

บทความวิชาการ

- ◆ **Magnetic Field Effect on Physicochemical Properties of Water**
Pornchai Premkaisorn and Wanpen Wasupongpun

บทความวิจัย

- ◆ การกำจัดสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีที่กระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
สุพัตรา รักษาพรต นันทพร มุลรังษี วราภรณ์ พันธุ์เดช และ อังคณา แยมศรี
- ◆ ศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่องานหัตถอุตสาหกรรม ชุมชนบ้านถ้ำเสือ จังหวัดเพชรบุรี
สุรภา วงศ์สุวรรณ เกรียงศักดิ์ เขียวมั่ง และ มียอง ขอ
- ◆ **Development and Study on Physical and Sensory Properties of Dark Chocolates Fortified with Anthocyanin from Broken Riceberry Rice**
Paradorn Ngamdee Sureechay Jamkrajang and Siriwan Yankin
- ◆ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลในผลิตภัณฑ์อาหารว่างเสริมผงใบหม่อน
จักรกฤษณ์ ทองคำ ทวีศักดิ์ เตชะเกรียงไกร รัชนี คงคาอุยชัย และ ริญ เจริญศิริ
- ◆ ผลของจิ้งหรีดผง โปรตีนถั่วเหลืองสกัด และแซนแทนกัมที่มีต่อคุณภาพคุกกี้แป้งข้าวเจ้า
พงศ์พิพัฒน์ สนม และ กมลวรรณ แจ่มชัด
- ◆ การผลิตไอศกรีมโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกล
วรรณวิมล พุ่มโพธิ์ วิษณุวัฒน์ คงงาม สุริยา หล้าบัววงศ์ ภาณุวัฒน์ อวาส และ ภูมิใจ สะอาดโหม
- ◆ การวิเคราะห์การผสมพลาสดักชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสดักสตาร์ช
ยศฐา ศรีเทพ ญัฐกรณ์ หงษ์คำ และ พัทธระ ตะโคตร
- ◆ ประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL
ครรชิต เงินคำคง นิธิวัฒน์ จำรูญรัตน์ จิรายุ หมูคำ ญัฐพงศ์ กันศรี ญัฐพล วงศ์ขัติ นันทน์ภัส เงินคำคง และพิสิฐ ศรีสุริยจันทร์
- ◆ การตรวจวัดปริมาณฟอสเฟตในน้ำผิวดินจังหวัดลพบุรีด้วยระบบวิเคราะห์แบบไหลชนิดโฟลอินเจกชันอย่างง่าย
ปิยวรรณ พันสี จันทรา กออินทร์ และ ดวงใจ นาคะบริษา
- ◆ การทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวหอมมะลิที่มีผลต่อลักษณะทางเคมีกายภาพ กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมั่นโถว
สุพิชญา คำคม
- ◆ ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำมันข้าวโพดสามสายพันธุ์
รุ่งทิพา วงศ์ไพศาลฤทธิ์ และ วิภาดา พงษ์สานต์ศิริ
- ◆ การเสริมกำลังคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
รัตนศักดิ์ หงษ์ทอง อภัย เบ็ญจพงศ์ และ ธรรมมา เจียรธรวาณิช
- ◆ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงปรุงรสและผงโรยข้าวจากถั่วเหลืองหมักพื้นบ้าน
สุวีวรรณ ราชสม ญัฐวิภา สีลา และสุทธิดา ทากอนแก้ว
- ◆ แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสำหรับกรอบแห้งชิ้นบางของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพัดหล่นอิสระ
ศิวกร ศรีบุญญากุล กิรติ สุลักษณ์ และ ทวีช จิตรสมบุญ
- ◆ กรรณวิธีการปรับกรดของผักและผลไม้ด้วยเครื่องปรับสภาพความเป็นกรดภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ
จอมขวัญ สุวรรณรักษ์ พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ เจตนิพัทธ์ บุญยสวัสดิ์ ศันสนีย์ ทิมทอง
อินทิริมา ธีรญาอัครวงศ์ และ พุดกรอง พันธุ์โม่งค์

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

RMUTP RESEARCH JOURNAL

ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ

รักษาราชการแทนอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ และพัฒนาคณาจารย์

บรรณาธิการ

ดร.ประกอบ ชาติกุฎต์

กองบรรณาธิการ จากหน่วยงานภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์	ฤทธิเดช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์วิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุชัยวีร์	สุวรรณสวัสดิ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร	เก่งพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.สันติ	แมนศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.ทรงศักดิ์	เพ็ชรมิตร	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สายประสิทธิ์	เกิดนิยม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย	อมรศักดิ์ชัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกร	ยี่มนิรัฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย	พองสมุทร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กองบรรณาธิการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งอรุณ พรเจริญ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลทิมา เขาว์ชาญชัยกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนพล มงคลรัตนสิทธิ์
ดร.วรลักษณ์ ปัญญาธิพิงค์	ดร.ชลากร อุดมรักษาสกุล
ดร.สิงห์แก้ว ปือกเห็ง	ดร.วราพร ทองจีน
นางสาวเจนจิรา บ.ป.สูงเนิน	นางสาวพัชรนันท์ ยังรวริเชียร
นายปิยวัฒน์ เจริญทรัพย์	

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)
ประจำปี 14 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม 2563

รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย นิยมผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พองสมุทร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจวรรณ ธรรมธรรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ คุวิจิตรจากรู	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติพร ฤทธิเรืองเดช	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.มยุรี กัลยาวัฒนกุล	มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วรัญญู ศรีเดช	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.อรพินท์ เจริญถาวร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ อัจฉริยวิริยะ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรองจันทร์ รัตนประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เก๋ากันยา สุดประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชัย ปิละพงศ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินันท์ รัตนพรหม	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสรพี เหลืองสกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุตา ศุภคต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรหมวดี สุวฒิกะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พริมา พิริยางกูร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภรณ์ ลิ้มปิสุต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภ คงเป็นสุข	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วลัยรัตน์ จันทรปานนท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีสุวรรณ นฤนาทวงศ์สกุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรินทร์ ทองแสง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติพิทย์ อินทร์ชื่น	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)
ประจำปี 14 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม 2563

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม อรุณ

มหาวิทยาลัยพะเยา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ วรรณศรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ เพชรศิริธร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ดร.ธนิกานต์ สันต์สวัสดิ์

มหาวิทยาลัยพะเยา

ดร.ไตรภพ พาหอม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2563 ISSN 2651-1096 (online)

หน้า

บทความวิชาการ:

- Magnetic Field Effect on Physicochemical Properties of Water 1
Pornchai Premkaisorn and Wanpen Wasupongpun

บทความวิจัย:

- การกำจัดสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีที่กระตุ้นด้วยสารละลาย 18
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
สุพัตรา รักษาพรต นันทพร มูลรังษี วราภรณ์ พันธเดช และ อังคณา แยมศรี
ศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่องานหัตถอุตสาหกรรม ชุมชนบ้านถ้ำเสือ 31
จังหวัดเพชรบุรี
สุรภา วงศ์สุวรรณ เกรียงศักดิ์ เขียวมั่ง และ มียอง ขอ
Development and Study on Physical and Sensory Properties of Dark Chocolates 45
Fortified with Anthocyanin from Broken Riceberry Rice
Paradorn Ngamdee Sureechay Jamkrajang and Siriwan Yankin
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลในผลิตภัณฑ์อาหารว่างเสริมผงใบหม่อน 57
จักรกฤษณ์ ทองคำ ทวีศักดิ์ เตชะเกรียงไกร รัชณี คงคาอุยฉาย และ ธิญะ เจริญศิริ
ผลของจังหวัดผิง โปรตีนถั่วเหลืองสกัด และแซนแทนกัมที่มีต่อคุณภาพคุกกี้แป้งข้าวเจ้า 72
พงศ์พิพัฒน์ สนม และ กมลวรรณ แจ่มชัด
การผลิตไอศกรีมโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกล 85
วรรณวิมล พุ่มโพธิ์ วิษณุวัฒน์ คนงาม สุริยา หล้าบัววงศ์ ภาณุวัฒน์ อาวาส และ ภูมิใจ สะอาดโหม
การวิเคราะห์การผสมพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรล 98
ยศฐา ศรีเทพ ญัฐกรณ์ หงษ์คำ และ พัทธระ ตะโคตร
ประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL 110
ครรชิต เงินคำคง นิธิวัฒน์ จำรูญรัตน์ จิรายุ หมูคำ ญัฐพงศ์ กันศรี ญัฐพล วงศ์ขัติ
นันทน์ภัส เงินคำคง และพิสิฐ ศรีสุริยจันทร์

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2563 ISSN 2651-1096 (online)

	หน้า
การตรวจวัดปริมาณฟอสเฟตในน้ำผิวดินจังหวัดลพบุรีด้วยระบบวิเคราะห์แบบไหล ชนิดโฟลอินเจกชันอย่างง่าย	122
ปิยวรรณ พันสี จันทิรา กออินทร์ และ ดวงใจ นาคะปรีชา	
การทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวหอมมะลิที่มีผลต่อลักษณะทางเคมีกายภาพ กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมั่นโถว	135
สุพิชญา คำคม	
ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำมันข้าวโพดสามสายพันธุ์	152
รุ่งทิพา วงศ์ไพศาลฤทธิ์ และ วิชาญ พงษ์สานต์ศิริ	
การเสริมกำลังคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	160
รัตนศักดิ์ หงส์ทอง อภัย เบ็ญจพงศ์ และ ธรรมมา เจียรธรวาณิช	
การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงปรุงรสและผงโรยข้าวจากถั่วเหลืองหมักพื้นบ้าน	173
สุวีรวรรณ ราชสม ญัฐวิภา สีสำ และสุทธิดา ทากอนแก้ว	
แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสำหรับการอบแห้งชั้นบางของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้ง แบบเป่าพัดล้นอิสระ	183
ศิวกร ศรีธัญญากร กิรติ สุลักษณ์ และ ทวีช จิตรสมบุญ	
กรรมวิธีการปรับกรดของผักและสลัดด้วยเครื่องปรับสภาพความเป็นกรดภายใต้	198
การควบคุมอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ	
จอมขวัญ สุวรรณรักษ์ พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ เจตนิพัทธ์ บุญยสวัสดิ์ ศันสนีย์ ทิมทอง อินทธีมา หิรัญอุครวงศ์ และ พุดกรอง พันธุ์อุโมงค์	

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

Magnetic Field Effect on Physicochemical Properties of Water

Pornchai Premkaisorn* and Wanpen Wasupongpun

Faculty of Science, Siam University
38 Petkaserm Road, Bangwa, Pasricharoen, Bangkok, 10160

Received 31 May 2018; Revised 27 December 2018; Accepted 12 June 2020

Abstract

Water is a vital component of almost every organism. Magnetic fields effecting on physical properties of water are reported in this work. In order to obtain the magnetized water, magnetic fields were applied and subsequently passed through water. The chemical properties of magnetized water were also studied such as pH, dissolved oxygen gas, spectroscopic data of UV-, X-ray and IR-spectrum, calcium carbonate crystallization, concrete strength, levitation, refractive index, melting point, contact angle, electrolytic potential value, hydrogen bonding, vaporization, conductivity, flow rate, dielectric constant, viscosity, surface tension, total hardness, convection, Ac magnetic susceptibility and diffusion. In addition, the magnetized water affecting the growth of some plants and mice with antineoplastic drugs were also studied.

Keywords : Magnetized Water; Magnetic Field

* Corresponding Author. Tel.: +668 6722 5162, E-mail Address: pornpre2001@yahoo.com

1. Introduction

The argument of magnetized water (MW) is still doubtful among the scientific community. Many scientific literatures have reported an effect of magnetic fields on water. However, inconsistent experimental findings and unreproducible results are observed. The use of magnetic or electromagnetic treatment has provided different results. Therefore, many factors affecting experimental results must be controlled, for instance, magnetic flux density, saturation effect time, memory effect time, temperature and flow rate of water. Some people believe that the properties of pure water could not be changed by magnetic treatment (MT).

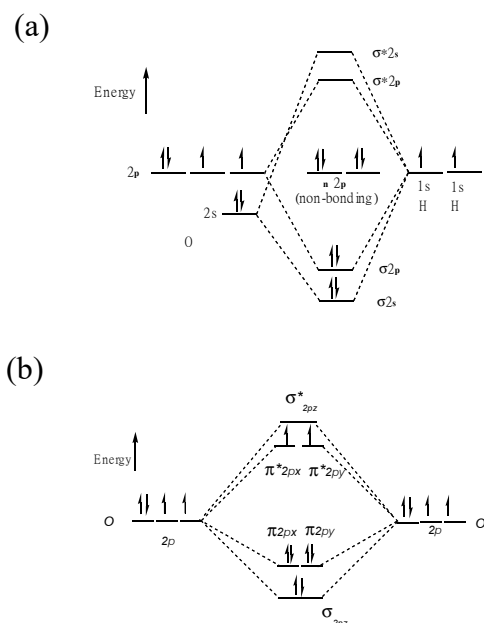


Fig. 1 Schematic view molecular orbital of water molecule (a) and oxygen gas molecule (b)

Nevertheless, there are a few studies which claim the existence of magnetized water. Thus, this work reviews the properties of magnetized water, which had been revealed in the

literature and its purposing possible mechanisms. A water molecule is diamagnetic, explained by molecular orbital theory because of the absence of an unpaired electron in the molecule (**Fig. 1a**), therefore, it is weakly repelled by a magnet. On the other hand, an oxygen molecule is paramagnetic, containing two unpaired electrons (**Fig. 1b**), and is attracted by a magnet. Gutierrez-Mejia, F. and Ruiz-Suarez, J.C. [1] studied on the topic of an inter-conversion between diamagnetic and paramagnetic properties of water molecules under a magnetic field, and the change of its physicochemical properties.

