the structure and immunomodulatory activity of polysaccharides from fresh and dried longan,” *Journal of Functional Foods*, vol. 76, p. 104323, 2021.
- [2] C. Somjai, T. Siriwoharn, K. Kulprachakarn, S. Chaipoot, R. Phongphisutthinant and P. Wiriacharee, “ Utilization of Maillard reaction in moist- dry- heating system to enhance physicochemical and antioxidative properties of dried whole longan fruit,” *Heliyon*, vol. 7, p. E07094, 2021.
- [3] K. Rakariyatham, D. Zhou, N. Rakariyatham and F. Shahidi, “Sapindaceae (*Dimocarpus longan* and *Nephelium lappaceum*) seed and peel by-products: Potential sources for phenolic compounds and use as functional ingredients in food and health applications,” *Journal of Functional Foods*, vol. 67, p. 103846, 2020.
- [4] Office of Agricultural Economics. (2022, Nov. 30). Longan and products export statistics 2019- 2021. [Online]. Available: http://impexp.oae.go.th/service/export.php?S_YEAR=2562&E_YEAR=2563&PRODUCT_GROUP=5252&PRODUCT_ID=4990&wf_search=&WF_SEARCH=Y
- [5] C. Somjai, T. Siriwoharn, K. Kulprachakarn, S. Chaipoot, R. Phongphisutthinant, W. Chaiyana, S. Srinuanpan and P. Wiriacharee, “Effect of drying process and long- term storage on characterization of Longan pulps and their biological aspects: Antioxidant and cholinesterase inhibition activities,” *LWT Food Science and Technology*, vol. 154, p. 112692, 2022.
- [6] S. Surbkar, T. Wongsiriamnuay, S. Ratanamarno and R. Surbkar, “ Drying characteristics of longan flesh by infrared radiation,” *KKU Research Journal*, vol. 19, no. 2, pp. 201-214, 2014.
- [7] P. Nuthong, A. Achariyaviriya, K. Namsanguan and S. Achariyaviriya, “ Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air,” *Journal of Food Engineering*, vol. 102, pp. 233–239, 2011.
- [8] T. Somjai, S. Achariyaviriya, A. Achariyaviriya and K. Namsanguan, “ Strategy for longan drying in two-stage superheated steam and hot air,” *Journal of Food Engineering*, vol. 95, pp. 313–321, 2009.
- [9] J. Varith, P. Dijkanarukkul, A. Achariyaviriya and S. Achariyaviriya, “ Combined microwave- hot air drying of peeled longan,” *Journal of Food Engineering*, vol. 81, pp. 459–468, 2007.
- [10] D. Su, M. Zhang., Z. Wei, X. Tang, R. Zhang, L. Liu and Y. Deng, “ Effect of microwave power on kinetics and characteristics of microwave vacuum- dried longan (*Dimocarpus longan* Lour.) pulp,” *Food*

- Science and Technology International*, vol. 21, no. 2, pp. 124-132, 2013.
- [11] K. Apinyavisit, A. Nathakarakul, G. S. Mittal and S. Soponronnarit, "Heat and mass transfer properties of longan shrinking from a spherical to an irregular shape during drying," *Biosystems Engineering*, vol. 169, pp. 11-21, 2018.
- [12] AOAC, "Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists," 18th ed. Washington DC: Gaithersburg, 2010.
- [13] R. Kasim, and M.U. Kasim, "Biochemical changes and color properties of fresh-cut green bean (*Phaseolus vulgaris* L. cv. gina) treated with calcium chloride during storage," *Food Science and Technology*, vol. 35, no. 2, pp. 266-272, 2015.
- [14] Thai Agricultural Standard, "Dried longan flesh (TAS 8-2006)," Bangkok, Thailand: National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standard, Ministry of Agriculture and Cooperatives, 2006.
- [15] M. Yunchalad, R. Supasri, K. Wongkrajank, C. Hiraga and A. Watanasook, "Preconcentration of longan juice extract with microfiltration and reverse osmosis," *Journal of Food and Agro-Industry*, vol. 1, no. 01, pp. 17-23, 2008.
- [16] P. S. Taoukis, and M. Richardson, "Principles of intermediate-moisture foods and related Technology," in *Water Activity in Foods*, G. V. Barbosa-Canovas, ' A. J. Fontana, S. J. Schmidt and T. P. Labuza, 2nd Ed. Chicago, USA, John Wiley & Sons, Inc. 2020, pp. 273-312
- [17] A. Figiel, "Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum- microwave methods," *Journal of Food Engineering*, vol. 98, pp. 461-470, 2010.
- [18] A. Nathakarakul, P. Jaiboon and S. Soponronnarit, "Far- infrared radiation assisted drying of longan fruit," *Journal of Food Engineering*, vol. 100, no. 4, pp. 662-668, 2010.
- [19] S. Chunthaworn, S. Achariyaviriya, A. Achariyaviriya and K. Namsanguan, "Color kinetics of longan flesh drying at high temperature," *Procedia Engineering*, vol. 32, pp. 104-111, 2012.
- [20] W. Senadeera, G. Adiletta, B. Önal, M. Di Matteo and P. Russo, "Influence of different hot air drying temperatures on drying kinetics, shrinkage, and colour of persimmon slices." *Food*, vol. 101, no. 9, pp. 1-12, 2020.
- [21] M. M. Han, Y. Yi, H. X. Wang and F. Huang, "Investigation of the maillard reaction between polysaccharides and proteins from longan pulp and the improvement in activities," *Molecules*, vol. 22, no. 6, pp. 1-14, 2017.
- [22] M. Corzo-matinez, N. Corzo, M. Villamiel and M. D. del Castillo, "Browning reactions," in *Food Biochemistry and Food Processing*, B.

- K. Simpson, L. Nollet, G. Paliyath, S. Benjakul, G. Paliyath, Y. H. Hui, 2nd ed. Iowa, John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 56–83.
- [23] A. Achariyaviriya, S. Soponronnarit and J. Tiansuwan, “Study of longan flesh drying,” *Drying Technology*, vol. 19, no. 9, pp. 2315–2329, 2007.
- [24] Y. F. Shang, H. Cao, C. K. Wei, K. Thakur, A. M. Liao, J. H. Huang and Z. J. Wei, “Effect of sugar types on structural and flavor properties of peony seed derived Maillard reaction products,” *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 44, no. 3, p. e14341, 2020.
- [25] T. Rithmanee, and P. Intipunya, “Effects of high power ultrasonic pretreatment on physicochemical quality and enzymatic activities of dried longan,” *Journal of Agricultural Science*, vol. 4, no. 11, pp. 299–306, 2012.

ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและสมบัติการต้านออกซิเดชันของไวน์ผลไม้เมืองหนาวที่ปลูกในประเทศไทย

รุ่งทิพา วงศ์ไพศาลฤทธิ์* และ วิชาญ พงษ์สานต์ศิริ

คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

149 ถนนเจริญกรุง แขวงยานนาวา เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

รับบทความ 28 มกราคม 2565 แก้ไขบทความ 26 ธันวาคม 2565 ตอรับบทความ 9 กุมภาพันธ์ 2566

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์ ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารประกอบ ฟลาโวนอยด์ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl scavenging capacity (DPPH) และวิธี 1, 10-Phenanthroline (Phen) ในไวน์ผลไม้เมืองหนาวทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ ไวน์ ลูกบ๊วย ท้ออำพัน ท้อสีทอง เชอร์รี่และผลไม้รวม (พีช บ๊วย) พบว่า ตัวอย่างไวน์ผลไม้เมืองหนาวทั้ง 5 ชนิดมีปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด เท่ากับ 0.70 ± 0.01 , 0.61 ± 0.03 , 0.63 ± 0.00 , 0.67 ± 0.01 , 0.63 ± 0.00 และ 0.64 ± 0.03 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ($p < 0.05$) ปริมาณแอนโทไซยานินซึ่งวัดโดยวิธีพีเอช-ดีฟเฟอเรนเชียล มีค่าเท่ากับ 3.81 ± 0.00 , 0.97 ± 0.06 , 1.22 ± 0.12 , 0.05 ± 0.01 , 0.02 ± 0.01 และ 0.57 ± 0.03 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ($p < 0.05$) ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ 0.33 ± 0.01 , 0.39 ± 0.00 , 0.04 ± 0.01 , 0.15 ± 0.01 , 0.21 ± 0.010 และ 0.15 ± 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ($p < 0.05$) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 16.19 ± 0.01 , 17.31 ± 0.05 , 11.37 ± 0.03 , 9.42 ± 0.04 , 9.47 ± 0.06 และ 15.31 ± 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ($p < 0.05$) และมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับร้อยละ 47.65 ± 0.06 , 55.54 ± 0.01 , 9.75 ± 0.02 , 3.90 ± 0.03 , 0.58 ± 0.01 และ 23.86 ± 0.00 ตามลำดับ ($p < 0.05$) ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ Phen เท่ากับ 151.43 ± 0.03 , 143.21 ± 0.03 , 5.01 ± 0.35 , 5.89 ± 0.01 , 7.15 ± 0.05 และ 41.92 ± 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ($p < 0.05$) ซึ่งจะเห็นว่าไวน์ผลไม้เมืองหนาวทั้ง 5 ชนิดมีปริมาณแคโรทีนอยด์ ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและการต้านอนุมูลอิสระแตกต่างกัน ซึ่งอาจใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการสร้างอัตลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ไวน์ผลไม้ในการประกอบธุรกิจหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP) และสร้างความแตกต่างของผลิตภัณฑ์โดยแทรกข้อมูลสารแอนติออกซิแดนท์เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์

คำสำคัญ : ไวน์ผลไม้; ไวน์; บ๊วย; พีชอำพัน; พีชสีทอง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6759 9237, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: rungthiwa.w@mail.rmutk.ac.th

Content of Bioactive Compounds and Antioxidant Properties of Winter Fruit Wines Grown in Thailand

Rungthiwa Wongpaisanrit* and Wichan Pongsankeeree

Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep
149 Charoenkrung Road, Yannawa, Sathorn, Bangkok 10120

Received 28 January 2022; Revised 26 December 2022; Accepted 9 February 2023

Abstract

The objective of this research was to quantify carotenoids content, anthocyanin content, flavonoid compounds content, phenolic compound content and antioxidant activity by 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl scavenging capacity (DPPH) and 1, 10-Phenanthroline (Phen) in 5 types of winter fruit wine, namely; plum (*Prunus domestica* L.), plum (*Prunus mume*), amber peach (*Prunus persica* var. *persica*), golden peach (*Prunus persic*), cherry (*Prunus cerasifera*) and mixed fruit (peach, plum). It was found that the total carotenoid contents of the winter fruit wine samples were equal to 0.70 ± 0.01 , 0.61 ± 0.03 , 0.63 ± 0.00 , 0.67 ± 0.01 , 0.63 ± 0.00 and 0.64 ± 0.03 mg/l, respectively ($p<0.05$), the anthocyanin content measured by the pH-differential method were 3.81 ± 0.00 , 0.97 ± 0.06 , 1.22 ± 0.12 , 0.05 ± 0.01 , 0.02 ± 0.01 and 0.57 ± 0.03 mg/l, respectively ($p<0.05$). The amount of flavonoid compounds were 0.33 ± 0.01 , 0.39 ± 0.00 , 0.04 ± 0.01 , 0.15 ± 0.01 , 0.21 ± 0.010 and 0.15 ± 0.01 mg/l, respectively ($p<0.05$). The total phenolic compounds were 16.19 ± 0.01 , 17.31 ± 0.05 , 11.37 ± 0.03 , 9.42 ± 0.04 , 9.47 ± 0.06 and 15.31 ± 0.02 mg/l, respectively ($p<0.05$). The DPPH antioxidant capacity were 47.65 ± 0.06 , 55.54 ± 0.01 , 9.75 ± 0.02 , 3.90 ± 0.03 , 0.58 ± 0.01 and 23.86 ± 0.00 , respectively ($p<0.05$). The antioxidant activity of Phen were 151.43 ± 0.03 , 143.21 ± 0.03 , 5.01 ± 0.35 , 5.89 ± 0.01 , 7.15 ± 0.05 and 41.92 ± 0.02 mg/l, respectively ($p<0.05$). It can be seen that all 5 types of winter fruit wines contain carotenoids, anthocyanin content, phenolic compounds content and antioxidants was different. This may be used as the basis for establishing the identity of the fruit wine product in the OTOP business and differentiating the product by inserting antioxidant information to add value to the product.

Keywords: Fruit Wines; Plum (*Prunus domestica* L.); Plum (*Prunus mume*); Amber Peach (*Prunus persica* var. *persica*); Golden Peach (*Prunus persic*)

* Corresponding Author. Tel.: +668 6759 9237, E-mail Address: rungthiwa.w@mail.rmuth.ac.th

1. บทนำ

ฟรุตไวน์ (Fruit wine) หรือไวน์ผลไม้เป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์หมักที่ทำจากส่วนผสมที่หลากหลาย อาจมีรสชาติเพิ่มเติมที่มาจากผลไม้ดอกไม้อื่นๆ และสมุนไพร โดยไม่รวมถึงเบียร์ (beer), ไซเดอร์ (cider), มีด (mead) และ เพอร์รี่ (perry) ซึ่งไวน์ผลไม้เป็นที่ยอมรับมาช้านานในหมู่คนทำไวน์แถบเมดิเตอร์เรเนียนจะปลูกองุ่น ตัวอย่างเช่น ในอเมริกาเหนือหรือสแกนดิเนเวีย เช่น ลิทัวเนีย นอร์เวย์ เดนมาร์กหรือประเทศอื่นๆ ในแถบยุโรปตอนเหนือ เป็นต้น [1]

ไวน์ผลไม้ (Fruit Wine) เป็นธุรกิจที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีแหล่งวัตถุดิบผลไม้ท้องถิ่นรสชาติดีกระจายอยู่ทุกภูมิภาค [1] ตัวอย่างเช่น ไวน์สับปะรด ไวน์สตอเบอร์รี่ ไวน์กระเจี๊ยบ ไวน์ส้มเขียวหวาน ไวน์ลำไย เป็นต้น ซึ่งผลไม้ที่ผลิตไวน์มักนิยมผลไม้ที่สุก หรือแก่จัด ส่วนวัตถุดิบอื่นๆ ได้แก่ เชื้อยีสต์ เอนไซม์ น้ำตาล เครื่องเทศ และวัตถุดิบที่ใช้ในการบรรจุ เช่น กล่องกระดาษ ฉลาก ขวดไวน์ และจุกคอร์ก ซึ่งโครงสร้างของต้นทุนการผลิต จะเป็นวัตถุดิบประมาณร้อยละ 85 ของต้นทุนการผลิต ค่าแรงงาน ร้อยละ 7 ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร ร้อยละ 1 และค่าเสียหยาบการผลิต ร้อยละ 7 ตามลำดับ [2]

ไวน์ผลไม้ เป็นไวน์ที่ผลิตจากน้ำผลไม้สูงถึง 20% ไวน์เหล่านี้อาจจะบุนผลากด้วยคำต่าง ๆ เช่น Fruit Wine, Crisp and Fruity หรือ Rich & Red จุดเด่นของไวน์ชนิดนี้ คือ มีรสชาติไม่แพ้ง และถูกเก็บรักษาในอัตราที่ต่ำกว่าไวน์ทั่วไปที่ทำจากองุ่น ซึ่งในทางกฎหมายแล้วไวน์ผลไม้อยู่ในกลุ่มสุราประเภท "สุราแช่" เนื่องจากในไวน์แต่ละขวดมีส่วนผสมของแอลกอฮอล์อยู่ในปริมาณไม่เกิน 15% ดังนั้น กฎหมายและภาษีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไวน์ผลไม้จึงเป็นกฎหมายเดียวกับผลิตภัณฑ์สุราประเภทอื่นๆ คือ พระราชบัญญัติสุรา พ.ศ.2493 [3]

การผลิตไวน์ผลไม้โดยทั่วไปจะนำผลไม้ที่สุกหรือแก่จัด มาล้างทำความสะอาด และตัดส่วนที่ไม่ต้องการทิ้ง จากนั้นนำมาบดหรือหั่น และคั้นเอาเฉพาะน้ำ (ไวน์แดงต้องใส่เปลือกและเนื้อผลไม้ลงไปด้วยและอย่าให้เนื้อผลไม้ละเอียดจนเกินไป เพราะจะทำให้ไวน์มีสีขุ่น) จากนั้นปรับความเข้มข้น ความหวาน โดยการเติมน้ำ หรือน้ำตาลทรายขาว และระดับความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำผลไม้ โดยเติมแอมโมเนียหอม น้ำมะนาวในระดับที่เหมาะสม ขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ ทั้งนี้ น้ำผลไม้ที่เหมาะสมจะต้องมีความหวานประมาณร้อยละ 20-25 ของน้ำหนักสุทธิของน้ำผลไม้และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ระหว่าง 3.2-4.0 จากนั้นนำไปต้มฆ่าเชื้อนาน 20 นาที หรือเติมสารซัลเฟอร์-ไดออกไซด์ หรือโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟต์ เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อที่ติดมากับน้ำผลไม้ (การเติมสารเคมีจะได้ไวน์คุณภาพดีกว่าการใช้ความร้อน) แล้วถ่ายลงใส่ถังหมักในขณะที่มีความร้อนประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส และปิดภาชนะให้สนิททั้งน้ำผลไม้ให้เย็นลงประมาณ 1 คืน หลังจากนั้นเติมเชื้อยีสต์ที่กำลังเติบโต ซึ่งต้องเตรียมไว้ 1-2 วัน เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์ แล้วหมักต่อในที่เย็น (ที่อุณหภูมิ 18-22 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้) เพื่อให้กระบวนการทำงานของยีสต์เป็นไปอย่างช้าๆ ใช้ระยะเวลาราว 2-6 สัปดาห์ หรือจนกว่าไวน์เริ่มใส ไม่มีฟองอากาศผุดและเชื้อยีสต์ตกตะกอนนอนก้นแล้ว ก็จะได้ไวน์ที่มีระดับแอลกอฮอล์ 10-12 ดีกรี นำไวน์ที่ได้ มากรองเศษเนื้อผลไม้อีกครั้ง แล้วนำไปหมักอีกครั้งในภาชนะปิดสนิท (ที่อุณหภูมิ 18-22 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้) จนกว่าไวน์จะใส แล้วนำไวน์ที่ได้มาผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อ โดยพาสเจอร์ไรซ์ หรือเติมสารเคมี เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อน้ำส้มสายชู และปรุงแต่งรสชาติบรรจุในขวดแห้งที่สะอาด ปิดจุกและฉลากเพื่อจำหน่ายต่อไป [2]

ไวน์ผลไม้แต่ละชนิดมีสารในกลุ่มมะโรมาติกมากมายหลายชนิด จึงส่งผลให้ไวน์ผลไม้มีกลิ่นรสที่หลากหลายตามผลไม้ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ [4], [5] นอกจากนี้ในไวน์ผลไม้ยังมีสารประกอบกลุ่มฟีนอลิกซึ่งมีสมบัติในการเป็นสารแอนติออกซิแดนท์(antioxidant) [6], [7] ตัวอย่างเช่น แอนโทไซยานิน (anthocyanin) ซึ่งเป็นรงควัตถุชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นในไวน์ผลไม้ ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ช่วยชะลอความเสื่อมของเซลล์ ช่วยลดอัตราเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจ และเส้นเลือดอุดตันในสมองด้วยการยับยั้งไม่ให้เลือดจับตัวเป็นก้อนและชะลอความเสื่อมของดวงตา เป็นต้น

ประเทศไทยมีไม้ผลเขตร้อนที่เพาะปลูกเพื่อจำหน่ายผลผลิตเชิงการค้าได้ไม่กี่ชนิด เนื่องจากไม้ผลเขตร้อนเจริญเติบโตในสภาพอากาศเขตอบอุ่น (temperate zone) ในขณะที่ประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนชื้น (tropical zone) แต่การผลิตไม้ผลเขตร้อนบนพื้นที่สูงซึ่งมีสภาพอากาศเย็นในฤดูหนาว สามารถช่วยแก้ปัญหาในเรื่องการอพยพ และการทำลายป่าของชาวไทยภูเขา ทำให้ชาวไทยภูเขา มีอาชีพและมีรายได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การปลูกไม้ผลเขตร้อนยังเป็นการช่วยอนุรักษ์พื้นที่ต้นน้ำได้อย่างดีอีกด้วย [8]

บ๊วย อยู่ในสกุล Rosaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Prunus mume* เป็นไม้ผลเมืองหนาว มีแหล่งกำเนิดในสาธารณรัฐประชาชนจีน นิยมปลูกในภาคเหนือของประเทศไทย จัดอยู่ในสกุลเดียวกับท้อ พลัม หรือ ลูกพรุน ลักษณะผลกลม เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2.5 เซนติเมตร ผลดิบมีสีเขียว ผลแก่เต็มที่จะมีสีเหลือง มีรสขมอมเปรี้ยว และมีกลิ่นหอม ในญี่ปุ่นและไต้หวันสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ในช่วงเดือนมิถุนายนถึงสิงหาคม ส่วนในประเทศไทยเก็บเกี่ยวได้ในช่วงเดือนเมษายน [9] พันธุ์ที่นิยมปลูกคือ บ๊วยพันธุ์เซียงราย หรือ บ๊วยพันธุ์แม่สาย บ๊วยชนิดนี้จัดเป็นพันธุ์พื้นเมืองดั้งเดิมของไทย ต้องปลูกในพื้นที่ที่มีความสูงกว่าระดับน้ำทะเลตั้งแต่ 500 เมตรขึ้นไป และผลมีขนาดเล็กไม่ตรงกับความต้องการของโรงงานแปรรูป [10]

พลัมเป็นไม้ผลตระกูล Rosaceae สกุล *Prunus* เป็นไม้ผลกลุ่ม stone fruit มีแหล่งกระจายพันธุ์อยู่แถบเอเชียตะวันตกรวมไปถึงสาธารณรัฐประชาชนจีน สาธารณรัฐอิสลามอิหร่าน สาธารณรัฐอิสลามอัฟกานิสถาน และสาธารณรัฐตุรกี เป็นต้น [11] พันธุ์ที่นิยมปลูกเพื่อการค้ามี 2 สายพันธุ์ คือ พลัมยุโรป (*Prunus domestica* L.) และพลัมญี่ปุ่น (*Prunus salicina*) และพลัมที่สามารถปลูกได้ดีในประเทศไทย คือ พลัมญี่ปุ่น ซึ่งพลัมญี่ปุ่นนี้มีถิ่นกำเนิดดั้งเดิมอยู่ในสาธารณรัฐประชาชนจีน และมีการพัฒนาสายพันธุ์ที่ประเทศญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกา [12] มีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ มีวิตามินเอที่ช่วยบำรุงสายตา มีวิตามินซีป้องกันโรคหวัด และโรคเลือดออกตามไรฟัน มีแร่ธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสช่วยเสริมสร้างกระดูกและฟัน ทั้งยังแก้โรคหอบหืด หล่อลื่นลำไส้ แก้อาการปวดของโรคไต เลื่อน ลดอาการเหงื่อออกมาก และช่วยลดความดันโลหิตได้ด้วย [13]

โหนด จัดอยู่ในวงศ์ Rosaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Prunus domestica* L. โหนดอยู่ในตระกูลพลัม เช่นเดียวกับ ลูกท้อ บ๊วย เชอร์รี่ อัลมอนต์ และนางพญาเสือโคร่ง และมีถิ่นกำเนิดจากบริเวณคอเคซัสในเอเชียตะวันตก [14]

เชอร์รี่ หรือโหนด (cherry plum) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Prunus cerasifera* เป็นผลไม้ที่อุดมไปด้วยไฟเบอร์ วิตามินและแร่ธาตุ เช่น วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 วิตามินบี 3 วิตามินซี โพแทสเซียม แคลเซียม และสังกะสี นิยมทำเป็นแยม เยลลี่ พาย และน้ำผลไม้

พีช (peach) หรือลูกท้อ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Prunus persic* อยู่ในสกุล *Prunus* อันเป็นสกุลเดียวกับกับ ชากระบะ, บ๊วย, เชอร์รี่ หรือนางพญาเสือโคร่งผลมีลักษณะกลม เมื่อสุกจะมีสีเหลืองทอง พีชสด พีชอุดมไปด้วยวิตามินเอ วิตามินซี และอนุมูลอิสระ ที่ช่วยชะลอวัยได้ ส่วนเบต้าแคโรทีนในพีช ช่วยป้องกันโรคมะเร็งบางชนิด และช่วยบำรุงผิว [8] พีชเป็นราชินีของไม้ผลเขตร้อน

หนารองจากแอปเปิ้ล เพราะได้รับความนิยมในการบริโภค จึงปลูกอย่างแพร่หลายในเขตอบอุ่น มีถิ่นกำเนิดในประเทศจีนและปลูกได้แพร่หลายในสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ศตวรรษที่ 17 นอกจากรสชาติที่พึงประสงค์แล้ว พืชยังได้รับความนิยมในตลาดผลิตผลสด เนื่องจากผู้บริโภคเข้าใจถึงประโยชน์ต่อสุขภาพ [15] พืชสามารถเจริญเติบโตและผลิดอกติดผลในสภาพพื้นที่ที่มีอากาศเย็นในระดับความสูงประมาณ 1,000 เมตรจากระดับน้ำทะเล ปัจจุบันโครงการหลวงได้นำพืชมามาปลูกเพื่อส่งเสริมให้ราษฎรปลูกเพื่อสร้างรายได้ [16] ตัวอย่างเช่น พืชสายพันธุ์อ่าพันอ่างช้างซึ่งมีรสชาติหวานอมเปรี้ยว เนื้อสีเหลืองอำพัน ฉ่ำน้ำ เหมาะรับประทานสด ส่วนลูกพืชเปรี้ยวพันธุ์เจด (Jade) ผลค่อนข้างกลม เนื้อแน่น เมื่อสุกจะมีสีเหลืองทั้งผล รสชาติหวานอมเปรี้ยว สามารถรับประทานทานสดได้ และแปรรูปได้ดี [17]

เป็นเวลานานมาแล้วที่ประเทศไทยส่งเสริมเกษตรกรรมในพื้นที่ดอยสูงเพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิตของชาวเขา ลดการเผาป่าทำไร่เลื่อนลอยและการปลูกฝิ่นด้วยการปลูกผลไม้เมืองหนาว และได้เริ่มทำการตลาดผ่านช่องทางการตลาดภายใต้ชื่อสินค้าดอยคำของมูลนิธิโครงการหลวง ซึ่งผู้บริโภคได้ให้การตอบรับผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเป็นอย่างดี จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผลไม้เมืองหนาวทั้ง 5 ชนิดได้แก่ หนุ่ย บัวย พืชอ่าพัน พืชสีทอง เซอร์รี่ และผลไม้รวม (พืชและบัวย) โดยนำมาผลิตผลไม้และเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ เคมี ปริมาณแคโรทีนอยด์ ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและการต้านอนุมูลอิสระของผลไม้เมืองหนาวทั้ง 5 ชนิด ซึ่งคาดว่าจะเป็นการสร้างคุณลักษณะและเพิ่มมูลค่าของผลไม้ ให้สูงขึ้นและเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประกอบอาชีพเพื่อสร้างรายได้ นำวัตถุดิบจากท้องถิ่นเพื่อสร้างอัตลักษณ์ให้กับสินค้าที่มีความแตกต่างจากที่อื่นโดยแทรกข้อมูลสารแอนติออกซิแดนท์ที่เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้า นอกจากนี้อาจเป็น

ข้อมูลพื้นฐานเพื่อประกอบการตัดสินใจสำหรับการประกอบอาชีพเพื่อสร้างรายได้ เพื่อสร้างสภาพคล่องให้กับผู้ประกอบการธุรกิจในอนาคตได้

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่างไวน์ผลไม้เมืองหนาว

ทำไวน์ผลไม้เมืองหนาว โดยใช้ผลไม้เมืองหนาว 5 ชนิด ได้แก่ หนุ่ย บัวย พืชอ่าพัน พืชสีทอง เซอร์รี่และผลไม้รวม (พืช บัวย) โดยนำผลไม้ทั้ง 5 ชนิด นำมาผานเอาเมล็ดออก แล้วชั่งน้ำหนัก 1,500 กรัม ผสมน้ำเปล่าที่สะอาดลงไปในอัตราส่วน 1 : 2 จากนั้นนำไปปั่นโดยใช้เครื่องปั่นผสม (ปั่นนาน 30 วินาที) วัดค่าความหวานและปรับความหวานเท่ากับ 20 ° Brix (โดยเติมน้ำตาลทราย) นำส่วนผสมของผลไม้เมืองหนาวทั้งหมดไปต้มโดยใช้ไฟปานกลาง พอเดือดให้เติมน้ำตาล คนจนน้ำตาลละลาย ยกกลงแล้วตั้งทิ้งไว้ให้อุ่น แล้วบรรจุใส่ขวดขนาด 5 ลิตร เติมหัลล่าเชื้อยีสต์ (*Saccharomyces cerevisiae*, Lalvin K1-V1116, Canada, ยีสต์ 5 กรัม ต่อส่วนผสมน้ำผลไม้ 500 มิลลิลิตร) เขย่าให้กลัเชื้อกระจายทั่วแล้วปิดปากขวดด้วยสำลีหรือหลอดดักก๊าซ หมักทิ้งไว้ 2-3 สัปดาห์หรือจนได้ปริมาณแอลกอฮอล์ในช่วง 12 -14% แล้วแยกกากออก จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที บรรจุใส่ขวดขนาด 5 ลิตร นำไปแช่ในตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิ 15-20 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไวน์ผลไม้ตกตะกอน จากนั้นถ่ายไวน์ที่ใสขวดใหม่โดยใช้สายยางขนาดเล็ก นำไวน์บ่มที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 เดือน สำหรับตัวอย่างไวน์ที่นำไปวิเคราะห์หากมีความขุ่นจะนำตัวอย่างไวน์ปั่นเหวี่ยงโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm นาน 5 นาที

2.2 ศึกษาคุณภาพทางกายภาพ- คำสี

โดยการวัดค่าสีด้วยเครื่อง Hunter Lab นำตัวอย่างไวน์ผลไม้เมืองหนาว 5 ชนิดและผลไม้รวม (พืช บัวย) แต่ละตัวอย่างมาวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี

(Minolta™ Hunter Lab) รุ่น UltrScan PRO ในระบบ L*, a* และ b* โดยค่า L* ที่เข้าใกล้ 100 หมายถึง ตัวอย่างมีความสว่างมากจนเป็นสีขาวหรือสีจาง แต่ถ้าค่า L* เข้าใกล้ 0 หมายถึง ตัวอย่างมีความสว่างน้อยลงจนเป็นสีคล้ำ ส่วนค่า a* ที่เป็นบวก แสดงว่าตัวอย่างเป็นสีแดง แต่ค่า a* ที่เป็นลบ แสดงว่าตัวอย่างเป็นสีเขียว และในค่า b* ที่เป็นบวก แสดงว่าตัวอย่างเป็นสีเหลือง แต่ถ้าค่า b* เป็นลบ แสดงว่าตัวอย่างเป็นสีน้ำเงิน

2.3 ศึกษาคุณภาพทางเคมี

โดยนำตัวอย่างไวน์ผลไม้มาวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยใช้ pH Meter (pH700, EUTECH, Singapore) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำหรือค่าความหวาน (° Brix) โดยใช้ Hand Refractometer (ATAGO, Japan) และปริมาณ Alcohol (%) โดยใช้ Vinometer (ALLA, France)

2.4 ศึกษาปริมาณแคโรทีนอยด์

เตรียมตัวอย่างดังนี้ ปิเปิดไวน์ตัวอย่างละ 5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองเตรียมไว้ ส่วนตัวอย่างที่เป็นผลไม้สด ให้ชั่งตัวอย่างละ 5 กรัม นำมาบดให้ละเอียด ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วสกัดตัวอย่างด้วยอะซิโตน 25 มิลลิลิตร เขย่าแล้วกรองตัวอย่าง จากนั้นนำสารละลายส่วนใสที่สกัดได้ใส่ในหลอดทดลอง นำสารที่สกัดได้ไปวัดที่ความยาวคลื่น 470 nm 645 nm และ 663 nm ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (libra s22, bichrome, UK) แล้วบันทึกค่าที่วัดได้เป็นค่าดูดกลืนแสง ทดลอง 3 ซ้ำ และคำนวณดังนี้ [18]

$$\text{Chlorophyll } a = \frac{[12.7(A_{663}) - 2.69(A_{645})] \times V}{(1000 \times W)} \quad (1)$$

$$\text{Chlorophyll } b = \frac{[22.9(A_{645}) - 4.68(A_{663})] \times V}{(1000 \times W)} \quad (2)$$

$$\text{Carotenoid} = \frac{[1000(A_{470}) + 3.27\{(\text{chlorophyll } a) - (\text{chlorophyll } b)\}] \times V}{(W \times 229)} \quad (3)$$

เมื่อกำหนดให้ A = ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)

V = ปริมาตรของอะซิโตน (ml)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (g)

2.5 ศึกษาปริมาณแอนโทไซยานินโดยวิธีพีเอช-ดิฟเฟอเรนเชียล (pH-differential)

โดยเตรียมสารละลาย KCl pH₁ โดยชั่งโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.86 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร (ใช้แท่งแม่เหล็กกวน) เติมน้ำกลั่น 950 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยกรดไฮโดรคลอริก จนกว่าจะได้ pH เท่ากับ 1 แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นเตรียมสารละลาย CH₃COONa.3H₂O pH_{4.5} โดยชั่งโซเดียมอะซิเตท 54.43 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร (ใช้แท่งแม่เหล็กกวน) เติมน้ำกลั่น 940 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยกรดไฮโดรคลอริก จนกว่าจะได้ pH เท่ากับ 4.5 ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1,000 มิลลิลิตร เมื่อเตรียมสารละลายเรียบร้อยแล้ว จึงวิเคราะห์หาปริมาณแอนโทไซยานินโดยวิธีพีเอช-ดิฟเฟอเรนเชียล (pH-differential) โดยปิเปิดตัวอย่างไวน์ผลไม้เมืองหนาว 5 ชนิดและผลไม้รวม (พีช บัวย) ตัวอย่างละ 1 มิลลิลิตร ปรับปริมาตร KCl pH₁ ให้ครบ 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 nm และ 700 nm ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (libra s22 bichrome, UK) โดยทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นปิเปิดตัวอย่างไวน์ผลไม้เมืองหนาว 5 ชนิดและผลไม้รวม (พีช บัวย) อย่างละ 1 มิลลิลิตร ปรับปริมาตร โซเดียมอะซิเตท pH_{4.5} ให้ครบ 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 nm และ 700 nm ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (libra s22 bichrome, UK) โดยทดลอง 3 ซ้ำ และนำมาคำนวณโดยใช้สูตรดังนี้ [19]

$$\text{Anthocyanin (mg/L)} = \frac{A \times MW \times DF \times 1000}{\epsilon \times l} \quad (4)$$

เมื่อกำหนดให้

$$A = (A_{520} - A_{700}) \text{pH}_{1.0} - (A_{520} - A_{700}) \text{pH}_{4.5}$$

$$MW = 499.2 \text{ g mol}^{-1} \text{ (cyanidin-3-glucoside)}, 306.7 \text{ g mol}^{-1} \text{ (pelargonidin-3-glucoside)}$$

$$DF = \text{dilution factor}$$

$$\epsilon = \text{molar extinction coefficient}; 26,900 \text{ l.mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}, \text{cyanidin-3-glucoside}, 31,100 \text{ l.mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}, \text{pelargonidin-3-glucoside}$$

$$l = \text{ความกว้างของคิวเวต (cm)}$$

2.6 ศึกษาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ (Total Flavonoid content)

วิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ ใช้วิธี Aluminium Chloride Colorimetric ทำได้โดยผสมสารละลายสกัดความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร กับ แอลกอฮอล์ 95% ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร แล้วเติม 10% Aluminium Chloride ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและเติม 1 โมลาร์ Potassium Acetate ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตรสุดท้าย 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 415 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer ทำ 3 ซ้ำใช้เคอร์ชิตินเป็นสารมาตรฐาน นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ในหน่วยของมิลลิกรัมสมมูลของเคอร์ชิตินต่อกรัมสารสกัด [20], [21]

2.7 ศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content)

นำตัวอย่างไวน์ผลไม้เมืองหนาว 5 ชนิดและผลไม้รวม (พีช บัวย) (ถ้าไวน์ขุนนำไปปั่นเหวี่ยงและนำส่วนใสมาวิเคราะห์) โดยบีบตัวอย่างไวน์มาตัวอย่างละ 0.30 มิลลิลิตร เติมสารละลาย Folin-Ciocalteu เข้มข้น 10% (โดยปริมาตรต่อปริมาตร) จำนวน 1.50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 7.5%

(โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในน้ำกลั่น) จำนวน 3 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 10 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายผสมกัน และตั้งไว้ในที่มืด เป็นเวลา 30 นาที (ถ้าสารละลายขุนนำไปปั่นเหวี่ยงและนำเอาสารละลายใสมาวิเคราะห์) เมื่อเกิดปฏิกิริยาสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงิน แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (libra s22, bichrome, UK) โดยทดลอง 3 ซ้ำ และนำไปคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดจากกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0, 40, 80, 120, 160, 200 และ 240 ไมโครกรัม โดยชั่งกรดแกลลิก 0.02 กรัมละลายและปรับปริมาตรด้วยแอลกอฮอล์ 95% ให้ครบ 50 มิลลิลิตร [21]

2.8 ศึกษาความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยวิธี DPPH (1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl)

วิเคราะห์ความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวอย่างผลไม้สดและไวน์ผลไม้เมืองหนาว 5 ชนิดและผลไม้รวม (พีช บัวย) ซึ่งจะอาศัยการติดตามความสามารถในการทำละลายอนุมูลอิสระ DPPH ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่ทำให้สารละลายมีสีม่วงและสามารถดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร โดยจะเปรียบเทียบกับสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันมาตรฐานคือวิตามินซี (ซึ่งละลายน้ำได้ดี) โพรพิลแกลเลต (Propylgallate; PG) และ และบีเอชเอหรือบิวทิลเลตไฮดรอกซีแอนิโซล (Butylated hydroxyanisole; BHA) (ซึ่งสารมาตรฐานทั้ง 2 ตัวละลายในน้ำมันจึงละลายแอลกอฮอล์ได้ดี) โดยใช้วิตามินซี โพรพิลแกลเลต และ BHA อย่างละ 0.1 กรัม

บีบตัวอย่างไวน์ผลไม้เมืองหนาว 5 ชนิด และผลไม้รวม (พีช บัวย) จำนวน 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองแต่ละหลอด จากนั้นเติมสารละลายต่าง ๆ ลงไปดังนี้คือ

สารละลาย DPPH เข้มข้น 0.188 % (โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในแอลกอฮอล์ 95%) จำนวน 0.72 มิลลิลิตร, สารละลายแอลกอฮอล์ 40 % จำนวน 5.18 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วย vortex mixer พร้อมจับเวลาทันทีเมื่อครบ 30 นาที แล้วถ่ายสารละลายลงในคิวเวต นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (libra s22) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ สำหรับปฏิกิริยาควบคุม(control) จะใช้น้ำกลั่น, แอลกอฮอล์ 40%, แอลกอฮอล์ 95% อย่างละ 0.1 แทน สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันมาตรฐาน และหลอดที่เป็น Blank จะเตรียมเหมือนปฏิกิริยาควบคุมแต่จะเติมแอลกอฮอล์ 95% จำนวน 0.72 มิลลิลิตรแทน สารละลาย DPPH โดยแต่ละการทดลองจะทำ 3 ซ้ำ [21] และคำนวณหาฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ดังนี้

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (ร้อยละ) = (ค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH ที่ไม่มีตัวอย่าง - ค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH ที่มีตัวอย่าง) $\times$ 100/ ค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH ที่ไม่มีตัวอย่าง (5)

2.9 ศึกษาการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูล

อิสระด้วยวิธี 1,10-Phenanthroline (Phen)

นำตัวอย่างไวน์ผลไม้เมืองหนาว 5 ชนิดและผลไม้รวม (พีช บัวย) (ถ้าไวน์ขุนนำไปปั่นเหวี่ยงและนำส่วนใสมาวิเคราะห์) โดยปิเปตตัวอย่างไวน์มาตัวอย่างละ 0.60 มิลลิลิตรใส่ในหลอดทดลองแต่ละหลอด ปิเปตสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เข้มข้น 0.2% (โดยมวลต่อปริมาตร) จำนวน 1.00 มิลลิลิตร เติมสารละลาย 1,10-Phenanthroline เข้มข้น 0.5% (โดยมวลต่อปริมาตร) จำนวน 0.5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยเมทานอลให้ครบ 10 มิลลิลิตร เขย่าและเก็บไวน์ที่มีดเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (libra s22) โดยทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นนำไปคำนวณหาฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระจากกราฟมาตรฐานเฟอร์รัสซัลเฟต

[20], [21] โดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต 0.1 กรัมละลายในเมทานอล 95 % และปรับความเข้มข้น เป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ออกแบบการทดลองโดยใช้การวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) และวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS Version 22

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาคุณภาพทางกายภาพและ

คุณภาพทางเคมีของไวน์ผลไม้เมืองหนาว

ผลการทดลองทำไวน์ผลไม้เมืองหนาว 5 ชนิด และผลไม้รวม (พีช บัวย) ได้แก่ ไวน์เลือด บัวย พีช อำพัน พีชสีทองและเชอร์รี่และผลไม้รวม (พีช บัวย) จากนั้นนำมาวัดคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางเคมี ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 1-3

ตารางที่ 1 ค่าสี ($L^* a^* b^*$) ของผลิตภัณฑ์ไวน์ผลไม้เมืองหนาว 6 ชนิด

ชนิดของไวน์ผลไม้	ค่าสี		
	L^*	a^*	b^*
ไวน์	34.01 $\pm$ 0.01 ^c	9.26 $\pm$ 0.03 ^b	1.25 $\pm$ 0.04 ^b
เชอร์รี่	47.32 $\pm$ 0.02 ^a	3.09 $\pm$ 0.02 ^c	0.20 $\pm$ 0.05 ^c
พีชอำพัน	46.84 $\pm$ 0.05 ^a	1.90 $\pm$ 0.02 ^d	0.43 $\pm$ 0.03 ^c
พีชสีทอง	43.90 $\pm$ 0.06 ^b	1.69 $\pm$ 0.06 ^d	1.45 $\pm$ 0.06 ^a
บัวย	44.09 $\pm$ 0.06 ^b	5.99 $\pm$ 0.06 ^a	0.15 $\pm$ 0.06 ^b
รวม (พีช บัวย)	46.85 $\pm$ 0.06 ^a	1.63 $\pm$ 0.06 ^d	0.11 $\pm$ 0.06 ^d

หมายเหตุ : ^{a, b, c} หมายถึง ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 1 การวิเคราะห์ค่าสีได้แก่ ค่า $L^* a^* b^*$ พบว่าไวน์ผลไม้มีค่าสีแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ไวน์ไหนมีค่าความสว่าง (L^*) ต่ำที่สุด แต่มีค่าความเป็นสีแดง (a^*) สูงเนื่องจากไหนมีสีแดงเข้มมากกว่าผลไม้อื่น ส่วนไวน์เชอร์รี่นั้นมีค่าความสว่าง (L^*) สูงที่สุด และมีค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มากที่สุด เนื่องจากพีชอำพันมีสีเหลืองมากกว่าผลไม้

ชนิดอื่น ๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าสีของผลิตภัณฑ์ไวน์ผลไม้แต่ละชนิดมีความสอดคล้องตามลักษณะของวัตถุดิบ

นำตัวอย่างไวน์แต่ละตัวอย่างมาวัดค่าการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่า °Brix และปริมาณแอลกอฮอล์ ผลการทดลอง ดังตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ค่า pH Brix และ ปริมาณแอลกอฮอล์ของไวน์หลังจากหมัก 1 สัปดาห์

ชนิดของไวน์	หมัก 1 สัปดาห์		
	pH *	Brix *	Alc (%)*
โทน	2.95±0.01 ^c	7.00±0.01 ^b	9.00±0.01 ^b
เชอร์รี่	3.08±0.02 ^a	6.00±0.01 ^c	8.00±0.02 ^c
พีชอำพัน	2.83±0.01 ^c	7.20±0.01 ^{ab}	10.00±0.01 ^a
พีชสีทอง	3.06±0.01 ^a	8.00±0.01 ^a	10.00±0.01 ^a
บ๊วย	2.99±0.01 ^{ab}	6.00±0.01 ^c	9.00±0.01 ^b
รวม (พีช บ๊วย)	2.99±0.01 ^{ab}	7.00±0.01 ^b	9.00±0.00 ^b

หมายเหตุ : a, b, c หมายถึง ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวดังมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p < 0.05)

ตารางที่ 3 ค่า pH Brix และ ปริมาณแอลกอฮอล์ของไวน์หลังการฆ่าเชื้อ

ชนิดของไวน์	หลังการฆ่าเชื้อ		
	pH *	° Brix *	Alc (%)*
โทน	3.34±0.01 ^a	7.00±0.01 ^b	9.00±0.01 ^b
เชอร์รี่	3.21±0.02 ^b	6.00±0.01 ^c	9.00±0.01 ^b
พีชอำพัน	2.93±0.01 ^c	7.20±0.00 ^b	10.00±0.01 ^a
พีชสีทอง	3.09±0.01 ^b	8.00±0.01 ^a	10.00±0.01 ^a
บ๊วย	3.02±0.05 ^b	8.00±0.01 ^a	9.00±0.01 ^b
รวม (พีช บ๊วย)	3.02±0.01 ^b	8.00±0.01 ^a	10.00±0.01 ^a

หมายเหตุ : a, b, c หมายถึง ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวดังมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p < 0.05)

จากตารางที่ 2 และ 3 พบว่าคุณภาพทางเคมีของไวน์ ได้แก่วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในน้ำ (° Brix) และปริมาณแอลกอฮอล์ของผลิตภัณฑ์ไวน์ผลไม้ทั้ง 6 ชนิดมีความแตกต่างกันทั้งในระหว่างการหมักและหลังการฆ่าเชื้อ (p<0.05) และจะสังเกตได้ว่าในระหว่างการหมักไวน์และหลังการฆ่าเชื้อ

ไวน์แต่ละชนิดจะมีค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่า Brix แตกต่างกันเล็กน้อย ส่วนปริมาณ alcohol ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยในระหว่างการหมัก ไวน์จะมีปริมาณน้ำตาลจะลดลงและมีปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าเชื้อยีสต์จะเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์ โดยเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ในน้ำหมักเกิดเป็นสารต่างๆ เช่น กลิ่น เอธิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) กรดอินทรีย์ (organic acid) คาร์บอนไดออกไซด์ การหมักสามารถเกิดได้ทั้งในสภาวะที่มีอากาศ (aerobic fermentation) หรือไม่มีอากาศ (anaerobic fermentation) การหมักของยีสต์ในไวน์ ผลพลอยได้คือกรดอะซิติกและกรดคาร์บอซิลิก ซึ่งทำให้ไวน์มีค่า pH เป็นกรด ส่งผลให้ไวน์แต่ละชนิดมีรสชาติและกลิ่นหอมที่แตกต่างกันไป [4], [5] นอกจากนี้ยังได้สารกลุ่มฟีนอล เช่น แอนโทไซยานินและแทนนิน ซึ่งให้รสฝาดและเป็น antioxidant [6], [7] และองค์ประกอบต่างๆ อยู่ในเกณฑ์ทั่วไปของผลิตภัณฑ์ไวน์คือ ปริมาณแอลกอฮอล์ไม่เกิน 15 ดีกรี ในระหว่างการหมักไวน์หากไม่มีควบคุมปริมาณ alcohol จะทำให้มีปริมาณ alcohol เพิ่มขึ้น เพราะยีสต์ ยังคงทำงานอยู่ จึงต้องยับยั้งการทำงานของยีสต์โดยวิธีการฆ่าเชื้อ ซึ่งในส่วนของการฆ่าเชื้อโดยใช้ความร้อนอาจทำให้น้ำระเหยออกไปจึงส่งผลให้ไวน์มีความหวานเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและทำให้เกิดการสูญเสียกลิ่นรสของไวน์ผลไม้ด้วย

3.2 ผลการศึกษาการหาปริมาณแคโรทีนอยด์ แอนโทไซยานิน สารประกอบฟลาโวนอยด์ สารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของไวน์ผลไม้เมืองหนาว

โดยวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์ ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH, Phenanthroline และ Flavonoid ของไวน์ผลไม้เมืองหนาว 5 ชนิดและผลไม้มixed (พีช บ๊วย) ผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณแคโรทีนอยด์ แอนโทไซยานิน สารประกอบฟลาโวนอยด์ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของไวน์ผลไม้เมืองหนาว 5 ชนิดและผลไม้รวม (พีช บ๊วย)

ชนิดของไวน์	ปริมาณแคโรทีนอยด์ (มิลลิกรัม/ลิตร)	ปริมาณแอนโทไซยานิน (มิลลิกรัม/ลิตร)	ปริมาณ Flavonoid (มิลลิกรัม/ลิตร)	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	
					อนุมูลอิสระ DPPH (ร้อยละ)	อนุมูลอิสระ Phen (มิลลิกรัม/ลิตร)
ไวน์	0.70±0.01 ^a	3.81±0.00 ^a	0.33±0.01 ^b	16.19±0.01 ^b	47.65±0.06 ^b	151.43±0.03 ^a
เชอร์รี่	0.61±0.03 ^b	0.97±0.06 ^c	0.39±0.00 ^a	17.31±0.05 ^a	55.54±0.01 ^a	143.21±0.03 ^b
พีชอำพัน	0.63±0.00 ^b	1.22±0.12 ^b	0.04±0.01 ^e	11.37±0.03 ^d	9.75±0.02 ^d	5.01±0.35 ^f
พีชสีทอง	0.67±0.01 ^{ab}	0.05±0.01 ^e	0.15±0.01 ^d	9.42±0.04 ^e	3.90±0.03 ^e	5.89±0.01 ^e
บ๊วย	0.63±0.00 ^b	0.02±0.01 ^e	0.21±0.01 ^c	9.47±0.06 ^e	0.58±0.01 ^f	7.18±0.05 ^d
รวม (พีช บ๊วย)	0.64±0.03 ^b	0.57±0.03 ^d	0.15±0.01 ^d	15.13±0.02 ^c	23.86±0.00 ^c	41.92±0.02 ^c

หมายเหตุ : a , b , c, d, e หมายถึง ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวดิ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4 พบว่าไวน์ไวน์และไวน์เชอร์รี่มีปริมาณแคโรทีนอยด์ ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์สูง และมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงเมื่อเทียบกับไวน์ชนิดอื่นๆ ($p < 0.05$) โดยเฉพาะอย่างยิ่งแอนโทไซยานิน (anthocyanins) ซึ่งแอนโทไซยานิน จัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds) โดยแอนโทไซยานิน เป็นสารสีที่พบได้ทั่วไปในดอกไม้ ผลไม้บางชนิด ใบหรือลำต้นของพืชบางชนิดที่มีสีแดงตั้งแต่สีแดงถึงน้ำเงินเข้ม โดยสีของแอนโทไซยานินจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะความเป็นกรด-ด่างในสภาพที่เป็นกรดมีค่าพีเอช (pH) ต่ำกว่า 3 (เป็นกรดสูง) จะทำให้แอนโทไซยานินมีสีแดง ในสภาพที่ค่อนข้างเป็นกลาง หรือมีค่าพีเอชประมาณ 7-8 แอนโทไซยานินจะมีสีม่วง และเมื่อสภาพเป็นเบสหรือมีค่าพีเอชมากกว่า 11 (เป็นเบสสูง) แอนโทไซยานินจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งเกิดจากการรีโชนแซนซ์ของประจุบวกของไอออนฟลาโวนิลเลียมทำให้พีเอชมีผลต่อคุณสมบัติของแอนโทไซยานินด้วย [22]

การหาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของเคอร์ซีติน คำนวณได้จาก

กราฟมาตรฐานของเคอร์ซีติน ($Y=0.0125x+0.0007$; $r^2=0.999$) จะให้เห็นว่าไวน์เชอร์รี่มีปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์สูงที่สุด และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับไวน์ชนิดอื่นๆ ซึ่งฟลาโวนอยด์เป็นสารเมแทบอไลต์ชั้นทุติยภูมิในพืชสร้างจากกรดอะมิโนที่มีวงแหวน (aromatic amino acids) ได้แก่ phenylalanine, tyrosine และ malonate โดยทำหน้าที่เป็นสารให้สีที่สำคัญในพืชช่วยในการกรองรังสีอัลตราไวโอเล็ตและการช่วยตรึงไนโตรเจน ฟลาโวนอยด์พบได้ในผัก ผลไม้ ธัญพืช พืชตระกูลถั่ว เครื่องเทศ สมุนไพร ลำต้น กิ่งก้าน ดอก และเมล็ด รวมถึงเครื่องดื่มบางชนิด เช่น ชา โกโก้ เบียร์ และไวน์ เป็นต้น [20], [21]

ในการวัดความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระไวน์ไวน์และไวน์เชอร์รี่ มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงเมื่อเทียบกับไวน์ชนิดอื่น ๆ ($p < 0.05$) และจะเห็นได้ว่าไวน์ที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงจะมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงด้วยเช่นกัน ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกนั้นจะทำหน้าที่ทั้งเป็นสารให้อิเล็กตรอนหรือเป็นสารให้ไฮโดรเจนและกำจัด

ออกซิเจนที่อยู่ในรูปแอคทีฟ ทำให้สารประกอบฟีนอลิก มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ [20], [21]

การวัดความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยวิธี DPPH เป็นวิธีที่สามารถแยกแยะจัดอันดับอนุมูลอิสระที่มีความไวสูงได้ และนอกจากนี้โครงสร้างทางเคมีของ DPPH ทำให้สารอนุมูลที่มีฤทธิ์แรงแต่มีขนาดใหญ่บางสารไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาขจัดอนุมูลหรือเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าความเป็นจริง ทั้ง ๆ ที่สารต้านอนุมูลอิสระนั้นมีฤทธิ์ที่ดีในการขจัดอนุมูลเปอร์ออกไซด์ และสารรีดิวซ์สามารถทำให้สี DPPH จางลงได้อีกด้วย [20], [21]

การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี Phenanthroline สามารถวัดได้ด้วยการอาศัยการเปรียบเทียบความสามารถในการรีดิวซ์โลหะได้โดยอาศัยการรีดิวซ์เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ให้ไปเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) แล้วทำปฏิกิริยากับ 1-10-phenanthroline เกิดเป็นสารเชิงซ้อนสีแดงซึ่งฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระนั้นจะแปรผันตามค่าการดูดกลืนแสงที่สามารถแสดงถึงการเป็นตัวรีดิวซ์หรือการต้านอนุมูลอิสระที่ติดนั่นเอง [20], [21]

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธี DPPH และ Phen ในการทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ เนื่องจากทั้งสองวิธีเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ยุ่งยาก ใช้เวลาในการวิเคราะห์สั้น และใช้สารปริมาณน้อยในการวิเคราะห์ซึ่งวิธี DPPH นั้น เป็นวิธีที่นิยมอย่างแพร่หลายโดยมี โดยความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจะแสดงค่าออกมาเป็นค่า IC_{50} ส่วนวิธี PHEN นั้น ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระนั้นจะแปรผันตามค่าการดูดกลืนแสงที่สามารถแสดงถึงการเป็นตัวรีดิวซ์หรือการต้านอนุมูลอิสระที่ติดนั่นเอง และในการทดลองนี้ยังพบว่า ไวน์ผลไม้เมื่อทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และวิธี Phen ให้ผลการทดลองในทิศทางเดียวกัน

4. สรุป

สภาวะการหมักไวน์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน สามารถหมักไวน์ได้ปริมาณแอลกอฮอล์สูงสุดร้อยละ 10 โดยปริมาตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ทั่วไปของผลิตภัณฑ์ไวน์ คือ ปริมาณแอลกอฮอล์ไม่เกิน 15 ดีกรี ไวน์ผลไม้เมืองหนาว 5 ชนิดและผลไม้รวม (พีช บ๊วย) มีปริมาณของแคโรทีนอยด์แอนโทไซยานิน สารประกอบ ฟลาโวนอยด์ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดแตกต่างกัน จึงทำให้มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และวิธี Phen แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยไวน์เชอรี่ และไวน์โหนดมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูง รองลงมาคือไวน์ผลไม้รวม และสุดท้ายที่มีความใกล้เคียงกัน คือ ไวน์พีชอำพัน ไวน์พีชสีทอง และไวน์บ๊วย นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าในไวน์แต่ละชนิดเมื่อปริมาณแคโรทีนอยด์ ปริมาณแอนโทไซยานินปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์สูง จะทำให้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงขึ้นและมีสมบัติต้านการเกิดออกซิเดชันมากขึ้นด้วย ดังนั้นจึงพอสรุปได้ว่าในไวน์ผลไม้เมืองหนาวมีสารต้านอนุมูลอิสระที่อาจส่งผลดีต่อสุขภาพของผู้ดื่ม แม้ว่าการดื่มไวน์อาจมีประโยชน์ต่อสุขภาพหลายประการ แต่การดื่มในปริมาณที่มากเกินไปอาจส่งผลกระทบในทางลบได้ ดังนั้นควรดื่มในปริมาณที่เหมาะสม โดยมีปริมาณการที่แนะนำคือ ผู้ชายควรดื่มไม่เกินวันละ 2 แก้ว หรือประมาณ 250-300 มิลลิลิตร และผู้หญิงควรดื่มไม่เกินวันละ 1 แก้ว หรือประมาณ 125-150 มิลลิลิตร

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์, สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่อำนวยความสะดวกงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Phruephat Songtieng. (2020, February 23). Fruit wine. [Online]. Available: <https://www.drinksandco.co.th/knowledge/FruitWine>
- [2] Department of Industrial Promotion. (2000, January 15). Fruit wine industry. [Online]. Available: <https://www.ryt9.com/s/ryt9/231650>
- [3] Ministry of Finance. MOF Tax Clinic. (2016). Fruit wine tax clinic. [Online]. Available: <http://taxclinic.mof.go.th>
- [4] Tracey E. Sieberta,b, Sheridan R. Bartera, Miguel A. de Barros Lopesb, Markus J. Herdericha, I. Leigh Francisa, “Investigation of ‘stone fruit’ aroma in Chardonnay, Viognier and botrytis Semillon wines,” Food Chemistry, vol. 43, pp. 286-296, 2018.
- [5] Wei Jianping, Zhang Yuxiang, Yuan Yahong, Dai Lu, Yue Tianli, “Characteristic fruit wine production via reciprocal selection of juice and non-*Saccharomyces* species,” Food Microbiology, vol. 79, pp. 66-74, 2019.
- [6] Uroš Čakara, Aleksandar Petrovičb, Boris Pejinc, Mira Čakara, Marijana Živkovićd, Vlatka Vajsd, Brižita Đorđevića, “Fruit as a substrate for a wine: A case study of selected berry and drupe fruit wines,” Scientia Horticulturae, vol. 244, pp. 42-49, 2019.
- [7] Yang Hui , Su Wen, Wang Lihong, Wang Chuang, Wang Chaoyun, “Molecular structures of nonvolatile components in the Haihong fruit wine and their free radical scavenging effect,” Food Chemistry, vol. 353, pp. 1292-1298, 2021.
- [8] Royal Project Foundation. (2021, November 3) . winter fruit. [Online]. Available: <http://www.royalprojectmarket.com/productDetail.php?pid=215>
- [9] You Bangyan, Yang Shiyang, Yu Jiawen, Xian Wenyan, Deng Yu, Huang Wei, Li Wu, Yang Ruili, “Effect of thermal and dry salt-curing processing on free and bound phenolics and antioxidant activity in *Prunus mume* fruits together with the phenolic bioaccessibility,” Food Science and Technology, vol 145, pp. 111355, 2021.
- [10] Jirawan Rojanapornpip. (2021, October 10). plum. [Online]. Available: https://www.sentangsedtee.com/farming-trendy/article_98062. (2021).
- [11] Jiawen Yua, Wu Lic, Bangyan Youa, Shiyang Yanga, Wenyan Xiana, Yu Denga, Wei Huangab, Ruili Yang, “Phenolic profiles, bioaccessibility and antioxidant activity of plum (*Prunus Salicina* Lindl),” Food Research International. vol.143, pp. 110300, 2021.
- [12] Chongting Guo, Jinfeng Bi, Xuan Li, Jian Lyu, Ye Xu, Jiaying Hu, “Investigation on the phenolic composition, related oxidation and antioxidant activity of thinned peach dried by different methods,” Food Science and Technology. vol. 147. pp.111573, 2021
- [13] Janja Kristl, Metka Slekovec, Stanislav Tojnko, Tatjana Unuk. “Extractable antioxidants and non-extractable phenolics in the total antioxidant activity of selected plum cultivars (*Prunus domestica* L.): Evolution during on-tree ripening,” Food Chemistry. vol.125, pp. 29-34, 2011

- [14] December town. (2021, October 20) plum. [Online]. Available: <http://decembertown.com/%E0%B8%A5%E0%B8%B9%E0%B8%81%E0%B9%84%E0%B8%AB%E0%B8%99/>
- [15] Xiaoxi Liao, Phillip Greenspan, Ronald B. Peg, "Characterizing the phenolic constituents and antioxidant capacity of Georgia peaches," Food Chemistry. vol. 271, pp. 345-353, 2019
- [16] Han Xueyuan, Peng Qi, Yang Huanyi, Hu Baowei, Shen Chi, Tian Rungang, "Influence of different carbohydrate sources on physicochemical properties and metabolites of fermented greengage (*Prunus mume*) wines," Food Science and Technology. vol.121(108929), pp.1-8, 2020.
- [17] Christophe Aubert, Guillaume Chalot, "Physicochemical characteristics, vitamin C, and polyphenolic composition of four European commercial blood-flesh peach cultivars (*Prunus persica* L. Batsch)," Food Composition and Analysis. Vol. 86, pp. 103337, 2020.
- [18] Hu, Q.P. and J.G. Xu. "Profiles of carotenoids, anthocyanins, phenolics, and antioxidant activity of selected color waxy corn grains during maturation" J. Agri. Food Chem. vol. 59, pp. 2026-2033, 2011.
- [19] Ermes Lo Piccolo, Fabrizio Araniti, Marco Landi, Rossano Massai, Lucia Guidi, Maria Rosa Abenavoli, Damiano Remorini, "Girdling stimulates anthocyanin accumulation and promotes sugar, organic acid, amino acid level and antioxidant activity in red plum: An overview of skin and pulp metabolomics," Scientia Horticulturae, vol. 280, pp. 109907, 2021.
- [20] Suratchana Dathong and Suthira Maneechai, "Antioxidant Activities of *Crateva adansonii* DC. subsp. *trifoliata* and their degradation kinetics," Food Research International, 50(2). pp. 691-69, 2013.
- [21] Rungthiwa Wongpisanrit, Wichan Pongsankeeree, "Antioxidant Activity of 3 Varieties of Corn Milk," RMUTP Research Journal, Vol. 14, pp. 48-57, 2020.
- [22] Suphaphon Fakngoen and Sirapapa Meerod, "Extraction and Separation of Anthocyanins from *Carissa carandas* L." report due to meeting National Academic Year No. 4 . research institute Kamphaeng Phet Rajabhat University. pp. 1002- 1011, 2017.

Computational Efficiency for Calculating Determinants of Block Matrices

Puttha Sakkaplangkul and Nattaporn Chuenjarern*

School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
1 Chalongkrung 1 Alley, Ladkrabang, Bangkok 10520

Received 1 April 2022; Revised 26 December 2022; Accepted 9 February 2023

Abstract

In this paper, we study a method for calculating the determinant of a matrix divided into four submatrices using the formula of Schur. The purpose of this study is to analyze and provide the formula for the number of flops for matrix determinants consisting of submatrices of different sizes. The results are analyzed based on matrices with a submatrix on the first main diagonal of size 1×1 . It shows that using the formula of Schur to calculate the determinant gives the number of flops close to calculating the determinant directly using the Gaussian elimination method. We also prove the relationship between the number of flops of determinant calculations by using the formula of Schur and direct determinant calculations using the Gaussian elimination method. Numerical experiments are presented, and the conclusions of the theoretical analysis are well supported.

Keywords: Determinant; Block matrix; Formula of Schur; Gaussian elimination method; Floating-point operations per second

* *Corresponding Author. Tel.: +666 2329-8000 (Ext.6188), E-mail Address: nattaporn.ch@kmitl.ac.th*

1. Introduction

The determinant of a matrix is one of the main contents in matrix theory or linear algebra. It is very useful in several areas of sciences and engineering; for example, solving a system of linear equations, finding the area and volume of an object, and finding integrals of a multivariable function. For a small size of a matrix, the determinant can be calculated by the Leibniz formula and Laplace expansion. However, there is some complexity to use the mentioned methods to calculate the large size of a matrix. In [1], the authors have listed methods that can be used to find the determinant of a matrix, for instance, the LU decomposition method, QR decomposition method and Cholesky decomposition method. Moreover, they also proposed a new method for determinant calculation that is faster than the existing method. However, it may occur to us how we might compare the performance of the procedure for computing the determinant. One way to evaluate the performance is counting a floating-point operations per second (flops).

Some studies have proposed a novel way for computing the determinant of a matrix with the idea of reducing the size of a matrix; for example, Chio method [2], Dodgson condensation [3] and Reduce order method [4]. A block matrix is a matrix that has been partitioned into submatrices called blocks. Partitioning will reduce the size of the original matrix to small submatrices. We may consider

matrix partitions to be the idea of reducing the size of a matrix. There are many methods for finding a determinant of block matrices. The formula of Schur, [5], [6], is one of the popular methods to evaluate the determinant of a block matrix. It is an essential technique in numerical analysis, statistics, and matrix analysis. The general idea of this method is to first partition a matrix into four blocks where the first main diagonal is a square and nonsingular matrix. Then, the determinant of the original matrix is the product of the determinants of submatrices described in the formula of Schur. So, this method allows us to calculate the determinant of small matrices instead of computing a large size of the original matrix. The formula of Schur and the original method should give the same results for calculating the determinant. However, we may want to know that which method has better performance.

In this paper, we present the exact formula of the number of flops to compute the determinant based on the formula of Schur. In determinant computation, we also examine the size of the diagonal submatrices in relation to the number of flops. Moreover, we compare and analyze the performance of determinant calculations resulting in the formula of Schur to the Gaussian elimination method.

The rest of the paper is organized as follows: we first discuss related definitions and theorems that we will use throughout the paper in Section 2. In the results section, we demonstrate the main

theorems showing the formula of flops for computing the determinant of a block matrix by the formula of Schur, including the comparison efficiency of the methods. The summary of this work will be discussed in the discussion and conclusion sections.

2. Research Methodology

In this section, we focus on an $m \times m$ block matrix, M , partitioned into four submatrix blocks as follows

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, \quad (1)$$

where A, B, C and D are block matrices having sizes $n \times n$, $n \times (m-n)$, $(m-n) \times n$, $(m-n) \times (m-n)$, respectively.

Theorem 1 (Schur complement) [5], [6], [7] If the matrix A is invertible, then Schur complement of a block matrix (1) is defined by

$$M / A = D - CA^{-1}B. \quad (2)$$

In particular, one of the applications of the Schur complement is to compute the determinant of block matrices and allow us to derive useful formulae for the factorization of a block matrix [8], [9]. The Schur complement was presented by Schur in 1918 [5].

Theorem 2 (Formula of Schur) [5], [7] If the matrix A is invertible, the

determinant of a block matrix (1) is given by

$$\det(M) = \det(A) \det(D - CA^{-1}B). \quad (3)$$

In the case of reading acquisition, several properties and its applications of the Schur complement are available in the literature [5], [6], [7], [9] and references therein.

Definition 3 (Floating-point operations per second (flops)) A flops is a norm to measure the performance of a computer operating calculation in a mathematical floating point.

In other words, flops tells us the number of operations to reach the command in the program. The fewer flops, the better computer performance.

The principle for counting flops for an operator in mathematics; summation, subtraction, multiplication and division, is counting one operator to be one flops. For example, $2 + 3$ requires 1 flops, $4 \times (5 + 2)$ requires 2 flops. In a matrix algebra, each operation requires more flops than a single number because one matrix has more than one entry to operate. **Table 1** shows examples of flops involving vector and matrix operations. More examples can be found in [10].

Define k is a real number, C is a matrix of size $n \times n$, A is a matrix of size $m \times n$, B is a matrix of size $n \times p$, u and v are column vectors of size n and w is a row vector of size m .

Table 1 The number of flops for computing some vector and matrix operations

	Product	Summation	Flops
kv	n	-	n
kA	nm	-	nm
$v^T u$	n	$n-1$	$2n-1$
vw	nm	-	nm
Au	nm	$m(n-1)$	$2nm-m$
AB	mnp	$mnp(n-1)$	$2mnp-mp$

Theorem 4 (Flops of Matrix Inversion) [11] If an invertible square matrix is of size $m \times m$, then the required number of operations to find its inverse by adapted Gaussian elimination method is

$$3m^3 - m \text{ when } m > 1.$$

Theorem 5 (Flops of Determinant by Gaussian Elimination Method) [12] Suppose that a square matrix M of size $m \times m$, defined in (1), when $m > 1$. The required number of operations to find its determinant by Gaussian elimination method is

$$\frac{1}{6}(-6 + 5m - 3m^2 + 4m^3).$$

3. Results

In this section, we focus on an $m \times m$ block matrix, M , defined in (1), where $m > 1$. We first analyze the relationship between the partition of block matrices and the number of flops in the determinant calculation. Here we partition the matrix M into four submatrix blocks as given in (1). Without loss of generality, we may assume that the submatrix block A is a square matrix whose size is $n \times n$ where $1 \leq n \leq m-1$. Moreover, a flops of

calculating the determinants will be counted based on the Gaussian elimination method while we use the conventional approach in **Theorem 4** to calculate the number of flops of the matrix inversion. In this paper, the number of flops will be studied in calculating the determinant using and not using the formula of Schur. In other words, we apply the Gaussian elimination method to calculate the determinant of the original matrix, M , comparing to the determinant of such matrix by using the formula of Schur. Our results are shown as below:

In the following, we present a computer algorithm of determinants calculation by the formula of Schur.

Algorithm : Method of the formula of Schur

Step 1 Insert order of matrix M and order of the submatrix A defined in (1)

Step 2 Create a loop for calculating A^{-1} by **Theorem 4**

Step 3 Create a loop for calculating $A^{-1}B$

Step 4 Create a loop for calculating $CA^{-1}B$

Step 5 Create a loop for calculating $D - CA^{-1}B$

Step 6 Create a loop for calculating $\det(D - CA^{-1}B)$ and $\det(A)$ by **Theorem 5**

Step 7 Calculate the determinant $\det(M)$ from the result in Step 6 by **Theorem 2**

Theorem 6 Suppose a square matrix M of size $m \times m$, is partitioned as a block matrix (1). If the matrix A of size $n \times n$ is invertible, then the number of flops of the matrix M using the formula of Schur is given by the function flop as

$$\text{flop}(n) = \begin{cases} \frac{1}{6}\beta & \text{for } n=1 \\ \frac{1}{6}(-6+\alpha+\beta) & \text{for } 2 \leq n \leq m \end{cases}$$

where $\alpha = 18n^3 - 6n$ and

$$\beta = 5m - 3m^2 + 4m^3.$$

Proof: As A is an $n \times n$ invertible matrix, the number of flops to calculate the inverse of A

$$\begin{cases} 1 & \text{for } n=1 \\ 3n^3 - n & \text{for } 2 \leq n \leq m \end{cases} \quad (3)$$

Next, to calculate the number of flops for a matrix $D - CA^{-1}B$, it consists of the following 3 steps: First, calculate flops of $A^{-1}B$. Second, calculate flops of $C(A^{-1}B)$. Third, calculate flops of $D - CA^{-1}B$. Therefore, the number of flops used to find the matrix $D - CA^{-1}B$ is equal to

$$n(m-n)(2m-1). \quad (4)$$

Moreover, the flops count for computing the determinant of the matrix $D - CA^{-1}B$ requires

$$\frac{1}{6}(-6 + 5(m-n) - 3(m-n)^2 + 4(m-n)^3) \text{ flops.} \quad (5)$$

Finally, the number of flops for the multiplication between $\det(A)$ and $\det(D - CA^{-1}B)$ requires

$$1 \text{ flops} \quad (6)$$

Adding (3) - (6), a total of flops for computing the determinant when the size of the matrix A is 1×1

$$\frac{1}{6}(5m - 3m^2 + 4m^3),$$

otherwise it requires total of flops

$$\frac{1}{6}(-6 - 6n + 18n^3 + 5m - 3m^2 + 4m^3).$$

Proposition 7 Given M is a square matrix whose submatrix block A has a size of 1×1 , defined in equation (1). The difference of the number of flops in calculating the determinant of the matrix M by using the Gaussian elimination method and the formula of Schur is 1.

Proof: Let M be a square matrix of size 1×1 , whose submatrix block A has a size of 1×1 . Without loss of generality, we may assume that $m > 1$. By **Theorem 5**, the number of flops for computing the determinant of the matrix M by Gaussian elimination method is $\frac{1}{6}(-6 + \beta)$. By

Theorem 6, the number of flops for computing the determinant by formula of Schur is $\frac{\beta}{6}$. Consider the difference of the number of flops of both methods is 1, as desired.

Theorem 6 gives the formula of flops measurements for calculating the determinant of a block matrix in the formula of Schur. Because determinant calculations involve basic algebraic operations, the size of the matrix affects the number of algebraic operations. The following experiments will demonstrate the number of flops and the partitioning of a matrix using the formula of Schur.

Table 2 The number of flops for computing the determinant of a 7×7 matrix versus with several sizes of the block matrix A

Sizes of the submatrix block A	The number of flops
1	210
2	231
3	287
4	397
5	579
6	851

Table 2 shows the relationship between the number of flops for computing the determinant of a 7×7 matrix M and the partition of the matrix M having four submatrix blocks. We perform our experiment using the submatrix block A of size from 1×1 to 6×6 and count the number of flops via the formula in **Theorem 6**. This shows that the operation counts increase dramatically as the size of the submatrix block A increases. In contrast to the number of flops to calculate the determinant of the matrix M directly based on the Gaussian elimination method requires only 209 flops. **Figure 1** also shows a semilogy plot of the relationship between the size of the submatrix and the number of flops for calculating the determinant of matrices. In this experiment, we fix the original matrix M of several sizes 7×7 and 20×20 matrices. The obtained results are consistent with what we discussed earlier. That is, the size of the submatrix block is directly related to the number of flops in the determinant calculation.

Moreover, we see that the number of flops when the submatrix block A of size 1×1 is close to the number of flops when calculating the determinant directly using the Gaussian elimination method.

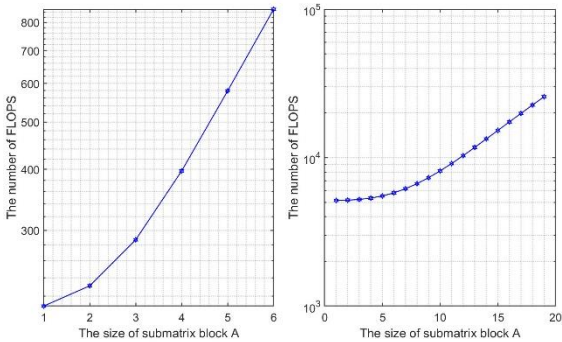


Figure 1 The number of flops for computing the determinant of matrices versus with several sizes of the block matrix A : Left, M is a 7×7 matrix, Right, M is a 20×20 matrix.

That raises the question of the number of flops will be when the matrix M is larger and the submatrix block A has a size of 1×1 . Further details are described in **Table 3**.

Table 3 The number of flops for computing the determinant of matrices with different dimensions where the size of the block matrix A is 1×1

Sizes of matrix M	The number of flops	
	With Gaussian elimination method	With Formula of Schur
2×2	4	5
3×3	15	16
4×4	37	38
5×5	74	75
6×6	130	131
7×7	203	210

Sizes of matrix M	The number of flops	
	With Gaussian elimination method	With Formula of Schur
8×8	315	316
9×9	452	453
10×10	624	625

Table 3 shows the number of flops for computing the determinant of the matrix M of several sizes by using the formula of Schur and by using the Gaussian elimination method computing the determinant directly. In the experiment, we consider the matrix M partitioned into four submatrix blocks given in equation (1) of size from 1×1 where its submatrix block A has a size of 1×1 . **Figure 2** demonstrates a semilogy plot of the comparison the number of flops for calculating the determinant of matrices between using and not using the formula of Schur where the submatrix block A is of size 1×1 . In this experiment, we use the original matrix M of several sizes from 2×2 to 20×20 .

From **Table 3** and **Figure 2**, we see that the number of flops of both methods are similar to each other and have the same effect in the same direction. In other words, the number of flops between using and not using the formula of Schur is increasing when the size of the matrix M is increasing, and the difference in the number of flops for both methods is 1 regardless of the size of the matrix M , which confirms our result in **Proposition 7**. Moreover, if the size of the matrix increases, then the basic manipulations can be applied to the determinant of the

matrix. This results in an increase in the number of flops in both methods, which is shown in **Table 3**.

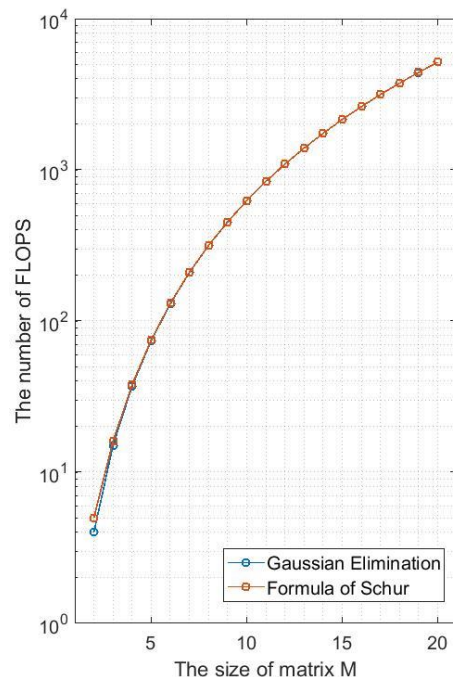


Figure 2 The number of flops for computing the determinant of matrices with different dimensions where the size of the block matrix A is 1×1 for both methods.