Even though many scientists have said that magnetized water is a pseudoscience, a few people still believe that water properties could be changed after treatment with magnetic field. Therefore, the effect of magnetic fields onto the change of water properties is reviewed in this article. Both supporting and opposing experimental results are reported and discussed in this work. However, the other detail of experiment has been reported in references [1]-[56]. Moreover, the physical and biological properties are also reviewed in this article.

2. Results and Discussion

2.1 Physical properties' aspect

2.1.1 pH effect

Zamora, L.L. *et al.* [2] determined the effect of a magnetic field (50 mT) which was applied onto drinking water under a flow rate of 65.5 mL/s for 5 times of circulation, at 27-30 °C. The results showed that the a change of pH was not observed. Similarly, the finding of Quickenden, T.I. *et al.* [3] supported no change in pH (2.7 T magnetic field,

water flow rate of 1.08-200 ml min⁻¹, at 27-30 °C).

2.1.2 Dissolved oxygen gas effect

Ueno, S. and Harada, K. [4] applied a dc magnetic field (1 T magnetic field intensity, gradient 10 T m⁻¹, 30-60 min) onto the water surface in an oxygen atmosphere, effecting an increase in the degree of the oxygen redistribution, which depended on the initial concentration of oxygen gas. Redistribution of dissolved oxygen was not observed in an equilibrium state of oxygen pressure in the air atmosphere.

Obviously, this magnetically induced response controlled the diffusion of dissolved oxygen in the bulk water. The results showed that an increase of 5% of dissolved oxygen concentration in water occurred after the applied ac magnetic field ranging from 1-8 T, which depended on an initial concentration of oxygen gas [5]. The maximum of dissolved oxygen was found with the maximum magnetic field flux density (B) which was independent on the maximum magnetic force, wherein B (dB/dz) was the largest in a magnetic field (wherein z = a position along the z-axis). Notice that the increasing or decreasing dissolved oxygen content in the duration before and after exposure with magnetic field showed an exponential change. Furthermore, Hirota, N. *et al.* [6] reported on the magnetic field (4 T) accelerated with oxygen gas dissolving into water. An increase of 37% oxygen concentration was observed (1 h, at 15 °C) compared with controls. The mechanism could be explained by magnetically induced convection in the water due to the non-uniformity of magnetic susceptibility created by the dissolution of oxygen in the water phase.

While Nakagawa, J. *et al.* [7] reported that the water surface (13 °C) was suppressed around 28.2 mm from the surface region which was exposed with 8 T of magnetic field intensity (Moses effect) by using an oxygen gas atmosphere (11 °C). The pressure of oxygen gas was increased to 47 Pa. They summarized that the water surface was dependent on magnetic field and oxygen gas pressure. However, the dissolution of carbon dioxide gas was not affected by the magnetic field. On the other hand, in the presence of oxygen gas, the dissolution of carbon dioxide gas has become significantly faster ($137.2 \pm 5.27 \text{ g m}^{-3} \rightarrow 177.1 \pm 6.76 \text{ g m}^{-3}$). They proposed that a difference of magnetic susceptibility ($\Delta\chi$) between degassed water and saturated oxygen gas in water ($+3.3 \times 10^{-8}$, $P[\text{O}_2] = 5 \times 10^4 \text{ Pa}$, 15 °C) was larger than that of degassed water and saturated carbon dioxide gas in water (-0.2×10^{-8} , $P[\text{CO}_2] = 2 \times 10^4 \text{ Pa}$, 25 °C). The larger difference of magnetic susceptibility was extended, the more force has influenced on a water surface, which is given by equation (1).

$$F = \frac{\Delta\chi}{\mu_0} B \left(\frac{dB}{dz} \right) \quad (1)$$

When

F is force

$\Delta\chi$ is a volume magnetic susceptibility difference

μ_0 is vacuum magnetic permeability

Therefore, the surface water molecules showed more effectively by the magnetic field than the inner ones. The magnetic susceptibility difference around surface water was much more than that of inner ones (**Fig. 2**).

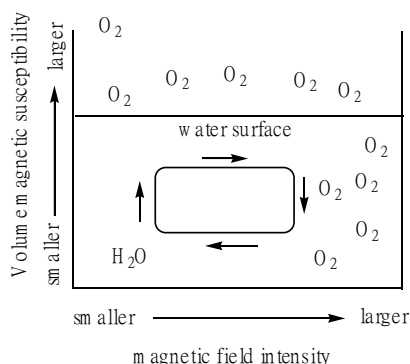


Fig. 2 Showing the difference of volume magnetic susceptibility of oxygen gas and water regions and magnetic field intensity into water [7]

2.1.3 Optical properties effect

2.1.3.1 UV-spectra

Rai, S. *et al.* [8] studied UV- and fluorescence spectra by using a static magnet (0.3 T, 25 °C) applied onto distilled deionized water. It was found that the N (north), S (south) and N+S poles produced the differences result of the spectrum. They proposed that the magnetic field effected on the restructuring of water ranging from distorted tetrahedral through a clathrate hydrate framework. The South pole of a magnet raised the water structures to higher energy states and the North pole to the lower energy states than normal. On the other hand, Colic, M. and Morse, D. [9] attributed differences in UV- and fluorescence spectra to the water being magnetically induced into gas/liquid interface perturbation and resulting in the generation of ozone gas and hydrogen peroxide. In addition, they proposed the idea of “magnetic memory of water” that the water could retain the properties for a while after treatment. Moreover, Bo, D. and Pang, X.F. [10] investigated the UV-spectra of magnetized water (0.44 T magnetic field; 5 h; 25 °C). The changing of UV-spectra was observed at the

wavelength of 191 nm. The absorbance of normal water and magnetized water were ~ 0.4 and ~ 2.94 , respectively. They proposed that the magnetic field induced the polarization and distribution of electrons. Ding, Z.-R. *et al.* [11] has ascribed the breaking of a large number of hydrogen bonds which was due to the electron states being affected by magnetic field or perturbation, and this phenomena was influenced by magnetic field over 200 mT.

2.1.3.2 IR-spectra

Bo, D. and Pang, X.F. [10] and X.F. Pang, *et al.* [12] reported that the IR-spectra of magnetized water (0.6-0.44 T, 5 h, 20 °C) was changed in the region of 400 - 4,000 cm^{-1} . A higher intensity of peaks under magnetic flux density was observed at a longer duration time. Saturation effect time was also studied for 110, 100, 90 and 60 min which were influenced from external magnetic field *via* a magnetic flux density of 0.06, 0.20, 0.30 and 0.40 T, respectively. In conclusion, the magnetic flux density increased while a saturation effect time decreased. Moreover, a memory effect time, which is a time for recovery of the ordinary state, was also introduced which was 35, 45, 58 and 60 min, respectively (**Table 1**).

Table 1 Showing a saturation effect time and memory effect time at various magnetic flux density (Pang, X.F. and Bo, D. [13])

Magnetic flux Density (T)	Saturation effect time (min)	Memory effect time (min)
0.06	110	35
0.20	100	45
0.30	90	58
0.44	60	60

Additionally, the effect of temperature ranging from 25-85 °C was investigated [13]. The different IR-spectra of magnetized water was recorded compared with controls. Magnetized water showed its anomaly properties. They proposed that bulk water did not exist as free molecules, but was more complicated than ordinary substances.

2.1.3.3 X-ray-spectra

Bo, D. and Pang, X.F. [10] demonstrated the X-ray diffraction result of magnetized water (0.44 T magnetic field intensity for 5 h, at 25 °C) by shifting from 39,417 count/s to 42,872 count/s. A diffraction angle (2θ) was slightly decreased. Water could be magnetized by mixing the magnetized water with Fe_2O_3 . The diffraction angle was decreased by 2° compared with the mixture Fe_2O_3 and ordinary water.

As the results mentioned above, they proposed a theory of “Molecular Current” or “Small Magnet” that bulk water existed as closed loops. The magnetic field induced a current in the closed loops as well as the proton responded for a conductive carrier (instead of the electron). Therefore, water could be magnetized in this process. Due to the fact that proton is larger than electron. Thus, the mobility of proton is slower than that of electron. However, this effect is very small and it is enough to increase the intensity peaks of Raman- and IR-spectrum in the experiments.

2.1.4 Calcium carbonate crystallization effect

Coey, J.M.D. and Cass, S. [14] applied a magnetic field (10 mT) into a solution of 120 mg, Ca/L. It was found that a ratio of aragonite/calcite changed

and the memory of magnetic treatment was extended over 200 h.

In accordance with Kobe, S. *et al.* [15] reported later; the aragonite/calcite ratio decreased from 2.43 to 0.32. Goncharuk, V.V. *et al.* [16]-[17] concluded that the crystallization forms of calcium carbonate were influenced by paramagnetic substances, nitrogen oxide, oxygen of the air, and TEMPON (2,2,6,6-tetramethylpiperidine-on-*N*-oxyl radical). As mentioned above results, they refused a contribution of oxygen gas microbubbles.

2.1.5 Concrete strength effect

Engineering paper reported by Su, N. *et al.* [18], the tap water was irradiated *via* the magnetic field and used as a solvent in concrete mixing. An increasing of mortar's compressive strength in the range of 9-23% was dependent on the magnitude of the applied magnetic field. Clearly, enhancement of the combined force among the molecules, corpuscles and components in the concrete, lifted its mass density [19], workability and some of durability [20]-[21]. The proposed mechanism was due to an increase in the degree of concrete's hydration.

2.1.6 Levitation effect

Ikezoe, Y. *et al.* [22] has succeeded in levitating a droplet of water by the superconducting magnet (10 T) in accord to “magneto-Archimedes levitation” which was illustrated by equation (2).

$$-(\rho_w - \rho_a)g + \left(\frac{\chi_w - \chi_a}{\mu_o} \right) B \left(\frac{dB}{dz} \right) = 0 \quad (2)$$

where ρ_w was density of water (1.0 kg/m^3), and ρ_a was density of internal atmosphere system (for air and oxygen

gas was 1.21 and 1.31 kg m⁻³, respectively). χ_w was a volume magnetic susceptibility of water (-9.03×10^{-6}), χ_a was volume magnetic susceptibility for air (0.379×10^{-6}), and oxygen gas (1.80×10^{-6}) at 20 °C, and g was a gravitational force.

Researchers found that replacing the internal atmosphere with air (60 atm) affecting the gravitational force (first-term in eq. 2) was balanced with the Buoyancy force (second-term in eq. 2), a droplet of water levitated. However, if the air replaced by oxygen gas (paramagnetic substance), its internal pressure could be reduced to 12 atm; giving the same result. It was found that the different degree of levitation depended on density and volume magnetic susceptibility of each substance.

This technique has been used to separate any compounds such as potassium chloride and sodium chloride crystals, which were levitated at different positions in the air under applied magnetic field [23]-[26].

2.1.7 Refractive index effect

Refractive index of magnetized water was increased by 0.1 % which reported by Hosoda, H. *et al.* [27]. The value increased from 1.333 to 1.335 under magnetic field (10 T at 25 °C). Not only magnetized water, but also the diluted electrolyte solutions (0.40 M, NiCl₂ and 0.5 M, NaCl) gave the same results. Due to a higher hydrogen bond of ordinary water formed under the applied magnetic field. In contrast, the opposite result has been found with the concentrated electrolyte solutions (2.5 M, NiCl₂ and 5.0 M, NaCl).

Four years later, Pang, X.F. [28] has confirmed that the 0.7% of refractive

index was slightly increased (1.336 to 1.3345) under a lower magnetic field intensity (0.44 T, 25 °C). It was probably due to the strengthening of intermolecular hydrogen bonds of magnetized water [29].

2.1.8 Meting point effect

Regarding the melting point, an effect has been shown by Inaba, H. *et al.* [30], who applied a 6 T magnetic field intensity on the water. A slightly increasing melting point of water (H₂O) was 5.6 mK. With heavy water (D₂O), a larger effect was observed, increased by 21.8 mK. They explained this by Lorentz force suppressing the thermal motion of the partially charged atoms, strengthening the hydrogen bonding and increased the dynamic magnetic susceptibility (the term “dynamic” means the movement of atoms due to the thermal motions such as vibrating and rotating motions at high frequencies). The suppression of the thermal motions by the magnetic field makes the solid phase more stable and makes the dynamic magnetic susceptibility larger. They interpreted the larger experimental values that the dynamic magnetic susceptibility rather than the static magnetic susceptibility was assumed, and the larger ones were considered to be due to the larger dynamic magnetic susceptibility.

Osuga, T. and Tatsuoka, H. [31] has concluded that the magnetic field effect on water was one of the factors affecting the increase of melting point for H₂O and D₂O. Magnetic field provided a suitable position for the liquid water molecules to freeze; subsequently the enhancement of nucleation rate in liquid phase near the melting point has taken place.

2.1.9 Contact angle effect

Otsuka, I. and Ozeki, S. [32] have observed the un-changing of contact angle ($\theta = 65^\circ$) in ultrapure water (Milli-Q water; 18 M Ω) as an ordinary and magnetized water in a vacuum. On the other hand, during the irradiation with oxygen gas present (140-760 mmHg), the contact angle was sharply changed during ~ 30 -100 min at $\sim 57.5^\circ$. This value existed for ~ 70 min and it subsequently sharply increased to the reference water at 210 min. In conclusion, the contact angle of magnetized water was not affected by magnetic fields if it did not coexist with oxygen gas.

2.1.10 Electrolytic potential effect

Otsuka, I. and Ozeki, S. [32] have investigated the effect of magnetic field on the diluted electrolyte solution (10 mM of NaCl, KCl, or CaCl₂). Furthermore, it was found that the magnetized water was more difficult oxidize than the ordinary water, it is likely due to a higher electrolytic potential ($E^0 = 2.35$ to 2.63 V; $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 0.5 \text{H}_2 + \text{O}_2$), the magnetic field induced transient oxygen clathrate-like hydrate, $(\text{O}_2)_m(\text{H}_2\text{O})_n$, and including the developing water networks [33].

2.1.11 Hydrogen bonding effect

Chang, K.T. and Weng, C.I. [34] have calculated the forming of a new hydrogen bond, by varying the applied magnetic field intensity. The 10 T applied magnetic field increased the number of hydrogen bond's by 0.34%.

2.1.12 Vaporization effect

Increasing rate of evaporated water under magnetic field has been found, and compared with ordinary water [35]-[36]. These parameters [37] were the product

of magnetic flux density (B) with its gradient (dB/dz). The possibility of creation for the magnetic wind was driven by the gradient susceptibility distribution caused by water content distribution in the atmosphere. Toledo, E.J.L. *et al.* [29] has also reported the increase of magnetized water's vaporization enthalpy ranging from 58.86 kJ/mol to 68.86 kJ/mol, and was compared to an ordinary water (45-65 mT magnetic field at 22 °C).

2.1.13 Conductivity effect

The conductivity of magnetized water depended directly on applied magnetic field intensity (0.144-0.5 T). Reported [38] the saturation effect time was 5 min after the irradiation. It was explained in a way that the conductivity in water, causing of proton conductivity (instead of the electron) and they calculated the mobility and conductivity of protons as 6.5 - $6.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1}$ and 7.6 - $8.1 \times 10^{-3} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$, respectively [39].

In contrast, Zamora, L.L. *et al.* [2] and Shen, X. [40] did not observe the change of conductivity of magnetized water in comparison with the ordinary water. The conductivity of ordinary water result was $2.00 \pm 0.07 \text{ mS cm}^{-1}$, while the ones of magnetized water under magnetic field were $1.99 \pm 0.07 \text{ mS cm}^{-1}$ and $2.06 \pm 0.06 \text{ mS cm}^{-1}$, at 4 and 16 h, respectively.

Nevertheless, the opposite results have been reported by Szczes, A. *et al.* [36]. The magnetic field reduced the conductivity of magnetized water which was inversely proportional to the flow rate of water. Furthermore, a bulk of water could be kept hold a memory effect up to 24 h. They proposed that the applied magnetic field increased a number of hydrogen bonds network

strengthening, and the perturbation of gas/liquid interface from the air nanobubbles in the water.

2.1.14 Flow rate effect

Applied magnetic field (0.2-0.5 T, unspecified temperature), in perpendicular to burette, reduced the flow rate of distillate water. The 0.5 T of magnetic field intensity can reduce droplets of magnetized water to 2 mL min⁻¹, which was comparable with an ordinary water of 19.5 mL min⁻¹ [38]. It was due to the increase of the magnetized water's viscosity [41]-[42].

2.1.15 Dielectric constant effect

The dependence of magnetic field intensity (0.02-0.05 T) and dielectric constant were observed by Ibrahim, H.I. [38]. Shen, X. [40] also indicated that the increase of 3.7% in dielectric constant of deionized water under applied magnetic intensity of 0.15 T, was due to more polarized water molecules under a higher magnetic field intensity.

2.1.16 Viscosity effect

Cai, R. *et al.* [41] has indicated that magnetic field (1 T, treatment time 13 min, 25 °C) can increase a high-level of purified water's viscosity (18.2 MΩ, 298 K) up to 11%, ranging from ~1.066 mPa s to ~1.18 mPa s. The result showed that the longer the time of magnetic field treatment was, a higher viscosity extended. According to the previous work of Ghauri, S. A. and Ansari, M. S. [42], they have reported the changing of relative viscosity which slightly increased by 0.12%, ranging from 0.8904 mPa s to 0.8915 ± 3x10⁻⁵ mPa (under 0.75 T transverse magnetic field at 25 °C). Similarly, Toledo, E.J.L. *et al.* [29] has reported a 3.34% higher viscosity,

from 964.42 ± 1.19 μPa s to 996.63 ± 4.42 μPa s, in comparison with the ordinary water (22 °C under 45-65 mT).

Ghauri, S. A. *et al.* [42] has also reported the variation of viscosity ($\Delta\eta$) with temperature (T) that it could be well explained by the following second order equation (3) which contained a regression value of 0.9916. The proposed mechanism was on the basis of the stronger hydrogen bonds forming.

$$\Delta\eta = (1.0 \times 10^{-6}) T^2 + (8.0 \times 10^{-4}) T - 0.133 \quad (3)$$

Cai, R. *et al.* [41] also attributed that rotational motion of magnetized water was slower than ordinary water, because of an increase of 'correlation time' (τ_c , the average time for one molecule rotating per radian) from 65 ps to 140 ps. The slower rotational motion indicated that the strengthening of hydrogen bonds was reflected by a larger of water clusters formed. As above results which were refused by Pang, X.F. and Bo, D. [43] who revealed that the water viscosity decreased by 17% (0.3-0.4 T magnetic field and the temperature of 37.5 °C). Saturation effect time was 68 min, ranging nearly from 6 mPa s to 5.5 mPa, while the viscosity of ordinary water was 1.002 mPa. Notice that the viscosity of magnetized water by Pang, X.F. and Bo, D. was highly prone when compared to the ordinary water.

2.1.17 Surface tension effect

The surface tension of magnetized water decreased by 8% of 72.44 mN/m to 62.5 mN/m (1 T intensity field with treatment time for 13 min at 25 °C). In summary, as exposure time increases, the surface tension decreases [41]. Cai, R. *et al.* also attributed surface tension

descended with the cohesive inner molecular energy E_{inner}^A . As the cohesive inner molecular energy decreased, new hydrogen bonds formed. In previous work, Pang, X.F. and Bo, D. [28] reported similar results, the viscosity was reported in terms of contact angle. These values of magnetized water onto copper and graphite surface were reduced by 2° and 1.4° , respectively. They proposed the polarization of water by applying the magnetic field and effecting a change in water clusters.

Fujimura, Y. and Iino, M. [44]-[45] disagreed with the preceding results. Theirs result displayed surface tension of magnetized water (10 T, duration treatment time 20-40 min, 25°C) that increased by $1.83 \pm 0.18\%$, ranging from 71.96 ± 0.14 mN/m to 73.31 ± 0.16 mN/m. The other has reported [29] a smaller effect by 0.04% of surface tension (from 72.27 ± 0.37 mN m^{-1} to 75.50 ± 0.23 mN m^{-1} , at 22°C with 45-65 mT of magnetic field intensity). Note that after removal from the magnetic field, the surface tension exponentially decreased to the control value.

They proposed hydrogen bonds were more stabilized during magnetic field treatment. In addition, Toledo, E.J.L. *et al.* [29] proposed that the magnetic field effect broke an intra hydrogen bond of larger water clusters; therefore, the smaller water clusters with stronger inter cluster hydrogen bonds were formed. The water clusters sizes were explained by 4, 8 and 12. Later, Lee, C. *et al.* [46] calculated the most stable water cluster was sizes of 4. However, Zamora, L.L. *et al.* [2] refused any changing of the surface tension of water after magnetic field treatment. The observed surface tension of ordinary water and magnetized water of 4 h and

16 h for treatment time was 75.4, 75.2 and 75.6 mN m^{-1} , respectively.

According to Amiri, M.C. and Dadkhah, A.A. [47] 's work, the authors suggested that the soluble/insoluble impurity materials were responsible for changing of surface tension water instead of magnetic field effect.

2.1.18 Total hardness effect

Zamora, L.L. *et al.* [2] has not observed the changing total hardness of magnetized water. The value of ordinary water was 0.873 g, CaCO_3 L^{-1} , while the magnetized water's values (4 and 16 h treatment time) depending on the treatment time were 0.877 and 0.879 g, CaCO_3 L^{-1} , respectively.

2.1.19 Convection effect

The convection of water was either suppressed/enhanced by downward/upward magnetic field, depending on the direction of magnetic force [48]. The results indicated that the convection in a diamagnetic fluid of water could be controlled by using the magnetic field of 10 T. Additionally, Zhou, *et al.* [49] proposed that water molecule clusters have a district anisotropy and it was explained in terms of magnetic moment interaction. The magnetic moment will be negative if most of the nearest water molecules form long chains that run nearly parallel to magnetic field strength B. This configuration has a higher stability. Furthermore, if most water molecules become form chains which were vertical to B, the magnetic moment interaction energy will be positive, and that is less stable. This may explain a directional effect of magnetic force.

2.1.20 Ac magnetic susceptibility effect

Gutierrez-Mejia, F. and Ruiz-Suarez, J.C. [1] has investigated the ac

magnetic susceptibility of water in the frequency range of 1 kHz – 1 MHz at a low magnetic field. The results showed a paramagnetic behavior between 500 kHz and 1 MHz of samples (at 37 °C and 25 °C) which was surprising as water was believed to be a diamagnetic. The transition from diamagnetism to paramagnetism was observed in pure water and diluted salt solution (1 mM, NaCl) but the concentrated salt solution (0.1 M and 0.25 M) was not chance. They proposed that while the magnetic field was applied, the perturbation of such molecules would be increased. It may be due to the excitation produced by the magnetic field. However, this effect was not observed at a constant magnetic field because under this condition the magnetization had been seen as an average. In case of ice, water acquired a rigid conformation. The perturbation was small due to the small magnetic field and it only detected the diamagnetic contribution.

2.1.21. Diffusive effect

Chang, K.T. and Weng, C.-I. [34] have calculated the diffusion coefficients of liquid water and that it decreased by approximately 14% (changing from $2.14 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ to $1.87 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, at 27 °C). It could be assumed that a static magnetic field has restricted the movement of water molecules.

2.2 Magnetized water affecting biological system

Yi-long, M.A. *et al.* [50] irradiated 80 mT magnetic field intensity onto water (preparing by doubly distilled deionized water and it was kept at 4 °C overnight before used). Magnetized water could accelerate the activity of the glutamate decarboxylase; increased by 30%. They proposed the magnetization

of ordinary water, and it was rearranged in order, subsequently with a weak magnetic field was formed. The active site of enzyme conformation was activated by this field. Hence, the enhanced activity of enzyme could be observed.

On the other hand, Ueno, S. and Iwasaka, M. [51], reported hydrogen peroxide's decomposed by catalase to give water and oxygen gas as products. They indicate that magnetic fields affect the dynamic movement of oxygen bubbles which are produced in the reaction mixture by the decomposition of hydrogen peroxide. A 20-25% oxygen gas increased during monitoring the reaction. However, the mechanism proposed by the dynamic movement of oxygen bubbles and the magnetic field did not affect the activity of catalase.

Johnson, K.E. *et al.* [52] used magnetized water oral irrigator with 29 patients. The treatment with magnetized water yielded a significant lower calculus index (64%). Gingival and plaque indexes were reduced by 27.5% and 2.2%, respectively. There were not statistically significant, however, a strong positive correlation between the plaque index and the Watt accretion index was observed.

They proposed that the magnetized water oral irrigator could be a useful adjunct in the prevention of calculus accumulation in periodontal patients. As mentioned, it could be due to the changing formation of calcium carbonate crystallization in magnetic fields from calcite to aragonite forms. Aragonite had higher density than calcite form, and it is less prone to form hard scale (Coey, J.M.D. and Cass, S. [14].

Dayong, L. *et al.* [53] studied the effect of magnetized water (distillate water, 0.25 T magnetic field intensity,

flow rate water was 20 mL/mL, 50 times of circulation) on mice given high doses of antineoplastic drugs; CTX (cyclophosphamide), MMC (mitomycin C), Lyc (lycobetaine), DDP (cisplatin) and HA (harringtonine).

Table 2 The %ILS of mice after being given magnetized water daily for a week^d

Drug	Dosage (mg/kg)	Mean survival days			
		No. of	(1) ^a mice	(2) ^b	%ILS
CTX	500	8	0.5	4.0	700
MMC	8	8	4.8	7.2	50
Lyc	200	8	0.6	1.8	200
DDP	40	8	1.5	3.0	100
HA	20	8	2.0	4.5	125

^aWith magnetized water, ^bWithout magnetized water, ^cThe increase of life span (ILS), ^dExperimental term was 7 days, $p < 0.01$

The positive effect of magnetized water among various anticancer drugs on life span was different (**Table 2**). Increased in %ILS of all drugs was observed. They proposed that magnetized water could remarkably extend the life span of mice and attenuated the leukopenia by mitigating the toxicity of anticancer drugs *in vivo*. They believed that magnetic field strengthened the immune functions of the body.

Maheshwari, B.L. and Grewal, H.S. [54] used magnetic field treatment of tap water, recycled water, 1500 ppm NaCl water and 3000 ppm NaCl water as irrigation water of celery, snow peas and peas, all samples were conducted in glasshouse under controlled environmental conditions. Mostly, magnetized water showed a higher % increase in fresh weight as seen in **Table 3**. Except for celery which was not changed, but the water productivity increased.

Table 3 Showing the fresh weight without MF (1), with MF (2) and % increase of fresh weight with MF was comparable without MF and water productivity (4) of celery, snow peas, and peas.