4. Discussion

The Schur complement is a method to find the determinant of a matrix by using submatrix blocks. This method should give a smaller number of flops than the Gaussian elimination method of calculating the determinant directly without dividing the matrix into submatrices. In the formula of Schur, although calculating the determinant of submatrices gives smaller numbers of

flops than the original matrix, calculating the inverse of the submatrices and the multiplication operations of the submatrices in the formula will produce more flops. The result is that the increasing number of flops compensates for the decrease in the number of flops from computing determinants of submatrices. That is why the number of flops for both methods is not significantly different.

In addition, any square matrices can be broken into four submatrix blocks. In this work, we consider submatrices in a partitioned matrix having the main diagonal blocks square matrices. These submatrices identified in (1) can be of various sizes depending on a partition of the original matrix. We found that calculating the determinant of matrices using the formula of Schur gives the best efficiency in terms of the number of flops when the submatrix block A is of size 1.

To develop strategies to lessen the amount of flops than the existing approach, one can find an inversion matrix that produces less flops than the technique employed in this study. Another strategy that we are researching is the pattern of splitting the matrix into more than 4 blocks.

Remark. Moreover, there is another way to compare the performance of the methods by using the time execution. However, we focus on the operation count or flops for calculating the determinant of a matrix. Since the time execution depends on coding techniques, we may omit this approach to compare the performance of the calculation.

5. Conclusion

In this paper, the authors study a method for determining the determinant by the formula of Schur of a matrix written as a 2×2 block matrix. We provide the exact formula for the number of operations (flops) for calculating the determinant of a matrix by the formula of Schur. This formula is used to determine the efficiency of determinant calculations on each partition of a block matrix. The results show that the partitioning of matrix blocks directly affects the number of flops in the determinant calculation by using the formula of Schur. In addition, the matrix M with a submatrix on the first main-diagonal blocks of size 1×1 yields the smallest number of flops relative to the different sizes. The authors further investigate the efficiency of the determinant calculation of block matrices with such properties when the initial matrix size is larger. In this case, we calculate the determinant of the matrix by Gaussian elimination method and the formula of Schur and compare the number of flops for each method. The study found that the number of flops obtained by the formula of Schur whose the first submatrix on the main diagonal is of size 1×1 is as good as the Gaussian elimination method. All experiment results illustrated confirm our theoretical results.

6. Acknowledgement

The authors would like to thank the referee for carefully reading our manuscript and providing such constructive comments and suggestions that improved the paper's quality into its current form.

7. References

- [1] O. Rezaifara, H. Rezaeeb, "A new approach for finding the determinant of matrices," *Applied Mathematics and Computation*, pp. 1445- 1454, 2007.
- [2] F. Chiò, "Mémoire sur les fonctions connues sous le nom De Résultantes Ou De Déterminans.," *A. Pons*, , 1853.
- [3] C. Dodgson, "Condensation of Determinants, Being a New and Brief Method for Computing their Arithmetical Values," *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 15, pp. 150-155, 1866.
- [4] M. Bayat, H. Faal, "A New Method for Computing Determinants By Reducing The Orders By Two," *Caspian Journal of Mathematical Sciences (CJMS)*, pp. 16-24, 2018.
- [5] J. Schur, "Über Potenzreihen, die im Innern des Einheitskreises beschränkt sind," *Journal für die reine und angewandte Mathematik (Crelles Journal)*, vol. 148, pp. 122-145, 1918.
- [6] R. W. Cottle, "Manifestations of the Schur complement," *Linear Algebra and its Applications*, vol. 8, no. 3, pp. 189-211, 1974.
- [7] E. V. Haynsworth, "Determination of the inertia of a partitioned Hermitian matrix," *Linear Algebra and its Applications*, vol. 1, no. 1, pp. 73-81, 1968.
- [8] L. Vandenberghe, S. P. Boyd , *Convex optimization*, Cambridge University Press Cambridge, 2004.
- [9] F. Zhang, *The Schur complement and its applications*, Springer Science & Business Media, 2006.
- [10] R. Hunger, *Floating Point Operations in Matrix- Vector Calculus*, Munich: Technische Universität München, 2007.
- [11] H. Arsham, M. Oblak , "Matrix inversion: A computational algebra approach," *International Journal of Mathematical Education*, pp. 599-605, 1996.
- [12] G. Williams, *Linear Algebra with Applications*, Alternate Edition, Jones & Bartlett Learning, 2011.

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไอศกรีมเสริมใยอาหารจากเฟี้ยวเร่ส้มโอ

จารุพัฒน์ กาญจนรงค์ และ วิจิตรา ปล้องบรรจง*

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ (ศาลายา)

96 หมู่ 3 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

รับบทความ 2 พฤษภาคม 2565 แก้ไขบทความ 27 ธันวาคม 2565 ตอรับบทความ 9 กุมภาพันธ์ 2566

บทคัดย่อ

การพัฒนาไอศกรีมเสริมใยอาหารจากเฟี้ยวเร่ส้มโอโดยใช้เนื้อส้มโอเป็นสารให้ความคงตัวในไอศกรีม 4 สูตร คือ ร้อยละ 5, 7, 10 และ 15 พบว่า การเพิ่มปริมาณเนื้อส้มโอทำให้อยู่ยละการขึ้นฟูและค่าความหนืดเพิ่มขึ้น แต่ทำให้อัตราการละลายลดลง โดยไอศกรีมที่ไม่มีการผสมเนื้อส้มโอยังคงมีความชอบโดยรวมสูงสุดและเมื่อเพิ่มปริมาณเนื้อส้มโอลงไปทำให้การยอมรับโดยรวมมีค่าลดลง ซึ่งไอศกรีมสูตรที่มีเนื้อส้มโอ 7% เป็นสูตรที่ได้รับการยอมรับโดยรวมสูงสุด (6.28 ± 1.88) โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสูตรมาตรฐาน มีค่าร้อยละการขึ้นฟู $41.15 \pm 0.59\%$ ค่าความหนืด 698.02 ± 5.56 cps มีค่าการละลายที่ 30 นาที เท่ากับ $22.23 \pm 0.24\%$ นอกจากนี้การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของไอศกรีมที่มีเนื้อส้มโอ 7% พบว่า มีค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ 25.28 ± 1.88 องศาบริกซ์ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.35 ± 0.30 มีปริมาณความชื้นและเส้นใยร้อยละ 71.72 และ 7.73 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไอศกรีมสูตรควบคุมที่ใช้สารทางการค้า (CREMODAN® SE 709-M; Danisco Thailand Co., Ltd.) เป็นสารให้ความคงตัว พบว่า ไอศกรีมที่ผสมส้มโอมีปริมาณเส้นใยสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเก็บรักษาที่ -20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 วัน พบว่า จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและแบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์มอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของประกาศกระทรวงสาธารณสุข

คำสำคัญ : ส้มโอ; ไอศกรีม; ใยอาหาร; สารให้ความคงตัว; เฟี้ยวเร่

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1796 9536, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: vijitra.plo@rmutr.ac.th

Product Development of Ice Cream Fiber-Fortified from Pomelo Puree

Jurapat Kanjanarong and Vijitra Plongbunjong*

Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin (Salaya)
96 Moo.3 Salaya District Phutthamonthon, Nakhon Pathom 73170

Received 2 May 2022; Revised 27 December 2022; Accepted 9 February 2023

Abstract

Development of fiber-fortified ice cream product from pomelo puree with a stabilizer in 4 recipes of 5, 7, 10 and 15 % was demonstrated. The results showed that the overrun and viscosity value of ice cream increased whereas the melting rate significantly decreased depended on pomelo content. Ice cream without pomelo puree remained the highest in sensory acceptance, and with the addition of pomelo puree, overall acceptance decreased. The ice cream formula with 7% pomelo puree was the highest overall acceptance (6.28 ± 1.88), with no statistically significant difference from the standard formula without pomelo puree added. Overrun was $41.15 \pm 0.59\%$, the viscosity was 698.02 ± 5.56 cps, and melting rate at 30 minutes was $22.23 \pm 0.24\%$. In addition, chemical analysis of 7% pomelo puree ice cream found that total soluble solids was 25.28 ± 1.88 °Brix, pH was 3.35 ± 0.30 , and moisture and fiber content were 71.72 and 7.73 percent respectively when compared to a controlled ice cream using a commercial substance (CREMODAN® SE 709-M; Danisco Thailand Co., Ltd.) as a stabilizer, it was found that pomelo puree -infused ice cream had significantly higher fiber content ($p \leq 0.05$). Also, the storage of pomelo ice cream at -20 °C for 12 days showed a lower total number of microorganisms and coliform bacteria than a standard criterion of the Ministry of Public Health.

Keywords : Pomelo; Ice Cream; Dietary Fiber; Stabilizer; Puree

* Corresponding Author. Tel.: +668 1796 9536, E-mail Address: vijitra.plo@rmutr.ac.th

1. บทนำ

ส้มโอจัดเป็นพืชตระกูลส้มที่มีเปลือกหนา นิยมรับประทานเป็นผลไม้สด หรือนำไปประกอบอาหารประเภทต่างๆ เป็นผลไม้ท้องถิ่นของจังหวัดนครปฐม โดยเฉพาะพื้นที่อำเภอนครชัยศรี สามารถปลูกส้มโอได้รสชาติดีจนเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย โดยพันธุ์ที่ได้รับการยอมรับและเป็นที่ต้องการของตลาดต่างประเทศ ได้แก่ พันธุ์ทองดี และชาวน้ำผึ้ง นอกจากนี้ ส้มโอนครชัยศรียังได้รับการขึ้นทะเบียน “ผลไม้บ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (Geographical Indication; GI)” จากกรมทรัพย์สินทางปัญญากระทรวงพาณิชย์ ซึ่งเป็นสิ่งที่บ่งบอกได้ชัดเจนถึงเอกลักษณ์ของท้องถิ่นได้เป็นอย่างดี

ส้มโอเป็นผลไม้ที่มีปริมาณน้ำตาลต่ำ มีปริมาณเพคตินเป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูงทั้งส่วนเนื้อและเปลือกส่วนสีขาวที่เรียกว่า อัลเบโด (Albedo) ซึ่งเพคตินมีคุณสมบัติช่วยให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีความคงตัว ทำให้เกิดเจลและเป็นอิมัลซิไฟเออร์ นอกจากนี้ เพคตินยังจัดเป็นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ในกลุ่มพรีไบโอติกชนิดหนึ่งที่ส่งผลดีต่อระบบขับถ่าย และช่วยลดความเสี่ยงจากมะเร็งลำไส้ใหญ่ได้ [1] ใยอาหารจากพืชตระกูลส้มมีประโยชน์ต่อสุขภาพ คือ สามารถช่วยลดคอเลสเตอรอล เพราะมีคุณสมบัติเป็นอิมัลชันที่สามารถจับน้ำและไขมัน ได้ดี [2] โดยสัดส่วนของใยอาหารที่ละลายน้ำและใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในส้มโอมีค่าใกล้เคียงกันคือ มีใยอาหารที่ละลายน้ำ 1 ส่วน และมีใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ 2 ส่วน อีกทั้งส้มโอยังมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ เช่น ฟลาโวนอยด์ และวิตามินซีที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) [3]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาไอศกรีมเพื่อสุขภาพที่มีน้ำตาลต่ำเสริมใยอาหารจากเนื้อส้มโอและใช้เนื้อส้มโอเป็นสารให้ความคงตัวในไอศกรีมทดแทนการใช้กาวกัม หรือสารให้ความคงตัวชนิดอื่นๆ ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ โดยพัฒนาไอศกรีมรูปแบบซอร์เบต ซึ่งเป็นของว่างซึ่งได้รับความนิยมทั้งชาวไทยและต่างประเทศ เนื่องจากมีกลิ่นรสที่ให้ความสดชื่นกับผู้บริโภค ไม่มีการเติมไขมันนมหรือกะทิ จึงมีความเป็นไปได้ที่

จะพัฒนาเป็นไอศกรีมเพื่อสุขภาพ ที่มีสารสำคัญที่เป็นประโยชน์ เหมาะกับกลุ่มผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพ สอดคล้องกับการเติบโตของตลาดไอศกรีมทั้งในและต่างประเทศที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี โดยศึกษาปริมาณเนื้อส้มโอที่เหมาะสมสำหรับผสมลงในไอศกรีมที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และจุลชีววิทยา นอกจากนี้มีการประเมินความพึงพอใจจากผู้บริโภค ดังนั้น จึงคาดว่าผลการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการต่อยอดทางธุรกิจให้กับผู้สนใจผลิตผลิตภัณฑ์ไอศกรีมเพื่อสุขภาพ โดยเฉพาะเกษตรกรผู้ปลูกส้มโอในจังหวัดนครปฐม และพื้นที่อื่นๆ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

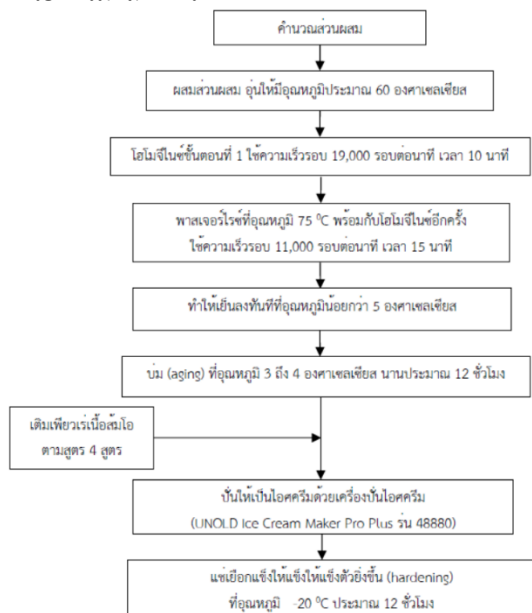
2.1 การเตรียมเพียวเร่จากเนื้อส้มโอเพื่อใช้เป็นสารให้ความคงตัวในไอศกรีม

เตรียมเพียวเร่ส้มโอจากผลส้มโอที่แก่เต็มที่ อายุประมาณ 8 เดือน นับจากวันเริ่มติดผลอ่อน โดยการล้างทำความสะอาดผลส้มโอสายพันธุ์ทองดี ปอกเปลือก และแกะเฉพาะเนื้อส้มโอ บรรจุในถุงลามิเนตอลูมิเนียมฟอยล์ เก็บรักษาด้วยวิธีการแช่เยือกแข็ง อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาทำเพียวเร่ โดยทำการปั่นผสมเนื้อส้มโอให้ละเอียดขณะที่เนื้อส้มโอเย็นจัดเพื่อป้องกันการเกิดรสม โดยควบคุมอุณหภูมิตลอดการปั่นที่ 5 องศาเซลเซียส และนำมารองแยกกากผ่านตะแกรงขนาด 40 เมช เพื่อให้ได้เนื้อเพียวเร่ที่เนียนละเอียด วัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ให้อยู่ในช่วง 12.3-12.9 องศาบริกซ์ และวัดค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วง 3.45-3.50 บรรจุเพียวเร่ใส่กล่องสุญญากาศเก็บไว้ที่ -20 องศาเซลเซียส เพื่อนำมาใช้เป็นสารให้ความคงตัวในการทำไอศกรีมส้มโอ

2.2 การผลิตไอศกรีมโดยใช้เพียวเร่ส้มโอเป็นสารให้ความคงตัว

เตรียมส่วนผสมในการทำไอศกรีมตามสัดส่วน [4]-[5] โดยใช้เพียวเร่ส้มโอเป็นสารให้ความคงตัว 4 ระดับ คือ ร้อยละ 5, 7, 10 และ 15 เปรียบเทียบกับ

สูตรมาตรฐานที่ใช้สารให้ความคงตัวทางการค้าร้อยละ 0.45 (CREMODAN® SE 709-M; Danisco Thailand Co., Ltd.) ทำการทดลองสูตรละ 3 ซ้ำ ซึ่งขั้นตอนการทำไอศกรีมแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตไอศกรีมจากเพียวเรสมีโอ

2.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัสในสูตรไอศกรีมที่ใช้เนือสั่มโอเป็นสารให้ความคงตัว

ขั้นตอนการประเมินทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมสั่มโอ วางแผนการทดลองแบบ Randomized completely block design (RCBD) โดยศึกษาความชอบของผู้ทดสอบต่อลักษณะด้านต่างๆของไอศกรีมสั่มโอ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ รสชาติ เนือสั่มผัส และความชอบโดยรวม [6]-[7] ให้คะแนนความชอบ (hedonic scale) มีระดับคะแนน 1-9 (1 = ไม่ชอบมากที่สุด 2 = ไม่ชอบมาก 3 = ไม่ชอบเล็กน้อย 4 = ไม่ชอบน้อยที่สุด 5 = เฉย ๆ 6 = ชอบน้อยที่สุด 7 = ชอบเล็กน้อย 8 = ชอบมาก 9 = ชอบมากที่สุด) โดยใช้ผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน เพศชาย 25 คน และหญิง 25 คน มีอายุอยู่ในช่วง 20-45 ปี วิเคราะห์ความแปรปรวนโดย Analysis of variance (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยการวิเคราะห์

ความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีในไอศกรีมสั่มโอ

นำไอศกรีมแต่ละสูตรวัดคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีในด้านต่างๆ ดังนี้ โดยไอศกรีมทุกสูตรมีการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2.4.1 การวิเคราะห์ค่าสี

วัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี Chroma Meter รุ่น CR-400/CR-410 โดยใช้พารามิเตอร์สี CIE Lab ผลลัพธ์ของการวัดค่าสีจะแสดงค่าในระบบอินเตอร์ (Hunter system) และพิกัดสี่เหลี่ยม (rectangular coordinate) โดยกำหนดหน่วยวัดสีที่สำคัญลักษณะ L* คือ ความสว่าง (lightness) a* คือ ค่าสีแดง b* คือ ค่าสีเหลือง โดยทดลอง 3 ซ้ำ บันทึกผล และคำนวณค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่าง

2.4.2 การวัดค่าความหนืดของไอศกรีมที่ผ่านการบ่ม

บรรจุไอศกรีมเต็มถ้วยพลาสติก วัดค่าความหนืดของไอศกรีมที่ผ่านการบ่มที่ 3-4 องศาเซลเซียส ปริมาตร 600 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องวัดความข้นหนืด (Brookfield Viscometer รุ่น DV-II+) ใช้หัววัดเบอร์ 2 ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างขณะวัดที่ 25 องศาเซลเซียส รายงานในหน่วยเซนติพอยส์ (cP) โดยทดลอง 3 ซ้ำ ในไอศกรีมทุกสูตร

2.4.3 การวัดค่าการขึ้นฟู (Overrun)

วัดค่าการขึ้นฟู โดยชั่งน้ำหนักไอศกรีมเหลวที่บรรจุเต็มถ้วย ขนาด 50 กรัม ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง และชั่งน้ำหนักไอศกรีมเมื่อแช่เยือกแข็งด้วยเครื่องทำไอศกรีมจนแข็งตัว เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตักไอศกรีมที่ได้ในถ้วยพลาสติกใบเดิม ชั่งน้ำหนักอีกครั้ง โดยค่าการขึ้นฟูสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้ [8]

ค่าการขึ้นฟู (ร้อยละ) = ((น้ำหนักไอศกรีมเหลว - น้ำหนักไอศกรีม)/ น้ำหนักไอศกรีม) x 100

2.4.4 การวัดอัตราการละลาย (Melt-down rate)

วัดโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส โดยก่อนการวิเคราะห์ ตัวอย่างไอศกรีมต้องผ่านกระบวนการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตักไอศกรีมปริมาณ 30 กรัม วางไว้บนกรวยกรองที่รองรับด้วยกระบอกตวง ทำการวัดปริมาตรของไอศกรีมที่หยดลงมาในกระบอกตวงทุก ๆ 10 นาที จนกว่าไอศกรีมจะละลายหมด [9]

2.4.5 การวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (⁰Brix)

วัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง refractometer

2.4.6 การวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH)

วัดค่าความเป็นกรดต่างโดยนำส่วนผสมไอศกรีมที่ได้ก่อนบ่ม มาวัดค่าความเป็นกรดต่างด้วยเครื่อง pH meter

2.4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติต่างๆของไอศกรีม

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติต่างๆได้แก่ ปริมาณความชื้น ตามวิธี AOAC 2000 ปริมาณใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber, TDF) ปริมาณใยอาหารที่ละลายน้ำ (Soluble dietary fiber, SDF) และใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble dietary fiber, IDF) [10]

2.4.8 การศึกษาคุณสมบัติทางจุลชีววิทยา

ศึกษาโดยตรวจสอบสมบัติทางจุลินทรีย์ วิเคราะห์จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total Plate Count) และวิเคราะห์แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ด้วยวิธี MPN [11]

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การศึกษาปริมาณเนื้อสัมผัสที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นส่วนให้ความคงตัวในไอศกรีม

ผลการศึกษาการใช้เพียวเร่ส്മโอเป็นส่วนให้ความคงตัวในไอศกรีมที่ 4 ระดับ คือ ร้อยละ 5, 7, 10 และ 15 เปรียบเทียบกับสูตรมาตรฐานที่ใช้สารให้ความคงตัวทางการค้า (CREMODAN® SE 709-M; Danisco Thailand Co., Ltd.) ร้อยละ 0.45 พบว่า ปริมาณเนื้อสัมผัสที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าร้อยละการขึ้นฟู และค่าความหนืดเพิ่มขึ้น แต่ทำให้อัตราการละลายลดลง ดังแสดงในตารางที่ 1 เนื่องจากในส്മโอประกอบไปด้วยสารเพคติน ซึ่งเป็นสารกลุ่มโพลีแซคคาไรด์ที่มีคุณสมบัติในการเพิ่มความข้นหนืดในผลิตภัณฑ์อาหาร โดยจะเกิดการพองตัวและส่งผลให้การละลายลดลง [9], [12]-[13] ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอาหารที่ต้องการความคงตัวได้ดียิ่งขึ้น [12], [14]

ตารางที่ 1 ร้อยละการขึ้นฟู (% Overrun) ความหนืด อัตราการละลายที่ 30 นาที ของไอศกรีมน้ำตาลต่ำเสริมใยอาหารจากส്മโอ

เนื้อส്മโอ (%)	Overrun (%)	ความหนืด (Cps)	อัตราการละลาย (%)
0	93.00±0.61 ^a	669.79±5.13 ^c	19.08±0.16 ^d
5%	37.05±0.73 ^e	650.64±4.75 ^d	19.00±0.20 ^d
7%	41.15±0.59 ^d	698.02±5.56 ^b	22.23±0.24 ^c
10%	43.54±0.20 ^c	698.44±5.87 ^b	24.30±0.13 ^b
15%	62.00±0.48 ^b	705.36±4.98 ^a	26.11±0.22 ^a

- ข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ ค่าที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันแต่ละคอลัมน์ บ่งบอกถึงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05)

3.2 การศึกษาปริมาณการใช้เพียวเร่ส้มโอที่ส่งผลต่อคุณลักษณะทางกายภาพด้านค่าสีของไอศกรีมที่ใช้เนื้อส้มโอเป็นสารให้ความคงตัว

จากการทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพด้านค่าสี พบว่า การวิเคราะห์ค่าสีของไอศกรีมใช้เนื้อส้มโอเป็นสารให้ความคงตัวปริมาณต่างกัน คือ ร้อยละ 0, 5, 7, 10 และ 15 เมื่อมีการผสมเพียวเร่ส้มโอเพิ่มขึ้นทำให้ค่า L มีแนวโน้มลดลง ค่า a* และ b* แนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณลักษณะทางกายภาพด้านค่าสี L a* b*

เนื้อส้มโอ (%)	ค่าสี		
	L	a*	b*
0	96.20±	-1.90±	6.19±
	0.43 ^a	0.41 ^d	0.35 ^d
5	94.09±	6.24±	4.71±
	0.32 ^b	1.03 ^c	0.85 ^c
7	90.72±	6.80±	4.28±
	1.00 ^c	0.81 ^c	1.01 ^c
10	86.80±	8.12±	2.15±
	1.31 ^d	1.00 ^b	1.12 ^b
15	83.13±	9.84±	1.05±
	0.62 ^e	0.19 ^a	1.66 ^a

- ข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ ค่าที่กำกับด้วยตัวอักษรที่ต่างกันแต่ละคอลัมน์ บ่งบอกถึงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

3.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัสในสูตรไอศกรีมที่ใช้เนื้อส้มโอเป็นสารให้ความคงตัว

จากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสพบว่า ผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ไม่เติมและเติมเนื้อส้มโอในปริมาณต่างๆ ได้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ คุณภาพทางด้านกลิ่นรส ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 3 สำหรับคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านเนื้อสัมผัส พบว่า การเพิ่มเนื้อส้มโอ

เป็นสารให้ความคงตัวในปริมาณที่มากขึ้นมีแนวโน้มที่ทำให้ค่าความชอบในด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ลดลง เนื่องจากผู้ทดสอบชิมรับรู้ได้ถึงรสขมที่เกิดจากปริมาณเนื้อส้มโอที่มากเกินไปในไอศกรีม [15]-[16] โดยผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ไม่เติมเนื้อส้มโอได้รับคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสสูงกว่าผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่มีการเติมเนื้อส้มโอที่ 5 และ 7% แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ไม่เติมเนื้อส้มโอและผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ใช้ส้มโอเป็นสารให้ความคงตัวร้อยละ 5 และ 7 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ค่าคะแนนความชอบรวมของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับค่าคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส กล่าวคือ การเติมเนื้อส้มโอในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้คะแนนความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์ลดลง โดยผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ไม่มีการเติมเนื้อส้มโอ ได้คะแนนความชอบสูงกว่าผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่มีการเสริมใยอาหารจากเนื้อส้มโอในปริมาณต่างๆ แต่อย่างไรก็ดี คะแนนความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่ไม่มีการเสริมเนื้อส้มโอไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) กับผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่มีการเสริมเนื้อส้มโอที่ระดับร้อยละ 5 และ 7 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่มีการเสริมเนื้อส้มโอในปริมาณร้อยละ 10 และ 15 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด ($P \leq 0.05$)

ตารางที่ 3 การทดสอบทางประสาทสัมผัสสูตรไอศกรีมที่ใช้เนื้อส้มโอเป็นสารให้ความคงตัว

เนื้อส้มโอ (%)	ลักษณะ ปรากฏ	รสชาติ	เนื้อ	ความชอบ
			สัมผัส	โดยรวม
0	7.00±	6.90±	6.79±	7.20±
	0.93 ^a	1.11 ^a	0.45 ^a	0.83 ^a
5	6.99±	6.84±	6.70±	6.55±
	0.99 ^a	1.66 ^a	0.35 ^{ab}	1.03 ^a

เนื้อส้มโอ (%)	ลักษณะปรากฏ	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
7	6.72±	6.80±	6.53±	6.28±
	1.00 ^a	0.87 ^a	0.30 ^{ab}	1.88 ^{ab}
10	6.80±	6.42±	5.69±	5.35±
	1.31 ^a	1.22 ^a	0.47 ^b	1.72 ^b
15	6.73±	6.44±	5.71±	5.40±
	1.09 ^a	1.19 ^a	0.31 ^b	1.66 ^b

- ข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ ค่าที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันแต่ละคอลัมน์ บ่งบอกถึงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05)

3.4 วิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพ เคมี และสมบัติต่างๆ ของไอศกรีมส้มโอ

การวิจัยครั้งนี้วิเคราะห์ค่าปริมาณความชื้นตามวิธีมาตรฐาน AOAC 2000 ปริมาณใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber, TDF) ปริมาณใยอาหารที่ละลายน้ำ (Soluble dietary fiber, SDF) และใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble dietary fiber, IDF) วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4 โดยพบว่าปริมาณใยอาหาร ความชื้น และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการเพิ่มเนื้อส้มโอในไอศกรีม เนื่องจากในเนื้อส้มโอมีเพคตินเป็นองค์ประกอบซึ่งเพคตินจัดเป็นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ อีกทั้งในเนื้อส้มโอมีน้ำเป็นองค์ประกอบสูง ซึ่งผลการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P≤0.05) กับสูตรควบคุมที่ไม่มีการเติมเนื้อส้มโอสำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างในไอศกรีม นอกจากนี้ ไอศกรีมที่มีส่วนผสมของส้มโอในปริมาณต่างๆ มีความเป็นกรดที่สูงขึ้น และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P≤0.05) กับสูตรควบคุมที่ไม่มีการเติมเนื้อส้มโอ

ตารางที่ 4 ปริมาณความชื้น ปริมาณใยอาหารทั้งหมด ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในไอศกรีม

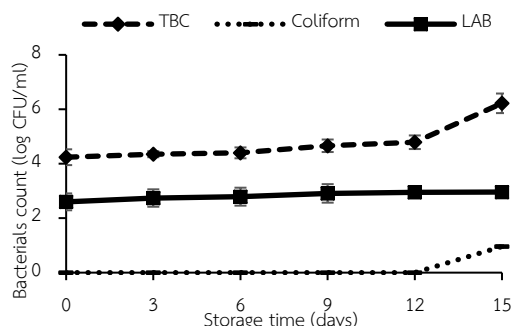
เนื้อส้มโอ (%)	ความชื้น (%)	ใยอาหาร (%)	ความเป็นกรด-ด่าง	ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (°Brix)
0	70.00±	6.90±	4.09±	25.00±
	0.87 ^b	1.01 ^c	0.45 ^a	0.83 ^b
5	70.59±	7.54±	3.34±	25.25±
	0.90 ^b	1.11 ^b	0.35 ^b	1.03 ^b
7	71.72±	7.73±	3.35±	25.28±
	1.10 ^{ab}	0.87 ^b	0.30 ^b	1.88 ^b
10	72.26±	10.04±	3.45±	26.50±
	1.32 ^a	1.20 ^a	0.21 ^b	0.12 ^a
15	72.53±	10.32±	3.51±	26.40±
	1.09 ^a	1.09 ^a	0.31 ^b	1.06 ^a

- ข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ ค่าที่กำกับด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันแต่ละคอลัมน์ บ่งบอกถึงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05)

3.5 ศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมเสริมใยอาหารจากส้มโอ

ในการศึกษาอายุการเก็บรักษาไอศกรีมเสริมใยอาหารจากเนื้อส้มโอที่ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 วัน โดยสุ่มตัวอย่างทุกๆ 3 วัน พบว่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และแบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์มอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 354 เรื่องไอศกรีม (2556) แต่หลังจาก 12 วันของการเก็บรักษา พบว่าแบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์มมีการเพิ่มจำนวนขึ้น (0.96±0.05) log CFU/ml และจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดก็เพิ่มจำนวนขึ้น (6.22±0.36) log CFU/ml แต่จุลินทรีย์กลุ่มแลคโตบาซิลลัสมียังคงปริมาณคงที่ จึงสามารถสรุปได้ว่าไอศกรีมส้มโอที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 วัน สามารถบริโภคได้อย่างปลอดภัยเนื่องจากมีปริมาณ

แบคทีเรียทั้งหมดและโคลิฟอร์มแบคทีเรียอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (TBC) แบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์ม (coliform) และจุลินทรีย์กลุ่มแลคโตบาซิลลัส (LAB) ที่พบในไอศกรีมส้มโอที่เก็บรักษา 15 วัน ในอุณหภูมิ - 20 องศาเซลเซียส

4. สรุป

การเติมเนื้อส้มโอเพื่อเสริมใยอาหารในไอศกรีมส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพ ด้านสี ร้อยละการขึ้นฟูของไอศกรีม การละลายของไอศกรีม และคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของไอศกรีม โดยทำให้สีของไอศกรีมหม่นลงเล็กน้อยซึ่งตรวจสอบได้จากผลการวัดค่าสี และการพัฒนาไอศกรีมน้ำตาลต่ำเสริมใยอาหารจากส้มโอโดยใช้เนื้อส้มโอเพื่อให้ความคงตัวในไอศกรีม 4 สูตร ปริมาณร้อยละ 5, 7, 10 และ 15 สูตรที่มีการเพิ่มเนื้อส้มโอที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าร้อยละการขึ้นฟู และค่าความหนืดเพิ่มขึ้น แต่ทำให้การละลายของไอศกรีมลดลง โดยไอศกรีมที่ไม่มีการผสมเนื้อส้มโอได้รับความชอบโดยรวมสูงสุด และเมื่อปริมาณเนื้อส้มโอเพิ่มขึ้น ทำให้การยอมรับโดยรวมมีค่าลดลง โดยพบว่าไอศกรีมที่มีเนื้อส้มโอ 7% เป็นสูตรที่ได้รับการยอมรับโดยรวมสูงสุด (6.28 ± 1.88) โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับสูตรมาตรฐานที่ไม่มีการเติมเนื้อส้มโอ มีค่าร้อยละการขึ้นฟู $41.15 \pm 0.59\%$ ค่าความหนืด 698.02 ± 5.56 cps มีค่าการละลายที่ 30 นาทีเท่ากับ $22.23 \pm 0.24\%$ นอกจากนี้ การวิเคราะห์

คุณสมบัติทางเคมี พบว่ามีค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ 25.28 ± 1.88 องศาบริกซ์ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.35 ± 0.30 มีปริมาณความชื้นและเส้นใยร้อยละ 71.72 และ 7.73 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับไอศกรีมสูตรควบคุม พบว่าไอศกรีมส้มโอมีปริมาณเส้นใยสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การเก็บรักษาที่ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 วัน พบว่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและแบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์มอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 354 เรื่องไอศกรีม (2556) [17]

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. S. F. Chung, M. Meijerink, B. Zeuner, J. Holck, P. Louis, A. S. Meyer, J. M. Wells, H. J. Flint and S. H. Duncan, "Prebiotic potential of pectin and pectic oligosaccharides to promote anti-inflammatory commensal bacteria in the human colon" *FEMS microbiology ecology*, vol. 93(11), pp. 1-9, Nov. 2017.
- [2] J. Y. Huang, J. S. Liao, J. R. Qi, W. X. Jiang and X. Q. Yang, "Structural and physicochemical Properties of pectin-rich dietary fiber prepared from citrus peel" *Food Hydrocolloids*, vol. 110, pp. 106140. Jan. 2021.
- [3] W. Quan, Y. Tao, M. Lu, B. Yuan, J. Chen, M. Zeng, F. Qin, F. Guo and Z. He, "Stability of the phenolic compounds and antioxidant capacity of five fruit (apple, orange, grape,

- pomelo and kiwi) juices during *in vitro*-simulated gastrointestinal digestion” *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 53(5), pp.1131-1139. Nov. 2017.
- [4] R. Nazaruddin, A. Syaliza and A. Wan Rosnani, “The effect of vegetable fat on the physicochemical characteristics of dates ice cream” *International journal of dairy technology*, vol. 61(3), pp. 265-269. July. 2008.
- [5] M. Dervisoglu and F. Yazici, “The effect of citrus fibre on the physical, chemical and sensory properties of ice cream”. *Food Science and Technology International*, vol. 12(2), pp. 159-164. April. 2006.
- [6] A. P. Jardines, J. Arjona-Román, P. Severiano Pérez, A. Totosaús-Sánchez, S. Fiszman and H. Escalona-Buendía, “Agave fructans as fat and sugar replacers in ice cream: Sensory, thermal and texture properties” *Food Hydrocolloids*, vol. 108, pp. 106032. Nov. 2020.
- [7] A. Tiwari, H. K. Sharma, N. Kumar and M. Kaur, “The effect of inulin as a fat replacer on the quality of low-fat ice cream” *International journal of dairy technology*, vol. 68(3), pp. 374-380. Nov. 2014.
- [8] W. Arbuckle, “Calculating cost and percentage of overrun Ice cream,” 1st ed. Springer, Boston, MA, 1986, pp. 184-200.
- [9] D. Parid, N. Rahman, A. Baharuddin, R. Kadir Basha, A. Mat Johari and S. Abd Razak, “Effects of carboxymethyl cellulose extracted from oil palm empty fruit bunch stalk fibres on the physical properties of low-fat ice cream” *Food Research*, vol. 5(1), pp. 1-7. Jan. 2021.
- [10] L. Prosky, N. G. Asp, T. F. Schweizer, J. W. Devries and I. Furda, “Determination of insoluble, soluble, and total dietary fiber in foods and food products: interlaboratory study” *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, vol. 71(5), pp. 1017-1023. Sep.1988.
- [11] Bacteriological Analytical Manual Online. (2001). Chapter 3: Aerobic Plate Count. USFDA. 10 pp. Retrieved March 11, 2022, from <http://www.cfsan.fda.gov>
- [12] X. Y. Wang, R. Xu, Y. X. Wang, L. Y. Ma, S. P. Nie, M. Y. Xie and J. Y. Yin, Physicochemical and rheological properties of pomelo albedo pectin and its interaction with konjac glucomannan” *International journal of biological macromolecules*, vol. 151, pp. 1205-1212. May. 2020.
- [13] M. Zhu, R. Huang, P. Wen, Y. Song, B. He, J. Tan, H. Hao and H. Wang, “Structural characterization and immunological activity of pectin polysaccharide from kiwano (*Cucumis metuliferus*) peels” *Carbohydrate Polymers*, vol.254, pp. 117371, Feb. 2021.
- [14] W. Wang, X. Ma, X. P. Jiang, L. Hu, Z. Zhi, J. Chen, T. Ding, X. Ye and D. Liu, “Characterization of pectin from grapefruit peel: A comparison of ultrasound-assisted and conventional heating extractions,”

- Food Hydrocolloids*, vol. 61, pp. 730-739, Dec. 2016.
- [15] M. W. Cheong, S. Q. Liu, W. Zhou, P. Curran and B. Yu, "Chemical composition and sensory profile of pomelo (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) juice," *Food Chemistry*, vol. 135(4), pp. 2505-2513, Dec. 2012.
- [16] S. Kumar, M. Khadka, R. Mishra, D. Kohli and S. Upadhaya, "Effects of conventional and microwave heating pasteurization on physiochemical properties of pomelo (*Citrus maxima*) juice," *Journal of Food Processing and Technology*, vol. 8(7), pp. 1-4, July. 2017.
- [17] Food Act standard No.354 (Ice cream), Ministry of Public Health (2556). (online). Available URL; https://food.fda.moph.go.th/law/data/announ_moph/P354.pdf

ผลของอัตราส่วนสับปรดภูแลต่อสับปรदनางแลที่มีต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสในข้าวเกรียบสับปรด

กฤษณกัณฑ์ ภาโพธิรัตน์ ชญานิน วังตาล* และ รักชนก อินจันทร์

สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

80 หมู่ 9 ถนนพหลโยธิน ตำบลบ้านดู่ อำเภอเมืองเชียงราย จังหวัดเชียงราย 57100

รับบทความ 30 มีนาคม 2565 แก้ไขบทความ 4 มกราคม 2566 ตอรับบทความ 9 กุมภาพันธ์ 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกตำรับต้นแบบผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปรด และศึกษาอัตราส่วนของสับปรดภูแลต่อสับปรदनางแลที่เหมาะสมต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปรดท้องถิ่นจังหวัดเชียงราย ผลวิจัยพบว่าตำรับข้าวเกรียบที่ได้รับการคัดเลือกประกอบด้วย แป้งมันสำปะหลัง แป้งสาลีเอนกประสงค์ เนื้อสับปรด บัตตาเวีย น้ำสะอาด และน้ำตาลร้อยละ 52.46, 13.11, 16.39, 16.39 และ 1.64 ตามลำดับ การศึกษาอัตราส่วนของปริมาณสับปรดภูแลต่อสับปรदनางแล ในการผลิตข้าวเกรียบสับปรดในอัตราส่วน 100:0, 72:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 พบว่าอัตราส่วน 50:50 ของปริมาณสับปรดภูแลต่อสับปรदनางแล เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตข้าวเกรียบสับปรด โดยได้รับคะแนนคุณภาพทางประสาทสัมผัสสูงสุด ซึ่งมีคะแนนอยู่ในช่วง 7.34-7.84 (ปานกลางถึงชอบมาก) มีค่าสี ความสว่าง (L^*) 87.70 ค่าสีเขียว-แดง (a^*) 12.33 และค่าสีเหลือง (b^*) 53.80 ทั้งนี้พบว่าอัตราส่วนปริมาณของสับปรดภูแลต่อสับปรदनางแลที่แตกต่างกันในสูตรข้าวเกรียบสับปรด ไม่ส่งผลต่อค่าความกรอบ และปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปรด

คำสำคัญ : คุณภาพทางประสาทสัมผัส; ข้าวเกรียบ; สับปรดภูแล; สับปรदनางแล

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 985 5209, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: Chayanin.wan@crru.ac.th

Effect of Phulea to Nanglea Pineapple Ratios on Physical, Chemical and Sensory Evaluation in Pineapple Crisps

Kritsanakan Phaphothirat Chayanin Wangtan* and Rakchanok Inchan

Home Economics Program, Education Faculty, Chiangrai Rajabhut University, Chiangrai
80 Moo. 9, Phaholyothin Road, Bandu, Meung Chiangrai, Chiangrai 57100

Received 30 March 2022; Revised 4 January 2023; Accepted 9 February 2023

Abstract

This research aimed to select of pineapple chips recipe and study the ratio of Phulea pineapple to Nanglea pineapple in pineapple crisps. The selected pineapple crisps consisted of a percentage of cassava starch, all-purpose flour, Pattavia pineapple, water, and sugar for 52.46, 11.31, 16.39, 16.39 and 1.64 respectively. A study of the ratio of Phulea pineapple to Nanglea pineapple in pineapple crisps of 100:0, 72:25, 50:50, 25:75, and 0:100. The result showed that: the ratio of 50:50 is an appropriate ratio for making pineapple crisps, with sensory evaluation being the highest in all aspects. The colour quality are (L^*) 87.70, (a^*) 12.33 and (b^*) 53.80. and research also showed the ratio of Phulea pineapple to Nanglea pineapple in pineapple crisps in different ratios did not affect the crispness and a_w Value.

Keywords : Sensory Qualities; Crisps; Phulea Pineapple; Nanglea Pineapple

* Corresponding Author. Tel.: +669 985 5209, E-mail Address: Chayanin.wan@crru.ac.th

1. บทนำ

สับปะรดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของจังหวัดเชียงราย ซึ่งมีผลผลิตมากกว่า 146,000 ตัน ในปี 2563 โดยสับปะรดนางแลเป็นสับปะรดสายพันธุ์น้ำผึ้งซึ่งอยู่ในกลุ่ม Smooth cayenne ขณะที่สับปะรดภูแลเชียงรายเป็นสับปะรดสายพันธุ์วิน ซึ่งสับปะรดทั้งสองสายพันธุ์ถือเป็นสินค้าทางการเกษตรที่รับรองสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (GI) ของจังหวัดเชียงราย [1] แต่อย่างไรก็ตาม หนึ่งในปัญหาสำคัญของสับปะรดที่ทำการเพาะปลูกในจังหวัดเชียงรายคือ ผลผลิตสับปะรดล้นตลาด ส่งผลให้ราคาสับปะรดตกต่ำ เกษตรกรได้รับความเดือดร้อน เนื่องจากไม่มีตลาดรองรับ ถึงแม้ว่าจะมีการรณรงค์รับซื้อจากเกษตรกรโดยตรง แต่ก็ยังมีผลผลิตอีกจำนวนมากที่ยังรับซื้อไม่หมด หรือมีผู้ซื้อนำสับปะรดนางแลและภูแลในช่วงราคาถูกไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์แต่ก็ยังมีไม่มาก เกษตรกรจึงมีการนำสับปะรดไปใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารสัตว์หรือใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปอาหาร [2] จากการศึกษาด้านการจัดจำหน่ายและการแปรรูปสับปะรดพบว่าเกษตรกรยังคงแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ๆ คือ สับปะรดอบแห้ง แยมสับปะรด และน้ำสับปะรด เป็นต้น [3] ซึ่งการแปรรูปสับปะรดเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยให้เกษตรกรผู้ปลูกสับปะรดมีรายได้เพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาความต้องการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากสับปะรดในพื้นที่จังหวัดเชียงรายคือ ข้าวเกรียบสับปะรด สับปะรดกวนอบแห้ง ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้ความรู้ร่วมกับทรัพยากรที่มีอยู่ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ [4] โดยผลิตภัณฑ์ที่จะช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มให้ผลผลิตคือ ข้าวเกรียบสับปะรด

ข้าวเกรียบเป็นผลิตภัณฑ์ที่นิยมรับประทานในประเทศไทย และกลุ่มเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [5] ซึ่งการทำข้าวเกรียบส่วนใหญ่จะใช้วัตถุดิบในท้องถิ่นเป็นหลัก ตัวอย่างเช่น ข้าวเกรียบปลา ข้าวเกรียบ

ฟักทอง ข้าวเกรียบข้าวโพด ข้าวเกรียบมัน เป็นต้น วัตถุดิบในการผลิตข้าวเกรียบประกอบด้วย แป้งเครื่องปรุงรส และส่วนประกอบอื่นๆ เช่น เนื้อสัตว์ ผัก ผลไม้ และธัญพืช ซึ่งมีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบหลัก โดยกระบวนการผลิตข้าวเกรียบประกอบด้วยการผสม การนวด การขึ้นรูป การนึ่งหรือการต้ม ลดอุณหภูมิ การหั่นเพื่อลดความชื้น และการทอดให้เกิดการพองตัว ตามลำดับ [6] ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบมีการพัฒนาที่มีความหลากหลาย จากการใช้ผลผลิตท้องถิ่นมาดัดแปลง เป็นส่วนประกอบของข้าวเกรียบเพิ่มมากยิ่งขึ้น [7] เช่น การพัฒนาข้าวเกรียบปรุงรสเสริมรสสกัดจากใบขลุ่ [8] ข้าวเกรียบฟักทองให้เป็นรสชาติสมุนไพรที่สร้างความแปลกใหม่ในผลิตภัณฑ์ [9] ซึ่งเป็นการส่งเสริมการใช้ผลผลิตในท้องถิ่นมาแปรรูป และสามารถแก้ปัญหาผลผลิตล้นตลาดได้

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการนำสับปะรดภูแลและสับปะรดนางแลซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของจังหวัดเชียงรายมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรดเพื่อตอบสนองความต้องการของชุมชน ผู้บริโภค อีกทั้งเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่ม และสร้างความหลากหลายในการใช้วัตถุดิบจากสับปะรดในพื้นที่ได้อีกทางหนึ่ง อีกทั้งการนำสับปะรดภูแลและสับปะรดนางแลมาแปรรูปเป็นข้าวเกรียบ โดยคัดเลือกตำรับต้นแบบของข้าวเกรียบสับปะรดและศึกษาอัตราส่วนของสับปะรดภูแลต่อนางแลที่ส่งผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส และคุณภาพทางเคมี และกายภาพในข้าวเกรียบสับปะรด

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การคัดเลือกตำรับต้นแบบผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรด

สับปะรดที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ สับปะรดสายพันธุ์ปัตตาเวีย (*Ananas comosus* cv. Smooth Cayenne) นำสับปะรดมาปอกเปลือก ล้างทำความสะอาด

สะอาด นำตาและแกนสับปะรดออก หั่นสับปะรดเป็นชิ้นๆ บั่นให้ละเอียด นำสับปะรด ที่เตรียมไว้มาผลิตข้าวเกรียบสับปะรด 3 ตำรับ โดยดัดแปลงจาก [10]-[12] (ตารางที่ 1) โดยมีขั้นตอนการทำข้าวเกรียบดังนี้

นำแป้ง เกลือป่น สับปะรด ผสมรวมให้เข้ากัน ใส่ น้ำร้อนที่ละเล็กละน้อยนวดให้เข้ากัน บั่นเป็นแท่งกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว นึ่งด้วยไฟแรงประมาณ 40 นาที หรือจนกระทั่งแป้งสุกใสทั่วทั้งแท่ง แช่เย็นที่อุณหภูมิ 2-5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นหั่นเป็นชิ้นหนา 2 มิลลิเมตร นำแผ่นข้าวเกรียบวางเรียงบนตะแกรง เข้าเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จนผลิตภัณฑ์มีระดับความชื้นไม่เกินร้อยละ 6-7 นำแผ่นข้าวเกรียบสับปะรดทอดในน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 160-170 องศาเซลเซียส ตักขึ้นสะเด็ดน้ำมัน พักไว้ให้เย็น จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรดทั้ง 3 ตำรับ ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยให้ผู้ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 100 คน โดยใช้แผนลิเคิ์พแบบสุ่มสมดุล [13] ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความกรอบ ความชอบโดยรวมด้วยวิธี 9-Point Hedonic Scale [14] โดยคะแนน 9 หมายถึงชอบมากที่สุด 1 คะแนน หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด เพื่อคัดเลือกต้นแบบผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรดที่ได้รับการยอมรับสูงสุดเพื่อใช้การทดลองขั้นต่อไป

2.2 การศึกษาอัตราส่วนของสับปะรดกวนต่อนางแลที่ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัส ในข้าวเกรียบสับปะรด

สับปะรดที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ สับปะรดสายพันธุ์ภูแล (*Ananas comosus* cv. Phulae) และสับปะรดสายพันธุ์นางแล (*Ananas comosus* cv. Nanglae) เตรียมสับปะรดโดยนำสับปะรดปอกเปลือก ล้างทำความสะอาด นำตาและแกนสับปะรดออก หั่นสับปะรดเป็นชิ้นๆ บั่นให้ละเอียด นำสับปะรดทั้ง 2

สายพันธุ์มาผลิตเป็นข้าวเกรียบสับปะรด ตามตำรับที่ดีที่สุดในการทดลองที่ 1 โดยเปลี่ยนสับปะรดที่ใช้ในการทดลองจากสับปะรดสายพันธุ์ภูแลเป็นสับปะรดสายพันธุ์ภูแล และสับปะรดสายพันธุ์นางแล ซึ่งในการทดลองจะมีการศึกษาอัตราส่วนระหว่างปริมาณสับปะรดกวนต่อสับปะรดนางแลในอัตราส่วนร้อยละ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100 ตามลำดับ

2.2.1 การวิเคราะห์ทางกายภาพ

2.2.1.1 วิเคราะห์ค่าสี ระบบ CIE L* a* และ b* ด้วยเครื่องวัดค่าสีรุ่น Color Flex 45/0, Hunter Lab, USA. โดยค่าความสว่าง (L*) (ค่า 0-100 โดย 0 หมายถึง วัตถุสีเข้ม, 100 หมายถึง วัตถุสีขาว) ค่าสี a* คือวัตถุสีแดง (+) วัตถุสีเขียว (-) และค่าสี b* คือวัตถุสีเหลือง (+) วัตถุสีน้ำเงิน (-) เพื่อเปรียบเทียบสีของข้าวเกรียบสับปะรดในแต่ละสูตร

2.2.2.2 วิเคราะห์เนื้อสัมผัส Texture Profile Analysis (TPA) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส TA.9T plus, Stable Micro Systems, United Kingdom. นำข้าวเกรียบสับปะรดหลังทอดแต่ละสูตรมาวิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัสโดยใช้หัววัดแบบทรงกระบอก (P/2) ด้วยแรงกด 20 นิวตัน ความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที บันทึกค่าแรงกดสูงสุดของตัวอย่าง โดยทำการทดสอบซ้ำ 10 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยของแรงกดสูงสุดที่ได้ในแต่ละตัวอย่าง

2.2.2 การวิเคราะห์ทางเคมี

ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ด้วยเครื่องวัดค่า Water Activity (a_w) รุ่น Aqua lab Model Series 4TE, USA. นำตัวอย่างข้าวเกรียบสับปะรดในแต่ละสูตรวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) เพื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของข้าวเกรียบสับปะรดในแต่ละสูตร

2.2.3 การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ให้ผู้ประเมินที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 100 คน โดยใช้แผนลิเคิ์พแบบสุ่มสมดุล [13] ประเมิน

คุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น ความกรอบ และความชอบโดยรวม ด้วยวิธี 9-Point Hedonic Scale โดยคะแนน 9 หมายถึงชอบมากที่สุด 1 คะแนน หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด [14]

2.3 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรด สำหรับคุณภาพทางกายภาพ และเคมี วิเคราะห์สถิติโดยการวางแผนการทดลองแบบ (Complete Randomized Design. (RRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ย และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test. (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design. (RCBD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน Analysis of Variance. (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test. (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 1 ตำรับต้นแบบผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรด

ส่วนประกอบ (%)	ตำรับที่		
	1	2	3
แป้งมัน			
ลำปะหลัง	47.39	52.46	51.60
แป้งสาลี	-	13.11	-
อเนกประสงค์			
เนื้อสับปะรด	35.55	16.39	17.20
บัตตาเวีย			
น้ำสะอาด	16.59	16.39	29.48
เกลือ	0.47	-	0.49
น้ำตาล	-	1.64	1.23

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การคัดเลือกตำรับต้นแบบผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรด

ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส (ตารางที่ 2) ของตำรับต้นแบบผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรด ทั้ง 3 ตำรับพบว่าผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรดตำรับที่ 2 [11] คุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ สี ความกรอบ มีคะแนนความชอบมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรดตำรับที่ 1 [10] และ 3 [12] ($p \leq 0.05$) เนื่องจากผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรดตำรับที่ 2 มีส่วนประกอบของแป้งสาลีอเนกประสงค์ ทำให้สีของข้าวเกรียบมีความแตกต่าง จากการมีปริมาณอะไมโลสในส่วนประกอบของแป้งสูงขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนของอะไมโลสก็เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดผลึกที่ส่งผลต่อสีของข้าวเกรียบ โดยทำให้ข้าวเกรียบมีสีขาวขึ้น [15] และส่งผลต่อความกรอบของข้าวเกรียบ โดยปริมาณแป้งสาลีมีโปรตีน (Gluten) ที่มีบทบาทต่อความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และโครงสร้างของข้าวเกรียบเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ข้าวเกรียบที่ส่วนผสมของแป้งสาลีอเนกประสงค์จึงมีคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านความกรอบสูง ซึ่งสอดคล้องกับ [16] พบว่าการเพิ่มปริมาณแป้งสาลีจะทำให้ความกรอบของข้าวเกรียบเพิ่มขึ้นในการศึกษาปริมาณแป้งสาลีที่ส่งผลต่อคุณลักษณะของแผ่นข้าวเกรียบน้ำพริกปลาร้าทรงเครื่อง [17]-[18] ที่พบว่า ปริมาณโปรตีน (Gluten) ในแป้งสาลีจะส่งผลต่อความกรอบ และโครงสร้างของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับ [19] ที่พบว่าแป้งสาลีมีไกลอะดิน (Gliadin) และกลูเตนิน (Glutenin) ที่รวมตัวกันเป็นกลูเตน (Gluten) ทำให้เป็นโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ทำให้มีความแข็งแรง

ดังนั้นความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรด ทั้ง 3 ตำรับ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 2

ดังนั้นจึงพิจารณาคะแนนความชอบที่คุณลักษณะอื่นประกอบ พบว่า ลักษณะปรากฏ สี และเนื้อสัมผัส ของตำรับ 2 [11] ได้รับคะแนนสูงสุด จึงได้รับการคัดเลือก

ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณสับปะรดและต่อสับปะรดนางแลในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรดต่อไป

ตารางที่ 2 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวเกรียบสับปะรดทั้ง 3 ตำรับ

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรด		
	ตำรับที่ 1	ตำรับที่ 2	ตำรับที่ 3
ลักษณะปรากฏ	7.54 ^b ±0.12	7.92 ^a ±0.11	7.31 ^b ±0.12
สี	7.26 ^b ±0.15	8.01 ^a ±0.12	7.12 ^b ±0.16
กลิ่น ^{ns}	6.89±0.15	7.07±0.13	6.99±0.15
รสชาติ ^{ns}	6.97±0.15	7.10±0.12	6.98±0.12
ความกรอบ	7.46 ^b ±0.12	8.16 ^a ±0.14	7.42 ^b ±0.17
ความชอบโดยรวม ^{ns}	7.08±0.85	7.12±0.79	7.92±0.76

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} คือไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.2 การศึกษาอัตราส่วนของสับปะรดและต่อนางแลที่ส่งผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส และคุณภาพทางเคมี และกายภาพในข้าวเกรียบสับปะรด

จากการศึกษาอัตราส่วนของสับปะรดและต่อนางแลที่ส่งผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส และคุณภาพทางเคมี และกายภาพในข้าวเกรียบสับปะรดอัตราส่วนที่ต่างกัน 5 ระดับ คือ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 (ตารางที่ 3)

พบว่าข้าวเกรียบสับปะรดทั้ง 5 สูตร (ตารางที่ 3) จะมีคุณลักษณะที่ต่างกันทางด้านสี ($p < 0.05$) โดยความเข้มของสีจะผันแปรตามอัตราส่วนระหว่างสับปะรดและต่อสับปะรดนางแล ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้าวเกรียบสับปะรดที่มีปริมาณสับปะรดสูงและนางแลเพิ่มขึ้น จะมีแนวโน้มสีสว่างขึ้น โดยค่าความสว่าง (L^*) จะเพิ่มขึ้น แต่จะให้ค่าแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ลดลง ($p < 0.05$) เมื่อใส่ส่วนผสมของสับปะรดนางแลเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยจากการที่ใช้อัตราส่วนของสับปะรดและต่อสับปะรดนางแลที่ต่างกันทำให้ข้าวเกรียบสับปะรดมีค่าสีที่ต่างกัน ทั้งนี้อาจมี

สาเหตุมาจากรงควัตถุ (Pigment) ที่พบในสับปะรดและต่อสับปะรดนางแลและปริมาณที่ความแตกต่างกัน โดยรงควัตถุ (Pigment) ที่พบในสับปะรด อาทิเช่น ปริมาณแคโรทีนอยด์ และเบต้าแคโรทีน เป็นต้น โดยสอดคล้องกับ [20] ที่พบว่าสีเหลืองและสีส้มที่ต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ และเบต้าแคโรทีน ซึ่งเนื้อของสับปะรดทุกสายพันธุ์จะมีสีเหลืองแต่ความเข้มของสีจะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของสับปะรด ซึ่งเนื้อสับปะรดจะมีสีเหลือง เนื้อสัมผัสกรอบ และชุ่มน้ำกว่าสับปะรดสับปะรดนางแลที่มีเนื้อสีเหลืองออกน้ำตาลเล็กน้อย ดังนั้นเมื่อลดปริมาณของสับปะรดและต่อสับปะรดนางแลจึงมีผลให้ข้าวเกรียบสีอ่อนลง ($p < 0.05$) ทั้งนี้อัตราส่วนของสับปะรดและต่อสับปะรดนางแลที่ต่างกันในส่วนผสมข้าวเกรียบไม่ส่งผลต่อค่าความกรอบและค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของข้าวเกรียบสับปะรดโดยมีค่าระหว่าง 0.34-0.41 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 3) ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนข้าวเกรียบ มพช. 107/2554 (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.6) [21]

ตารางที่ 3 คุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับประดที่ใช้อัตราส่วนสับประดเกลือและสับประดนางแลที่แตกต่างกัน 5 ระดับ

คุณภาพทางกายภาพและเคมี	สับประดเกลือ : นางแล				
	100:0	75:25	50:50	25:75	0:100
ค่าสี					
L*	83.51 ^b ±2.47	86.43 ^{ab} ±6.96	87.70 ^{ab} ±6.09	86.93 ^{ab} ±2.47	88.50 ^a ±4.09
a*	13.52 ^a ±1.43	13.21 ^{ab} ±1.32	12.33 ^{ab} ±1.83	11.75 ^{bc} ±1.41	10.78 ^c ±2.11
b*	65.83 ^a ±6.37	63.21 ^{ab} ±6.11	53.80 ^{ab} ±6.57	49.72 ^b ±5.86	43.63 ^b ±4.32
ความกรอบ ^{ns} (N)	78.60±2.88	78.21±2.82	78.50±2.55	77.70±2.06	79.70±2.67
ปริมาณน้ำอิสระ (a _w) ^{ns} (%)	0.40±0.10	0.39±0.12	0.34±0.14	0.37±0.18	0.41±0.11

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
^{ns} คือไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)
ค่า L* ถ้ามีค่ามากขึ้น แสดงว่า มีค่าความสว่างมากขึ้น
ค่า a* เป็น (+) หมายถึงออกสีแดง และ a* เป็น (-) หมายถึง สีเขียว
ค่า b* เป็น (+) หมายถึงออกสีเหลือง และค่า b* เป็น (-) หมายถึงออกสีน้ำเงิน

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยคุณภาพประสาทสัมผัสและความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับประดที่ใช้อัตราส่วนสับประดเกลือและสับประदनางแลที่แตกต่างกัน 5 ระดับ

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	สับประดเกลือ : นางแล				
	100:0	75:25	50:50	25:75	0:100
ลักษณะปรากฏ	7.32 ^b ±0.10	7.04 ^{ab} ±0.12	7.72 ^a ±0.14	7.08 ^{ab} ±0.13	7.32 ^b ±0.15
สี	7.38 ^{ab} ±0.14	7.31 ^{ab} ±0.23	7.34 ^{ab} ±0.11	6.88 ^b ±0.18	7.10 ^a ±0.16
กลิ่น ^{ns}	7.75±0.14	7.78±0.15	7.84±0.11	7.86±0.16	7.80±0.13
รสชาติ	7.16 ^b ±0.13	7.56 ^{ab} ±0.15	7.88 ^a ±0.14	7.68 ^{ab} ±0.14	7.10 ^b ±0.13
ความกรอบ ^{ns}	7.44±0.15	7.56±0.13	7.70±0.14	7.36±0.15	7.39±0.13
ความชอบโดยรวม ^{ns}	7.40±0.13	7.42±0.14	7.74±0.13	7.68±0.14	7.66±0.13

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึงค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
^{ns} คือไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ผลทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสในตัวอย่างข้าวเกรียบสับประดทั้ง 5 สูตร (ตารางที่ 4) พบว่าอัตราส่วนของสับประดเกลือต่อสับประदनางแลในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับประด ไม่มีผลต่อ

คุณภาพทางประสาทสัมผัสทางด้าน กลิ่น ความกรอบ และความชอบโดยรวม ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่มีผลต่อคุณลักษณะทางด้านลักษณะปรากฏ สี และรสชาติดังนี้

ด้านลักษณะปรากฏพบว่าข้าวเกรียบสับปะรด อัตราส่วนสับปะรดกวนต่อสับปะรดนางแล 50:50 ได้รับคะแนนความชอบทางด้านลักษณะปรากฏสูงที่สุดซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยทางสถิติ ($p>0.05$) กับข้าวเกรียบสับปะรดอัตราส่วนสับปะรดกวนต่อสับปะรดนางแล 75:25 และ 25:75 แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยทางสถิติ ($p\leq 0.05$) กับข้าวเกรียบสับปะรดอัตราส่วนสับปะรดกวนต่อสับปะรดนางแล 100:0 และ 0:100 โดยได้คะแนนความชอบอยู่ในระดับชอบปานกลาง

ความชอบด้านสีพบว่า ข้าวเกรียบสับปะรด อัตราส่วนสับปะรดกวนต่อสับปะรดนางแล 100:0 ได้รับคะแนนความชอบทางด้านสีสูงที่สุด ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยทางสถิติ ($p>0.05$) กับข้าวเกรียบสับปะรดอัตราส่วนสับปะรดกวนต่อสับปะรดนางแล 75:25, 50:50 25:75 และ 0:100 แต่กับข้าวเกรียบสับปะรดอัตราส่วนสับปะรดกวนต่อสับปะรดนางแลที่ 25:75 มีความแตกต่างแตกต่างกันอย่างมีนัยทางสถิติ ($p\leq 0.05$) กับข้าวเกรียบสับปะรดอัตราส่วนสับปะรดกวนต่อสับปะรดนางแล 0:100 จะเห็นได้ว่าการปรับลดอัตราส่วนของสับปะรดกวนและสายพันธุ์ของสับปะรดมีผลต่อค่าความสว่าง (L^*) เพิ่มขึ้น ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ลดลงตามผลวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

และด้านรสชาติข้าวเกรียบสับปะรดอัตราส่วนสับปะรดกวนต่อสับปะรดนางแล 50:50 ได้รับคะแนนความชอบสูงที่สุด ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) กับข้าวเกรียบสับปะรดอัตราส่วน 75:25 และ 25:75 แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) กับข้าวเกรียบสับปะรดอัตราส่วนสับปะรดกวนต่อสับปะรดนางแล 100:0 และ 0:100 โดยได้รับคะแนนความชอบอยู่ในระดับชอบปานกลาง

ดังนั้นการปรับอัตราส่วนของข้าวเกรียบสับปะรดที่ใช้อัตราส่วนสับปะรดกวนและสับปะรดนางแลที่แตกต่างกันปริมาณสับปะรดส่งผลต่อคุณภาพทาง

ประสาทสัมผัสของผู้บริโภคทางด้านลักษณะปรากฏ สี และรสชาติ ซึ่งสับปะรดทั้งสองสายพันธุ์มีความแตกต่างกันเนื่องจากสับปะรดกวนอยู่ในกลุ่ม Queen ซึ่งเนื้อข้างในมีสีเหลืองเข้ม รสหวาน มีเยื่อใยน้อยส่งผลให้ลักษณะข้าวเกรียบจึงมีสี และรสชาติที่แตกต่างจากสับปะรดนางแลที่อยู่ในกลุ่ม Cayenne ซึ่งเนื้อมีสีเหลือง เยื่อใยกปานกลาง ดังนั้นในอัตราส่วนสับปะรดกวนต่อสับปะรดนางแล 50:50 จึงเป็นสูตรที่เหมาะสมในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรด

4. สรุป

จากการศึกษาการคัดเลือกตำรับต้นแบบผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรดพบว่าตำรับที่ได้รับการคัดเลือกในการทำข้าวเกรียบสับปะรดประกอบด้วย แป้งมันสำปะหลังร้อยละ 52.46 แป้งสาลีเอนกประสงค์ร้อยละ 13.11 เนื้อสับปะรดร้อยละ 16.39 น้ำสะอาดร้อยละ 16.39 และน้ำตาลร้อยละ 1.64 ขณะที่อัตราส่วนระหว่างสับปะรดกวนต่อสับปะรดนางแลที่เหมาะสมต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสับปะรดได้แก่ อัตราส่วน 50:50 จะมีคุณภาพทางประสาทสัมผัสทางด้าน ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความกรอบ และความชอบโดยรวม คือ 7.72, 7.34, 7.84, 7.88, 7.70 และ 7.74 ตามลำดับ มีคุณภาพทางเคมี และกายภาพ คือ ค่าความสว่าง (L^*) 87.70 ค่าสีเขียว-แดง (a^*) 12.33 และค่าสีเหลือง (b^*) 53.80 ความกรอบ 78.50 N และปริมาณความปริมาตรน้ำอิสระ (a_w) ร้อยละ 0.34

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยเพื่อการพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย โครงการวิจัยเชิงพื้นที่ หนึ่งคณะ หนึ่งพื้นที่ หนึ่งนวัตกรรม (Triple One) ประจำปีงบประมาณ 2563

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chiang Rai Agriculture District Office. 2021. Agriculture and Cooperatives Development Plan of Chiang Rai (2023-2027). Retrieved Dec 16, 2019. From <https://www.opsmoac.go.th/chiangrai-strategic-preview-431691791799>. (in Thai)
- [2] Thai PBS. 2019. Behind Phu Lae pineapple overflowing the market. Retrieved Jul 16, 2019. From <https://news.thaipbs.or.th/content/272875>. (in Thai)
- [3] Sermsiri N., Kasidit C., and Darunphop U., 2019. Enhancing of Nanglae Pineapple Farmers Becoming Smart Farmers. Journal of Social Sciences Srinakharinwirot University. Vol 12, Issue 2 (2019). 328-347. (in Thai)
- [4] Kritsanakan, P., Rakchanok I., and Chayanin W., 2021. A Study of the Development Demands of Pineapple Products of Agricultural Housewives in Wiang Chai District, Chiang Rai. Proceeding of the 3rd Nation Conference Phetchabun Rajabhat University, Bangkok, Education, pp1742-1751. (in Thai)
- [5] Ang, C.Y.W., Liu, K. and Hoang, Y., 1999, Asian Food Science & Technology, Technomic Publishing Company, Inc., USA.
- [6] The Thai Tapioca Development Institute. 2019. Tapioca Starch Industry. Retrieved Jan 12, 2021. From <http://www.tapioca-thai.org/E4.html>. (in Thai)
- [7] Sakuntra, K. 2015. Cracker from mixed flour and dried Seablite (*Suaeda maritima*). Proceeding of the 6th Nation and Interanion Conference Suan Sunandha Rajabhat University, Bangkok, Science, pp513-523. (in Thai)
- [8] Sopa, T. 2017. Development of Seasoned Tapioca Crackers (Thai Snack) Fortified with Khlu Leaf Extract. Home Economics master's thesis. Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. Bangkok, Thailand. (in Thai)
- [9] Pakawadee, P., Phaiwan, P., Soratworachum, I., & Susitra, S. 2019. Product Development of Tom Yum Pumpkin Cracker. PSRU Journal of Science and Technology 4(3): 15-26, 2019. (in Thai)
- [10] Pompol, R. 2002. Food Perservation (2nd ed.). Bangkok: Odeonstore. (in Thai)
- [11] Payom, A. 2000. product processing for Agricultural to create a career and increase income at 8 provinces in the eastern of Thailand. Institute of Food Research and Product Development Kasetsart University Si Racha campus. Chon Buri, Thailand. (in Thai)
- [12] Processing food from fruits and vegetables. 2017. Pumpkin Cracker Retrieved Jan 23, 2017. <http://www.vegetweb.com/food>. (in Thai)
- [13] T. Getuadisorn, Business Opportunities Study in Thai Bakery Sector, 1st ed. Bangkok:

- Embassy of the Kingdom of the Netherlands in Bangkok, 2013.
- [14] H.J.H. MacFie, N. Bratchell, K. Greenhoff and L.V. Vallis, "Designs to balance the effect of order of presentation and first- order carryover effects in hall test," *Journal of sensory Studies*. Vol 4, no.2 pp. 129- 148, May 2007.
- [15] Tester, R.F. and Morrison, W.R. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches. II. Waxy rice starches. *Cereal Chemistry* 67: 558-563.
- [16] Nanthaya, K., Rerngnaporn, M., Unnop, T. & Anupong, Y. 2019. Effect of Wheat flour Content on Characteristics of Spicy Fermented Fish Paste Cracker. *Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal*. Vol 11, No,13 (2019) 1-14. (in Thai)
- [17] Teewee, T. 2002. Effects of Mechanical Force and Amylose Content on the Buffing of Rice Grain. Research Report. Department of Food Science and Nutrition Faculty of Science and Technology Prince of Songkla University. Songkla: Thailand. (in Thai)
- [18] Rungnaphar, P. 2000. Analysis of gelatinization and retrogradation processes affecting puffing of rice snack products. thesis. Kasetsart University. Bangkok, Thailand. (in Thai)
- [19] Teeranuch., C. & Natjaya, M. 2018. The use of Sinin Rice Flour Substituted Wheat Flour in the Crust of Flaky Chinese Pastry (Khanom Pia Kularb). *RMUTP Research Journal Science & Technology*. Vol 12, No. 1 (2018). 27-29. (in Thai)
- [20] Rungtiwa, K. & Teeravat, T. 2018. Effects of Pineapple Varieties on Sensory Quality of Sorbet Ice Cream Product. *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports (AJSTR)* Vol. 21, No. 3 (2018): Special Issue (2018). 35-42. (in Thai)
- [21] Thai Industrial Standards Institute. 2011. Thai Community Product Standard CRISPY SNACK, KHAOGRIAB (107/2011). Ministry of Industry. Bangkok: Thailand.

ผลของระดับอุณหภูมิอบแห้งต่อการอบแห้งกระเจี๊ยบเขียวแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล

ปิยบุตร อินัน¹ ญัฐพงศ์ สมพันธ์¹ ศิริชัย วิเวก¹ สมหญิง พงศ์พิมล² และ ภูมิใจ สอาดโฉม^{1*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

²คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

¹41/1 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมืองตาก จังหวัดตาก 63000

²123 ถนนมิตรภาพ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

รับบทความ 13 พฤษภาคม 2565 แก้ไขบทความ 6 มกราคม 2566 ตอบรับบทความ 13 กุมภาพันธ์ 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกระเจี๊ยบเขียว หาพลังงานไฟฟ้าและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ออบแห้ง และหาสมบัติทางกายภาพด้านสีของผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้ง โดยแผ่นกระเจี๊ยบเขียวขนาด 30x30 (กว้างxยาว) เซนติเมตรหนา 5 มิลลิเมตรถูกอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง 7 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิอบแห้ง 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส จนความชื้นของกระเจี๊ยบเขียวต่ำกว่าร้อยละ 10 มาตรฐานเปียก ผลการทดลองพบว่า กระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่ากระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ การอบแห้งกระเจี๊ยบเขียวที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีพลังงานไฟฟ้าและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากกว่าการอบแห้งกระเจี๊ยบเขียวที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) พลังงานไฟฟ้าและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ออบแห้งกระเจี๊ยบเขียวที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) นอกจากนี้พบว่า ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่าความสว่าง (ค่า L^*) และค่าสีเขียว (ค่า $-a^*$) น้อยกว่าผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าสีเหลือง (ค่า b^*) น้อยกว่าผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามค่าสีเหลือง (ค่า b^*) ของผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส กับผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 และ 90 องศาเซลเซียส ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ดังนั้นผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง 7 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีคุณภาพด้านสีดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง 7 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ : การอบแห้ง; กระเจี๊ยบเขียว; เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ; รังสีอินฟราเรดไกล

Effect of Drying Temperature Level on Vacuum Drying of Okra Combined with Far-infrared Radiation

Piyabud Innu¹ Nattapong Somfan¹ Sirichai Vivek¹ Somying Pongpimol²
and Poomjai Sa-adchom^{1*}

¹Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

²Faculty of Architecture, Khon Kaen University

¹41/1 Paholayothin Road, Mai Ngam, Muang Tak, Tak, 63000

²123 Mittraphap Road, Nai Muang, Muang Khon Kaen, Khon Kaen, 40002

Received 13 May 2022; Revised 6 January 2023; Accepted 13 February 2023

Abstract

This research aimed to study the effect of infrared radiation assisted vacuum drying on the change of moisture content of okra and to determine the electrical energy and specific energy consumption used for drying. The physical property in terms of the color of dried okra powder was examined. Okra sheets with a size of 30x30 (width x length) cm and a thickness of 5 mm were dried under an absolute pressure of the drying chamber of 7 kPa and the drying temperatures of 70, 80, and 90°C until the moisture content of the okra was lower than 10% wet basis. The experimental results showed that dried okra at high temperatures could reduce moisture faster than that at low temperatures. Drying okra at the temperature of 70°C had a significantly higher the electrical energy and specific energy consumption than that of 80 and 90°C ($P \leq 0.05$). The electrical energy and specific energy consumption used for drying okra at 80 and 90°C were not significantly different ($P > 0.05$). In addition, okra powder dried at high temperatures had significantly lower lightness (L^* value) and greenness ($-a^*$ value) than that at low temperatures ($P \leq 0.05$). Okra powder dried at the temperature of 70°C had significantly lower yellowness (b^* value) than that of 90°C ($P \leq 0.05$). However, the yellowness (b^* value) of okra powder dried at the temperature of 80°C and okra powder dried at the temperatures of 70 and 90°C were not significantly different ($P > 0.05$). Therefore, okra powder dried at an absolute pressure of the drying chamber of 7 kPa and the drying temperature of 70°C had the best color quality compared to that of 80 and 90°C.

Keywords : Drying; Far-infrared Radiation; Okra; Vacuum Dryer

** Corresponding Author. Tel.: +668 1727 5771, E-mail Address: poomjai.s@gmail.com*

1. บทนำ

กระเจี๊ยบเขียวเป็นพืชผักพื้นบ้านที่คนไทยนิยมบริโภค และเป็นพืชผักที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีเนื้อที่เพาะปลูกกระเจี๊ยบเขียว 3,797 ไร่ ผลผลิตกระเจี๊ยบเขียวรวม 4,883 ตัน และมีราคาขายกระเจี๊ยบเขียว 15 บาทต่อกิโลกรัม [1] กระเจี๊ยบเขียวมีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีแร่ธาตุและวิตามินต่าง ๆ ได้แก่ แคลเซียม เหล็กแมกนีเซียม ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม โซเดียม วิตามินเอ วิตามินบี และวิตามินซี เป็นต้น รวมทั้งมีกลูตาไรโอนซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ช่วยสร้างสารซ่อมแซมเซลล์ และขจัดสารพิษที่เกิดในร่างกาย นอกจากนี้กระเจี๊ยบเขียวมีสรรพคุณต่าง ๆ ได้แก่ ช่วยบำรุงสมอง รักษาโรคความดันโลหิต บรรเทาอาการไข้หวัด ช่วยป้องกันหลอดเลือดตีตัน และบรรเทาอาการโรคกระเพาะอาหารและลำไส้อักเสบ เป็นต้น [2] อย่างไรก็ตามบางฤดูกาลผลผลิตกระเจี๊ยบเขียวมีมากเกินความต้องการของตลาด ทำให้กระเจี๊ยบเขียวเหลือจากการจำหน่ายและเกิดการเน่าเสียซึ่งเป็นการสูญเสียทางเศรษฐกิจ ดังนั้นการแปรรูปกระเจี๊ยบเขียวให้เป็นกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ และช่วยเพิ่มมูลค่าของกระเจี๊ยบเขียว

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่รักษาคุณภาพลดการสูญเสีย ยืดอายุการเก็บรักษาสภาพ และทำให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งมีมูลค่าเพิ่มขึ้น โดยในปัจจุบันการอบแห้งส่วนใหญ่นิยมอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนสามารถติดตั้งได้ง่ายและให้ความร้อนสม่ำเสมอ แต่มีปัญหาที่พบคือ ใช้ระยะเวลาอบแห้งนาน และผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้มีคุณภาพด้านกลิ่นรส สี และเนื้อสัมผัสด้อยลง [3], [4] ดังนั้นการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลสามารถช่วยแก้ปัญหาในส่วนนี้ได้ โดยการอบแห้งแบบสุญญากาศเป็นวิธีการทำให้น้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์มีจุดเดือดต่ำและระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ ช่วยลดพลังงานที่ใช้

อบแห้ง [5] ช่วยป้องกันการสลายตัวของวิตามิน และลดการสูญเสียสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ด้านกลิ่นรส [6] ทั้งนี้มีการนำรังสีอินฟราเรดไกลมาเป็นแหล่งให้ความร้อนในการอบแห้งแบบสุญญากาศเนื่องจากรังสีอินฟราเรดไกลสามารถทะลุผ่านเข้าสู่เนื้อผลิตภัณฑ์ ทำให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์เกิดการสั่นและเกิดความร้อน น้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์จึงแพร่ไปยังผิวผลิตภัณฑ์และระเหยออกไปได้เร็ว [7], [8] กลไกการเคลื่อนที่ของน้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์ดังกล่าวทำให้ลดความชื้นของผิวและเนื้อผลิตภัณฑ์ได้พร้อม ๆ กัน ส่งผลให้ผิวผลิตภัณฑ์ไม่เกิดการเหี่ยวแห้ง และคงสมบัติของผลิตภัณฑ์บางอย่างได้ใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่นำมาอบแห้ง [9] จากข้อดีดังกล่าวในปัจจุบันจึงนิยมอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์แบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล ได้แก่ กระชายดำ [10] รางจืด [10] ขมิ้น [11] ข้าวฮางอก [12] ใบชา [13] เพชรสังฆาต [14] เห็ดหอม [15] ดอกบัว [16] ชিং [17] ใบมะกรูด [18] และข่า [18] ซึ่งพบว่า ไม่มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งกระเจี๊ยบเขียวแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดว่าควรศึกษาการอบแห้งกระเจี๊ยบเขียวแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล แล้วแปรรูปกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งให้เป็นกระเจี๊ยบเขียวผง ซึ่งเป็นอาหารเพื่อสุขภาพที่น่าสนใจสำหรับผู้บริโภค

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกระเจี๊ยบเขียวระหว่างการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล วิเคราะห์หาพลังงานไฟฟ้าและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ระหว่างกระบวนการอบแห้ง และวิเคราะห์สมบัติด้านสีของผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้ง

2. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

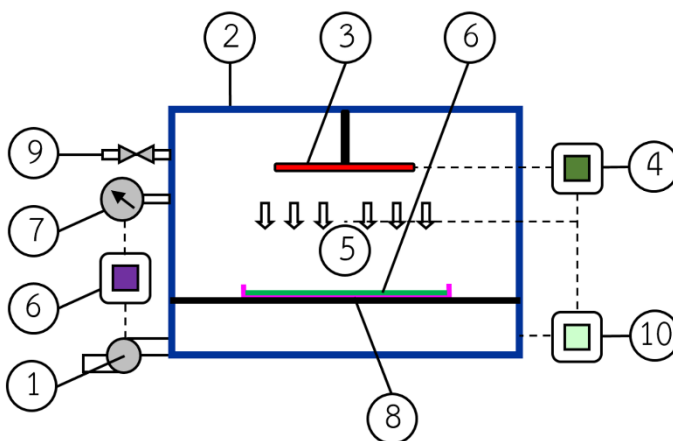
2.1 วัตถุดิบ

2.1.1 กระเจี๊ยบเขียว พันธุ์แม่โจ้ 49

2.2 เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล

ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลแสดงดังรูปที่ 1 การทำงานของเครื่องอบแห้งนี้เริ่มจากปั๊มสุญญากาศแบบโรตารี่ยี่ห้อ Woosung รุ่น MPV-6 ขนาดกำลังไฟฟ้า 400 วัตต์ (หมายเลข 1) ดูดอากาศออกจากห้องอบแห้งซึ่งมีขนาด 50x35x35 (กว้างxยาวxสูง) เซนติเมตร (หมายเลข 2) โดยแหล่งให้ความร้อนแก่อากาศในห้องอบแห้งนี้คือ หลอดรังสีอินฟราเรดไกลยี่ห้อ Infrapara รุ่น AW-2-500 ขนาดกำลังไฟฟ้า 500 วัตต์ จำนวน 1 หลอด (หมายเลข 3) ซึ่งติดตั้งอยู่ด้านบนเหนือผลิตภัณฑ์อบแห้ง 10 เซนติเมตร อุณหภูมิอากาศในห้องอบแห้งถูกควบคุมด้วยเครื่อง

ควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดียี่ห้อ Toho รุ่น TTM-004-PA (หมายเลข 4) ตำแหน่งที่ควบคุมอุณหภูมิอากาศอยู่กลางห้องอบแห้งและอยู่เหนือผลิตภัณฑ์อบแห้ง 5 เซนติเมตร โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (หมายเลข 5) เป็นตัววัดอุณหภูมิ และใช้อุปกรณ์วัดความดันยี่ห้อ Sunx รุ่น DP-100 (หมายเลข 6) ควบคุมความดันภายในห้องอบแห้งซึ่งต่อกับมาตรวัดความดัน (หมายเลข 7) นอกจากนี้ยังมีภาชนะขนาด 30x30 เซนติเมตร (หมายเลข 8) สำหรับวางผลิตภัณฑ์อบแห้ง ทั้งนี้เครื่องอบแห้งได้หุ้มฉนวนเซรามิกไฟเบอร์มีความหนา 12.5 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่ภายนอก มีวาล์วปรับความดัน (หมายเลข 9) และมิเตอร์วัดไฟฟ้ายี่ห้อ Dai-ichi รุ่น DD28 (หมายเลข 10) ติดตั้งอยู่ด้วย



(1) ปั๊มสุญญากาศ (2) ห้องอบแห้ง (3) หลอดรังสีอินฟราเรดไกล (4) เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี (5) เทอร์โมคัปเปิล (6) เครื่องควบคุมความดัน (7) มาตรวัดความดัน (8) ภาชนะสำหรับวางผลิตภัณฑ์ (9) วาล์วปรับความดัน และ (10) มิเตอร์ไฟฟ้า

รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล

2.3 วิธีการทดลอง

2.3.1 การเตรียมกระเจี๊ยบเขียว

ซื้อกระเจี๊ยบเขียว พันธุ์แม่โจ้ 49 ที่มีอายุ 45-50 วัน จากตลาดสดเทศบาล อ.เมือง จ.ตาก แล้วคัดแยกขนาดกระเจี๊ยบเขียวให้มีความยาวประมาณ 13-14 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 เซนติเมตร

จากนั้นนำกระเจี๊ยบเขียว 500 กรัม มาล้างด้วยน้ำเปล่าให้สะอาด แล้วนำไปลวกในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง) ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล ที่มีอุณหภูมิ 98 ± 2 องศาเซลเซียส จำนวน 2 ลิตร นาน 3 นาที และทำให้เย็นทันทีโดยแช่น้ำเย็น (อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส) จำนวน 2 ลิตร นาน 1 นาที แล้วนำขึ้นแล้วพัก

ให้สะอาด น้ำ ทั้งนี้การลวกช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีเขียวในผัก โดยการลวกขัดขวางกลไกการเปลี่ยนแปลงคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ไปเป็นฟีโอไฟติน (Pheophytin) ทำให้สีผักสดใสนั่น ส่วนการเติมโซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง) ในน้ำที่ลวก เพื่อทำให้โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride) ไปรวมตัวกับเพกทิน (Pectin) ในเซลล์พืช ซึ่งช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัส (Texture) ทำให้ผักมีเนื้อแน่น แข็ง และกรอบ [19]

จากนั้นหั่นกระเจี๊ยบเขียวที่ผ่านการลวกแล้วให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ มีความยาวประมาณ 1 เซนติเมตร แล้วบดสับให้ละเอียดด้วยเครื่องบดสับยี่ห้อ Philips รุ่น HR1393 นาน 1 นาที และเทกระเจี๊ยบเขียวที่บดสับแล้วลงบนภาชนะถาดสี่เหลี่ยมที่รองด้วยแผ่นเพลอนขนาด 30x30 เซนติเมตร แล้วเกลี่ยให้เป็นแผ่นบาง ๆ เสมอกัน ใช้ความหนาของแผ่นกระเจี๊ยบเขียวที่ 5 มิลลิเมตร)

2.3.2 วิธีการอบแห้ง

อบแห้งแผ่นกระเจี๊ยบเขียวขนาด 30x30 (กว้างxยาว) เซนติเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง 7 กิโลปาสกาล (ความดันสัมบูรณ์นี้เป็นความดันสัมบูรณ์ที่ต่ำสุดที่เครื่องอบแห้งนี้สามารถทำได้) และอุณหภูมิอบแห้งที่ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิอบแห้งช่วงนี้เหมาะสำหรับอบแห้งกระเจี๊ยบเขียวตามงานวิจัยของ N. Jorntapha and A. Soponapornnara [20] โดยอุณหภูมิอบแห้งแบ่งเป็น 3 ค่า เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ) จนความชื้นของกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งต่ำกว่าร้อยละ 10 มาตรฐานเปียก [21] ทั้งนี้ในแต่ละอุณหภูมิอบแห้งทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

2.3.3 การหาความชื้นของกระเจี๊ยบเขียว

การหามวลแห้งของกระเจี๊ยบเขียวทำได้โดยนำกระเจี๊ยบเขียวไปอบในตู้อบแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จนมวลคงที่ [22] โดยชั่งมวลก่อนและหลังการอบแห้ง แล้วนำค่ามวลที่ได้

ไปคำนวณหาความชื้นของกระเจี๊ยบเขียวที่เวลาใด ๆ ได้ดังสมการ

$$M = \left(\frac{W - D}{W} \right) \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่

M คือ ความชื้นของกระเจี๊ยบเขียวที่เวลาใด ๆ (ร้อยละมาตรฐานเปียก)

W คือ มวลของกระเจี๊ยบเขียวที่เวลาใด ๆ (กรัม)

D คือ มวลแห้งของกระเจี๊ยบเขียว (กรัม)

ทั้งนี้ในแต่ละการทดลอง ความชื้นของกระเจี๊ยบเขียวถูกวัด 3 ซ้ำ

2.4 การหาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้อบแห้งกระเจี๊ยบเขียว

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้อบแห้งกระเจี๊ยบเขียววัดด้วยมิเตอร์ไฟฟ้ายี่ห้อ Dai-ichi รุ่น DD28 ในหน่วย กิโลวัตต์·ชั่วโมง ทั้งนี้ในแต่ละการทดลอง พลังงานไฟฟ้าที่ใช้อบแห้งกระเจี๊ยบเขียวถูกวัด 3 ซ้ำ

2.5 การหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้อบแห้งกระเจี๊ยบเขียว

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้อบแห้งกระเจี๊ยบเขียว คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ใช้อบแห้งกระเจี๊ยบเขียวต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกระเจี๊ยบเขียวอบแห้ง โดยหาจากสมการ [23]

$$SEC = \frac{E_{elec}}{M_w} \quad (2)$$

โดยที่

SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้อบแห้งกระเจี๊ยบเขียว (กิโลวัตต์·ชั่วโมงต่อกิโลกรัม)

E_{elec} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้อบแห้งกระเจี๊ยบเขียว (กิโลวัตต์·ชั่วโมง)

M_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกระเจียบเขียวอบแห้ง (กิโลกรัม)

ทั้งนี้ในแต่ละการทดลอง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ออบแห้งกระเจียบเขียวถูกวัด 3 ชั่วโมง

2.6 การทดสอบคุณภาพด้านสีของผงกระเจียบเขียวอบแห้ง

กระเจียบเขียวอบแห้งถูกบดให้ละเอียดเป็นผงด้วยเครื่องบดอาหารยี่ห้อ Spring Green Evolution รุ่น PG500 ขนาด 1,600 วัตต์ นาน 1 นาที แล้วจึงร่อนผ่านรูดะแกรงขนาด 60 เมช (ขนาดรูดะแกรงช่องละ 0.25×0.25 (กว้างxยาว) มิลลิเมตร) คุณภาพด้านสีของผงกระเจียบเขียวอบแห้งวัดด้วยเครื่องวัดสีอาหารยี่ห้อ Minolta รุ่น CR-10 ใช้ระบบสี CIE LAB วัดค่าสีของผงกระเจียบเขียวอบแห้งในรูปแบบ L^* a^* และ b^* โดยค่า L^* แสดงค่าความสว่าง $+a^*$ แสดงค่าสีแดง $-a^*$ แสดงค่าสีเขียว $+b^*$ แสดงค่าสีเหลือง และ $-b^*$ แสดงค่าสีน้ำเงิน ทั้งนี้ในแต่ละการทดลอง ค่าสีของผงกระเจียบเขียวอบแห้งถูกวัด 3 ชั่วโมง

2.7 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

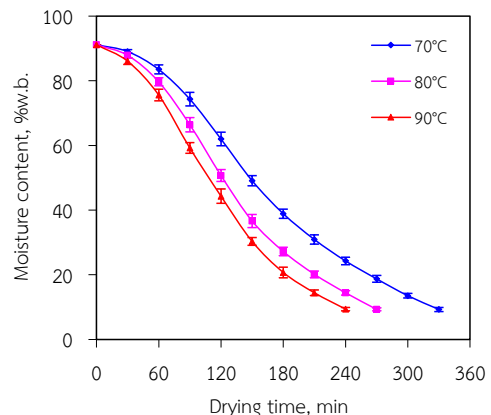
ความชื้นของกระเจียบเขียววิเคราะห์ผลทางสถิติโดยการหาค่าเฉลี่ย ส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ออบแห้งกระเจียบเขียว ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ออบแห้งกระเจียบเขียว ค่าสีของผงกระเจียบเขียวอบแห้ง วิเคราะห์ผลทางสถิติแบบ One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม SPSS

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของกระเจียบเขียว

การเปลี่ยนแปลงความชื้นของกระเจียบเขียวระหว่างการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสี

อินฟราเรดไกล เมื่ออบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง 7 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิอบแห้ง 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 2 พบว่ากระเจียบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่ากระเจียบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปสู่ผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้น น้ำในผลิตภัณฑ์จึงระเหยออกได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้ที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง 7 กิโลปาสกาล กระเจียบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบแห้ง 330 270 และ 240 นาที ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Sakaew et al. [11] และ N. Keeratiyadathanapat et al. [12] โดยพบว่า ที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้งเดียวกัน ระยะเวลาอบแห้งสั้นลงเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของกระเจียบเขียวระหว่างการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล เมื่ออบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง 7 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิอบแห้ง 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส

3.2 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ออบแห้งกระเจียบเขียว

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ออบแห้งกระเจียบเขียวแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล เมื่ออบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง 7 กิโลปาสกาล และ

อุณหภูมิอบแห้ง 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ (หน่วยกิโลวัตต์·ชั่วโมง) มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบแห้งนานกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส เท่ากับ 60 และ 90 นาที ตามลำดับ และพบว่า พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้อบแห้ง (หน่วยกิโลวัตต์·ชั่วโมง) ที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบแห้งใกล้เคียงกัน โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบแห้งนานกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เท่ากับ 30 นาที ทั้งนี้ที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง 7 กิโลปาสคาล กระเจียบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส มีพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้เท่ากับ 2.54 ± 0.06 2.27 ± 0.07 และ 2.25 ± 0.05 กิโลวัตต์·ชั่วโมง ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ยังพบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นทำให้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ต่อชั่วโมง (หน่วยวัตต์) มีค่ามากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงใช้พลังงานไฟฟ้าถ่ายเทความร้อนจากหลอดรังสีอินฟราเรดไกลไปยังอากาศภายในห้องอบแห้งที่มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้ที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง 7 กิโลปาสคาล กระเจียบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส มีพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ต่อชั่วโมงเท่ากับ 461.21 ± 11.11 504.44 ± 16.02 และ 561.67 ± 12.58 วัตต์ ตามลำดับ

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้อบแห้งกระเจียบเขียว

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้อบแห้งกระเจียบเขียวแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล เมื่ออบแห้งที่ความดัน 7 กิโลปาสคาล และอุณหภูมิอบแห้ง 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ยมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ U. Teeboonma and S. Jongjam [9] และ S. Soros et al. [10] โดยพบว่า ที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้งเดียวกัน ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้อบแห้งมีค่ามากขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิอบแห้งลง

อย่างไรก็ตามตารางที่ 2 พบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ยที่ใช้อบแห้งที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้อบแห้งที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) (อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2) ทั้งนี้ที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง 7 กิโลปาสคาล การอบแห้งกระเจียบเขียวที่อุณหภูมิ 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ยเท่ากับ 5.62 ± 0.14 5.03 ± 0.16 และ 4.98 ± 0.11 กิโลวัตต์·ชั่วโมงต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 1 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้อบแห้งกระเจี๊ยบเขียวแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ครั้งที่	เวลาอบแห้ง (นาท)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์·ชั่วโมง)	ค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์·ชั่วโมง)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อ ชั่วโมง (วัตต์)	ค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้า ที่ใช้ต่อชั่วโมง (วัตต์)
70	1	330	2.55	2.54±0.06 ^a	463.64	461.21±11.11 ^c
	2		2.47		449.09	
	3		2.59		470.91	
80	1	270	2.21	2.27±0.07 ^b	491.11	504.44±16.02 ^b
	2		2.35		522.22	
	3		2.25		500.00	
90	1	240	2.20	2.25±0.05 ^b	550.00	561.67±12.58 ^a
	2		2.24		560.00	
	3		2.30		575.00	

หมายเหตุ: อักษรต่างกันในคอลัมน์เดียวกันให้ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ที่ใช้อบแห้งกระเจี๊ยบเขียวแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ครั้งที่	เวลาอบแห้ง (นาท)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์·ชั่วโมง)	ปริมาณน้ำที่ระเหย (กรัม)	SEC (กิโลวัตต์·ชั่วโมงต่อกิโลกรัม)	ค่าเฉลี่ยของ SEC (กิโลวัตต์·ชั่วโมงต่อกิโลกรัม)
70	1	330	2.55	451.36	5.65	5.62±0.14 ^a
	2		2.47	451.68	5.47	
	3		2.59	450.98	5.74	
80	1	270	2.21	451.10	4.90	5.03±0.16 ^b
	2		2.35	451.35	5.21	
	3		2.25	451.59	4.98	
90	1	240	2.20	451.35	4.87	4.98±0.11 ^b
	2		2.24	451.56	4.96	
	3		2.30	450.98	5.10	

หมายเหตุ: อักษรต่างกันในคอลัมน์เดียวกันให้ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.4 คุณภาพด้านสีของผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้ง

ผลการทดสอบคุณภาพด้านสีของผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งซึ่งแสดงเป็นค่า L^* , a^* และ b^* แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่าความสว่าง (ค่า L^*) และค่าสีเขียว (ค่า $-a^*$) น้อยกว่าผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบเมลลาร์ด (Maillard browning reaction) มากกว่า

การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ [24] ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ P. Sa-adchom et al. [25] และ R. Yamsuan et al. [26] โดยพบว่าผลิตภัณฑ์อบแห้งมีสีเข้มหรือคล้ำขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าสีเหลือง (ค่า b^*) น้อยกว่าผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามค่าสีเหลือง (ค่า b^*) ของผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส กับผง

กระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 และ 90 องศาเซลเซียส ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ทั้งนี้กระเจี๊ยบเขียวสดมีค่า L^* a^* และ b^* เท่ากับ 22.13 ± 1.12 -29.05 ± 0.65 และ 16.62 ± 1.24 ตามลำดับ กระเจี๊ยบเขียวหลังการลวกมีค่า L^* a^* และ b^* เท่ากับ 27.52 ± 1.25 -34.49 ± 0.54 และ 13.98 ± 1.06 ตามลำดับ และกระเจี๊ยบเขียวก่อนการอบแห้งมีค่า L^* a^* และ b^* เท่ากับ 51.66 ± 1.19 -22.17 ± 0.48 และ 30.37 ± 1.21 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ยังแสดงผลการเปรียบเทียบคุณภาพด้านสีของผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส กับผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่จำหน่ายในท้องตลาด (ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (Solar drying) และอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying)) พบว่า ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าสีเขียว (ค่า $-a^*$) มากกว่าผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq0.05$) ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าความสว่าง (ค่า L^*) มากกว่าผง

กระเจี๊ยบเขียวอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq0.05$) อย่างไรก็ตามค่าความสว่าง (ค่า L^*) ของผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ทั้งนี้ค่าสีเหลือง (ค่า b^*) ของผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส กับผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์และอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง 7 กิโลปาสกาล และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีคุณภาพด้านสีดีกว่าผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่จำหน่ายในท้องตลาด (ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์และอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง) เนื่องจากการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลเป็นกระบวนการลดความดันในขณะอบแห้ง ทำให้น้ำในอาหารระเหยที่อุณหภูมิต่ำ และช่วยลดการสูญเสียสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ด้านสี [6]

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบคุณภาพด้านสี (ค่า L^* a^* และ b^*) ของผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้ง

วิธีการอบแห้ง	อุณหภูมิอบแห้ง	L^*	a^*	b^*
ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล	70 องศาเซลเซียส	48.61 ± 1.03^a	-17.39 ± 0.53^e	24.28 ± 1.17^b
	80 องศาเซลเซียส	46.14 ± 0.92^b	-15.28 ± 0.64^d	25.50 ± 1.11^{ab}
	90 องศาเซลเซียส	42.65 ± 1.14^c	-9.98 ± 0.56^b	26.60 ± 1.05^a
ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่จำหน่ายในท้องตลาด (อบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ (Solar drying))	-	44.45 ± 1.08^{bc}	-8.70 ± 0.61^a	23.46 ± 1.14^b
ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่จำหน่ายในท้องตลาด (อบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying))	-	48.30 ± 1.16^a	-12.83 ± 0.58^c	24.78 ± 1.21^{ab}

หมายเหตุ: อักขระต่างกันในกลุ่มเดียวกันให้ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4. สรุป

การอบแห้งกระเจี๊ยบเขียวแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง 7 กิโลปาสคาล และอุณหภูมิอบแห้ง 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่า กระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่ากระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ การอบแห้งกระเจี๊ยบเขียวที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีพลังงานไฟฟ้าและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากกว่าการอบแห้งกระเจี๊ยบเขียวที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีค่าความสว่าง (ค่า L^*) และค่าสีเขียว (ค่า $-a^*$) น้อยกว่าผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งกระเจี๊ยบเขียวแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง 7 กิโลปาสคาล คือ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เนื่องจากได้ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่มีคุณภาพด้านสีดีที่สุด และมีพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้เท่ากับ 2.54 ± 0.06 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งใกล้เคียงกับการอบแห้งกระเจี๊ยบเขียวที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งมีพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้เท่ากับ 2.27 ± 0.07 และ 2.25 ± 0.05 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพด้านสีของผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส กับผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่จำหน่ายในท้องตลาด (ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์และอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง) พบว่า ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าสีเขียว (ค่า $-a^*$) มากกว่าผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์และอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าความสว่าง (ค่า L^*) มากกว่าผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ผงกระเจี๊ยบเขียวอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ของห้องอบแห้ง 7 กิโลปาสคาล และอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบแห้ง 330 นาที มีคุณภาพด้านสีที่ดี และสามารถผลิตเพื่อจำหน่ายเชิงพาณิชย์ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มวิสาหกิจชุมชนการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร ตำบลไม้จาม อำเภอมะนัง จังหวัดตาก ที่ได้ให้ความร่วมมือทำงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Agricultural Economics, *Okra*, 1st ed. Bangkok: Office of Agricultural Economics, 2020.
- [2] P. Jitjaroenrungruang, "Development of polysaccharide from okra for cosmetic products," Independent study, Dept. Cosmetic Sci., Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand, 2015.
- [3] S. Trakultaweeapat, "Study on dried basil leaf with low temperature and relative humidity," M.S. thesis, Dept. Energy Tech., King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2017.
- [4] S. Saksuwan, "Product development of dried mango without sugar added using combined microwave and hot air drying technique," M.Eng. thesis, Dept. Energy Tech., King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2017.
- [5] P. Sa-adchom and T. Swasdisewi, "Pork slices drying using a combined vacuum and far-infrared radiation technique," *Industrial*

- Technology Lampang Rajabhat University Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 83-97, Jan. 2014.
- [6] C. Rattanamongkol, "Drying kinetics of vacuum far-infrared drying of mango," M.Eng. thesis, Dept. Food Eng., Maejo University, Chiang Mai, Thailand, 2018.
- [7] P. Kongpootha, U. Tapai and P. Sa-adchom, "Effect of drying temperatures on charcoal briquettes drying using a combined solar energy and far-Infrared radiation dryer, and a far- infrared radiation dryer," *RMUTP Research Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 77-93, Mar. 2016.
- [8] W. Pumpha, V. Khon-ngam, S. Labuawong, P. Arwat and P. Sa-adchom, "Production of roasted chicken in jar using heat transfers from far-infrared ray," *RMUTP Research Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 85-97, Mar. 2020.
- [9] U. Teeboonma and S. Jongjam, "Ginger drying using infrared-vacuum technique," *Burapha Science Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 76-86, Jul. 2010.
- [10] S. Soros, P. Toomthong, S. Suayklang and N. Keeratiyadathanapat, "Infrared-vacuum drying machine," Research report, Dept. Agricultural Machinery, Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus, Surin, Thailand, 2013.
- [11] S. Sakaew, P. Toomthong and T. Homchampa, "Drying of herbal using infrared-vacuum," Research report, Dept. Electrical Tech., Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus, Surin, Thailand, 2014.
- [12] N. Keeratiyadathanapat, A. Leetrakool and S. Srina, "Hang-rice drying by Thai jasmine rice 105 using infrared-vacuum," Research report, Dept. Mechanical Eng., Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus, Surin, Thailand, 2015.
- [13] P. Praneetpolkrang and P. Leekun, "Khlu leave tea drying using infrared-vacuum technique," Research report, Dept. Industrials Tech., Rambhai Barni Rajabhat University, Chanthaburi, Thailand, 2016.
- [14] S. Thanimkarn, "Drying of *Cissus quadrangularis* Linn. using vibration assisted infrared drying under vacuum conditions," Ph.D. dissertation, Dept. Agricultural Eng., King Mongkut's Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 2019.
- [15] K. Witinantakit, N. Uengkimbuan and S. Rungsawang, "Mathematical modeling of shiitake mushroom drying using infrared-vacuum technique," *SWU Engineering Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 1-13, Sep. 2019.
- [16] W. Manangan and K. Witinantakit, "Water lily drying using pulsed vacuum-infrared combined with silica sand embedding," *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 84-98, Sep. 2020.
- [17] K. Witinantakit, W. Manantaphong, J. Sitranon and E. Boonthum, "The drying kinetic of ginger slices using pulsed vacuum dryer," *Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 21-31, Jan. 2021.

- [18] S. Jaekhom, K. Witinantakit and E. Boonthum, “ Herb drying using vacuum combined infrared radiation and hot air,” *Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 32-43, Jan. 2021.
- [19] C. Chucherd and N. Limtiyayothin, “ The seasoned star gooseberry baked sheet product,” Special project, Dept. Food Services Industry, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand, 2016.
- [20] N. Jorntapha and A. Soponaumpornnara, “Production of crispy okra sheet by hot air oven dryer,” B.Sc. special project, Dept. Food Sci. & Tech., Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand, 2015.
- [21] W. Saengthongpinit, S. Thakham, P. Theptubtim and P. Fuengfu, “ Development of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) and water spinach (*Ipomoea aquatica* Var. *reptans*) sheet as a healthy snack,” in *Proceeding of the 7th NPRU National Academic Conference*, Nakhon Pathom, 2015, pp. 771-780.
- [22] AOAC, *Official Methods of Analysis of AOAC International*, 19th ed. Virginia: Association of Official Analytical Chemists, 2019.
- [23] A. Panyayuen, J. Lek-ong, K. Kunsuwan and P. Sa-adchom, “ The study of suitable drying time and physical characteristic of pork slices dried using microwave followed by hot air,” *RMUTP Research Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 63-77, Jan. 2019.
- [24] P. Sa-adchom, T. Swasdisevi, T. Thomthong, P. Samuttharin and S. soponronnarit, “Drying of ground fish slices using superheated steam,” *RMUTP Research Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 74-86, Mar. 2013.
- [25] P. Sa-adchom, P. Supavititpatana and T. Supavititpatana, “ Effect of drying temperature on foam-mat tamarind drying using far-infrared radiation,” in *Proceeding of the 18th TSAE National Conference and the 10th TSAE International Conference*, Bangkok, 2015, pp. 277-282.
- [26] R. Yamsuan, K. Ruttarattanamongkol and R. Assavarachan, “Drying modelling and influence of temperature on physicochemical properties of soft dried pickled ginger,” *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 47-57, Mar. 2018.

การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวม จากสารสกัดยาอายุวัฒนะ

จิรภัทร เล่ห์สิงห์¹ ธิญญา พรหมศรี^{1*} กริยาภา หลายรุ่งเรือง² และ เจมส์ พิงผล³

¹สาขาวิชาการแพทย์แผนไทยประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

²วิทยาลัยการแพทย์แผนไทยอภัยภูเบศร จังหวัดปราจีนบุรี คณะสาธารณสุขศาสตร์และสหเวชศาสตร์

สถาบันพระบรมราชชนก กระทรวงสาธารณสุข

³วิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุข กาญจนาภิเษก คณะสาธารณสุขศาสตร์และสหเวชศาสตร์

สถาบันพระบรมราชชนก กระทรวงสาธารณสุข

¹ 1 ถนนอุทองนอก แขวงดุสิต เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

² 225 หมู่ 11 ตำบลไม้เค็ด อำเภอมืองปราจีนบุรี จังหวัดปราจีนบุรี 25230

³ 56 หมู่ 1 ถนนคลองขวาง-เจ้าเฟื่อง ตำบลราษฎร์นิยม อำเภอนนทบุรี 11150

รับบทความ 1 ตุลาคม 2565 แก้ไขบทความ 20 มกราคม 2566 ตอรับบทความ 13 กุมภาพันธ์ 2566

บทคัดย่อ

ตามความเชื่อของแพทย์พื้นบ้าน ยาอายุวัฒนะเป็นยาบำรุงร่างกายที่มีสรรพคุณช่วยให้คนมีสุขภาพดี และมีอายุยืน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และเปรียบเทียบปริมาณฟีนอลิกรวมจากสารสกัดยาอายุวัฒนะชนิดลูกกลอน สกัดยาโดยการต้มยาด้วยน้ำกลั่น และการหมักยาในเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 95, 70 และ 50 ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าสารสกัดด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุด และพบปริมาณฟีนอลิกรวมมากที่สุด โดยวิธี 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging assay ให้ค่า IC_{50} เท่ากับ 87.23 ± 1.53 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร วิธี Ferric reducing antioxidant power (FRAP) assay แสดงค่า FRAP เท่ากับ 40.96 ± 0.91 มิลลิกรัมสมมูลของกรดเฟอริกต่อกรัมสารสกัด และแสดงค่า Trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) เท่ากับ 20.33 ± 0.85 มิลลิกรัมสมมูลของโทรลอกซ์ต่อกรัมสารสกัด และปริมาณฟีนอลิกรวมมีค่าเท่ากับ 25.53 ± 1.54 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัด ขณะที่สารสกัดด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 70, 95 และการต้มยาด้วยน้ำกลั่น ให้ผลน้อยกว่าสารสกัดด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 ตามลำดับ

คำสำคัญ : ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ; ยาอายุวัฒนะ; ลูกกลอน; ปริมาณฟีนอลิกรวม

Study on Antioxidant Activities and Total Phenolic Contents Analysis from the Elixir Extracts

Jirapat Laysing¹ Thanya Promsorn^{1*} Kriyapa Lairungruang² and James Phungphol³

¹Applied Thai Traditional Medicine Program, Graduate School, Sunandha Rajabhat University

²Abhaibhubejhr College of Thai Traditional Medicine Prachinburi, Faculty of Public Health and Allied Health Sciences, Praboromarajchanok Institute, Ministry of Public Health

³Kanchanabhishek Institute of Medical and Public Health Technology, Faculty of Public Health and Allied Health Sciences, Praboromarajchanok Institute, Ministry of Public Health

¹ 1 U-Thong Nok Road., Dusit., Bangkok 10300 Thailand

²225 Moo. 11, Maiket Mueang Prachinburi Prachinburi 25230 Thailand

³56 Moo. 1, Khlong Khwang-Chao Fueng Rat Niyom Sai Noi Nonthaburi 11150 Thailand

Received 1 October 2022; Revised 20 January 2023; Accepted 13 February 2023

Abstract

According to folk medicine beliefs, elixir was a body tonic with properties that help people stay healthy and live longer. The purposes of this research were to compare the antioxidant activities, and to compare the total phenolic contents from bolus elixir extracts. The drug was extracted by boiling with distilled water and maceration with 95%, 70%, and 50% ethanol, respectively. The results showed that extracts with 50% ethanol had the best antioxidant activities, and found the highest total phenolic contents as follows: 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging assay gave IC_{50} of 87.23 ± 1.53 $\mu\text{g/mL}$, Ferric reducing antioxidant power (FRAP) assay showed the value was 40.96 ± 0.91 $\text{mgFe}^{2+}/\text{g}$, and Trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) value was 20.33 ± 0.85 mgTrolox/g , and total phenolic contents was equal to 25.53 ± 1.54 mg GAE/g . The extracts with 70%, 95% ethanol, and distilled water showed less effective than the extracts with 50%, respectively.

Keywords : Antioxidant Activity; Elixir; Bolus; Total phenolic contents

** Corresponding Author. Tel.: +669 1797 4242, E-mail Address: thanya.pr@ssru.ac.th*

1. บทนำ

“สารต้านอนุมูลอิสระ” หรือ “สารแอนติออกซิแดนท์” เป็นสารที่ทำหน้าที่ชะลอการเกิดกระบวนการออกซิเดชัน [1] แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) สารต้านอนุมูลอิสระที่เป็นเอนไซม์ (Enzyme) ได้แก่ Superoxide Dismutase, Catalase, และ Glutathione Peroxidase 2) สารต้านอนุมูลอิสระ ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Nonenzymatic) โดยส่วนใหญ่เป็นกลุ่ม ที่มักพบในพืชธรรมชาติ ได้แก่ Ascorbic acid หรือ วิตามินซีและกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compounds) จำพวก ฟีนอล (Phenol) ฟีนอลิก (Phenolic Acids) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) แทนนิน (Tannins) ไกลโคไซด์ (Glycosides) อัลคาลอยด์ (Alkaloids) ลิกนิน (Lignins) และอื่นๆ [2] อย่างไรก็ตามแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญและนับว่าปลอดภัยที่สุด คืออาหาร พืช ผัก และผลไม้ [3] ขณะที่ร่างกายมีอายุมากขึ้น ความสามารถในการสร้างสารต้านอนุมูลอิสระกลับลดลง ทำให้ขาดความสมดุลระหว่างปริมาณอนุมูลอิสระและสารต้านอนุมูลอิสระ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการรับประทานอาหารประเภท พืช ผัก และผลไม้ ซึ่งเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระประเภทวิตามิน และเกลือแร่ เพื่อปรับสมดุลของสารต้านอนุมูลอิสระภายในร่างกาย และเป็นการป้องกันโรคต่าง ๆ ที่มีสาเหตุจากอนุมูลอิสระ

วิธีวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีการทำลายอนุมูลอิสระดีพีพีเอช (DPPH assay) เปรียบเทียบกับสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้เป็นสารมาตรฐานคือ BHT หรือ Butylated Hydroxytoluene (3, 5-di-tert-butyl-4-hydroxytol) และการวิเคราะห์ความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของสารต้านอนุมูลอิสระ (FRAP assay) เทียบกับกรฟามาตรฐาน Ferrous Sulfate ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะมีการสร้างอนุมูลอิสระที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนและวิเคราะห์ความสามารถในการยับยั้งหรือกำจัดอนุมูลอิสระของสารตัวอย่างที่สนใจโดยวัดปริมาณอนุมูลอิสระที่ลดลงหรือที่เหลือจากค่าการดูดกลืนแสง การประเมินประสิทธิภาพเชิงปริมาณของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระนิยมประเมินได้ 2 แบบ คือ แบบปริมาณ

ความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีในตัวอย่างซึ่งค่าตัวเลขสูงก็แสดงว่ามีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูง และแบบปริมาณความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่ทำให้สารอนุมูลอิสระลดลงร้อยละ 50 (IC_{50} , 50% of Inhibitory Concentration) โดยค่าตัวเลขต่ำแสดงว่ามีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูง [4] และการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวม (Total Phenolic Contents) ใช้สารละลาย Folin-Ciocalteu (F-C reagent) เป็นการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวม ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่มักพบในพืชธรรมชาติ [5]

ตำรับยาอายุวัฒนะจากบันทึกของแผ่นดิน 7 “สมุนไพรรักษาแม่หญิง” เขียนโดย ภญ.ดร.สุภาภรณ์ ปิติพร โรงพยาบาลเจ้าพระยาอภัยภูเบศร จังหวัดปราจีนบุรี กล่าวว่า “หึ่งอากาศ พาดต้นไม้ หงายธรณีหนีสงสาร ไปนิพพานไม่กลับ” เมื่อถอดรหัสตำรับยาอายุวัฒนะแล้วเห็นว่ามีส่วนประกอบอยู่ 5 สิ่ง คือ หึ่งอากาศ คือ น้ำผึ้ง พาดต้นไม้ คือ บอระเพ็ด หงายธรณี คือ หัวเหวหมู หนีสงสาร คือ ขมิ้นชัน ไปนิพพานไม่กลับ คือ ผักเสี้ยน สรรพคุณ ทำให้ผายลม บำรุงธาตุ เจริญอาหาร แก้อืดเมื่อย ทำให้นอนหลับ ช่วยให้การขับถ่ายเป็นปกติ ดังนั้นยาอายุวัฒนะเป็นยาที่ต้องรักษาก่อนเพื่อเป็นการสร้างร่างกายให้สมบูรณ์แข็งแรง มีภูมิคุ้มกันต่อโรคได้ดี แล้วจึงรักษาอาการป่วยที่เกิดจากความเสื่อมของร่างกายได้ ซึ่งส่วนมากจะเป็นโรคเรื้อรัง เช่น โรคความดันโลหิตสูง โรคเบาหวาน โรคอัมพฤกษ์อัมพาต โรคเมเร็ง โรคหัวใจ โรคผอมแห้ง โรคอ้วน โรคแก่เร็วเกินไป ที่เกิดจากร่างกายขาดความสมดุลระหว่างปริมาณสารอนุมูลอิสระและสารต้านอนุมูลอิสระ ในทางแพทย์แผนไทยหมายถึงธาตุไม่ปกติ ซึ่งยาอายุวัฒนะเข้าไปส่งเสริมธาตุให้ปกติ [6]

บอระเพ็ด มีการศึกษาความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ด้วยน้ำกลั่น เอทานอล เท่ากับ 1.10 ± 0.01 และ 7.21 ± 1.24 มิลลิกรัมสมมูลของวิตามินอีต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ [7]

หัวเหวหมู มีการศึกษาความสามารถในการต้านออกซิเดชัน ด้วยน้ำกลั่น เอทานอล เท่ากับ 4.03 ± 1.93

และ 3.99 ± 2.25 มิลลิกรัมสมมูลของวิตามินอีต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ [7]

ขมิ้นชัน มีการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ สกัดด้วยเมทานอล โดยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl scavenging (DPPH) โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 52.06 ไมโครกรัมต่อมิลลิตร [8]

ผักเสี้ยนผี มีการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ สกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ คลอโรฟอร์ม เมทานอล และน้ำกลั่น จากการศึกษาพบว่าสารสกัดผักเสี้ยนผีในปิโตรเลียมอีเทอร์ และคลอโรฟอร์ม ไม่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ ในขณะที่สารสกัดเมทานอลแสดงฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl scavenging (DPPH) โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 56.39 ไมโครกรัมต่อมิลลิตร และจับอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ (superoxide scavenging activity) โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 919.70 ไมโครกรัมต่อมิลลิตร [9]

หลักการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมเพื่อสกัดให้ได้สารที่ต้องการออกมามาก และไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการสกัด คลอโรฟอร์ม (Chloroform) เป็นตัวทำละลายที่ดีแต่เกิด emulsion ง่าย เฮกเซน (Hexane) มีความเป็นพิษต่อระบบประสาท คือ อาการแขน-ขาอ่อนแรง และอาจเป็นอัมพาตได้ แอลกอฮอล์ (Alcohol) ที่ใช้มากคือ เมทานอลและเอทานอล เนื่องจากมีคุณสมบัติในการละลายได้กว้างทั้งสารที่มีขั้วและไม่ขั้วและยังใช้ทำลายเอนไซม์ในพืชได้ [10]

ถึงแม้จะมีข้อมูลสนับสนุนฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสมุนไพรแต่ละชนิดในตำรายาอายุวัฒนะ แต่ยังไม่พบการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดยาอายุวัฒนะชนิดลูกกลอน ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และเปรียบเทียบปริมาณฟีนอลิกรวมจากสารสกัดยาอายุวัฒนะชนิดลูกกลอน ด้วยตัวทำละลายที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นข้อมูลในการสนับสนุนในการเลือกใช้ตำรายาอายุวัฒนะ และเพื่อเผยแพร่ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ให้กับประชาชน หน่วยงาน และบุคลากรที่เกี่ยวข้อง

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ยาลูกกลอนตำรายาอายุวัฒนะ โรงพยาบาลเจ้าพระยาอภัยภูเบศร จังหวัดปราจีนบุรี มีส่วนประกอบ ได้แก่ บอระเพ็ด หัวแห้วหมู ขมิ้นชัน ผักเสี้ยนผี หนังกิ่งละ 15 กรัม และน้ำผึ้ง ปั่นเป็นลูกกลอน นำยาลูกกลอนมาสกัดโดยการหมักด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 95, 70 และ 50 และสกัดด้วยวิธีการต้มยาด้วยน้ำกลั่น ศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH assay (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl radical scavenging assay) และ วิเคราะห์ความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของสารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP assay (Ferric Reducing Antioxidant Power) รวมทั้งวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวม (Total Phenolic Contents)

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

2.1.1 เครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมี

เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น AB 204-S, Switzerland) เครื่องระเหยสุญญากาศ (ยี่ห้อ Buchi รุ่น R-100, Switzerland) เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (ยี่ห้อ Sp scientific รุ่น Advantage pro, England) เครื่องอ่านไมโครเพลท (ยี่ห้อ Biotek รุ่น Synergy H1 MFD, USA) สารเคมี 95% ethanol, commercial grade (บริษัท C.M.J. Anchor, Thailand) 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (บริษัท Fluka, USA) และ 3, 5-di-tert-butyl-4-hydroxytol (BHT) (บริษัท Fluka, USA)

2.1.2 การเตรียมสารสกัด

2.1.2.1 การหมัก (Maceration)

นำยาลูกกลอนตัวอย่างละ 50 กรัม ใส่ในภาชนะที่มีฝาปิดสนิทเติมเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95, 70 และ 50 อย่างละ 100 มิลลิตรลงไปตามลำดับ ปิดฝาหมักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยเขย่าวันละ 3 เวลา เป็นเวลา 3 วัน แล้วนำมารองแยกกากออกด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำกากตัวอย่างเดิมมาสกัดซ้ำอีก 2 รอบ นำส่วนที่เป็นสารสกัดมาระเหยเอาตัวทำละลายออก โดยใช้เครื่อง

ระเหยสูญญากาศ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จนได้สารสกัดที่มีลักษณะข้นและเหนียวหนืด จากนั้นชั่งน้ำหนักสารสกัดจนน้ำหนักคงที่ แล้วเก็บสารสกัดไว้ในตู้แช่แข็ง -20 องศาเซลเซียส [11]

2.1.1.2 การต้ม (Decoction)

นำยาลูกกลอนตัวอย่างละ 50 กรัม จากนั้นใส่ลงในหม้อต้มน้ำ จนท่วมตัวย่า ต้มเดือดนาน 15 นาที จากนั้นกรองด้วยผ้าขาวบาง แล้วกรองซ้ำด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 เพื่อแยกเอากากออก ทำ 3 ซ้ำ นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปทำแห้ง โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ชั่งน้ำหนักแห้งของสารสกัด เก็บในภาชนะปิดสนิท เก็บไว้ในตู้แช่แข็ง -20 องศาเซลเซียส [12] การคำนวณหาค่า % Yield ดังสมการที่ (1)

$$\% \text{ Yield (Dry Weight Basis)} = \frac{(W_1 \times 100)}{W_2} \quad (1)$$

โดยที่

% Yield = ร้อยละของสารสกัดที่ได้

W_1 = น้ำหนัก (กรัม) ของสารสกัดหลังจากระเหยตัวทำละลายโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

W_2 = น้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง

2.1.3 วิธีการตรวจสอบความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ

วิธีการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH (ดัดแปลงจาก Hatano และคณะ (1989) และ Yamasaki และคณะ (1994) DPPH เป็นอนุมูลอิสระที่เสถียรสามารถถ่ายเทอิเล็กตรอนในโมเลกุลได้ ซึ่งจะทำให้เกิดสารละลายสีม่วง เมื่อได้รับสารต้านอนุมูลอิสระจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง [13], [14]

2.1.3.1 การเตรียมสารละลาย DPPH

เตรียม DPPH ความเข้มข้น 6×10^{-5} โมลาร์ ชั่ง 2.4 มิลลิกรัม ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วย Absolute Ethanol แล้วเก็บในที่พ้นแสง

2.1.3.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐาน Butylated Hydroxytoluene (BHT) ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วย Absolute Ethanol จากนั้นนำมาเจือจางที่ความเข้มข้น 100, 50, 10 และ 1 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

2.1.3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง

เตรียมสารสกัดยา ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางด้วยตัวทำละลายของสารสกัด ความเข้มข้น 100, 50, 10 และ 1 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

2.1.3.4 วิธีการทดสอบ

1) ปิเปตต์สารสกัด 100 ไมโครลิตร ใส่ในไมโครเพลท 96 หลุม ที่ความเข้มข้น 100, 50, 10 และ 1 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และเติมสารละลาย DPPH 100 ไมโครลิตร เพื่อทำปฏิกิริยา

2) ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องอ่านไมโครเพลท

3) รายงานผลการทดลอง เป็นค่า 50% Inhibitory Concentration (IC_{50}) คือค่าความสามารถในการต้านออกซิเดชัน คำนวณผลโดยใช้โปรแกรม GraphPad Prism version 9.3.1 รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SEM ดังสมการที่ (2)

การคำนวณหาค่า % inhibition

$$\% \text{ Inhibition} = \frac{[A (\text{Control}) - A (\text{Sample})]}{A (\text{Control})} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่

% Inhibition = ร้อยละการต้านอนุมูลอิสระ

$A (\text{Control})$ = ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ของสารละลาย DPPH

A (Sample) = ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ของสารสกัดผสมกับสารละลาย DPPH
หมายเหตุ ในแต่ละความเข้มข้นจะทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง (Triplicate)

2.1.4 วิธีการตรวจสอบความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ

วิธีการวิเคราะห์ความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของสารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP (ดัดแปลงจาก Brand และคณะ (1995) เตรียม FRAP Reagent โดยผสม Acetate Buffer, 2,4,6-Tris(2-pyridyl)-s-triazine (TPTZ), ($C_{18}H_{12}N_6$) และ Ferric Chloride ในอัตราส่วน 10:1:1 ตามลำดับ [15]

2.1.4.1 การเตรียมสารละลาย

1) เตรียมสารละลาย Acetate Buffer เข้มข้น 300 มิลลิโมลาร์ pH 3.6 ซึ่ง Sodium Acetate Trihydrate ($C_2H_3NaO_2$) และผสม Glacial Acetic Acid 16 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ตั้งไว้ในอุณหภูมิห้อง

2) เตรียมสารละลาย TPTZ เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ใน 40 มิลลิโมลาร์ (M.W. 312.34) โดยชั่ง TPTZ 15.617 มิลลิกรัม ผสมกับ 40 มิลลิโมลาร์ HCl ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ตั้งไว้ในอุณหภูมิห้อง หลีกเลี่ยงการสัมผัสแสง

3) เตรียมสารละลาย Ferric Chloride เข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ ซึ่ง $FeCl_3 \cdot 27.03$ มิลลิกรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ตั้งไว้ในอุณหภูมิห้อง

4) นำสารละลาย 1) และ 2) ผสมให้เข้ากัน จากนั้นผสมสารละลาย 3) จะได้เป็น FRAP Reagent สารละลายเป็นสีน้ำตาลเทาหม่น

2.1.4.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

1) เตรียม Trolox เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางด้วย Absolute Ethanol ให้ได้เป็น 6 ความเข้มข้น ดังนี้

300, 200, 100, 50, 25 และ 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

2) เตรียม Ferrous Sulfate ($FeSO_4$) เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางด้วยน้ำกลั่น ให้ได้เป็น 6 ความเข้มข้น คือ 300, 200, 100, 50, 25 และ 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

3) เตรียมสารละลายมาตรฐาน Butylated Hydroxytoluene (BHT) ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางด้วย Absolute Ethanol

2.1.4.3 การเตรียมสารตัวอย่าง

เตรียมสารสกัดยา ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางด้วยตัวทำละลายของสารสกัด

2.1.4.4 วิธีการทดสอบ

1) ปิเปตต์สารสกัดและสารละลายมาตรฐาน 20 ไมโครลิตร ใส่ในไมโครเพลท 96 หลุม

2) เติม FRAP reagent 180 ไมโครลิตร ที่ถูกอุ่นด้วยอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที นำไปเติมลงในไมโครเพลท 96 หลุม

3) ตั้งทิ้งไว้ 8 นาที ที่อุณหภูมิห้อง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องอ่านไมโครเพลท

2.1.5 การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวม (Total Phenolic Contents)

การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวม (Total Phenolic Contents) โดยวิธี Folin-Ciocalteu's Procedure (ดัดแปลงจาก Miliauskas และคณะ (2004) [5]

2.1.5.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

1) กรดแกลลิก เข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ เตรียมกรดแกลลิก 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางด้วย Absolute Ethanol ให้ได้เป็น 7 ความเข้มข้น ดังนี้ 500, 250, 100, 50, 25, 10 และ 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

2) เตรียม Sodium Carbonate Anhydrous 1.875 กรัม จำนวน 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางด้วย น้ำกลั่น 7 ความเข้มข้น ดังนี้ 500, 250, 100, 50, 25, 10 และ 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

3) Folin-Ciocalteu's Phenol ความเข้มข้น ร้อยละ 10 โดยปริมาตร (10% v/v) นำสารละลาย Folin-Ciocalteu's Phenol ให้มีความเข้มข้นเป็น ร้อยละ 10 โดยปริมาตร จากนั้นนำมาเจือจางด้วย น้ำกลั่น ให้ได้เป็น 7 ความเข้มข้น ดังนี้ 500, 250, 100, 50, 25, 10 และ 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

4) เตรียมสารละลายมาตรฐาน Butylated Hydroxytoluene (BHT) ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อ มิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางด้วย Absolute Ethanol

2.1.5.2 การเตรียมสารตัวอย่าง

1) เตรียมสารสกัดยา ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นนำมาเจือจางด้วยตัวทำละลายของ สารสกัด

2.1.5.3 วิธีการทดสอบ

1) ปิเปตต์สารสกัดและสารละลายมาตรฐาน 20 ไมโครลิตร ใส่ในไมโครเพลท 96 หลุม

2) ปิเปตต์กรดแกลลิก 20 ไมโครลิตร 7 ความเข้มข้น คือ 500, 250, 100, 50, 25, 10 และ 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ใส่ในไมโครเพลท 96 หลุม

3) เติมสารละลายของ Folin-Ciocalteu's Phenol เจือจาง 100 ไมโครลิตร ใส่ในข้อ 1) และ 2)

4) เติมสารละลาย Sodium Carbonate 80 ไมโครลิตร ใส่ในข้อ 1) และ 2)

5) ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องอ่าน ไมโครเพลท รายงานผลการทดลอง

การคำนวณปริมาณฟีนอลิกรวมในตัวอย่างสารสกัด

$$\text{mgGAE/g} = \left(\frac{\text{Absorbance } 765 - X}{\text{Slope}} \right) \times \left(\frac{\text{Dilution} \times \text{Volume}}{1000} \right) \times W \quad (3)$$

โดยที่

mgGAE/g = มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัม สารสกัด

W = น้ำหนักของตัวอย่างยา มีหน่วยกรัม

Slope = ความชันจากกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก

Volume = ปริมาตรของสารสกัดทั้งหมด มีหน่วย มิลลิลิตร

Dilution = ค่าการเจือจางตัวอย่างก่อนนำมาวิเคราะห์

Absorbance = ค่าดูดกลืนแสงที่วัดได้ของตัวอย่าง หรือสารมาตรฐานนำค่า Absorbance ที่วัดได้ทำการหา มาตรฐานของสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก และ หาค่า Linear Regression หาค่าความเข้มข้นของ สารละลายตัวอย่างจากกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก หมายเหตุ ในแต่ละความเข้มข้นจะทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง (Triplicate)

2.1.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

รายงานผลการทดลองเป็นค่าเฉลี่ย (Mean) $\pm$ ความคลาดเคลื่อน (SEM) จากข้อมูลผลการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ค่า IC_{50} คำนวณด้วยโปรแกรม GraphPad Prism 9.3.1 และวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าทางสถิติ ด้วยโปรแกรม SPSS Statistics 22 ใช้ One-Way, ANOVA เพื่อเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ สารสกัดตำรับยาอายุวัฒนะที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่ต่างกัน และเพื่อเปรียบเทียบปริมาณฟีนอลิกของสารสกัดตำรับ ยาอายุวัฒนะที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่ต่างกัน

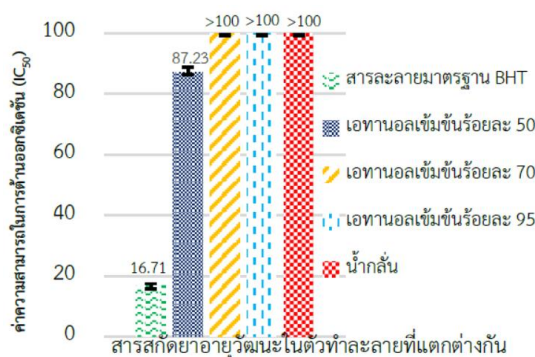
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

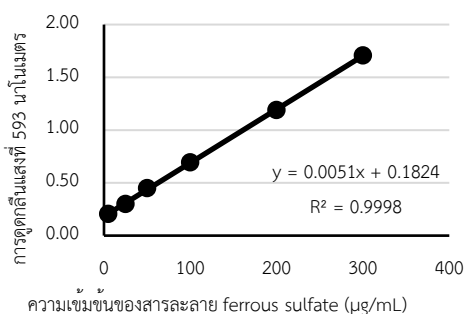
3.1.1 การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH

ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ของสารสกัดยาอายุวัฒนะ พบว่า สารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ

87.23±1.53 ไมโครกรัมต่อมิลลิเมตร สารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่ ความเข้มข้น ร้อยละ 95 70 และน้ำกลั่น ไม่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ โดยมีค่า IC_{50} มากกว่า 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิเมตร ตามลำดับ สารละลายมาตรฐาน BHT มีค่า IC_{50} เท่ากับ 16.71±0.67 ไมโครกรัมต่อมิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธีของสารสกัดยาอายุวัฒนะ ชนิดลูกกลอน ที่ใช้ตัวทำละลายในการสกัดที่แตกต่างกัน

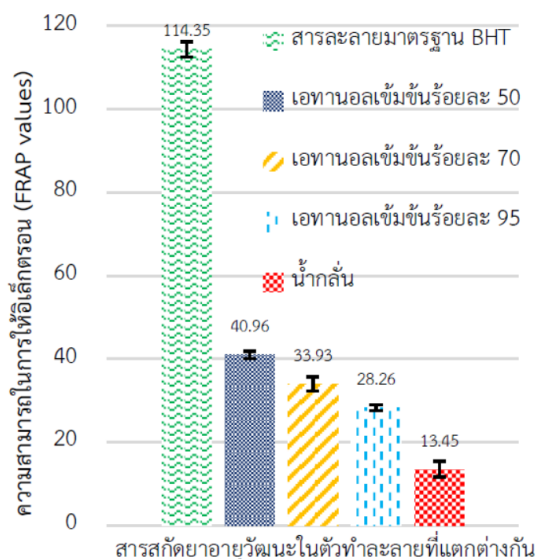


รูปที่ 2 กราฟมาตรฐานแสดงการดูดกลืนแสงที่ 593 นาโนเมตร ด้วยวิธี FRAP ของสารละลาย Ferrous sulfate ที่ความเข้มข้นต่างๆ

3.1.2 การทดสอบความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของสารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP

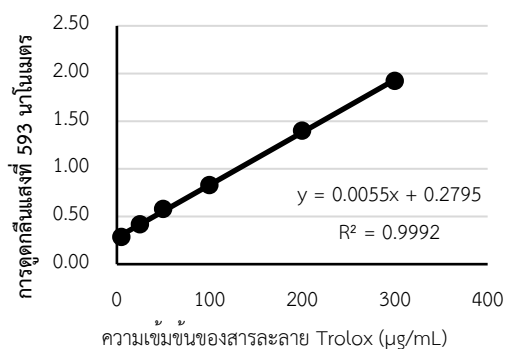
3.1.2.1 ผลการทดสอบความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของสารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP คำนวณได้จากการ

สร้างกราฟมาตรฐาน Ferrous sulfate จากกราฟมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9998 และมีสมการคือ $y=0.0051x+0.1824$ แสดงดังรูปที่ 2 สารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่ ความเข้มข้น ร้อยละ 50 มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนสูงที่สุด โดยมีค่า FRAP เท่ากับ 40.96±0.91 มิลลิกรัมสมมูลของกรดเพอริกต่อกรัมสารสกัด รองลงมาคือ สารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่ ความเข้มข้น ร้อยละ 70 และ 95 มีค่า FRAP เท่ากับ 33.93±1.68 และ 28.26±0.70 มิลลิกรัมสมมูลของกรดเพอริกต่อกรัมสารสกัด ตามลำดับ และสารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยน้ำกลั่น มีค่าในการต้านอนุมูลอิสระต่ำที่สุด มีค่า FRAP เท่ากับ 13.45±1.88 มิลลิกรัมสมมูลของกรดเพอริกต่อกรัมสารสกัด สารละลายมาตรฐาน BHT มีค่า FRAP เท่ากับ 114.35±1.85 มิลลิกรัมสมมูลของกรดเพอริกต่อกรัมสารสกัด แสดงดังรูปที่ 3

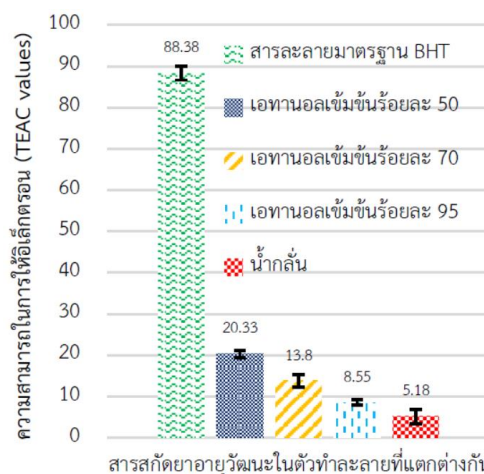


รูปที่ 3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการให้อิเล็กตรอน (FRAP values) ของสารสกัดยาอายุวัฒนะชนิดลูกกลอน ที่ใช้ตัวทำละลายในการสกัดที่แตกต่างกัน

3.1.2.2 ผลการทดสอบความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของสารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP คำนวณได้จากการสร้างกราฟมาตรฐาน Trolox (Trolox equivalent capacity; TEAC) จากกราฟมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9992 และมีสมการคือ $y=0.0055x+0.2795$ แสดงดังรูปที่ 4 สารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูงสุด โดยมีค่า TEAC เท่ากับ 20.33 ± 0.85 มิลลิกรัมสมมูลของโทรลอกซ์ต่อกรัมสารสกัด รองลงมาคือ สารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 70 และ 95 มีค่า TEAC เท่ากับ 13.80 ± 1.55 และ 8.55 ± 0.65 มิลลิกรัมสมมูลของโทรลอกซ์ต่อกรัมสารสกัด ตามลำดับ และสารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยน้ำกลั่น มีค่าในการต้านอนุมูลอิสระต่ำที่สุด มีค่า TEAC เท่ากับ 5.18 ± 1.74 มิลลิกรัมสมมูลของโทรลอกซ์ต่อกรัมสารสกัด สารละลายมาตรฐาน BHT มีค่า TEAC เท่ากับ 88.38 ± 1.72 มิลลิกรัมสมมูลของโทรลอกซ์ต่อกรัมสารสกัด แสดงดังรูปที่ 5



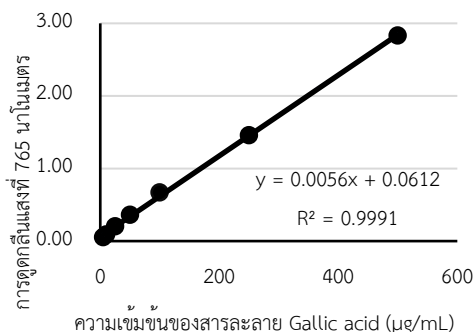
รูปที่ 4 กราฟมาตรฐานแสดงการดูดกลืนแสงที่ 593 นาโนเมตร ด้วยวิธี FRAP ของสารละลาย Trolox ที่ความเข้มข้นต่างๆ



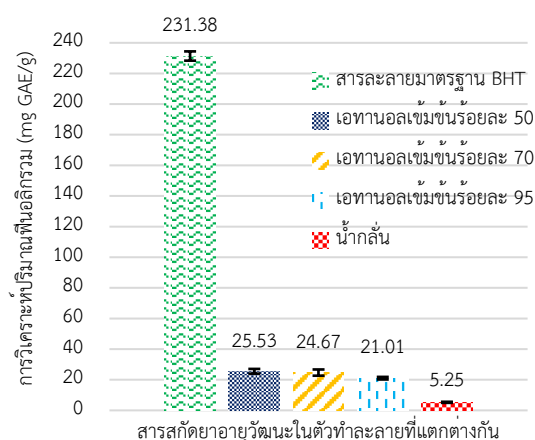
รูปที่ 5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการให้อิเล็กตรอน (TEAC values) ของสารสกัดยาอายุวัฒนะ ชนิดลูกกลอน ที่ใช้ตัวทำละลายในการสกัดที่แตกต่างกัน

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวม

ปริมาณฟีนอลิกรวมคำนวณได้จากการสร้างกราฟมาตรฐาน จากกราฟมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9991 และมีสมการคือ $y=0.0056x+0.0612$ แสดงดังรูปที่ 6 พบว่า สารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 มีปริมาณฟีนอลิกรวมสูงสุด เท่ากับ 25.53 ± 1.54 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัด รองลงมาคือ สารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 70 และ 95 มีปริมาณฟีนอลิกรวม เท่ากับ 24.67 ± 2.03 และ 21.01 ± 0.85 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัด ตามลำดับ สารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 95 มีปริมาณฟีนอลิกรวม เท่ากับ มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัด และสารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยน้ำกลั่น มีปริมาณฟีนอลิก รวมต่ำที่สุด เท่ากับ 5.25 ± 0.35 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัด แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการให้อิเล็กตรอน (FRAP values) ของสารสกัดยาอายุวัฒนะชนิดลูกกลอน ที่ใช้ตัวทำละลายในการสกัดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณฟีนอลิกรวม (มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัด) ของสารสกัดยาอายุวัฒนะชนิดลูกกลอน ที่ใช้ตัวทำละลายในการสกัดที่แตกต่างกัน

3.3 การเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH วิเคราะห์ความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของสารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP และการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวม

ผลการศึกษาทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ในตัวทำละลายแต่ละชนิด พบว่า สารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 95, 70 และน้ำกลั่น ไม่มีความแตกต่างกัน แต่สารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 และสารละลายมาตรฐาน BHT มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ผลการศึกษาความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของสารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ในตัวทำละลายแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ผลการศึกษากการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวม ในตัวทำละลายแต่ละชนิด พบว่า สารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 95, 70 และ 50 ไม่มีความแตกต่างกัน แต่สารสกัดยาอายุวัฒนะ ด้วยน้ำกลั่น และสารละลายมาตรฐาน BHT มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณฟีนอลิกรวมของสารสกัดยาอายุวัฒนะ

ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด	DPPH IC ₅₀ (µg/mL)	FRAP		ปริมาณฟีนอลิกรวม (mg GAE/g)
		FRAP values (mgFe ²⁺ /g)	TEAC values (mgTrolox/g)	
เอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 95	>100 ^c	28.26±0.70 ^d	8.55±0.65 ^d	21.01±0.85 ^b
เอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 70	>100 ^c	33.93±1.68 ^c	13.80±1.55 ^c	24.67±2.03 ^b
เอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 50	87.23±1.53 ^b	40.96±0.91 ^b	20.33±0.85 ^b	25.53±1.54 ^b
น้ำกลั่น	>100 ^c	13.45±1.88 ^e	5.18±1.74 ^e	5.25±0.35 ^c
สารละลายมาตรฐาน BHT	16.71±0.67 ^a	114.35±1.85 ^a	88.38±1.72 ^a	231.38±3.02 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษร a, b, c, d, e ที่แตกต่างกันในแนวดิ่งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4. สรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวมของสารสกัดยา พบว่า สารสกัดยาด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูงสุด และสกัดได้ปริมาณฟีนอลิกรวมมากที่สุด รองลงมาคือ สารสกัดยาด้วยเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 70, 95 และวิธีการต้มยาด้วยน้ำกลั่น ตามลำดับ สารสกัดยาด้วยเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 50 มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระดีที่สุด และได้ปริมาณฟีนอลิกรวมมากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวทำละลายอื่น ๆ

เอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 มีข้อที่เหมาะสมกับการสกัดสารออกมาได้มากกว่าสารสกัดยาด้วยวิธีการต้มยาด้วยน้ำกลั่น มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณฟีนอลิกรวมน้อยที่สุด อาจเนื่องมาจากวิธีการต้มเป็นกระบวนการใช้ความร้อนจึงส่งผลให้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสลายตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารประกอบฟีนอลิกซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลักในการยับยั้งอนุมูลอิสระในพืช [16] มีรายงานการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสมุนไพรวัดในตำรับยาอายุวัฒนะ พบว่า สารสกัดผักเสี้ยนผีที่สกัดด้วยตัวเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 มีค่า IC_{50} มากกว่า 250 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และมีปริมาณฟีนอลิกรวม เท่ากับ 3.52 ± 0.05 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัด [17] สารสกัดบอระเพ็ดและหัวเหว้าหมูที่สกัดด้วยเอทานอลมีความสามารถในการต้านออกซิเดชัน เท่ากับ 7.21 ± 1.24 และ 3.99 ± 2.25 มิลลิกรัมสมมูลของวิตามินอีต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้งตามลำดับ [7] มีปริมาณฟีนอลิกรวม เท่ากับ 8.02 ± 1.14 [7] และ 222.14 ± 1.29 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัด [7] สารสกัดขมิ้นชัน ที่สกัดด้วยเมทานอลมีความเข้มข้นร้อยละ 99.8 มีค่า IC_{50} เท่ากับ 136.56 ± 0.531 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และมีปริมาณฟีนอลิกรวม เท่ากับ 415.56 ± 0.012 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัด [18] สารสกัดผักเสี้ยนผี และขมิ้นชันมีค่า IC_{50} มากกว่ายาลูกกลอนสารสกัดหัวเหว้าหมู

และบอระเพ็ดไม่ได้รายงานเป็นค่า IC_{50} ขมิ้นชัน และหัวเหว้าหมูมีปริมาณฟีนอลิกรวมมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับยาลูกกลอน แต่บอระเพ็ดและผักเสี้ยนผี มีปริมาณฟีนอลิก รวมน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับยาลูกกลอนที่สกัดด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 ของงานวิจัยนี้

ผลที่ได้จากการศึกษานี้ทำให้มีข้อเสนอว่าหากต้องการบริหารยาลูกกลอนนี้ให้ได้ประโยชน์ในการต้านอนุมูลอิสระควรใช้ยาในรูปแบบของสารสกัดที่สกัดด้วยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้ตัวทำละลายชนิดเดียวกัน และใช้วิธีวิเคราะห์วิธีเดียวกันกับสมุนไพรวัดเดียวเทียบกับตำรับยา นอกจากนี้ควรมีการศึกษาลายพิมพ์นิ้วมือของสารสกัดด้วยเทคนิค Thin Layer Chromatography (TLC Fingerprint) เพื่อใช้พิสูจน์เอกลักษณ์ของตำรับยาอายุวัฒนะ ควรมีการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของยา และควรมีการศึกษาหาสารปนเปื้อนในเม็ดยา

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวิทยาลัยการแพทย์แผนไทยอภัยภูเบศร จังหวัดปราจีนบุรี วิทยาลัยเทคโนโลยีทางการแพทย์และสาธารณสุขกาญจนาภิเษกที่เอื้อเพื่อห้องปฏิบัติการในการทำวิจัย และมูลนิธิโรงพยาบาลเจ้าพระยาอภัยภูเบศร ที่อนุญาตให้ใช้ตำรับยาอายุวัฒนะในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Halliwell and J.M.C. Gutteridge, "Oxygen free radicals and iron in relation to biology and medicine: some problem and concepts," *Arch Biochem Biophys*, vol. 246, pp. 501-514, May 1986.
- [2] V. Lobo, A. Patil, A. Phatak, and N. Chandra, "Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health," *Pharmacogn Rev*, vol. 4, no. 8, pp. 118-26, Jul-Dec 2010.

- [3] A.M. Papas, "Determinants of Antioxidant Status in Humans," in *Antioxidant Status, Diet, Nutrition, and Health*, 1st ed. New York: CRC Press, 1999, pp. 89-95.
- [4] B. Phansawan, "Free radicals, Antioxidants and Antioxidant Activity Determination," *Thai Science and Technology*, vol. 21, no. 3, pp. 266-286, Jul - Sep 2013.
- [5] P.R. Miliauskas, Venskutonis, and T.A. Van Beek, "Screening of radical scavenging activity of some medicinal and aromatic plant extracts," *Food Chemistry*, vol. 85, no. 2, pp. 231-237, April 2004.
- [6] S. Pitiporn, "Records of the Land, 7 Medicinal Herbs for Mae Ying," in *Chaophraya Abhaibhubejhr Hospital Prachinburi*, 1st ed. Bangkok, 2014
- [7] R. Tangbuchakiat, "Total Antioxidant Activity of Herbals in Anti-Aging Formulas Extracted with Different Solvents Using Abts Radical Scavenging Assay," in *Proceeding of National Rangsit University, Collage of Oriental Medicine, Rangsit University, Pathum Thani, Thailand*, 2019, pp.1-9
- [8] W. Boonsinchai, S. Thapphasaraphong, N. Nualkaew and S. Nualkaew "Antioxidant activity and total phenolics of herbal extract of combination from mulberry leaves, turmeric rhizome ,lakoocha's wood and shiitake." In *Proceeding The 7th Annual Northeast Pharmacy Research Conference* Faculty of Pharmaceutical Sciences, Khon Kaen University, Thailand, 2015, pp.267-272
- [9] A. Upadhyay, P. Chattopadhyay, D. Goyary, PM. Mazumder and V. Veer, "In vitro fibroblast growth stimulatory and in vivo wound healing activity of *Cleome viscosa*,". *The Journal of Orient Pharm Exp Med*, vol.14, no 269-278., Feb, 2014
- [10] S. Lenapun, J. Jamthaweeikul and J.Chaiwut, "Chemical Specifications of *Piper sarmentosum* Roxb. Roots," *The Journal of Thai Traditional and Alternative Medicine*, vol.12 no. 2, May-Aug, 2014
- [11] Y. Maneepisamai, P. Yasin and S. Simarugumpai, "Anti- inflammatory activity and anti-dermatitis-causing bacterial activity of *Blumea balsamifera* (L.) DC. leaf extracts," *Chandrasem Rajabhat University*, vol. 18, no. 35, Jul-Dec, 2012.
- [12] W. Neelapong, B. Phonyotin and W. Sittikijyothin, "Extraction of Active Compounds from Thai Herbs: Powder and Extract," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 1, Jan-Mar, 2019.
- [13] T. Hatano, R. Edamatsu, M. Hiramatsu, A. Mori Y. Fujita, T. Yasuhara, T. Yoshida and T. Okuda, "Effect of the interaction of tannin with co-existing substances VI. Effect of tannins and related polyphenols on superoxide anion radical, and on 1, 1 - diphenyl-2 - picrylhydrazyl radical," *Chem. Pharm. Bull*, vol. 37, no. 8, pp. 2016-2021, 1989.
- [14] K. Yamazaki, A. Hashimoto, Y. Kokusenya, T. Miyamoto and T. Sato, "Electrochemical method for estimating the antioxidative

- effect of methanol extracts of crude drugs,” *Chem Pharm Bull*, vol 42, no. 8, pp. 1663-1665, 1994.
- [15] I.I.F. Benzie, J.J. Strain, “The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay,” *Anal Biochem*, vol. 239, no. 1, pp. 70–76, July 1996.
- [16] K. Rodriguez, K.S Ah-Hen, A. Vega-Galvez, V. Vasquez, I. Quispe-Fuentes, P. Rojas, and R. Lemus-Mondaca, “Changes in bioactive components and antioxidant capacity of maqui, *Aristotelia chilensis* [Mol] Stuntz, berries during drying”: *LWT - Food Science and Technology*, vol 65, pp. 537-542, Jan, 2016.
- [17] K. Koedkeao, T. Phanhun and A. Sunthitikawinsakul, “Analysis of Antioxidant Activity, Total Phenolics and Total Flavonoids Contents,” in *Proceeding of 10th National Kasetsart University, Nakhon Pathom Rajabhat University*, Thailand, 2013, pp. 1-8
- [18] N. Huayhongthong, “Phytochemical Screening and Biological Activities of some Thai Medicinal Plants Using in the Diabetes Therapy,” M.S. thesis, Radiation Lab., Univ. Thailand, 2016.
- [19] O. Chantaravichit and C. Ongard, “Total Phenolic Compounds, Antioxidant Activity, and Antimicrobial of Weed Extracts,” *Agricultural Sci. J*, vol 46, no. 3, pp.285-288, 2015.

การพัฒนาผลิตภัณฑ์พุดดิงนมถั่วเหลืองพร้อมดื่มแคลอรีต่ำเสริมงาดำสำหรับผู้สูงอายุ

อัจฉรา ดลวิทยาคุณ* เกษรารักษ์ ทะปะละ รัชชนา ดิษฐา และ ปริญญ์ พุฒนาค

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
41/1 ตำบลโม่งาม อำเภอมะนัง จังหวัดตาก 63000

รับบทความ 10 กรกฎาคม 2565 แก้ไขบทความ 21 มกราคม 2566 ตอรับบทความ 1 มีนาคม 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาพุดดิงนมถั่วเหลืองพร้อมดื่มแคลอรีต่ำเสริมงาดำสำหรับผู้สูงอายุ โดยทำการประเมินสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่เสริมงาดำร้อยละ 5 10 15 และ 20 ของน้ำหนักนมถั่วเหลือง จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณงาดำเพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความสว่าง (L^*) ลดลง ค่าสีแดง (a^*) และค่าความเขียวเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อค่าสีเหลือง (b^*) ค่าความยืดหยุ่น และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เสริมงาดำร้อยละ 15 มีคะแนนความชอบอยู่ในเกณฑ์ชอบมาก (7.71 ± 0.78) เมื่อนำสูตรดังกล่าวมาศึกษาชนิดและปริมาณสารให้ความหวาน พบว่า ชนิดและปริมาณสารให้ความหวานที่แตกต่างกันส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเขียวแตกต่างกัน โดยผลิตภัณฑ์พุดดิงที่ใช้ซอร์บิทอลร้อยละ 25 มีคะแนนความชอบอยู่ในเกณฑ์ชอบปานกลาง และคุณค่าทางโภชนาการประกอบด้วย ความชื้นร้อยละ 81.03 โปรตีนร้อยละ 2.0 ไขมันร้อยละ 3.6 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 13 เกลือร้อยละ 0.37 มีค่าพลังงาน 92 กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม

คำสำคัญ : พุดดิงนมถั่วเหลืองพร้อมดื่ม; แคลอรีต่ำ; งาดำ; สารให้ความหวานแทนน้ำตาล; อาหารสำหรับผู้สูงอายุ

Product Development of Low-Calorie Ready-to-Drink Soy Bean Milk Pudding Supplemented with Black Sesame for the Elderly

Achara Dholvitayakhun* Ketwarang Thapala Randhana Dittha
and Parinya Putnak

Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna Tak
41/4 Mai-Ngam, Muang, Tak, 63000

Received 10 July 2022; Revised 21 January 2023; Accepted 1 March 2023

Abstract

This research aimed to develop a low-calorie ready-to-drink soybean milk pudding supplemented with black sesame for the elderly. The chemical, physical properties, and sensory evaluations of pudding products supplemented with 5 10 15, and 20% soybean milk weight were determined. Results showed that an increasing amount of black sesame caused a decrease in lightness (L^*), but redness (a^*) and hardness increased ($p \leq 0.05$). However, it did not affect yellowness (b^*), springiness, and total soluble solids. Sensory evaluation showed that the product with 15% black sesame showed a like very much score (7.71 ± 0.78). Therefore, this product was selected for studying the types and amounts of sweeteners. Results revealed that the different types and quantities of sweeteners resulted in different brightness (L^*) and hardness values. The substitution of 2.5% sugar with sorbitol in soybean milk pudding received the highest score of sensory evaluation in like moderate score. The product's nutritional composition was 81.03% moisture, 2.0% protein, 3.6% fat, 13% carbohydrate, 0.37% ash, and 92 Kcal/100g.