Celery

	(1)	(2)	(3)	(4)
- tap water	414.3	414.5	0	4
- recycled water ^a	377.3	424.0	12	12
- 1500 ppm NaCl water	181.0	198.3	9	11
- 3000 ppm NaCl water	108.5	133.3	25	23

Snow peas pod

	(1)	(2)	(3)	(4)
- tap water	216	233	8	12
- recycled water ^a	198	210	6	7.5
- 1500 ppm NaCl water	186	188	1	0
- 3000 ppm NaCl water	164	174	6	13

Peas

	(1)	(2)	(3)	(4)
- tap water	1.6	1.62	8	5
- recycled water ^a	1.23	1.33	6	7
- 1500 ppm NaCl water	1.05	1.03	1	0
- 3000 ppm NaCl water	0.88	0.93	6	4

(1) Mean yield of fresh weight(g) without MF (2) Mean yield of fresh weight(g) with MF, (3) % Increase of fresh weight with MF is comparable without MF and (4) Water productivity (kg/1000 L water), ^aTreated water from Richmond Sewage Treatment Plant) [54]

Selim, A-F.H. and El-Nady, M.F. [55] showed the result of irrigated tomato seeds by magnetized water. This treatment revealed the best for overcoming the bad effects of water deficit on tomato plant growth characteristics, water relations, proline concentration and photosynthetic pigments, as well as anatomical structure of some organs of tomato plants, in which was comparable to that seed with tap water as a control group. They suggested that the effect of magnetic

treatments act as a protective factor against water deficit. A 13.3% increase in germination of wheat seeds was observed when compared to a control using the magnetized water, whereas the increase in germination was insignificant with the seed magnetization [56].

3. Conclusion

So far, magnetic field slightly effects the properties of water. It is believed that this phenomenon did not influence the pH of water, but it was dependent on the diffusion/dissolution of oxygen, UV-spectra absorption, IR-spectra intensity, x-ray count of its properties. Crystallization of calcium carbonate changed a calcite/aragonite ratio. Engineering reported a compressive strength of mortar increased *e.g.* an increase of the degree of hydration.

Sodium chloride and potassium chloride crystals were differently levitated in the air under the magnetic field. An increase by 0.1% of refractive index and a slight increase of the melting point by 5.6 mK was observed for an ordinary water and also showed more effect on heavy water (21.8 mK). The contact angle was decreased for a while and upward to the ordinary state after an hour. Magnetized water was harder to oxidize due to an increase in electrolytic potential. A 0.34% increase of hydrogen bonds was gained after magnetic treatment. The rate of evaporated water and dielectric constant increased, but the viscosity incline decreased due to reducing by the flow rate. Regarding a number of different results in surface tension, this property is still unconcluded. Conductivity presumably inverted on magnetic flux. The water flow rate decreased under the magnetic field, but the total hardness was not changed.

The AC magnetic susceptibility of water transformed from diamagnetism to paramagnetism, it was observed for pure water and diluted salt solution, only at room temperature but not for concentrated salt solutions. In the biological aspect, magnetized water accelerates 30% glutamate decarboxylase activity. In the other hands, the decomposition activity of hydrogen peroxide by catalase was unaffected. It was employed as an oral irrigator and yielded a significant lower calculus index (64%). Gingival and plaque indexes were reduced by 27.5% and 2.2%, respectively.

Furthermore, it increased in %ILS of drugs; antineoplastic drugs; CTX, MMC, Lyc, DDP and HA, which were taken at high doses on mice. Magnetized water showed positive results as an irrigator of celery, snow peas and peas. A higher growth in fresh weight in comparison to tap water except for celery, where although % increase in fresh weight did not change, the water productivity increased. Magnetized water could overcome the negative effects of water deficit on tomato plant growth characteristics, water relations, proline concentration, and photosynthetic pigments, as well as the anatomical structure of some organs of tomato plants which was comparable to that seed with tap water as a control group. Furthermore, increasing in wheat seeds' germination was also observed.

Many theories of magnetized water were proposed, including the molecular current or small magnets, dissolved oxygen, water cluster forming, hydrogen bond formed changing, oxygen nanobubbles forming, liquid/gas interface perturbation, and oxygen clathrate-like hydrate, $(O_2)_m(H_2O)_n + \text{water network}$. Nevertheless, all those just have ascribed

by limitations. Many works' claims have been made that the magnetic field changed the physicochemical property of water which depended on many factors in experiments *e.g.* magnetic flux density, saturation effect time, memory effect time, temperature, flow rate of water, etc. It can be assumed that the water molecules after magnetic treatment could be kept "memory effect" for a while whether its significantly changed physicochemical properties on biological systems. Although, all proposed theories would seem to be reasonable, but clearer accountability is needed for further studies.

4. Acknowledgement

I would like to thank Dr. Pimpimon Anekthirakun and RMUTP journal editorial department for English proofing.

5. References

- [1] F. Gutierrez-Mejia and J. C. Ruiz-Suarez, "AC magnetic susceptibility at medium frequencies suggests a paramagnetic behavior of pure water," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 324, no. 6, pp. 1129–1132, Mar. 2012.
- [2] R. V. Martín Algarra, L. Lahuerta Zamora, G. M. Antón Fos and P. A. Alemán López, "Magnetized Water: Science or Fraud?," *J. Chem. Educ.*, vol. 85, no. 10, p. 1416, Oct. 2008,
- [3] T. I. Quickenden, D. M. Betts, B. Cole and M. Noble, "The effect of magnetic fields on the pH of water," *J. Phys. Chem.*, vol. 75, no. 18, pp. 2830-2831, Sep. 1971.
- [4] S. Ueno and K. Harada, "Redistribution of dissolved oxygen concentration under strong dc magnetic fields," *IEEE T. Magn.*, vol. 18, no. 6, pp. 1704-1706, Nov. 1982.
- [5] S. Ueno, M. Iwasaka, and G. Furukawa, "Dynamic behavior of dissolved oxygen under magnetic fields," *IEEE T. Magn.*, vol. 31, no. 6, pp. 4259-4261, 1995.
- [6] N. Hirota, . Ikezoe, H. Ueakata, J. Nakagawa and K. Kitazawa, "Magnetic field effect on the kinetics of oxygen dissolution into water," *Materials Transactions – JIM*, vol. 41, no. 8, pp. 976-980, 2000.
- [7] J. Nakagawa, N. Hirota, K. Kitazawa, H. Yokoi, Y. Kakudate, and S. Fujiwara, "Measurement of oxygen pressure increase in magnetic field," *IEEE T. Magn.*, vol. 34, no. 4, pp. 2024-2026, 1998.
- [8] S. Rai, N.N. Singh and R.N. Mishra, "Magnetic restructuring of water," *Med. Biol. Eng. Comput.*, pp. 614-617, 1995.
- [9] M. Colic and D. Morse, "The elusive mechanism of the magnetic 'memory' of water," *Colloid Surface A*, vol. 154, no. 1-2, pp. 167–174, 1999.
- [10] D. Bo, and X.F. Pang, "Variations of optic properties of water under action of static magnetic field," *Chinese Sci. Bull.*, vol. 52, no. 23, pp. 3179-3182, 2007.
- [11] Z.-R. Ding, Y.-J. Zhao, F.-L. Chen, J.-Z. Chen, and S.-X. Duan, "Magnetization mechanism of magnetized water," *Acta Phys. Sin.*, vol. 60, no. 6, pp. 064701, 2011.
- [12] X.-F. Pang, J.-F. Yu and H.-J. Zeng, "The properties of proton conductivity along the hydrogen-

- bonded molecular systems with damping under influences of thermal perturbation and structure nonuniformity,” *Int. J. Mod. Phys. B*, vol. 25, no. 01, pp. 55–71, Jan. 2011.
- [13] X. Pang and B. Deng, “Infrared absorption spectra of pure and magnetized water at elevated temperatures,” *A Letter Journal Exploring the Frontiers of Physics*, vol. 92, no. 6, pp. 65001, Jan. 2011.
- [14] J. M. D. Coey and S. Cass, “Magnetic water treatment,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 209, no.1-3, pp. 71-74, Feb. 2000.
- [15] S. Kobe, G. Drazic, P.J. McGuinness and J. Strazisar, “The influence of the magnetic field on the crystallisation form of calcium carbonate and the testing of a magnetic water-treatment device,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 236, no. 1-2, pp. 71–76, Oct. 2001.
- [16] V. V. Goncharuk, V. A. Bagrii, R. D. Chebotareva and S. Yu. Bashtan, “Impact of dissolved oxygen on the water magnetization effect,” *J. Water Chem. Tech.*, vol. 28, no. 3, pp. 63-65, Jan. 2006.
- [17] V. V. Goncharuk, V. A. Bagrii, R. D. Chebotareva, S. Yu. Bashtan and A. V. Nanieva, “Crystallization of calcium carbonate in magnetized water in the presence of paramagnetic substances,” *J. Water Chem. Tech.*, vol. 31, no. 3, pp. 172–176, Jun. 2009.
- [18] N. Su, Y.-H. Wu and C.-Y. Mar, “Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast-furnace slag,” *Cement Concrete Res.*, vol. 30, no. 4, pp. 599-605, 2000.
- [19] X.F. Pang and X.S. Zhu, “The influences of magnetized water on physical properties of concrete,” *2011 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, ASEMD 2011*, art. no. 6145116, pp. 270-274, 2011.
- [20] M.N. Abou-Zeid, E.H. Fahmy and M. Abdel-Raouf, “Properities of concrete mixtures incorporating magnetized water,” *Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*, 2015, GC-162-1-GC-162-10.
- [21] N. Su and B. Miao, “Effect of magnetized water on properties of fluidized concrete,” *Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*, pp. 1208-1213, 2003.
- [22] Y. Ikezoe, N. Hirota, J. Nakagawa and K. Kitazawa, “Making water levitate,” *Nature*, vol. 393(25 June), pp. 749-750, 1998.
- [23] K. Kitazawa, Y. Ikezoe, H. Uetake, and N. Hirota, “Magnetic field effects on water, air and powders,” *Physica B*, vol. 294-295, pp. 709-714, 2001.
- [24] Y. Ikezoe, T. Kaihatsu, S. Sakae, H. Uetake, N. Hirota and K. Kitazawa, “Separation of feeble magnetic particles with magneto-Archimedes levitation,” *Energ. Convers. Manage.*, vol. 43, pp. 417-425, 2002.
- [25] N. Hirota, Y. Ikezoe, H. Uetake, Kaihatsu, T. Takayama and K. Kitazawa, “Magneto-Archimedes levitation and its application,”

- RIKEN Review*, no. 44, pp. 159-161, 2002.
- [26] K. Kitazawa, Y. Ikezoe, H. Uetake and N. Hirota, "Magnetic field effects on water, air and powders," *Physica B*, vol. 294-295, pp. 709-714, 2004.
- [27] H. Hosoda, H. Mori, N. Sogoshi, A. Nagasawa and S. Nakabayashi, "Refractive indices of water and aqueous electrolyte solutions under high magnetic fields," *J. Phys. Chem. A*, vol. 108, no. 9, pp. 1461-1464, 2004.
- [28] X.F. Pang and D. Bo, "The changes of macroscopic features and microscopic structures of water under influence of magnetic field," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 403, no. 19-20, pp. 3571– 3577, Oct. 2008.
- [29] E. J. L. Toledo, T. C. Ramalho and Z. M. Magriotis, "Influence of magnetic field on physical-chemical properties of the liquid water: Insights from experimental and theoretical models," *J. Mol. Struct.*, vol. 888, no. 1-3, pp. 409–415, Oct. 2008.
- [30] H. Inaba, T. Saitou, K. Tozaki and H. Hayashi, "Effect of the magnetic field on the melting transition of H₂O and D₂O measured by a high resolution and supersensitive differential scanning calorimeter," *J. Appl. Phys.*, vol. 96, no. 11, pp. 6127-6132, Dec. 2004.
- [31] T. Osuga and H. Tatsuoka, "Magnetic-field transfer of water molecules," *J. Appl. Phys.*, vol. 106, pp. 094311(1-9), 2009.
- [32] I. Otsuka and S. Ozeki, "Does magnetic treatment of water change its properties?," *J. Phys. Chem. B*, vol. 110, no. 4, pp. 1509-1512, Feb. 2006.
- [33] S. Ozeki and I. Otsuka, "Transient oxygen clathrate-like hydrate and water networks induced by magnetic fields," *J. Phys. Chem. B*, vol. 110, no. 41, pp. 20067-20072, Oct. 2006.
- [34] K.T. Chang, and C.-I. Weng, "The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation," *J. Appl. Phys.* Vol. 100, no. 043917, pp. 1-6, 2006.
- [35] L. Holysz, A. Szczes and E. Chibowski, "Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 316, no. 2, pp. 996–1002, 2007.
- [36] A. Szczes, E. Chibowski, L. Holysz and P. Rafalski, "Effects of static magnetic field on water at kinetic condition," *Chem. Eng. Process*, vol. 50, no. 1, pp. 124-127, 2011.
- [37] J. Nakagawa, N. Hirota, K. Kitazawa and M. Shoda, "Magnetic field enhancement of water vaporization," *J. Appl. Phys.*, vol. 86, no. 5, pp. 2923-2925, 1999.
- [38] H.I. Ibrahim, "Biophysical Properties of Magnetized Distilled Water," *Egypt. J. Solids*, vol. 29, no. 2, pp. 363-369, 2006.
- [39] X.F. Pang and Y.-P. Feng, "Mobility and conductivity of the proton transfer in hydrogen-bonded molecular systems," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 373, no. 3-4, pp. 392–401, 2003.