Keywords : Ready-to-drink soybean milk pudding; Low-Calorie; Black sesame; Artificial sweeteners; Elderly food

* Corresponding Author. Tel.: +668 5910 8165, E-mail Address: achara2518@yahoo.co.th

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุเป็นแนวโน้มที่เกิดขึ้นทั่วโลก โดยประเทศไทยเริ่มก้าวเข้าสู่การเป็นสังคมสูงอายุระดับสมบูรณ์ (complete aged society) ในปี 2564 และคาดการณ์ว่าในปี 2574 ประเทศไทยจะก้าวเข้าสู่สังคมสูงอายุระดับสุดยอด (super aged society) คือ มีผู้สูงอายุมากกว่าร้อยละ 28 ของประชากรทั้งหมด [1] เพื่อรับมือและวางแผนก่อนก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุอย่างสมบูรณ์รัฐบาลได้จัดทำมาตรการขับเคลื่อนระเบียบวาระแห่งชาติเรื่อง สังคมสูงอายุ ในยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี โดยเน้นให้มีคุณภาพชีวิตที่ดีในสังคมสูงอายุ ซึ่งผู้สูงอายุมักมีความเสี่ยงสูงขึ้นต่อการเป็นโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (Non-Communicable Diseases: NCDs) ทั้งโรคอ้วน โรคเบาหวาน โรคความดันโลหิต เป็นต้น สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากพฤติกรรมกรรมการรับประทานอาหาร การออกกำลังกาย หรือความเสื่อมถอยของสุขภาพ [2] ด้วยความเสี่ยงดังกล่าวจึงทำให้มีการพัฒนาและสร้างนวัตกรรมด้านอาหารที่เน้นการผลิตอาหารเฉพาะวัย สำหรับการแก้ปัญหาภาวะโภชนาการในกลุ่มผู้สูงอายุ [3] โดยเน้นอาหารที่ให้แคลอรีต่ำหรือลดแคลอรี เพื่อลดการเกิดภาวะน้ำหนักเกินในผู้สูงอายุ ซึ่งเป็นปัญหาที่พบมากในกลุ่มดังกล่าว และมีการเพิ่มสารอาหารบางชนิดที่มักพบการขาดในผู้สูงอายุ เช่น แคลเซียม เหล็กและวิตามิน [4] ตลอดจนเน้นอาหารที่นิ่มและกลืนง่าย โดยภาวะการกลืนลำบากถือเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่จะทำให้เกิดภาวะแทรกซ้อนต่าง ๆ เช่น การสำลักอาหาร ซึ่งอาจทำให้เกิดภาวะขาดน้ำในผู้สูงอายุได้ [5] ดังนั้นอาหารที่เหมาะสมกับผู้สูงอายุจึงต้องเป็นอาหารที่ไม่เลวเกินไป จับตัวได้ในระดับหนึ่ง อาหารที่สามารถกลืนได้ง่ายหลังจากผ่านการบดเคี้ยวทางปาก เช่น อาหารในรูปแบบเจลลี่หรือมูส พุดดิ้ง เป็นต้น [6] พุดดิ้งจัดเป็นของว่างชนิดหนึ่งที่มีความนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากลักษณะภายนอกของพุดดิ้งมีลักษณะคล้ายวุ้นนิ่มเคี้ยวและกลืนได้ง่าย อีกทั้งยังจัดเป็นอาหารที่มีความขึ้นสูง เหมาะสม

สำหรับผู้ที่มีปัญหาในช่องปาก ทั้งปัญหาการเคี้ยว การกลืน และริมฝีปากแห้ง [7] จึงเหมาะสำหรับผู้สูงอายุ ซึ่งส่วนประกอบหลักที่สำคัญของพุดดิ้ง คือ นมสด แต่อย่างไรก็ตามผู้บริโภคชาวเอเชียส่วนใหญ่ร้อยละ 80 กลับขาดเอนไซม์แล็กเทส (Lactose intolerance) ที่ย่อยน้ำตาลแล็กโทสในนม [8] ซึ่งพบในผู้สูงอายุบางรายที่ไม่ได้ดื่มนมเป็นประจำ ส่งผลให้เกิดอาการปวดท้อง เสียดท้อง แน่นท้อง และท้องเสีย เมื่อรับประทานนมวัวหรือผลิตภัณฑ์จากนมวัว [4] ทำให้มีการวิจัยและพัฒนาพุดดิ้งที่จากธัญพืชชนิดอื่น ๆ ทดแทนผลิตภัณฑ์จากนมวัว ยกตัวอย่างเช่น การพัฒนาสูตรพุดดิ้งนมสดที่ทดแทนด้วยน้ำนมข้าวโพด [8] พุดดิ้งผักสำหรับผู้สูงอายุ [9] เยลลี่ข้าวไรซ์เบอร์รี่สำหรับผู้สูงอายุ [10] หรือเต้าหูนมข้าวโพดผสมเกล็ดข้าวโพด [11] เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีผลการทดลองในผลิตภัณฑ์พุดดิ้ง โดยเฉพาะพลังงานในรูปน้ำตาลที่เป็นสาเหตุของโรคอ้วนและโรคเบาหวานในผู้สูงอายุ

ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาและตอบโจทย์ผลิตภัณฑ์สำหรับผู้สูงอายุที่เน้นอาหารให้แคลอรีต่ำ แต่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ทางทีมผู้ทดลองจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์พุดดิ้งจากน้ำนมถั่วเหลืองแทนนมวัว ที่ไม่ต้องเคี้ยวใช้วิธีบดหรือใช้หลอดดูดแทน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเซตตัวและอ่อนนุ่มกว่าพุดดิ้งทั่วไปที่ใช้วิธีการตักรับประทาน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า นมถั่วเหลืองไม่มีน้ำตาลแล็กโทสและคอเลสเตอรอล มีสตาร์ชน้อย มีโปรตีนใกล้เคียงกับนมวัวแต่น้ำมันน้อยกว่านมวัวประมาณ 2 เท่า [12] นอกจากนั้นถั่วเหลืองยังช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือด [13] เป็นแหล่งของแคลเซียมช่วยป้องกันภาวะกระดูกพรุน [14] มีสารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยลดความเสี่ยงของการเติบโตของเซลล์มะเร็ง [15] และเพื่อให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีแคลอรีต่ำ โดยเฉพาะพลังงานในรูปน้ำตาลการทดลองนี้จึงมีการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล เพื่อลดปัญหาโรคอ้วนและโรคเบาหวานที่มีพบในผู้สูงอายุ ตลอดจนมีการเสริม

งาดำที่เป็นแหล่งแคลเซียม ซึ่งงาดำมีกลีมนรสที่ผู้สูงอายุคุ้นเคยในผลิตภัณฑ์ซึ่งคาดว่าจะสามารถเสริมได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่างาดำสามารถลดความเครียดในผู้สูงอายุได้จากสารลิกแนน (Lignans) [16] เพื่อให้ผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนมถั่วเหลืองพร้อมดื่มเสริมงาดำที่พัฒนาขึ้นสามารถเป็นอาหารที่เหมาะสมสำหรับผู้สูงอายุได้ ตลอดจนเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับกลุ่มผู้รักสุขภาพได้อีกหนึ่งด้วย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัตถุดิบ

ถั่วเหลืองชิก (ตราไร้ทิพย์, ประเทศไทย) งาดำ (ตราไร้ทิพย์, ประเทศไทย) นมสดในกระโถนที่อุณหภูมิเย็น 10 นาทีและปั่นละเอียดเพื่อใช้ในการทดลอง เจลาตินและซูคราโลส (บริษัท ยูเนี่ยนชาเยน จำกัด , ประเทศไทย) ผงวุ้น (ตรานางเงือกสีเขียว ห้างหุ้นส่วน จำกัด พัฒนาสินเอ็นเตอร์ไพรส์, ประเทศไทย) มอลทิทอลผงและซอร์บิทอลผง (บริษัท เวชกิจ เคมีภัณฑ์ จำกัด, ประเทศไทย) และน้ำตาลทรายขาว (น้ำตาลทรายบริสุทธิ์ตราลิน, ประเทศไทย)

2.2 วิธีการเตรียมน้ำนมถั่วเหลือง

นำถั่วเหลือง 150 กรัม มาล้างด้วยน้ำสะอาด 2 ครั้งผึ่งให้แห้งแล้ว นำไปคั่วในกระทะเทฟลอนที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส นาน 10 นาทีเพื่อลดกลิ่น จากนั้นเทใส่เครื่องผลิตน้ำนมถั่วเหลือง (ยี่ห้อ JUICYANG รุ่น HES-08 กำลังไฟ 750 วัตต์) เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการบีบสกัดโปรตีนในถั่วเหลืองด้วยแรงคนที่ไม่เท่ากัน เทน้ำปริมาณ 1 ลิตรใส่ลงในเครื่อง เมื่อเครื่องเริ่มทำงานเครื่องจะต้มร้อนที่อุณหภูมิ 90 – 100 องศาเซลเซียส และคนภายในเครื่องอย่างต่อเนื่องนาน 27 นาทีจนเครื่องหยุดทำงาน นำถั่วเหลืองที่ได้มารองด้วยผ้าขาวบางทับ 2 ชั้น นำน้ำนมถั่วเหลืองที่ได้ไปใช้ในการผลิตพุดดิ้งต่อไป

2.3 วิธีการเตรียมน้ำนมถั่วเหลือง

การผลิตพุดดิ้งน้ำนมถั่วเหลืองดัดแปลงมาจากอัจฉรา [17] เริ่มจากชั่งน้ำหนักน้ำนมถั่วเหลือง ร้อยละ 37.43 น้ำ ร้อยละ 52.4 น้ำตาลทราย ร้อยละ 9.73 เจลาติน ร้อยละ 0.29 และผงวุ้น ร้อยละ 0.15 วิธีการผลิตเริ่มจากผสมน้ำ และเจลาตินทิ้งไว้ให้พองตัวประมาณ 10 นาทีในหม้อต้ม เมื่อครบเวลาใส่ผงวุ้นน้ำขึ้นตั้งไฟให้เดือดใช้เวลา 7 นาที ใส่น้ำตาล นมถั่วเหลืองหรือนมถั่วเหลืองผสมงาดำที่ได้จากการทดลอง ต้มต่อจนส่วนผสมมีอุณหภูมิถึง 90 องศาเซลเซียส และปิดไฟยกลงจากเตา ทิ้งให้อุณหภูมิลดลงจนถึง 60 องศาเซลเซียส เทใส่บรรจุภัณฑ์ที่เตรียมไว้ พักไว้ที่อุณหภูมิห้องจนอุณหภูมิของพุดดิ้งลดลงถึง 28 ± 1 องศาเซลเซียส และนำเข้าตู้เย็นอุณหภูมิประมาณ 8 ± 3 องศาเซลเซียสจนกระทั่งเซตตัว

2.4 การศึกษาปริมาณงาดำที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนมถั่วเหลืองพร้อมดื่ม

น้ำนมถั่วเหลืองที่ได้มาเสริมงาดำ 4 ระดับคือ ปริมาณงาดำร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ของน้ำหนักน้ำนมถั่วเหลือง ตามลำดับ (เกินร้อยละ 25 ผลิตภัณฑ์พุดดิ้งจะมีรสขม) อัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 1 นำงาดำแต่ละสูตร มาผลิตเป็นพุดดิ้งน้ำนมถั่วเหลืองผสมงาดำ โดยนำงาดำคั่วบดมาปั่นผสมกับนมถั่วเหลืองใช้ในการทดลอง ข้อ 2.2 บัณผสมนาน 20 วินาที คั้นเอาน้ำและแยกกากออกได้เป็นน้ำนมถั่วเหลืองผสมงาดำ นำไปผลิตพุดดิ้งโดยวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับพุดดิ้งนมถั่วเหลืองในข้อ 2.3 ได้ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 4 สูตร และนำพุดดิ้งที่ได้มาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ โดยวัดค่าสี วัดเนื้อสัมผัส คุณภาพทางเคมี วัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้เทียบกับสูตรควบคุม (สูตรพุดดิ้งนมถั่วเหลืองที่ไม่ใส่งาดำ) และนำทั้ง 4 สูตรประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ดังนี้

- วัดค่าสีในระบบ CIE ด้วยเครื่องวัดค่าสี (Hunter Lab รุ่น MiniScan EZ LAV) วัดค่าความสว่าง

(L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) โดยวัดค่าตรงกลางของชิ้นของตัวอย่างพุดdingที่เซตตัวแล้ว วัดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

- วัดเนื้อสัมผัส ด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) รุ่น TA.XT plus ใช้หัววัด Cylinder probe (P/36R) กำหนดอัตราเร็วก่อนวัด (Pre-test speed) 2.0 mm/s อัตราเร็วขณะวัด (Test speed) 10 mm/s อัตราเร็วหลังวัด (Post-test speed) 10 mm/s ระยะทางในการกดลงไปบนพุดding (Distance) ร้อยละ 50 รายงานผลเป็นค่าความแข็ง (Hardness) ในหน่วยนิวตัน (N) ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) ในหน่วยนิวตันต่อวินาที (N.s) ทดสอบ 10 ซ้ำ และนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งและค่าความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์พุดding

- วัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ โดยนำตัวอย่างพุดdingที่เซตตัวแล้วมา 10 กรัม บีบใส่ถุงพลาสติกให้

กระจายตัวและนำไปวัดด้วยเครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Brix Refractometer) ที่ระดับ 0 - 32% วัดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

- วัดคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์พุดdingนํ้านมถั่วเหลืองพร้อมดื่มเสริมงาดำทั้ง 4 สูตร โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มไม่บล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design; RCBD) ใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คนที่เคยรับประทานพุดdingนม โดยนำเสนอตัวอย่างพร้อมกันทั้ง 4 สูตรในถ้วยสีขาวขนาด 30 ml และทดสอบชิมด้วยการใช้หลอดดูด เพื่อประเมินคุณลักษณะด้านสี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม ด้วยวิธี 9 – point hedonic scale ให้คะแนนความชอบ 1 ถึง 9 (1=ไม่ชอบมากที่สุด และ 9=ชอบมากที่สุด) นำคะแนนที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่าง เพื่อคัดเลือกตัวอย่างที่มีคะแนนความชอบสูงสุดไปใช้ในขั้นต่อไป

ตารางที่ 1 อัตราส่วนปริมาณงาดำเพื่อเสริมในพุดdingนมถั่วเหลือง 4 สูตร

ส่วนผสม	สูตรควบคุม (กรัม)	ปริมาณงาดำ			
		ร้อยละ 5	ร้อยละ 10	ร้อยละ 15	ร้อยละ 20
นมถั่วเหลือง	250	35.5	33.7	31.8	29.9
น้ำ	350	52.4	52.4	52.4	52.4
น้ำตาล	65	9.7	9.7	9.7	9.7
ผงวุ้น	1	0.2	0.2	0.2	0.2
เจลาติน	2	0.3	0.3	0.3	0.3
งาดำ	-	1.9	3.7	5.6	7.5

หมายเหตุ: ปริมาณงาดำที่ใช้คิดเป็นร้อยละของน้ำหนักนมถั่วเหลืองเริ่มต้น (250 กรัม)

2.5 การศึกษาชนิดและอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารให้ความหวานในผลิตภัณฑ์พุดdingนํ้านมถั่วเหลืองพร้อมดื่มเสริมงาดำ

เลือกสูตรพุดdingนํ้านมถั่วเหลืองพร้อมดื่มเสริมงาดำที่ผ่านการคัดเลือกจากข้อที่ 2.5 มาศึกษาชนิดและอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารให้ความหวานในผลิตภัณฑ์

พุดding โดยทำการศึกษานิตสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลในพุดdingนํ้านมถั่วเหลืองเสริมงาดำ 2 ชนิด คือ ซอร์บิทอล และมอลทิทอล ซึ่งเป็นกลุ่มของสารให้ความหวานที่มีคุณค่าทางโภชนาการ (nutritive sweeteners) เป็นสารให้ความหวานที่ไหม้ผล (bulk sweeteners) โดยทำการศึกษาปริมาณสารให้ความหวาน 2 ระดับ คือ

ทดแทนน้ำตาลทรายร้อยละ 25 และร้อยละ 50 ของปริมาณน้ำตาลที่ใช้ในสูตร ได้ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 4 สูตร เนื่องจากสารทดแทนความหวานทั้ง 2 ชนิดมีระดับความหวานที่น้อยกว่าซูโครส (ซูโรบิทอลหวานเป็น 0.6 และมอลทิทอลหวานเป็น 0.9 เท่าของน้ำตาลซูโครส) เมื่อนำมาทดแทน จะทำให้ความหวานลดลงจึงจำเป็นต้องใช้ซูคราโลส ซึ่งเป็นสารให้ความหวานที่ไม่มีคุณค่าทางโภชนาการ (non-nutritive sweeteners) เนื่องจากมีความหวานเป็น 600 เท่าเมื่อเทียบกับซูโครส จึงใช้ในปริมาณน้อยมาก นิยมใช้เสริมรสหวานให้กับสารให้ความหวานที่ให้มีวล [18] เป็นตัวปรับระดับความหวานให้เท่ากับความหวานของสูตรพื้นฐาน (คำนวณจากค่า relative sweetness) อัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 2 นำแต่ละสูตรมาผลิตเป็นพุดดิงนํ้านมถั่วเหลืองเสริมงาดำที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล ตามกรรมวิธีการเตรียมพุดดิงนํ้านมถั่วเหลือง จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ โดยวัดค่าสี วัดเนื้อสัมผัส คุณภาพทางเคมี วัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ เทียบกับสูตรควบคุม (สูตรพุดดิงนํ้านมถั่วเหลืองเสริมงาดำที่ใช้น้ำตาล

ซูโครส) และวัดคุณภาพทางประสาทสัมผัสเช่นเดียวกับข้อที่ 2.5 เพื่อคัดเลือกตัวอย่างที่มีคะแนนความชอบรวมสูงสุดไปใช้ในขั้นต่อไป

2.6 การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของพุดดิงนํ้านมถั่วเหลืองพร้อมดื่มเสริมงาดำที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล

นำผลิตภัณฑ์พุดดิงนํ้านมถั่วเหลืองพร้อมดื่มเสริมงาดำที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล ที่ได้รับความชอบสูงสุดในการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสมาวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ โดยวัดปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณไขมัน ปริมาณโปรตีน ปริมาณคาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำตาล ปริมาณแคลเซียม และปริมาณโซเดียม ตามวิธีที่กำหนดโดย A.O.A.C [19] หาค่าปริมาณพลังงานของผลิตภัณฑ์ โดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter, AC500 และนำข้อมูลที่ได้มาจัดทำข้อมูลโภชนาการแบบย่อ และนำมาเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์พุดดิงนมถั่วเหลืองที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 2 ชนิดและอัตราส่วนของสารให้ความหวานในส่วนผสมพุดดิงนมถั่วเหลืองพร้อมดื่มเสริมงาดำ

ส่วนผสม	สูตรควบคุม (กรัม)	(ซูโรบิทอลร้อยละ 25)		(ซูโรบิทอลร้อยละ 50)		(มอลทิทอลร้อยละ 25)		(มอลทิทอลร้อยละ 50)	
		น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาณ (ร้อยละ)	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาณ (ร้อยละ)	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาณ (ร้อยละ)	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาณ (ร้อยละ)
นมถั่วเหลือง	212.5	212.5	31.8	212.5	31.8	212.5	31.8	212.5	31.8
งา	37.5	37.5	5.6	37.5	5.6	37.5	5.6	37.5	5.6
น้ำ	350	350	52.4	350	52.4	350	52.4	350	52.4
น้ำตาล	65	48.75	7.3	32.5	4.9	48.75	7.3	32.5	4.9
ผงวุ้น	1	1	0.1	1	0.1	1	0.1	1	0.1
เจลาติน	2	2	0.2	2	0.2	2	0.2	2	0.2
ซูโรบิทอล	-	16.25	2.4	32.5	4.9	-	-	-	-
มอลทิทอล	-	-	-	-	-	16.25	2.4	32.5	4.9
ซูคราโลส	-	0.0108	-	0.0217	-	0.0054	-	0.0108	-

หมายเหตุ : สารให้ความหวานที่ใช้คิดเป็นร้อยละของน้ำหนักน้ำตาลซูโครสเริ่มต้น

2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ การทดลองใช้แผนการทดลองแบบ CRD (Completely Randomized Design) และ RCBD (Randomized Complete Block) วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีทเมนต์ ด้วยวิธี Scheffe's method ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาปริมาณงาดำที่เหมาะสมใน

ผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนมถั่วเหลืองพร้อมดื่ม

ผลการศึกษาปริมาณงาดำที่เหมาะสม ที่ใช้เสริมในพุดดิ้งพร้อมดื่ม 4 ระดับ คือ ปริมาณงาดำร้อยละ

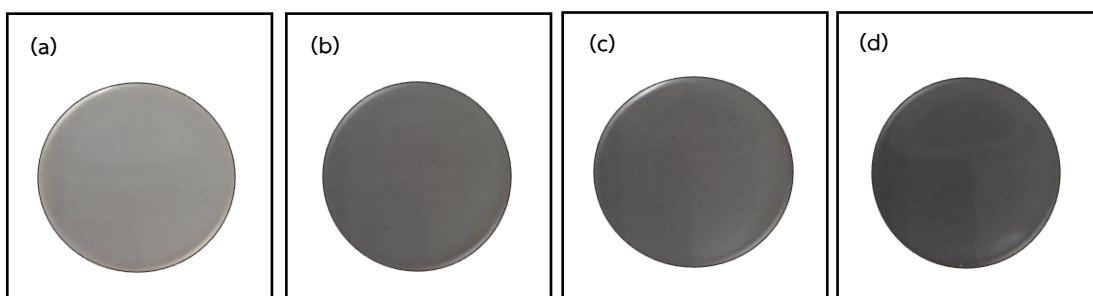
5, 10, 15 และ 20 ของน้ำหนักนมถั่วเหลืองเริ่มต้นตามลำดับ ได้ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 4 สูตร ต่อคุณลักษณะในด้านต่าง ๆ เทียบกับสูตรควบคุม (ร้อยละของการทดแทนงาเท่ากับ 0) พบว่า

ผลการวิเคราะห์ค่าสี พบว่า เมื่อปริมาณงาดำที่เสริมในผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนมถั่วเหลืองสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) ลดลงและค่าสีแดง (a^*) เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับสูตรควบคุม แต่ไม่มีผลต่อค่าสีเหลือง (b^*) ของผลิตภัณฑ์ ($p > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 3 ผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนมถั่วเหลืองพร้อมดื่มเสริมงาดำที่ได้มีสีเทาเข้มตามระดับงาดำที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 1) ซึ่งเกิดจากสีงาดำที่บริเวณเปลือกของงาดำ เมื่อนำไปผสมกับผลิตภัณฑ์ทำให้มีสีเข้มขึ้นเช่นเดียวกับที่พบในผลิตภัณฑ์สปีจเค้กเสริมงาดำ [20] เครื่องดื่มจากข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำ [21] เป็นต้น

ตารางที่ 3 สมบัติทางเคมีและกายภาพของผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนมถั่วเหลืองพร้อมดื่มเสริมงาดำ

ปริมาณงาดำ (ร้อยละ)	ค่าสี			เนื้อสัมผัส		ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Brix) ^{ns}
	L	a^*	b^{*ns}	ความแข็ง(N)	ความยืดหยุ่น(N/s) ^{ns}	
0	78.74 ^a ± 1.75	-2.37 ^c ± 0.45	3.29 ± 0.46	91.50 ^b ± 2.78	0.95 ± 0.12	17.00 ± 0.00
5	39.92 ^b ± 2.43	0.37 ^b ± 0.15	2.47 ± 0.31	94.58 ^b ± 0.48	0.95 ± 0.02	15.33 ± 0.57
10	38.80 ^{bc} ± 0.82	0.96 ^a ± 0.05	2.91 ± 0.04	117.64 ^a ± 2.21	0.95 ± 0.02	16.00 ± 0.00
15	35.57 ^{bc} ± 1.52	1.20 ^a ± 0.14	3.22 ± 0.13	112.07 ^a ± 5.40	0.95 ± 0.01	17.33 ± 1.15
20	35.73 ^c ± 1.06	1.15 ^a ± 0.33	3.25 ± 0.50	118.91 ^a ± 4.79	0.96 ± 0.01	15.33 ± 0.57

หมายเหตุ: 0* คือ สูตรมาตรฐานพุดดิ้งนมถั่วเหลืองที่ไม่ใส่งาดำ, ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



รูปที่ 1 ลักษณะสีที่ปรากฏของพุดดิ้งนมถั่วเหลืองเสริมงาดำ (a) ปริมาณงาร้อยละ 5, (b) ปริมาณงาร้อยละ 10, (c) ปริมาณงาร้อยละ 15, (d) ปริมาณงาร้อยละ 20

ผลการวิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัส พบว่า เมื่อปริมาณงาดำที่เสริมในพุดดิงนมถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็ง (Hardness) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) โดยผลิตภัณฑ์ที่เสริมงาดำทั้ง 4 สูตร มีความแข็งอยู่ในช่วง 94.58 – 118.91 นิวตัน ในขณะที่ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) ไม่พบความแตกต่างเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม ($p > 0.05$) โดยมีความยืดหยุ่นอยู่ในช่วง 0.95 – 0.96 นิวตันต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณงาดำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างของพุดดิงแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของคาร์โบไฮเดรต (สตาร์ช) ในงาที่มีมากถึง 21.8 กรัม ในขณะที่ถั่วเหลืองมีเพียง 11.4 กรัมต่อ 100 กรัม [22] จึงทำให้พุดดิงที่เสริมงามีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณงาที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่ไม่ใส่งาดำ สอดคล้องกับงานวิจัยหลายเรื่องที่มีการเสริมส่วนผสมอื่นในพุดดิง ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เช่น พุดดิงนมสดที่ทดแทนด้วยน้ำนมข้าวโพด [23] เต้าฮวยข้าวกล้องอก [24] เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นในทุกสูตรจะมีค่าความแข็งน้อยกว่าในผลิตภัณฑ์พุดดิงอื่น เช่น พุดดิงเสริมผงดาวอินคาที่มีความแข็ง 1036.74 นิวตัน [25] เนื่องจากพุดดิงที่พัฒนาขึ้นจะเน้นเป็นพุดดิงที่เซตเป็นเจลและสามารถดูดได้โดยใช้หลอดแต่ไม่คงรูปเมื่อแกะออกจากพิมพ์ เพื่อให้

เหมาะสำหรับกลุ่มผู้สูงอายุที่มีปัญหาในระบบการเคี้ยวและกลืน จึงทำให้ค่าความแข็งของพุดดิงที่พัฒนาขึ้นมีค่าน้อยกว่าพุดดิงปกติที่มีความแข็ง 891 นิวตัน [25] ที่ใช้วิธีการบริโภคด้วยการใช้ช้อนตัก

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้

พบว่า ปริมาณงาดำที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้เมื่อเทียบกับสูตรควบคุม ($p > 0.05$) โดยปริมาณของแข็งที่ละลายของผลิตภัณฑ์พุดดิงนมถั่วเหลืองทั้ง 4 สูตรอยู่ในช่วง 15.33 – 17.33 องศาบริกซ์ ดังแสดงในตารางที่ 3

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส

พบว่า ปริมาณงาดำที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อคะแนนความชอบด้านสี เนื้อสัมผัส กลิ่น และรสชาติของพุดดิงนมถั่วเหลือง ($p > 0.05$) แต่ปริมาณงาดำที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อคะแนนความชอบโดยรวม ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อปริมาณงาดำเพิ่มขึ้น จะมีผลให้คะแนนความชอบรวมเพิ่มขึ้นจนถึงระดับงาดำที่เสริมร้อยละ 15 แต่เมื่อปริมาณงาดำถึงร้อยละ 20 ความชอบโดยรวมจะลดลงดังแสดงในตารางที่ 4 เนื่องจากผลิตภัณฑ์เริ่มมีรสขม โดยผลิตภัณฑ์พุดดิงนมถั่วเหลืองที่เสริมงาดำร้อยละ 15 มีคะแนนด้านความชอบโดยรวมมากที่สุด คือ อยู่ในระดับชอบมาก จึงเลือกใช้ปริมาณงาดำที่ใช้เสริมร้อยละ 15 มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

ตารางที่ 4 สมบัติทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์พุดดิงนมถั่วเหลืองพร้อมดื่มเสริมงาดำ

ปริมาณงาดำ (ร้อยละ)	สี ^{ns}	เนื้อสัมผัส ^{ns}	กลิ่น ^{ns}	รสชาติ ^{ns}	ความชอบโดยรวม
5	7.09 ± 1.24	6.69 ± 1.53	6.77 ± 1.21	6.66 ± 1.73	6.80 ^b ± 1.47
10	7.03 ± 1.09	7.03 ± 1.24	6.60 ± 1.26	6.91 ± 1.33	7.14 ^{ab} ± 0.94
15	7.40 ± 1.00	7.43 ± 1.06	6.94 ± 1.05	7.46 ± 0.95	7.71 ^a ± 0.78
20	7.43 ± 1.14	7.06 ± 1.57	6.77 ± 1.43	7.20 ± 1.23	7.40 ^{ab} ± 0.94

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.2 ผลการศึกษาชนิดและอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารให้ความหวานในผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนํ้านมถั่วเหลืองเสริมงาดำ

นำผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนํ้านมถั่วเหลืองเสริมงาดำร้อยละ 15 ที่ผ่านการคัดเลือกมาทำการศึกษาชนิดสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลในพุดดิ้งนม 2 ชนิด คือ ซอร์บิทอล และมอลทิทอล ปริมาณที่ใช้ทดแทน 2 ระดับ คือ ร้อยละ 25 และ 50 ของน้ำตาลทรายได้ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 4 สูตร ต่อคุณลักษณะในด้านต่าง ๆ เทียบกับสูตรควบคุม (สูตรพุดดิ้งนํ้านมถั่วเหลืองเสริมงาดำร้อยละ 15 ที่ใช้น้ำตาลซูโครส) พบว่า

ผลการวิเคราะห์ค่าสี พบว่า ค่าสีของพุดดิ้งนํ้านมถั่วเหลืองเสริมงาดำที่ใช้สารให้ความหวานทั้ง 4 สูตร มีค่าความสว่าง (L^*) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่างกันจะมีผลทำให้ค่าความสว่างแตกต่างกัน โดยพบว่า การใช้ซอร์บิทอลในอัตราส่วนที่ต่างกันจะให้ค่าความสว่างและค่าสีเหลืองไม่ต่างจากสูตรควบคุม ในขณะที่การใช้มอลทิทอลจะมีผลให้ค่าความสว่างเพิ่มมากขึ้นและค่าสีเหลืองลดลงเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปิยนุสรณ์ และนวร

[26] ที่พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณมอลทิทอลมากขึ้น ทำให้ค่าสีก็มีความสว่างเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ทั้ง 4 สูตรมีค่าความสว่างอยู่ในช่วง 35.73-45.65 ค่าสีแดง (a^*) อยู่ในช่วง 0.99 – 1.17 และค่าสีเหลือง (b^*) อยู่ในช่วง 1.73 – 2.90 ดังแสดงในตารางที่ 5

ผลการวิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัส พบว่า ชนิดและปริมาณสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลที่แตกต่างกันส่งผลให้ค่าความแข็ง (Hardness) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อปริมาณสารให้ความหวานเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นทั้งในซอร์บิทอลและมอลทิทอลเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม แต่อย่างไรก็ตามซอร์บิทอลจะส่งผลให้พุดดิ้งมีความแข็งมากกว่าการใช้มอลทิทอลในระดับเดียวกัน เช่นเดียวกับการใช้สารให้ความหวานซอร์บิทอลทดแทนน้ำตาลในแยมสตอเบอร์รี่ ราสเบอร์รี่ และเชอร์รี่ [27] ในขณะที่ชนิดและปริมาณสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลไม่ส่งผลต่อค่าความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เมื่อเทียบกับสูตรควบคุมโดยผลิตภัณฑ์ทั้ง 4 สูตร มีความแข็งอยู่ในช่วง 121.21 – 414.62 นิวตัน และมีความยืดหยุ่นอยู่ในช่วง 0.83 – 0.99 นิวตัน/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สมบัติทางเคมีและกายภาพของพุดดิ้งนํ้านมถั่วเหลืองเสริมงาดำร้อยละ 15 ที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล

สารให้ความหวาน (ร้อยละ)	ค่าสี			เนื้อสัมผัส		ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Brix) ^{ns}
	L	a^{*ns}	b	ความแข็ง(N)	ความยืดหยุ่น(N/s)	
ตัวควบคุม	35.57 ^b ±1.52	1.20±0.14	3.22 ^a ±0.13	112.07 ^e ± 5.40	0.95 ± 0.01	17.33 ± 1.15
ซอร์บิทอล 25	36.96 ^b ±0.95	1.17±0.09	2.90 ^{ab} ±0.44	273.39 ^b ± 4.45	0.96 ± 0.02	17.33 ± 0.57
ซอร์บิทอล 50	35.73 ^b ±0.29	0.99±0.14	2.67 ^{ab} ±0.42	414.62 ^a ± 26.7	0.97 ± 0.01	17.17 ± 0.29
มอลทิทอล 25	45.65 ^a ±0.39	1.08±0.07	1.73 ^b ±0.64	121.21 ^d ± 2.89	0.83 ± 0.21	16.66 ± 0.00
มอลทิทอล 50	44.21 ^a ±1.03	0.96±0.07	1.94 ^b ±0.21	196.46 ^c ± 4.63	0.99 ± 0.00	16.33 ± 0.00

หมายเหตุ : ตัวควบคุม* คือ สูตรพุดดิ้งนํ้านมถั่วเหลืองเสริมงาดำร้อยละ 15 ที่ใช้น้ำตาลซูโครส

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้
พบว่า ชนิดและปริมาณของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนมถั่วเหลืองเสริมงาดำ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เมื่อเทียบกับสูตรควบคุม โดยผลิตภัณฑ์พุดดิ้งที่ได้มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้อยู่ในช่วง 16.33 – 19.33 องศาบริกซ์ดังแสดงในตารางที่ 5

ผลการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส พุดดิ้ง นมถั่วเหลืองเสริมงาดำร้อยละ 15 ที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล 2 ชนิด 2 ระดับ พบว่า ชนิดและ

ปริมาณของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลที่แตกต่างกันในผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนมถั่วเหลืองเสริมงาดำ ไม่มีผลต่อคะแนนความชอบด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบโดยรวม ($p>0.05$) โดยผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนมถั่วเหลืองเสริมงาดำร้อยละ 15 ที่ใช้ซอร์บิทอลร้อยละ 25 มีคะแนนด้านความชอบในทุกด้าน รวมทั้งมีคะแนนความชอบโดยรวมมากที่สุด อยู่ในระดับชอบปานกลาง ดังแสดงในตารางที่ 6 จึงเลือกใช้ผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนมถั่วเหลืองเสริมงาดำร้อยละ 15 ที่ใช้ซอร์บิทอลร้อยละ 25 เป็นสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

ตารางที่ 6 สมบัติทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนมถั่วเหลืองเสริมงาดำร้อยละ 15 ที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล

สารให้ความหวาน(ร้อยละ)	สี ^{ns}	กลิ่น ^{ns}	เนื้อสัมผัส ^{ns}	รสชาติ ^{ns}	ความชอบโดยรวม ^{ns}
ซอร์บิทอล 25	7.05±1.75	6.68±1.73	7.22±1.87	7.00±1.70	7.14±1.95
ซอร์บิทอล 50	6.77±1.40	6.25±1.51	6.74±1.53	6.25±1.68	6.51±1.57
มอลทิทอล 25	7.05±1.88	7.00±1.67	7.17±1.68	6.68±1.99	6.85±1.49
มอลทิทอล 50	7.00±1.77	6.65±1.63	7.22±1.70	6.65±1.53	6.94±1.54

หมายเหตุ: ns ค่าเฉลี่ยของแนวตั้ง หมายถึง แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

3.3 การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของพุดดิ้งนมพร้อมดื่มเสริมงาดำโดยใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล

ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนมถั่วเหลืองเสริมงาดำร้อยละ 15 ที่ใช้ซอร์บิทอลร้อยละ 25 พบว่า มีค่าปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 81.03, 2.0, 3.6, 0.37 และ 13 ตามลำดับ และพลังงาน 92 กิโลแคลอรี/100กรัม ดังแสดงในตารางที่ 7 โดยผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นจะมีปริมาณคาร์โบไฮเดรต และพลังงานลดลง ในขณะที่โปรตีนและไขมันเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนมถั่วเหลืองสูตรพื้นฐาน ที่มีปริมาณ

โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน ร้อยละ 1.75, 19.95, 2.00 ตามลำดับ และพลังงาน 102 กิโลแคลอรี/100กรัม โดยปริมาณของโปรตีนและไขมันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากงาดำที่เสริมในพุดดิ้ง โดยงาดำจะมีปริมาณโปรตีน 20.6 กรัม และมีไขมัน 51.6 กรัมต่องาดำอบ100 กรัม [22] จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์พุดดิ้งที่เสริมงาดำจึงมีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงกว่าสูตรควบคุม

เมื่อนำผลวิเคราะห์มาจัดทำเป็นข้อมูลโภชนาการแบบย่อ พบว่า ผลิตภัณฑ์พุดดิ้งนมถั่วเหลืองเสริมงาดำร้อยละ 15 ที่ใช้ซอร์บิทอลร้อยละ 25 หนึ่งหน่วยบริโภค (100 กรัม) ให้พลังงาน 90 กิโลแคลอรี พลังงานไขมันทั้งหมด 3.5 กิโลแคลอรี โปรตีน 2 กรัม

คาร์โบไฮเดรต 13 กรัม โซเดียม 15 มิลลิกรัม และแคลเซียมคิดเป็นร้อยละ 4 ของปริมาณที่แนะนำให้บริโภคต่อวัน (Thai RDI) ดังแสดงในรูปที่ 2 พุดดิ่งนํ้านมถั่วเหลืองที่พัฒนาขึ้นให้พลังงาน และคาร์โบไฮเดรตน้อยกว่าผลิตภัณฑ์พุดดิ่งนมถั่วเหลืองที่มี โปรตีน, ไขมัน, คาร์โบไฮเดรต เท่ากับ 1.75, 2.00, 19.95 กรัม ตามลำดับและมีพลังงาน 102 กิโลแคลอรี/100 กรัม จึงคาดว่าจะสามารถส่งเสริมเพื่อให้เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพต่อไปได้ในอนาคต

ตารางที่ 7 คุณภาพทางเคมีของพุดดิ่งนมถั่วเหลืองเสริม งาดำร้อยละ 15 ที่ใช้ซอร์บิทอลร้อยละ 25

สารอาหาร	ปริมาณ (ร้อยละ/100 กรัม)
ความชื้น	81.03
โปรตีน	2.0
ไขมัน	3.6
เถ้า	0.37
คาร์โบไฮเดรต	13
พลังงาน	92 Kcal

หมายเหตุ: วิเคราะห์โดย ศูนย์บริการห้องปฏิบัติการอุตสาหกรรมอาหาร กรุงเทพมหานคร

Nutrition labeling (THAI, RDI)

ฉลากโภชนาการสำหรับขนาดบรรจุ 100 กรัม
หนึ่งหน่วยบริโภค 1 ถ้วย (100 กรัม)

ข้อมูลโภชนาการ			
หนึ่งหน่วยบริโภค: 1 ถ้วย (100 กรัม)			
จำนวนหน่วยบริโภคต่อถ้วย : 1			
คุณค่าทางโภชนาการต่อหนึ่งหน่วยบริโภค			
พลังงานทั้งหมด		90 กิโลแคลอรี	
ร้อยละของปริมาณที่แนะนำให้บริโภคต่อวัน*			
ไขมันทั้งหมด	3.5 ก.		5 %
โปรตีน	2 ก.		
คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด	13 ก.		4 %
น้ำตาล	10 ก.		
โซเดียม	15 มก.		1 %
ร้อยละของปริมาณที่แนะนำให้บริโภคต่อวัน*			
แคลเซียม		4 %	

* ร้อยละของปริมาณสารอาหารที่แนะนำให้บริโภคต่อวันสำหรับคนไทยอายุตั้งแต่ 6 ปีขึ้นไป (Thai RDI) โดยคิดจากความต้องการพลังงานวันละ 2,000 กิโลแคลอรี

รูปที่ 2 ฉลากโภชนาการแบบย่อผลิตภัณฑ์พุดดิ่งนมถั่วเหลืองเสริมงาดำร้อยละ 15 ที่ใช้ซอร์บิทอลร้อยละ 25

4. สรุป

การพัฒนาผลิตภัณฑ์พุดดิ่งนมถั่วเหลืองพร้อมดื่มแคลอรีต่ำเสริมงาดำสำหรับผู้สูงอายุ โดยปริมาณงาดำร้อยละ 15 และใช้ซอร์บิทอลเป็นสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทรายร้อยละ 25 ในพุดดิ่งนํ้านมถั่วเหลือง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์พุดดิ่ง ที่มีสีออกเทามากกว่าพุดดิ่งทั่วไป มีคะแนนความชอบอยู่ในระดับชอบปานกลาง โดยปริมาณหน่วยบริโภค (100 กรัม) ให้พลังงาน 90 กิโลแคลอรี พลังงานไขมันทั้งหมด 3.5 กิโลแคลอรี โปรตีน 2 กรัม คาร์โบไฮเดรต 13 กรัม โซเดียม 15 มิลลิกรัม และแคลเซียมคิดเป็นร้อยละ 4 ของปริมาณที่แนะนำให้บริโภคต่อวัน (Thai RDI) โดยผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นจะให้พลังงานและคาร์โบไฮเดรตลดลง เมื่อเทียบกับสูตรพุดดิ่งนมถั่วเหลืองในการทดลองจึงคาดว่าสามารถนำไปใช้เป็นอาหารว่างสำหรับผู้สูงอายุได้ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้งบประมาณด้านวิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2565 และขอขอบคุณสาขาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตามที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Health, "Annual Report 2020 Bureau of Elderly Health," Department of Health, Ministry of Public Health, Nonthabur, 2020.
- [2] National Statistical Office, "Summary 2010 Household Socio-Economic Survey Report," Sri Muang Printing Co., Ltd., Bangkok, 2011.

- [3] M. Heinrich and J. Prieto, "Diet and healthy ageing 2100: Will we globalize local knowledge systems?," *Ageing Research Review*, vol. 7, no. 3, pp. 249–274, Jul 2008.
- [4] C. Kaewanun, "Nutrition of the Elderly," *EAU Heritage Journal Science and Technology*, vol. 12, no. 2, p. 112–119, May-Aug 2008.
- [5] C. Mekhora, "Food for elderly with swallowing difficulty," *Food*, vol. 47, no. 2, pp. 14-18, 2017.
- [6] P. Khammamoon, "Innovative healthy food or food for those in need (Medicare Food) Chapter 2.," [Online]. Available: http://www.nfi.or.th/datas/files/June 20192_%20MedicareFood.pdf. [Accessed 18 May 2022].
- [7] P. Clavé, m. D. Kraa, V. Arreola, M. Girvent, R. Farré, E. Palomera and M. Serra-prat, "The effect of bolus viscosity on swallowing function in neurogenic dysphagia," *Alimentary Pharmacology & Therapeutics*, vol. 24, no. 9, pp. 1385-1394, Oct 2006.
- [8] R. Ruengthamsing, P. Piyasuwanying and N. Siriwong, "Formulation Development of Milk Pudding Substituted with Corn Milk," *KKU Science Journal*, vol. 44, no. 2, pp. 345-354, 2016.
- [9] C. Chimker, N. Rungraung, P. Thiyajai and S. Purttiponthanee, "Formulation of Vegetable Pudding for Elderly and Their Storage Effect on Total Phenolics and Antioxidant Activities," (*Science and Technology*) *Srinakharinwirot University Journal*, vol. 11, no. 21, pp. 64-76, 2019.
- [10] W. Yuenyongphutthakan, S. Wichianchot and U. Sukatta, "Development of Healthy Gel Food Product for Elderly from Prebiotic Thai Fruit using Riceberry Rice Jelly as Prototype Product," Chonburi, 2017.
- [11] K. Sommee, S. Jomwichian and N. Wonghirundecha, "Development of Tahuay from corn milk mixed with scale of corn," *Journal of Agricultural Technology, Songkhla Rajabhat University*, vol. 4, no. 6, pp. 31-43, 2008.
- [12] P. Sukphan, "Development of prebiotic fortified soybean milk for elderly consumers," Songkla University, Songkla, 2009..
- [13] K. Taku, K. Umegaki and S. Watanabe, "Soy isoflavones lower serum total and LDL cholesterol in humans: a meta-analysis of 11 randomized controlled trials," *American Journal of Clinical Nutrition*, vol. 85, no. 4, pp. 1148-1156, 2007.
- [14] P. Wei, M. Liu และ Y. Chen, "Systematic review of soy isoflavone supplements on osteoporosis in women," *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, เล่มที่ 5, %13, pp. 243-248, 2012.
- [15] A. Takagi, M. Kano and C. Kaga, "Possibility of breast cancer prevention: Use of soy Isoflavones and fermented soy beverage produced using probiotics," *International*

- Journal of Molecular Sciences*, vol. 16, no. 5, pp. 10907-10920, 2015..
- [16] K. Tudpor, P. Sringaokham, N. Thaweesak, P. Reunthong and T. Laoakka, "Effects of black sesame- fortified pudding consumption on psychological stress of community- dwelling older persons," *Research and development health system journal*, vol. 14, no. 2, pp. 175-181, 2021.
- [17] A. Dholvitayakhun, Principles of Food Preparation, Tak: Rajamangala University of Technology Lanna Tak, 2017.
- [18] N. Srisangwan, "Nutritional Improvement of A- Lua and Foi- Thong desserts by using nonsugar sweeteners," Silpakorn University, Nakhon Pathom, 2012.
- [19] A. O. A. C. , Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists, Washington DC: The Association of Official Analytical Chemists, 2019.
- [20] S. Chatjarunchaisri, " Development of Sponge Cake with Black Sesame," Kasetsart University, Nonthaburi, 2004.
- [21] N. Chumsri and s. Arunrungsawat, " The Development of Drink from Riceberry with Black Sesame," *Christian University of Thailand Journal*, vol. 22, no. 3, pp. 340 - 350, 2016.
- [22] Department of Health, Food composition Table of Thai Foods, Nonthaburi: The Printing Office Agency to assist veterans in Royal Shu patham, 2018.
- [23] R. Ruangthamsing, P. Piyasuwanying and N. Siriwong, "Formulation Development of Milk Pudding Substituted with Corn Milk," *KKU Science Journal*, vol. 44, no. 2, pp. 345-354, 2016.
- [24] A. Suklim, K. Laothaworn, W. Panichkornkul and N. Tongcom, "Development of Germinated Brown Rice Pudding Product," in *Proceeding of 6th Academic Science and Technology Conference (ASTC 2018)*, Bangkok, Thailand, 2561.
- [25] P. Lhaothong, N. Chuaykarn and S. Pruettiwilai, "Effect of Sacha Inchi Powder on Physical and Sensorial Characteristics of Pudding Product," in *Proceeding of 58th Academic Conference of Kasetsart University*, Nonthaburi, 2020.
- [26] P. Noidueng and N. Bandij, "Utilization of Maltitol and Sucralose in Low-Calories Butter Cookies Production," *APHEIT journal*, vol. 4, no. 2, pp. 42-51, 2015.
- [27] A. Vilela, S. Matos, A. Abraão, A. Lemos and F. Nunes, "Sucrose replacement by sweeteners in strawberry, raspberry, and cherry jams: Effect on the textural characteristics and sensorial profile – A chemometric approach," *Journal of Food Processing*, vol. 2015, pp. 1-14, 2015.

การพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด

บุญทริกา ศิลา¹ กระวี ตรีอำรรค^{2*} และ เทวรัตน์ ตรีอำรรค¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

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

รับบทความ 29 พฤศจิกายน 2565 แก้ไขบทความ 7 กุมภาพันธ์ 2566 ตอรับบทความ 1 มีนาคม 2566

บทคัดย่อ

การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ ขึ้นเพื่อช่วยลดความชื้นข้าวเปลือกยังคงประสบปัญหาสำคัญเรื่องความสิ้นเปลืองพลังงานที่ยังคงสูงอยู่ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรดขึ้นและศึกษาความเป็นไปได้ในการลดปัญหาดังกล่าว ทำการศึกษาเงื่อนไขการอบแห้งข้าวเปลือก 3 เงื่อนไข คือ 1) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 60°C 2) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 วัตต์ 3) การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด 800 วัตต์ ประเมินสมรรถนะการอบแห้งจากพฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น โดยกำหนดให้ความเร็วลมและอัตราการป้อนข้าวเปลือกคงที่ ที่ 6 m/s และ 8.4 kg/min ตามลำดับ ทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ความชื้นเริ่มต้น 23% w.b. ครึ่งละ 20 kg จนถึงความชื้นสุดท้าย 14% w.b. ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดใช้เวลาเร็วที่สุดคือ 220 นาที อัตราการอบแห้งของวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนและวิธีการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 60°C ให้ค่า SEC ต่ำที่สุดคือ 14.24 ± 0.88 MJ/kg water และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า SEC เฉลี่ยพบว่า ผลลัพธ์จากวิธีการอบแห้งทั้ง 3 เงื่อนไข ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

คำสำคัญ : ข้าวเปลือก; ข้าวขาวดอกมะลิ 105; เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม; รังสีอินฟราเรด

Development of an Infrared-assisted Pneumatic Paddy Drying System

Boontarika Sila¹ Krawee Treeamnuk^{2*} and Tawarat Treeamnuk¹

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

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

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

Received 29 November 2022; Revised 7 February 2023; Accepted 1 March 2023

Abstract

The development of various dryers to dry paddy still faces a significant problem of high energy consumption. Therefore, this research objective was to develop an infrared-assisted pneumatic paddy drying system and study the possibility of reducing the problem. The study consists of 3 methods of drying paddy, namely: 1) drying paddy by hot air 60°C; 2) drying paddy by hot air 60°C with 50 W infrared radiation; and 3) Drying paddy with 800 W infrared radiation. In this study, 20 kg of Thai jasmine 105 paddy with initial moisture content 23%w.b. was dried until 14%w.b. at drying air velocity and paddy feed of 6 m/s and 8.4 kg/min respectively. The performance of drying was evaluated based on the drying characteristic curve, drying rate and the specific energy consumption (SEC) of the developed drying system. The results showed that hot air combined with infrared radiation in drying had fastest time 220 min in drying. Drying rate of hot air drying and hot air drying combined with infrared radiation was no statistical difference ($p < 0.05$). The lowest SEC was 14.24 ± 0.88 MJ/kg_{water} and it was not significantly different ($p < 0.05$) when comparing within all experiment methods.

Keywords: Paddy; Thai jasmine 105 rice; Pneumatic dryer; Infrared

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

1. บทนำ

ข้าว นับเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ทั้งในด้านการบริโภคและการเป็นสินค้าเกษตรส่งออกของประเทศ มีพื้นที่เพาะปลูกครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศ ในปีการผลิต 2563 ไทยเป็นผู้ส่งออกข้าวอันดับ 3 ของโลก โดยมีปริมาณการส่งออกถึง 5.72 ล้านตัน [1] อย่างไรก็ตามในการรักษาคุณภาพข้าวให้ได้ตามมาตรฐานนั้นยังคงเป็นสิ่งสำคัญ ชาวนาไทยยังคงประสบกับปัญหาคุณภาพข้าวที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งปัจจัยหลักที่ทำให้ข้าวมีคุณภาพต่ำลงนั้นคือความชื้นที่สะสมในข้าวโดยข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวมีความชื้นสูงถึง 24 – 28%w.b. [2] ส่งผลให้ผลผลิตข้าวที่ได้เกิดการเน่าเสียระหว่างการเก็บรักษา อีกทั้งความชื้นที่สูงยังส่งผลต่อการแตกหักที่เด่นชัดระหว่างการสี [3] ซึ่งปัญหาความชื้นสูงในข้าวนั้นทำให้ข้าวเปลือกไม่มีคุณภาพที่ดีพอที่จะขายได้ราคาตามมาตรฐาน ส่งผลให้เกษตรกรขายข้าวเปลือกได้ในราคาต่ำและมีผลผลิตคุณภาพสูงออกสู่ตลาดน้อย ดังนั้นการควบคุมความชื้นข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวจึงเป็นสิ่งสำคัญ ความชื้นที่เหมาะสมในการเก็บรักษามะลิข้าวเปลือกคือ 14%w.b. จะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้นและคุณภาพการสีสูงขึ้น [4], [5]

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เครื่องจักรและเทคโนโลยีการอบแห้งมาทดแทนการลดความชื้นแบบดั้งเดิม เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่นิยมใช้แพร่หลายที่สุดคือเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน เนื่องจากมีความสะดวกในการทำงาน เครื่องอบแห้งชนิดนี้ได้แก่ เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดไหลคลุกเคล้า (Louisiana State University หรือ LSU) อุณหภูมิลมร้อนสามารถใช้ได้สูงถึง 60°C [6] เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์-เบด สามารถใช้อุณหภูมิอบแห้งได้สูงถึง 140 - 150°C [7] เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมซึ่งอาศัยลมร้อนใช้อุณหภูมิสูงถึง 80°C [8], [9] ซึ่งหลักการทำงานคือข้าวที่มีความชื้นสูงถูกป้อนเข้ามาในห้องอบแห้งและถูกลมที่เป่าเข้ามาในห้องอบแห้งพัดลอยขึ้นไปพร้อมกัน ทั้งนี้ปัญหาหลักของ

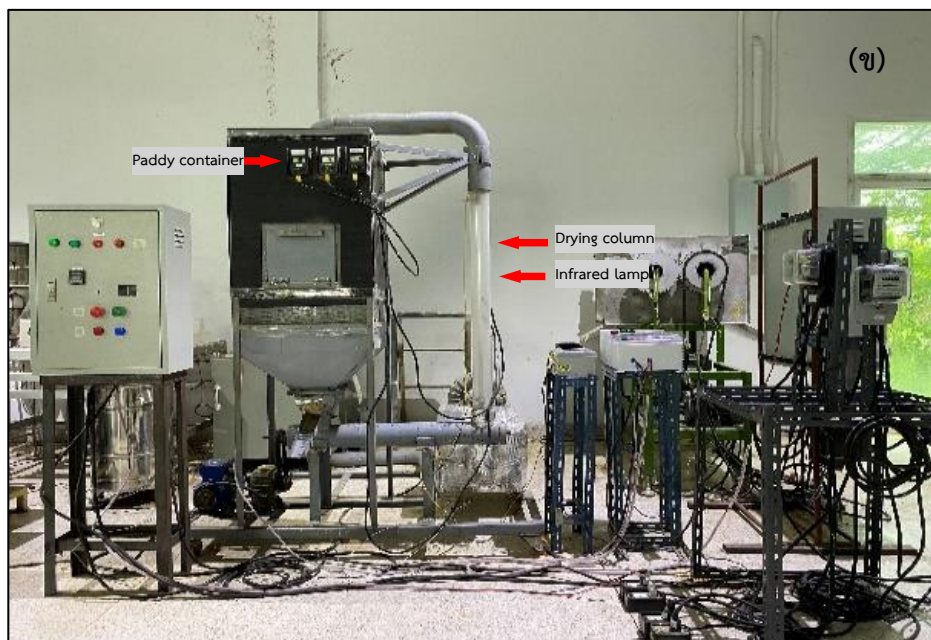
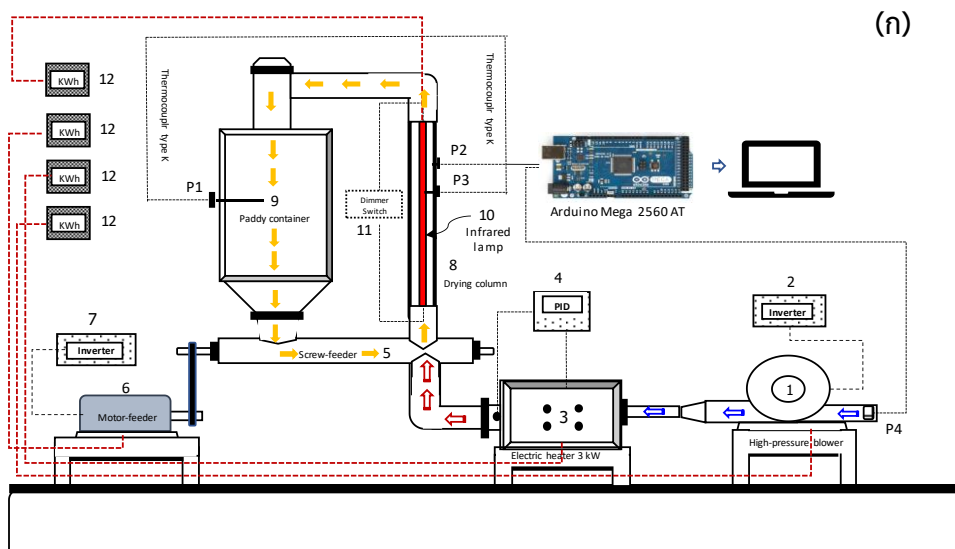
การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนคือการใช้พลังงานในการอบแห้งที่สูงมาก [10] จากการให้ความร้อนกับอากาศอบแห้ง ดังนั้นจึงต้องมีการประยุกต์ใช้พลังงานจากแหล่งอื่นๆ เข้ามาใช้ร่วมกันเพื่อลดการใช้พลังงานของอากาศอบแห้งและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งให้สูงขึ้น

รังสีอินฟราเรดเป็นทางเลือกหนึ่งของการใช้พลังงานร่วมในระบบอบแห้ง เนื่องจากมีคุณสมบัติสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อวัสดุได้โดยตรงโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง จึงมีการสูญเสียพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อมน้อยมาก ส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า [11], [12], [13] และพบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งสามารถลดการใช้เวลาในการอบแห้งลดลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน [14] มีการใช้พลังงานจากรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งวัสดุหลายชนิด ซึ่งพบว่าวัสดุที่ผ่านการอบแห้งมีคุณภาพที่สูงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน [15] ทั้งนี้จากข้อดีดังกล่าวจึงมีการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับการอบแห้งหลายประเภท เช่น มีการพัฒนาเทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ฟลูอิดเซชันร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น [16] การอบแห้งข้าวเปลือกโดยรังสีอินฟราเรด ลมร้อนและการเทมเปอร์ริง [17] การใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนในการอบแห้งขมิ้น [18] มันเทศ [19] ถั่วลิสง [20] หัวหอม [21] แอปเปิ้ล [22] สาหร่ายเตา [23] แครอท [24] พุทรา [25] ผัก [26] และเมล็ดถั่วพิสตาชิโอ [27] เป็นต้น

เพื่อเป็นการพัฒนาการอบแห้งแบบพาหะลมด้วยอากาศร้อนให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาด้านแบบระบบอบแห้งแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งข้าวเปลือกซึ่งมีความแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาคือวัสดุอบแห้งไม่ได้วางอยู่กับที่ โดยวัสดุมีการลอยตัวไหลไปกับลมร้อนเกิดกระบวนการการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นขณะที่วัสดุลอยตัวในหอบแห้งซึ่งมี 2

แหล่งความร้อนคือลมร้อนและหลอดรังสีอินฟราเรดที่ถูกติดตั้งภายในหอบแห้ง และมีการทดสอบอบแห้งทั้งหมด 3 เงื่อนไข คือ 1) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อน 2) การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนร่วมกับ

รังสีอินฟราเรด 3) การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ



รูปที่ 1 (ก) แผนภาพเครื่องอบแห้งที่ใช้ทดสอบ

(ข) เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรดที่พัฒนาขึ้น

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การพัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบ

พาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรด

เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยอินฟราเรดที่แสดงดังรูปที่ 1 ก โดยได้แสดงหมายเลขกำกับแต่ละอุปกรณ์ซึ่งประกอบไปด้วยหมายเลข 1) พัดลมความดันสูง (Blower) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น VORTEX ขนาด 1.5 kW 2) อินเวอร์เตอร์ควบคุมพัดลมความดันสูงยี่ห้อ MITSUBISHI รุ่น E700 3) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 3 kW 4) เครื่องควบคุมอุณหภูมิฮีตเตอร์ (Temperature control) ยี่ห้อ BERM รุ่น REX-C100 5) สกรูลำเลียงข้าว 6) มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรูขนาด 0.75 kW 7) อินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์ยี่ห้อ HATTEC-GR 8) หอบแห้งที่ทำจากท่ออะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 74 mm ยาว 1 เมตร 9) ถังเก็บข้าวขนาด $0.40 \times 0.50 \times 0.80 \text{ m}^3$ 10) หลอดอินฟราเรดชนิดควอทซ์ขนาด 1 kW โดยวัสดุที่นิยมนำมาทำหลอดอินฟราเรด คือ วัสดุประเภท เซรามิกที่มีคุณสมบัติทนความร้อนสูง เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า หลอดแก้วควอทซ์ ซึ่งจะปล่อยคลื่นอินฟราเรดระยะกลางออกมา [28] มีการนำมาใช้งานแพร่หลายเนื่องจากง่ายในการควบคุม ให้ความร้อนค่อนข้างเร็วและเป็นพลังงานที่สะอาด 11) สวิตช์ควบคุมกระแสไฟฟ้า (Dimmer Switch) ขนาด 1.6 kW และ 12) มิเตอร์วัดพลังงานไฟฟ้า (ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MF – 37E) การทำงานของเครื่องต้นแบบ (รูปที่ 1 ข) เริ่มจากเมื่อเปิดพัดลมความดันสูง (หมายเลข 1) อากาศแวดล้อมจากภายนอกจะถูกดูดเข้าไปเพิ่มอุณหภูมิที่ฮีตเตอร์ (หมายเลข 3) จนได้อุณหภูมิ 60°C จากนั้น อากาศอุณหภูมิสูงจะถูกลำเลียงเข้าสู่หอบแห้ง (หมายเลข 8) ทางด้านล่างซึ่งภายในมีหลอดอินฟราเรด (หมายเลข 10) ติดตั้งอยู่ตรงกลางหอบเพื่อเป็นแหล่งให้ความร้อนแหล่งที่สอง ขั้นตอนการอบแห้งเริ่มจากข้าวเปลือกในถังเก็บ (หมายเลข 9) จะถูกสกรูลำเลียง (หมายเลข 5) ไปยังหอบ

อบแห้งเพื่อสัมผัสกับลมร้อนที่เป่าขึ้นมา จากนั้นข้าวจะถูกเป่าลอยขึ้นไปในหอบแห้ง (หมายเลข 8) พร้อมกับลมร้อนและสัมผัสกับความร้อนที่แผ่ออกมาจากหลอดอินฟราเรดไปพร้อมกัน เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นในหอบแห้ง หลังจากนั้นเมล็ดข้าวจะถูกลำเลียงออกจากหอบแห้งมาเก็บไว้ที่ถังเก็บ (หมายเลข 9) และจะถูกลำเลียงหมุนวนในระบบไปเรื่อย ๆ จนถึงความชื้นสุดท้ายจึงสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง

2.2 วิธีการทดสอบ

เมื่อทำการประกอบเครื่องอบแห้งเรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K จำนวน 4 ตำแหน่ง (P1 – P4) แสดงดังรูปที่ 1 ก โดยเชื่อมต่อเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 AT และเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เพื่อรับค่าและแสดงผล

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ใช้ความเร็วลมอากาศคงที่ที่ 6 m/s (ความถี่อินเวอร์เตอร์ 60 Hz) ซึ่งเป็นความเร็วลมที่ทำให้เมล็ดข้าวสามารถลอยขึ้นไปยังหอบแห้งได้จากการทดสอบระบบเบื้องต้น และอัตราการป้อนคงที่ที่ 0.14 kg/s (ความถี่อินเวอร์เตอร์ 16 Hz) ซึ่งเป็นอัตราป้อนที่เหมาะสมในการป้อนข้าวไหลไปสัมผัสกับลมแล้วสามารถลอยขึ้นไปได้ ควบคุมอุณหภูมิของข้าวเปลือกในถังไม่ให้สูงเกินกว่า 60°C เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเมล็ดข้าวในถังเก็บ หลังการอบแห้งให้ไม่เกิน 45°C ซึ่งช่วยให้ควบคุมคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งได้ [29], [30], [31], [32], [33] ในทุกเงื่อนไขการทดสอบ แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 เงื่อนไข คือ 1) หอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 60°C 2) หอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ร่วมกับเปิดหลอดอินฟราเรด 50 วัตต์ (อุณหภูมิเฉลี่ยของหลอดอยู่ที่ 70°C) 3) หอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้หลอดอินฟราเรด 800 วัตต์ (อุณหภูมิเฉลี่ยของหลอดอยู่ที่ 345°C) ร่วมกับการใช้อากาศอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยใช้

ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นเริ่มต้น 23%w.b. ทดสอบครั้งละ 20 kg อบจนถึงความชื้นสุดท้าย 14%w.b. และทำซ้ำเงื่อนไขละ 3 ซ้ำ ตลอดการทดลอง

2.3 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

2.3.1 พฤติกรรมการอบแห้ง

การประเมินพฤติกรรมการอบแห้งจะประเมินจากปริมาณความชื้น (Moisture content) ในเมล็ดข้าวที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นไปจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ โดยในขั้นตอนการหาความชื้นในเมล็ดข้าวสามารถหาได้จากการนำตัวอย่างเมล็ดข้าว 10 กรัมไปชั่งน้ำหนักก่อนนำไปอบหามวลแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [34] จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักหลังอบแห้ง และนำค่าน้ำหนักก่อน - หลังมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก (Wet basis, %w.b.) ตามสมการที่ (1)

$$M_w = \frac{W_i - W_d}{W_i} \quad (1)$$

โดยที่ M_w = ความชื้น ณ เวลาใดๆ (เปอร์เซ็นต์ฐานเปียก, %w.b.)

W_i = น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (g)

W_d = น้ำหนักข้าวเปลือกแห้ง (g)

2.3.2 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

อัตราการอบแห้งข้าวเปลือกคือความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในเมล็ดข้าวที่ลดลงต่อระยะเวลาการอบแห้ง ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (2)$$

โดยที่ DR = อัตราการอบแห้ง (kg_{water}/h)

W_i = น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (g)

W_f = น้ำหนักข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (g)

2.3.3 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

วัดค่าการใช้พลังงานจากมิเตอร์ไฟฟ้า (ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MF – 37E) ที่ต่อเข้ากับพัดลมความดันสูง Blower) ฮีตเตอร์ไฟฟ้า มอเตอร์ และหลอดอินฟราเรด ตามลำดับ คำนวณหา SEC ได้จากสมการที่ 3 [35]

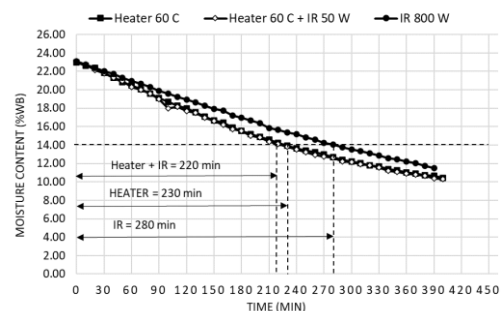
$$SEC = \frac{3.6E}{W_i - W_f} \quad (3)$$

โดยที่ SEC = ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg_{water})

E = พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในกระบวนการอบแห้ง (kWh)

3. ผลการศึกษา/อภิปรายผล

3.1 พฤติกรรมการอบแห้ง



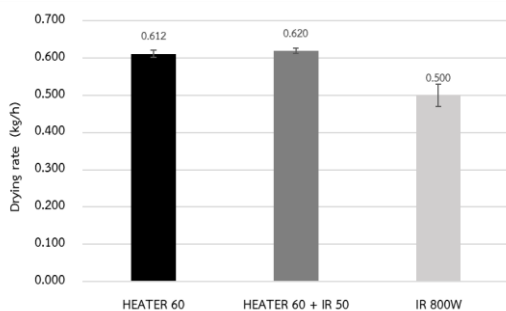
รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C

พฤติกรรมการอบแห้งแสดงด้วยค่าปริมาณความชื้น (Moisture content) ในเมล็ดข้าวที่ลดลงจากความชื้นเริ่มต้นไปจนถึงความชื้นสุดท้ายที่ต้องการดังรูปที่ 2 จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งช่วงแรกความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีสาเหตุมาจากในช่วงแรกนั้นเมล็ดข้าวมีความชื้นที่บริเวณผิวเมล็ดแตกต่างกับภายในแกนกลางของเมล็ดมาก กล่าวคือเกิด

Moisture gradient สูง จึงทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวอย่างรวดเร็ว [16], [36] และเมื่อเปรียบเทียบเวลาในการอบแห้งพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C ร่วมกับรังสีอินฟราเรด 50 วัตต์ มีอัตราการลดลงของความชื้นถึงความชื้นสุดท้าย 14%w.b. เร็วที่สุดคือ 220 นาที รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด 800 วัตต์ ที่เวลา 230 และ 280 นาที ตามลำดับ ซึ่งจากผลดังกล่าวพบว่ามีผลสอดคล้องกับ Afzal และคณะ [37] ซึ่งได้ศึกษาการอบแห้งข้าวบาร์เลย์โดยใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน พบว่าสามารถร่นระยะเวลาในการอบแห้งได้เนื่องจากวิธีการดังกล่าวสามารถให้ความร้อนผ่านเข้าไปยังภายในเมล็ดข้าวเปลือกทำให้เมล็ดได้รับความร้อนพร้อมๆ กันทั้งภายในและนอกเมล็ดส่งผลให้การถ่ายเทมวลน้ำภายในเมล็ดมีอัตราการถ่ายเทที่เร็วขึ้น [38]

3.2 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

จากการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกทั้ง 3 เงื่อนไข เมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งที่แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีอัตราการอบแห้ง 0.612 ± 0.009 kg_{water}/h การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้ง 0.620 ± 0.007 kg_{water}/h และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้ง 0.501 ± 0.007 kg_{water}/h



รูปที่ 3 อัตราการอบแห้งของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยวิธีการที่ต่างกัน

ตารางที่ 1 ค่าอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

Methods	DR (kg _{water} /h)
HEATER 60	0.612 ± 0.009 ^b
HEATER 60 + IR 50 W	0.620 ± 0.007 ^b
IR 800 W	0.501 ± 0.007 ^{ab}

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p<0.05).

ซึ่งสังเกตได้ว่าการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งอีก 2 เงื่อนไข แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทางสถิติ ที่แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า อัตราการอบแห้งของวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนและวิธีอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งมีสาเหตุมาจากพลังงานไฟฟ้าจากรังสีอินฟราเรดที่ใช้ร่วมกับลมร้อนถูกใช้เพียง 50 วัตต์ ทั้งนี้เนื่องจากไม่ต้องการให้ข้าวเปลือกในถังเก็บมีอุณหภูมิสูงกว่า 60°C จึงทำให้หลอดอินฟราเรดไม่เกิดการแผ่รังสีอย่างเต็มที่ เพราะอุณหภูมิผิวหลอดอาจต่ำเกินไป ส่งผลให้อัตราการอบแห้งยังไม่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน และเมื่อพิจารณาการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวพบว่าอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด คือ 0.501 ± 0.007 kg_{water}/h ทั้งนี้อาจเป็นเพราะข้าวเปลือกมีเวลาสัมผัสกับรังสีสั้นเกินไปในขณะที่แขวนลอยกับอากาศอยู่ในหอบแห้งประกอบกับเมล็ดข้าวเปลือกมีขนาดเล็กเมื่อแขวนลอยในอากาศทำให้มีพื้นที่รับรังสีน้อยเกินไป ความร้อนจากการแผ่รังสีจึงเข้าสู่เมล็ดข้าวเปลือกได้น้อย

การใช้รังสีอินฟราเรดในการอบแห้งร่วมกับการพาความร้อนทั้งสองเงื่อนไข ยังไม่ส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุมาจากการใช้ความเร็วลมร้อนที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากต้องใช้ในการพาให้ข้าวเปลือกแขวนลอยไปกับอากาศและเคลื่อนที่ไปในหอบขณะอบแห้ง อากาศนี้จะพัดผ่านหลอดอินฟราเรดตลอดเวลาและอาจส่งผลให้ความร้อน

บนผิวหลอดซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของลมร้อนสูญเสียไปด้วย รังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากหลอดจึงส่งไปไม่ถึงเมล็ดข้าวได้อย่างสมบูรณ์ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับ Sharma และคณะ [38] ที่ได้ทำการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวร่วมกับการพาอากาศร้อนซึ่งพบว่าการใช้ความเร็วลมร้อนที่มากกว่า 2.6 m/s ส่งผลทำให้เกิดการระบายความร้อน (Cooling effect) ที่บริเวณผิวของแท่งเซรามิกของหลอดอินฟราเรด

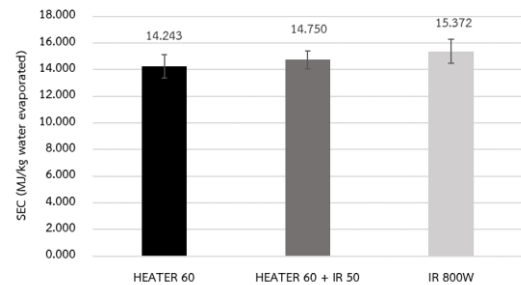
3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

(Specific energy consumption, SEC)

เมื่อพิจารณาในส่วนของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ในการทดลองทั้ง 3 เงื่อนไข ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวมีค่า SEC 14.24 ± 0.88 MJ/kg_{water} การอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดมีค่า SEC 14.75 ± 0.67 MJ/kg_{water} และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่า SEC 15.37 ± 0.91 MJ/kg_{water}

จากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) จะสูงที่สุดเมื่ออบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว ซึ่งมีอัตราการอบแห้งที่ต่ำที่สุด เนื่องจากใช้ระยะเวลาการอบแห้งที่ยาวนาน ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานที่สูง รองลงมาคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด อันเนื่องมาจากมีแหล่งความร้อนเสริมที่เพิ่มเข้ามาทำให้ช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งข้าวเปลือกและส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการอบแห้งลดลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว และสุดท้ายคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่า SEC ต่ำที่สุดคือ 14.24 ± 0.88 MJ/kg_{water} แต่การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อันเนื่องมาจากพลังงานไฟฟ้าจากรังสีอินฟราเรดที่ใช้ร่วมกับลมร้อนถูกใช้เพียง 50 วัตต์ ซึ่งยังเป็นพลังงานที่น้อยและอาจไม่

ส่งผลมากนักในการเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้งภายในหอบแห้ง



รูปที่ 4 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยวิธีการที่ต่างกัน

ตารางที่ 2 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

Methods	SEC (MJ/kg _{water})
HEATER 60	14.24 ± 0.88^a
HEATER 60 + IR 50 W	14.75 ± 0.67^a
IR 800 W	15.37 ± 0.91^a

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลในหัวข้ออัตราการอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทางสถิติ ที่แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า วิธีอบแห้งทั้ง 3 เงื่อนไข ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4. สรุป

การพัฒนาต้นแบบระบบอบแห้งแบบพาหะลมเสริมการทำงานด้วยรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งข้าวเปลือกและทดสอบอบแห้งทั้ง 3 เงื่อนไขพบว่า

พฤติกรรมการอบแห้งช่วงแรกความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วทั้ง 3 เงื่อนไขมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบเวลาในการอบแห้งพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด มีอัตราการลดลงของ

ความชื้นถึงความชื้นสุดท้าย 14%w.b เร็วที่สุดคือ 220 นาที อัตราการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนร่วมกับอินฟราเรดมี อัตราการอบแห้งที่ดีที่สุดคือ $0.620 \pm 0.007 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ แต่การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับค่า SEC พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่า SEC ต่ำที่สุดคือ $14.24 \pm 0.88 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทางสถิติพบว่าวิธีการอบแห้งทั้ง 3 เงื่อนไข ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

5. ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด ยังไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งในงานวิจัยต่อไปจะมีแนวทางการปรับปรุงระดับของรังสีอินฟราเรดที่เสริมร่วมกับลมร้อนให้มีระดับที่เหมาะสมและมีความสำคัญยิ่งขึ้น และเพิ่มการประเมินคุณภาพข้าวหลังการอบแห้ง เพื่อศึกษาความแตกต่างของวิธีการอบแห้งทั้งสองวิธีต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Pakdeekaew, K. Treeamnuak and T. Treeamnuak, "Study of Relationship Between Electrical Property and Moisture Content of KHAO DAWK MALI 105 Paddy," 13th Conference of Electrical Engineering Network 2021 (EENET 2021), Rajamongala University of Technology Ianna, Thailand, 2021.
- [2] B.D. De Padua. "Requirements for drying high moisture content grain in Southeast Asia, preserving grain quality by aeration and in-store drying," Proceedings of International Seminar, Kuala Lumpur, Malaysia, pp 45–49, 1985.
- [3] M. M. Banaszek, T. J. Siebenmorgen, "HEAD RICE YIELD REDUCTION RATES CAUSED BY MOISTURE ADSORPTION," American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), vol. 33, no. 3, pp 1263-1269, 1990.
- [4] O. R. Kunze and D. L. Calderwood, Systems for Drying Rice, Drying and Storage of Agricultural Crops. Published by AVI Publishing company Inc., Westport, Connecticut, USA pp.381 pp., 1980.
- [5] Ministry of agriculture and Cooperatives, "Thai agricultural standard TAS 4004-2017 (THAI RICE)," Bangkok: The Agricultural Co-operative Federation of Thailand (ACFT).
- [6] P. Tuaynak, M. Chuchonak, M. Yapha, and P. Bunyawachakul, "Review of Development of Paddy Dried in Industry," SWU Engineering Journal (2014), vol. 9(1), pp. 68-74, 2557.
- [7] S. Soponronnarit, "Fluidized- Bed Paddy Drying," (Science Asia) vol. 25: pp. 51-56, (1999).
- [8] J. Jekkew, "Performance evaluation of paddy rice pneumatic dryer," A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Energy management Engineering Suranaree University of Technology. 2016.