- [40] X. Shen, "Increased dielectric constant in the water treated by extremely low frequency electromagnetic field and its possible biological implication," *J. Physics: Conference Series*, vol. 329, no. 012019, 2011.
- [41] R. Cai, H. Yang, J. He, and W. Zhu, "The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds," *J. Mol. Struct.*, vol. 938, no. 1-3, pp. 15-19, 2009.
- [42] S.A. Ghauri and M.S. Ansari, "Increase of water viscosity under the influence of magnetic field," *J. Appl. Phys.*, vol. 100, no. 6, pp. 066101-066101-2, 2006.
- [43] X. Pang and B. Deng, "Investigation of changes in properties of water under the action of a magnetic field," *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*, vol. 51, no. 11, pp. 1621-1632, Nov. 2008.
- [44] Y. Fujimura and M. Iino, "Magnetic field increases the surface tension of water," *J. of Physics: Conference Series*, vol. 156, no. 1, pp. 1-5, 2009.
- [45] Y. Fujimura and M. Iino, "The surface tension of water under high magnetic fields," *J. Appl. Phys.*, 103, 124903, 2008.
- [46] C. Lee, H. Chen and G. Fitzgerald, "Chemical bonding in water clusters," *J. Chem. Phys.* Vol. 102, no. 3, pp. 1266-1269, 1995.
- [47] M.C. Amiri and A.A. Dadkhah, "On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment", *Colloid Surface A*, vol. 27, no. 8(1-3), pp. 252-255, 2016.
- [48] H. Nakamura, T. Takayama, H. Uetake, N. Hirota and K. Kitazawa, "Magnetically Controlled Convection in a Diamagnetic Fluid," *Phys. Rev.* vol. 94, no. 14, p. 144501, Apr. 2005.
- [49] K. X. Zhou, G. W. Lu, Q. C. Zhou, J. H. Song, S. T. Jiang and H. R. Xia, "Monte Carlo simulation of liquid water in a magnetic field," *J. Appl. Phys.*, vol. 88, no. 4, pp. 1802-1805, 2000.
- [50] M. Yi-long, R. Hui, R. Shu, Z. Er-kang, H. Gang and Z. Yao-wu, "A study of the effect of magnetized water on enzyme activities by potentiometric enzyme electrode method," *J. Tongji Med. Univ.*, vol. 12, no. 4, pp. 193-196, Dec. 1992.
- [51] S. Ueno and M. Iwasaka, "Catalytic activity of catalase under strong magnetic fields of up to 8 T," *J. Appl. Phys.*, vol. 79, no. 8, p. 4705, 1996.
- [52] K. E. Johnson, J. J. Sanders, R. G. Gellin and Y. Y. Palesch, "The effectiveness of a magnetized water oral irrigator (Hydro Floss®) on plaque, calculus and gingival health," *J. Clin. Periodontol*, vol. 25, no. 4, pp. 316-321, Apr. 1998.
- [53] L. Dayong, S. Wenda, C. Jingyi, L. Tingren, C. Baoyi and F. Zhiyu, "Effect of magnetized water on the mice given," *J. of Shanghai University*, vol. 3, no. 1, pp. 81-83, Mar. 1999.
- [54] B. L. Maheshwari and H. S. Grewal, "Magnetic treatment of irrigation water: Its effects on vegetable crop yield and water productivity," *Agr. Water Manage.* vol. 96, no. 8, pp. 1229-1236, Aug. 2009.

- [55] A. -F. H. Selim and M. F. El-Nady, "Physio-anatomical responses of drought stressed tomato plants to magnetic field," *Acta Astronautica*, vol. 69, no. 7-8, pp. 387–396, Sep. 2011.
- [56] B. Ijaz, S. A. Jatoi, D. Ahmad, M. S. Masood and S. U. Siddiqui, "Changes in germination behavior of wheat seeds exposed to magnetic field and magnetically structured water," *African J. of Biotech.*, vol. 11, no. 15, pp. 3575-3582, Feb. 2012.

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

การกำจัดสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีที่กระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

สุพัตรา รักษาพรต* นันทพร มุลรังษี วราภรณ์ พันธุ์เดช และ อังคณา แยมศรี

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

41 หมู่ 5 ตำบลท่าช้าง อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี 22000

รับบทความ 15 สิงหาคม 2562 แก้ไขบทความ 23 พฤษภาคม 2563 ตอรับบทความ 19 มิถุนายน 2563

บทคัดย่อ

สีย้อมที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ คณะผู้วิจัยจึงสนใจนำเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีเหลือทิ้งมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์โดยวิธีการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 36 มิลลิโมลต่อกรัม อัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อถ่าน 20:32 มิลลิกรัมต่อกรัม เพื่อนำไปใช้ในการดูดซับสีย้อม โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม อัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสีย้อม และเวลาในการดูดซับ และตรวจสอบลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ปริมาณความชื้น การดูดซับไอโอดีน การดูดซับเมทิลีนบลู และศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รวมถึงการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ จากการทดลอง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีรูพรุนขนาดเล็ก สามารถดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์สูงสุด 7.50 ± 0.25 มิลลิกรัมต่อกรัม และเข้าสู่สมดุลที่เวลา 150 นาที โดยใช้อัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสีย้อม 1:500 กรัมต่อมิลลิกรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าอัตราเร็วการดูดซับสีย้อมสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ($R^2 = 0.9999$) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมก็เพิ่มตามไปด้วย แต่ถ้าเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์มากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมจะลดลงส่งผลให้เวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับช้าลงตามไปด้วย

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์; เมล็ดสละ; การดูดซับ; สีย้อม

*ผู้นิพนธ์ประสานงานโทร: +669 2964 4654, ไลน์อีเมลล์: supattra.r@rbru.ac.th

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

Dye Removal Using *Salacca zalacca* (Sumalee) Seeds Activated Carbon by KOH Activation

Supattra Raksaphort* Nuntaporn Moonrungsee Waraporn Pandet and Angkhana Yamsree

Faculty of Science and Technology, Rambhai Barni Rajabhat University
41 Moo 5 Thachang Mueng Chanthaburi 22000

Received 15 August 2019; Revised 23 May 2020; Accepted 19 June 2020

Abstract

Dyes contaminated in wastewater, that negatively affecting the environment and human health. The objectives of this study to prepare activated carbon from *Salacca zalacca* (Sumalee) seeds activated by 36 mmol/g KOH, dye solution and activated carbon ratio 20:32 mL/g for dye removal. The influents of dye removal from wastewater by *Salacca zalacca* (Sumalee) seeds activated carbon were investigated as initial dye concentration, activated carbon and dye solution ratio, and contraction time. The moisture content, the iodine number, the methylene blue index, and the functional groups by FTIR technique of the *Salacca zalacca* (Sumalee) activated carbon were characterized, and the kinetics adsorption were also analyzed. The results showed that the activated carbon was the microporous material, the highest dye removal from wastewater was 7.50 ± 0.25 mg/g, the equilibrium time was 150 min with the activated carbon to dye solution ratio of 1:500 g/mL, for 200 mg/L initial concentration. The kinetics of the adsorption process can be described by a pseudo-second order model ($R^2 = 0.9999$). When increasing the initial concentration of dyes, the adsorption efficiency was increased. The amount of activated carbon increased, resulting in lower adsorption efficiency and the equilibrium time was longer.

Keywords : Activated Carbon; Salacca Seed; Adsorption; Dye

* Corresponding Author. Tel.: +669 2964 4654, E-mail Address: supattra.r@rbru.ac.th

1. บทนำ

สีย้อม (Dyes) เป็นสารที่สลายตัวทางชีวภาพได้ยาก มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ถึงแม้สีย้อมบางชนิดจะไม่เป็นพิษ แต่สีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้มทำให้เกิดสภาพไม่น่าดู และเป็นที่รังเกียจต่อผู้พบเห็นเมื่อมีการปนเปื้อนในแหล่งน้ำ และยังกั้นขวางปริมาณแสงส่งผลให้ความสามารถในการส่องผ่านสู่แหล่งน้ำลดลง ลดการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ การผลิตออกซิเจนลดลง ทำให้แหล่งน้ำมีออกซิเจนไม่เพียงพอและไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ [1]-[3] นอกจากนี้โลหะเจือปนที่ปนเปื้อนอยู่ในสีย้อมผ้า ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิด ทำให้เอนไซม์ทำงานได้น้อยลงหรือไม่ได้เลย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสีย [4]

เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพ เคมีและชีวภาพ โดยแต่ละวิธีจะมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ซึ่งการใช้เทคโนโลยีทางกายภาพ เช่น การใช้กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่น ก็จะต้องควบคุมระดับความดันน้ำ อัตราการไหลของน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิสำหรับการใช้เทคโนโลยีทางเคมีมีข้อจำกัดในเรื่องของการใช้สารเคมีในการกำจัด นอกจากจะสิ้นเปลืองแล้ว ตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก และเป็นการเพิ่มสารเคมีในสิ่งแวดล้อมด้วย เช่น กรณีวิธีการสร้างตะกอนและการรวมตะกอนโดยใช้สารส้ม ปูนขาว และสารประกอบเหล็ก เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่จะมีกากตะกอนเกิดขึ้นในปริมาณมากซึ่งยุ่งยากในการนำไปกำจัด กระบวนการเฟนตัน (Fenton Process) ก็ต้องควบคุมความเข้มข้นของเหล็ก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ค่าอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา วิธีการใช้โอโซน ก็ต้องควบคุมอุณหภูมิ ความดัน ความเป็นกรด-ด่าง และความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า รวมทั้งอาจส่งผลกระทบต่อ

สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ เนื่องจากโอโซนจะทำปฏิกิริยากับสารบางชนิดทำให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็ง ส่วนการใช้เทคโนโลยีทางชีวภาพ ได้แก่ การดูดซับด้วยสาหร่าย การย่อยสลายสีย้อมโดยใช้เชื้อราบางชนิด มีข้อจำกัดในเรื่องความสะดวกในการใช้งาน การเก็บรักษา การขนส่ง รวมถึงการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและการย่อยสลาย [5] นอกจากนี้วิธีต่าง ๆ ที่กล่าวมามีอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือ กระบวนการดูดซับ ถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีวิธีการที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ๆ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารพิษ และสีย้อมออกจากน้ำเสีย ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ในการดูดซับได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) โดยเป็นตัวดูดซับสำหรับการบำบัดน้ำเสียซึ่งสามารถดูดซับสีย้อม โลหะหนัก อินทรีย์สารได้

ถ่านกัมมันต์ เป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงและมีคุณสมบัติในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนในของเหลว หรือก๊าซเอาไว้ได้ในปริมาณสูง ซึ่งเตรียมได้จากการนำวัตถุดิบพวกสารอินทรีย์ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ถ่านหิน ปีโตรเลียม กะลาเผาขาว เปลือกถั่วเมล็ดแข็ง กากขานอ้อย ชีล้อย กระดุกสัตว์ เป็นต้น มาเผาด้วยความร้อนในเตาอัดอากาศให้เป็นถ่าน และกระตุ้นผ่านกระบวนการทางเคมีหรือกายภาพเพื่อให้เกิดความพรุน (Porosity) เพิ่มขึ้นจำนวนมากเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนในการดูดซับให้มากที่สุด ภายในโครงสร้างมีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็กลักษณะโครงสร้างคล้ายของแกรไฟต์ ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อมวล (Surface Area per Mass Ratio) สูงมาก มีค่าประมาณ 600 ถึงมากกว่า 2,400 ตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g) ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุตั้งต้น และกระบวนการกระตุ้น [6] โดยการกระตุ้นถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ การกระตุ้นทางกายภาพ ซึ่งจะเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่ใช้เวลานานและความร้อนสูง ส่งผลให้ได้ผลผลิตต่ำ และมีค่าใช้จ่ายสูง ส่วนการกระตุ้นด้วยสารเคมี ใช้เวลาไม่นาน และ

อุณหภูมิกระตุ้นต่ำ ได้โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ดีกว่า แต่วิธีนี้อาจมีข้อบกพร่องในเรื่องของสารตกค้างในถ่านกัมมันต์ได้ ส่วนใหญ่สารเคมีที่นิยมใช้ในการกระตุ้นเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ได้แก่ กรดฟอสฟอริก โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และซิงค์คลอไรด์ ซึ่งถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนเพิ่มขึ้นได้ต้องขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของลิกนินต่อเซลลูโลสในวัตถุดิบ อัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น และอัตราการให้ความร้อน เป็นต้น โดยในปัจจุบันถ่านกัมมันต์ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การกำจัดสี และกลิ่นในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มหรือน้ำประปา ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย เป็นต้น

จังหวัดจันทบุรีเป็นจังหวัดที่มีเกษตรกรรมเป็นพื้นฐานของเศรษฐกิจ ส่วนใหญ่เป็นการเพาะปลูกพืชไม้ผล เนื่องจากจังหวัดจันทบุรีมีสภาพภูมิประเทศ และสภาพภูมิอากาศเหมาะสำหรับการเพาะปลูก ทำให้จังหวัดจันทบุรีมีผลไม้เป็นจำนวนมากและคุณภาพดี ผลไม้ที่เกษตรกรนิยมปลูกมาก คือ มังคุด ทุเรียน เงาะ และสละ (*Salacca zalacca*) ซึ่งสละจัดเป็นผลไม้ที่นิยมรับประทานมากชนิดหนึ่งไม่ว่าจะเป็นการรับประทานในรูปผลสดหรือการนำมาแปรรูป เนื่องจากสละเป็นผลไม้ที่มีประโยชน์ อุดมด้วยสารอาหารหลายชนิด เนื้ออ่อนนุ่ม มีรสหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อยและมีกลิ่นหอม สละเป็นผลไม้ที่ให้ผลผลิตต่อเนื่องตลอดทั้งปี สามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด ได้แก่ สลวยแกล้ว สลวกวน น้ำพริกสละ เป็นต้น ซึ่งสามารถเป็นของฝากและเก็บรักษาได้นานขึ้น ทั้งยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับสละในช่วงที่มีผลผลิตออกสู่ตลาดปริมาณมากและเพิ่มรายได้ให้กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรอีกด้วย ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากสละที่นิยมมากที่สุดคือ สลวยแกล้ว โดยแปรรูปจากผลสละสดให้อยู่ในรูปของสละในน้ำเชื่อม ในกระบวนการผลิตสลวยแกล้ว จะต้องควั่นเมล็ดสละออกก่อน ทำให้มีปริมาณเมล็ดสละเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปจำนวนมาก ซึ่งเมล็ดสละ

เหลือทิ้งเหล่านี้จะถูกทิ้งไปโดยที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ และหากไม่ได้รับการกำจัดที่เหมาะสม เมล็ดสละดังกล่าวจะกลายเป็นขยะซึ่งเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา อีกทั้งเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีมีปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 60 [7] ซึ่งเป็นปริมาณที่เพียงพอที่จะนำมาพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์ได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชีวมวลอื่น ๆ เช่น กะลาผลปาล์ม ร้อยละ 19.8 [8] ต้นโอ๊กกาน้ำ ร้อยละ 23.0 [9] เปลือกไข่ไก่ ร้อยละ 30.46 และเปลือกหอยแครง ร้อยละ 37.10 [10]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้เตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีที่กระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก [7] และนำไปดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ มีค่าเท่ากับ 2.90 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อใช้สารละลายสีย้อมเข้มข้นเริ่มต้นที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายสีย้อม 1:50 กรัมต่อมิลลิกรัม และเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 40 นาที แต่ยังไม่สามารถกำจัดสีย้อมออกได้หมด [11] ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะพัฒนาการนำเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีเหลือทิ้งมาเตรียมเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น เพื่อนำไปใช้ในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ปริมาณของถ่านกัมมันต์ และเวลาที่ใช้ในการกำจัดสีย้อม รวมถึงศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ งานวิจัยนี้นอกจากจะช่วยเหลือเพิ่มมูลค่าให้กับเมล็ดสละแล้ว ยังเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการกำจัดของเสียได้อย่างเหมาะสมอีกด้วย

2. วิธีการทดลอง

การวิจัยในครั้งนี้มีลำดับขั้นตอนการดำเนินงานและการทดลองดังต่อไปนี้

2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ คือ เมล็ดสละพันธุ์สุมาลีเหลือทิ้งจากการแปรรูปสละลอยแก้วจากอำเภอขลุง จังหวัดจันทบุรี กระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH, Analytical Reagent Grade, Chemikit Limited Partnership) เข้มข้น 36 มิลลิโมลต่อกรัม กำจัดส่วนเกินของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และเกล็ดด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl, Commercial Grade, Chemikit Limited Partnership) เข้มข้น 0.1 นอร์มอล ทดสอบด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3 , Laboratory Grade, Ajax Finechem) ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ใช้ในการดูดซับสีย้อมผ้าประเภทสีย้อมแอซิดฟ (Reactive Dyes, Commercial Grade) ซึ่งเป็นสีน้ำเงินกรมท่า ใช้ไอโอดีน (I_2 , Analytical Reagent Grade, Ajax Finechem) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล และโซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, Analytical Reagent Grade, Ajax Finechem) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ในการวิเคราะห์หาค่าการดูดซับของไอโอดีน และใช้เมทิลีนบลู ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$, Laboratory Grade, Ajax Finechem) วิเคราะห์ค่าการดูดซับของเมทิลีนบลู

2.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี

2.2.1 การเตรียมตัวอย่างเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี

นำเมล็ดสละมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา หั่นให้มีขนาดเท่า ๆ กัน จากนั้นนำไปผึ่งลมให้แห้ง และนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ แล้วเก็บไว้ในภาชนะสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง

2.2.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี

นำเมล็ดสละที่ผ่านการอบแห้งแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง [7] ที่

ให้เย็นในเตาเผา ได้เป็นถ่านชาร์ และนำถ่านชาร์มาผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 36 มิลลิโมลต่อกรัม ในอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อถ่านชาร์ 20:32 มิลลิลิตรต่อกรัม อบถ่านให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง [12] ทั้งให้เย็นและล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้อย่างต่อเนื่องด้วยน้ำประปา กำจัดส่วนเกินของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และเกล็ดด้วยกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.1 นอร์มอล ล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยน้ำสะอาด ทดสอบด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท อบถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิให้เย็น บดและร่อนผ่านตะแกรงแยกขนาด 180 ไมโครเมตร ก่อนนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น

2.3 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์

2.3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ตามมาตรฐาน

ASTM-D2867-95

อบถั่วกระเบื้องที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกน้ำหนักของถั่วกระเบื้อง และชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์ตัวอย่างให้มีน้ำหนักประมาณ 1.000X กรัม ใส่ในถั่วกระเบื้อง บันทึกน้ำหนักก่อนอบของถั่วกระเบื้อง และถ่านกัมมันต์ จากนั้นนำไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำไปชั่ง และบันทึกน้ำหนักหลังอบของถั่วกระเบื้อง และถ่านกัมมันต์ เพื่อคำนวณหาร้อยละความชื้นของถ่านกัมมันต์

2.3.2 การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน ตาม

มาตรฐาน ASTM-D4607-94

อบถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งและบันทึกน้ำหนักถ่านกัมมันต์ตัวอย่างที่อบแล้ว $0.5000 \pm 0.05xx$ กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ จากนั้นบีบ

สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน เพื่อให้ผงถ่านกัมมันต์ทุกส่วนชุ่มด้วยสารละลาย เปิดจุกต้มในตู้ดูดควัน ให้เดือด 30 วินาที เพื่อกำจัดเถ้า และกัมมันต์ออกจากผิวถ่านกัมมันต์ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ปิดเตาสารละลายไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ปิดจุกอย่างรวดเร็วแล้วเขย่าแรง ๆ เป็นเวลา 30 วินาที กรองแยกถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก ประมาณ 20 ถึง 30 มิลลิลิตร จากนั้นเปิดสารละลาย 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ และไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีขาวอ่อน เติมน้ำแบ่ง 2-3 หยด ไทเทรตต่อจนสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเข้มเป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ นำค่าความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาปริมาณการดูดซับไฮโดรเจนของถ่านกัมมันต์

2.3.3 การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับเมทิลีนบลู ตามมาตรฐาน JIS K1474-1991

อบถ่านที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ซึ่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่อบแล้ว $0.5000 \pm 0.05 \times x$ กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ พร้อมบันทึกน้ำหนัก ปิดเตาสารละลายเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่ากรด-เบสเท่ากับ 7 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีถ่านกัมมันต์ ปิดจุกและกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที และกรองแยกถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก ประมาณ 5 ถึง 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปหาความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดซับโดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer, Thermo Scientific, Genesys

10S) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 667 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์เป็นตัวเปรียบเทียบ และนำค่าความเข้มข้นที่วัดได้มาคำนวณหาปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลู

2.3.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET Surface Area)

ปริมาตรรูพรุนรวม (Total Pore Volume)

ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average Pore Diameters)
ของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนรวม และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีเหลือทิ้ง โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (Quantachrome, NovaWin, Autosorb 1 MP) ด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET)

2.3.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วย

เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR)

ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีทั้งก่อนและหลังการดูดซับสี้อม ถูกนำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงคลื่น $4000-500 \text{ cm}^{-1}$ โดยผสมถ่านกัมมันต์กับผงโพแทสเซียมโบรไมด์ บดให้ละเอียด ใส่ลงในแม่พิมพ์ นำไปอัดด้วยแท่นอัดไฮดรอลิก (Hydraulic) จากนั้นนำแผ่นถ่านกัมมันต์ที่อัดไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์

2.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลในการดูดซับสี้อม ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์

อบถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่อบแล้วใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดเตาสารละลายสี้อมผ้า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี้อม 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีถ่านกัมมันต์อยู่ ด้วยอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อน้ำเสียสังเคราะห์

เท่ากับ 1:500, 2:500, 3:500 และ 4:500 กรัมต่อมิลลิลิตร กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2-360 นาที กรองแยกถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายสีย้อมผ้าด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรกไป จากนั้นจึงกรองรับสารละลายที่เหลือเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer, Thermo Scientific, Genesys 10S) ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร แล้วนำมาคำนวณหาค่าปริมาณการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละ ตามสมการ (1)

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad (1)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณการดูดซับสีย้อม (มิลลิกรัมต่อกรัม) C_o และ C_e คือ ความเข้มข้นของสีย้อมตอนเริ่มต้นและที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ V คือ ปริมาตรสารละลาย (ลิตร) และ m คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับ (กรัม)

2.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

นำข้อมูลที่ได้จากการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น และเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ต่าง ๆ มาคำนวณตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อศึกษากลไกในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาตรา

ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาตราที่เตรียมได้มีขนาด 180 ไมครอน มีปริมาณความชื้นของเมล็ดสละอยู่ร้อยละ 36.91 โดยทั่วไปโครงสร้างของเมล็ดจะมีเปลือกหุ้มทำหน้าที่ป้องกันการกระหายของน้ำที่สะสมอยู่ในเอนโดสเปิร์ม (Endosperm) เพื่อใช้สำหรับเป็นแหล่งอาหารในการเจริญเติบโตเป็นต้นพืชของเอ็มบริโอ (Embryo) ดังนั้น น้ำหนักแห้งเมล็ดสละพันธุ์สุมาตราที่เหลืออยู่ เท่ากับ ร้อยละ 63.09 อาจจะประกอบไปด้วยคาร์บอน และสารระเหยง่ายต่าง ๆ เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน เป็นต้น [13] ซึ่งการเตรียมถ่านกัมมันต์จะต้องใช้วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักจึงเป็นผลดีสำหรับการนำเมล็ดสละพันธุ์สุมาตราไปเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ มีร้อยละผลผลิตของถ่านชาร์ เท่ากับร้อยละ 32.18 และร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ เท่ากับร้อยละ 10.69 เมื่อใช้ความร้อนในการทำคาร์บอนไอซ์เซชันและการกระตุ้นถ่าน จะทำให้องค์ประกอบต่าง ๆ และคาร์บอนบางส่วน รวมถึงสารระเหยง่ายต่าง ๆ และน้ำ ถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของเมล็ดสละพันธุ์สุมาตรา ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีโครงสร้างของรูพรุน และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้ร้อยละผลผลิตของถ่านชาร์และร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ลดลง

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาตรา

ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์	ผลที่ได้
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.35±0.01
ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	532.32±59.08
ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)	12.81±0.04
พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	500.29
ปริมาตรรูพรุนรวม (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	0.250
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (นาโนเมตร)	0.997

ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีที่เตรียมได้ มีปริมาณความชื้น ค่าการดูดซับไอโอดีน และค่าการดูดซับเมทิลีนบลู แสดงดังตารางที่ 1

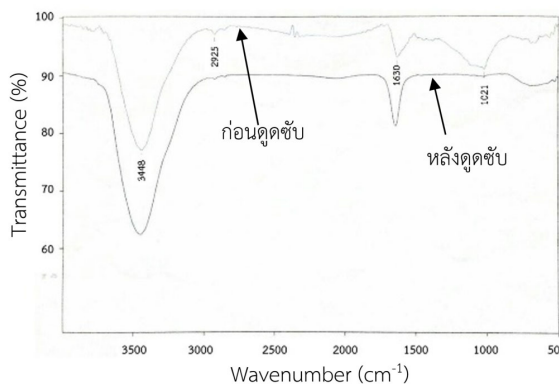
จากการศึกษาลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้พบว่า ถ่านกัมมันต์มีปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 0.35 ± 0.01 ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีปริมาณความชื้นตามเกณฑ์มาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่กำหนดให้ถ่านกัมมันต์มีปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 8 [14] เนื่องจากปริมาณความชื้นของถ่านกัมมันต์จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยปริมาณความชื้นที่สูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง ปริมาณการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 532.32 ± 59.08 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอโอดีนต่ำกว่าเกณฑ์ของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเล็กน้อย ที่กำหนดให้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีค่าการดูดซับไอโอดีน ไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม [14] อาจเนื่องมาจากการที่ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวน้อยเพียง 500.29 ตารางเมตรต่อกรัม ทำให้สามารถดูดซับไอโอดีนได้ต่ำกว่าเกณฑ์ และมีปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลูเท่ากับ 12.81 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูต่ำ เนื่องจากโมเลกุลของเมทิลีนบลูมีขนาดประมาณ 1.58 นาโนเมตร ซึ่งใหญ่กว่ารูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ (0.997 นาโนเมตร) จึงไม่เกิดการดูดซับขึ้นภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์เท่านั้น อีกทั้งมีปริมาณการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลู ซึ่งเมทิลีนบลูเป็นอนุภาคที่ไม่มีเลกุลขนาดกลาง แสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีรูพรุนขนาดเล็ก จึงทำให้สามารถดูดซับไอโอดีนที่มียุภาคนขนาดเล็กกว่า 1.5 นาโนเมตรได้ดี [15] โดยมีปริมาตรรูพรุนรวม 0.250 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ถึงแม้ว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จะมีความพรุน

ตัวต่ำ แต่ค่าการดูดซับไอโอดีนก็สูงกว่าของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกไข่และเปลือกหอยแครง (510.44 มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งยังสามารถใช้ในการดูดซับสีย้อมได้ [10]