- [9] N. Wongbubpa, K. Treeamnuak and T. Treeamnuak, "Influence of Drying Air Velocity Characteristics on Paddy Drying," RMUTP Research Journal, vol. 16, no. 1, January-June 2022.
- [10] S.D.F. Mihindukulasuriya, H.P.W. Jayasuriya, Mathematical modeling of drying characteristics of chilli in hot air oven and fluidized bed dryers. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, vol. 15, pp. 154 – 166, 2013.
- [11] A.S. Ginzburg, "Application of infrared radiation in food processing," Chemical and Process Engineering Series, Leonard Hill, London. 1969.
- [12] C. Sandu, Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis. Biotechnology Progress, vol. 2, pp. 109 – 119, (1986).
- [13] C. Ratti, and A.S. Mujumdar, Infrared drying. Handbook of Industrial Drying: Volume 1, 2nd ed., Mujumdar, A.S. (Ed.), Marcel Dekker, New York, pp. 567–588, 1995.
- [14] T. Abe, and T.M. Afzal, "Thin-layer infrared radiation drying of rough rice," Journal of Agricultural Engineering Research, vol. 67, pp. 289–297, 1997.
- [15] F. Niibori, and S. Motoi, "Evaporation of vegetables used by infrared rays," Food Processing, vol. 23, pp. 38 – 42, (1988).
- [16] N. Meeso, "Development of Paddy Drying Technique Using Combination of Fluidization and Near-infrared Radiation," full paper, Thailand Science Research and Innovation (TSRI), 2012.
- [17] J. Laohavanich, "Drying of paddy by Infrared ray, hot air and tempering," full paper, Thailand Science Research and Innovation (TSRI), 2016.
- [18] G. Jeevarathinam a,b, R. Pandiselvam c, T. Pandiarajan d, P. Preetha, M. Balakrishnan, V. Thirupathi and A. Kothakota, "Infrared assisted hot air dryer for turmeric slices:Effect on drying rate and quality parameters," LWT (Food Science and Technology), vol. 144, 2021.
- [19] D.I. Onwude, N. Hashim, K. Abdan, R. Janius and G. Chen, "The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato," Journal of Food Engineering, vol. 241, pp. 75–87, 2019.
- [20] C. Chen, I. Wongso, D. Putnam, R. Khir and Z. Pam, "Effect of hot air and infrared drying on the retention of cannabidiol and terpenes in industrial hemp (Cannabis sativa L.)," Industrial Crops & Products, vol. 172, 2021.
- [21] D.G. Praveen Kumar, H. Umesh Hebbar and M.N. Ramesh, "Suitability of thin layer models for infrared-hot air-drying of onion slices," LWT (Food Science and Technology), vol. 39, pp. 700-705, 2006.
- [22] H. S. EL-Mesery, R. M. Kamel and R.Z. Emara, "Influence of infrared intensity and air temperature on energy consumption and physical quality of dried apple using hybrid dryer," Case Studies in Thermal Engineering, vol. 27, 2021.

- [23] N. Pothisri, S. Jaturonglamlert, C. Nitatwichit and C. Warit, "Combined convective and infrared radiation drying kinetics of *Spirogyra* sp.," The 40th National Graduate Research Conference, Thailand, 2016, pp. 325-334.
- [24] Z. Geng, M. Torki, M. Kaveh, M. Beigi and X. Yang, "Characteristics and multi-objective optimization of carrot dehydration in a hybrid infrared /hot air dryer," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 172, 2022.
- [25] Q. Chen, J. Bi, X. Wu, J. Yi, L. Zhou and Y. Zhou, "Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 64, pp. 759 – 766, 2015.
- [26] H. Umesh Hebbar, K.H. Vishwanathan and M.N. Ramesh, "Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables," *Journal of Food Engineering*, vol. 65, pp. 557 – 563, 2004.
- [27] G. Jeevarathinam, R. Pandiselvam, T. Pandiarajan, P. Preetha, M. Balakrishnan, V. Thirupathi and Anjineyulu Kothakota, "Infrared assisted hot air dryer for turmeric slices:Effect on drying rate and quality parameters," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 144, 2021.
- [28] S. A. Aboud, A.B. Altemimi, A. R. S. Al-Hilphy, L. Yi-Chen and F. Cacciola, "A Comprehensive Review on Infrared Heating Applications in Food Processing," *MDPI Journals*, vol. 24, no. 22, pp. 4125, 2019.
- [29] A. MÜLLER, M. T. NUNES, V. MALDANER, P. C. CORADI, R. S. de MORAES, S. MARTENS, A. F. LEAL, V. F. PEREIRA and C. K. MARIN, "Rice Drying, Storage and Processing: Effects of Post-Harvest Operations on Grain Quality," *Rice Science*, vol. 29, no. 1, pp. 16 – 30, 2022.
- [30] S. Khomkaew, "Temperature of Recirculation batch drying the paddy had an effect on aroma (2AP)," *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 1 – 9, 2021.
- [31] X. Zheng and Y. Lan, "Effects of Drying Temperature and Moisture Content on Rice Taste Quality," *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, vol. 10, 2007.
- [32] X. Z Zheng and X. D. Zhao, "Calculation of taste value and study on drying quality of rice," *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, vol. 30, pp. 54 – 60, 2000.
- [33] C. N. Nguyen and O. R. Kunze, "Fissures Related to Post-Drying Treatments in Rough Rice," *Cereal chemistry*, vol. 61, no. 1, pp. 63 – 68, 1984.
- [34] AOAC, *Official Method of Analysis of AOAC International*. Virginia: Association of Official Analytical Chemists, 1995.
- [35] N. Saelim, T. Treeamnuak and K. Treeamnuak, "Development of a Continuous Flow Paddy Dryer with Infrared Radial Radiation Technique," *RMUTP Research Journal*, vol. 12, no. 2, Jul.-Dec. 2018.

- [36] J. Chu, A. Lane, and D. Conklin, "Evaporation of liquids into their superheated vapors," Ind Eng Chem, vol. 53(3), pp. 275 – 280, 1953.
- [37] T.M. Afzal, T. Abe, and Y. Hiikida, "Energy and Quality Aspects during Combined FIR-Convection Drying of Barley," International Journal of Food Engineering, Vol. 42, pp. 177-782, 1999.
- [38] G. P. Sharma, R.C Verma, and P. Pathare, "Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices," Journal of Food Engineering; 17(3): 282-286, 2006.

อิทธิพลของอัตราการให้น้ำต่อผลผลิตและคุณภาพพญานาเปียร์ปากช่อง 1 โดยใช้เครื่องรับรู้สำหรับตรวจวัดค่าความชื้นในดิน

กิตติศักดิ์ วสันตวิวงศ์^{1*} จิรณ กิ่งแก้ว² และ วีรวัฒน์ ปัญกิจฉนวน³

¹โรงเรียนการเรือน มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

²นักวิจัยอิสระ

³กองการสัตว์และเกษตรกรรมที่ 1 กรมการสัตว์ทหารบก

¹204/3 ถนนสิรินธร แขวงบางพลัด เขตบางพลัด กรุงเทพฯ 10700

²กรุงเทพฯ

³57 หมู่ 5 ตำบลเกาะสำโรง อำเภอเมืองกาญจนบุรี จังหวัดกาญจนบุรี 71000

รับบทความ 23 ธันวาคม 2564 แก้ไขบทความ 8 กุมภาพันธ์ 2566 ตอรับบทความ 1 มีนาคม 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาอัตราการให้น้ำต่อผลผลิตและคุณภาพพญานาเปียร์ปากช่อง 1 ได้แก่ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และโปรตีนหยาบ ด้วยการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก อัตราการให้น้ำในแต่ละแปลงด้วยเครื่องรับรู้สำหรับตรวจวัดค่าความชื้นในดิน จำนวน 3 ระดับ คือ 12 16 และ 20 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ต่อครั้ง วัดผลผลิตและคุณภาพโดยตัดพญานาเปียร์ จำนวน 3 ครั้ง ครั้งที่ 1 อายุ 70 วัน ครั้งที่ 2 อายุ 115 วัน และครั้งที่ 3 อายุ 150 วัน พบว่า การตัดครั้งที่ 1 ผลผลิตไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) น้ำหนักสด $4,190 \pm 403$ $4,019 \pm 435$ และ $3,995 \pm 320$ กิโลกรัมต่อไร่ น้ำหนักแห้ง 779 ± 109 746 ± 86 และ 734 ± 64 กิโลกรัมต่อไร่ และค่าโปรตีนหยาบ ร้อยละ 10.88 ± 1.02 10.73 ± 0.83 และ 10.08 ± 0.98 ของวัตถุแห้ง มีการให้น้ำ จำนวน 6 ครั้งต่อแปลง การตัดครั้งที่ 2 ผลผลิตไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) น้ำหนักสด $7,075 \pm 618$ $6,924 \pm 511$ และ $6,837 \pm 511$ กิโลกรัมต่อไร่ น้ำหนักแห้ง $1,085 \pm 64$ $1,037 \pm 123$ และ $1,036 \pm 37$ กิโลกรัมต่อไร่ และโปรตีนหยาบ ร้อยละ 12.91 ± 1.54 12.88 ± 1.33 และ 12.86 ± 1.19 ของวัตถุแห้ง มีการให้น้ำ จำนวน 3 ครั้งต่อแปลง และการตัดครั้งที่ 3 ได้ผลผลิตใกล้เคียงกับการตัดครั้งที่ 2 ผลผลิตและคุณภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) น้ำหนักสด $7,590 \pm 691$ $7,446 \pm 555$ และ $7,456 \pm 788$ กิโลกรัมต่อไร่ น้ำหนักแห้ง $1,138 \pm 162$ $1,161 \pm 166$ และ $1,112 \pm 108$ กิโลกรัมต่อไร่ และค่าโปรตีนหยาบ ร้อยละ 12.98 ± 1.55 12.95 ± 1.58 และ 12.94 ± 1.08 ของวัตถุแห้ง มีการให้น้ำ จำนวน 5 ครั้งต่อแปลง ผลการศึกษานี้ สรุปได้ว่าอัตราการให้น้ำที่เหมาะสมต่อการเติบโต คือ 12 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ต่อครั้ง

คำสำคัญ : เครื่องรับรู้; ค่าความชื้น; พญานาเปียร์ปากช่อง 1; ผลผลิต

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 2539 9545, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: kittisak_was@dusit.ac.th

The Effect of Watering rate to Napier *Pak Chong* 1 Grass on Its Yield and Quality Using a Soil Moisture Sensor Module

Kittisak Wasantiwong^{1*} Jeerun Kingkaew² and Weerawat Punquejana³

¹Suan Dusit School of Culinary Arts, Suan Dusit University

²Independent Academic

³1st Veterinary and Agriculture Division, Veterinary and Remount Department, The Royal Thai Army

1204/3 Sirindhorn road, Bang Bamru, Bang Phlat, Bangkok, 10700.

²Bangkok

³57 Moo 5, Koh Samrong Subdistrict, Mueang Kanchanaburi District, Kanchanaburi, 71000.

Received 23 December 2021; Revised 8 February 2023; Accepted 1 March 2023

Abstract

The research aims to study on watering rates per the Napier Pak Chon 1 grass yield and quality, including fresh-weight, dry-weight and crude protein content by using randomized complete block design in each field cutting Napier grass 3 times: 1st, 70-days aged, 2nd at 115-days aged, and 3rd at 150-days aged. The watering rates of water at 12, 16, and 20 cubic meters per rai. The results showed that in the 1st cutting was not different significantly ($P > 0.05$), the results as fresh-weight of $4,190 \pm 403$, $4,019 \pm 435$, and $3,995 \pm 320$ kg per rai, dry-weight of 779 ± 109 , 746 ± 86 , and 734 ± 64 kgs per rai, crude protein of 10.88 ± 1.02 , 10.73 ± 0.83 and 10.08 ± 0.98 percent, and amount of watering 6 times per plot. The 2nd cutting was not different significantly ($P > 0.05$), the results as fresh-weight of $7,075 \pm 618$, $6,924 \pm 511$, and $6,837 \pm 511$ kgs per rai, dry-weight $1,085 \pm 64$, $1,037 \pm 123$, and $1,036 \pm 37$ kgs per rai, and crude protein of 12.91 ± 1.54 , 12.88 ± 1.33 , and 12.86 ± 1.19 percent and amount of watering 3 times per plot. In the 3rd cutting, the results near by the 2nd cutting and was not different significantly ($P > 0.05$). The results as fresh-weight of $7,590 \pm 691$, $7,446 \pm 555$ and $7,456 \pm 788$ kgs per rai, dry-weight of $1,138 \pm 162$, $1,161 \pm 166$, and $1,112 \pm 108$ kgs per rai, crude protein of 12.98 ± 1.55 , 12.95 ± 1.58 , and 12.94 ± 1.08 percent, and amount of watering 5 times per plot. In conclusion, the optimum watering rate was 12 cubic meters per rai a time.

Keywords : Sensor Module; Moisture content; Napier Pak Chong 1; Grass; Yield

* Corresponding Author. Tel.: +669 2539 9545, E-mail Address: kittisak_was@dusit.ac.th

1. บทนำ

ประเทศไทยประสบปัญหาภัยแล้งจากปริมาณน้ำฝนที่ตกน้อยลงและภาวะฝนทิ้งช่วงต่อเนื่องกันในช่วงระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา ทำให้เกิดการขาดแคลนน้ำทั้งน้ำที่ใช้เพื่อการอุปโภค บริโภคและน้ำใช้ในการทำการเกษตร ส่งผลต่อเกษตรกรหลายกลุ่ม [1] การบริหารการให้น้ำให้มีประสิทธิภาพจึงเป็นภารกิจที่สำคัญ กลุ่มเกษตรกรผู้เลี้ยงโคส่วนใหญ่ของประเทศไทยมักพบปัญหาการขาดแคลนหญ้าอาหารสัตว์ในช่วงฤดูแล้ง หรือระยะที่ฝนทิ้งช่วง ทำให้เกษตรกรผู้เลี้ยงโคต้องไ้พางข้าวที่มีคุณค่าทางอาหารต่ำเป็นแหล่งอาหารสำหรับสัตว์เลี้ยง [2] ปัจจุบันหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เป็นพืชอาหารสัตว์ที่เกษตรกรนิยมนำมาปลูกเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์เนื่องจากให้ผลผลิตต่อไร่สูง มีโภชนะโปรตีนและสารอาหารอื่นๆ เพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของสัตว์เลี้ยง ปลูกและดูแลรักษาง่าย ปริมาณผลผลิตของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 สัมพันธ์กับปริมาณน้ำที่ใช้ในการปลูก [3] ในช่วงฤดูฝนที่มีปริมาณน้ำมาก สามารถให้ผลผลิตสูงถึง 8-10 ตันต่อไร่ [4] แต่ในช่วงฤดูแล้งหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 จะให้ผลผลิตเพียง 1-2 ตันต่อไร่ [5] การศึกษาปริมาณการให้น้ำในปริมาณที่เหมาะสมโดยใช้ค่าความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Available water) อยู่ระหว่างร้อยละ 50 – 100 การให้น้ำในช่วงเวลาที่ความชื้นในดินถึงจุดวิกฤต พืชไม่สามารถนำน้ำในดินมาใช้ประโยชน์ได้เมื่อความชื้นในดินมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 50 [6], [7] ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและปริมาณผลผลิตลดลง การศึกษาหาอัตราการให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ หากเกษตรกรทราบถึงปริมาณน้ำที่เหมาะสม จะทำให้สามารถบริหารการใช้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ นั่นคือ ทำให้หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ให้ผลผลิตสูงขึ้นในช่วงฤดูแล้ง อีกทั้งยังส่งผลให้เกษตรกรสามารถลดพื้นที่ปลูกหญ้าหรือไม่จำเป็นต้องขยายพื้นที่ปลูกหญ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากได้ผลผลิตต่อไร่สูงขึ้นหลายเท่า ทำให้ใช้พื้นที่ปลูกพืชชนิด

อื่นเพื่อกระจายรายได้และสร้างความหลากหลายของระบบนิเวศ

อิทธิพลของอัตราการให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่เหมาะสมมีความสำคัญเนื่องจากการศึกษาเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการให้ปริมาณน้ำนั้น พบว่าปริมาณน้ำที่ให้มส่งผลต่อผลผลิตที่ได้ กล่าวคือ ยิ่งให้ปริมาณน้ำมาก ทำให้ได้ผลผลิตมาก แต่เมื่อถึงปริมาณน้ำระดับหนึ่งปริมาณผลผลิตที่ได้จะไม่เพิ่มขึ้น อีกปัจจัยที่มีความสำคัญ คือ ในฤดูแล้งเกษตรกรมีน้ำใช้อย่างจำกัด การกำหนดอัตราการให้น้ำโดยใช้เครื่องรับรู้สำหรับตรวจวัดความชื้นในดินที่เป็นเครื่องมือสำหรับกำหนดการให้น้ำ อาจสามารถสร้างความได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแบบเดิมที่นิยมระบุวิธีการให้น้ำหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 แบบระบุเวลาในการให้น้ำแบบที่ไม่ชัดเจนนัก เช่น การให้น้ำทุก 5-6 วันต่อครั้งๆ ละ 2 ชั่วโมง [6] การให้น้ำแบบพ่นฝอยทุก 3 – 5 วัน [2] และการให้น้ำแบบปล่อยน้ำไหลไปตามร่องน้ำดิน ทุกๆ 7-10 วัน [4] เป็นต้น

ดังนั้น การนำเครื่องรับรู้สำหรับตรวจวัดความชื้นในดินมาวัดความชื้นเพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการให้น้ำที่ไม่มีผลกระทบต่อเกษตรกรและปริมาณผลผลิตของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 จะช่วยทำให้เกษตรกรสามารถทราบปริมาณน้ำที่จะใช้ได้เหมาะสมต่อการปลูกโดยไม่กระทบปริมาณผลผลิตและคุณภาพของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เป็นการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

2. ระเบียบวิธีวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ ศึกษาอัตราการให้น้ำต่อผลผลิตและคุณภาพหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ได้แก่ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และโปรตีนหยาบ โดยใช้แผน การทดลองสุ่ม สมบูรณ์ ภายใน บล็อก (Randomized Completely Block Design : RCBD) ด้วยการทำการทดลอง 5 ซ้ำ โดยกำหนดให้ 1 แปลงต่อ

1 อัตราการให้น้ำ มีขนาดพื้นที่การทดลอง กว้าง 16 เมตร ยาว 100 เมตร แบ่งการเก็บผลการทดลองดังนี้ ในการเก็บผลผลิตและคุณภาพของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 จะแบ่งแปลงทดลองออกเป็น 5 แปลงย่อย แต่ละแปลงมีขนาด กว้าง 16 เมตร ยาว 20 เมตร (1 แปลงย่อย เท่ากับ 1 ซ้ำ) เก็บ 5 ซ้ำ ด้วยอัตราปริมาณการให้น้ำ 3 ระดับ (Treatment) คือ 12 16 และ 20 ลูกบาศก์ เมตรต่อไร่ต่อครั้ง โดยใช้อ้างอิงการให้น้ำในการปลูก อ้อยที่ 16 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ต่อครั้ง [6] เป็นอัตรา ปริมาณน้ำควบคุม เนื่องจากยังไม่สามารถหาปริมาณน้ำ ที่น้อยที่สุดที่ใช้กับหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 มาอ้างอิงได้ เป็นการณำพาพร้อมทั้งนำเครื่องรับรู้สำหรับตรวจวัด ความชื้นในดิน (Calibrate โดยใช้การวัดเทียบกับ เครื่องวัดความชื้นยี่ห้อ JEDTO รุ่น ETP307) มาติดตั้ง ในแปลงทดลองเพื่อวัดค่าความชื้นในดิน นำผลที่ได้จาก การวัดค่าความชื้นในดินที่มีค่าต่ำกว่าค่าความชื้นที่ จุติวิฤต ซึ่งมีผลกระทบกับการเจริญเติบโตและปริมาณ

ผลผลิตของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 มาเป็นเครื่องมือใน การกำหนดจำนวนครั้งของการให้น้ำ

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

2.1.1 การเตรียมแปลงทดลองและการเตรียมดิน

เตรียมแปลงทดลองขนาด 1 ไร่ (100x16 เมตร) จำนวน 3 แปลง สถานที่ตั้งแปลงทดลองอยู่ที่ตำบล พรหมณี อำเภอมืองนครนายก นครนายก คุณลักษณะ ดินของพื้นที่ดังกล่าวเป็นดินร่วนปนทรายจัดอยู่ในกลุ่ม ชุดดินหินกอง ชุดดินมาบบอน และชุดดินท้ายาง ซึ่งเป็น ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ค่อนข้างต่ำ ระดับความลาดชัน อยู่ประมาณร้อยละ 5-12 ทั้งนี้ ได้นำดินไปวิเคราะห์ สมบัติต่างๆ โดยเก็บตัวอย่างดินตามวิธีของกรมพัฒนา ที่ดิน สุ่มเก็บตัวอย่างดินทั่วทั้ง 3 ไร่ จำนวน 15 จุด นำตัวอย่างดินที่ได้มาแบ่งเป็นสี่ส่วนแล้วเก็บดินมา 1 ส่วน เพื่อทำการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์สมบัติดิน ของแปลงทดลอง แสดงตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์สมบัติดินแปลงทดลอง

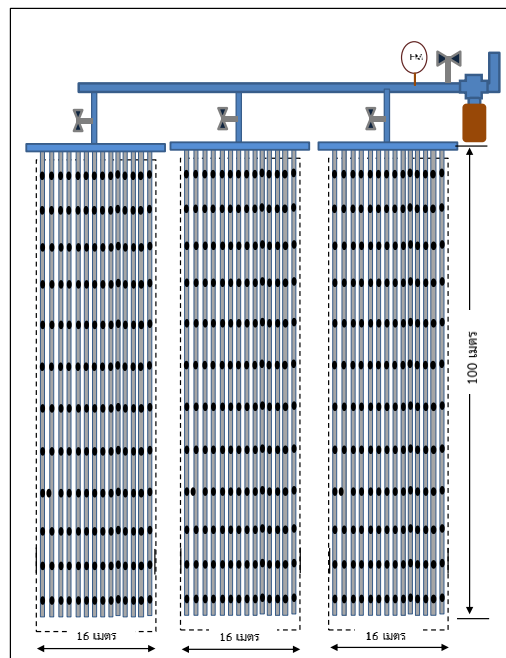
รายการ		หน่วย	ผล	แปลผล
ความเป็นกรด-ด่าง (pH, 1:1)		-	5.18	กรดจัด
ค่าการนำไฟฟ้า (EC, 1:1)		$\mu\text{S}/\text{cm}$	45.2	ไม่เค็ม
อินทรีย์วัตถุ (Walkley&Black)		ร้อยละ	0.93	ต่ำ
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Brayll)		ในล้านส่วน	3.63	ต่ำ
สกัดด้วย	โพแทสเซียม (K)	ในล้านส่วน	47.4	ต่ำ
1N NH_4OAc	แคลเซียม(Ca)	ในล้านส่วน	234	ต่ำมาก
pH 7.0	แมกนีเซียม(Mg)	ในล้านส่วน	23.1	ต่ำมาก
	เหล็ก (Fe)	ในล้านส่วน	96.4	สูงมาก
สกัดด้วย	แมงกานีส(Mn)	ในล้านส่วน	47.3	สูงมาก
DPTA	ทองแดง (Cu)	ในล้านส่วน	0.44	ต่ำ
	สังกะสี (Zn)	ในล้านส่วน	0.56	ต่ำ

ผลจากตารางที่ 1 พบว่า สมบัติของดินแปลงทดลองมีความเป็นกรดจัด ดินไม่เค็ม ไม่มีการสะสมของเกลือ อินทรีย์วัตถุต่ำ ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมต่ำมาก มีเศษหินและก้อนกรวดมาก มีความลาดชันของพื้นที่และพื้นที่ไม่สม่ำเสมอ อาจส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดปัญหาในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 จึงต้องทำการปรับสภาพและปรับระดับความลาดเอียงรวมทั้งความเป็นกรด-ด่างของพื้นที่ให้เหมาะสมต่อการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ก่อนทำการทดลอง ดังนั้นทำการปรับความลาดเอียงให้เป็นร้อยละ 5 และปรับค่าพีเอชเป็น 6.8 อินทรีย์วัตถุในดินให้มีปริมาณร้อยละ 1.5 เพื่อให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมกับการปลูกตามที่ระบุไว้ในคู่มือการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 [7] แล้วจึงนำเครื่องรับรู้ (เซนเซอร์วัดความชื้นแบบทองแดงความยาว 25 เซนติเมตร เป็นหน้าสัมผัสกับพื้นดิน และวงจรเซนเซอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนความชื้นเป็นสัญญาณอนาล็อก) สำหรับตรวจวัดความชื้นในดินมาวัดความชื้นเพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการให้น้ำที่ไม่มีผลกระทบกับการเจริญเติบโตและปริมาณผลผลิตของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 โดยผันแปรอัตราปริมาณน้ำที่ให้น้ำแปลงทดลอง 3 ระดับ คือ 12 16 และ 20 ลูกบาศก์เมตรต่อครั้งต่อไร่ การปรับสภาพแปลงทดลองเริ่มการเตรียมดินด้วยการไถตะไกรอินทรีย์วัตถุ (เกล็ดดิบ) ในอัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ สารปรับปรุงดิน (โดโลไมท์) ในอัตรา 500 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยอินทรีย์ในอัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ ขั้นตอนต่อมาคือทำการไถแปร ยกร่อง แล้วเดินระบบท่อน้ำหลักโดยใช้ท่อ PVC (ยี่ห้อท่อน้ำไทย ประเภทท่อน้ำดื่ม) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว เทปน้ำหยดที่มีระยะห่างรูน้ำหยด 60 เซนติเมตร (เทปน้ำหยด ยี่ห้อไฮโย ขนาด 16 มิลลิเมตร หนา 0.20 มิลลิเมตร) ติดตั้งกับท่อน้ำหลักให้แต่ละท่อห่างกัน 120 เซนติเมตร (รูปที่ 1) ตามระยะการปักท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 [7] โดยอัตราปริมาณน้ำจากระบบน้ำหยดนี้ จะมีอัตราการไหล เท่ากับ 4.68 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ติดตั้ง

ตัวกรอง (ยี่ห้อไฮโย แบบตะแกรง ขนาด 2 นิ้ว) และมิเตอร์ (มิเตอร์น้ำทองเหลือง 2 ชั้น ยี่ห้อ TAYO รุ่น TAY404-0982-56) วัดอัตราการไหลของน้ำแยกกันในแต่ละแปลง

2.1.2 การเตรียมท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์

นำหญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 อายุ 90 – 110 วัน [7] ที่จะใช้เป็นท่อนพันธุ์มาตัดยอดและใบออกให้มีความยาวของลำต้นจากโคนถึงยอดประมาณ 120 เซนติเมตร จากนั้นตัดท่อนพันธุ์ให้แต่ละท่อนติดข้อ 2 – 3 ข้อ (ความยาวประมาณ 20 – 30 เซนติเมตร) ท่อนพันธุ์ที่นำมาใช้ควรเป็นท่อนพันธุ์ที่ตัดมาแล้ว ไม่เกิน 4-5 วัน เพราะอาจส่งผลถึงเปอร์เซ็นต์การงอกที่ลดลงเนื่องจากจะทำให้จุดเจริญของรากและตาเสียไป



รูปที่ 1 แนวการวางเทปน้ำหยดในแปลงทดลอง

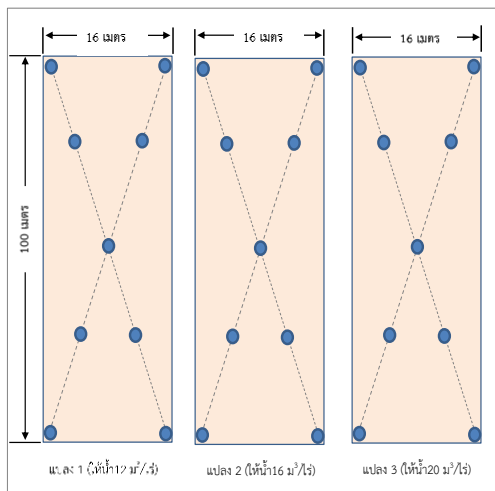
2.1.3 การปลูกและการดูแล

ปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 โดยวิธีการปักท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ให้มีระยะห่างระหว่างแถว 120 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างต้น 60

เซนติเมตร ดูแลแปลงหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ตามคู่มือการปลูกเนเปียร์ปากช่อง 1 [7]

2.1.4 การให้น้ำ

ติดตั้งเครื่องรับรู้ (ประกอบด้วยเซนเซอร์วัดความชื้น สายนำสัญญาณ ชุดแปลงสัญญาณ และคอมพิวเตอร์) จำนวน 9 จุดต่อไร่ (รูปที่ 2) เพื่อตรวจวัดความชื้นในแปลงปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 โดยปักส่วนขาของเครื่องรับรู้ให้ปลายสุดของขาซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้วัดความชื้นในดิน ลึกจากผิวดินประมาณ 20 เซนติเมตร (รูปที่ 3) [8], [9] ซึ่งเป็นตำแหน่งใกล้เคียงกับบริเวณรากของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่อยู่ลึกประมาณ 30-50 เซนติเมตร [4] เมื่อเครื่องรับรู้สำหรับตรวจวัดความชื้นในดินวัดความชื้นแล้วพบว่าความชื้นถึงจุดวิกฤต คือ ค่าความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 50 [10] ก็จะปล่อยน้ำให้แก่หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ในแปลงทดลอง 3 ระดับ คือ แปลง 1 ให้น้ำ 12 ลูกบาศก์เมตรต่อครั้งต่อไร่ แปลง 2 ให้น้ำ 16 ลูกบาศก์เมตรต่อครั้งต่อไร่ และแปลง 3 ให้น้ำ 20 ลูกบาศก์เมตรต่อครั้งต่อไร่ ซึ่งการให้น้ำในครั้งต่อไปเมื่อความชื้นในดินต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤต



รูปที่ 2 ตำแหน่งในการติดตั้งเครื่องรับรู้



รูปที่ 3 ภาพเครื่องรับรู้ที่ถูกปักลงในดินลึก 20 เซนติเมตร

2.1.5 การเก็บเกี่ยวผลผลิตหญ้าปากช่อง 1

ตัดหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ในแปลงทดลองเพื่อวัดผลผลิตครั้งแรกเมื่ออายุครบ 70 วันหลังการปลูก ตัดครั้งที่ 2 หลังจากตัดครั้งที่ 1 ผ่านไป 45 วัน (115 วัน) และตัดครั้งที่ 3 หลังจากตัดครั้งที่ 2 ผ่านไป 45 วัน (150 วัน) [11], [12] นำหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณผลผลิต (น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง) และคุณภาพ (ปริมาณโปรตีน) ใช้การตัดผลผลิตในแต่ละแปลง (ตามที่ระบุไว้ในระเบียบวิธีวิจัย) โดยกำหนดให้ 1 แปลงย่อยเท่ากับ 1 ไร่ ซึ่งน้ำหนักสดและวิเคราะห์น้ำหนักแห้งโดยอบด้วยตู้อบไฟฟ้าชนิดควบคุมอุณหภูมิได้ (Hot air oven รุ่น Binder ED53) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส [13] จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง และหาปริมาณโปรตีนโดยการหาปริมาณโปรตีนหยาบ [14] ตลอดจนบันทึกปริมาณน้ำที่ใช้ในแต่ละแปลงทดลอง

2.1.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way Analysis of Variance : ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ ในกรณีที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วย LSD ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ($P > 0.05$) โดยใช้โปรแกรม SPSS

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ศึกษาอิทธิพลของอัตราการให้น้ำต่อปริมาณผลผลิตของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ในแต่ละแปลงที่ได้ทำการเก็บปริมาณการให้น้ำที่ใช้ในการปลูกต่อปริมาณผลผลิตแบ่งเป็น 3 ระยะ คือ การตัดหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ครั้งที่ 1 เริ่มนับระยะเวลาดังตั้งแต่วันที่ปักท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 จนถึงวันที่ตัดหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่อายุ 70 วัน การตัดหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ครั้งที่ 2 คือ 45 วันหลังจากตัดครั้งที่ 1 และการตัดหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ครั้งที่ 3 คือ 45 วันหลังจากตัดครั้งที่ 2 ให้ผลการทดลองดังนี้

3.1 การตัดหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ครั้งที่ 1

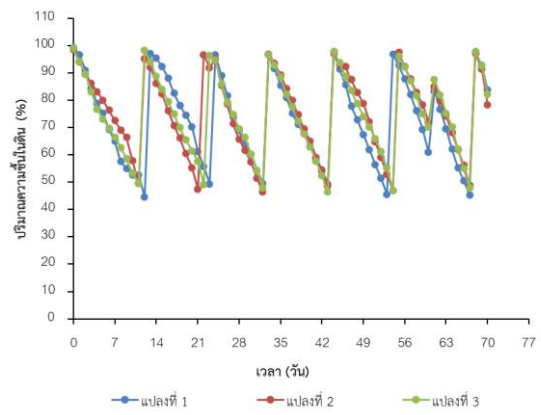
ผลการศึกษาปริมาณน้ำที่ใช้ในการปลูกต่อปริมาณผลผลิตของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ในแต่ละแปลงที่ได้ทำการตัดครั้งแรกเมื่ออายุครบ 70 วัน แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าปริมาณน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และโปรตีนในแต่ละแปลงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 2 ปริมาณผลผลิต (กิโลกรัมต่อไร่) และปริมาณโปรตีน (ร้อยละ) ของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 อายุ 70 วัน

ผลผลิต	อัตราการให้น้ำ 12	อัตราการให้น้ำ 16	อัตราการให้น้ำ 20	SEM
	ลูกบาศก์	ลูกบาศก์	ลูกบาศก์	
	เมตรต่อไร่	เมตรต่อไร่	เมตรต่อไร่	
น้ำหนักสด	4190±403	4019 ±435	3995±320	95.88
น้ำหนักแห้ง	779±109	746±86	734±64	21.73
โปรตีน	10.88±1.02	10.73±0.83	10.08±0.98	0.226

จากตารางที่ 2 แสดงผลให้ทราบว่าปริมาณผลผลิตหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ในแปลงที่ 1 มีการเจริญเติบโตดีให้ผลผลิตมากกว่าแปลงที่ 2 และ 3 แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับ

แปลงที่ 2 และ 3 ในขณะที่ปริมาณน้ำที่ใช้แต่ละแปลงมีปริมาณแตกต่างกัน โดยแปลงที่ 1 ใช้น้ำในปริมาณน้อยที่สุด แปลงถัดไปที่ใช้น้ำมากขึ้นคือแปลงที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ส่วนการลดลงของค่าความชื้นในดินเมื่อเวลาผ่านไปในแต่ละแปลงจะใช้เวลาใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4 โดยแปลงที่ 1 ปริมาณน้ำที่ใช้ทั้งหมด 72 ลูกบาศก์เมตร แปลงที่ 2 ปริมาณน้ำที่ใช้ทั้งหมด 96 ลูกบาศก์เมตร และแปลงที่ 3 ปริมาณน้ำที่ใช้ทั้งหมด 120 ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4 ปริมาณความชื้นของดินในแปลงทดลองที่ระยะการตัดครั้งที่ 1

ตารางที่ 3 ปริมาณผลผลิต (กิโลกรัมต่อไร่) และปริมาณโปรตีน (ร้อยละ) ของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ภายหลังการตัดครั้งแรก 45 วัน

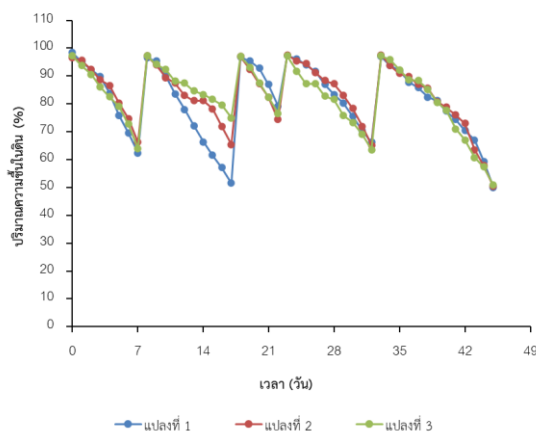
ผลผลิต	อัตราการให้น้ำ 12	อัตราการให้น้ำ 16	อัตราการให้น้ำ 20	SEM
	ลูกบาศก์	ลูกบาศก์เมตร	ลูกบาศก์	
	เมตรต่อไร่	ต่อไร่	เมตรต่อไร่	
น้ำหนักสด	7075±618	6924 ±511	6837±511	133.96
น้ำหนักแห้ง	1085±64	1037±123	1036±37	20.82
โปรตีน	12.91 ±1.54	12.88 ±1.33	12.86 ±1.19	0.325

3.2 การตัดหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ครั้งที่ 2

ผลของการตัดครั้งที่ 2 (ภายหลังการตัดครั้งแรก 45 วัน) แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ปริมาณน้ำหนัสด น้ำหนักแห้ง และโปรตีนในแต่ละแปลงนั้นไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ปริมาณน้ำหนัสด น้ำหนักแห้ง และโปรตีนของหญ้าแปลงที่ 1 มีค่ามากกว่าแปลงที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ในขณะที่ระยะเวลาในการให้น้ำในแต่ละแปลงจะมีระยะเวลาใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 5 แปลงที่ 1 ใช้น้ำน้อยที่สุด 36 ลูกบาศก์เมตร รองลงมาคือแปลงที่ 2 ใช้น้ำ 48 ลูกบาศก์เมตร และ แปลงที่ 3 ใช้น้ำ 60 ลูกบาศก์เมตร เนื่องจากในรอบการตัดครั้งที่ 2 นี้ การให้น้ำในแปลงหญ้า ได้รับผลกระทบจากฝนนอกฤดูที่ตกในวันที่ 21 (มีฝนตกกระทบบ้างที่ดำเนินการทดลอง) ภายหลังการตัดหญ้าครั้งที่ 1 ทำให้จำนวนครั้งของการให้น้ำลดลง ส่งผลต่อปริมาณน้ำที่รดแปลงหญ้าในการทดลอง

ในส่วนของการลดลงของความชื้นในดินเมื่อให้น้ำในปริมาณต่างกันใช้เวลาใกล้เคียงกัน คล้ายกันกับการทดลองในการตัดครั้งที่ 1



รูปที่ 5 ปริมาณความชื้นในดินในแปลงทดลองที่ระยะการตัดครั้งที่ 2

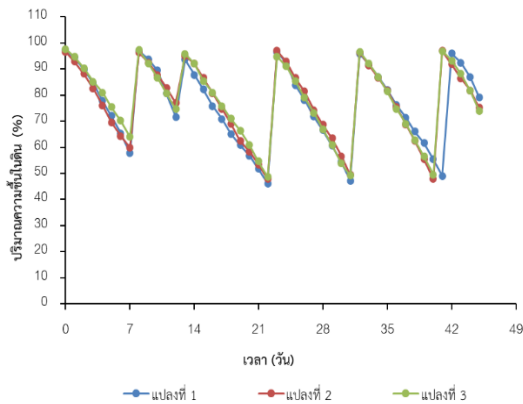
ตารางที่ 4 ปริมาณผลผลิต(กิโกรัมต่อไร่)และปริมาณโปรตีน(ร้อยละ)ของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ภายหลังการตัดครั้งที่ 3 (45 วันหลังจากตัดครั้งที่ 2)

ผลผลิต	อัตราการใช้	อัตราการใช้	อัตราการใช้	SEM
	น้ำ 12	น้ำ 16	น้ำ 20	
	ลูกบาศก์เมตรต่อไร่	ลูกบาศก์เมตรต่อไร่	ลูกบาศก์เมตรต่อไร่	
น้ำหนัสด	7590±691	7446±555	7456±788	164.66
น้ำหนักแห้ง	1138±162	1116±166	1112±108	35.49
โปรตีน	12.98±1.55	12.95 ±1.58	12.94 ±1.08	0.34

3.3 การตัดหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ครั้งที่ 3

ผลของการศึกษาปริมาณน้ำที่ใช้ในการปลูกต่อปริมาณผลผลิตของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่ได้จากการตัดครั้งที่ 3 (45 วันหลังจากตัดครั้งที่ 2) แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าปริมาณน้ำหนัสด น้ำหนักแห้ง และโปรตีนในแต่ละแปลงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ปริมาณน้ำหนัสด น้ำหนักแห้ง และโปรตีนของหญ้าแปลงที่ 1 มีแนวโน้มมากกว่าแปลงที่ 2 และ 3 ตามลำดับ สอดคล้องกับ V.M. Ngo and H. Wiktorsson [15] และ P. Kulasuwan et al. [12] ว่าความถี่ในการตัดที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณผลผลิตและโปรตีนของหญ้า เนเปียร์ปากช่อง 1 เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ J. Noola-aong et al. [16] และ S. A. Wadi et al. [17] ในขณะที่ปริมาณน้ำที่ให้ในแต่ละแปลงจะมีปริมาณแตกต่างกัน โดยแปลงที่ 1 ใช้น้ำในปริมาณน้อยที่สุด รองลงมาคือแปลงที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ในการให้น้ำจะเปิดน้ำลงสู่แปลงหญ้าเมื่อค่าความชื้นลดลงต่ำกว่าร้อยละ 50 แสดงดังรูปที่ 6 แปลงที่ 1 ใช้น้ำน้อยที่สุด 60 ลูกบาศก์เมตร รองลงมาคือแปลงที่ 2 ใช้น้ำ 80 ลูกบาศก์เมตร และ แปลงที่ 3 ใช้น้ำ 100 ลูกบาศก์เมตร ในส่วนของการลดลงของความชื้นในดินเมื่อให้น้ำในปริมาณต่างกันใช้เวลาใกล้เคียงกัน คล้ายกันกับการทดลองในระยะที่ 1 และระยะที่ 2



รูปที่ 6 ปริมาณความชื้นในดินในแปลงทดลองที่ระยะการตัดครั้งที่ 3

การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของทั้ง 3 แปลงทดลองในช่วงระยะของการตัดครั้งที่ 2 และ 3 มีลักษณะคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นของการตัดครั้งที่ 1 กล่าวคือ ปริมาณความชื้นในดินจะลดลงในเวลาใกล้เคียงกันแต่มีความแตกต่างกันที่แต่ละรอบของการให้น้ำในการตัดครั้งที่ 2 และ 3 จะใช้เวลาสั้นขึ้น กล่าวคือ ปริมาณความชื้นในดินลดลงต่ำกว่าร้อยละ 50 ภายในเวลา 7-9 วัน ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่หญ้านเปียร์ปากช่อง 1 มีอัตราการเจริญเติบโตที่รวดเร็วมากขึ้น สอดคล้องกับ B. Gonzalez et al.[18] และ P. D. Walton [19] การให้น้ำในรอบการตัดครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 จึงมีการใช้น้ำในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งนอกจากนี้ในระยะการตัดครั้งที่ 2 และ 3 มีการใส่ปุ๋ยและอินทรีย์วัตถุเพิ่มตามคู่มือการปลูกที่กำหนด ซึ่งจำเป็นต้องมีการให้น้ำเพิ่มในวันที่ใส่ปุ๋ยและอินทรีย์วัตถุ อีกทั้งในช่วงของระยะการตัดครั้งที่ 2 มีฝนตกลงมาทำให้การให้น้ำหญ้านเปียร์ปากช่อง 1 ในแปลงปลูกมีความถี่ลดลง หรือมีเวลาของรอบการให้น้ำยาวนานขึ้น

ดังนั้นอัตราการให้น้ำที่เหมาะสมต่อการเติบโตของหญ้านเปียร์ เป็นอัตราการให้น้ำต่อครั้งต่ำที่สุดคือ

12 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ต่อครั้ง เมื่อค่าความชื้นของดินลดลงถึงค่าความชื้นจุดที่วิกฤต เนื่องจากการให้น้ำในปริมาณดังกล่าวไม่ส่งผลผลิตทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพ เมื่อพิจารณาจากปริมาณผลผลิตและร้อยละของโปรตีนหยาก ที่อัตราการให้น้ำในปริมาณต่าง ๆ การให้น้ำ 12 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ต่อครั้ง ที่ระยะเวลาเฉลี่ย 7-9 วัน จึงเป็นการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพสูง เมื่อเปรียบเทียบกับ การให้น้ำในปริมาณมากๆ ซึ่งแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและสอดคล้องกับ J. Noola-aong et al. [16]

4. สรุป

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราการให้น้ำในแปลงหญ้าเนเปียร์กับปริมาณผลผลิตที่ได้ โดยประยุกต์ใช้เครื่องรับรูสำหรับตรวจวัดสภาพแวดล้อมของดินวัดความชื้นในแปลงทดลองโดยทำการวางแผนเซอร์วัดความชื้นที่ความลึก 20 เซนติเมตร จากผิวดินเป็นตัวกำหนดเวลาในการให้น้ำ พบว่า ปริมาณผลผลิตของหญ้านเปียร์ที่ได้จากแปลงปลูกที่มีการแปรอัตราการให้น้ำ 12 16 และ 20 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ต่อครั้ง ทำการให้น้ำในครั้งต่อไปเมื่อค่าความชื้นในดินมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 50 ในการตัดครั้งที่ 1 ปริมาณผลผลิตหญ้านเปียร์ที่ได้จากแปลงที่ 1 2 และ 3 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อัตราการให้น้ำในรอบการตัดครั้งที่ 1 ของแปลงที่ 1 2 และ 3 คือ 72 96 และ 120 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ ในการตัดครั้งที่ 2 ให้ผลไปในทิศทางเดียวกับการตัดครั้งที่ 1 แต่จะให้ปริมาณผลผลิตและร้อยละของโปรตีนหยากมากขึ้น คือ ปริมาณผลผลิตหญ้านเปียร์ที่ได้จากแปลงที่ 1 2 และ 3 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) อัตราการให้น้ำในรอบการตัดครั้งที่ 2 ของแปลงที่ 1 2 และ 3 คือ 36 48 และ 60 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ ตามลำดับ การตัดครั้งที่ 3 ให้ผลใกล้เคียงกับการตัดครั้งที่ 2 คือ ผลผลิตหญ้านเปียร์ที่ได้จากแปลงที่ 1 2 และ

3 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยอัตราการให้น้ำในรอบการตัดครั้งที่ 3 ของแปลงที่ 1 2 และ 3 คือ 60 80 และ 100 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ ตามลำดับ ในส่วนของการลดลงของความชื้นในดินเมื่อให้น้ำในปริมาณต่างกันใช้เวลาใกล้เคียงกัน

ผลการวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรให้สามารถเตรียมการในเรื่องปริมาณน้ำใช้ในการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ให้เพียงพอ สำหรับดินร่วนปนทราย โดยอัตราการให้น้ำที่ 12 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ต่อครั้ง สามารถให้ผลผลิตหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ได้สูงไม่แตกต่างจากอัตราการให้น้ำที่มากกว่านี้ เนื่องจากปัจจัยการเจริญเติบโตและการสร้างโปรตีนมาจากหลายปัจจัย ดังนั้นการเพิ่มปริมาณน้ำอย่างเดียวยังไม่สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตและการสร้างโปรตีนของพืชได้ โดยงานวิจัยนี้ยังมีข้อที่ควรปรับปรุงอยู่บ้าง เช่น การนำหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ไปปลูกที่พื้นที่อื่นๆ ที่มีสภาวะอากาศ และฤดูที่แตกต่างกันอาจให้ผลที่ต่างกันและควรทดสอบอัตราปริมาณการให้น้ำที่ต่ำกว่า 12 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ต่อครั้ง อาจจะให้ผลไม่แตกต่างจาก 12 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ต่อครั้ง ก็ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับสนับสนุนทุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน (Supercluster) มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Sowcharoensuk. (2020, Feb 7) Ri-drought .[Online]. Available: <https://www.krungsri.com/th/research/research-intelligence/RI-Drought>
- [2] Bureau of animal nutrition department. (n.d). Planting Napier Pak Chong 1 (5/2017). [Online]. Available: <http://secretary.dld.go.th/index.php/informationdld/article-dld/2625-1-5-2560>
- [3] Office of the secretary, Department of livestock development.(19 Oct 2020) Planting grass for livestock have a good income (1/2021) [Online] . Available: <https://secretary.dld.go.th/webnews/index.php/th/news-menu/dld-editorial-menu/6799-1-2564>
- [4] K. Kiyothong. (n.d). Handbook of Planting Napier Pak Chong 1 . [Online]. Available: http://extension.dld.go.th/th1/images/stories/cattle_buff_bord/napiagrass.pdf
- [5] S. Udchachon. (n.d). How to planning napier in high production and good quality.[Online]. Available: http://nutrition.dld.go.th/Nutrition_Knowledge/ARTICLE/72_1.HTML
- [6] N. Puengpa and A. Boontham. (n.d). Study on the Optimun Quantity of Irrigation Water Application for Different Stages of Sugarcane Growth. The 9th Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus Conference. [Online] . Available: http://researchconference.kps.ku.ac.th/article_9/pdf/p_plant12.pdf
- [7] Handbook of Planting Napier Pak Chong 1, 1st Ed., Nakhon Ratchasima : Mittrapap Printing, 2013.
- [8] S. Mongkolpitak and T. Suesut.(2015). Environment Monitoring And Control For Agriculture Via Smart Device. The 54th Kasetsart University Conference. [Online].

- Available: https://agkb.lib.ku.ac.th/ku/search_detail/download_digital_file/334101/91338
- [9] N. Đuzić and D. Đumić. , “Automatic Plant Watering System via Soil Moisture Sensing by means of Suitable Electronics and its Applications for Anthropological and Medical Purposes”, Collegium antropologicum, June 41(2): 169-172,2017.
- [10] N. Pourphan and O. Koaykitjareen, “Evaluation of Effectiveness on Border Irrigation for Napier Grass”, B.Eng. Project, Dept. Civil Eng, Kasetsart Univ. Kamphaengsaen Campus., Nakhon Pathom, 2013.
- [11] S. Wijitphan and P. Lowilai, “Effects of Cutting Interval on Yields and Nutritive Values of King Napier Grass (*Pennisetum purpureum* cv. King grass) under Irrigation Supply,” *KKU Research Journal*, vol. 16(3), pp. 215–224, Mar. 2011.
- [12] P. Kulasuwan, P. Thobunluepop, N. Tonmukayakul, P. Mani-in, A. Pongtip, J.Muangpan, J. Changkaewmanee and N. Vinijchevit, “Effect of Seasonal and Cutting Interval of Napier Paek-Chong 1 on Growth Biomass and Biogas Productivity”, *Agricultural Science Journal*, Vol.45 No.2 (Suppl.) May-August, pp. 721-724 ,2014.
- [13] S. Moonsrikaew, D. Chittathanaseth, N. Khajornchaikul, A. Phumivithcha and S. Krangwong, “The effect of manure fertilizer on yield and nutritive values of hybrid napier grass (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum Americanum*, Pak Chong1),” in *Proceeding of 1st* , Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industr, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, 2016, pp.1-7.
- [14] AOAC., “Official method of analysis”, (21th) Association of Official Analytical Chemistry, Washington D.C.: USA.,1984.
- [15] V.M. Ngo and H. Wiktorsson, “Forage yield, nutritive value, feed intake and digestibility of three grass species as affected by harvest frequency”, *Trop. Grasslands*. 37: 101-110, 2003.
- [16] J. Noola-aong, A. Poh-etae and I. Aleemama, “Effect of Fertilizer on Yield and Chemical Compositions of Napier Grass (*Pennisetumpurpureum*)”, *YRU Journal of Science and Technology* , Vol. 1 No. 2 ,pp 23-30, 2016.
- [17] S. A. Wadi, Y. Ishiiand, S. Idota, “Effect of cutting interval and cutting height on dry matter yield and overwintering ability at the established year in *Pennisetum* species”, *Plant Prod. Sci.* 7(1): 88-96, 2004.
- [18] B. Gonzalez, J. Boucaud, J. Salette, J.Langlois and M. Duyme, “Changes in stubble carbohydrate content during regrowth of defoliated perennial ryegrass (*Loliumperenns*) L.) on two nitrogen levels”, *Grass Forage Sci.* 44: 411, 1989.
- [19] P.D. Walton, “Production and management of cultivated forages”, *Preston Publishing Company Inc. Virginia. U.S.A.* pp. 335, 1984.

การเลือกที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าประเภทเครื่องดื่มโดยใช้ตัวแบบคณิตศาสตร์โดยพิจารณาต้นทุนโลจิสติกส์การขนส่ง

พรพิมล ชัยวุฒิศักดิ์*

ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 คลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

รับบทความ 24 มีนาคม 2565 แก้ไขบทความ 16 กุมภาพันธ์ 2566 ตอรับบทความ 1 มีนาคม 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเลือกทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าประเภทเครื่องดื่มที่มีต้นทุนรวมของการขนส่งสินค้าต่ำที่สุด โดยอาศัยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาอำเภอเมืองของทั้ง 76 จังหวัด ไม่รวมจังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งเป็นที่ตั้งของโรงงาน ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้แบ่งสถานการณ์ออกเป็น 2 สถานการณ์ ได้แก่ 1) เมื่อกำหนดให้มีศูนย์กระจายสินค้าได้เพียงหนึ่งแห่ง 2) เมื่อกำหนดให้มีศูนย์กระจายสินค้า 4 แห่งตามการจัดแบ่งพื้นที่เป็น 4 ภูมิภาค โดยกำหนดให้หนึ่งภูมิภาคมีศูนย์กระจายสินค้าหนึ่งแห่ง ผู้วิจัยใช้การประมวลผลด้วยโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้ สถานการณ์ที่ 1 มีต้นทุนการขนส่งรวม 786,107.75 บาท/เดือน และมีจุดคุ้มทุนเท่ากับ 6 ปี 9 เดือน 1 วัน โดยมีจังหวัดอยุธยาเป็นจังหวัดที่เหมาะสมที่สุดในการตั้งศูนย์กระจายสินค้า ซึ่งผลเฉลยที่ได้จากตัวแบบสอดคล้องกับความคิดเห็นของผู้บริหารของบริษัท สถานการณ์ที่ 2 มีต้นทุนการขนส่งรวม 401,499.61 บาท/เดือน และมีจุดคุ้มทุนเท่ากับ 8 ปี 2 เดือน 6 วัน โดยมีผลเฉลยการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าจำแนกตามภูมิภาคดังนี้ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จังหวัดอุตรดิตถ์ จังหวัดร้อยเอ็ด และจังหวัดพังงา สำหรับภาคกลาง ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และ ภาคใต้ ตามลำดับ

คำสำคัญ : ศูนย์กระจายสินค้า; ตัวแบบทางคณิตศาสตร์; ต้นทุนรวมของการขนส่ง; จุดคุ้มทุน; โปรแกรมซีเพล็กซ์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +660 2329 8400, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: pornpimol.ch@kmitl.ac.th

Location Selection of Beverage Distribution Center Using a Mathematical Modeling Considering Transportation Logistic Costs

Pornpimol Chaiwuttisak*

Department of Statistics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
1 Chalong Krung 1 Alley, Lat Krabang, Bangkok, 10520

Received 24 March 2022; Revised 16 February 2023; Accepted 1 March 2023

Abstract

This research aims to select the location of the beverage distribution center with the lowest total cost of transportation using a mathematical model by considering the Muang districts of all 76 provinces, excluding Chachoengsao Province, where the factory is located. In the present study, two scenarios were divided: 1) when only one distribution center was required; 2) when four distributions, according to four regions, were required. The results processed by IBM ILOG CPLEX Optimization Studio have shown that Scenario 1, the total transportation cost is 786,107.75 baht/month and the break-even point is 6 years 9 months 1 day. Ayutthaya is the optimal province to set up a distribution center. The solution obtained from the model is consistent with the opinions of the executives of the company, Scenario 2, the total transportation cost is 401,499.61 baht/month and the break-even point is 8 years 2 months 6 days. The results of the establishment of distribution centers classified by regions are as follows. Phra Nakhon Si Ayutthaya Province, Uttaradit Province, Roi Et Province and Phang Nga Province for the central, northern, northeastern, and southern regions respectively.

Keywords : Distribution Center; Mathematical Model; Total Transportation Costs; Break-Even Point; CPLEX Program

* Corresponding Author. Tel.: +660 2329 8400, E-mail Address: pornpimol.ch@kmitl.ac.th

1. บทนำ

ต้นทุนการขนส่งสินค้าเป็นองค์ประกอบใหญ่ที่สุดของโครงสร้างต้นทุนโลจิสติกส์คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 49.7 ของต้นทุนโลจิสติกส์รวม ในปี พ.ศ. 2562 และข้อมูลในปี พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2561 รายงานว่าสัดส่วนต้นทุนการขนส่งสินค้าสูงเกินครึ่งของต้นทุนโลจิสติกส์รวม สัดส่วนรองลงมาที่มีค่าใกล้เคียงกับต้นทุนการขนส่งสินค้าคือสัดส่วนต้นทุนการเก็บรักษาสินค้าคงคลัง และสุดท้ายคือต้นทุนการบริหารจัดการ [1] ดังนั้นจากสัดส่วนที่กล่าวมาในข้างต้นแสดงให้เห็นว่าควรให้ความสำคัญกับการวางแผนการขนส่งสินค้าเป็นอันดับแรก กล่าวคือ ถ้าหากผู้ประกอบการสามารถลดต้นทุนในการขนส่งสินค้าลงได้ จะทำให้สามารถลดต้นทุนโลจิสติกส์รวมได้เช่นกัน การสร้างโครงข่ายการขนส่งเป็นหนึ่งในวิธีการที่ช่วยลดต้นทุนในการขนส่งและเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่งด้วย ซึ่งประกอบไปด้วยหลายวิธีการ ทั้งนี้การสร้างศูนย์กระจายสินค้า (Distribution Center: DC) เป็นหนึ่งในวิธีการสร้างโครงข่ายการขนส่งเพื่อเป็นแนวทางบริหารจัดการการขนส่งสินค้าในอนาคต อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการขนส่งสินค้าอีกด้วย

การเลือกทำเลที่ตั้งโรงงานอุตสาหกรรม โกดังหรือคลังสินค้าย่อมมีบทบาทสำคัญในการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ที่มีผลต่อความสำเร็จขององค์การธุรกิจ หากเลือกทำเลที่ไม่เหมาะสมจะมีผลกระทบอื่น ๆ ตามมาได้แก่ ค่าใช้จ่ายและระยะเวลาที่ใช้ในการขนส่งมากหากอยู่ห่างไกลแหล่งวัตถุดิบ การเลือกที่ดินในเขตเมืองเป็นทำเลจะมีราคาสูงและค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ที่ตามมาก็จะสูงตามไปด้วย นอกจากนี้อาจขาดแคลนแรงงานที่มีคุณภาพ ขาดแคลนวัตถุดิบ รวมไปถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่เป็นอุปสรรคต่อองค์การธุรกิจ โดย A. Leenatham และ P. Khemavuk [2] ได้ศึกษาเรื่องการเลือกตำแหน่งที่ตั้งคลังสินค้าโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณีศึกษา โรงงานผลิตเบียร์ เพื่อหาศูนย์กระจายสินค้าของเบียร์ที่เหมาะสมในภาคใต้ โดย

พิจารณาที่ต้นทุนการขนส่งจากโรงงานผลิตไปยังลูกค้าต่ำที่สุด โดยใช้อำเภอเมืองของทั้ง 14 จังหวัดในเขตพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นตัวแปรตัดสินใจประมวลผลด้วย Excel Solver ผลวิจัยสรุปว่า ควรตั้งคลังสินค้าที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยมีค่าขนส่งสุทธิก่อนทำการวิจัย 241,687,361 บาท และค่าขนส่งสุทธิหลังการศึกษาวิจัย 167,489,011 บาท ค่าขนส่งลดลงคิดเป็นร้อยละ 30.70

W. Atthirawong และ S. Ponglangka [3] ศึกษาเรื่องการเลือกตำแหน่งที่ตั้งของคลังสินค้าและศูนย์กระจายสินค้า กรณีศึกษา บริษัท ไปรษณีย์ไทยดิสทริบิวชัน จำกัด มีวัตถุประสงค์เพื่อหาจังหวัดในประเทศไทยที่เหมาะสมสำหรับตั้งคลังสินค้าและศูนย์กระจายสินค้ากลุ่มยาและเวชภัณฑ์ไปยังลูกค้าปลายทางเพื่อให้ต้นทุนการขนส่งโดยรวมมีค่าต่ำที่สุด โดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม LINGO ผลการวิจัยพบว่ามีต้นทุนโดยรวมต่ำกว่าการดำเนินงานในปัจจุบัน เท่ากับ 1,343,170 บาท ต่อเดือน หรือลดลงร้อยละ 6.10 โดยตัวแบบที่เหมาะสมนั้นประกอบไปด้วยการตั้งคลังสินค้า 1 แห่งที่จังหวัดสมุทรปราการ และศูนย์กระจายสินค้าทั้งหมด 12 แห่งใน 12 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดลำพูน พิชณุโลก นครราชสีมา อุดรธานี สุราษฎร์ธานี สงขลา อยุธยา เพชรบูรณ์ มหาสารคาม สกลนคร และศรีสะเกษ เพื่อกระจายสินค้าไปยังลูกค้าในจังหวัดใกล้เคียง

S. Limpanawanich [4] ได้ศึกษาเรื่องการวิเคราะห์ที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าสำหรับเขตพื้นที่ภาคใต้ กรณีศึกษา บริษัทเอกชนแห่งหนึ่ง มีวัตถุประสงค์เพื่อหาทำเลที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าแห่งใหม่สำหรับรองรับความต้องการของลูกค้าที่คาดว่าจะเพิ่มขึ้น รวมถึงศึกษาด้านต้นทุนการจัดการและการขนส่งที่ต่ำที่สุดและระบุขอบเขตรับผิดชอบของศูนย์กระจายสินค้าแต่ละแห่งว่าควรรับผิดชอบจังหวัดใดบ้าง โดยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาศูนย์กระจาย

สินค้าที่ดีที่สุด และใช้ Excel Solver ในการประมวลผลข้อมูล จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ศูนย์กระจายสินค้าที่ได้รับเลือกมี 2 แห่ง ได้แก่ จังหวัดสงขลา (อำเภอหาดใหญ่) ซึ่งเป็นจังหวัดที่เป็นศูนย์กระจายสินค้าเดิม โดยต้องกระจายสินค้าไปทั้งหมด 9 จังหวัด ได้แก่ นครศรีธรรมราช ชุมพร กระบี่ พังงา ภูเก็ต ตรัง บัตตานีสตูล และ สงขลา และอีกหนึ่งแห่งคือ จังหวัด พัทลุง โดยต้องกระจายสินค้าไปทั้งหมด 3 จังหวัด ได้แก่ สุราษฎร์ธานี ระนอง และ พัทลุง โดยมีต้นทุนทั้งหมดแล้ว มีมูลค่ารวมเท่ากับ 1,486,235 บาท/เดือน อีกหนึ่งกรณีหากยังดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ โดยใช้ศูนย์กระจายสินค้าจังหวัดสงขลา (อำเภอหาดใหญ่) และก่อสร้างศูนย์กระจายสินค้าเพิ่มอีกหนึ่งแห่งในจังหวัดนี้จะมีต้นทุนรวมอยู่ที่ 1,509,173 บาท/เดือน ดังนั้นต้นทุนรวมของการตั้งศูนย์กระจายสินค้าที่จังหวัดสงขลา (อำเภอหาดใหญ่) และจังหวัดพัทลุง มีต้นทุนรวมที่ต่ำกว่าอยู่ 22,938 บาท/เดือน คิดเป็นร้อยละ 1.54

Meskarian et al. [5] ได้ทำการศึกษาเรื่องปัญหาการเลือกสถานที่ตั้งคลินิกสำหรับบริการด้านสุขภาพในมณฑลแฮมป์เชอร์ ประเทศอังกฤษ โดยทำการวิเคราะห์ทั้งความต้องการของผู้ป่วยในปัจจุบันและที่คาดการณ์ไว้ ซึ่งจะระบุจำนวนที่ตั้งคลินิกที่ต้องการและตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ที่เหมาะสม เพื่อลดระยะเวลาในการเดินทางของผู้ป่วยและเพิ่มโอกาสในการได้รับบริการสูงสุด โดยการตรวจสอบอัลกอริทึมอย่างง่าย และการวิเคราะห์เมตาฮิวริสติกส์ โดยแบ่งเป็น 2 สถานการณ์ คือ หาที่ตั้งคลินิกในพื้นที่ตั้งปัจจุบัน และพื้นที่ที่ใด ๆ ภายในมณฑลแฮมป์เชอร์ ซึ่งพิจารณาเวลาที่ใช้ในการเดินทางด้วยรถยนต์ส่วนบุคคลและระบบขนส่งสาธารณะ และ ผลการวิจัยพบว่าสถานที่ตั้งคลินิกสามารถลดลงจาก 28 เป็น 20 แห่ง โดยที่ 90% ของผู้ป่วยสามารถเดินทางโดยระบบขนส่งสาธารณะไปยังคลินิกภายใน 30 นาที และผู้ป่วยเดินทางโดยรถยนต์ส่วนบุคคลใช้เวลาไม่เกิน 15 นาที

ทั้งนี้บริษัทกรณีศึกษามีแนวคิดที่จะหาที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าโดยพิจารณาจากค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้า ซึ่งบริษัทกรณีศึกษาเป็นผู้ผลิตเครื่องดื่มหลายประเภทที่มีความเชี่ยวชาญในผลิตภัณฑ์ไวน์จากผลไม้ ด้วยการทำการผลิตผลิตภัณฑ์ไวน์ผลไม้ 60 ล้านลิตรทุกปี ปัจจุบันมีโรงงานจำนวนหนึ่งแห่งตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรมบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา เนื่องจากมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจทำให้ความต้องการในกลุ่มธุรกิจไวน์จากผลไม้เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งบริษัทได้มองหาแนวทางในการเพิ่มขีดความสามารถของการให้บริการที่ครอบคลุมและครบวงจรมากขึ้น ยกกระดับความสามารถด้านการจัดเก็บและการกระจายสินค้าให้กับลูกค้าได้อย่างทันเวลาและมีประสิทธิภาพ ซึ่งมุ่งเน้นกลุ่มลูกค้าการตลาดแบบดั้งเดิม (Traditional Trade) ได้แก่ ตัวแทนจำหน่ายในแต่ละจังหวัด โดยใช้บริการจากภายนอกองค์กร (Outsource) ในการขนส่งสินค้าจากโรงงานเต็มคันรถตรงไปให้ลูกค้าแต่ละราย (Full Truck Load: FTL)

อย่างไรก็ตามการเลือกทำเลที่ตั้งสถานที่สำหรับประกอบธุรกิจให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ผู้ประกอบการต้องคำนึงถึงยอดขายที่คาดว่าจะได้รับ ค่าใช้จ่ายในการขนส่ง พนักงาน รวมทั้งเวลา ลักษณะและสภาพของเส้นทาง การจราจร ตลอดจนความสัมพันธ์กับลูกค้า [6] โดยจะพิจารณาลักษณะที่ดีของแต่ละทำเลนำมาประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้ ซึ่งส่งผลทำให้ธุรกิจประสบความสำเร็จได้ รวมทั้งปัจจุบันได้มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีไมโครคอมพิวเตอร์มากขึ้น ทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลทำได้ง่าย สะดวก ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและประหยัดเวลา ทำให้การประมวลผลข้อมูลมีประสิทธิภาพมาก จึงมีผู้ผลิตโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติสำหรับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์มากขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปัญหาการเลือกตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าที่เหมาะสมที่มีต้นทุนรวมต่ำที่สุดโดยอาศัยข้อมูลของบริษัทกรณีศึกษาและพัฒนาตัวแบบทาง

คณิตศาสตร์และประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป IBM ILOG CPLEX [7] โดยบริษัทสามารถนำผลการศึกษาวិจัยไปใช้เป็นแนวทางประกอบการตัดสินใจในการเลือกตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้า หรือเป็นแนวทางในการปรับปรุง พัฒนาประสิทธิภาพในการดำเนินงานของบริษัทในอนาคต

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วย การเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ ข้อมูลลูกค้าของบริษัท ประวัติการสั่งซื้อสินค้า ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการสร้างศูนย์กระจายสินค้า ประกอบด้วยราคาที่ดิน ค่าก่อสร้าง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของศูนย์กระจายสินค้า ปริมาณความจุสูงสุด และค่าขนส่งโดยเฉลี่ยของรถขนส่งแต่ละประเภท การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์และประมวลผลด้วยโปรแกรม IBM ILOG CPLEX โดยผู้วิจัยได้แบ่งการประมวลผล ออกเป็น 2 กรณี ได้แก่

1) ข้อจำกัดของสมการวัตถุประสงค์มีการเปลี่ยนแปลง โดยพิจารณาจากข้อจำกัดจำนวนการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าแบ่งออกเป็น 2 ตัวแบบ ดังนี้

- ตัวแบบที่ 1 การประมวลผลด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เมื่อกำหนดให้มีศูนย์กระจายสินค้าได้เพียง 1 แห่ง

- ตัวแบบที่ 2 การประมวลผลด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เมื่อแบ่งเป็น 4 ภูมิภาค โดยกำหนดให้มีศูนย์กระจายสินค้าได้เพียง 1 แห่งในหนึ่งภูมิภาค (โดยที่ กำหนดให้ จันทบุรี ฉะเชิงเทรา ชลบุรี ตราด ปราจีนบุรี และระยอง รับสินค้าโดยตรงจากโรงงานในจังหวัด ฉะเชิงเทรา)

2) พารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง โดยพิจารณาจาก 4 พารามิเตอร์ได้แก่ 1) อุปสงค์โดยเฉลี่ยของลูกค้า 2) ค่าขนส่งโดยเฉลี่ยของรถแต่ละประเภทแยกตามจังหวัด

ลูกค้า 3) อัตราต้นทุนค่าขนส่ง และ 4) จำนวนลูกค้า โดยที่

พารามิเตอร์ที่ 1 แบ่งออกเป็น 4 สถานการณ์ ดังนี้

- สถานการณ์ที่ 1 ถ้าความต้องการสินค้าของลูกค้าเพิ่มขึ้น 10%

- สถานการณ์ที่ 2 ถ้าความต้องการสินค้าของลูกค้าเพิ่มขึ้น 15%

- สถานการณ์ที่ 3 ถ้าความต้องการสินค้าของลูกค้าลดลง 10%

- สถานการณ์ที่ 4 ถ้าความต้องการสินค้าของลูกค้าลดลง 15%

พารามิเตอร์ที่ 2 แบ่งออกเป็น 4 สถานการณ์ ดังนี้

- สถานการณ์ที่ 5 ถ้าค่าขนส่งสินค้าโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 5%

- สถานการณ์ที่ 6 ถ้าค่าขนส่งสินค้าโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 10%

- สถานการณ์ที่ 7 ถ้าค่าขนส่งสินค้าโดยเฉลี่ยลดลง 5%

- สถานการณ์ที่ 8 ถ้าค่าขนส่งสินค้าโดยเฉลี่ยลดลง 10%

พารามิเตอร์ที่ 3 คืออัตราต้นทุนค่าขนส่ง จะคำนวณการเพิ่มขึ้นของ อัตราค่าขนส่งจากโรงงานไปยังศูนย์กระจายสินค้า อัตราค่าขนส่งจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้า และ อัตราค่าขนส่งจากโรงงานไปยังลูกค้า โดยการเพิ่มขึ้นตั้งแต่ช่วง 10% ถึง 100% เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์

พารามิเตอร์ที่ 4 คือการเพิ่มจำนวนโหนดลูกค้าจาก 37 จังหวัดเป็น 77 จังหวัด

2.1.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

บริษัทกรณีศึกษาใช้การตลาดแบบดั้งเดิม กล่าวคือไม่มีอินเทอร์เน็ตเข้ามาช่วยในการประชาสัมพันธ์ หรือเผยแพร่ข้อมูลต่าง ๆ และเป็นการ

ใช้ช่องทางออฟไลน์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในขณะนั้นเป็นการสื่อสารไปยังลูกค้า มีเพียงการบอกต่อกันของลูกค้าหรือตัวแทนจำหน่ายที่กระจายตามจังหวัดต่าง ๆ ในประเทศไทย ดังนั้นกลุ่มลูกค้านั้นจึงเป็นกลุ่มเดิม ข้อมูลที่นำมาใช้ในตัวแทนทางคณิตศาสตร์จะเป็นข้อมูลอุปสงค์เฉลี่ยของลูกค้าตั้งแต่เดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2562 ถึง เดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2562 และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Variability Coefficient: VC) เพื่อใช้ในการตรวจสอบความแปรปรวนของระดับความต้องการสินค้าของลูกค้า [8] ดังสมการที่ 1 – 3

$$\text{Variability Coefficient(VC)} = \frac{\text{Est.VarD}}{(\bar{d})^2} \quad (1)$$

$$\bar{d} = \frac{1}{n} (\sum d_t) \quad (2)$$

$$\text{Est.VarD} = \frac{1}{n} (\sum d_t^2) - (\bar{d})^2 \quad (3)$$

โดยที่

d_t	แทน	ปริมาณอุปสงค์ของลูกค้าในแต่ละช่วงเวลา t
$\bar{d}$	แทน	ปริมาณอุปสงค์เฉลี่ยของลูกค้า
n	แทน	ช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษา
Est.VarD	แทน	ความแปรปรวนของอุปสงค์ของลูกค้า

R. Peterson และ E. Silver [8] ได้กล่าวไว้ว่า ถ้าค่า $VC \leq 0.25$ แสดงว่า ความต้องการสินค้ามีความแน่นอนและคงที่ โดยผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนสำหรับค่าอุปสงค์ในจังหวัดต่าง ๆ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.25 ทั้งหมด นั่นคือ ทุกจังหวัดมีความต้องการของสินค้าในปริมาณที่เท่า ๆ กันทุกเดือน ดังนั้นค่าอุปสงค์สินค้าเฉลี่ยของลูกค้าสามารถนำไปใช้ในตัวแทนทางคณิตศาสตร์ได้

ผู้วิจัยทำการพิจารณาดำเนินที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าทั้งสิ้น 76 จังหวัด ยกเว้นจังหวัดฉะเชิงเทราที่เป็นที่ตั้งของโรงงาน โดยจะพิจารณาจุดศูนย์กลางที่ตั้งของจังหวัดทุกจังหวัด จากรูปที่ 3 ผู้วิจัยได้แบ่งภูมิภาคประเทศไทยตามการแบ่งภาคของกรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย [9] ออกเป็น 4 ภูมิภาค ได้แก่ ภาคกลาง (สีเขียว) ภาคตะวันออกเฉิยงเหนือ (สีน้ำเงิน) ภาคเหนือ (สีแดง) และ ภาคใต้ (สีเหลือง) และจังหวัดในแต่ละภูมิภาค

บริษัทกรณีศึกษามีโรงงานอยู่ 1 แห่ง ตั้งอยู่ที่นิคมอุตสาหกรรมบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา มีหน้าที่รับผิดชอบในการกระจายสินค้าไปยังลูกค้าที่กระจายอยู่จังหวัดต่าง ๆ ในประเทศไทย โดยการจ้างบริษัทภายนอก (Outsource) ในการขนส่งสินค้าในรูปแบบเต็มคันรถ (Full Truck Load: FTL) ยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งสินค้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ รถบรรทุก 4 ล้อสามารถบรรทุกได้ 19,008 ลบ.ซม. รถบรรทุก 6 ล้อสามารถบรรทุกได้ 17,107,200 ลบ.ซม. และรถบรรทุก 10 ล้อสามารถบรรทุกได้ 39,916,800 ลบ.ซม. โดยกำหนดประเภทรถที่ใช้ในการขนส่งแต่ละจังหวัด ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการขนส่งเป็นค่าที่บริษัทขนส่งเสนอมาให้กับบริษัทกรณีศึกษา ผู้วิจัยได้นำมาเฉลี่ยหาค่าขนส่งของรถแต่ละประเภท แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าขนส่งโดยเฉลี่ยของรถแต่ละประเภท (หน่วย: บาท/กิโลเมตร)

ประเภทรถ	ค่าขนส่งโดยเฉลี่ย (บาท/กิโลเมตร)
รถบรรทุก 4 ล้อ (4W)	18.96
รถบรรทุก 6 ล้อ (6W)	33.74
รถบรรทุก 10 ล้อ (10W)	49.79



รูปที่ 1 ตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้า (ตำแหน่งสี่เหลี่ยม) และตำแหน่งโรงงาน (ตำแหน่งสีแดง)

บริษัทกรณีศึกษามีความต้องการที่จะสร้างศูนย์กระจายสินค้าขนาด 5,000 ตารางเมตร โดยข้อมูลจากบัญชีราคามาตรฐานต่อหน่วย โรงเรือนสิ่งปลูกสร้างระบุว่าราคาก่อสร้างโกดังเก็บของที่มีพื้นที่ตั้งแต่ 2,001 ตารางเมตรขึ้นไปมีราคา 8,000 บาท/ตารางเมตร ราคาดังกล่าวรวมทั้งค่าก่อสร้างและตกแต่ง ค่าวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ และคุณภาพฝีมือแรงงาน [10] ส่วนราคาที่ดินแบบรายจังหวัดใช้ราคาที่ดินของศูนย์กลางของจังหวัดเป็นที่ยกศูนย์กระจายสินค้า [11] ซึ่งมูลค่าที่ดินและค่าก่อสร้างแตกต่างกันในแต่ละจังหวัด

สำหรับค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของศูนย์กระจายสินค้าแต่ละแห่งให้เป็นค่าคงที่ที่เท่ากัน รายละเอียดแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าใช้จ่ายรายเดือนในการดำเนินการของศูนย์กระจายสินค้า

รายละเอียด	จำนวน	ค่าใช้จ่ายต่อหน่วย	ค่าใช้จ่ายรวมต่อเดือน
โอเพอเรเตอร์	4 ตำแหน่ง	500 บาท/วัน/คน	60,000
รถโฟล์คลิฟท์	4 คัน	20,000 บาท/เดือน/คัน	80,000
ค่าสาธารณูปโภค	-	40,000 บาท/เดือน	40,000
รวม			180,000

2.1.2 การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์

ตัวแบบการเลือกตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าด้วยต้นทุนการขนส่งที่ต่ำที่สุด

เซต (Set)