3.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด-สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ทั้งก่อนและหลังการดูดซับสีย้อม โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับสีย้อมที่อัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสีย้อม 4:500 กรัมต่อมิลลิลิตร ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม-อินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงคลื่น $4000-500 \text{ cm}^{-1}$ สเปกตรัมของถ่านกัมมันต์แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ทั้งก่อนและหลังการนำไปดูดซับสีย้อมมีแถบการสั่นในช่วง $3,500-2,500 \text{ cm}^{-1}$ มีลักษณะกว้างและต่ำ เกิดจากพันธะ -OH ของหมู่ ไฮดรอกซิลที่มีความถี่ของการสั่นในรูปแบบการยืด (Stretching Vibration) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Q.S. Liu, et al. [16] แถบการสั่นในช่วง $1,750-1,540 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ $\text{C}=\text{O}$ และมีแถบการสั่นในช่วง $3,000-2,850 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ C-H ซึ่งเป็นการสั่นในอนุพันธ์ของเบนซีนสเปกตรัมตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ทั้งก่อนและหลังการดูดซับสีย้อมใกล้เคียงหรือไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงว่าถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี ยังคงมีองค์ประกอบอินทรีย์เหลืออยู่ แต่จะสังเกตได้ว่าที่แถบการสั่นในช่วง $1,000-1,300 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน -OH, -O-, -COO- และ -COOH ปรากฏบนสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ก่อนการดูดซับสีย้อม แต่ไม่ปรากฏบนสเปกตรัมหลังการดูดซับสีย้อม อาจเนื่องมาจากสีย้อมที่ใช้เป็นสีประเภทรีแอคทีฟ ซึ่งเป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ โมเลกุลของสีย้อมจะยึดจับกับหมู่ -OH ด้วยพันธะโควาเลนต์ในสถานะต่าง [17] ซึ่ง

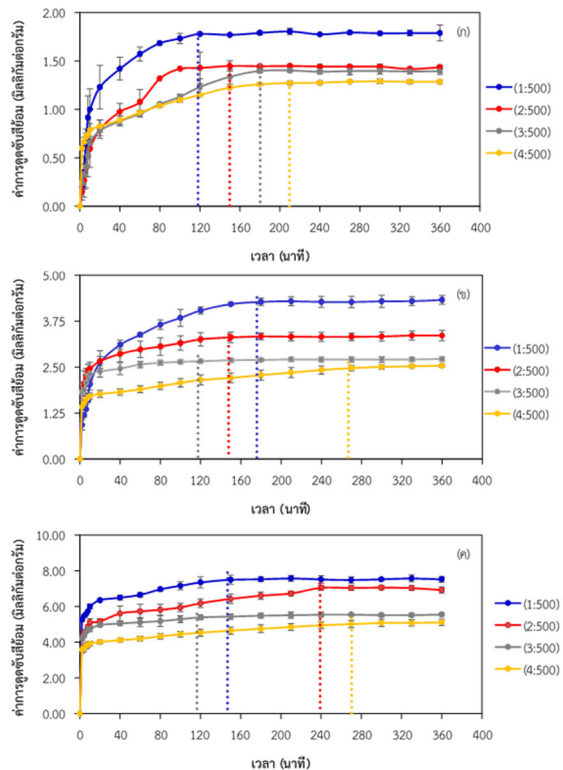
เป็นไปได้ว่า ในกระบวนการดูดซับ สีย้อมจะยึดจับกับ หมู่ -OH ที่มีในถ่านกัมมันต์ จึงทำให้ไม่ปรากฏแถบการสั่นตรงตำแหน่งดังกล่าวบนสเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ หลังการดูดซับสีย้อม อาจกล่าวได้ว่าการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี เป็นการดูดซับทั้งทางเคมีและทางกายภาพร่วมกัน



รูปที่ 1 สเปกตรัมของถ่านกัมมันต์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

3.3 ผลของการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

การดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลีที่กระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในน้ำเสีย 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสีย้อม 1:500, 2:500, 3:500 และ 4:500 กรัมต่อมิลลิกรัม และเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย ตั้งแต่ 2-360 นาที พบว่าที่อัตราส่วนต่าง ๆ จะมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้ไม่เท่ากัน โดยแสดงผลในรูปของค่าการดูดซับสีย้อมซึ่งคำนวณจากปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับไว้ต่อปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับ แสดงผลดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ค่าการดูดซับสีย้อมด้วยอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสีย้อมต่าง ๆ ที่เวลาตั้งแต่ 2-360 นาที (ก) ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค) ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 2 (ก), (ข) และ (ค) พบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 2-360 นาที ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเร็วมากในช่วงแรก เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นสารบนตัวดูดซับกับสารละลาย (Concentration Gradient) และที่ว่างบนผิวของถ่านกัมมันต์ยังคงมีมาก ทำให้ดูดซับสีย้อมได้มากขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ปริมาณการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่สภาวะสมดุล ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น ตำแหน่งที่ว่างเหล่านั้นดูดซับสีย้อมไว้เต็มที่แล้ว [17] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Wirungrong [10] ที่อธิบายว่า การเพิ่มระยะเวลาใน

การดูดซับ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากแรงขับเคลื่อนที่มาก อันเนื่องมาจากผลต่างของความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายกับปริมาณสีย้อมบนตัวดูดซับ หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ รวมถึงงานวิจัยของ D. Kavitha, and C. Namasivayam [18] ซึ่งอธิบายไว้ว่า ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากเกิดการแพร่ของสีย้อมจากสารละลายมายังผิวของตัวดูดซับ และปริมาณการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วงหลัง เนื่องจากการแพร่ของสีย้อมจากผิวของตัวดูดซับเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมากขึ้น จาก 50 ไปเป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมก็เพิ่มตามไปด้วย เนื่องจากความเข้มข้นของสีย้อมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีโมเลกุลของสีย้อมมากขึ้น โอกาสที่โมเลกุลของสีย้อมจะเคลื่อนที่เข้าไปสัมผัสพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เป็นไปได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ K. Pongsak [19] อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสีย้อมบนถ่านกัมมันต์กับในสารละลายด้วย [17] นอกจากนี้ ความแรงไอออนของอิเล็กโทรไลต์ในสารละลาย ซึ่งมีผลตึงผิวระหว่างสีย้อมกับผิวของถ่านกัมมันต์จะทำให้การดูดซับลดลง [20] และจากการศึกษาอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายสีย้อม จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์มากขึ้นจากอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสีย้อม 1:500 เป็น 2:500, 3:500 และ 4:500 กรัมต่อมิลลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมจะลดลง และทำให้เวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับช้าลงตามไปด้วย อาจเป็นเพราะถ้าปริมาณถ่านกัมมันต์น้อยจะมีการกระจายตัวในสารละลายได้ดี และเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณมาก เนื่องจากหากถ่านกัมมันต์มีปริมาณมากเกินไป จะเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน ทำให้พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับลดลง หากเพิ่มอัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อสีย้อม เป็น

4:500 กรัมต่อมิลลิตร จะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลนานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Wirungrong [10] ที่อธิบายว่า การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับหรือค่าปริมาณการดูดซับมีค่าลดลง เนื่องจากน้ำหนักของสีย้อมต่อน้ำหนักของตัวดูดซับมีค่าลดลง

3.4 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

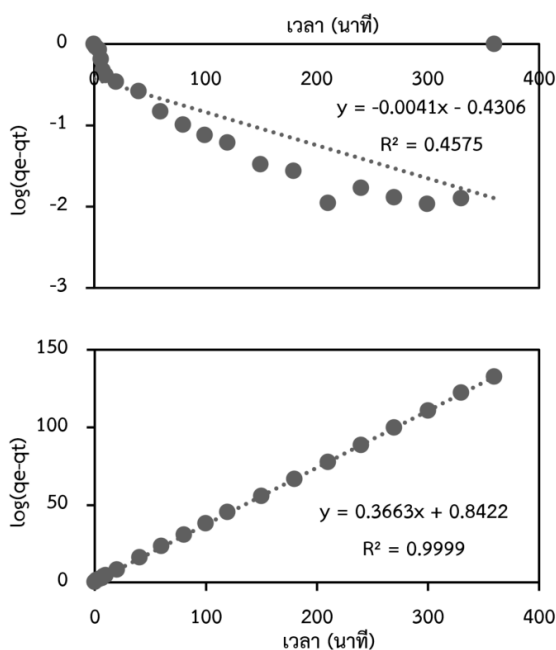
จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสะพันธุ์สุมาลี โดยนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยสมการการดูดซับตามแบบจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม เพื่อศึกษากลไกการดูดซับ ซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสีย้อมและถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปมีการอธิบายกลไกการดูดซับ 2 วิธี คือ ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียม และ ปฏิกริยาอันดับสองเทียม ซึ่งกลไกทั้ง 2 แบบตั้งบนสมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับและการคายซับเป็นปฏิกริยาเคมีเทียม (Pseudo Chemical Reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกริยาของถ่านกัมมันต์ เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยสมการการดูดซับตามแบบจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม และอันดับสองเทียม ซึ่งแสดงดังสมการ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (2)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3)$$

เมื่อ q_t และ q_e คือ ปริมาณการดูดซับสีย้อมที่เวลาใด ๆ และที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) ตามลำดับ k_1 และ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่ง (ต่อนาที) และค่าคงที่อัตราอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที) ตามลำดับ และ t คือ เวลาใด ๆ (นาที)

พบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมากกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (0.9999) สูงกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (0.4575) ซึ่งปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีสมมติฐานว่า อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ แสดงว่าขั้นตอนการสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสีย้อมและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เป็นขั้นกำหนดอัตรา (Rate of Limiting Step) [21] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี (ก) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ข) ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมและลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดสละพันธุ์สุมาลี ที่ผ่านการคาร์บอนซ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 36 มิลลิโมลต่อ

กรัม ในอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อถ่าน 20:32 มิลลิตรต่อกรัม เผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก มีปริมาณการดูดซับไอโอดีน เท่ากับ 532.32 ± 59.08 มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลู เท่ากับ 12.81 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อกรัม และความสามารถในการดูดซับสีย้อมสูงสุดของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ เท่ากับ 7.50 ± 0.25 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยใช้อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายสีย้อมที่ 1:500 กรัมต่อมิลลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และเข้าสู่สมดุลที่เวลา 150 นาที จากการวิเคราะห์หึ่งฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ทั้งก่อนและหลังการดูดซับ สีย้อม ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ พบว่าการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ เป็นการดูดซับทั้งทางเคมีและทางกายภาพร่วมกัน และเมื่อนำผลที่ได้ไปศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม ให้ผลการทดลองสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ($R^2 = 0.9999$) สามารถอธิบายได้ว่า อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้สามารถนำมาใช้ในการดูดซับสีย้อมออกจากน้ำเสียได้ เป็นการลดปัญหามลพิษทางน้ำให้แก่สิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นการนำเมล็ดสละที่เหลือทิ้งจากการแปรรูปมาเพิ่มมูลค่าและลดปริมาณขยะได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณร้านคุณหนูสละลอยแก้ว ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เมล็ดสละพันธุ์สุมาลีที่เหลือทิ้งจากการแปรรูปสละลอยแก้ว เพื่อใช้ในการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ที่อำนวยความสะดวกสำหรับสถานที่ทำการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Sreepongpan, *Water Pollution*, 3rd ed., Nahkon Pathom: Silpakorn University, 2004.
- [2] C. Park, M. Lee, B. Lee, S. W. Kim, H. A. Chase, J. Lee and S. Kim, "Biodegradation and biosorption for decolorization of synthetic dyes by *Funalia trogii*," *Biochemical Engineering Journal*, vol. 36, pp. 59-65, 2007.
- [3] S. Wang, "A comparative study of Fenton and Fenton-like reaction kinetics in decolourisation of wastewater," *Dyes and Pigments*, vol. 76, pp. 714-720, 2008.
- [4] S. Prangsiri, "Comparison of dye adsorption efficiencies by activated carbon and digested sludge from activated sludge wastewater treatment," M.D. Thesis, Dept. Envi. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2008.
- [5] C. Wanida, "Color removal technology in industrial wastewater," *Burapha Science Journal*, vol. 17, no. 1, pp. 181-191, 2012.
- [6] H. M. Virginia and B. P. Adrián, *Lignocellulosic precursors used in the synthesis of activated carbon: Characterization techniques and applications in the wastewater treatment*, Croatia: InTech., 2012.
- [7] R. Supattra, S. Ruengwit, K. Artit, S. Surachok, P. Jatupong, S. Chadaporn and S. Monthira, "Preparation of activated carbon from Salak seed by chemical activation," in *Proceeding of GPE-6th International Congress on Green Process Engineering*, Toulouse, France, 2018.
- [8] J. Guo and A. C. Lua, "Kinetic study on pyrolysis process of oil-palm stone using two-step consecutive reaction model," *Biomass and Bioenergy*, vol. 20, pp. 223-233, 2001.
- [9] S. Timur, I. Cem Kantarli, E. Ikizoglu and J. Yanik, "Preparation of a carbons from *Oreganum* stalks by chemical activation," *Energy and Fuels*, vol. 20, no. 6, pp. 2636-2641, 2006.
- [10] S. Wirungrong, "Adsorption of methyl red dye by activated carbon from egg shell and ark shell by chemical activation method," *Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal*, vol. 7, no. 7, pp. 97-110, 2015.
- [11] R. Supattra, M. Nuntaporn, S. Wiparat and P. Jatupong, "Preparation of activated carbon from Salak seeds for dye removal," in *Proceeding of The Pure and Applied Chemistry International Conference 2018 (PACCON 2018) "Chemistry toward a Sustainable Future"*, The 60th Anniversary of His Majesty the King's Accession to the Throne International Convention Center, Hat Yai, Songkhla, Thailand, 2018, pp. EE50-53.
- [12] H. Laksaci, A. Khelifi, M. Trari and A. Addoun, "Synthesis and characterization of microporous activated carbon from coffee grounds using potassium