I แทน ศูนย์กระจายสินค้า

$$; I = \{i | i = 1, 2, 3, \dots, 76\}$$

J แทน ลูกค้าแยกตามรายจังหวัด

$$; J = \{j | j = 1, 2, 3, \dots, 37\} \text{ และ}$$

$$J = \{j | j = 1, 2, 3, \dots, 77\} \text{ กรณีที่มีการ}$$

เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ 4 กล่าวคือ

จำนวนลูกค้าเพิ่มจาก 37 เป็น 77 จังหวัด

พารามิเตอร์ (Parameter)

D_{0i} แทน ระยะทางจากโรงงานไปยังศูนย์กระจายสินค้า i

D_{0j} แทน ระยะทางจากโรงงานไปยังลูกค้า j

D_{ij} แทน ระยะทางจากศูนย์กระจายสินค้า i ไปยังลูกค้า j

S_i	แทน ค่าขนส่งสินค้าจากโรงงานไปยังศูนย์กระจายสินค้า i (หน่วย: บาท/กิโลเมตร)
T_j	แทน ค่าขนส่งสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้า j (หน่วย: บาท/กิโลเมตร)
U_j	แทน ค่าขนส่งสินค้าจากโรงงานไปยังลูกค้า j (หน่วย: บาท/กิโลเมตร)
Q_j	แทน ปริมาณอุปสงค์สินค้าของลูกค้าแต่ละจังหวัด j
W_j	แทน ปริมาณความจุสูงสุดที่รถขนส่งสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้า j จะสามารถรับได้
MaxCapacity	แทน ปริมาณความจุสินค้าสูงสุดของศูนย์กระจายสินค้า

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

$X_i \in \{0,1\}; i \in I$ โดย $X_i = 1$ ถ้าเลือกตั้งศูนย์กระจายสินค้าที่ตำแหน่ง i มิฉะนั้น $X_i = 0$

$Y_{0j} \in \{0,1\}; j \in J$ โดย $Y_{0j} = 1$ ถ้าโรงงานส่งสินค้าไปยังลูกค้า j มิฉะนั้น $Y_{0j} = 0$

$Y_{ij} \in \{0,1\}; i \in I, j \in J$ โดย $Y_{ij} = 1$ ถ้าศูนย์กระจายสินค้าที่ตำแหน่ง i ทำการส่งสินค้าไปยังลูกค้าที่ตำแหน่ง j มิฉะนั้น $Y_{ij} = 0$

$F_j = \left\lfloor \frac{Q_j}{w_j} \right\rfloor; j \in J$ แทน จำนวนรอบในการขนส่งสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้า i ไปยังลูกค้า j

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{76} S_i D_{0i} X_i + \sum_{i=1}^{76} \sum_{j=1}^{77} T_j D_{ij} F_j Y_{ij} + \sum_{j=1}^{77} U_j D_{0j} Y_{0j} \quad (4)$$

ภายใต้ข้อจำกัด

$$\sum_{i=1}^{76} X_i \geq 1 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{76} Y_{ij} + \sum Y_{0j} = 1; \forall j \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{76} (Y_{0j} + Y_{ij}) F_j \geq \sum_{j=1}^{76} \frac{Q_j}{w_j}; \forall j \quad (7)$$

$$Y_{ij} \leq X_i; \forall i, \forall j \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{77} Q_j Y_{ij} \leq \text{MaxCapacity}; \forall i \quad (9)$$

$$X_i \in \{0,1\}; \forall i \quad (10)$$

$$Y_{0j} \in \{0,1\}; \forall j \quad (11)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\}; \forall i, \forall j \quad (12)$$

$$F_j = \left\lfloor \frac{Q_j}{w_j} \right\rfloor; \forall j \quad (13)$$

คำอธิบาย

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (4) เป็นการหาตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าที่ทำให้ต้นทุนการขนส่งสินค้าโดยรวมมีค่าต่ำสุด โดยพจน์ที่ 1 แทนต้นทุนการขนส่งสินค้าจากโรงงานไปยังศูนย์กระจายสินค้า พจน์ที่ 2 แทนต้นทุนการขนส่งสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้า พจน์ที่ 3 แทนค่าขนส่งสินค้าจากโรงงานไปยังลูกค้า อสมการข้อจำกัด (5) เป็นการยืนยันว่าศูนย์กระจายสินค้าจะต้องเปิดอย่างน้อยหนึ่งแห่ง สมการข้อจำกัด (6) เป็นการยืนยันว่าลูกค้า j ทั้งหมดจะได้รับสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้า i หรือโรงงานเพียงอย่างเดียวหนึ่ง อสมการข้อจำกัด (7) เป็นการคำนวณหาจำนวนเที่ยวรถขนส่งที่วิ่งจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้า j อสมการข้อจำกัด (8) เป็นการยืนยันว่าลูกค้า j ได้รับสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้า i ที่เปิดให้บริการ อสมการข้อจำกัด (9) เป็นการยืนยันว่าลูกค้า j ทั้งหมดที่ได้รับสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้า i นั้นมีปริมาณความต้องการสินค้ารวมไม่เกิน ปริมาณความจุของศูนย์กระจายสินค้าสมการข้อจำกัด สมการข้อจำกัด (10) - (12) เป็นข้อจำกัดเชิงตัวเลขของตัวแปรตัดสินใจ สมการข้อจำกัด (13) เป็นการกำหนดจำนวนรอบในการขนส่งสินค้าไปยังลูกค้าในจังหวัดที่ j

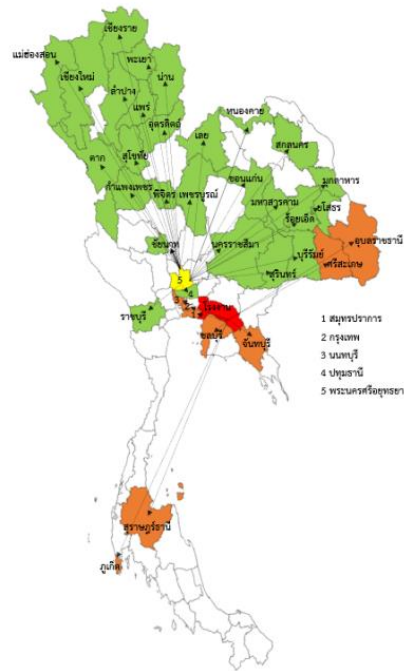
ข้อกำหนดเบื้องต้นของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ มีดังนี้

- 1) ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ หาตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าที่ทำให้ต้นทุนการขนส่งสินค้าโดยรวมมีค่าต่ำสุด โดยที่ไม่ได้รวมค่าก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ
- 2) ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ใช้ข้อมูลลูกค้าในปี พ.ศ. 2562 เป็นที่อยู่จังหวัดของลูกค้า ซึ่งมีอยู่ 37 จังหวัด
- 3) ข้อมูลที่ใช้ประมวลผลในตัวแบบ ผู้วิจัยได้กำหนดจุดที่ตั้งในอำเภอเมืองของแต่ละจังหวัดเป็นหลัก
- 4) ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นส่วนหนึ่งดัดแปลงมาจากปัญหาครอบคลุมความต้องการของลูกค้าทุกคนด้วยต้นทุนน้อยที่สุด (Set Covering Problem)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เมื่อกำหนดให้มีศูนย์กระจายสินค้าได้เพียง 1 แห่ง

จากการประมวลผลตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับพิจารณาเลือกที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าที่มีต้นทุนการขนส่งต่ำสุด เมื่อกำหนดให้ทางเลือกที่เป็นไปได้เพียง 1 แห่งเท่านั้น โดยอาศัยโปรแกรม IBM ILOG CPLEX ในการระบุจังหวัดที่เหมาะสมในการสร้างศูนย์กระจายสินค้าของบริษัทกรณีศึกษาที่ทำให้ค่าขนส่งต่ำที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าจังหวัดที่เหมาะสมสำหรับตั้งศูนย์กระจายสินค้าคือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา แสดงดังรูปที่ 2 โดยผลรวมของต้นทุนการขนส่งสินค้ารวมมีค่าเท่ากับ 786,107.75 บาทต่อเดือน ค่าดำเนินงานภายในศูนย์กระจายสินค้าเท่ากับ 180,000 บาทต่อเดือน และต้นทุนการก่อสร้างศูนย์กระจายสินค้าเท่ากับ 115,000,000 บาท



รูปที่ 2 ตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าจากการประมวลผลด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เมื่อกำหนดให้มีศูนย์กระจายสินค้าได้เพียง 1 แห่ง

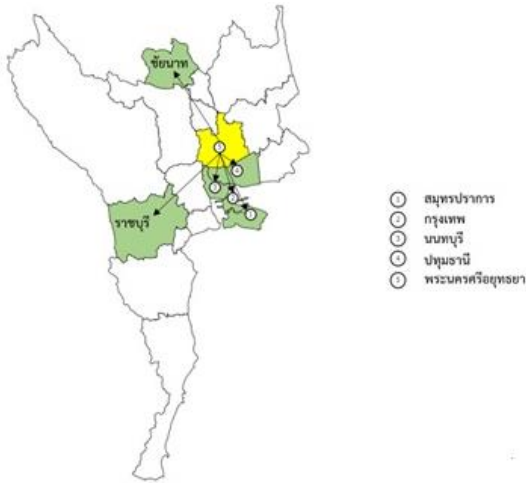
ในรูปที่ 2 พื้นที่สีเหลืองคือจังหวัดที่มีศูนย์กระจายสินค้า พื้นที่สีเขียวคือจังหวัดลูกค้าที่ได้รับสินค้าโดยขนส่งจากศูนย์กระจายสินค้า พื้นที่สีแดงคือจังหวัดที่ตั้งโรงงาน และพื้นที่สีส้มคือจังหวัดที่ได้รับสินค้าโดยขนส่งจากโรงงานโดยตรง ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายโดยรวมในการขนส่งสินค้า เมื่อกำหนดให้จำนวนของศูนย์กระจายสินค้าเพิ่มขึ้นด้วยโปรแกรม CPLEX แสดงดังตารางที่ 3 โดยที่ค่าในตารางแสดงถึง ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการขนส่งของศูนย์กระจายสินค้านั้นหน่วยเป็น บาท/เดือน หากค่าในตารางคือ 0.00 จะหมายถึงศูนย์กระจายสินค้าแห่งนั้นส่งสินค้าเฉพาะในจังหวัดตนเองเท่านั้น จะเห็นว่า ค่าใช้จ่ายในการขนส่งลดลงเมื่อจำนวนศูนย์กระจายสินค้าเพิ่มมากขึ้น และ จังหวัดที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าที่เหมาะสมจะเปลี่ยนแปลงตามจำนวนศูนย์กระจายสินค้า

ตารางที่ 3 ค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้าเมื่อกำหนดจำนวนศูนย์กระจายสินค้า (DC) เท่ากับ 1 - 8

จังหวัดที่ตั้ง DC	#DC = 1	#DC = 2	#DC = 3	#DC = 4	#DC = 5	#DC = 6	#DC = 7	#DC = 8
พระนครศรีอยุธยา	539,705.79	-	-	-	8,304.48	8,304.48	8,304.48	0.00
อุดรดิต์	-	179,472.32	115,409.70	115,409.70	115,409.70	57,666.94	32,668.65	32,668.65
นนทบุรี	-	225,582.79	190,164.83	48,811.02	13,374.78	13,374.78	13,374.78	13,374.78
ร้อยเอ็ด	-	-	59,842.36	59,842.36	59,842.36	59,842.36	59,842.36	-
พังงา	-	-	-	27,135.55	27,135.55	27,135.55	27,135.55	27,135.55
พะเยา	-	-	-	-	-	27,592.64	27,592.64	27,592.64
พิจิตร	-	-	-	-	-	-	8,038.76	8,038.76
กาฬสินธุ์	-	-	-	-	-	-	-	22,948.20
สุรินทร์	-	-	-	-	-	-	-	23,872.00
จันทบุรี	-	-	-	-	-	-	-	-
สมุทรปราการ	-	-	-	-	-	-	-	-
ยโสธร	-	-	-	-	-	-	-	-
เลย	-	-	-	-	-	-	-	-
กรุงเทพฯ	-	-	-	-	-	-	-	-
ชลบุรี	-	-	-	-	-	-	-	-
รวม	539,705.79	405,055.11	365,416.89	251,198.63	224,066.87	193,916.75	176,957.22	155,630.58

3.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เมื่อแบ่งเป็น 4 ภูมิภาค โดยกำหนดให้มีศูนย์กระจายสินค้าได้เพียง 1 แห่งในหนึ่งภูมิภาค

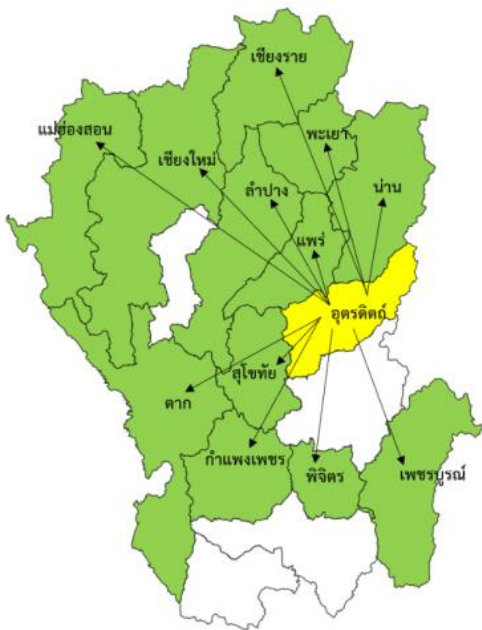
1) ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลของภาคกลาง
ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าจังหวัดที่เหมาะสมสำหรับตั้งศูนย์กระจายสินค้าคือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา แสดงดังรูปที่ 3 โดยผลรวมของต้นทุนการขนส่งสินค้ารวมมีค่าเท่ากับ 130,057.55 บาทต่อเดือน และค่าขนส่งจากบริษัทไปยังลูกค้า มีค่าเท่ากับ 12,618.16 บาทต่อเดือน ค่าดำเนินงานภายในศูนย์กระจายสินค้าเท่ากับ 180,000 บาทต่อเดือน และต้นทุนการก่อสร้างศูนย์กระจายสินค้าเท่ากับ 115,000,000 บาท โดยตารางที่ 6 แสดงการกระจายสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้าในจังหวัดต่าง ๆ



รูปที่ 3 ตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าภาคกลาง (พื้นที่สีเหลือง) และตำแหน่งลูกค้า (พื้นที่สีเขียว)

2) ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลของภาคเหนือ

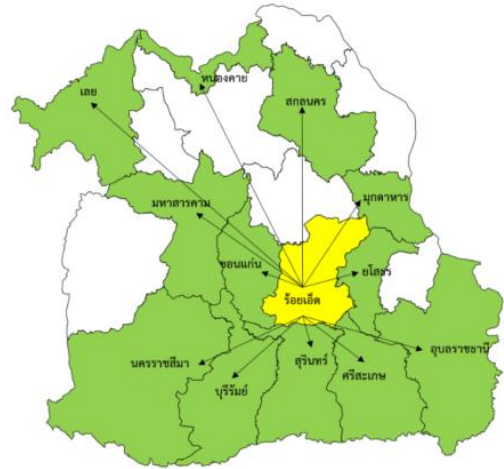
ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าจังหวัดที่เหมาะสมสำหรับตั้งศูนย์กระจายสินค้าคือ จังหวัดอุดรธานี แสดงดังรูปที่ 4 โดยผลรวมของต้นทุนการขนส่งสินค้ารวมมีค่าเท่ากับ 121,565.71 บาทต่อเดือน ค่าดำเนินงานภายในศูนย์กระจายสินค้าเท่ากับ 180,000 บาทต่อเดือน และต้นทุนการก่อสร้างศูนย์กระจายสินค้าเท่ากับ 115,000,000 บาท



รูปที่ 4 ตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าภาคเหนือ (พื้นที่สีเหลือง) และตำแหน่งลูกค้า (พื้นที่สีเขียว)

1) ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าจังหวัดที่เหมาะสมสำหรับตั้งศูนย์กระจายสินค้าคือ จังหวัดร้อยเอ็ด แสดงดังรูปที่ 5 โดยผลรวมของต้นทุนการขนส่งสินค้ารวมมีค่าเท่ากับ 94,661.63 บาทต่อเดือน ค่าดำเนินงานภายในศูนย์กระจายสินค้าเท่ากับ 180,000 บาทต่อเดือน และต้นทุนการก่อสร้างศูนย์กระจายสินค้าเท่ากับ 140,000,000 บาท



รูปที่ 5 ตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (พื้นที่สีเหลือง) และ ตำแหน่งลูกค้า (พื้นที่สีเขียว)

2) ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลของภาคใต้

ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าจังหวัดที่เหมาะสมสำหรับตั้งศูนย์กระจายสินค้าคือ จังหวัดพังงา แสดงดังรูปที่ 6 โดยผลรวมของต้นทุนการขนส่งสินค้ารวมมีค่าเท่ากับ 42,625.87 บาทต่อเดือน ค่าดำเนินงานภายในศูนย์กระจายสินค้าเท่ากับ 180,000 บาทต่อเดือน และต้นทุนการก่อสร้างศูนย์กระจายสินค้าเท่ากับ 102,500,000 บาท



รูปที่ 6 ตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าภาคใต้ (พื้นที่สีเหลือง) และตำแหน่งลูกค้า (พื้นที่สีเขียว)

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์กำหนดให้มีจำนวนศูนย์กระจายสินค้าเท่ากับ 1 แห่ง เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการขนส่งในตัวแบบทางคณิตศาสตร์

ค่าขนส่งจากโรงงานไปยังศูนย์กระจายสินค้า	ค่าขนส่งจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้า	ค่าขนส่งจากโรงงานไปยังลูกค้า	ที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้า
เพิ่มขึ้น [10% - 100%]	-	-	พระนครศรีอยุธยา
-	เพิ่มขึ้น [20% - 100%]	-	นนทบุรี
-	-	เพิ่มขึ้น [10% - 100%]	พระนครศรีอยุธยา
เพิ่มขึ้น [10% - 100%]	เพิ่มขึ้น [20% - 100%]	-	นนทบุรี
เพิ่มขึ้น [10% - 100%]	-	เพิ่มขึ้น [10% - 100%]	พระนครศรีอยุธยา
-	เพิ่มขึ้น [10% - 100%]	เพิ่มขึ้น [10% - 100%]	พระนครศรีอยุธยา
เพิ่มขึ้น [10% - 100%]	เพิ่มขึ้น 70%	เพิ่มขึ้น [10% - 40%]	นนทบุรี
เพิ่มขึ้น [10% - 100%]	เพิ่มขึ้น 80%	เพิ่มขึ้น [10% - 50%]	นนทบุรี
เพิ่มขึ้น [10% - 100%]	เพิ่มขึ้น [90% - 100%]	เพิ่มขึ้น [10% - 60%]	นนทบุรี

3.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) เมื่อพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องมีการเปลี่ยนแปลง

เมื่อปริมาณความต้องการสินค้าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -15% ถึง 15% หรือเมื่อค่าขนส่งเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง - 10% ถึง 10% ผลลัพธ์ที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ นอกจากนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์ผลเพิ่มเติม พบว่าเมื่ออัตราค่าใช้จ่ายในการขนส่งจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้าเปลี่ยนแปลงในช่วงเพิ่มขึ้น 20% ถึง 100% จะทำให้ที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าเปลี่ยนจากจังหวัดอยุธยาเป็นจังหวัดนนทบุรี สามารถดูรายละเอียดผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 4

ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมาณผลตัวแบบทางคณิตศาสตร์เมื่อแบ่งภูมิภาคออกเป็น 4 ภูมิภาคโดยที่ในแต่ละภูมิภาคมีจำนวนศูนย์กระจายสินค้าเพียง 1 แห่ง ผลลัพธ์โดยรวมคือ เมื่อความต้องการสินค้าเปลี่ยนแปลงในช่วง ลดลง 15% ถึง เพิ่มขึ้น 15% และค่าขนส่งเปลี่ยนแปลงในช่วง ลดลง 10% ถึง เพิ่มขึ้น 10% ผลลัพธ์ที่ได้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ

เมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนลูกค้าเป็น 77 จังหวัดผลลัพธ์ที่ได้คือ อ่างทอง ถูกเลือกเป็นศูนย์กระจายสินค้าแทนจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

3.4 การเปรียบเทียบต้นทุนการขนส่งสินค้าก่อนจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าและหลังจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้า

ต้นทุนการขนส่งสินค้าก่อนจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้ามีค่าเท่ากับ 15,356,952.84 บาทต่อปี นำต้นทุนการขนส่งที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ คำนวณร้อยละผลต่างระหว่างต้นทุนการขนส่งก่อนและหลังตั้งศูนย์กระจายสินค้าโดยคำนวณจากสมการที่ 14 และ คำนวณจุดคุ้มทุนในแต่ละสถานการณ์ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15 โดยที่ต้นทุนคงที่คือ ค่าก่อสร้างศูนย์กระจายสินค้า และ กำไรต่อหน่วยคือ ผลต่างของต้นทุนการขนส่งก่อนกับหลังตั้งศูนย์กระจายสินค้า และสามารถสรุปผลศึกษาและเปรียบเทียบดังตารางที่ 5

$$\text{ร้อยละต่างระหว่างต้นทุนการขนส่งก่อนและหลังตั้งศูนย์กระจายสินค้า} = \left(\frac{\text{ผลต่างของต้นทุนการขนส่งก่อนและหลังตั้งศูนย์กระจายสินค้า}}{\text{ต้นทุนค่าขนส่งก่อนตั้งศูนย์กระจายสินค้า}} \right) \times 100 \quad (14)$$

$$\text{จุดคุ้มทุน} = \left(\frac{\text{ต้นทุนคงที่}}{\text{กำไรต่อหน่วย}} \right) \quad (15)$$

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบต้นทุนการขนส่งสินค้าก่อนจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าและหลังจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้า

ตัวแบบคณิตศาสตร์	ต้นทุนการขนส่งต่อปี (บาท/ปี)	ผลต่างของต้นทุนการขนส่งก่อนและหลังตั้งศูนย์กระจายสินค้า (บาท/ปี)	ร้อยละของผลต่างระหว่างต้นทุนการขนส่งก่อนและหลังตั้งศูนย์กระจายสินค้า	ค่าก่อสร้าง (บาท)	ระยะเวลาดำเนินการ (ปี)
ก่อนตั้งศูนย์กระจายสินค้า	15,356,952.84	-	-	-	-
ศูนย์กระจายสินค้ามีเพียง 1 แห่ง	9,433,293.00	5,923,659.84	38.57	40,000,000.00	6 ปี 9 เดือน 1 วัน
ศูนย์กระจายสินค้าแบ่งตามภูมิภาคมีเพียง 1 แห่ง	4,818,347.04	10,538,605.80	68.62	160,000,000.00	8 ปี 2 เดือน 6 วัน

สรุปผลการเปรียบเทียบได้ดังนี้

เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เมื่อกำหนดให้มีศูนย์กระจายสินค้าได้เพียง 1 แห่ง พบว่า สามารถลดต้นทุนการขนส่งสินค้าได้ 5,923,659.84 บาทต่อปี ต้นทุนการขนส่งลดลง 38.57% และมีจุดคุ้มทุนเท่ากับ 6 ปี 9 เดือน 1 วัน

ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เมื่อแบ่งเป็น 4 ภูมิภาค โดยกำหนดให้มีศูนย์กระจายสินค้าได้เพียง 1 แห่งในหนึ่งภูมิภาค พบว่า สามารถลดต้นทุนการขนส่งสินค้าได้ 10,538,605.80 บาทต่อปี ต้นทุนการขนส่งลดลง 80.31% และมีจุดคุ้มทุนเท่ากับ 8 ปี 2 เดือน 6 วัน

4. สรุป

จากการประยุกต์ใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในการหาทำเลที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าของบริษัท

กรณีศึกษาโดยให้เกิดต้นทุนการขนส่งรวมต่ำที่สุด โดยใช้ข้อมูลอุปสงค์เฉลี่ยของลูกค้าตั้งแต่เดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2562 ถึง เดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2562 ทั้งหมด 37 จังหวัด ในการประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป IBM ILOG CPLEX สามารถสรุปได้ดังนี้

เมื่อกำหนดให้จำนวนที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้ามีค่าเท่ากับ 1 แห่ง ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าจังหวัดที่เหมาะสมสำหรับตั้งศูนย์กระจายสินค้าคือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยที่ต้นทุนการขนส่งจากบริษัทกรณีศึกษาไปยังศูนย์กระจายสินค้าทั้งมีค่าประมาณ 6,721.65 บาทต่อเดือน ต้นทุนการขนส่งสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้ามีค่าประมาณ 539,705.79 บาทต่อเดือน และต้นทุนการขนส่งจากบริษัทกรณีศึกษาไปยังลูกค้ามีค่าประมาณ 239,680.31 บาทต่อเดือน รวมเป็นต้นทุนการขนส่งรวม มีค่าประมาณ 786,107.75 บาทต่อเดือน สามารถลดต้นทุนการขนส่งได้ร้อยละ 38.57 ต้นทุนการก่อสร้างรวมค่าที่ดินมีค่า

เท่ากับ 115,000,000 บาทต้นทุนการดำเนินงานมีค่าเป็น 180,000 บาทต่อเดือน และมีจุดคุ้มทุนเท่ากับ 6 ปี 9 เดือน 1 วัน จุดเด่นของจังหวัดพระนครศรีอยุธยาถือเป็นหนึ่งในจังหวัดที่มีโรงงานอุตสาหกรรมตั้งอยู่เป็นจำนวนมากและมีเส้นทางคมนาคมหลักไปยังจังหวัดต่าง ๆ ในทุก ๆ ภูมิภาคได้ จังหวัดอยุธยา มีโครงข่ายการขนส่งทางถนนและระบบขนส่งทางรถไฟ รวมทั้งต้นทุนที่ใช้ในการก่อสร้างไม่สูงมากนัก และจากการพูดคุยกับผู้จัดการแผนกคลังสินค้า พบว่าการตั้งศูนย์กระจายสินค้าที่จังหวัดอยุธยาสอดคล้องกับความคิดของผู้บริหาร จุดด้อยของจังหวัดพระนครศรีอยุธยาคือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยาขาดระบบการขนส่งทางอากาศ แต่เนื่องจากการขนส่งทางอากาศไม่ได้เป็นรูปแบบการขนส่งที่ใช้ในการกระจายสินค้า

เมื่อกำหนดให้จำนวนที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าแบ่งตามภูมิภาคมีค่าเท่ากับ 1 แห่ง ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า จังหวัดที่เหมาะสมสำหรับตั้งศูนย์กระจายสินค้าในภาคกลาง ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และ ภาคใต้ คือ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จังหวัดอุดรธานี จังหวัดร้อยเอ็ด และจังหวัดพังงา ตามลำดับ โดยที่ต้นทุนการขนส่งจากบริษัทกรณีศึกษาไปยังศูนย์กระจายสินค้าทั้ง 4 แห่ง มีค่าประมาณ 49,970.69 บาทต่อเดือน ต้นทุนการขนส่งสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้ามีค่าประมาณ 338,910.76 บาทต่อเดือน และต้นทุนการขนส่งจากบริษัทกรณีที่ศึกษาไปยังลูกค้ามีค่าประมาณ 12,618.16 บาทต่อเดือน รวมเป็นต้นทุนการขนส่งรวมมีค่าประมาณ 401,499.61 บาทต่อเดือน สามารถลดต้นทุนการขนส่งได้ร้อยละ 68.62 ต้นทุนการก่อสร้างรวมค่าที่ดินมีค่าเท่ากับ 472,500,000 บาท ต้นทุนการดำเนินงานมีค่าเป็น 720,000 บาทต่อเดือน และมีจุดคุ้มทุนเท่ากับ 8 ปี 2 เดือน 6 วัน

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเลือกทำเลที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้า โดยพิจารณาตำแหน่งที่ตั้งศูนย์

กระจายสินค้าจากจุดศูนย์กลางที่ตั้งของจังหวัดทั้งสิ้น 76 จังหวัด ยกเว้นจังหวัดฉะเชิงเทราที่เป็นที่ตั้งของโรงงาน ในความเป็นจริงจำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยทางด้านภูมิศาสตร์ เศรษฐศาสตร์ สังคม เทคโนโลยีหรือด้านการตลาดเป็นองค์ประกอบที่นำมาใช้ในการตัดสินใจลงทุนสร้างศูนย์กระจายสินค้า

2. ในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้มีการกำหนดตำแหน่งที่ตั้งเป้าหมายที่แน่นอน ผู้วิจัยได้กำหนดจุดที่ตั้งในอำเภอเมืองของแต่ละจังหวัดเป็นหลัก ซึ่งในทางปฏิบัติจริงอาจเลือกทำเลที่ตั้งที่อยู่ในเขตหรืออำเภออื่นได้ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อระยะทางที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ทำให้ต้นทุนการขนส่งเปลี่ยนแปลงไปได้

3. การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้ค่าขนส่งเป็นปัจจัยหลักเพียงปัจจัยเดียวในการสร้างตัวแบบ ซึ่งตัวแบบทางคณิตศาสตร์ยังสามารถเพิ่มปัจจัยอื่น ๆ ลงในตัวแบบได้ อาทิเช่น ค่าเก็บรักษาสินค้า ค่าสร้างศูนย์กระจายสินค้า ค่าความเสี่ยง ค่าเช่าที่ดิน เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับสนับสนุนจากข้อมูลจากคุณนายทรงศทวี ชะนา ผู้จัดการแผนกคลังสินค้าของบริษัทกรณีศึกษา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of the National Economic and Social Development Council. (12 February 2020). Thailand's Logistics Report 2019. [Online]. Available: https://www.nesdc.go.th/ewt_dl_link.php?nid=10791.
- [2] A. Leenatham and P. Khemavuk, "A Warehouse Location Selection by Applying Mathematical model: The brewery manufacturer case study," *Engineering*

- Journal of Siam University*, vol. 19, no. 1, pp. 14-26, 2018.
- [3] W. Atthirawong and S. Ponglangka, "Location Selection of Warehouse and Distribution Centers: A Case Study of Thailand Post Distribution Co., Ltd," *Journal of Applied Statistics and Information Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 10-24, 2020.
- [4] S. Limpanawanich, "An Analysis of Distribution Center Location for Southern Zone: A Case Study of a Private Company," M.S. thesis, Eng. in Ind. Mgt., Prince of Songkla Univ., 2019.
- [5] R. Meskarian, M. L. Penn, S. Williams and T. Monks, "A Facility Location Model for Analysis of Current and Future Demand for Sexual Health Services," *PLoS ONE*, vol. 12, no. 8, pp. 1-18, 2017.
- [6] K. Apiprachyasakul, *Warehouse and Distribution Management*, 1st ed. Bangkok: Focus Media And Publishing Company Limited., 2013.
- [7] IBM. (13 April 2020). IBM ILOG CPLEX Optimization Studio OPL Language User's Manual version 12 release 8. [Online]. Available: https://www.ibm.com/docs/en/SSSA5P_12.8.0/ilog.odms.studio.help/pdf/opl_languser.pdf
- [8] R. Peterson, and E. Silver, *A Decision Systems for Inventory Management and Production Planning*, New York: John Wiley & Sons, 1979.
- [9] Department of Provincial Administration. (13 March 2020). Local Government Unit Information. [Online]. Available: <https://multi.dopa.go.th/pab/news/cate9>.
- [10] The Valuers Association of Thailand, (29 March 2020). A Standard Unit Price Account for Building during 2020 – 2021. [Online]. Available: <http://www.vat.or.th>.
- [11] The Treasury, (15 April 2020). A Summary of Land Valuation 2019. [Online]. Available: <https://www.treasury.go.th/th/summary-of-land-valuation>

การประเมินสมรรถนะของระบบปรับอากาศแบบไฮบริดระหว่างเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยและเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอ

ณัฐพล อำไพ และ อาทิตย์ คุณศรีสุข*

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

รับบทความ 3 สิงหาคม 2565 แก้ไขบทความ 20 กุมภาพันธ์ 2566 ตอรับบทความ 1 มีนาคม 2566

บทคัดย่อ

ระบบปรับอากาศแบบไฮบริด ประกอบด้วย เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย และเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอทั่วไป ถูกตรวจสอบและประเมินสมรรถนะในการศึกษานี้ อาคารขนาด 2.30 m X 2.30 m X 2.75 m ถูกสร้างขึ้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา มีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอในอาคาร เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยสัมผัสโดยอ้อม 5 ชนิดที่แตกต่างกัน ถูกสร้างและติดตั้งในอาคาร เครื่องทำความเย็นดังกล่าว ได้แก่ เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยแบบวัฏจักรเอ็ม, เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลตั้งฉากแบบนำอากาศกลับสู่ช่องเปียก, เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลตั้งฉาก, เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลสวนทางแบบมีแผ่นกัน และเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลสวนทาง ผลการทดสอบพบว่า เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลตั้งฉากให้ค่าสมรรถนะการทำความเย็นและประสิทธิภาพภาระเปาะเปียกสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีก 4 ชนิด โดยสมรรถนะการทำความเย็นและประสิทธิภาพภาระเปาะเปียกสูงสุด คือ 11.68 และ 0.97 ตามลำดับ เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดดังกล่าวสร้างได้ง่าย เนื่องจากมีความซับซ้อนภายในเครื่องน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับอีก 4 ชนิด ดังนั้น จึงเลือก เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลตั้งฉาก การติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยภายนอกอาคาร พบว่า สามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 30.77% เมื่อเปรียบเทียบกับติดตั้งภายในอาคาร นอกจากนี้ การสเปรย์น้ำไม่ต่อเนื่องบนเครื่องทำความเย็นนั้นดีกว่าการสเปรย์น้ำต่อเนื่อง การสเปรย์น้ำ 5 min ทุก 2 h สามารถลดอุณหภูมิหลังผ่านเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยลงได้ 8 °C

คำสำคัญ : ระบบปรับอากาศแบบไฮบริด; เครื่องปรับอากาศแบบอัดไอ; เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยสัมผัสโดยอ้อม; เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยแบบวัฏจักรเอ็ม; ประสิทธิภาพภาระเปาะเปียก

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

Performance Evaluation of a Hybrid Evaporative Cooling – Vapor Compression Air Condition

Natthapon Aumpai and Atit Koonsrisuk*

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Road, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000

Received 3 August 2022; Revised 20 February 2023; Accepted 1 March 2023

Abstract

A hybrid system combining an evaporative cooler and a traditional vapor-compression air-conditioner was investigated and evaluated its performance in this study. A 2.30m x 2.30m x 2.75m building was built at Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima. A vapor-compression air-conditioner was installed in the building. Five different types of indirect evaporative coolers were built and installed in the building. They are a Maisotsenko (M) - cycle type, cross-flow with regeneration type, cross-flow without regeneration type, counter-flow with baffles type, and counter-flow without baffles type. The test results showed that the cross-flow without regeneration type provided the highest coefficient of performance (COP) and wet-bulb effectiveness compared with the other 4 types. Its maximum COP and wet bulb effectiveness were 11.68 and 0.97, respectively. This type was also easier to build because it is less complicated when compared to the others. Therefore, the cross-flow without regeneration type was chosen. It found that installing the evaporative cooler outside the building can reduce energy consumption by 30.77% compared with installing the cooler inside the building. It also found that intermittent water spraying on the cooling core is better than continuous water spraying 5 min spraying of water every 2 h can reduce the outlet air temperature of the cooler to about 8 °C.

Keywords: Hybrid cooling systems; Vapor-compression air-conditioner; Indirect evaporative cooler; Maisotsenko -cycle cooler; Wet bulb effectiveness

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

1. บทนำ

ระบบปรับอากาศแบบไฮบริด คือ การใช้เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย (Evaporative Cooler: EC) ลดภาระการทำความเย็นให้กับเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอ (Vapor Air Condition, VAC) [1]-[3] เนื่องจากเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยช่วยลดอุณหภูมิอากาศก่อนจ่ายเข้าสู่เครื่องปรับอากาศแบบอัดไอ โดยระบบดังกล่าวช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ประเทศอินเดียสำหรับห้องโถง 3700 – 11700 kWh [4] และในสาธารณรัฐอิสลามอิหร่านสามารถลดภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศลงได้ 75% ส่งผลให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลง 55% [5]

อย่างไรก็ตาม การใช้เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยต้องเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของแต่ละพื้นที่ เช่น สภาพภูมิอากาศแบบร้อนแห้งอย่างประเทศอินเดียเลือกใช้เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยสัมผัสโดยตรง (Direct Evaporative Cooler, DEC) เนื่องจากช่วยลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นสัมบูรณ์ (Humidity ratio) ให้กับอากาศ [6] แต่เครื่องทำความเย็นชนิดดังกล่าวเพิ่มความชื้นสัมบูรณ์ให้กับอากาศ 4 - 6 (g/kg_{dry}) [7] จึงไม่เหมาะกับสภาพอากาศแบบร้อนชื้นอย่างประเทศไทย ดังนั้นการเลือกใช้เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยทางอ้อม (Indirect Evaporative Cooler, IEC) จึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความสนใจในงานวิจัยนี้ เนื่องจากการลดอุณหภูมิของเครื่องทำความเย็นดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อความชื้นสัมบูรณ์ภายในอากาศ [8]-[10]

เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยสัมผัสโดยอ้อมได้รับการพัฒนาลักษณะการไหลของอากาศที่หลากหลายรูปแบบโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำความเย็นให้สูงกว่าเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยสัมผัสโดยตรง เครื่องทำความเย็นวัฏจักรเอ็ม (Maisotsenko Cycle, MC) ได้รับการทดสอบที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร พบว่า การเปิดระบบปรับอากาศแบบไฮบริดช่วยลดอุณหภูมิจาก 35 °C เหลือ 20 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 14 g/kg_{dry} ในขณะที่

ที่เปิดเฉพาะเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอ เหลือ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 17 g/kg_{dry} [11] เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลตั้งฉาก (Cross-flow Indirect Evaporative Cooler, CIEC) ที่ใช้อากาศสิ่งแวดล้อม 100% ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถลดอุณหภูมิอากาศได้ต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก [12] เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลสวนทาง (Counter-flow Indirect Evaporative Cooler, CTIEC) ได้รับการทดสอบในเงื่อนไขของสภาพอากาศที่หลากหลาย พบว่าประสิทธิภาพกระเปาะเปียก (Wet-bulb Effectiveness) อยู่ระหว่าง 0.55-1.06 การติดตั้งแผ่นกั้น (Baffle) ภายในเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยช่วยเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน (Overall Coefficient of Heat Transfer) ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศหลังผ่านเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยลดลง 21% และสมรรถนะการทำความเย็นเพิ่มขึ้น 71% [13] แม้ว่าการใช้เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยแต่ละชนิดส่งผลให้ลดภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศได้ แต่ชนิดที่เหมาะสมกับสภาพอากาศของจังหวัดนครราชสีมายังไม่ได้รับการเปรียบเทียบ

นอกจากการพัฒนาลักษณะการไหลของอากาศที่หลากหลายรูปแบบภายในเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยแล้ว การปรับปรุงองค์ประกอบต่าง ๆ ยังถูกพัฒนาเพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำความเย็นอีกด้วย เช่น การใช้อากาศสิ่งแวดล้อม 100% สำหรับลดอุณหภูมิที่เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลาย พบว่า เงื่อนไขดังกล่าวมีประสิทธิภาพผลกระเปาะเปียก 1.13-1.41 [14], [15] การควบคุมเวลาการสเปรย์น้ำในช่องเปียกแทนที่จะสเปรย์อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ประสิทธิภาพผลกระเปาะเปียกเพิ่มขึ้นจาก 0.81 เป็น 0.92 [16] อย่างไรก็ตาม การใช้อากาศภายในห้องปรับอากาศสำหรับลดอุณหภูมิอากาศที่เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย และการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการสเปรย์น้ำในช่องเปียกยังไม่ถูกศึกษา

ในงานวิจัยนี้จึงได้สร้างและทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยแต่ละชนิดประเมินสมรรถนะการทำความเย็น และการใช้พลังงานไฟฟ้า เพื่อเลือกเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยสำหรับพัฒนาสำหรับนำไปใช้งานภายใต้สภาพอากาศจังหวัดนครราชสีมา โดยเลือกขนาดและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานร่วมกับห้องปรับอากาศ [17] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจำลองระบบปรับอากาศแบบไฮบริด โดยใช้สภาพอากาศของจังหวัดนครราชสีมา เป็นฐานข้อมูลในการคำนวณขนาด และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยที่เหมาะสมกับอาคาร ร้านสะดวกซื้อ และที่อยู่อาศัย นอกจากนี้ ได้มีการทดสอบประสิทธิภาพของตำแหน่งการติดตั้งและระยะเวลาที่เหมาะสมในการสเปรย์น้ำที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำความเย็นและการใช้พลังงานไฟฟ้า

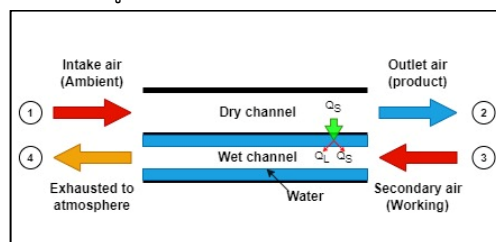
2. คำอธิบายระบบ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอหลักการทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยที่ใช้ในการศึกษา การตั้งค่าการทดลอง และอธิบายการคำนวณสมรรถนะการทำความเย็น

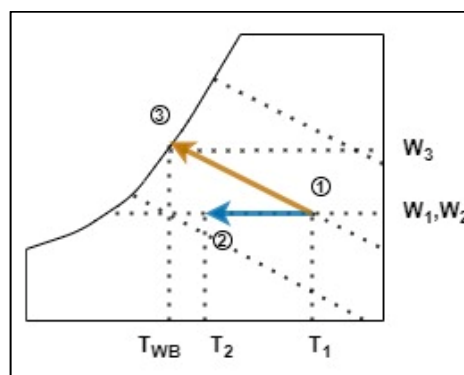
2.1 เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย

หลักการทำงานพื้นฐานของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยสัมผัสโดยอ้อมแสดงดังรูปที่ 1 ภายในเครื่องดังกล่าวมีช่องทำงานสองประเภท ได้แก่ ช่องแห้ง (Dry Channel) และ ช่องเปียก (Wet Channel) เริ่มต้นการทำงานโดยอากาศสิ่งแวดล้อม (Ambient Air) จะไหลเข้าสู่ช่องแห้ง ในขณะเดียวกันก็จะไหลเข้าสู่ช่องเปียกด้วย เมื่ออากาศที่ไหลเข้าช่องเปียกสัมผัสกับน้ำ อากาศในช่องเปียกอุณหภูมิจะลดลง และความชื้นสัมบูรณ์สูงขึ้นด้วยอิทธิพลของความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) และความร้อนแฝง (Latent Heat) เมื่อเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิในช่องแห้งและช่องเปียก อากาศในช่องแห้งที่มีอุณหภูมิสูง

กว่าอากาศในช่องเปียกจึงถ่ายเทความร้อนสู่อากาศในช่องเปียกในรูปแบบของความร้อนสัมผัส กระบวนการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวแสดงในแผนภูมิไซโครเมตริกของรูปที่ 2 อากาศจากตำแหน่งที่ (1) ถึง (2) หมายถึง อุณหภูมิลดลงในขณะที่ความชื้นสัมบูรณ์คงที่ อากาศจากตำแหน่งที่ (1) ถึง (3) หมายถึง อุณหภูมิลดลงในขณะที่ความชื้นสัมบูรณ์เพิ่มขึ้น

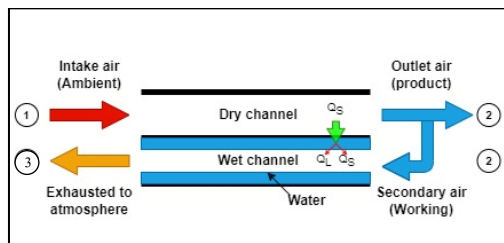


รูปที่ 1 หลักการทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย

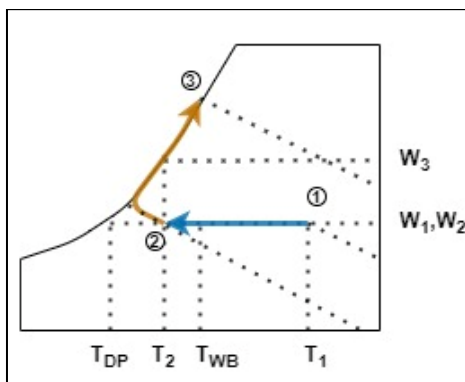


รูปที่ 2 กระบวนการลดอุณหภูมิของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย

เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดแบ่งอากาศกลับสู่ช่องเปียก (Regenerative Indirect Evaporative Cooler, RIEC) แสดงดังรูปที่ 3 มีการทำงานที่แตกต่างจากเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยทั่วไปคือ การแบ่งอากาศหลังผ่านช่องแห้ง 30% กลับสู่ช่องเปียก จากสาเหตุดังกล่าวส่งผลให้อากาศหลังผ่านช่องแห้งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศสิ่งแวดล้อม ซึ่งกระบวนการลดอุณหภูมิของเครื่องดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 หลักการทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดแบ่งอากาศกลับสู่ช่องเปียก



รูปที่ 4 กระบวนการลดอุณหภูมิของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดแบ่งอากาศกลับสู่ช่องเปียก

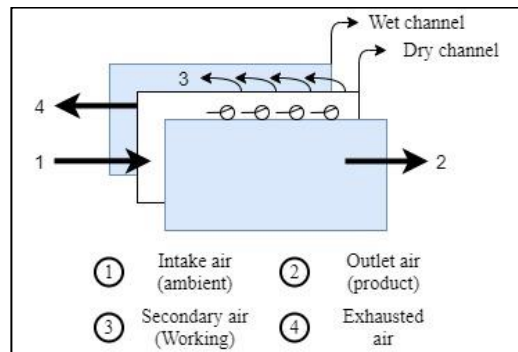
ในระบบปรับอากาศแบบไฮบริด อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำภายในห้องปรับอากาศจะถูกส่งไปยังช่องเปียกแทนอากาศสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยและลดความร้อนทิ้ง (Waste Heat) ซึ่งระบบดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้

2.2 คำอธิบายเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยทั้ง 5 ชนิด

ชุดต้นแบบเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยทั้ง 5 ชนิดที่ถูกสร้างและทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 – 9 ตามลำดับ

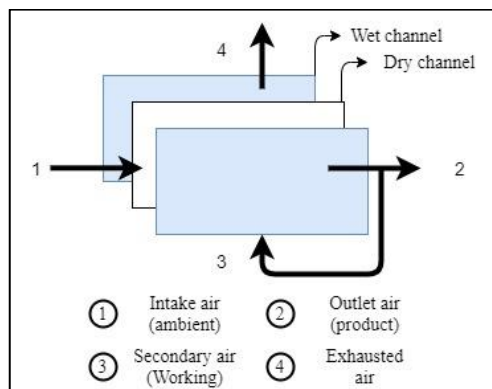
เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยแบบวัฏจักรเอ็ม (Maisotsenko Cycle, MC) แสดงดังรูปที่ 5 คือเครื่องทำความเย็นที่ใช้อากาศจากสิ่งแวดล้อมกระแส

เดียวในการทำงานไหลเข้าสู่ช่องแห้ง แต่มีการแบ่งอากาศ 30% ผ่านรูเล็กๆจากช่องแห้งเข้าสู่ช่องเปียกแทนการใช้อากาศจากสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง



รูปที่ 5 เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยแบบวัฏจักรเอ็ม

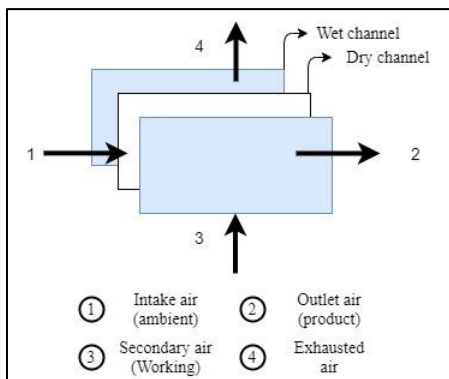
เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลตั้งฉากแบบนำอากาศกลับสู่ช่องเปียก (Cross-flow Regenerative Indirect Evaporative Cooler, CRIEC) แสดงดังรูปที่ 6 มีลักษณะการไหลระหว่างอากาศในช่องแห้งกับช่องเปียกแบบตั้งฉาก เครื่องทำความเย็นชนิดนี้จะนำอากาศทั้งหมดไหลผ่านช่องแห้งก่อนนำกลับเข้าสู่ช่องเปียก



รูปที่ 6 เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลตั้งฉากแบบนำอากาศกลับสู่ช่องเปียก

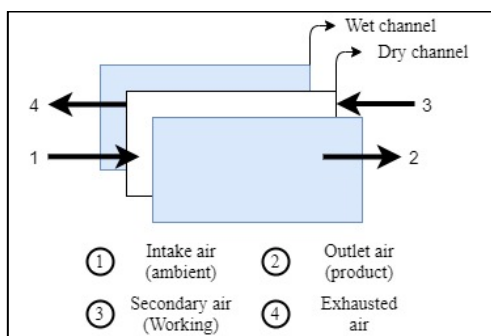
เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลตั้งฉาก (Cross-flow Indirect Evaporative Cooler:

CIEC) แสดงดังรูปที่ 7 เป็นเครื่องทำความเย็นที่มีลักษณะการไหลระหว่างอากาศในช่องแห้งกับช่องเปียกแบบตั้งฉากกัน โดยอากาศที่ไหลเข้าสู่ช่องเปียกเป็นอากาศจากห้องทดสอบที่มีอุณหภูมิและความชื้นต่ำจากการทำงานของเครื่องปรับอากาศ



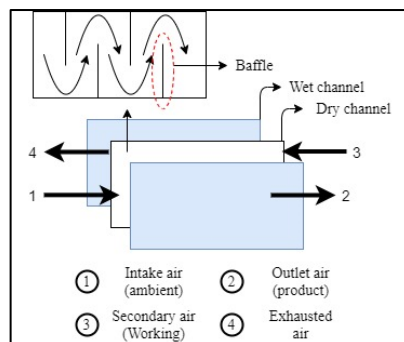
รูปที่ 7 เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลตั้งฉาก

เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลสวนทาง (Counter-flow Indirect Evaporative Cooler, CTIEC) แสดงดังรูปที่ 8 เป็นเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยที่มีทิศทางการไหลของอากาศสวนทางกันระหว่างช่องแห้งกับช่องเปียกโดยใช้อากาศสองกระแสในการทำงาน ได้แก่ อากาศสิ่งแวดล้อมที่ไหลเข้าสู่ช่องแห้ง และอากาศจากห้องทดสอบไหลเข้าสู่ช่องเปียก



รูปที่ 8 เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลสวนทาง

เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลสวนทางแบบมีแผ่นกั้น (Counter-flow Evaporative Cooler with baffles, CTIEC_B) แสดงดังรูปที่ 9 มีทิศทางการไหลของอากาศเหมือนกับชนิดไหลสวนทาง แต่แตกต่างกันที่ภายในช่องแห้งของเครื่องทำความเย็นชนิดนี้มีการติดตั้งแผ่นกั้น (Baffle) โดยมีวัตถุประสงค์ให้อากาศภายในช่องแห้งมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 9 เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลสวนทางแบบมีแผ่นกั้น

2.3 การติดตั้งการทดสอบ

การควบคุมสภาพอากาศภายในอาคารทดสอบเพื่อไม่ให้ถูกรบกวนจากอากาศภายนอก จึงได้สร้างห้องปรับอากาศขนาด 2.30 m X 2.30 m X 2.75 m บริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 10 ผนังสร้างจากแผ่นยิปซัมไม่มีการติดตั้งฉนวนกันความร้อน เครื่องปรับอากาศใช้ชนิดความเร็วคงที่ (Fixed Speed Type) ขนาด 9000 BTU รูปที่ 11 แสดงการติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย



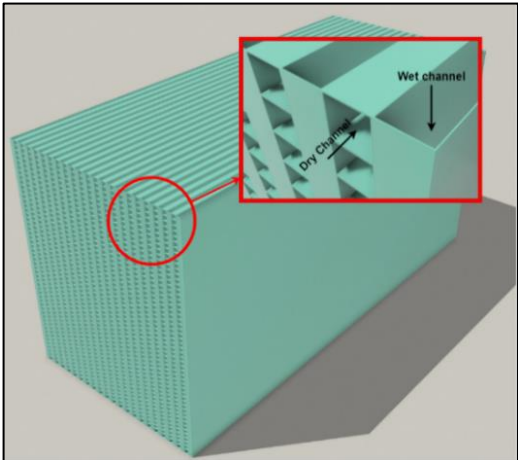
รูปที่ 10 อาคารทดสอบ



รูปที่ 11 การติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย

ภายในเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยจะถูกแบ่งช่องแห้งและช่องเปียกด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตเพื่อป้องกันน้ำรั่วจากช่องเปียกเข้าไปในช่องแห้งแสดงดังรูปที่ 12 เลือความหนาของแผ่นโพลีคาร์บอเนตอยู่ที่ 0.5 mm ซึ่งเป็นขนาดที่ส่งผลน้อยต่อการนำความร้อน [18] การเพิ่มพื้นที่การกระจายตัวของน้ำในช่องเปียกทำได้โดยติดตั้งผ้าสาส์ที่มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้รวดเร็ว และกระจายน้ำ

ได้ดี ขนาดและพารามิเตอร์ของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยแสดงดังตารางที่ 1 ได้รับการจำลองเพื่อหาขนาดและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยแต่ละชนิดสำหรับนำไปสร้างจริง นอกจากนี้อัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงตามเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยแต่ละชนิด



รูปที่ 12 แบบจำลองตำแหน่งช่องแห้งและช่องเปียกของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย

ตารางที่ 1 ขนาดและพารามิเตอร์เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย

ชนิด	MC	CRIEC	CIEC	CTIEC _B	CTIEC
ขนาด (มม.)	200x500x255	240x500x255	240x500x255	400x600x255	400x600x255
ช่องแห้ง (มม.)	5	5	5	5	5
ช่องเปียก (มม.)	5	5	5	5	5
จำนวนช่องแห้ง	18	20	20	20	20
จำนวนช่องเปียก	17	19	19	19	19
อัตราการไหลช่องแห้ง (m ³ /h)	388.53	446.55	129.6	270	140.4
อัตราการไหลช่องเปียก (m ³ /h)	197.01	124.77	129.6	270	140.4

แผนผังการติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยแสดงดังรูปที่ 13 แสดงลักษณะการติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยภายนอกอาคารทดสอบ การทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยประกอบด้วย 3 ระบบย่อย ได้แก่ ระบบปรับอากาศ

(Air Conditioner System) ระบบระบายอากาศ (Ventilation System) และระบบสเปรย์น้ำ (Water Spraying System) โดยระบบระบายอากาศประกอบด้วยพัดลม 2 ตัว ตัวแรกทำหน้าที่ดูดอากาศช่องแห้งเข้าสู่อาคารทดสอบ ตัวที่สองทำหน้าที่ดึง

อากาศจากอาคารทดสอบเข้าสู่ช่องเป๊ยก ในกรณีทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยแบบนำอากาศกลับสู่ช่องเป๊ยก พัดลมตัวที่สองจะถูกติดตั้งระหว่างช่องแห้งและช่องเป๊ยกเพื่อทำหน้าที่แบ่งอากาศ 30% เข้าสู่ช่องเป๊ยก [19] การควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ถูกแบ่ง 30% เข้าสู่ช่องเป๊ยกของงานวิจัยนี้ทำได้โดยการติดตั้งตัวปรับแรงดันไฟฟ้า (Dimmer

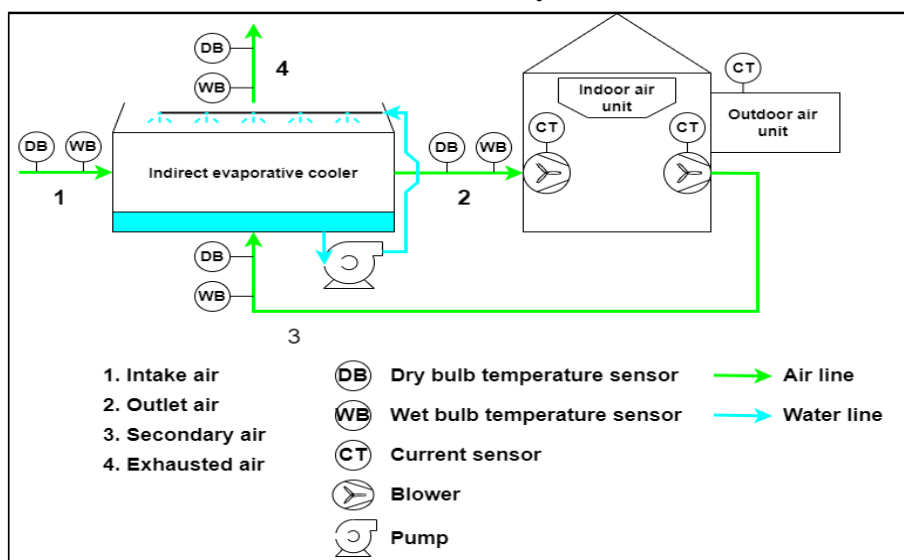
Switch) ที่พัดลมตัวที่สอง เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้กับพัดลมดังกล่าวให้ได้อัตราการไหลที่ต้องการโดยวัดผ่านแอนิโมมิเตอร์ (Anemometer) เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยรวมถึงท่ออากาศแต่ละชิ้นถูกหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศสิ่งแวดล้อมกับอากาศภายในท่อ

ตารางที่ 2 ข้อมูลจำเพาะของเซนเซอร์

Parameters	Instruments	Accuracy	Range
Dry bulb temperature Sensor	DS18B20	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	-55°C to $+125^{\circ}\text{C}$
Wet bulb temperature Sensor	DS18B20	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$	-55°C to $+125^{\circ}\text{C}$
Current Sensor	SCT-013-010	0.80%	0 to 10 A

นอกจากนี้ ระบบดังกล่าวได้ติดตั้งระบบควบคุมการทำงานของปั้มน้ำเพื่อศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการสเปรย์น้ำ, เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor) และเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า (Current Sensors) เครื่องมือวัดแต่ละตัวถูกสอบเทียบเครื่องมือก่อนนำมาใช้งาน ข้อมูลจำเพาะของเซนเซอร์ที่นำมาใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้ง

เซนเซอร์ ประกอบด้วย เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศ ถูกติดตั้งที่ทางเข้าและทางออกที่ช่องแห้งและช่องเป๊ยกของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย ตำแหน่งเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ถูกติดตั้ง มีดังนี้ 1.พัดลมดูดอากาศผ่านเครื่องทำความเย็น 2.พัดลมดูดอากาศจากห้องทดสอบสู่ช่องเป๊ยกของเครื่องทำความเย็น 3. คอมเพรสเซอร์ของเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 แผนผังการติดตั้งเครื่องทำความเย็นและตำแหน่งเครื่องมือวัด

2.4 สมการที่เกี่ยวข้อง

ผลต่างอุณหภูมิหลังผ่านแกนทำความเย็นในช่องแห้ง (ตำแหน่งที่ 1 – 2 ในรูปที่ 2) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\Delta t = t_{db,in} - t_{db,out} \quad (1)$$

โดยที่

$$t_{db,in} = \text{อุณหภูมิอากาศเข้าช่องแห้ง (}^{\circ}\text{C)}$$

$$t_{db,out} = \text{อุณหภูมิอากาศออกช่องแห้ง (}^{\circ}\text{C)}$$

การเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในช่องแห้งอยู่ในรูปแบบของความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) สามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta t \quad (2)$$

โดยที่

$$\dot{m} = \text{อัตราการไหลของอากาศหลังผ่านเครื่อง}$$

ทำความเย็นแบบน้ำระเหย (kg/s)

$$C_p = \text{ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kgK)}$$

พลังงานไฟฟ้า (Electric Power) สำหรับพัดลมทั้งหมดที่ใช้ในการทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด 220 V แสดงดังสมการที่ ...

$$P_{VC} = \frac{IV}{1000} \quad (3)$$

โดยที่

$$I = \text{กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศ (A)}$$

$$V = \text{แรงดันไฟฟ้า (V)}$$

ความชื้นสัมบูรณ์ในอากาศ (Humidity Ratio) เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำความเย็นรายละเอียดการคำนวณแสดงดังต่อไปนี้ [20]

$$\ln p_{ws} = \frac{c_8}{T} + c_9 + c_{10}T + c_{11}T^2 + c_{12}T^3 + c_{13} \ln T \quad (4)$$

เมื่อ

$$c_8 = -5.80 \times 10^3$$

$$c_9 = 1.39$$

$$c_{10} = -4.86 \times 10^{-2}$$

$$c_{11} = 4.17 \times 10^{-5}$$

$$c_{12} = -1.44 \times 10^{-8}$$

$$c_{13} = 6.54$$

โดยที่

$$T = \text{อุณหภูมิอากาศตำแหน่งที่ต้องการหาความชื้นสัมบูรณ์ (K)}$$

สมการคำนวณความชื้นสัมบูรณ์อิ่มตัว

$$W_s = 0.62198 \left(\frac{p_{ws}}{p - p_{ws}} \right) \quad (5)$$

สมการคำนวณความชื้นสัมบูรณ์

$$W = \frac{A - B}{C + D - E} \quad (6)$$

เมื่อ

$$A = (2501 - 2.381T_{wet})W_s$$

$$B = 1.006(T_{dry} - T_{wet})$$

$$C = 2501$$

$$D = 1.805T_{dry}$$

$$E = 4.186T_{wet}$$

โดยที่

T_{dry} = อุณหภูมิอากาศกระเปาะแห้ง (K)

T_{wet} = อุณหภูมิอากาศกระเปาะเปียก (K)

p_{ws} = ความดันอากาศอิ่มตัว (Pa)

p = ความดันบรรยากาศ (Pa)

ประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบน้ำระเหย (Wet-bulb Effectiveness) ของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\varepsilon_{wb} = \frac{t_{db,in} - t_{db,out}}{t_{db,in} - t_{wb,in}} \quad (7)$$

โดยที่

$T_{wb,in}$ = อุณหภูมิอากาศกระเปาะเปียกขาเข้า
ช่องเปียก (°C)

สมรรถนะการทำความเย็น (Coefficient of Performance: COP_R) ของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยคำนวณจากสัดส่วนระหว่างความร้อนที่ดึงออกจากอากาศต่อพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับระบบทำความเย็น ดังนี้

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_R}{P_R} \quad (8)$$

โดยที่

$\dot{Q}_R$ = พลังงานความร้อนที่เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยดึงออกจากอากาศได้ (kW)

P_R = พลังงานไฟฟ้าที่พัฒนาระบายอากาศให้กับระบบทำความเย็นแบบน้ำระเหย (kW)

สมรรถนะการทำความเย็น (Coefficient of Performance: COP_{VC}) ของเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอน้ำคำนวณจากสัดส่วนระหว่างความร้อนที่ดึงออกจากอากาศต่อพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับระบบอัดไอน้ำ ดังนี้

$$COP_{VC} = \frac{\dot{Q}_{VC}}{P_{VC}} \quad (9)$$

โดยที่

$\dot{Q}_{VC}$ = พลังงานความร้อนที่เครื่องปรับอากาศแบบอัดไอน้ำดึงออกจากอากาศได้ (kW)

P_{VC} = พลังงานไฟฟ้าที่พัฒนาระบายอากาศให้กับเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอน้ำ (kW)

3. คำอธิบายการทดสอบ

ลำดับแรกของการทดสอบ ใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ [17] เพื่อประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยทั้ง 5 ชนิดที่จะทำการสร้างเพื่อทดสอบ

ลำดับถัดมาได้เลือกเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยที่มีสมรรถนะการทำความเย็นสูงสุดสำหรับนำไปทดสอบอิทธิพลที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำความเย็น ได้แก่

- อิทธิพลตำแหน่งการติดตั้ง
- อิทธิพลระยะเวลาการสเปรย์น้ำ

รายละเอียดของการทดสอบอิทธิพลแต่ละเงื่อนไขแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดสอบอิทธิพลแต่ละประเภท

ประเภทการทดสอบ	เงื่อนไขการทดสอบ
อิทธิพลตำแหน่งการติดตั้ง	ติดตั้งภายในอาคาร
	ทดสอบ
	ติดตั้งภายนอกอาคาร
อิทธิพลการสเปรย์น้ำ	ทดสอบ
	สเปรย์น้ำตลอดการ
	ทดสอบ
อิทธิพลระยะเวลาการสเปรย์น้ำ	สเปรย์น้ำ 5 น. แล้วปิด
	สเปรย์น้ำ 5 น. ทุก 2
	ชม.

4. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับผลการทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยแต่ละชนิด รวมถึงอิทธิพลที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำความเย็น

4.1 อิทธิพลชนิดเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย

ผลการทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยทั้ง 5 ชนิด ถูกเปรียบเทียบในตารางที่ 4 โดยอุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อมในช่วงการทดสอบ 8 h โดยตารางที่ 4 จะแสดงค่าต่ำสุดและสูงสุดของแต่ละรายการข้อมูลวัดหรือคำนวณในช่วงระยะเวลาที่ทดสอบ พบว่า เครื่องทำความเย็นวัฏจักรเอ็ม และเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลตั้งฉากแบบนำอากาศกลับสู่ช่องเปียกมีสมรรถนะการทำความเย็นและประสิทธิภาพประปาเปียกต่ำกว่าเครื่องทำความ

เย็นแบบน้ำระเหยอีก 3 ชนิด เนื่องจาก เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยทั้ง 2 ชนิด ใช้การแบ่งอากาศหลังผ่านช่องแห้งกลับสู่ช่องเปียก โดยการใช้อากาศตำแหน่งดังกล่าวเป็นอากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นสัมบูรณ์สูงกว่าการใช้อากาศจากห้องปรับอากาศ เนื่องจากเป็นอากาศที่มีความชื้นสัมบูรณ์เท่ากับอากาศสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิอากาศสูงกว่าอากาศที่มาจากห้องทดสอบที่มีการควบคุมอุณหภูมิจากเครื่องปรับอากาศ ส่งผลให้การรับภาระของน้ำในช่องเปียกทำได้น้อยลง เป็นสาเหตุให้การลดอุณหภูมิอากาศในช่องเปียกและการรับความร้อนจะช่องแห้งทำได้น้อยลง สุดท้ายส่งผลให้ สมรรถนะการทำความเย็นต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยที่ใช้อากาศจากห้องทดสอบที่เปิดเครื่องปรับอากาศ

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย

ชนิด	$t_{db,in}$ (°C)	RH (%)	W (g/kg _{dry})	COP _R	ϵ_{wb}
MC	22.44-24.19	66-83	11-15	0.30-1.40	0.20-0.72
CFR	22.87-26.57	55-81	10-20	0.22-1.56	0.26-0.64
CF	22.23-31.38	43-75	12-13	1.99-11.68	0.57-0.97
CTF _B	27.79-35.71	43-74	15-18	3.52-10.54	0.58-0.96
CTF	28.55-34.06	54-75	17-19	6.09-11.29	0.57-0.76

ในทางกลับการ การเปิดระบบปรับอากาศแบบไฮบริด โดยนำอากาศจากภายในอาคารทดสอบที่มีอุณหภูมิและความชื้นสัมบูรณ์ต่ำกลับเข้าสู่ช่องเปียกของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย พบว่า เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยอีก 3 ชนิด มีสมรรถนะการทำความเย็น

และประสิทธิภาพประปาเปียกมากกว่าการใช้เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยที่ใช้อากาศหลังผ่านช่องแห้งกลับสู่ช่องเปียก ผลการทดสอบเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยที่มีสมรรถนะการทำความเย็นสูงทั้ง 3 ชนิด ถูกนำมาเปรียบเทียบและแสดงใน ตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยในสภาพอากาศที่ใกล้เคียงกัน

ชนิด	$t_{db,in}$ (°C)	RH (%)	W (g/kg _{dry})	COP _R	ϵ_{wb}
CF	30.96	54.30	15.40	9.99	0.87
CTF _B	30.00	56.00	16.00	3.95	0.80
CTF	31.90	55.82	16.70	4.95	0.41

เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยทั้ง 3 ชนิด ทำงานภายใต้สภาพอากาศสิ่งแวดล้อมที่ใกล้เคียงกัน พบว่าเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลตั้ง ฉาก มีสมรรถนะการทำความเย็น และประสิทธิภาพ กระเปาะเปียกสูงสุด เนื่องจาก ผลต่างของอุณหภูมิ หลังผ่านแกนทำความเย็นมากกว่าเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหล ส่งผลให้สมรรถนะการทำความเย็นสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยทุกชนิดที่นำมาทดสอบ นอกจากนี้ โครงสร้างภายในของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลตั้งฉากมีความซับซ้อนน้อยจึงทำให้มีการสูญเสียแรงดันต่ำกว่าเครื่องทำความเย็นชนิดอื่น ส่งผลให้ปริมาณไฟฟ้าของพัดลมที่ใช้ร่วมกับเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดนี้ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลง แสดงดังตารางที่ 6

นอกจากนี้ ได้มีการเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยแต่ละชนิดร่วมกับเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอ กับระบบที่ติดตั้งเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอเพียงอย่างเดียวในสภาพอากาศที่ใกล้เคียงกัน เพื่อศึกษาสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอ พบว่า

ในกรณีที่มีการติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยแต่ละชนิดร่วมกับเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอส่งผลให้การระเหยการทำความเย็นที่มีต่อเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอลดลง นอกจากนี้ การใช้พลังงานไฟฟ้ามีค่าลดลงในทุกกรณีที่มีการติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยและลดได้สูงสุดที่เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลตั้งฉาก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลตั้งฉากสำหรับนำไปพัฒนาให้มีสมรรถนะการทำความเย็นเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 6 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าและความร้อนที่สามารถดึงออกจากอากาศของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย

ชนิด	P _R (kW)	Q _R (kW)
MC	0.451	0.13-0.64
CFR	0.426	0.09-0.67
CF	0.228	0.45-2.66
CTF _B	0.376	1.32-3.96
CTF	0.376	2.29-4.24

ตารางที่ 7 สมรรถนะของเครื่องปรับอากาศแบบอัดไอ

ชนิด	ติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย			ไม่ติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย		
	P _{VC} (kW)	Q _{VC} (kW)	COP _{VC}	P _{VC} (kW)	Q _{VC} (kW)	COP _{VC}
MC	3.7	3.48-14.33	0.94-3.87	3.71	3.48-14.65	0.94-3.95
CFR	3.52	1.79-13.24	0.51-3.76	3.76	2.63-14.33	0.70-3.81
CF	2.5	1.45-11.97	0.58-4.79	3.76	2.63-14.33	0.70-3.81
CTF _B	4.07	0.65-2.25	0.16-0.55	4.35	0.72-2.40	0.16-0.55
CTF	5.27	10.29-12.04	1.81-2.28	5.53	11.69-13.21	2.11-2.38

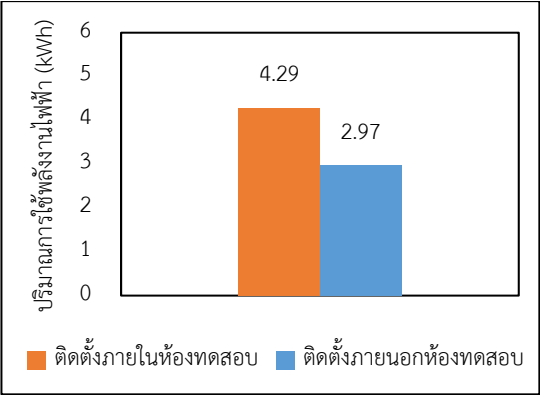
4.2 อิทธิพลตำแหน่งการติดตั้ง

ตำแหน่งการติดตั้งที่แตกต่างกันสองตำแหน่งของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยได้รับการทดสอบในงานวิจัยนี้ ตำแหน่งแรก คือการติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยภายในอาคารทดสอบและใช้อากาศภายในอาคารทดสอบในการทำงาน ตำแหน่งที่สอง คือการติดตั้งภายนอกอาคารทดสอบและใช้อากาศสิ่งแวดล้อมในการทำงาน ตัวแปรที่ใช้ในการวัดถึงสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยในหัวข้อนี้คือปริมาณการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศในระหว่างการทดสอบ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอยู่ในช่วง 22-31 °C การติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยไว้ในอาคารทดสอบส่งผลให้เครื่องปรับอากาศใช้พลังงานไฟฟ้า 4.29 kWh ในช่วงเวลากลางวันแปดชั่วโมง ในขณะที่การติดตั้งภายนอกอาคารใช้พลังงานเพียง 2.97 kWh แสดงดังรูปที่ 14

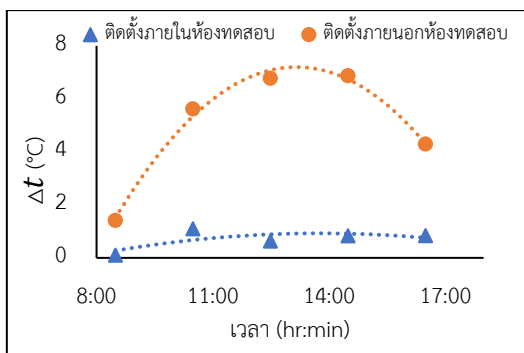
เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองเงื่อนไขการทดลองพบว่า การติดตั้งภายนอกอาคารทดสอบส่งผลให้การใช้ปริมาณไฟฟ้าลดลง 30.77% เนื่องจาก การติดตั้งภายนอกอาคารเป็นการลดอุณหภูมิอากาศทั้งหมดก่อนจ่ายเข้าสู่อาคารทดสอบ ในขณะที่การติดตั้งภายในอาคารเป็นการใช้อากาศที่ผสมกันระหว่างอากาศจากสิ่งแวดล้อมกับอากาศภายในห้องทดสอบ ส่งผลให้อากาศบางส่วนสร้างภาระการทำความเย็น

ให้กับเครื่องปรับอากาศ โดยภาระการทำความเย็นขึ้นอยู่กับผลต่างอุณหภูมิหลังผ่านแกนทำความเย็นแสดงดังรูปที่ 15

ในการศึกษาอิทธิพลตำแหน่งการติดตั้งที่ส่งผลต่อผลต่างของอุณหภูมิหลังผ่านแกนทำความเย็นในรูปที่ 15 พบว่า กรณีที่ติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยไว้ภายนอกมีผลต่างของอุณหภูมิหลังผ่านแกนทำความเย็นสูงสุดที่ 7.61 °C ในขณะที่ติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยไว้ภายในสูงสุดที่ 0.58 °C นั้นแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยไว้ภายนอกสามารถลดภาระการทำความเย็นต่อเครื่องปรับอากาศได้มากกว่าการติดตั้งภายในอาคารทดสอบ



รูปที่ 14 อิทธิพลตำแหน่งการติดตั้งที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ



รูปที่ 15 อิทธิพลตำแหน่งการติดตั้งที่ส่งผลต่อผลต่างของอุณหภูมิหลังผ่านแกนทำความเย็น

4.3 อิทธิพลการสเปรย์น้ำ

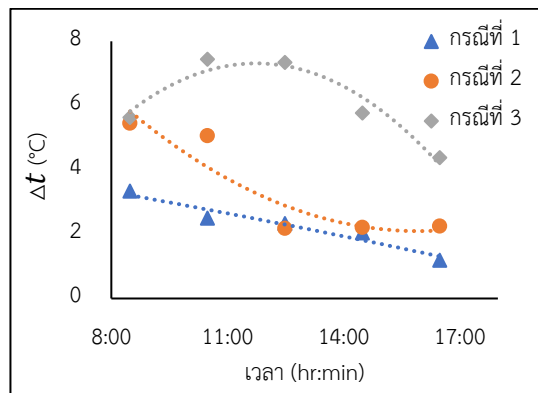
การเพิ่มสมรรถนะการทำความเย็นให้กับเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหย พบว่า อิทธิพลการสเปรย์น้ำลงบนเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยในห้องเป๊ยกได้รับความสนใจ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทดสอบและแบ่งการสเปรย์เป็น 3 กรณี

- กรณีที่ 1 สเปรย์น้ำตลอดการทดสอบ
- กรณีที่ 2 สเปรย์น้ำ 5 min แล้วปิด
- กรณีที่ 3 สเปรย์น้ำ 5 min ทุก 2 h

โดยทั้ง 3 กรณี มีการติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยไว้ภายนอกอาคารที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25-30 °C

ผลการทดสอบในกรณีที่ 1 พบว่า ผลต่างอุณหภูมิหลังผ่านแกนทำความเย็นเฉลี่ย 2 °C ซึ่งมีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับกรณีที่เหลือ เนื่องจาก การสเปรย์น้ำตลอดการทำงานของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยส่งผลให้ความชื้นสัมบูรณ์ในอากาศก่อนจ่ายเข้าสู่ห้องเป๊ยกเพิ่มขึ้น การระเหยของน้ำในห้องเป๊ยกจึงทำได้น้อยลง เป็นผลให้การลดอุณหภูมิอากาศในห้องเป๊ยกจึงทำได้น้อยลงตามไปด้วย กรณีที่ 2 พบว่า หลังจากหยุดการสเปรย์น้ำส่งผลให้ผลต่างของอุณหภูมิหลังผ่านแกนทำความเย็นเพิ่มขึ้นก่อนที่จะลดลงในที่สุด กรณีที่ 3 พบว่า การสเปรย์น้ำแบบไม่

ต่อเนื่องส่งผลให้การระเหยของน้ำภายในห้องเป๊ยกเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ผลต่างของอุณหภูมิหลังผ่านแกนทำความเย็นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 อิทธิพลการสเปรย์น้ำที่ส่งผลต่อผลต่างของอุณหภูมิหลังผ่านแกนทำความเย็น

ในการศึกษาอิทธิพลการสเปรย์น้ำที่ส่งผลต่อผลต่างของอุณหภูมิหลังผ่านแกนทำความเย็น ในรูปที่ 16 พบว่า กรณีที่ 3 มีผลต่างของอุณหภูมิหลังผ่านแกนทำความเย็นสูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น เนื่องจาก การสเปรย์น้ำไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้ไม่เพิ่มความชื้นให้กับอากาศก่อนเข้าสู่ห้องเป๊ยก ดังนั้น การรับการระเหยของน้ำในห้องเป๊ยกจึงเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถลดอุณหภูมิอากาศในห้องเป๊ยกและรับความร้อนจากห้องแห้งได้เพิ่มขึ้น ในท้ายที่สุด ส่งผลให้ผลต่างของอุณหภูมิหลังผ่านแกนทำความเย็นเพิ่มขึ้น

5. สรุป

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยโดยอ้อมทั้ง 5 ชนิด ด้วยการเปิดระบบปรับอากาศแบบไฮบริด โดย ออกแบบ สร้าง และติดตั้งกับอาคารทดสอบขนาดเล็ก ที่จังหวัดนครราชสีมา เพื่อประเมินอิทธิพลที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำความเย็น

ผลการเปรียบเทียบเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยโดยอ้อม พบว่า เครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยชนิดไหลตั้งฉาก มีสมรรถนะการทำความเย็นและประสิทธิภาพกระแสเป่าเปือกสูงสุด 11.29 และ 0.76 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับอีก 4 ชนิด

ผลการทดสอบและประเมินอิทธิพลที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำความเย็น พบว่า การติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยไว้ภายนอกใช้ปริมาณไฟฟ้าสำหรับ เครื่องปรับอากาศน้อยกว่าภายใน 30.77% จึงได้เลือกการติดตั้งเครื่องทำความเย็นแบบน้ำระเหยไว้ภายนอกเพื่อทดสอบร่วมกับอิทธิพลอื่น พบว่า การสเปรย์น้ำที่ไม่ต่อเนื่อง (ครั้งละ 5 min ทุก 2 h) ช่วยลดอุณหภูมิอากาศได้มากกว่าการสเปรย์ตลอดทั้งการทดสอบ ดังนั้นการสเปรย์น้ำไม่ต่อเนื่องจึงช่วยลดภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศได้มากกว่าการสเปรย์ตลอดทั้งการทดสอบ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่มอบทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุน OROG) และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.). จากโครงการศักยภาพการประหยัดพลังงานของระบบปรับอากาศแบบไฮบริดระหว่างระบบทำความเย็นแบบน้ำระเหยกับระบบอัดไอเพื่อร้านสะดวกซื้อในประเทศไทย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Q. Chen, M. Kum Ja, M. Burhan, F. Hassan Akhtar, M. Wakil Shahzad, D. Ybyraiymkul, K. Choon Ng, "A hybrid indirect evaporative cooling-mechanical vapor compression process for energy-efficient air conditioning," *Energy Conversion and Management*, Vol. 248, pp. 114798, 2021.
- [2] R. Tariq, N. Ahmed Sheikh, J. Xaman, A. Bassam, "Recovering waste energy in an indirect evaporative cooler – A case for combined space air conditioning for human occupants and produce commodities," *Building and Environment*, Vol. 152, pp. 105-121, 2019.
- [3] D. Pandelidis, A. Cichon, A. Pacak, S. Anisimov, P. Drag, "Performance comparison between counter- and cross-flow indirect evaporative coolers for heat recovery in air conditioning systems in the presence of condensation in the product air channels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 130, pp. 757-777, 2019.
- [4] V. Jain, S.C. Mullick, Tara C. Kandpal, "A financial feasibility evaluation of using evaporative cooling with air-conditioning (in hybrid mode) in commercial buildings in India," *Energy for Sustainable Development*, Vol. 17, pp. 47-53, 2013.
- [5] M. Wakil Shahzad, M. Burhan, D. Ybyraiymkul, S. Jin Oh, K. Choon Ng, "An improved indirect evaporative cooler experimental investigation," *Applied Energy*, Vol. 256, pp. 113934, 2019.
- [6] D. Bishoyi, K. Sudhakar, "Experimental performance of a direct evaporative cooler in composite climate of India,"

- Energy and Buildings, Vol. 153, pp. 190-200, 2017.
- [7] S.A. Nada, A. Fouda, M.A. Mahmoud, H.F. Elattar, "Experimental investigation of energy and exergy performance of a direct evaporative cooler using a new pad type," Energy and Buildings, Vol. 203, pp. 109449, 2017.
- [8] J. Chua, W. Xu, Yijun Fu, H Huo, "Experimental research on the cooling performance of a new regenerative dew point indirect evaporative cooler," Journal of Building Engineering, Vol. 43, pp.102921, 2021.
- [9] P. Patunkar, S. Dingare, "Performance investigations of cross flow indirect evaporative cooler," Materialstoday PROCEEDINGS, Part 11, Vol. 47, pp. 2915-2918, 2021.
- [10] D. Pandelidis, A. Cichon, A. Pacak, Anisimov, P. Drag, "Counter-flow indirect evaporative cooler for heat recovery in the temperate climate," Energy. Vol. 165, Part A, pp. 877-894, 2018.
- [11] D. Pandelidis, A. Cichon, A. Pacak, Anisimov, P. Drag, M. Drag, W. Worek, S. Cetin, "Performance study of the cross-flow Maisotsenko cycle in humid climate conditions," International Communications in Heat and Mass Transfer. Vol. 115, pp. 104581, 2020.
- [12] H Kim, S Ham, D Yoon, J Jeong, "Cooling performance measurement of two cross-flow indirect evaporative coolers in general and regenerative operation modes," Applied Energy. Vol. 195, Pages 268-277, 2017.
- [13] A.E. Kabeel, M. Abdelgaied, R. Sathyamurthy, T. Arunkum, "Performance evaluation and parameter sensitivity analysis of a membrane-based evaporative cooler with built-in baffles," Applied Thermal Engineering. Vol. 208, pp. 118228, 2017.
- [14] R. Tariq, N. Ahmed Sheikh, J. Xamán, A. Bassam, "Recovering waste energy in an indirect evaporative cooler – A case for combined space air conditioning for human occupants and produce commodities," Building and Environment. Vol. 152, pp. 105-121, 2019.
- [15] Y. Wan, Z. Huang, A. Soh, X. Cui, K. Jon Chua, "Analysing the transport phenomena of novel dew-point evaporative coolers with different flow configurations considering condensation," International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 170, pp. 120991, 2021.
- [16] S. Hossein Elahi, S.D. Farhani, "Increasing evaporative cooler efficiency by controlling water pump run and off times," International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 127, pp. 105525, 2021.
- [17] T. Theamtat, "Modeling and analysis of a hybrid evaporative cooling vapor compression air-conditioning," Thesis

- M.Eng. (Mechanical and Process), Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 2019.
- [18] C. T'Joel, Y. Park, Q. Wang, A. Sommers, X. Han, A. Jacobi, "A review on polymer heat exchangers for HVAC&R applications," *International Journal of Refrigeration*. Vol. 32, pp. 763–779, 2009.
- [19] R. Boukhanouf, O. Amer, H. Ibrahim, J. Calautit, "Design and performance analysis of a regenerative evaporative cooler for cooling of buildings in arid climates," *Building and Environment*, Vol.142, pp. 1-10, 2018.
- [20] 2001 ASHRAE Fundamentals Handbook (SI), Chapter 6: Psychrometrics, 6.1–6.17. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2002), Atlanta.
- [21] S. Thiangchanta, T. Anh Do, P. Suttakul, Y. Mona, "Energy reduction of split-type air conditioners using a pre-cooling system for the condenser," *Energy Reports*, Vol. 7, pp. 1-6, 2021.

การพัฒนาผลิตภัณฑ์หมั่นโถวทดแทนแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวดำ

นิตยา ภูงาม¹ บัญชา ห่อทอง¹ โสรยา พูนสวัสดิ์¹ และ ญัฐวลิณคล เศรษฐปราชโมทย์^{2*}

¹คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

¹145 หมู่ 15 ตำบลนอกเมือง อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ 32000

²41/1 หมู่ 7 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

รับบทความ 26 กรกฎาคม 2565 แก้ไขบทความ 7 มีนาคม 2566 ตอรับบทความ 5 เมษายน 2566

บทคัดย่อ

การใช้แป้งข้าวโพดข้าวเหนียวดำ (Purple waxy corn flour: PWCF) ทดแทนเพื่อปรับปรุงคุณภาพและเพิ่มคุณค่าทางสารอาหารให้กับผลิตภัณฑ์หมั่นโถว โดยทดแทน PWCF ที่อัตราส่วน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 15, 30 และ 45 เปรียบเทียบกับสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) พบว่า ความชื้นของหมั่นโถวที่มีการเติม PWCF ทั้ง 3 ระดับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ต่างจากชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม PWCF ($p > 0.05$) แต่อย่างไรก็ตามการเติม PWCF ร้อยละ 30 ส่งผลให้ค่าการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้น เท่ากับ ร้อยละ 63.24 และปริมาตรจำเพาะสูงกว่าสูตรอื่น ๆ เล็กน้อย (เท่ากับ ร้อยละ 1.85) นอกจากนี้การทดแทน PWCF ร้อยละ 30 มีผลทำให้ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น (เท่ากับ 6.08 และ 10.49 ตามลำดับ) เมื่อนำผลิตภัณฑ์หมั่นโถวทดแทน PWCF ร้อยละ 30 เก็บรักษา ณ อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน เปรียบเทียบกับสูตรควบคุม พบว่า ผลิตภัณฑ์หมั่นโถวทดแทน PWCF ร้อยละ 30 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ เช่น ค่าความยืดหยุ่น การอุ้มน้ำ และปริมาตรจำเพาะต่ำกว่าสูตรควบคุม นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ทดแทนด้วย PWCF ร้อยละ 30 ส่งผลให้มีปริมาณองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน เยื่อใย เถ้า และปริมาณสารแอนโทไซยานิน (ร้อยละ 3.45, 7.50, 0.61 และ 7.35 มิลลิกรัม ตามลำดับ) ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าหมั่นโถวสูตรควบคุมที่มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 2.52, 6.50, 0.44 และ 0 มิลลิกรัม ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

คำสำคัญ : ผลิตภัณฑ์หมั่นโถว; แป้งข้าวโพดข้าวเหนียวดำ; แอนโทไซยานิน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 7575 3966, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: natwalin@rmutl.ac.th

The Development of Mantou Product Supplement Purple Waxy Corn Flour

Nittaya Phungam¹ Buncha Hothong¹ Soraya Phoonsawat¹ and
Natwalinkhol Settapramote^{2*}

¹Faculty of Agriculture and Technology Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus

²Faculty of Science and Agricultural Technology Rajamangala University of Technology Lanna Tak

¹145 Moo 15, Nok Mueang Subdistrict, Mueang District, Surin Province 32000

²41/1 moo 7 Paholayothin road , Mai Ngam , Muang, Tak, Thailand, 63000

Received 26 July 2022; Revised 7 March 2023; Accepted 5 April 2023

Abstract

The replacement of wheat flour with purple waxy corn flour (PWCF) in mantou product at three levels, 15, 30 and 45 % was compared with control (0% PWCF). The results demonstrated that the moisture contents of mantou product with varying amounts of PWCF were no significant difference but were different from control sample without PWCF ($p > 0.05$). However, the addition of 30% PWCF to mantou product resulted in an increase in water holding characteristics (63.24%) and a slightly higher specific volume than other formulas (1.85%). Additionally, 30% PWCF replacement resulted in an increase in redness (a^*) and yellowness (b^*) values (6.08 and 10.49, respectively). When the mantou products were stored at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 28 days, it was found that the 30% PWCF replacement mantou product tended to change in qualities such as texture (springiness), water holding characteristics and specific volume. In addition, mantou products that were replaced with 30% PWCF and control sample were significant difference in chemical components, such as protein, fiber, ash, and anthocyanin ($p \leq 0.05$). The protein, fiber, ash, and anthocyanin contents of mantou products with 30% PWCF were 3.45 %, 7.50 %, 0.61%, and 7.35 mg, respectively which were higher than control mantou product (2.52 %, 6.50 %, 0.44 % and 0 mg, respectively).

Keywords : Mautou Product; Purple Waxy Corn Flour; Development

** Corresponding Author. Tel.: +668 7575 3966, E-mail Address: natwalin@rmutl.ac.th*

1. บทนำ

โดยทั่วไปผู้คนใช้ชีวิตแบบเร่งรีบซึ่งเวลาในแต่ละวันจะหมดไปกับการทำกิจกรรมต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน เช่น การเรียน การทำงาน และการเดินทาง เป็นต้น ดังนั้นอาหารที่รับประทานจึงเป็นอาหารประเภทที่มีความสะดวกและรวดเร็วในการบริโภค เช่น ขนมปัง หนัมนั้เโหว แชนวิช และ คูกี้ เป็นต้น ซึ่งผู้บริโภคส่วนใหญ่ไม่ค่อยให้ความสำคัญกับการเลือกรับประทานอาหารที่เป็นประโยชน์เท่าที่ควร เนื่องจากว่ามีข้อจำกัดด้านเวลาซึ่งเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ผู้บริโภคได้รับสารอาหารที่จำเป็นไม่เพียงพอต่อความต้องการของร่างกายส่งผลให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคต่าง ๆ ได้ง่าย และหนัมนั้เโหวจัดเป็นผลิตภัณฑ์ในกลุ่มขนมประเภทหนึ่งที่ได้รับคามนิยมอีกชนิดหนึ่งที่หาซื้อได้ทั่วไปและราคาไม่แพงตามริมถนนและในร้านสะดวกซื้อ ซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการของกลุ่มผู้บริโภคที่มีเวลาจำกัดต้องการความสะดวก และรวดเร็ว [1]

หนัมนั้เโหวเป็นแป้งนึ่งก้อนกลม ๆ สีขาวนวลเนียนเป็นที่นิยมบริโภคอย่างมากในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งคนไทยนั้เโหวมารับประทานกับชาหมี โดยมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ แป้งสาลี น้ำตาล และ ยีสต์ ซึ่งยีสต์จะเป็นตัวที่ช่วยให้ขึ้นฟูโดยยีสต์จะหมักน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ทั้งจากแป้งและน้ำตาลที่เติมลงไปในส่วนผสมของหนัมนั้เโหวให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และแอลกอฮอล์ทำให้เกิดกรดและเอสเทอร์มีผลทำให้เกิดโด (Dough) มีสภาพเป็นกรดอ่อนซึ่งจะทำให้กลูเตนอ่อนตัวมีลักษณะยืดหยุ่นและขยายตัวมากขึ้นสามารถเก็บกักก๊าซไว้ในโครงสร้างทำให้ผลิตภัณฑ์มีความยืดหยุ่น มีรูอากาศ และมีกลิ่นเฉพาะตัว เนื่องจากหนัมนั้เโหวมีวัตถุดิบหลัก คือ แป้งสาลีจึงเป็นเหตุให้มีคุณค่าทางโภชนาการต่ำ [2] จากรายงานวิจัยต่าง ๆ มีแนวทางเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระให้กับหนัมนั้เโหว ได้แก่ การใช้แป้งกล้วยดิบทดแทนแป้งสาลีในหนัมนั้เโหวทำให้เส้นใยและแร่ธาตุ เช่น โพรแต

สเซียม แคลเซียม และ แมกนีเซียมเพิ่มขึ้น [3] แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาแป้งหนัมนั้เโหวให้มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น เช่น แป้งจากข้าวกล้อง พักทอง มันเทศ และเผือกมาทดแทนแป้งสาลีให้เป็นทางเลือกใหม่สำหรับผู้บริโภค งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพื้ชอีกประเภทหนึ่งมาพัฒนาเป็นแป้งเพื่อนำมาประกอบอาหาร ได้แก่ ข้าวโพดข้าวเหนียวดำ โดยข้าวโพดชนิดนี้มีสารแอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นรงควัตถุธรรมชาติในกลุ่มฟลาโวนอยด์พบในส่วนที่มีสีน้ำเงิน สีม่วง สีแดง และสีส้มของผลไม้และผักจำนวนมาก [4] ซึ่งสารประกอบแอนโทไซยานินมีความสามารถในการต้านทานสารอนุมูลอิสระได้สูงกว่าวิตามินซี ช่วยลดโอกาสการเกิดมะเร็ง ช่วยเสริมสร้างให้ร่างกายต่อต้านเชื้อโรค สมานแผล เสริมภูมิคุ้มกันได้ดี และส่งเสริมการทำงานของเม็ดเลือดแดงอีกด้วย [5] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำข้าวโพดเหนียวดำมาพัฒนาเป็นแป้งเพื่อนำมาเสริมในแป้งสาลีบางส่วนในการทำผลิตภัณฑ์หนัมนั้เโหว เพื่อเป็นการนำคุณประโยชน์ของข้าวโพดเหนียวดำดังที่กล่าวมาข้างต้นมาช่วยพัฒนาผลิตภัณฑ์หนัมนั้เโหวเพื่อให้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้บริโภคกลุ่มที่ต้องการทานหนัมนั้เโหวที่มีคุณค่าทางสารอาหารที่และเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพมากยิ่งขึ้น รวมทั้งมีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาหนัมนั้เโหวให้เก็บรักษาไว้รับประทานได้นานมากยิ่งขึ้น

2. แนวคิด และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์หนัมนั้เโหวจัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมในการรับประทานกันอย่างแพร่หลาย โดยองค์ประกอบหลักของหนัมนั้เโหวจะผลิตจากแป้งสาลีเป็นหลักจึงมีผลการวิจัยด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ได้มีการนำแป้งชนิดต่าง ๆ ได้แก่ แป้งข้าว และแป้งธัญพืชเป็นต้นนำมาทดแทนการใช้แป้งสาลีที่ต้องมีการนำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยการนำแป้งที่หาได้ภายในประเทศมาใช้ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนในการทำผลิตภัณฑ์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุพิชญา [6] ที่มี

การทดแทนแป้งข้าวหอมนิล (Hom Nil Rice) เป็นข้าวที่มีสีที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ 78.09) โปรตีน (ร้อยละ 9.68) ไขมัน (ร้อยละ 3.71) โยอาหาร (ร้อยละ 4.58) มีสารประกอบฟีนอลิกในปริมาณ 588.28 มิลลิกรัม GAE/100 กรัม และสารแอนโทไซยานินเท่ากับ 65.85 มิลลิกรัม CyGE/100 กรัม แกมมา-โอริซานอล (γ -Oryzanol) แอลฟา-โทโคฟีรอล (α -Tocopherol) มาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์หมั่นโถวเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการที่ได้จากองค์ประกอบทางเคมีดังที่กล่าวมาข้างต้นรวมทั้งช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวให้ดียิ่งขึ้น [6] โดยในงานวิจัยนี้มีการนำแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวกำลังมาทดแทนในผลิตภัณฑ์ ซึ่งข้าวโพดสีม่วงมีองค์ประกอบของแอนโทไซยานินที่มีเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) หรือกำจัดอนุมูลอิสระ มีคุณสมบัติช่วยชะลอความเสื่อมของเซลล์ ลดอัตราเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจ และลดอัตราเส้นเลือดอุดตันในสมอง นอกจากนี้ช่วยยับยั้งไม่ให้เลือดจับตัวเป็นก้อน ชะลอความเสื่อมของดวงตา ช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen) อีโคไล (*Escherichia coli*) ในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคท้องร่วงและอาหารเป็นพิษ [7] ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิเช่นกระบวนการแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการเก็บรักษาอาหาร โดยช่วงอุณหภูมิที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมคือ -18 ถึง -20 องศาเซลเซียส กระบวนการแช่เยือกแข็งใช้หลักการเปลี่ยนน้ำในอาหารให้แปรสภาพจากของเหลวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส กลายเป็นของแข็งภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส เมื่อน้ำในอาหารซึ่งเป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี และจุลินทรีย์กลายเป็นของแข็งจึงหยุดการเจริญ และชะลอกระบวนการเสื่อมเสียของอาหารที่เกิดจากปฏิกิริยาข้างต้น แต่ระหว่างการแช่เยือกแข็งหรือละลายอาหาร (Freezing and Thawing) ให้กลับมาสู่ลักษณะพร้อมใช้หรือบริโภค มี

การเปลี่ยนแปลงทางเคมี และกายภาพเกิดขึ้นมากมายที่ส่งผลต่อคุณภาพของอาหาร ได้แก่ กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และสารอาหาร [8]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีการเตรียมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวกำลัง

นำข้าวโพดข้าวเหนียวกำลัง (โดยอายุเก็บเกี่ยว 65 วัน) มาปอกเปลือกด้วยน้ำสะอาดปาดเมล็ดข้าวโพดออกจากฝัก นำข้าวโพดที่ได้อัตราส่วนข้าวโพด:น้ำเท่ากับ 1:1 ไปต้มเปื่อยทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 24 ชั่วโมง ล้างทำความสะอาดแป้ง 4-5 ครั้ง นำแป้งไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อุณหภูมิ 55-60 องศาเซลเซียส เวลา 8 ชั่วโมง บดแป้งข้าวโพดให้เป็นผงละเอียดและนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช เก็บในถุงไนลอน/พีอีปิดผนึกสุญญากาศแล้วห่อด้วยถุงอะลูมิเนียมฟอยด์เก็บไว้ในที่มีดจนกว่าจะนำมาใช้งานต่อไป [9]

3.2 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแป้งข้าวโพดเหนียวกำลังต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์หมั่นโถว

ทำการศึกษาการเสริมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวกำลัง 3 ระดับ คือ ร้อยละ 15 30 และ 45 ตามลำดับ (ตารางที่ 1) ส่วนผสมของผลิตภัณฑ์หมั่นโถว ได้แก่ น้ำตาลทรายขาว ผงฟู ยีสต์ เนยขาว เกลือ และ น้ำเปล่า ปริมาณ 75, 6, 30, 1 กรัม และ 138 มิลลิลิตร ตามลำดับและศึกษาคุณภาพของหมั่นโถวที่ได้เพื่อคัดเลือกสูตรที่ดีที่สุด

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนการทดแทนแป้งข้าวโพดเหนียวกำลังในผลิตภัณฑ์หมั่นโถว

ส่วนผสม	อัตราส่วน (ร้อยละ)			
	0	15	30	45
แป้งสาลี	100	85	70	65
แป้งข้าวโพดข้าวเหนียวกำลัง	0	15	30	45

โดยมีขั้นตอนการผลิตหมั่นโถวด้วยวิธีการนี้ ทำการร่อนแป้งกับผงฟู น้ำตาลและเกลือละลายในน้ำสะอาด แล้วผสมยีสต์เข้าด้วยกันในอ่างผสม เทส่วนผสมของเหลวลงไปนวดกับส่วนผสมของแห้ง จากนั้นนวดให้เข้ากันจนส่วนผสมไม่ติดมือ แล้วใส่เนยขาวลงไปนวดต่อจนส่วนผสมเป็นก้อนโด และพักก้อนโดไว้ประมาณ 50-60 วินาที นำมาไล่อากาศ แล้วตัดแบ่งเป็นก้อน ก้อนละ 30 กรัม คลึงให้ผิวหน้าโดเรียบเนียนพักไว้ 10 นาที นำนึ่งในน้ำเดือด 15 นาที [4] จากนั้นทำการศึกษาคุณภาพของหมั่นโถว โดยการนำหมั่นโถวที่ผ่านการนึ่งด้วยไอน้ำเป็นเวลา 5 นาที พักให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) 5 นาที ก่อนวัดคุณภาพดังต่อไปนี้

1) วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส [4] วัดค่าความยืดหยุ่น (Springiness) ของหมั่นโถว ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture analyzer: TA. XTi/50) ทำการทดลองวิธีละ 3 ซ้ำ ใช้หัววัดรูปทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ความเร็วในการวัด 5 มิลลิเมตร ต่อ นาที และวัดโดยโปรแกรม Texture profile analysis (TPA) (จำนวน 6 ซ้ำ)

2) วิเคราะห์ค่าสี L^* a^* และ b^*

นำตัวอย่างหมั่นโถวมาวิเคราะห์ค่าสีโดยใช้เครื่อง Colorimeter รุ่น WR-10 ใช้ระบบ CIE $L^*a^*b^*$ โดยค่า L^* หมายถึง ค่าความสว่าง ค่า a^* หมายถึง ค่าของสีแดง (+) และสีเขียว (-) และค่า b^* หมายถึง ค่าของสีเหลือง (+) และสีน้ำเงิน (-) (จำนวน 6 ซ้ำ)

3) ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume)

ปริมาตรจำเพาะ (specific volume) โดยวิธี Rapeseed displacement ใช้ถั่วเขียวในการแทนที่ ดัดแปลงตามวิธีการของ มอก. (374-2534)

4) วัดปริมาณน้ำอิสระ (Water activity: a_w)

วัดปริมาณน้ำอิสระด้วยเครื่อง Water Activity (ยี่ห้อ AGUA LAB Series 3 TE) บรรจุหมั่นโถวไม่น้อยกว่าครึ่งลงในภาชนะใส่ตัวอย่าง และนำตัวอย่างลงในช่องสำหรับใส่ตัวอย่างปิดฝาเครื่องหมุนปุ่มวัดเพื่ออ่านค่ารอ

จนเครื่องทำงานเสร็จจะมีเสียงเตือนจากนั้นจดบันทึกค่าที่ได้ (จำนวน 6 ซ้ำ)

5) วิเคราะห์ปริมาณความชื้น [10]

ชั่งน้ำหนักหมั่นโถว 3 กรัม กระป๋องอลูมิเนียมที่อบและชั่งน้ำหนักไว้แล้ว นำไปอบในตู้อบลมร้อน (ยี่ห้อ Binder) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง ทำให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 30 นาที แล้วชั่งน้ำหนักจากนั้นนำเข้าอบ 1 ชั่วโมงจนน้ำหนักคงที่ (ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน ร้อยละ 0.1) นำไปคำนวณหาปริมาณความชื้น (จำนวน 6 ซ้ำ)

6) ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water Holding Capacity: WHC) [11]

ชั่งน้ำหนักหมั่นโถว 15 กรัม ใส่ในหลอดเซนตริฟิวส์ นำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 14 นาที ทำตัวอย่างให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปเซนตริฟิวส์ที่ 9000 รอบต่อนาที นาน 20 นาที ชั่งน้ำหนักส่วนของเหลว และส่วนเนื้อที่เหลือจากการเซนตริฟิวส์คำนวณความสามารถในการอุ้มน้ำ ดังสมการนี้

ความสามารถในการอุ้มน้ำ (ร้อยละ)

$$= (\text{น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)} - \text{น้ำหนักหลัง (กรัม)}) \times 100$$

3.3 การศึกษาอายุการเก็บรักษาของหมั่นโถวเสริมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว

นำหมั่นโถวที่ผ่านการคัดเลือกจากการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแป้งข้าวโพดเหนียวมาต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์หมั่นโถว มาบรรจุในถุงไนลอน/พีอี จากนั้นปิดผนึกจากนั้นนำไปเก็บรักษา ณ อุณหภูมิ - 18 องศาเซลเซียส เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 เดือน จากนั้นสุ่มตัวอย่างทุก 7 วัน (0, 7, 14, 21 และ 28 วัน) และนำมาวิเคราะห์คุณภาพต่าง ๆ ได้แก่ วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส ค่าสี L^* a^* และ b^* ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) และปริมาณน้ำอิสระ (จำนวน 6 ซ้ำ)

3.4 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์หมักโถวเสริมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวเก่า โดยนำผลิตภัณฑ์หมักโถวที่ผ่านการคัดเลือกมาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีดังต่อไปนี้

- 1) วิเคราะห์ปริมาณความชื้น [10]
- 2) วิเคราะห์ปริมาณโปรตีน โดยวิธี Kjeldahl [10]
- 3) วิเคราะห์ปริมาณไขมัน โดยวิธี Soxhlet (Soxhlet system) [10]
- 4) วิเคราะห์ปริมาณเยื่อใย [10]
- 5) วิเคราะห์ปริมาณเถ้า [10]
- 6) วิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต
- 7) วิเคราะห์ปริมาณสารแอนโทไซยานิน

การวิเคราะห์เริ่มจากเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1 (KCl-HCl buffer) และ pH 4.5 (CH_3COONa -HCl) จากนั้นปเปตสารสกัดที่ความเข้มข้น 0.1 mg/ml ปริมาตร 0.3 ml ลงในสารละลาย pH บัฟเฟอร์ปริมาตร 2.7 ml ผสมให้เข้ากัน และทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงในสารละลาย pH 1 และ pH 4.5 ที่ความยาวคลื่น 510 และ 700 nm และนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณหาปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (TA) [12]

3.5 วิเคราะห์ทางสถิติ

การศึกษาคุณภาพทางกายภาพ และการศึกษาอายุการเก็บรักษาของหมักโถวเสริมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวเก่าเปรียบเทียบคุณภาพของตัวอย่างและชุดควบคุมด้วยสถิติ จากการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design : CRD) วิเคราะห์หาความแตกต่างทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance ANOVA) และหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 ($p \leq 0.05$)

4. ผลการศึกษา

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์หมักโถวทดแทนแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวเก่า อัตราส่วน ร้อยละ 0, 15, 30 และ 45 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวเก่าจะส่งผลให้หมักโถวมีค่าความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น (6.46, 6.82, 9.05 และ 10.22 นิวตัน ตามลำดับ) ($p \leq 0.05$) ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์หมักโถวทุกสิ่งทดลองมีค่าสูง (0.94, 0.96, 0.96 และ 0.96 ตามลำดับ) ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ค่าความชื้นสูตรทดแทน ทั้ง 3 สูตร เท่ากับ ร้อยละ 33.09, 33.36 และ 33.77 ตามลำดับ ($p > 0.05$) และการวิเคราะห์การอุ้มน้ำของหมักโถว พบว่า การทดแทน PWCF ร้อยละ 30 เท่ากับ 63.24 ($p \leq 0.05$) สอดคล้องกับปริมาตรจำเพาะของผลิตภัณฑ์หมักโถวแสดงให้เห็นว่าสูตรทดแทน PWCF ร้อยละ 30 มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ ร้อยละ 1.85 จากการวิเคราะห์ค่าความสว่าง (L^*) แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวเก่ามากขึ้นจะส่งผลให้ค่า L^* ของหมักโถว มีค่าลดลง เท่ากับ 74.73, 56.62, 51.61 และ 44.63 ตามลำดับ และค่าความเป็นสีแดง (a^*) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวเก่ามากขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์หมักโถวมีค่า a^* เพิ่มขึ้น (0.76, 3.73, 6.08 และ 6.34 ตามลำดับ) ทั้งนี้ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) พบว่า มีแนวโน้มลดลง (3.39, 5.53, 10.49 และ 6.62 ตามลำดับ) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 2 และ 3) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์หมักโถวที่ทดแทน PWCF ร้อยละ 30 มีปริมาณการอุ้มน้ำ และปริมาตรจำเพาะ ที่มีค่าเหมาะสมที่สุดที่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หมักโถวมีคุณภาพดีสามารถนำไปศึกษาคุณภาพด้านอื่น ๆ ต่อไปได้ เนื่องจากในอัตราส่วนการทดแทน PWCF ร้อยละ 30 มีปริมาตรจำเพาะที่สูงกว่าสูตรและลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 2 ผลการศึกษาคุณลักษณะทางเคมี-กายภาพของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวทอดแทนแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวเก่า

ประเมินคุณภาพ	ปริมาณแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวเก่า (ร้อยละ)			
	0	15	30	45
ความยืดหยุ่น (นิวตัน)	6.46±0.41 ^c	6.82±0.98 ^c	9.05±0.60 ^b	10.22±0.39 ^a
a_w^{ns}	0.94±0.01	0.96±0.01	0.96±0.01	0.96±0.01
ความชื้น (ร้อยละ)	34.12±0.50 ^a	33.09±0.42 ^b	33.36±1.53 ^b	33.77±0.65 ^b
การร่อนน้ำ (ร้อยละ)	52.59±5.07 ^c	50.95±9.73 ^d	63.24±3.93 ^a	56.93±3.24 ^b
ปริมาตรจำเพาะ (ร้อยละ)	1.39± 0.40 ^b	1.42± 0.34 ^b	1.85± 0.27 ^a	1.10± 0.17 ^c

หมายเหตุ : a, b, c, d อักษรที่แถวเดียวกันแตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$); อักษร ^{ns} แถวเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาค่าสี L^* , a^* และ b^* ของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวเสริมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวเก่า

ค่าสี	ปริมาณแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวเก่า (%)			
	0	15	30	45
L^*	74.73±2.49 ^a	56.62±3.64 ^b	51.61±6.46 ^b	44.63±4.23 ^c
a^*	0.76±0.23 ^c	3.73±0.67 ^b	6.08±1.44 ^a	6.34±1.46 ^a
b^*	3.39±1.00 ^d	5.53±1.15 ^c	10.49±1.32 ^a	6.62±0.82 ^b

หมายเหตุ : a, b, c, d อักษรแถวเดียวกันที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



หมั่นโถวสูตรควบคุม

หมั่นโถวสูตรทดแทน
PWCF
ร้อยละ 30

รูปที่ 1 ลักษณะของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) และผลิตภัณฑ์หมั่นโถวทดแทนแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวเก่า ร้อยละ 30

จากการศึกษาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส (ความยืดหยุ่น) ของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) และหมั่นโถวทดแทน PWCF ร้อยละ 30 ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ณ อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นค่าความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวทั้ง 2 สูตร มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 0-28 วัน ผลิตภัณฑ์หมั่นโถวสูตรทดแทน PWCF ร้อยละ 30 มีค่าความยืดหยุ่นสูงกว่า (เท่ากับ 6.38-8.97 นิวตัน) สูตรควบคุมที่มีค่าเท่ากับ 6.09-7.29 นิวตัน และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่ายืดหยุ่น (Springiness) ของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวทดแทนแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวเก่า ร้อยละ 30 และหมั่นโถวสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ณ อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาในการเก็บรักษา (วัน)	ค่ายืดหยุ่น (Springiness; นิวตัน)	
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 30
0*	6.09±0.34	6.38±0.46
7*	6.39±0.32	6.97±1.26
14*	7.29±0.11	8.97±0.79
21*	10.32±0.46	10.09±0.42
28*	11.78±0.52	11.15±0.41

หมายเหตุ : * อักษรแถวเดียวกันที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณการอุ้มน้ำ และปริมาตรจำเพาะ ของผลิตภัณฑ์หมักโกลสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) และหมักโกลทดแทน PWCF ร้อยละ 30 ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ณ อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า เมื่อเก็บรักษานานขึ้นปริมาณการอุ้มน้ำของหมักโกลทั้ง 2 สูตร มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เมื่อเก็บรักษาหมักโกลเสริม แป้ง PWCF ร้อยละ 30 เป็นเวลา 7-28 วัน มีปริมาณการอุ้มน้ำสูงกว่า (เท่ากับ ร้อยละ 59.50, 56.78, 49.84 และ 39.64 ตามลำดับ) สูตรควบคุม (เท่ากับ ร้อยละ 58.64, 54.34, 45.36 และ 38.34 ตามลำดับ) ($p<0.05$) สอดคล้องกับการวิเคราะห์ปริมาตรจำเพาะที่เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้นทำให้ปริมาตรจำเพาะของหมักโกลทั้ง 2 สูตร มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาจากผลการศึกษาจะเห็นว่าหมักโกลสูตรควบคุมในช่วงการเก็บรักษาวันที่ 0-21 วัน มีปริมาตรจำเพาะสูงกว่า (เท่ากับ ร้อยละ 4.16, 3.56, 3.73, 2.46 และ 1.36) สูตรหมักโกลทดแทน PWCF ร้อยละ 30 (เท่ากับ ร้อยละ 1.74, 1.65, 1.50, 1.36 และ 1.16) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะของหมักโกลในแต่ละวันแสดงให้เห็นว่าหมักโกลทดแทน PWCF ร้อยละ 30 มีแนวโน้มลดลงน้อยกว่าสูตรควบคุม ($p\leq 0.05$) (ตารางที่ 5 และ 6)

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการอุ้มน้ำของผลิตภัณฑ์หมักโกลเสริมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวร้อยละ 30 และหมักโกลสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ณ อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาในการเก็บรักษา (วัน)	ปริมาณการอุ้มน้ำ (ร้อยละ)	
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 30
0*	68.34±3.17	63.34±4.97
7*	58.64±1.97	59.50±8.40
14*	54.34±6.03	56.78±5.16
21*	45.36±5.36	49.84±7.18
28*	38.34±6.31	39.64±6.18

หมายเหตุ : * อักษรแถวเดียวกันที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ปริมาตรจำเพาะของผลิตภัณฑ์หมักโกลเสริมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวร้อยละ 30 และหมักโกลสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ณ อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาในการเก็บรักษา (วัน)	ปริมาตรจำเพาะ (ร้อยละ)	
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 30
0*	4.16±0.12	1.74±0.28
7*	3.56±0.23	1.65±0.19
14*	3.73±0.11	1.50±0.31
21*	2.46±0.24	1.36±0.12
28 ^{ns}	1.36±0.31	1.16±0.22

หมายเหตุ : * อักษรแถวเดียวกันที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$); อักษร ^{ns} แสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

จากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ และค่าความชื้น (ร้อยละ) ของผลิตภัณฑ์หมักโกลสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) และหมักโกลทดแทน PWCF (ร้อยละ 30) เก็บรักษาเป็นเวลา 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ณ อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเก็บรักษานานขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยปริมาณน้ำอิสระของทั้ง 2 สูตร ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) มีค่าอยู่ในช่วง 0.96-0.98 ตามลำดับ และค่าความชื้นของหมักโกลทั้ง 2 สูตร มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดอายุการเก็บรักษา พบว่าหมักโกลสูตรควบคุม เท่ากับ ร้อยละ 33.19 34.89 34.51 34.36 และ 35.26 และหมักโกลทดแทน PWCF ร้อยละ 30 เท่ากับ ร้อยละ 34.02, 34.29, 33.87, 34.89 และ 35.19 ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 7 และ 8

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใยคาร์โบไฮเดรต และแอนโทไซยานิน ตามลำดับ ของผลิตภัณฑ์หมักโกลเสริมแป้ง PWCF ร้อยละ 30 และหมักโกลสูตรควบคุม

(ร้อยละ 0) พบว่า หมันโกลเสริมแป้ง PWCF ร้อยละ 30 มีปริมาณโปรตีน เยื่อใย เถ้า และสารแอนโทไซยานินสูงกว่า (ร้อยละ 3.45, 7.50, 0.61 และ 7.35 มิลลิกรัม ตามลำดับ) หมันโกลสูตรควบคุม ที่มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 2.52, 6.50, 0.44 และ 0 มิลลิกรัม ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของผลิตภัณฑ์หมันโกลทดแทนแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวกล้า ร้อยละ 30 และหมันโกลสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ณ อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาในการเก็บรักษา (วัน)	ค่า a_w^{ns}	
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 30
0	0.96±0.01	0.96±0.01
7	0.96±0.00	0.97±0.00
14	0.97±0.02	0.97±0.00
21	0.97±0.00	0.98±0.02
28	0.98±0.00	0.98±0.00

หมายเหตุ : อักษร ^{ns} แสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้น (ร้อยละ) ของผลิตภัณฑ์หมันโกลเสริมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวกล้า ร้อยละ 30 และหมันโกลสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) ที่เก็บรักษาเป็นเวลา 0, 7, 14, 21 และ 28 วัน ณ อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาในการเก็บรักษา (วัน)	ค่าความชื้น (ร้อยละ)	
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 30
0*	33.19±0.58	34.02±1.05
7*	34.89±0.28	34.29±0.73
14*	34.51±0.23	33.87±0.47
21*	34.36±0.26	34.89±0.78
28 ^{ns}	35.26±0.13	35.19±0.26

หมายเหตุ : อักษร * ในแถวเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$); อักษร ^{ns} ในแถวเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 9 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์หมันโกลเสริมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวกล้า ร้อยละ 30 และหมันโกลสูตรควบคุม (ร้อยละ 0)

องค์ประกอบทางเคมี	อัตราส่วน	
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 30
ความชื้น (ร้อยละ)*	37.28±0.85	36.30±0.20
ไขมัน (ร้อยละ)*	5.84±0.03	3.70±0.18
โปรตีน (ร้อยละ)*	2.52±2.18	3.45±0.35
เยื่อใย (ร้อยละ)*	6.50±1.52	7.50±1.69
เถ้า (ร้อยละ)๕	0.44±0.02	0.61±0.02
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)*	47.42±0.03	48.44±0.01
ปริมาณสารแอนโทไซยานิน (มิลลิกรัม CyGE/100 กรัม)*	0±0.05	7.35±0.52

หมายเหตุ : * อักษรที่แนวนอน ที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการวิเคราะห์ค่าความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์หมันโกลเสริมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวกล้าที่มีค่าสูงกว่าสูตรควบคุม เนื่องจากแป้งข้าวโพดมีคุณสมบัติมีความเหนียว ยืดหยุ่น และคืนตัวได้ช้า [13] เมื่อนำมาใช้งานร่วมกันกับแป้งสาลีที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน คือ เพิ่มความหนืด ความยืดหยุ่น และทำให้เกิดเจลในอาหารที่แข็งแรง โดยเมตแป้งเมื่อได้รับความร้อนจะดูดซึมน้ำและพองตัวขึ้นทำให้เมตแป้งเคลื่อนที่ยากจนเกิดความหนืดขึ้น แต่แป้งข้าวโพดจะยังมีความยืดหยุ่นจึงทำให้ผลิตภัณฑ์หมันโกลที่ได้มีลักษณะความยืดหยุ่นที่เหนียว นุ่มกว่าการใช้แป้งสาลีชนิดเดียว [14] และจากการวิเคราะห์ค่า a_w ความชื้น และปริมาณจำเพาะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากแป้งข้าวโพดเมื่อเติมเข้าไปในผลิตภัณฑ์แล้วจะเกิดการดูดซับน้ำเข้าไปภายในโครงสร้างและเกิดการอุ้มน้ำไว้ เมื่อมีการให้ความร้อนด้วยวิธีการนึ่งแบ่งจะเกิดเจลภายหลังจากทิ้งให้เย็นตัวลงแบ่งจะมีการจัดเรียงตัว

ใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดซับน้ำเข้ามาอีกและเกิดลักษณะคล้ายฟิล์มหรือผลึกและมีลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างแน่นมากยิ่งขึ้นจึงทำให้สามารถเก็บความชื้น หรือน้ำไว้ภายในโครงสร้างได้มากจึงทำให้ค่า a_w และความชื้นมีค่าใกล้เคียงกับสูตรควบคุม [15]

ผลการศึกษาค่า L^* , a^* และ b^* ของหมั่นโถวเสริมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวก้ามี่ค่าความสว่าง (L^*) ที่ต่ำมีค่าความเป็นสีแดง (a^*) และมีค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ขึ้นตามปริมาณแป้งที่เสริมเข้าไป เนื่องจากแป้งข้าวโพดมีองค์ประกอบของสารสีกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่มีสีม่วงแดงจึงทำให้เมื่อมีการเติมแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวกำลังไปในหมั่นโถวส่งผลให้มีค่าความสว่างลดลง และสีของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเป็นสีแดง หรือ ม่วง เป็นต้น ยิ่งเติมมากเท่าไรสีของผลิตภัณฑ์จะเข้มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด [16] เมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์หมั่นโถวทั้ง 2 สูตร มีแนวโน้มของค่าความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากบวนการนึ่งหมัโถวให้สุกประมาณร้อยละ 80 เป็นการพรีเจลาติไนซ์ของแป้งสาลีและแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวก้ามี่ ซึ่งสามารถยับยั้งการเกิดรีโทรกราเดชันในเจลาแป้งทำให้ผลิตภัณฑ์หมั่นโถวมีความคงตัวในการแช่เยือกแข็ง เนื่องจากกระบวนการเจลาติไนซ์ทำให้โครงสร้างของแป้งอ่อนตัว และช่วยเสริมให้พันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงสามารถต้านทานต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เช่น อุณหภูมิต่ำได้ จึงทำให้แป้งมีการคืนตัวที่ดีช่วยคงลักษณะทางกายภาพเคมีของผลิตภัณฑ์ได้ [17] ดังนั้นเมื่อนำมาทำการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส จึงยังคงมีความยืดหยุ่นและเหนียวนุ่ม รวมทั้งยังเก็บรักษาได้นานมากยิ่งขึ้นเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำ จากการวิเคราะห์ค่าการอุ้มน้ำ และปริมาตรจำเพาะ ของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ที่อุณหภูมิ

-18 องศาเซลเซียส จะทำให้โครงสร้างของแป้งจะเกิดกระบวนการรีโทรกราเดชันจากนั้นแป้งจะมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ ซึ่งจะมีการจัดเรียงตัวแบบเป็นสัณฐานที่เป็นรูปร่าง ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำ และปริมาตรจำเพาะมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ [18] จากการวิเคราะห์ค่า a_w และความชื้นของสูตรควบคุม และทดแทน PWCF ร้อยละ 30 ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากแป้งข้าวโพดเมื่อเติมเข้าไปในผลิตภัณฑ์แล้วจะเกิดการดูดซับน้ำเข้าไปภายในโครงสร้างและเกิดการอุ้มน้ำไว้ เมื่อมีการให้ความร้อนด้วยวิธีการนึ่งแป้งจะเกิดเจลภายหลังจากทิ้งให้เย็นตัวลง แป้งจะมีการจัดเรียงตัวใหม่และมีการแพ็คตัวกันแน่นมากยิ่งขึ้นจึงทำให้สามารถเก็บความชื้นหรือน้ำไว้ภายในโครงสร้างได้มากจึงทำให้ค่า a_w และความชื้นมีค่าใกล้เคียงกับสูตรควบคุม [2]

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหมั่นโถวทดแทน PWCF ร้อยละ 30 พบว่า มีปริมาณโปรตีนเยื่อใย เถ้า และสารแอนโทไซยานินสูงกว่า เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวก้ามี่มีคุณค่าทางสารอาหารสูง ซึ่งประกอบไปด้วย โปรตีนเยื่อใย เถ้า และสารสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารแอนโทไซยานินที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ [16] จึงทำให้เมื่อนำมาเติมภายในผลิตภัณฑ์มีคุณค่าทางสารอาหารเพิ่มขึ้นมากกว่าหมั่นโถวที่มีแค่ส่วนประกอบของแป้งสาลีเป็นหลักอย่างเดียว

5. สรุปผล

การใช้แป้งข้าวโพดข้าวเหนียวก้ามี่ปริมาณร้อยละ 30 เป็นสูตรดีและผ่านการคัดเลือก เนื่องจากมีค่าการอุ้มน้ำอยู่ในระดับที่สูงกว่าหมั่นโถวสูตรอื่น ๆ การอุ้มน้ำเป็นคุณลักษณะที่บ่งชี้ถึงผลิตภัณฑ์ที่ภายหลังการเก็บรักษายังสามารถกักเก็บน้ำไว้ภายในโครงสร้างอาหารได้จึงทำให้หมั่นโถวที่ได้มีความชุ่มฉ่ำไม่แห้ง และมีปริมาตรจำเพาะที่สูงกว่าสูตรอื่น ๆ จึงทำให้หมั่นโถวมีความนุ่ม

และขยายตัวกว่าหมั่นโถวสูตรอื่น ๆ จากการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าหมั่นโถวสูตรควบคุม เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการคัดเลือกเก็บรักษา ณ อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน ส่งผลให้มีคุณภาพที่ดีตลอดจนอายุการเก็บรักษา ดังนั้นหมั่นโถวมีการใช้แป้งข้าวโพดข้าวเหนียวกำลังมีลักษณะที่ดึงดูดใจผู้บริโภคเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภค และช่วยเพิ่มมูลค่าทางการตลาดให้กับวัตถุดิบทางการเกษตรได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการในการทำารทดลองในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Singthong, "Development of healthy bread product from sunchoke (*Helianthus tuberosus* L.) flour," *Journal of Science and Technology Ubon Ratchathani University*, Vol. 21, no. 1, pp. 71-83, January- April. 2019.
- [2] H. Wiangwalai and K. Phuwong, "Effect of red bean flour substituted for wheat flour on physicochemical properties and free radical scavenging activities in steamed bun (Mantou)," *Thai Journal of Science and Technology*, Vol. 7, no. 5, pp. 534-545, April. 2018.
- [3] C. Pakwan, W. Chareemuy and S. Phothiset, "Using banana flour instead of wheat flour in mantou (Research report)," Bachelor's degree dissertation, Dept. Food Technology., Kasetsart University Chaloeem Phrakiat Campus, Thailand, 2018.
- [4] B. Sopa, S. Fudsiri, C. Jitlaka and S. Jantapirak, "Enrich anthocyanin sweet purple corn ice cream," *Agricultural Science Journal*, Vol. 50, no. 2 (Suppl.), pp. 57-60, September-December. 2019.
- [5] T. Rithmanee and A. Phonpannawit, "Anthocyanin encapsulation from purple corn cob by spray Drying," *EAU Heritage Journal Science and Technology*, Vol. 12, no. 2, pp. 169-180, September-December. 2018.
- [6] Khumkhom, S. "Substitution of wheat flour with Hom Nil rice flour affects physicochemical characteristics, antioxidant activities, and sensory acceptance of Chinese steamed bread (Mantou)," *RMUTP Research Journal*, Vol. 14, pp. 135-151. July-December. 2020.
- [7] T. Rongsuphan and S. Kajorncheappunngam, "Anthocyanin content, antibacterial activity and antioxidant capacity of purple corn cob extract via ultrasonic extraction" *Research Journal Phranakhon Rajabhat (Science and Technology)*, Vol. 14, no. 1, pp. 47-61. January-June. 2019.
- [8] P. Srisorn, P. Boontaganon, A. Sopanangkul and Y. Terapatponchai, "Effect of frozen storage on quality of chormuang dough contains pregelatinized Hom Nil flour," *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, Vol. 22, no. 3, pp. 92-102. September- December. 2019.
- [9] A. Wongwai and A. Niyomram, (2019). "The development of vintnamese rice noodle

- from purple waxy corn flour (Report),” Bachelor's degree dissertation, Dept. Food Technology, Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus, Thailand, 2019.
- [10] AOAC, *Official Method of Analysis of AOAC International*. 18th ed. Virginia: Arlington, 2005.
- [11] T. Juntachote, “Influence of carrageenan addition on physico-chemical and sensory properties of low-fat chicken sausages,” *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, Vol. 28, no. 3, pp. 605-616, January- April. 2018.
- [12] Y. Shao, F. Xu, X. Sun, J. Bao and T. Beta, “Identification and quantification of phenolic acid and anthocyanin as antioxidant in bran, embryo and endosperm of white, red and black rice kernels (*Oryza sativa* L.),” *Journal of Cereal Science*, Vol. 59, no. 2, pp. 211-218, September-December. 2014.
- [13] R. B. Klosgen, A. Gierl, Z. Schwarz-Sommer and H. Saedler, “Molecular analysis of the waxy locus of *Zea mays*,” *Molecular and general Genetics*, Vol. 203, pp. 237-244. March. 1986.
- [14] S. Sisang, “Properties of starch affecting the processing of aquatic products,” Bachelor's degree dissertation, Dept. Fisheries, Aquatic Industry Technology Research and Development Division, Thailand, 2019.
- [15] N. Limsanguan, C. Jarunuch, W. Suthes, P. Srichayech, and K. Puntabutr, “Study of physical and chemical properties of modified corn grit flour by extrusion process,” *Journal of Science and Technology*, Vol. 26, no. 4, pp. 563-574. March-April. 2009.
- [16] A. Wongwai, A. Niyomram, N. Phungarm, N. Sethapramote, and W. Utto, “Effect of purple waxy corn flour on Quality of Kuay Jub Ubon Noodle Products (Research report),” Bachelor's degree dissertation, Dept. Food Technology, Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus, Thailand, 2021.
- [17] P. Srisorn, P. Boontaganon, A. Sopanangkul, and Y. Terapatponchai, “Effect of frozen storage on quality of chormuang dough contains pregelatinized hom nil flour,” *RMUTSB Academic Journal (Humanities and Social Sciences)*, Vol. 8, no. 2, pp. 199-214. January-June. 2020.
- [18] J. Ratseewo, F. Warren and S. Siriamornpun, “The influence of starch structure and anthocyanin content on the digestibility of Thai pigmented rice,” *Food Chemistry*, Vol. 298, pp. 124-149. January-June. 2019.

การพัฒนาผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงา

จรรยา คงแก้ว¹ พิศมัย กรุดพิศมัย² และ น้อมจิตต์ สุธิบุตร^{3*}

¹แผนกวิชาอาหารและโภชนาการ วิทยาลัยอาชีวศึกษาสุราษฎร์ธานี

²สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ วิทยาลัยอาชีวศึกษานครปฐม

³คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

¹456/3 ถ.ตลาดใหม่ ต.ตลาด อ.เมือง จ.สุราษฎร์ธานี 84000

²90 ถนนเทศบาล ตำบลพระปฐมเจดีย์ อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม 73000

³168 ถนนศรีอยุธยา แขวงวังใหม่ เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

รับบทความ 23 เมษายน 2566 แก้ไขบทความ 8 ตุลาคม 2566 ตอรับบทความ 31 ตุลาคม 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงา โดยศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงาที่บดผสมกับน้ำในขั้นตอนการเตรียมน้ำนมข้าว ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของน้ำตาลล้อยังก้วยผงซึ่งเป็นสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทรายในผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวาน ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของผงโปรตีนจากข้าวสำหรับเสริมในสูตรและศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวาน โดยนำนมข้าวชั้นหวานที่ได้ในแต่ละขั้นตอนมาประเมินคุณภาพและวิเคราะห์ผลทางสถิติ จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณของข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงาที่ผสมกับน้ำมีผลต่อความเข้มข้นของนมข้าวชั้นหวาน จากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่าการเตรียมน้ำนมข้าวที่ใช้ข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงาผสมกับน้ำเปล่าอัตราส่วน 10:40 ได้คะแนนความชอบมากกว่าการใช้อัตราส่วน 5:45 และ 15:35 ($p \leq 0.05$) การใช้น้ำตาลล้อยังก้วยผงทดแทนความหวานจากน้ำตาลทรายที่ระดับร้อยละ 30 ทำให้นมข้าวชั้นหวานมีคะแนนความชอบสูงกว่าการทดแทนที่ระดับร้อยละ 40 และ 50 ($p \leq 0.05$) การเสริมผงโปรตีนจากข้าวทำให้นมข้าวชั้นหวานมีสีอ่อนลง ความข้นหนืดสูงขึ้น ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานที่เสริมผงโปรตีนจากข้าวร้อยละ 4 สูงกว่าการเสริมปริมาณร้อยละ 2 และ 6 ($p \leq 0.05$) ผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงาสูตรที่พัฒนาได้ประกอบด้วยน้ำนมข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงาร้อยละ 46 น้ำตาลทรายป่นร้อยละ 35 น้ำตาลล้อยังก้วยผงร้อยละ 15 และผงโปรตีนจากข้าวร้อยละ 4 โดยผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานปริมาณ 100 กรัม ให้พลังงาน 215.66 กิโลแคลอรี มีปริมาณโปรตีน 3.03 กรัม ไขมัน 0.82 กรัม และคาร์โบไฮเดรต 49.04 กรัม และมีปริมาณแอสโทไซยานิน 8.88 มิลลิกรัม

คำสำคัญ : ข้าวไร้ดอกข้า; นมข้าวชั้นหวาน; ผลิตภัณฑ์เลียนแบบนม; ล้อยังก้วย

* ผู้พิมพ์ประสานงาน โทร: +668 5346 4522 ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: nomjit.s@mutp.ac.th

Product Development of Sweetened Condensed Rice Milk from Rai Dok Kha Phang Nga Rice

Janya Khongkaew¹ Pitsamai Grutpisamai² and Nomjit Suteebut^{3*}

¹Food and Nutrition Program, Suratthani Vocational College

²Food and Nutrition Program Nakhon Pathom Vocational College

³Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

1456/3 Talad Mai Road, Talad, Muang, Surat Thani 84000

290 Tesa Rd, Phra Prathom Chedi Sub-district, Mueang Nakhon Pathom, Nakhon Pathom 73000

3168 Sri Ayutthaya Road, Dusit, Wachira Hospital, Bangkok 10300

Received 23 April 2023; Revised 8 October 2023; Accepted 31 October 2023

Abstract

The objectives of this research were to formulate sweetened condensed rice milk from Rai Dok Kha Phang Nga rice by studying the ratio of rice to water in a rice milk-preparation step, to study the suitable amount of Luo Han Kuo powder used as a sweetener for sucrose substitute, to study the appropriate amount of supplementation with rice protein powder, and to analyze nutritional values of sweetened condensed rice milk product. The sweetened condensed rice milk obtained at each stage was evaluated for quality and statistical analysis. From the experiment, it was found that a ratio of crushed rice mixed with water affects the concentration of the product. From the results of sensory evaluation, it was found that the preparation of rice milk using Dok Kha rice mixed with water at a ratio of 10:40 received a higher preference score than using the ratios of 5:45 and 15:35 ($p \leq 0.05$). The use of Luo Han Kuo sugar powder sweetened replaced 30% sugar resulted in the product having a higher preference score than substitutions of 40% and 50% ($p \leq 0.05$). By adding rice protein powder, the sweetened condensed rice milk products had a lighter color. The viscosity was higher, and panelists rated the sweetened condensed rice milk product fortified with 4% rice protein powder more highly than those fortified with 2% and 6% ($p \leq 0.05$). The developed sweetened condensed rice milk product consists of 46% Phang Nga rice milk, 35% granulated sugar, 15% Luo Hang Kuay sugar powder, and 4% rice protein powder. The 100 g of developed sweetened condensed rice milk was 215.66 kcal with a protein content of 3.03 g, 0.82 g of fat, 49.04 g of carbohydrates, and 8.88 mg of anthocyanins.

Keywords: Rai Dok Kha rice; Sweetened condensed rice milk; Immitation milk; Monk fruit

** Corresponding Author. Tel.: +668 5346 4522, E-mail Address: nomjit.s@rmutp.ac.th*

1. บทนำ

ประเทศไทยมีผู้บริโภคบางกลุ่มที่มีปัญหาแพ้โปรตีนจากนมวัวหรือมีข้อจำกัดในการดื่มนมวัว ซึ่งเกิดจากร่างกายมีภาวะพร่องเอนไซม์ย่อยน้ำตาลแลคโตสในนม จากสถิติพบภาวะนี้ในคนไทยประมาณร้อยละ 3 [1] [2] ดังนั้นจึงมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์นมจากพืชหลากหลายชนิดเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์นมทางเลือกให้แก่ผู้บริโภค อาทิ นมจากถั่ว กระเจี๊ยบ [3] ข้าวโพด ลูกเดือย และข้าวชนิดต่างๆ [4] และผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เลียนแบบนม นมเปรี้ยวโยเกิร์ต [5], [6], [7], [8] เป็นต้น โดยมีทั้งการใช้ส่วนของเมล็ด ผัก หรือหัวพืชมาผลิตโดยตรง หรืออาจใช้ในรูปของโปรตีนสกัดจากส่วนของพืชเหล่านั้น

ข้าวที่นิยมมาทำผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพมักเป็นข้าวกลุ่มมีสี ด้วยพบคุณค่าจากสารสีที่มีประโยชน์สูงกว่าข้าวขาว เช่น สารแอนโทไซยานิน ข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงา คือ ข้าวไร้พันธุ์ดอกข้า 50 เป็นข้าวไร้พันธุ์พื้นเมืองที่มีสีน้ำตาลแดงอมม่วง สีแดง หรือสีแดงแกมขาว เมื่อสุกจะมีกลิ่นหอมคล้ายใบเตย ได้รับการขึ้นทะเบียนเป็นสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (GI) ของจังหวัดพังงา เมื่อปี พ.ศ. 2557 [9] ในพื้นที่จังหวัดพังงามีการส่งเสริมการปลูกข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงาเป็นสินค้าชุมชน มีการแปรรูปเบื้องต้นจำหน่ายเป็นข้าวกล้อง ชา และจมูกข้าว ซึ่งได้รับความนิยมในหมู่ผู้รักสุขภาพ คุณค่าทางโภชนาการของข้าวกล้องพันธุ์ดอกข้า 50 มีโปรตีน 7.57 กรัม/100 กรัม วิตามินบี1 0.194 มิลลิกรัม/100 กรัม วิตามินชนิดอัลฟาโทโคฟีรอลและแกมมาโทโคฟีรอล 12.15 และ 13.90 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าข้าวพันธุ์อื่นๆ [10] มีการนำข้าวไร้ดอกข้ามาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เจลลีส ผลิตภัณฑ์จีนอบแห้งจากข้าวไร้ดอกข้าทดแทนการใช้แป้งข้าวเจ้าเพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ชุมชนในท้องถิ่นออกสู่ตลาด [11]

ปัจจุบันผู้บริโภคคำนึงถึงอาหารที่ดีกับสุขภาพ นอกจากหลีกเลี่ยงอาหารที่ทำให้เกิดอาการแพ้แล้ว ยังหลีกเลี่ยงอาหารที่มีคอเลสเตอรอลสูงและเลือกบริโภคอาหารที่ให้พลังงานต่ำด้วย จึงให้ความสนใจบริโภค

อาหารที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลที่ให้พลังงานลดลงหรือไม่ให้พลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารสกัดที่มาจากธรรมชาติมากขึ้น เช่น หญ้าหวาน และน้ำตาลหล่อฮังก้วย [12], [13], [14]

น้ำตาลหล่อฮังก้วยสกัดมาจากผลหล่อฮังก้วย (Monk fruit) ชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Siraitia grosvenori* อยู่ในวงศ์ Cucurbitaceae หรือพืชในวงศ์แตง เป็นไม้เลื้อย มีผลทรงกลมขนาดเล็ก และมีถิ่นกำเนิดในตอนใต้ของประเทศจีนมีสารโมโกรไซด์ (Mogroside) ที่ให้ความหวาน ซึ่งจากการศึกษาการเมตาบอลิซึมของโมโกรไซด์ พบว่าจะไม่ถูกดูดซึมในทางเดินอาหารส่วนบน แต่พบว่ามีเอนไซม์ย่อยของกลูโคสออกโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ใช้เป็นแหล่งพลังงาน จากนั้นโมโกรไซด์ถูกขับออกจากระบบทางเดินอาหาร อาจมีปริมาณเล็กน้อยถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดและถูกขับออกทางปัสสาวะ ซึ่งไม่ส่งผลต่อการเพิ่มของระดับน้ำตาลในเลือด น้ำตาลหล่อฮังก้วยจึงเป็นสารให้ความหวานที่ไม่มีแคลอรี โดยน้ำตาลที่สกัดได้จากหล่อฮังก้วยนั้นให้ความหวานกว่าน้ำตาลทรายประมาณ 150-200 เท่า [12] มีผลดีต่อสุขภาพ สามารถใช้ได้อย่างปลอดภัยและไม่มีผลข้างเคียง มีการละลายที่ดีและทนต่อความเป็นกรดต่าง สามารถใช้ในกระบวนการผลิตที่มีการใช้ความร้อน ทนความร้อนได้สูงถึง 150 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที ใช้ปรับปรุงรสชาติของผลิตภัณฑ์ให้มีรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำตาลในเลือด ไม่ก่อให้เกิดฟันผุ [14], [15]

ปัจจุบันองค์การอาหารและยาสหรัฐอเมริกา (USFDA) ได้ประกาศให้ใช้สารสกัดจากผลหล่อฮังก้วยเป็นสารแต่งรสหวานในอาหารได้ โดยไม่มีการระบุปริมาณขั้นต่ำในการใช้เนื่องจากมีผลข้างเคียงต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณที่ใช้ปรุงแต่งอาหารโดยทั่วไป จึงเป็นสารให้ความหวานที่สกัดจากธรรมชาติอีกทางเลือกในการนำไปใช้ในส่วนผสมของอาหาร และผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ [12] อย่างไรก็ตามด้วยสารสกัดโมโกรไซด์ที่ได้จากหล่อฮังก้วยนั้นมีความหวานสูงมาก การนำสาร

โมโกรไซด์ปริมาณเล็กน้อยผสมในอาหารจึงเกิดการกระจายตัวค่อนข้างยาก ไม่สะดวกในการนำมาใช้งาน น้ำตาลหล่อฮังก้วยที่จำหน่ายสำหรับผู้บริโภคทั่วไปจึงมักผสมสารให้ความหวานแทนน้ำตาลชนิดอื่นด้วย เช่น อิริทริทอล (Erythritol) ซึ่งมีความหวานน้อยกว่าน้ำตาลทรายประมาณ 70% เมื่อผสมกับสารสกัดโมโกรไซด์จึงช่วยให้ปริมาณการใช้ไม่แตกต่างกับการใช้น้ำตาลทราย

โปรตีนจากข้าว มีการสกัดและผลิตจำหน่ายทางการค้าหลายชนิดเพื่อเสริมในผลิตภัณฑ์อาหาร ด้วยไม่มีน้ำตาลแลคโตส ปราศจากกลูเตน อุดมด้วยโปรตีนเหมือนเวย์โปรตีน คุณประโยชน์ของโปรตีนจากข้าว อาทิ เสริมสร้างกล้ามเนื้อและรักษากล้ามเนื้อ ชุ่มชื้นเซลล์ต่างๆ ในร่างกาย คุณค่าทางโภชนาการประมาณ 1,000 กรัม ให้โปรตีน 825 กรัม ไขมัน 83 กรัม พลังงาน 4,290 กิโลแคลอรี [16]

งานวิจัยนี้เล็งเห็นความสำคัญของข้าวไร่ดอกข้าฟงา ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร่ดอกข้าฟงา ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถเพิ่มมูลค่าของข้าวไร่ดอกข้าฟงา สร้างความแปลกใหม่ให้ผลิตภัณฑ์นมชั้นหวาน กลุ่มลูกค้าที่แพ้นมวัว แพ้น้ำตาลแลคโตส สามารถรับประทานได้และลดพลังงานลดปริมาณน้ำตาลด้วยการใช้น้ำตาลหล่อฮังก้วยให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทราย และเพิ่มปริมาณโปรตีนด้วยผงโปรตีนสกัดจากข้าวเพื่อตอบโจทยอาหารเพื่อสุขภาพทางเลือกสำหรับผู้บริโภค

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ศึกษาความเข้มข้นของนํ้านมข้าวไร่ดอกข้าฟงาสำหรับการผลิตนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร่ดอกข้าฟงา

ศึกษาความเข้มข้นของนํ้านมข้าวไร่ดอกข้าฟงา โดยแปรระดับอัตราส่วนข้าวไร่ดอกข้าฟงาต่อนํ้าที่ต่างกัน 3 ระดับ คือ 5:45 10:40 และ 15:35 โดยนํ้าหนักเตรียมนมข้าวชั้นหวานโดยการนำข้าวสารของข้าวไร่ดอกข้าฟงา (ข้าวไร่พันธุ์ดอกข้า 50 จากอำเภอเมืองฟงา)

มาบดให้ละเอียดแล้วแช่ข้าวสารที่บดได้นี้ในนํ้าเปล่าในปริมาณข้าวสารบด:นํ้าเปล่า 50:450 100:400 และ 150:350 (กรัม) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนํ้าส่วนผสมไปให้ความร้อนด้วยการตุ๋นด้วยหม้อไฟฟ้า (Electrolux) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที เติมนํ้าตาลทรายบ่น (ตราลิน) ปริมาณเท่ากับส่วนผสมของนํ้านมข้าว (อัตราส่วน 1:1 คือ นํ้านมข้าว 500 กรัม ผสมนํ้าตาลทรายบ่น 500 กรัม) คนให้นํ้าตาลละลาย ตุ่นต่อเป็นเวลา 8 นาที แล้วนํ้าส่วนผสมมาบ่นให้ละเอียดด้วยเครื่องบ่นไฟฟ้า (Bosch รุ่น MMB66G7M) กรองผ่านกระชอน แล้วนำไปตุ๋นด้วยความร้อน 90 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที บรรจุนมข้าวชั้นหวานในขวดแก้วปิดฝาขณะร้อน (Hot fill) และทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 ± 1 องศาเซลเซียส ระหว่างรอการทดสอบ [17] นํ้านมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร่ดอกข้าฟงา ที่ได้ไปวิเคราะห์คุณภาพต่าง ๆ ดังนี้

1) วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมีโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางสถิติ และเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของสิ่งที่ทดลองด้วยวิธี Duncan' New Multiple Range Test (DMRT) กำหนดนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS ได้แก่ การวัดค่าสี แสดงผลในรูปค่าความสว่าง (L^*) (0-100) ค่าความเป็นสีแดง (a^* ค่าบวก) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^* ค่าบวก) ด้วยเครื่องวัดค่าสี Konica Minolta รุ่น 35000 และวัดค่าความหนืดด้วยเครื่องวัดค่าความหนืด Brookfield Viscometer (RVDV-II+PRO, USA) โดยใช้หัวเข็ม No. 1 ใช้ปริมาณตัวอย่าง 250 มิลลิลิตรต่อการวัดแต่ละครั้ง อ่านค่าที่ระดับความเร็วรอบ 50 rpm บันทึกค่าในหน่วยเซนติพอยส์ (cP) วัดซ้ำ 3 ครั้ง

2) ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยนํ้านมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร่ดอกข้าฟงาที่ได้ไปทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ

(9-point hedonic scale) มีคะแนนตั้งแต่ 1-9 โดยให้คะแนนเท่ากับ 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด คะแนนเท่ากับ 5 หมายถึง บอกรับไม่ถูกว่าชอบหรือไม่ชอบ และคะแนนเท่ากับ 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด) ประเมินผลทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส (ความข้นหนืด) และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 30 คน เป็นนักศึกษาสาขาวิชาอาหารและโภชนาการ วิทยาลัยเทคนิคพังงา วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของสิ่งที่ทดลองด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) กำหนดนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS เพื่อคัดเลือกสูตรที่ได้รับการยอมรับมากที่สุด นำไปศึกษาขั้นตอนต่อไป

2.2 ศึกษาปริมาณการใช้น้ำตาลหล่อฮังก้วยผงให้ความหวานแทนน้ำตาลทรายสำหรับผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร่ดอกข้าฟงาสูตรลดน้ำตาล

นำสูตรผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานที่ผ่านการคัดเลือกจากข้อ 2.1 มาศึกษาปริมาณน้ำตาลหล่อฮังก้วยผง (ยี่ห้อหวานดี WanD น้ำตาลหล่อฮังก้วยผสมอิทธิพล) สำหรับทดแทนความหวานจากน้ำตาลทรายในปริมาณร้อยละ 0 30 40 และ 50 ของน้ำตาลทรายในสูตร (น้ำตาลหล่อฮังก้วยผงที่ใช้ในสูตรหวานเท่ากับน้ำตาลทรายแต่ไม่ให้พลังงาน การเตรียมนมข้าวชั้นหวานที่ใช้น้ำตาลหล่อฮังก้วยผงทดแทนน้ำตาลทรายปนร้อยละ 30 คือ นำนํ้านมข้าวปริมาณ 500 กรัม มาเติมน้ำตาลทรายปน 350 กรัม เติมน้ำตาลหล่อฮังก้วยผง 150 กรัม) จากนั้นนำนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร่ดอกข้าฟงาสูตรลดน้ำตาลทรายไปวิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่ การวัดค่าสี ค่าความหนืด และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส เช่นเดียวกับวิธีการข้อ

2.1 คัดเลือกสูตรที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดเพื่อนำไปศึกษาปริมาณการเสริมผงโปรตีนจากข้าวที่เหมาะสมต่อไป

2.3 ศึกษาปริมาณการเสริมผงโปรตีนจากข้าวสำหรับผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร่ดอกข้าฟงาสูตรลดน้ำตาลและเสริมโปรตีน

นำสูตรผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานสูตรลดน้ำตาลที่ผ่านการคัดเลือกจากข้อ 2.2 มาศึกษาการเสริมผงโปรตีนจากข้าว (ตราวิชามิน, โปรตีน 83%) เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับผลิตภัณฑ์ โดยเสริมในปริมาณแตกต่างกันได้แก่เสริม ร้อยละ 0 2 4 และ 6 (โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด) จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่ ปริมาณโปรตีน [18] ค่าสี ค่าความหนืด และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส เช่นเดียวกับวิธีการข้อ 2.1 คัดเลือกสูตรผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร่ดอกข้าฟงาสูตรที่มีปริมาณโปรตีนเหมาะสม และได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสมากที่สุด

2.4 ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร่ดอกข้าฟงา

นำผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานที่ผ่านการคัดเลือกจากข้อ 2.3 มาวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ ปริมาณความชื้น เถ้า ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรตและค่าพลังงานทั้งหมดได้จากการคำนวณ [18] วิเคราะห์ปริมาณวิตามินอี ชนิดอัลฟาโทโคฟีรอลด้วย HPLC [19] และวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานิน [20] เปรียบเทียบกับคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร่ดอกข้าฟงาสูตรพื้นฐาน

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนข้าวไร่ดอกข้าฟงาต่อน้ำในการเตรียมนมข้าวชั้นหวาน

จากการศึกษาปริมาณข้าวไร่ดอกข้าฟงาอบผสมกับน้ำที่แตกต่างกันในอัตราส่วน 15:35 10:40 และ

5:45 โดยน้ำหนัก และผสมกับน้ำตาลทรายเทียบอัตราส่วนในสูตรนมข้าวชั้นหวานเท่ากับร้อยละ 50 นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร่ดอกข้าฟ้งงาที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวข้นสีน้ำตาลเข้มอมแดง ความเข้มข้นของนมข้าวชั้นหวานลดลงเมื่อใช้น้ำในปริมาณมากขึ้น ผลการวิเคราะห์คุณภาพดังตารางที่ 1 พบว่าสูตรที่มีปริมาณข้าวไร่ดอกข้าฟ้งงาสูงขึ้นมีผลต่อค่าสี L^* a^* และ b^* โดยสีของผลิตภัณฑ์เข้มข้น และความข้นหนืดของผลิตภัณฑ์มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษาเรื่องการผลิตเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากข้าวหอมนิล [21] พบว่าเมื่อปริมาณน้ำลดลง น้ำนมข้าวมีความเข้มข้นสูงขึ้น สีเข้มขึ้น ค่า L^* ของเครื่องดื่มจากข้าวมีค่าลดลงด้วยการใช้น้ำในปริมาณมากไปเจือจางส่วนผสมมีผลทำให้สีของผลิตภัณฑ์อ่อนลง ค่า L^* จึงเพิ่มขึ้น การมีปริมาณข้าวไร่ดอกข้าฟ้งงาในปริมาณที่สูงส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และ ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) สูงขึ้น เนื่องจากข้าวไร่ดอกข้าฟ้งงามีปริมาณแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) เป็นรงควัตถุหรือสารสีที่ให้สีแดงม่วง และน้ำเงิน ทั้งนี้สารแอนโทไซยานินละลายได้ดีในน้ำ ไม่เสถียร สลายตัวได้ง่ายด้วยความร้อน ออกซิเจน และแสงแดด ดังนั้นเมื่อโครงสร้างของแอนโทไซยานินเปลี่ยนแปลงไป สีจึงเปลี่ยนไปด้วย [22]

ข้าวไร่ดอกข้าฟ้งงาที่ บดผสมกับน้ำในอัตราส่วนร้อยละ 15:35 10:40 และ 5:45 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาผลิตเป็นนมข้าวชั้นหวาน พบว่าค่าความข้นหนืดของนมข้าวชั้นหวานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณข้าวและน้ำที่ต่างกัน ถ้าใช้ข้าวปริมาณมากและน้ำปริมาณน้อยมีผลทำให้นมข้าวชั้นหวานที่ได้มีความเข้มข้นสูง ค่าความข้นหนืดที่วัดได้มีค่าสูง อัตราส่วนข้าวไร่ดอกข้าต่อน้ำที่ 5:45 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ค่าความข้นหนืดน้อยที่สุดที่ 4,480 เซนติพอยส์ (cp)

ตารางที่ 1 ค่าสีและค่าความข้นหนืดของนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร่ดอกข้าฟ้งงาที่มีปริมาณข้าวบดผสมกับน้ำอัตราส่วนต่างกัน

คุณภาพทางกายภาพ	อัตราส่วนข้าวไร่ดอกข้าฟ้งงา : น้ำ : น้ำตาลทราย		
	5: 45: 50	10: 40: 50	15: 35: 50
ค่าสี L^*	35.72±0.62 ^a	35.66±0.15 ^a	33.91±0.21 ^b
a^*	8.96±0.35 ^c	13.35±0.13 ^b	15.57±0.07 ^a
b^*	10.04±0.08 ^c	13.91±0.28 ^b	15.45±0.06 ^a
ความข้นหนืด (cP)	4,480±323 ^c	5,300±210 ^b	6,550±180 ^a

หมายเหตุ : ^{a b c} ที่กำกับค่าในแนวนอนเดียวกัน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ความหนืดของน้ำนมข้าวเกิดขึ้นจากการที่ข้าวถูกบดผสมกับน้ำและได้รับความร้อน เมื่อน้ำแบ่งได้รับความร้อน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในภายในโมเลกุลของเม็ดแป้ง(starch granule) ด้วยความร้อนทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของสตาร์ชในเม็ดแป้งสายพอลิเมอร์ของอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพกทิน (amylopectin) ที่อัดแน่นอยู่ในเม็ดแป้งจะคลายตัวและรวมกับน้ำที่ล้อมรอบส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะปรากฏ เม็ดแป้งพองตัว และความหนืดของน้ำแบ่งเพิ่มสูงขึ้น [22] การเพิ่มปริมาณของข้าวทำให้ปริมาณอะไมโลส อะไมโลเพกทิน ในอาหาร รวมถึงปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำมีปริมาณมากขึ้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำและการเกิดเจล จึงทำให้ค่าความความหนืดของน้ำนมข้าวเพิ่มขึ้น [23] สอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ทำการผลิตเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากข้าวหอมนิล [21] พบว่าเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความข้นหนืดของผลิตภัณฑ์ลดลงตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาผลของความร้อนและการทำให้เย็นที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการย่อยของแป้ง [23] เช่นเดียวกับการเตรียมเครื่องดื่มจากข้าวหอมนิลที่มีความเข้มข้นมากขึ้น ค่าความหนืดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของข้าวหอมนิลในสูตรเพิ่มขึ้น [21]

ตารางที่ 2 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงาที่มีปริมาณข้าวบดผสมกับน้ำอ้ตราส่วนต่างกัน

คุณลักษณะ	คะแนนความชอบ		
	ข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงา : น้ำ : น้ำตาลทราย 5:45:50	10:40:50	15:35:50
สี	4.30±0.60 ^c	7.73±1.28 ^a	5.10±0.76 ^b
กลิ่น	4.73±1.01 ^c	7.17±1.39 ^a	5.73±0.91 ^b
รสชาติ	5.80±1.24 ^b	7.20±1.10 ^a	5.67±0.84 ^b
เนื้อสัมผัส (ชั้นหนืด)	5.87±1.14 ^b	7.47±1.04 ^a	5.43±0.68 ^b
ความชอบโดยรวม	5.80±0.81 ^b	7.43±1.10 ^a	4.90±0.92 ^c

หมายเหตุ: ^{a b c} ที่กำกับค่าในแนวนอนเดียวกัน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

อัตราส่วนของข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงาต่อน้ำที่แตกต่างกันยังมีผลทำให้คุณภาพทางประสาทสัมผัสของนมข้าวชั้นหวานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 2) โดยสูตรที่ใช้ข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงาและน้ำ อัตราส่วน 10:40 โดยน้ำหนัก ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบเฉลี่ยสูงสุดในทุกด้าน ($p \leq 0.05$) มากกว่าอัตราส่วน 5:45 และ 15:35 มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับความชอบปานกลาง คะแนนความชอบอยู่ในระดับที่ผู้บริโภคยอมรับได้ เนื่องจากผู้ทดสอบชิมชอบผลิตภัณฑ์ที่มีความข้นหนืดที่พอดีไม่เจือจางหรือข้นหนืดเกินไป การใช้ข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงาและน้ำในอัตราส่วน 15:35 มีความเข้มข้นเกินไป ผู้ทดสอบชิมให้ข้อเสนอแนะว่ารับประทานแล้วรู้สึกฝืดคอ ลักษณะคล้ายเม็ดแป้งดิบที่ไม่ละลายน้ำ จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาจากค่าคะแนนความชอบในทุกด้าน จึงได้เลือกสูตรนมข้าวชั้นหวานที่ได้จากการใช้ข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงาและน้ำในอัตราส่วน 10:40 และผสมกับน้ำตาลทรายอีกร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ไปพัฒนาผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงาสูตรลดน้ำตาลในขั้นตอนต่อไป

3.2 ผลการศึกษาการใช้น้ำตาลหล่ออ้งก้วยผงให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทรายที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงาสูตรลดน้ำตาล

จากการศึกษาปริมาณน้ำตาลหล่ออ้งก้วยผงทดแทนความหวานจากน้ำตาลทรายในปริมาณร้อยละ 0 30 40 และ 50 ของปริมาณน้ำตาลทรายในสูตรผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงาที่ได้มีสีน้ำตาลอมแดง เหลือง มีความข้นหนืดน้อยกว่าสูตรพื้นฐานที่ใช้น้ำตาลทรายล้วน (ทดแทนร้อยละ 0) จากผลการวิเคราะห์ทางกายภาพ (ตารางที่ 3)

นมข้าวชั้นหวานที่ใช้น้ำตาลหล่ออ้งก้วยผงทดแทนความหวานของน้ำตาลระดับมากขึ้น มีผลทำให้สีของนมข้าวชั้นหวานแนวโน้มอ่อนลง ค่าความสว่าง (L^*) มีค่าสูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อค่า a^* และมีผลต่อค่า b^* สูงขึ้นด้วยน้ำตาลหล่ออ้งก้วยผงมีสมบัติทนต่อความร้อนได้ดี [12] ประกอบกับในส่วนผสมมีปริมาณน้ำตาลน้อยลงจึงช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non enzymatic browning reaction) เกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวส์ (reducing sugar) กับกรดอะมิโน โปรตีน หรือสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ โดยมีความร้อนเร่งปฏิกิริยาซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [24], [25], [26] ที่ได้ศึกษาการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีการให้ความร้อน มีผลการวัดค่าสีลักษณะคล้ายกันโดยเมื่อใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลมากขึ้น หรือใช้น้ำตาลทรายปริมาณลดลง สีของผลิตภัณฑ์ยิ่งอ่อนลง ค่า L^* จึงสูงขึ้น

ด้านความข้นหนืดของผลิตภัณฑ์พบว่าการทดแทนน้ำตาลทรายด้วยน้ำตาลหล่ออ้งก้วยผงที่ระดับร้อยละ 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก มีผลให้ผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานมีความหนืดน้อยกว่าสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณน้ำตาลทรายที่ใช้ลดลง

ดังนั้นการทดแทนน้ำตาลทรายด้วยน้ำตาลหล่อฮังก้วยผง ปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลต่อระดับความหนืดของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [27] ที่ได้ศึกษาเรื่องการปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการของขนมอาลัวและ

ฝอยทองโดยใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล พบว่าการใช้สารให้ความหวานต่างชนิดกันทดแทน น้ำตาลทรายในระดับที่ต่างกันมีผลทำให้ค่าความหนืด แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 3 ค่าสีและความข้นหนืดของนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้า่ฟ้งงาที่ใช้น้ำตาลหล่อฮังก้วยผงทดแทนความหวานจากน้ำตาลทรายร้อยละ 0 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก

คุณภาพ	ระดับการทดแทนความหวานด้วยน้ำตาลหล่อฮังก้วยผง			
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 30	ร้อยละ 40	ร้อยละ 50
ค่าสี L*	35.66±0.15 ^d	39.89±0.24 ^c	41.88±0.05 ^b	44.66±0.26 ^a
a* ^{ns}	13.35±0.13	13.57±0.09	13.66±0.04	13.45±0.25
b*	13.91±0.28 ^a	14.04±0.13 ^a	13.72±0.09 ^a	12.94±0.56 ^b
ความข้นหนืด (cP)	5,300±210 ^a	4,9500±100 ^b	4,750±350 ^c	4,600±120 ^d

หมายเหตุ: ^{a b c} ที่กำกับค่าในแนวนอนเดียวกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
^{ns} ที่กำกับในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้า่ฟ้งงาที่ใช้น้ำตาลหล่อฮังก้วยผงทดแทนความหวานจากน้ำตาลทรายร้อยละ 0 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก

คุณภาพ	คะแนนความชอบ			
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 30	ร้อยละ 40	ร้อยละ 50
สี	8.10±1.20 ^a	8.20±0.81 ^a	6.23±1.36 ^b	5.80±1.30 ^b
กลิ่น	7.55±1.30 ^a	7.50±0.94 ^a	5.57±1.45 ^b	5.43±1.33 ^b
รสชาติ	8.10±1.00 ^a	8.10±0.84 ^a	5.97±1.33 ^b	5.73±1.28 ^b
เนื้อสัมผัส (ความข้นหนืด)	7.87±1.12 ^a	7.97±1.00 ^a	5.97±1.13 ^b	5.37±1.45 ^b
ความชอบโดยรวม	8.33±0.98 ^a	8.47±1.01 ^a	6.60±1.40 ^b	6.30±0.88 ^b

หมายเหตุ: ^{a b c} ที่กำกับค่าในแนวนอนเดียวกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
^{ns} ที่กำกับในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

จากผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของนมข้าวชั้นหวานที่ใช้น้ำตาลหล่อฮังก้วยผงทดแทนความหวานจากน้ำตาลทรายในปริมาณร้อยละ 0 30 40 และ 50 (ตารางที่ 4) มีผลทำให้คุณภาพทางประสาทสัมผัสของนมข้าวชั้นหวานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสูตรที่ใช้น้ำตาลหล่อฮังก้วยผงปริมาณร้อยละ 30 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบเฉลี่ยสูงสุดในทุกด้าน ด้วยเหตุผลรสชาติของนมข้าวชั้น

หวานที่ได้มีความหวานพอดี ไม่มีรสหวานตกค้างจากผงหล่อฮังก้วย และผู้ทดสอบชิมไม่รู้สึกรสชาติแตกต่างจากการใช้น้ำตาลทราย เมื่อใช้น้ำตาลหล่อฮังก้วยถึงระดับร้อยละ 40 ผู้ทดสอบชิมให้ความเห็นว่ารู้สึกมีรสเผื่อนเล็กน้อยแตกต่างจากการใช้น้ำตาลทราย ทั้งนี้มีงานวิจัย [28] ที่ศึกษาเรื่องการปรับปรุงรูปแบบการรับรู้ความรู้สึกตามเวลาของสารให้ความหวานสังเคราะห์ที่พบว่าสารให้ความหวานสังเคราะห์บางชนิดเมื่อบริโภค

แล้วให้ความรู้สึกถึงรสหวานเร็ว บางชนิดมีรสขม บางชนิดให้รสซ่า บางชนิดเหลือรสหวานตกค้างยาวนาน (after taste) บางชนิดมี off-taste หรือกลิ่นรสไม่พึงประสงค์ แต่น้ำตาลหล่อยังก๊วยมีรายงานว่า เป็นสารให้ความหวานที่ไม่ให้พลังงานเช่นเดียวกับสารสตีวียอลไกลโคไซด์ในหญ้าหวาน หากแต่มีข้อดีกว่าคือไม่เกิดรสขมหลังรับประทาน อีกทั้งยังไม่พบรายงานการเกิดผลข้างเคียงรุนแรงจากการบริโภค [14] จึงได้เลือกสูตรนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไรด์อกข้าฟังงาที่ใช้น้ำตาลหล่อยังก๊วยผงทดแทนความหวานจากน้ำตาลทรายในปริมาณร้อยละ 30 เพื่อไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป

3.3 ผลการศึกษาปริมาณผงโปรตีนจากข้าวที่เหมาะสมสำหรับเสริมในผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไรด์อกข้าฟังงา

การเสริมผงโปรตีนจากข้าวปริมาณร้อยละ 0 2 4 และ 6 โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมดของนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไรด์อกข้าฟังงาสู่สูตรดน้ำตาล มีผลให้นมข้าวชั้นหวานที่ได้มีความข้นหนืดเพิ่มขึ้น และด้วยผงโปรตีนจากข้าวมีสีขาว ประกอบกับโปรตีนจากข้าวส่วนใหญ่เป็นกลูเตลิน (Glutelin) ซึ่งละลายน้ำได้น้อยที่ค่าพีเอช 4-5 เมื่อเติมผงโปรตีนในน้ำนมข้าวเพิ่มขึ้นจึงมีผลให้นมข้าวชั้นหวานมีสีอ่อนลง (ดังรูปที่ 1) การเสริมปริมาณผงโปรตีนจากข้าวที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) และค่าสีเหลือง (b^*) สูงขึ้น แต่ค่าสีแดง (a^*) ลดลง (ตารางที่ 5) ซึ่งสอดคล้องงานวิจัย [29] ที่พัฒนาโปรตีนบาร์จากข้าวกล้องและเวย์โปรตีนที่พบว่าโปรตีนบาร์สูตรที่มีปริมาณเวย์โปรตีนสูงขึ้น มีสีอ่อนลง มีค่าความสว่าง (L^*) สูงกว่าสูตรอื่น และสอดคล้องกับงานวิจัยที่พัฒนาผลิตภัณฑ์จุกข้าวรวมเสริมผงโปรตีนที่พบว่าผงจุกข้าวรวมเสริมโปรตีนจะมีสีอ่อนลงเมื่อเติมโปรตีนสกัดเพิ่มขึ้น [30]

การเติมผงโปรตีนจากข้าวที่ระดับร้อยละ 4 และ 6 โดยน้ำหนักทำให้ผลิตภัณฑ์มีความข้นหนืดมากกว่าสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) ยกเว้นการเติมร้อยละ 2

โดยน้ำหนักที่มีค่าความข้นหนืดไม่แตกต่างกับสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) การเติมผงโปรตีนจากข้าวปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มความข้นหนืดของผลิตภัณฑ์ด้วยโปรตีนเมื่อได้รับความร้อนเกิดการสูญเสียสภาพตามธรรมชาติ ทำให้ส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิกเปิดตัวออกมา ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง การพองตัวลดลง เกิดเป็นโครงสร้างลักษณะคล้ายร่างแหที่สามารถห่อหุ้มน้ำ ไขมัน และของแข็งให้อยู่รวมกันได้ ในลักษณะอิมัลชัน ส่งผลต่อค่าเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ข้นหนืดขึ้นหรือแน่นขึ้น [31] ด้วยโปรตีนมีคุณสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ จากผลการศึกษาสมบัติเชิงหน้าที่ด้านความสามารถในการเกิดอิมัลชันและความคงตัวของอิมัลชันพบว่าโปรตีนที่สกัดจากรำข้าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารที่เป็นอิมัลชันได้หลากหลายชนิด เช่น ใส่กรอกชนิดต่างๆ น้ำสลัด หรือมายองเนส [32] เป็นต้น ดังนั้นการเสริมผงโปรตีนจากข้าว นอกจากช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการปริมาณโปรตีนแล้วยังช่วยให้ปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานให้มีความข้นหนืดและคงตัวอีกด้วย ทั้งนี้ค่าความข้นหนืดของผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานที่ได้มีค่าสูงกว่าความข้นหนืดของผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานทางการค้าที่มีค่า $1,890 \pm 54.08$ cp และนมข้าวชั้นหวานผสมอัลมอนต์และงาขาวจากรายงานวิจัย [4] ที่มีความข้นหนืด $2,498.33 \pm 130.33$ cp



รูปที่ 1 นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไรด์อกข้าฟังงาเสริมผงโปรตีนจากข้าวร้อยละ 0 2 4 และ 6 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 5 ค่าสี ค่าความชื้นหนืด และโปรตีนของนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้าฟ้งาสูตรลดน้ำตาลและเสริมผงโปรตีนจากข้าวปริมาณต่างกัน

คุณภาพ ทางกายภาพ	ปริมาณการเสริมผงโปรตีนจากข้าว			
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 2	ร้อยละ 4	ร้อยละ 6
ค่าสี L*	35.66±0.15 ^d	48.66±0.05 ^c	51.15±0.08 ^b	54.27±0.10 ^a
a*	13.35±0.13 ^a	12.20±0.07 ^b	10.41±0.02 ^c	9.91±0.07 ^c
b*	13.91±0.28 ^c	16.11±0.02 ^b	16.14±0.03 ^b	17.59±0.08 ^a
ความชื้นหนืด (cP)	4,950±100 ^b	5,100±250 ^{ab}	5,280±250 ^a	5,350±50 ^a
โปรตีน (กรัม/100 กรัม)	0.54±0.00 ^d	1.25±0.05 ^c	3.03±0.05 ^b	4.85±0.05 ^a

หมายเหตุ :^{a b c d} กำกับค่าในแนวนอนเดียวกัน หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$)

ตารางที่ 6 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้าฟ้งาสูตรลดน้ำตาลและเสริมผงโปรตีนจากข้าวปริมาณปริมาณต่างกัน

คุณภาพ ทางประสาทสัมผัส	คะแนนความชอบ			
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 2	ร้อยละ 4	ร้อยละ 6
สี	8.03±0.84 ^a	7.60±0.56 ^a	7.73±0.84 ^{ab}	7.43±0.77 ^b
กลิ่น ^{ns}	7.53±0.78	7.67±0.68	7.53±0.78	7.53±0.73
รสชาติ	7.90±0.85 ^a	7.70±0.70 ^a	7.60±0.85 ^{ab}	7.40±0.86 ^b
เนื้อสัมผัส (ความชื้นหนืด)	7.83±0.98 ^a	7.73±0.58 ^a	7.63±0.98 ^a	7.33±0.80 ^b
ความชอบโดยรวม	7.93±0.68 ^a	7.83±0.37 ^a	7.63±0.68 ^{ab}	7.40±0.56 ^b

หมายเหตุ: ^{a b} กำกับค่าในแนวนอนเดียวกัน หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$)

^{ns} ที่กำกับในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

การเสริมผงโปรตีนปริมาณที่แตกต่างกันมีผลทำให้คุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 6) โดยการเสริมผงโปรตีนร้อยละ 0 2 และ 4 ของน้ำหนัก ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบเฉลี่ยในทุกด้านไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) แต่การเสริมผงโปรตีนที่ร้อยละ 6 ส่งผลให้ความชอบโดยรวม สี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสด้านความหนืดลดลงต่ำกว่าการเสริมร้อยละ 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$) ประกอบกับจากข้อเสนอแนะของผู้ทดสอบชิมที่พบว่าตัวอย่างนมข้าวชั้นหวานสูตรที่เสริมผงโปรตีนจากข้าวปริมาณสูงขึ้น รู้สึกมีสิ่งตกค้างในปากหลังการกลืนและรู้สึกฝืดคอมากขึ้น ดังนั้นการเสริมผงโปรตีนจากข้าวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คะแนนความชอบลดลง ผู้วิจัยจึงเลือกสูตรนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้าฟ้งาสูตรลดน้ำตาลและเสริมผงโปรตีนจากข้าวใน

ปริมาณร้อยละ 4 ของส่วนผสมทั้งหมด พิจารณาจากคะแนนความชอบและปริมาณโปรตีนที่วัดได้ร้อยละ 3.03 กรัม ไปศึกษาในขั้นต่อไป เมื่อเทียบสัดส่วนทั้งหมดของสูตรผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานที่พัฒนาได้นี้ประกอบด้วย น้ามนข้าวไร้ดอกข้าฟ้งงา น้าตาลทรายป่น น้าตาลหล่อฮังก้วยผง และผงโปรตีนจากข้าว ปริมาณร้อยละ 46 35 15 และ ร้อยละ 4 ตามลำดับ

3.4 ผลการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้าฟ้งาสูตรลดน้ำตาลและเสริมโปรตีน

ผลการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้าฟ้งาสูตรพื้นฐาน และนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกข้าฟ้งาสูตรที่พัฒนาได้จากการลดน้ำตาลทรายและเสริมผงโปรตีนจาก

ข้าว ทำให้ผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกขำมีคุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ ความชื้น เถ้า ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต พลังงานทั้งหมด วิตามินอีชนิดอัลฟาโทโคฟีรอลและปริมาณแอนโทไซยานิน (ดังตารางที่ 7) คุณค่าทางโภชนาการของนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกขำพังกาสูตรใช้น้ำตาลหล่ออังก้วยผงทดแทนความหวานจากน้ำตาลร้อยละ 30 และเสริมผงโปรตีนจากข้าวร้อยละ 4 ซึ่งเป็นสูตรที่ประกอบด้วยน้ำนมข้าวที่ได้จากการบดผสมข้าวไร้ดอกขำกับน้ำในอัตราส่วน 10:40 มาผสมกับน้ำตาล 50 ส่วน (น้ำตาลทรายป่นร้อยละ 70 น้ำตาลหล่ออังก้วยร้อยละ 30) และเติมผงโปรตีนจากข้าวร้อยละ 4 ช่วยลดพลังงานของผลิตภัณฑ์ให้มีเพียง 215.66 กิโลแคลอรี/100 กรัม ลดลงจากสูตรพื้นฐานร้อยละ 13.98 และ มีคาร์โบไฮเดรต 49.04 กรัม ซึ่งลดลงจากสูตรพื้นฐานร้อยละ 19.86 มีปริมาณโปรตีน 3.03 กรัม ซึ่งมีปริมาณมากกว่านมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกขำสูตรพื้นฐาน จึงเหมาะเป็นอาหารสำหรับทุกช่วงวัย โดยเฉพาะผู้ที่แพ้นมวัวและโปรตีนจากนมสัตว์

ตารางที่ 7 คุณค่าทางโภชนาการของนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกขำสูตรพื้นฐานและสูตรใช้น้ำตาลหล่ออังก้วยและเสริมโปรตีนจากข้าว

องค์ประกอบทางเคมี (ต่อ 100 กรัม)	นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกขำ	
	สูตรพื้นฐาน	สูตรลดน้ำตาลและเสริมโปรตีน
พลังงาน (กิโลแคลอรี)	250.7±0.20 ^a	215.66 ±0.15 ^b
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	61.19±0.06 ^a	49.04 ±0.04 ^b
โปรตีน (กรัม)	0.54±0.05 ^b	3.03 ±0.05 ^a
ไขมัน (กรัม)	0.42±0.02 ^b	0.82 ±0.03 ^a
เถ้า (กรัม)	0.08±0.00 ^b	0.15 ±0.01 ^a
ความชื้น (กรัม)	37.77±0.09 ^b	46.96±0.10 ^a
แอนโทไซยานิน ^{ns} (มิลลิกรัม)	0.55 ±0.09	0.58±0.05
วิตามินอี ชนิดอัลฟา	Not	Not
โทโคฟีรอล (มิลลิกรัม)	Detected	Detected

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของการทดลอง 2 ซ้ำ

ปริมาณแอนโทไซยานินของนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกขำพังกาทั้งสองสูตรพบ 0.55-0.58 มิลลิกรัม/100 กรัม ซึ่งไม่แตกต่างกัน ด้วยสมบัติของแอนโทไซยานินที่สามารถละลายได้ในน้ำ ไม่เสถียรจากความร้อน ดังนั้นปริมาณแอนโทไซยานินจึงมีค่าลดลง ยิ่งใช้อุณหภูมิสูง ระยะเวลาเพิ่มขึ้นจะเพิ่มโอกาสในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือการสลายตัวของแอนโทไซยานินมากขึ้นอีกด้วย สอดคล้องกับหลายงานวิจัยต่างๆ ที่ศึกษาเกี่ยวกับความคงตัวของแอนโทไซยานินในข้าวและผลิตภัณฑ์จากข้าวต่างๆ [33]-[35]

4. สรุป

การเตรียมส่วนผสมของนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกขำพังกา โดยแปรอัตราส่วนของข้าวสารที่บดผสมกับน้ำ พบว่าอัตราส่วน 10:40 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมทำให้นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกขำพังกาได้รับคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสสูงกว่าอัตราส่วน 15:35 และ 5:45 เมื่อใช้น้ำตาลหล่ออังก้วยผงให้ความหวานทดแทนน้ำตาลทรายป่นร้อยละ 30 สำหรับผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานสูตรลดน้ำตาล ทำให้ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบเฉลี่ยสูงกว่าสูตรที่ทดแทนความหวานจากน้ำตาลทรายป่นในปริมาณร้อยละ 40 และ 50 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบนมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกขำพังกาสูตรลดน้ำตาลและเสริมผงโปรตีนร้อยละ 4 ของส่วนผสมทั้งหมด ผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกขำพังกาสูตรที่ใช้น้ำตาลหล่ออังก้วยผงทดแทนน้ำตาลทรายและเสริมผงโปรตีนจากข้าว ปริมาณ 100 กรัม ให้พลังงานเท่ากับ 215.66 กิโลแคลอรี ต่ำกว่าสูตรพื้นฐานที่มีพลังงานเท่ากับ 250.70 กิโลแคลอรี และยังมีปริมาณโปรตีน 3.03 กรัม ซึ่งสูงกว่าสูตรพื้นฐานที่มี 0.54 กรัม ผลิตภัณฑ์นมข้าวชั้นหวานจากข้าวไร้ดอกขำพังกาที่พัฒนาได้จึงเหมาะสำหรับผู้บริโภคที่แพ้นมวัวและสนใจการบริโภคผลิตภัณฑ์ที่ดีต่อสุขภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และวิทยาลัยเทคนิคพังงาที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการทดสอบชิม และเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Che, *Cow milk protein allergy*, CMPA, The Pharmaceutical Association of Thailand under Royal Patronage. Bangkok: Mahidol University, 2018.
- [2] Anonymous. (2020, December 19). Cow's milk allergy. [Online]. Available: <https://www.marketthink.co/12400>
- [3] N. Satsue and N. Suteebut, "limitation milk product from Water Caltrop," *RMUTP Research Journal*, vol. 17, no. 2, pp. xx-xx, July. 2023.
- [4] R. Polpued and K. Khuenpet, "Formulation of sweetened condensed rice-milk fortified with cereals in retortable pouch," *International Journal of Agricultural Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 349-64, 2020.
- [5] K. Wadeesirisak, "Fermented plant-based milk and functional properties," *Journal of Food Research and Product Development*, vol. 52, no. 4, pp.14-26. 2022.
- [6] K. Huang, Y. Liu, Y. Zhang, H. Cao, D.K. Luo, C. Yi and X. Guan, "Formulation of plant-based yoghurt from soybean and quinoa and evaluation of physicochemical, rheological, sensory and functional properties," *Food Bioscience*, vol. 49, p.101831. October 2022.
- [7] N. Suteebut and P. Sangthong, "Brown rice yogurt products fortified with soy protein and prebiotics," in *Proceeding of 11th National Conference of Sri-Ayutthaya Rajabhat University*, Valaya Alongkorn Rajabhat University, 2018, pp. 808-8190.
- [8] T. Kitisripanya. (2018). Plant-based dairy products and their consumption as substitutes for cow's milk, Mahidol University. [Online]. Available: <https://www.pharmacy.mahidol.ac.th>
- [9] S. Chuchart, P. Ratchanit, S. Arintapach, K. Sirinthon, T. Orak and P. Rujira, "Dawk Kha50, a non-glutinous rice variety," *Thai Rice Research Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 18-29. 2018.
- [10] S. Chotechuen, A. Na Lampang Noenplab, S. Mulkum, J. Pengrat, N. Saeng-arun and S. Saeton, *Nutritional values of some Thai traditional rice varieties*, Rice Research and Development Division, Rice Department. Rice Department. 2015.
- [11] J. Keerati. (2019, June 14). Dried Rice Vermicelli Jellos, Nationnal Innovation Agency. [Online]. Available: <http://www.nia3portal.mworkgroup.co.th>
- [12] P. Anusiri. (2021, Dec 19). Sugar, handsome, hung guay. [Online]. Available: <https://www.nsm.or.th/nsm/th/node/6421>
- [13] H. Kantrong, "Stevia... sweet and healthy herb," *Food Journal*. vol 45, no. 3, pp.41-44. 2015.
- [14] K. Plomlek. (2014). Monk fruit: A new choice of sweeteners. National Food Institute. [Online]. Available: <http://www.fic.nfi.or.th>

- [15] O. Matangkasombut and P. Thanyasrisung, "Sugar substitutes and their effects on systemic and oral health," *Journal Dent. Assoc. Thai*, Vol 69, no. 4, pp.379-397. 2019.
- [16] Max Global Marketing Co., Ltd. (2022, November 28). Rice protein drink VISAMIN brand. [Online]. Available: <https://www.max-gbm.com/>
- [17] J. Khongkaew, "Sweetened condensed rice milk from Rai Dowk Kha Phang Nga rice," M.HE. thesis, Dept. Home Econ., RMUTP Univ., Thailand, 2022.
- [18] AOAC, Official Methods of Analysis of AOAC International, 21st ed. USA: Gaithersburg, MD. 2019.
- [19] R. Bucci, A. D. Magri, A. L. Magri and F. Marini, "Comparison of three spectrophotometric methods for the determination of gamma-oryzanol in rice bran oil," *Analytical Bioanalytical Chemistry*, vol. 375, no. 8, pp. 1254-1259. 2003.
- [20] M. K. Kim, H. A. Kim, K. Koh, H. S. Kim, Y. S. Lee and Y. H. Kim, "Identification and quantification of anthocyanin pigments in colored rice," *Nutrition Research and Practice*. vol. 2, no. 1, pp. 46-9. 2008.
- [21] T. Juthamas and T. Chalermphon, "Production of healthy beverage from Homnil rice," *Science Journal*, vol. 43, no. 3 (Suppl), pp. 395-402. 2015.
- [22] P. Pimpen and N. Rattanapanon. (2022, November 20). Anthocyanin. [Online]. Available: <https://www.foodnetworksolution.com>
- [23] R. Thanaporn, "Effects of heating and cooling on strccturalc change and digestion of starth," *Science Journal Burapha University*, vol. 21, no. 2 (Suppl), pp. 246-259. 2017.
- [24] N. Thaweeseang, K. Lueangprasert and K. Saelim, "Effects of alternative sweeteners on physical, chemical and sensory characteristics of purple yard long bean jam," *RMUTP Research Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 91-102. 2022.
- [25] A. Sirisupjarean, S. Kubglomsong and S. Sinsuwan, "Development of brownies using Chai Nat RD 43 cooked rice as a substitute for wheat flour and sweetener sucralose as a substitute for sugar," *PBRU Science Journal*, vol. 19, no. 2, pp. 82-99. 2022.
- [26] J. Othong, L. Klinmalai and A. Chareonchai, "The using of inulin replaced with sugar in milk ice cream supplemented with chicken breas," *Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST)*, vol. 19, no. 1, pp. 39-50. May. 2020.
- [27] S. Nuttarat, "Nutritional improvement of A-LUA and FOI-THONG desserts by using non-sugar sweeteners." M.S. thesis, Dept. Food Tech., Silpakorn Univ. Bangkok, Thailand, 2012.
- [28] N. Krodchakorn, "Improving the temporal profile of artificial sweeteners." M.S. thesis, Dept. Food Tech., Silpakorn Univ. Bangkok, Thailand, 2014.
- [29] S. Kotchaew and W. Chawakon, "Development of protein bar from brown rice and whey protein on physical and chemical properties of product," *FST MU Research Exercis Journal*, pp. 1-20. 2016.

- [30] P. Sirirat, T. Ohennapha and B. Orawan, "Development of rice germ powder fortified protein." *PSRU Journal of Science and Technology*, vol. 7, no. 1, pp.129-139. Jan. 2022.
- [31] N. Rattanapanon, *Food chemistry*, 5th ed. Bangkok: Odeon Store Publisher, 2014.
- [32] S. Kannanuch, "Protein extraction and hydrolysate production from deoiled Sangyod Muang Phatthalung rice bran," M.S. thesis, Dept. Food Pro. Eng., Chiang Mai Univ., Chiang Mai, Thailand, 2012.
- [33] S. Parnsakhorn and J. Langkapin, "Effect of different rice varieties on changes in anthocyanin content and physical properties of Zongzi products," *Journal of Engineering, RMUTT*, vol. 20, no. 2, pp.57-68. 2022.
- [34] S. Parnsakhorn, J. Langkapin and R. Muangrat, "Effect of freezing on the stability of GABA and anthocyanin content of cooked germinated," *Research Journal Rajamangala University of Technology Thanyaburi*, vol 18, no. 1, pp. 1-13. 2019.
- [35] C. Petchlert and T. Sangprathum, "Comparison of phenolic and anthocyanin content among four differences of raw and cooked rice," *Naresuan Phayao Journal*, vol. 13, no. 2, pp.36-41. 2020.

บทความวิชาการ: กระบวนการสเฟียรรอยไคซิงและการนำไปใช้กับ กระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิง

วรรณ หอมจะบก^{1,2*} กนกอร น้อยเล็ก^{1,2} นัยนา โปะสูงเนิน¹ และ หทัยชนก หุ้มไธสง¹

¹สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

²สถาบันนวัตกรรมวัสดุและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

^{1,2}744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลบ้านเกาะ อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 21 มกราคม 2565 แก้ไขบทความ 21 พฤศจิกายน 2565 ตอรับบทความ 20 มกราคม 2566

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อรวบรวมงานวิจัยที่มีเนื้อหา และปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการสเฟียรรอยไคซิง กระบวนการคาร์เบอร์ไรซิง และกระบวนการคาร์เบอร์ไรซิงตามด้วยกระบวนการสเฟียรรอยไคซิง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ สำหรับในงานภาคอุตสาหกรรม และงานทางด้านวิชาการ จากผลการศึกษาพบว่ากระบวนการสเฟียรรอยไคซิงมีอยู่หลายรูปแบบ แต่รูปแบบที่นิยมใช้คือการให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ A_1 เล็กน้อย และเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเหนืออุณหภูมิ A_1 เล็กน้อย ทำสลับกันไปเรื่อย ๆ โดยจำนวนรอบของการให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พบซีเมนไทต์กลที่มีขนาดเล็กละเอียดมากขึ้น ค่าความแข็งแรงลดลง และส่งผลให้ค่าแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) ค่าแรงดึงจุดคราก (yield strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%elongation) มีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิง มีปัจจัยที่สำคัญอยู่หลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็นชนิดของถ่านไม้ โดยถ่านไม้ที่ช่วยเพิ่มคาร์บอนได้สูงสุด คือ ถ่านไม้ยูคาลิปตัส รองลงมาคือ ถ่านไม้มะขาม ถ่านหังมันสำปะหลัง ถ่านกะลามะพร้าว และถ่านไม้ไผ่ ตามลำดับ ส่วนกรณีของการศึกษาสารเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยามากที่สุด รวมไปถึงสารเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มของแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติ รวมไปถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิงจะช่วยให้คาร์บอนแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้ดีขึ้น ทำให้ความแข็งแรงสูงขึ้น แต่ก็ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงกระแทกลดลง นอกจากนี้ การทำสเฟียรรอยไคซิงยังถูกนำมาประยุกต์ใช้หลังจากกระบวนการคาร์เบอร์ไรซิง โดยพบว่าซีเมนไทต์แบบตาข่ายโดยเฉพาะที่ผิวจะสลายตัวไปเป็นเม็ดกลม แต่เนื้อเหล็กยังคงความเหนียว และมีความยืดหยุ่นอยู่ ชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิงจะมีค่าความแข็งแรงมากขึ้น และค่าความแข็งแรงจะลดลงเมื่อผ่านกระบวนการสเฟียรรอยไคซิง เมื่อพิจารณาตัวแปรของระยะเวลา พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำสเฟียรรอยไคซิงที่นานขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลง ส่วนผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : สเฟียรรอยไคซิง; คาร์เบอร์ไรซิง; ซีเมนไทต์แบบตาข่าย

Academic article: Spheroidizing Process and Applying to Pack Carburizing Process

Wanna Homjabok^{1,2*} Kanokon Nuilek^{1,2} Naiyana Posungnoen¹ and Hathaichanok Humthaisong¹

¹Department of Materials, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

²Materials and Manufacturing Innovation Institute, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

^{1,2}744 Suranarai Road, Nai Mueang, Mueang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima 30000

Received 21 January 2022; Revised 21 November 2022; Accepted 20 January 2023

Abstract

The purpose of this article review was to compile contents and factors which affected the spheroidizing process, carburizing process, and carburizing process followed by the spheroidizing process for utilization in industrial, and academic matters. The findings of this study revealed that there were many methods for the spheroidizing process with the most used process being used with the cycle temperature at slightly lower and higher A_1 temperature. The number of sequences of increased temperature found lighter cementite which had higher ultimate tensile strength, yield strength, and percent elongation. The essential factors in the pack carburizing process were composed of types of charcoal, catalyst, temperature, and time. The best charcoals to extend carbon were from eucalyptus, tamarind, the rootstock of cassava, coconut shell, and bamboo respectively. The study showed that calcium carbonate (CaCO_3 , commercial-grade) was the best catalyst along with the catalyst in calcium carbonate from nature. The temperature and time in the process affected carbon diffused to sample well, increased hardness, and reduced the efficiency of impact. Moreover, spheroidizing was used after finishing carburizing process, discovering the cementite network where the surface changed to a sphere shape but with the properties of toughness and elasticity still high. After carburizing process, the sample had increased hardness but after the spheroidizing process the hardness decreased. Time studies showed that a longer period in the spheroidizing process, led to lower hardness and increased impact.

Keywords: Spheroidizing; Carburizing; Network Cementite

** Corresponding Author. Tel.: +668 7776 9920, E-mail Address: wanna.ho@rmuti.ac.th*

1. บทนำ

กระบวนการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความร้อน มีความสำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก เพราะเป็นกระบวนการที่ทำให้เหล็กมีสมบัติตรงตามที่ต้องการจะนำไปใช้งาน กระบวนการอบอ่อนเพื่อให้อ่อนตัวสูง (soft annealing) หรืออาจเรียกอีกอย่างว่า กระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง (spheroidizing) คือกระบวนการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความร้อนประเภทหนึ่ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่ออบอ่อนให้เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ในช่วง 0.7-1.2% C มีสมบัติทางด้านการตัด กลึง ไส เจาะ (machinability) ให้ดียิ่งขึ้น กระบวนการสเฟียร์รอยไดซิงนี้จะถูกนำมาใช้กับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูง 0.7-1.2% C ซึ่งเหล็กที่มีคาร์บอนสูงนี้จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของเพิร์ลไลต์ (pearlite) และโปรยูเทคตอยด์คาร์ไบด์ (proeutectoid carbide) หรือโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไทต์ (proeutectoid cementite) ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบตาข่าย (cementite network) ตามขอบเกรน ทำให้เมื่อนำไปทำการตัด กลึง หรือไส จะทำให้ได้ผิวที่ไม่เรียบ เพราะปลายมีดตัดจะตัดผ่านเนื้ออบริเวณอ่อน ซึ่งคือเฟสเฟอร์ไรท์ (ferrite) สลับกับเนื้ออบริเวณที่แข็งคือซีเมนไทต์ (cementite) ในการแก้ปัญหาี้ สามารถทำได้โดยทำให้โปรยูเทคตอยด์ซีเมนไทต์ขาดความต่อเนื่อง ไม่เป็นแบบตาข่าย โดยใช้กระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง

นอกจากการใช้กระบวนการสเฟียร์รอยไดซิงให้แก่อเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูงในช่วงดังกล่าวแล้ว กระบวนการนี้ยังถูกนำมาประยุกต์ใช้กับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ โดยหลังจากที่ทำการเติมคาร์บอนเข้าไปที่ผิวจนมีปริมาณสูงแล้วจึงนำมาให้ความร้อนอีกครั้งด้วยกระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง เพื่อให้ที่ผิวมีความแข็งสูงขึ้นจากซีเมนไทต์เม็ดกลมที่กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งผิว และยังคงความเหนียวภายในเนื้อเหล็กไว้ได้จากปริมาณคาร์บอนที่ต่ำ ซึ่งกระบวนการเติมคาร์บอน

เข้าไปที่ผิวของเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำก็คือกระบวนการคาร์เบอร์ไรซิง (carburizing) นั่นเอง

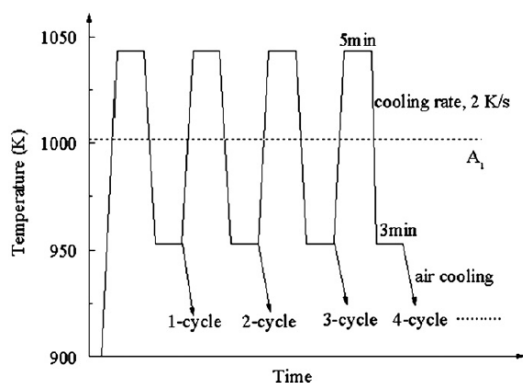
จากความสำคัญดังกล่าว จึงทำให้มีนักวิจัยหลาย ๆ กลุ่มที่ได้ทำการศึกษากระบวนการเหล่านี้อย่างกว้างขวาง ซึ่งบทความนี้ได้ทำการรวบรวมบทความที่สำคัญเหล่านั้น เพื่อนำไปใช้สำหรับงานภาคอุตสาหกรรมและงานทางด้านวิชาการ

2. กระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง

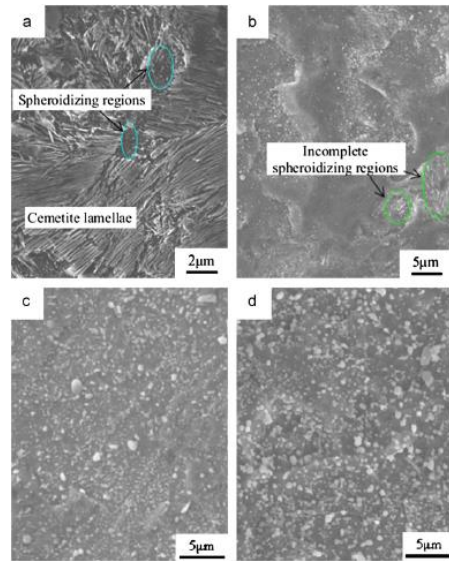
กระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง คือ กระบวนการการอบอ่อนเพื่อให้ได้ซีเมนไทต์กลม เป็นการปรับโครงสร้างจุลภาคให้เหมาะสมต่อการนำไปตัด กลึง ไส เจาะ โดยจะใช้กับเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนปานกลางและสูง รูปแบบของกระบวนการสเฟียร์รอยไดซิงอาจทำได้หลายวิธี เช่น 1) ให้ความร้อนแก่เหล็กให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ A_1 เล็กน้อย (ไม่เกิน 50°C) โดยใช้เวลานานประมาณ 12-24 ชั่วโมง 2) ให้ความร้อนให้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ A_1 เล็กน้อย จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในเตาลงมาที่อุณหภูมิต่ำกว่า A_1 เพียงเล็กน้อยแล้วคงไว้เป็นเวลานาน ๆ แล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และ 3) ทำการให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ A_1 เล็กน้อย และเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเหนืออุณหภูมิ A_1 เล็กน้อย ทำสลับกันไปเรื่อย ๆ เป็นรอบ ๆ แล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ การที่ต้องใช้อุณหภูมิสลับระหว่างต่ำและสูงกว่าอุณหภูมิ A_1 ส่งผลให้ซีเมนไทต์แบบตาข่ายขาดออกจากกันจนมีลักษณะเป็นเม็ดกลม โดยในขณะที่เหล็กอยู่เหนือเส้น A_1 เล็กน้อย ซีเมนไทต์ที่อยู่ในเพิร์ลไลต์จะขาดเสถียรภาพและจะขาดออกเป็นช่วง ๆ และเมื่อลดอุณหภูมิลงต่ำกว่าเส้น A_1 เล็กน้อย ซีเมนไทต์ที่เกิดจากการแตกตัวของออสเทนไนต์จะไปรวมตัวกับซีเมนไทต์ที่เหลืออยู่ ทำให้ไม่เกิดเป็นแถบ (lamellar) และจะฟอร์มตัวเป็นซีเมนไทต์เม็ดกลมที่มีเสถียรภาพสูง ทำให้เหล็กอ่อนตัวและเหนียว เมื่อนำไปตัด กลึง หรือไส มีดตัดจะ

ซีเมนไทต์เม็ดกลม โดยซีเมนไทต์อาจจะโดนเปิดและเบนหลบเข้าไปในเนื้อพื้น หรืออาจจะหลุดออกไป

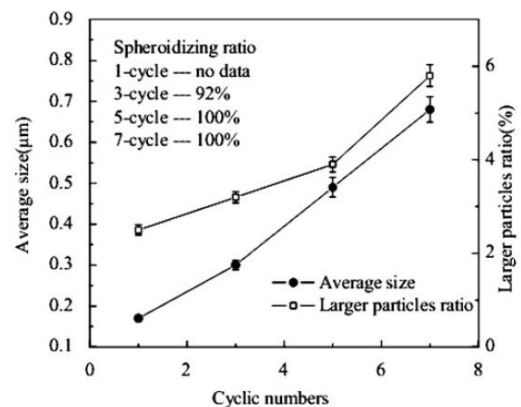
งานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาหมักจะทำการศึกษากจากจำนวนรอบ (n) ที่ใช้ในการให้ความร้อนสลับขึ้นลงระหว่างเส้น A_1 ดังแสดงตัวอย่างกระบวนการรอบซูปในรูปที่ 1 [1] และรูปที่ 2 [1] ได้แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก Fe-0.8C ที่ผ่านกระบวนการสเฟียไรไรอยโดซิงที่จำนวนรอบ 1, 3, 5 และ 7 รอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการให้ความร้อน 1 รอบ จะยังพบแถบซีเมนไทต์อยู่จำนวนมาก และเมื่อทำการเพิ่มรอบให้สูงขึ้นแถบซีเมนไทต์ก็จะมีปริมาณลดลงเรื่อย ๆ โดยที่จำนวนรอบ 7 รอบจะพบซีเมนไทต์กลมจำนวนมาก โดยรูปที่ 3 ได้แสดงขนาดและปริมาณสัดส่วนของการฟอร์มตัวเป็นซีเมนไทต์กลม [1] โดยพบว่าที่จำนวนรอบ 1 รอบ จะเริ่มพบซีเมนไทต์กลมและจะเกิดเป็นจำนวนมากที่จำนวนรอบ 3 รอบแต่ก็ยังพบโครงสร้างเฟิร์ลโลทหลงเหลืออยู่บางส่วน เมื่อเพิ่มจำนวนรอบเป็น 5 และ 7 รอบ ซีเมนไทต์จะเปลี่ยนเป็นซีเมนไทต์กลมทั้งหมด และไม่พบโครงสร้างเฟิร์ลโลทหลงเหลืออยู่ โดยจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ซีเมนไทต์กลมมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังมีกลุ่มวิจัยของ F. Jarrahi และคณะ [2] ที่ศึกษาขนาดและปริมาณของซีเมนไทต์กลมดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับกลุ่มวิจัยของ Z.Q. Lv [1]



รูปที่ 1 ตัวอย่างการรอบซูปด้วยกระบวนการสเฟียไรไรอยโดซิงโดยใช้ความร้อนสลับขึ้นลงระหว่างเส้น A_1



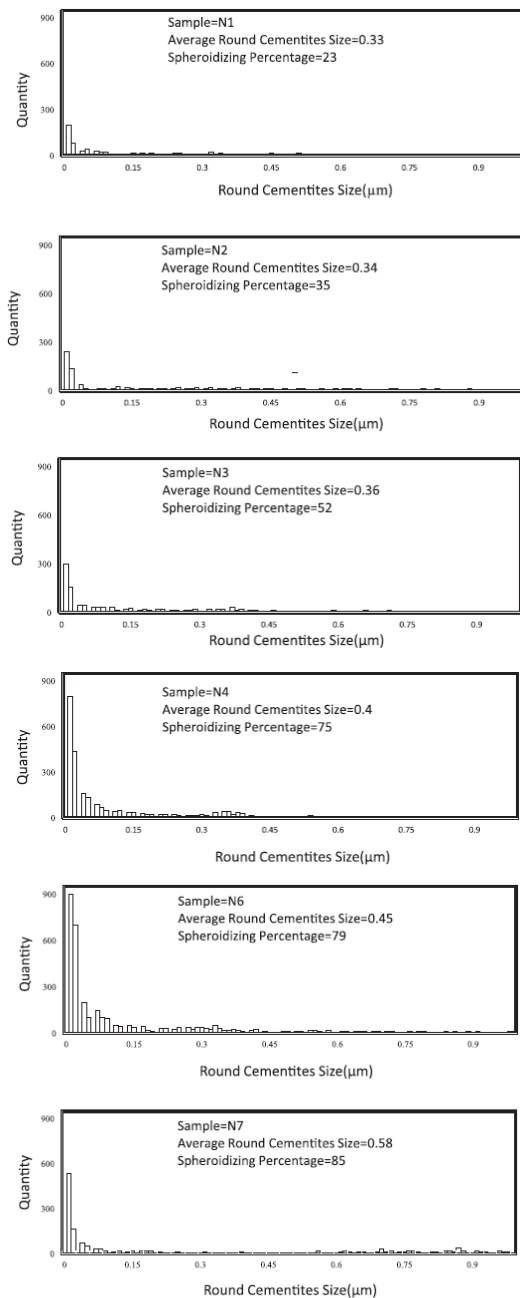
รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของ Fe-0.8C ที่ผ่านกระบวนการสเฟียไรไรอยโดซิงที่จำนวนรอบ a) 1 รอบ b) 3 รอบ c) 5 รอบ และ d) 7 รอบ



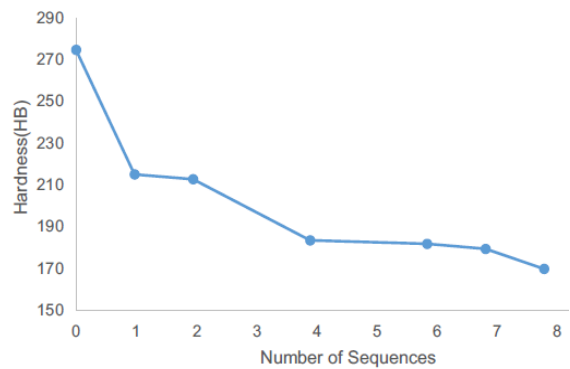
รูปที่ 3 ขนาดและปริมาณสัดส่วนของการฟอร์มตัวเป็นซีเมนไทต์กลมที่ผ่านกระบวนการสเฟียไรไรอยโดซิง

สมบัติทางกลก็เป็นสิ่งสำคัญที่ทำการศึกษาควคู่ไปกับการศึกษาโครงสร้างจุลภาค ได้แก่ การทดสอบค่าความแข็ง และการทดสอบแรงดึง ซึ่งพบว่าจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง (รูปที่ 5) [2] นอกจากนี้ยังพบว่าที่จำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นพอจะทำให้เห็นแนวโน้มได้ว่าส่งผลให้ค่าแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) ค่าแรงดึงจุดคราก (yield strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%elongation)

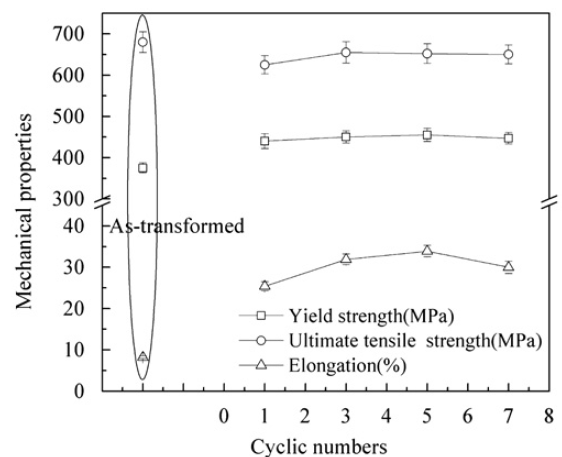
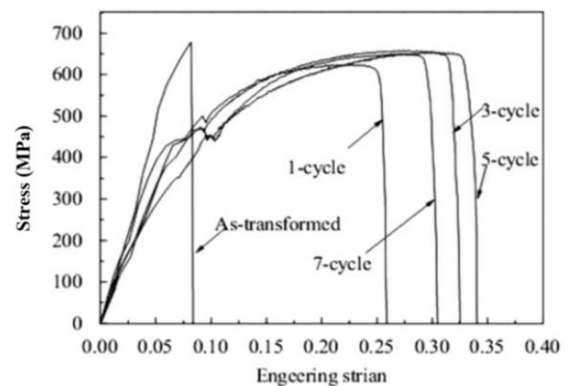
มีแนวโน้มสูงขึ้น และจะสังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จำนวนรอบ 7 รอบจะมีค่าลดลง (รูปที่ 6) [1] แต่แนวโน้มดังกล่าวก็ไม่ได้แตกต่างอย่างชัดเจนนัก



รูปที่ 4 ขนาดและปริมาณสัดส่วนของการฟอร์มตัวเป็นซีเมนต์ไธต์กลของเหล็ก AISI 1060 ที่ผ่านกระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง



รูปที่ 5 ค่าความแข็งของเหล็ก AISI 1060 ที่ผ่านกระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง



รูปที่ 6 ค่าการทดสอบแรงดึงของเหล็ก Fe-0.8C ที่ผ่านกระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง

3. กระบวนการคาร์โบไรซิง

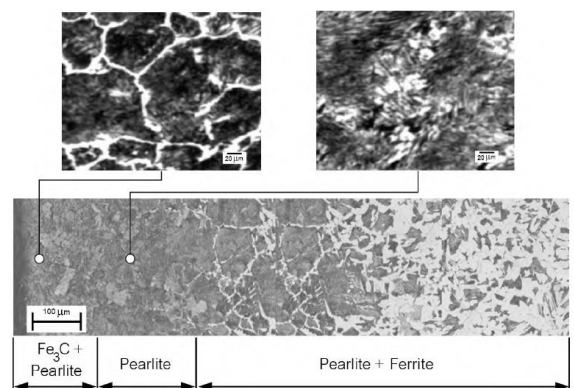
กระบวนการสเฟียไรไรซิง นอกจากจะใช้กับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูงแล้ว ก็ยังถูกนำมาใช้กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ต้องการชุบแข็งที่ผิว ซึ่งจะต้องทำการเพิ่มคาร์บอนไปที่ผิวของชิ้นงานด้วยกระบวนการคาร์โบไรซิง จากนั้นจึงทำสเฟียไรไรซิงเพื่อให้ได้ซีเมนต์ไต์เม็ดกลมที่กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งผิว ก่อนนำไปชุบแข็งและอบคืนตัว ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ เหล็กก็จะมี ความแข็งที่ผิวสูงขึ้นจากซีเมนต์ไต์เม็ดกลมที่กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งผิว และยังคงความเหนียวภายในเนื้อเหล็กไว้ได้จากปริมาณคาร์บอนที่ต่ำ

กระบวนการคาร์โบไรซิงสามารถแบ่งออกเป็นสามประเภทตามสภาพชนิดของแหล่งคาร์บอน ได้แก่ สารเพิ่มคาร์บอนสภาพของแข็ง (solid carburizing) สารเพิ่มคาร์บอนสภาพของเหลว (liquid carburizing) และสารเพิ่มคาร์บอนสภาพก๊าซ (gas carburizing)

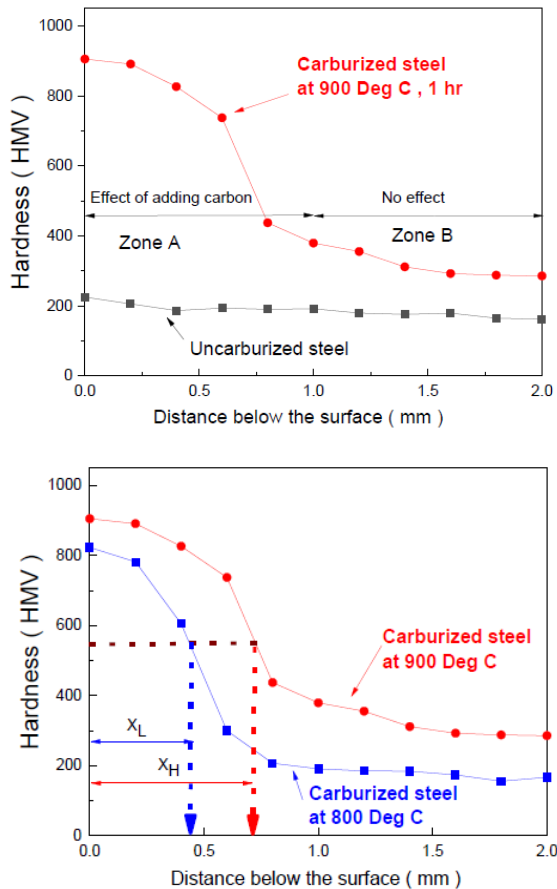
โดยวิธีการเพิ่มคาร์บอนโดยสารเพิ่มคาร์บอนสภาพของแข็ง อาจเรียกว่ากระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิง (pack carburizing) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้เนื่องจาก ราคาประหยัด ใช้กับเหล็กกล้าคาร์บอนที่ปกติแล้วมีคาร์บอนไม่เกิน 0.2% หลักการของวิธีการนี้คือ การนำเหล็กไปไว้ในที่มีปริมาณคาร์บอนสูง และให้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต โดยทั่วไปใช้อุณหภูมิประมาณ 925°C ที่อุณหภูมินี้คาร์บอนจะถูกดูดซึมเข้าไปในเนื้อเหล็กโดยการแพร่ ทำให้ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ซึ่งเหมาะสำหรับการชุบแข็งให้เกิดโครงสร้างมาเทนไซต์ ส่วนแกนกลางยังคงมีปริมาณคาร์บอนน้อยจึงยังคงสมบัติอ่อน และเหนียว [3] การทำแพ็กคาร์โบไรซิงสามารถสร้างเฟสที่แข็งในระดับโครงสร้างจุลภาคได้ ซึ่งทำให้ชิ้นงานเหล็กกล้ามีความแข็งแรงสูงขึ้น โดยโครงสร้างจุลภาคที่เหมาะสมที่เกิดขึ้นงานมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน [4] ดังนั้นในบทความนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิงเท่านั้น

กระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิงเป็นวิธีการเพิ่มคาร์บอนไปที่ผิวของเหล็กโดยอาศัยการแพร่ของคาร์บอนจากสารแพ็กคาร์โบไรซิงที่ประกอบไปด้วยถ่านผสมกับสารเร่งปฏิกิริยา [5] จึงมีนักวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษาค้นคว้าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการแพ็กคาร์โบไรซิง เช่น 1) ประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด [6]-[8] ซึ่งมีสารเร่งปฏิกิริยาทางเคมีจะเป็นกลุ่มคาร์บอนเนต 2) ประสิทธิภาพของถ่านไม้ [11] 3) สัดส่วนขององค์ประกอบสารแพ็กคาร์โบไรซิง [7] 4) สภาพที่ใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิง ซึ่งอาจเป็นอุณหภูมิ [9], [10] หรือเวลา [9]-[11] ในการเพิ่มคาร์บอน

ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิง จากรูปที่ 7 [11] จะเห็นว่าที่ผิวจะพบโครงสร้างซีเมนต์ไต์แบบตาข่ายและเฟิร์ลไลต์ เนื่องจากบริเวณนี้เป็นบริเวณที่คาร์บอนแพร่เข้ามาได้มากที่สุดจึงมีปริมาณคาร์บอนสูง ซึ่งอยู่ในกลุ่มไฮเปอร์ยูเทกตอยด์ (hyper-eutectoid) บริเวณถัดไปคือบริเวณที่พบโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ ซึ่งก็คือช่วงที่มีปริมาณคาร์บอน 0.8% C ซึ่งก็คือเหล็กยูเทกตอยด์ (eutectoid) ส่วนภายในของชิ้นงานจะพบเฟอร์ไรต์และเฟิร์ลไลต์ เป็นบริเวณที่มีคาร์บอนต่ำ ซึ่งอยู่ในกลุ่มไฮโปยูเทกตอยด์ (hypo-eutectoid)



รูปที่ 7 โครงสร้างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิง



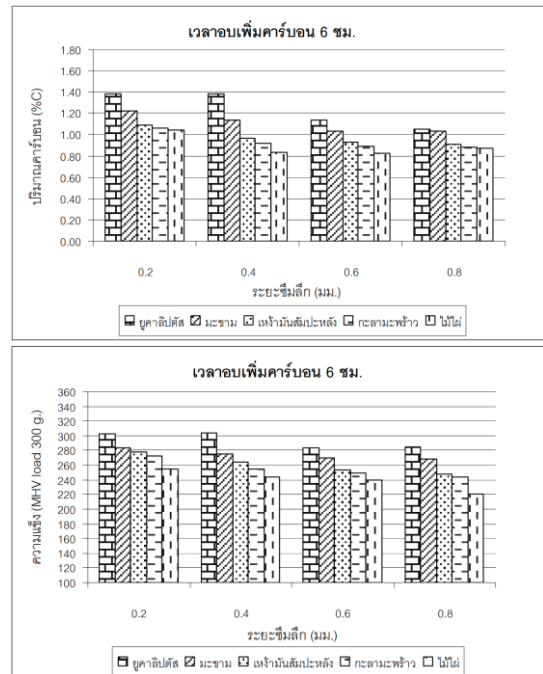
รูปที่ 8 ค่าความลึกผิวแข็งของเหล็กที่ผ่านกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิง

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งจากรูปที่ 8 [12] ก็จะพบว่าที่ผิวซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการแพร่ของคาร์บอน (effect of adding carbon) จะมีค่าความแข็งสูง (zone A) นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิที่สูงจะทำให้ได้ค่าความลึกผิวแข็ง (case depth)

3.1 อิทธิพลของสารแพ็กคาร์เบอร์โรซิง

สารแพ็กคาร์เบอร์โรซิง ซึ่งประกอบไปด้วยถ่านและสารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งผ่านมามีผู้วิจัยที่ได้นำเอาถ่านและสารเร่งปฏิกิริยาหลายชนิดมาทำการศึกษา โดยชนิดถ่านที่พบคือ ถ่านไม้อยูคาลิปตัส [9]-[11], [13], [14] ถ่านกะลามะพร้าว [11] ถ่านไม้มะขาม [11] ถ่านไม้ยางพารา [15] ถ่านไม้ไผ่ [7], [11] ถ่านเห้งหมันสำปะหลัง [11]

ถ่านไม้โกงกาง [8] โดยในกลุ่มวิจัยของ ณรงค์ศักดิ์ธรรมโชติ [11] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถ่านไม้หลายชนิดและพบว่าถ่านไม้ที่ให้ความสามารถในการเพิ่มคาร์บอนได้สูงสุด คือ ถ่านไม้ยูคาลิปตัส รองลงมาคือ ถ่านไม้มะขาม ถ่านเห้งหมัน สำปะหลัง ถ่านกะลามะพร้าว และถ่านไม้ไผ่ ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 9

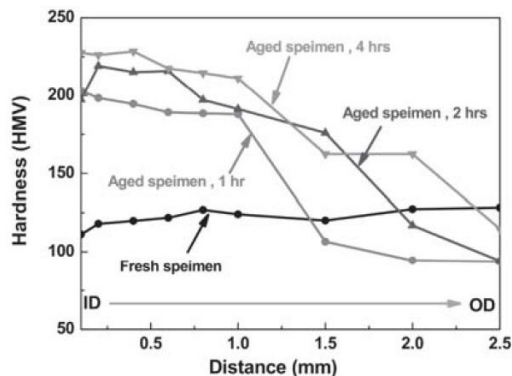


รูปที่ 9 ปริมาณคาร์บอนและค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงด้วยถ่านไม้ชนิดต่าง ๆ

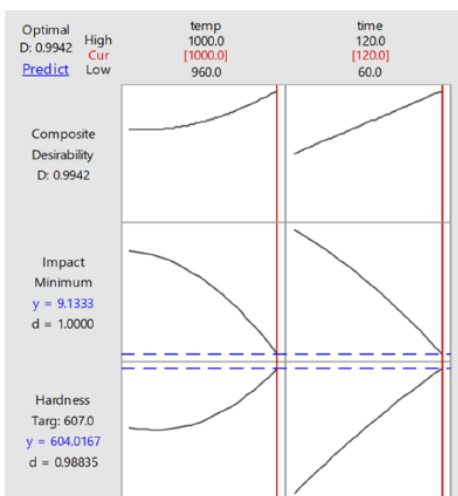
ส่วนกรณีของสารเร่งปฏิกิริยาก็มีนักวิจัยที่นำสารเร่งปฏิกิริยาหลากหลายมาใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) [6], [13], [14]-[16] แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) [7], [17] โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) [16], [18] รวมไปถึงงานศึกษาสารเร่งปฏิกิริยาในธรรมชาติ เช่น หินปูน [11] เปลือกไข่ไก่ ถ่านยางพารา [15] และผงกระดูกวัว [9] เป็นต้น นอกจากนี้สัดส่วนของส่วนผสมระหว่างถ่านกับสารเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงก็ถูกนำศึกษาถึงสัดส่วนที่เหมาะสมด้วยเช่นกัน [7]

3.2 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิง

อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิง เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการแพร่ของคาร์บอนตามกฎของฟิค (Fick's law) โดยกลุ่มที่ทำวิจัยเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใช้ในการแพ็กคาร์เบอร์โรซิง (800-1,000°C) [10], [12], [15], [17] ต่างพบว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้คาร์บอนสามารถแพร่เข้าไปที่ผิวได้ดีขึ้น ทำให้ได้ค่าความแข็งสูงขึ้น (รูปที่ 8) และในส่วนของการศึกษาเวลา [10], [11], [16], [18] ที่ใช้ในการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงก็ให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับอุณหภูมิ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 10 [16]



รูปที่ 10 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ



รูปที่ 11 Optimization ของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงหลังจากชุบแข็งและอบคืนตัวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

จากผลข้างต้นจะเห็นว่าอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงจะช่วยให้คาร์บอนแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้ดีขึ้น ทำให้ความแข็งสูงขึ้น แต่ก็ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงกระแทกลดลง ด้วยเหตุนี้จึงมีกลุ่มผู้วิจัยที่ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยของอุณหภูมิและเวลาที่เป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด (optimum) เพื่อให้ได้มาซึ่งสภาวะที่ดีที่สุดโดยใช้โปรแกรม Minitab 17 [9], [10] ดังแสดงตัวอย่างของผลการทดลองในรูปที่ 11 ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคืออุณหภูมิ 1,000°C เวลา 120 นาที โดยจะได้ค่าความแข็ง 604.0 HV และสามารถรับแรงกระแทกได้ 9.13 Jules

4. กระบวนการคาร์เบอร์โรซิงและตามด้วยกระบวนการสเฟียร์รอยโดซิง

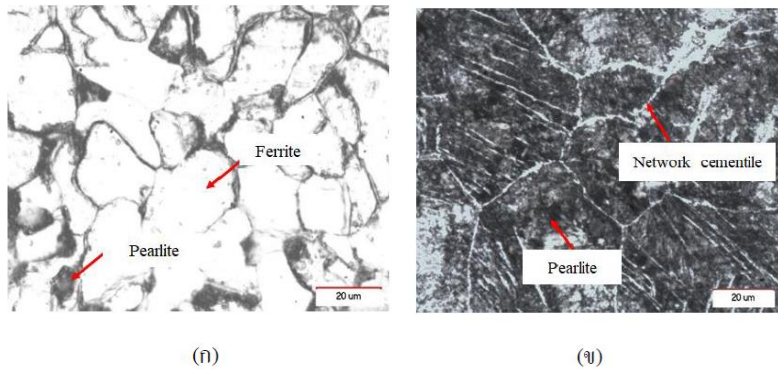
ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่ากระบวนการสเฟียร์รอยโดซิง นอกจากจะใช้กับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูงแล้ว ก็ยังถูกนำมาใช้กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ต้องการชุบแข็งที่ผิว เพื่อให้เหล็กมีความแข็งที่ผิวสูงขึ้นจากซีเมนต์ไต์เม็ดกลมที่กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งผิว และยังคงความเหนียวไว้ภายในเนื้อเหล็กได้

รูปที่ 12 [14] แสดงโครงสร้างของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำซึ่งจะประกอบไปด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลท์ และเมื่อทำการเพิ่มคาร์บอนด้วยกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงก็จะพบโปรยูต์ไต์คอตอยด์ซีเมนต์ไต์ที่มีลักษณะเป็นแบบตาข่ายและเพิร์ลไลท์ และเมื่อนำไปทำสเฟียร์รอยโดซิงก็จะพบว่าซีเมนต์ไต์แบบตาข่ายโดยเฉพาะที่ผิวจะสลายตัวไปเป็นเม็ดกลม ซึ่งเวลาที่ใช้ในการแช่อุณหภูมิไว้ในแต่ละรอบที่มากขึ้นก็จะยังพบซีเมนต์ไต์เม็ดกลมเพิ่มขึ้น อยู่บนเนื้อพื้น (matrix) ของเพิร์ลไลท์ ดังแสดงในรูปที่ 13 [14]

นอกจากนี้ ทางด้านสมบัติทางกลจะเห็นได้ว่าชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงจะมีค่าความแข็งมากขึ้นและจะลดลงเมื่อผ่านกระบวนการ

สเฟียร์รอยไคซิง โดยระยะเวลาที่ใช้ในการทำสเฟียร์รอยไคซิงที่นานขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง เพราะเวลาที่นานขึ้นจะทำให้ได้ซีเมนไทต์เม็ดกลมที่เล็กละเอียดมากขึ้น ส่วนผลการทดสอบความต้านทานแรง

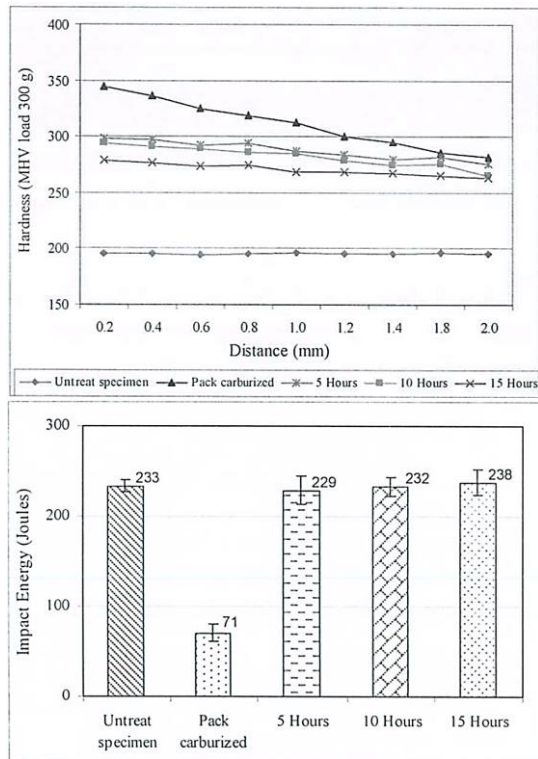
กระแทกจะให้ผลที่ตรงกันข้ามกับค่าความแข็ง ทั้งนี้ เพราะเหล็กที่แข็งจะรับแรงกระแทกได้ลดลงดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคของผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (ก) ก่อน และ (ข) หลัง ผ่านกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิง

ระยะลึกจากขอบ ขึ้นทดสอบ (มม.)	เวลาอบแช่ 0 นาที	เวลาอบแช่ 5 นาที	เวลาอบแช่ 10 นาที
0.2			
0.8			
1.0			

รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิงแล้วทำการสเฟียร์รอยไคซิงแบบไซคลิก 5 รอบ



รูปที่ 14 ค่าความแข็งและความต้านทานแรงกระแทกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิงแล้วทำการสเฟียร์รอยโดซิง

การที่ผลของหัวข้อนี้ อาจจะเห็นว่ามีผลแตกต่างจากกลุ่มงานวิจัย [1]-[2] ในหัวข้อที่ 2 ซึ่งมีผลว่าจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น (ทำให้เวลารวมในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย) จะส่งผลให้ซีเมนต์ไทด็กกลมมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับกลุ่มงานวิจัย [14] ในรูปที่ 13 ทั้งนี้หากพิจารณาถึงลงไปโครงสร้างจุลภาคก็อาจจะพออธิบายได้ว่าการที่เวลาอบแช่ 0, 5 และ 10 นาที ที่จำนวน 5 รอบ ยังคงพบซีเมนต์ไทด็กแบบตาข่ายให้เห็นอย่างชัดเจน ดังนั้นเวลาที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นเวลาที่ช่วยให้ซีเมนต์ไทด็กแบบตาข่ายขาดและแยกออกจากกัน ทำให้พบว่าซีเมนต์ไทด็กมีขนาดเล็กลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ส่วนกลุ่มงานวิจัยในหัวข้อที่ 2 ซึ่งได้ศึกษาจำนวนรอบ จะเห็นได้ว่าที่จำนวนรอบ 3 รอบ (รูปที่ 2) ก็แทบจะไม่หลงเหลือ

ซีเมนต์ไทด็กแบบตาข่ายแล้ว จำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ซีเมนต์ไทด็กมีลักษณะกลมมากขึ้นและอาจเกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย โดยอาจสังเกตได้จากรูปที่ 3 ว่าจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นช่วงแรกส่งผลต่อขนาดการใหญ่ขึ้นของซีเมนต์ไทด็กไม่มาก แต่จะเห็นแนวโน้มการโตขึ้นอย่างรวดเร็วที่จำนวนรอบสูง ๆ

5. สรุป

การศึกษากระบวนการสเฟียร์รอยโดซิงจากการรวบรวมบทความต่าง ๆ สามารถสรุปเป็นประเด็นที่สำคัญได้ดังนี้

กระบวนการสเฟียร์รอยโดซิงจะช่วยให้ซีเมนต์ไทด็กแบบตาข่ายสลายตัวไปเป็นซีเมนต์ไทด็กเม็ดกลม โดยผลของเวลาที่นานขึ้นหรือจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ซีเมนต์ไทด็กมีขนาดเล็กและละเอียดมากขึ้นบนเนื้อพื้นที่เป็นเฟิร์สโลท ทำให้ค่าความแข็งลดลง ความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ส่วนผลการทดสอบแรงดึงพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีแนวโน้มสูงขึ้น

การใช้กระบวนการสเฟียร์รอยโดซิงไปประยุกต์ใช้หลังจากการทำแพ็กคาร์เบอร์ไรซิงให้แก่เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ พบว่า ซีเมนต์ไทด็กแบบตาข่ายที่เกิดขึ้นที่ผิวจะสลายตัวไปเป็นซีเมนต์ไทด็กเม็ดกลมซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่าภายในเนื้อเหล็กที่ยังคงความเหนียวจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเฟิร์สโลท

การใช้กระบวนการสเฟียร์รอยโดซิงไปประยุกต์ใช้หลังจากการทำแพ็กคาร์เบอร์ไรซิงให้แก่เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่อาจจะต้องพิจารณาสมบัติทางด้านความแข็งแรงร่วมกับสมบัติทางกลอื่น ๆ เช่น ความต้านทานแรงกระแทก สามารถใช้โปรแกรม Minitab 17 มาช่วยในการหาสถานะที่เหมาะสมเพื่อให้คงความต้านทานแรงกระแทกได้ดีเมื่อความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Q. Lv, B. Wang, Z. H. Wang, S. H. Sun and W. T. Fu, "Effect of the cyclic heat treatments on spheroidizing behavior of the cementite in high carbon steel," *Materials Science & Engineering: A*, vol. 574, pp. 143-148, Jul. 2013.
- [2] F. Jarrahi, M. Kashefi and E. Ahmadzade-Beiraki, "An investigation into the applicability of Barkhausen noise technique in evaluation of machining properties of high carbon steel parts with different degrees of spheroidization," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 385, pp. 107-111, Jul. 2015.
- [3] N. Thammachot, *Metallurgy*, 3rd ed. Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 2013.
- [4] T. Chowwanonthapunya and C. Peeratatsuwan, "Microstructure and hardness evolution of carburized mild steel," *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 31, no. 4, pp. 145-152, Oct-Dec. 2020.
- [5] M. Sathirajinda, *Iron & Steel Heat-Treatment Engineering*, 3rd ed. Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 1994.
- [6] N. Thammachot, "The effect of energizer carburizing temperature and time on the mechanical properties of hardened big knives in a pack carburizing process," *KKU Engineering Journal*, pp. 172-177, Oct-Dec. 2016.
- [7] D. N. K. P. Negara, I. D. M. K. Muku, I. Sugita, I. Astika, I. W. Mustika and D. G. R. Prasetya, "Hardness distribution and effective case depth of low carbon steel after pack carburizing process under different carburizer," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 776, pp. 201-207, 2015.
- [8] P. Pitsuwan, P. Suwan, Y. Sengty and P. Kongsong, "Influence of catalyst on surface hardening of low carbon steel by method pack carburizing using mangrove charcoal powder," *Journal of Industrial Ubon Ratchathani Rajabhat University*, vol. 8, No. 2, pp. 1-12, Jul- Dec. 2018.
- [9] N. Thammachot, S. Noyming, S. Srisuk t, W. Homjabok, A. Mayai, and J. Banthao, "Optimization of carburizing temperature and time on mechanical properties of hardening the big knives in pack carburizing process by using cow bone as an energizer," *Journal Science Technology Mahasarakham University*, vol. 39, No. 3, pp.273-283, May-Jun. 2020.
- [10] S. Noyming, N. Thammachot, J. Nithikarnjanatham, R. Duekhunthod, S. Srinok, C. Peeratatsuwan and A. Mayai, "The analysis of factors effect to hardness by design of experiment of surface hardening of low carbon steel using egg shell as energizer in pack carburizing process," in *Engineering, Science, Technology and Architecture Conference*

- The 7th*, Dusit Princess Korat Hotel, Nakorn Ratchasima, 2016, pp. 353-359.
- [11] N. Thammachot, W. Homjabok and N. Thadee, "The efficiency of different of wood charcoal on increasing carbon content on surfaces of low carbon steel in the pack carburizing process," *KKU Engineering Journal*, vol. 41, No. 3, pp. 383-391, Jul-Sep. 2014.
- [12] T. Chowwanonthapunya, X. Mu and C. Peeratatsuwan, "Study on carburized steel used in maritime industry: the influences of carburizing temperature," *Maritime Technology and Research*, vol. 2, No. 1, pp. 33-39, Jan-Mar. 2020.
- [13] N. Thammachot, C. Wongnak, N. Thadee and T. Chaloemkitti, "The effect of spheroidized carbides by heating cycle on mechanical properties of surface carburized of low carbon steel knife shaped with pack carburizing process," in *Innovation and Technology Conference*, pp. 142-148, 2017.
- [14] N. Thammachot, H. Wanna, M. Amornsak and N. Sombut, "The effect of holding time in cyclic heat treatment process on network carbide structure of carburized carbon steel," *Journal of Rajamangala University of Technology Srivijaya*, vol. 12, No. 2, pp. 250-262, May-Aug. 2020.
- [15] P. Kongsong, N. Jansom and S. Faonongdu, "The comparison of energizer between the rubber wood ash and CaCO_3 in the pack carburizing process with rubber wood charcoal powder," *Journal of Rajamangala University of Technology Srivijaya*, vol. 11, No. 2, pp. 208-218, 2019.
- [16] T. Chowwanonthapunya, X. Mu and C. Peeratatsuwan, "The study on high temperature degradation of AISI 1020 low carbon steel in the carburization state," *Rajamangala University of Technology Phra Nakhon*, Vol. 10, No. 2, pp. 22-29, Sep. 2016.
- [17] A. Srivastava, H. Kumar, M. K. Yusufzai and M. Vashista, "Microstructure characterization of pack carburized IS-2062 low carbon steel using magnetic barkhausen noise," *Materials Today: Proceedings*, vol. 16, pp. 439-443, 2019.
- [18] S. Supriyono, "The effect of pack carburizing using charcoal on properties of mild steel," *Media Mesin: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 19, No. 1, pp. 38-42, Jan. 2018.



RMUTP

RESEARCH JOURNAL

Sciences and Technology