- hydroxides,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 147, pp. 254-262, 2017.
- [13] Krutoyja. (2017). Seed. [Online]. Available: https://km.nssc.ac.th/external_newsblog.php?language=Th&usid=&links=280
- [14] Thai Industrial Standard: Activated carbon, TIS900-2547. *Government Gazette*, 121 (79d), 30 Sep 2004.
- [15] E. F. Jaguaribe, L. L. Medeiros, M. C. S. Barreto and L. P. Araujo, “The performance of activated carbons from sugarcane bagasse, babassu, and coconut shells in removing residual chlorine,” *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 41-47, 2005.
- [16] Q. S. Lui, T. Zheng, P. Wang and L. Guo, “Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by microwave-induced phosphoric acid activation,” *Industrial Crops and Products*, vol. 31, pp. 233-238, 2010.
- [17] S. Rawinipa, “Dyes treatment in wastewater using adsorption processes,” *KKU Science Journal*, vol. 44, no. 3, pp. 419-434, 2016.
- [18] D. Kavitha and C. Namasivayam, “Experimental and kinetic studies on methylene blue adsorption by Coir Pith carbon,” *Bioresource Technology*, vol. 98, pp. 14-21, 2007.
- [19] K. Pongsak, “Decoloraization of dyeing wastewater using regenerable catalyst,” M.D. Thesis, Dept. Chem. Eng., Songkla Univ., Songkla, Thailand, 2012.
- [20] E. Lorence-Grabowska and G. Z. Gryglewicz, “Adsorption characteristics of congo red on coal-based mesoporous activated carbon,” *Dyes and Pigments*, vol. 74, pp. 34-40, 2007.
- [21] U. Chakkrit, K. Thitaporn, T. Nuntakarn, K. Suchittra, P. Itthisak, S. Thai and S. Puthaporn, “Adsorption of reactive black 5 dye on activated carbon prepared from Water Hyacinth,” *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, vol. 19, no. 1, pp. 163-177, 2017.

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

ศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่องานหัตถอุตสาหกรรม ชุมชนบ้านถ้ำเสือ จังหวัดเพชรบุรี

สุรภา วงศ์สุวรรณ* เกรียงศักดิ์ เขียวมั่ง และ มียอง ชอ

สาขาทัศนศิลป์และการออกแบบ คณะศิลปกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เลขที่ 169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมืองชลบุรี จังหวัดชลบุรี 20131

รับบทความ 2 กุมภาพันธ์ 2563 แก้ไขบทความ 14 พฤษภาคม 2563 ตอรับบทความ 25 มิถุนายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างบริบทของงานหัตถอุตสาหกรรม สมบัติของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในพื้นที่ชุมชน และเพื่อทดลองวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หาสมบัติทางกายภาพ และกระบวนการผลิตงานหัตถอุตสาหกรรมสำหรับชุมชนบ้านถ้ำเสือ จังหวัดเพชรบุรี จากข้อมูลปฐมภูมิที่ศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ของชุมชนกับบริบทของงานหัตถอุตสาหกรรม คือวัฒนธรรมภูมิปัญญาทางเกษตรที่มีการสืบทอดจากรุ่นสู่รุ่น และจากการเก็บข้อมูลการวิจัยแบบมีส่วนร่วม ผลที่ได้คือเศษวัสดุเหลือใช้จากพืชเศรษฐกิจในชุมชน ด้วยเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีสมบัติของเยื่อทำเป็นกระดาษหรือขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ โดยให้กากกล้วย = A ให้ใบไม้ = B และให้ใบสับปะรด = C ใช้สูตรการหาปริมาณตารางสามเหลี่ยม (Triaxial Blend Diagram) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร้อยละ 10-15 ของน้ำหนักแห้งต้มเยื่อ ผลที่ได้จากการทดลองจะแสดงสมบัติทางกายภาพในการเกิดวัสดุใหม่ ผลสรุปดังนี้ 1) ใช้ตัวอย่างแบบบาง (a) ตามมาตรฐานอ้างอิงมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกระดาษเส้นใยพืชขนาด 45x85 เซนติเมตร ตามเลขหมายปฏิบัติการดังนี้ 1.1) น้ำหนักมาตรฐานทุกสูตรการทดลองโดยเฉลี่ยเท่ากับ 220 กรัม/ตารางเมตร 1.2) ความต้านทานแรงฉีกขาดแข็งแรงมากที่สุดคือสูตร 3(10a) มีค่า 1,962 มิลลินิวตัน ลำดับสองคือสูตร 1(8a) ค่าอยู่ที่ 1,907 มิลลินิวตัน และลำดับสามคือสูตร 6(13a) ค่าอยู่ที่ 1,467 มิลลินิวตัน และ 1.3) ความชื้นของกระดาษพบว่าอยู่ในเกณฑ์ปกติ คือระดับร้อยละที่ ± 10 ซึ่งมีความสมบูรณ์สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์หรือบรรจุภัณฑ์ได้ตามคุณสมบัติของการใช้งาน 2) ผลสรุปสมบัติทางกายภาพหาความเหมาะสมของการขึ้นรูปและการทดลองการใช้กระดาษจากเส้นใยพืชพบว่า ลักษณะของสีมีความแตกต่างกัน การให้สีสันทอนน้ำตาลเทา สีสไตล์ทอน และการเกิดลวดลายเหมาะสมกับกระบวนการผลิตงานพิมพ์แบบพิมพ์สกรีน หรือวิธีการใช้ตรายางขนาดใหญ่ และสามารถขึ้นรูปด้วยมือและเครื่องอัดความร้อนกึ่งอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 70 วินาทีต่อชิ้น มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปต่อยอดเพื่อสร้างสรรค์งานหัตถอุตสาหกรรมสำหรับชุมชนได้

คำสำคัญ : สมบัติทางกายภาพ; วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร; หัตถอุตสาหกรรม; ชุมชนบ้านถ้ำเสือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 4292 9545, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: 59810061@go.buu.ac.th

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

Study the Physical Properties of Agricultural Waste for Industries Handicrafts Product, Bantumsua Community Phetchaburi Province

Surapa Wongsuwan* Kriangsak Khiaomang and Miyung Seo

Department of Visual art and Design, Faculty of Fine and Applied Arts, Burapha University
169 Long Had Bangsaen Rd., Saen Suk, Chon Buri District, Chon Buri 20131

Received 2 February 2020 Revised 14 May 2020; Accepted 25 June 2020

Abstract

This research 1) to study and analyze the relationship between the context of industrial handicrafts, properties of agricultural waste in community areas and 2) to agricultural waste to find physical properties and the industrial handicrafts for Bantumsua community, Phetchaburi province. From primary data it was found the relationship of the community with the context of industrial crafts is a culture of agricultural wisdom from the collection of participatory research data. Found method and test the properties of paper pulp from agricultural waste where banana leaves = A, bamboo leaves = B and pineapple leaves = C. Use the formula for quantifying the triangular grid the Trixie Blend Diagram to uses caustic sodium hydroxide 10-15% of dry weight. There are 7 test items, 1 formula thin and thickness (a) according to the experimental standard, referring to the community product standards, plant fiber paper. For testing as follows: 1) standard average weight from the test of paper size 45x85 cm operation number list of the experimental formula test section 1.1) standard weight the overall average is equal to 220 grams/sqm., 1.2) part 2 tear strength which is strong = 3(10a) at 1,962 mN, the second strength = 1(8a) at 1,907 mN and third = 6(13a) at 1,467 mN. 1.3) Part 3 the overall moisture content of the paper the experiment found the humidity level is within the normal level at $\pm 10\%$, which is complete and can be developed into a products or package. 2) Summary of physical properties the color characteristics of the paper according to provide color tones gray-brown and different beautiful suitable for the screen-printing and using large size rubber stamp. Process forming can produce use by semi-automatic heat setting at 140°C at time of 70 seconds per piece is suitable for further expansion to create industrial handicrafts for the community.

Keywords: Physical Property; Agricultural Waste; Industrial Handicrafts; Bantumsua Community

* Corresponding Author. Tel.: +669 4292 9545, E-mail Address: 59810061@go.buu.ac.th

1. บทนำ

จังหวัดเพชรบุรี หรือ “เมืองพริบพรี” ยังคงมีประเด็นที่ยังต้องมีการพัฒนา เพื่อเพิ่มศักยภาพของจังหวัดร่วมกับทุกภาคส่วน โดยมุ่งเน้นการส่งเสริมการผลิตสินค้าทางการเกษตร ส่งเสริมด้านการตลาดที่สามารถต่อยอด และแปรรูปสินค้าสร้างสรรค์และเพิ่มมูลค่าของผลผลิต รวมไปถึงการพัฒนาคุณภาพชีวิตให้ดีขึ้น เน้นส่งเสริมการพัฒนาการท่องเที่ยวเชิงนิเวศแหล่งวัฒนธรรม เพื่อสร้างสรรค์กิจกรรมการท่องเที่ยวด้วยทรัพยากร ทางธรรมชาติที่มีทุนทรัพยากรพื้นฐานสามารถนำมาแปรรูปและถ่ายทอดความคิดสร้างสรรค์สู่งานออกแบบได้ ชุมชนบ้านถ้ำเสือ อำเภอแก่งกระจาน มีพื้นที่ใช้ทำการเกษตรที่สำคัญตามลำดับคือ 1) สับปะรด 24,681 ไร่ 2) มะนาว 12,986 ไร่ และ 3) กล้วยน้ำว่า 9,041 ไร่ [1] ซึ่งจากสถิติดังกล่าว การทำการเกษตรในพื้นที่โดยรวมมีจำนวนมาก และแต่ละครัวเรือนที่ทำการเกษตรต้องมีการเก็บเกี่ยวผลผลิตในแต่ละวันมาพอสมควร ตามวัฏจักรของการเก็บเกี่ยวเมื่อเก็บผลผลิตแล้วลำต้นในพื้นที่การเกษตรต้องมีการตัดทิ้ง เพื่อปลูกไม้ผลใหม่จากสิ่งที่ตัดทิ้ง จึงกลายเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ชาวเกษตรกรรมมองข้ามคุณประโยชน์ การปลูกกล้วยในพื้นที่ของชุมชนบ้านถ้ำเสือก็เช่นกัน ผู้นำชุมชนกล่าวว่าทุกบ้านปลูกกล้วย “ต้นกล้วยมีความเหนียวด้วยคุณสมบัติที่เป็นเส้นใยนำไปแช่น้ำ ก็สามารถทำอะไรได้หลาย ๆ อย่าง และชาวบ้านเองก็จะได้เห็นประโยชน์และคุณค่าของต้นกล้วยมากขึ้น แทนที่จะมองแค่เป็นอินทรีย์วัตถุเพียงอย่างเดียว ปัจจุบันจำนวนของเศษวัสดุเหลือใช้จากการปลูกกล้วยมีจำนวนเพิ่มขึ้น ถ้ามีกระบวนการหรือนวัตกรรมที่สามารถแปรรูปเป็นวัสดุ หรือสร้างสรรค์เป็นผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นที่สามารถทำได้จริง เช่น 1) เส้นใยที่สามารถทำจักสานได้ 2) แปรรูปเป็นเยื่อกระดาษสร้างบรรจุภัณฑ์ สำหรับชุมชนหรือผลิตขาย และ 3) อื่น ๆ จะทำ

ให้ชาวบ้านเห็นคุณค่ามันมากขึ้น อีกอย่างต้นกล้วยมีทุกบ้านง่ายต่อการหาเพื่อเป็นวัตถุดิบ” [2]

ดังนั้นแหล่งวัฒนธรรม ภูมิปัญญาทางการเกษตรเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถพัฒนาศักยภาพของชุมชนให้แข็งแรงได้ พิเศษหลังจากการเก็บเกี่ยวจึงเป็นตัวแปรของพืชเศรษฐกิจในชุมชนก่อให้เกิดเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มากพอ สำหรับการต่อยอดสร้างสรรค์ให้เป็นงานศิลปะและงานหัตถกรรมภายในครัวเรือนเพื่อสร้างรายได้เสริมสำหรับชุมชนได้ หลักการในการสร้างสรรค์งานศิลปะเพื่อการออกแบบหัตถ-อุตสาหกรรม สู่การบูรณาการกับหลักการทางทฤษฎีและการปฏิบัติ ผลลัพธ์ที่ได้คือภาพรวมขององค์ความรู้ใหม่ พร้อมต้นแบบงานสร้างสรรค์ที่เป็นแนวทางในการพัฒนาชุมชน การสร้างอาชีพให้เกิดรายได้เสริมสู่ครัวเรือนให้เกิดขึ้นในเชิงพาณิชย์เพิ่มมากขึ้น โดยมีศาสตร์หลายศาสตร์เข้ามามีส่วนร่วมในการพัฒนามุ่งไปสู่การพัฒนา Thailand 4.0 ในกลุ่มที่ 5 ว่าด้วยเรื่องอุตสาหกรรมสร้างสรรค์ วัฒนธรรม และบริการที่มีมูลค่าเพิ่มสูง (Creative, Culture & High Value Service) เป็นอุตสาหกรรมสร้างสรรค์ในด้านมรดกทางวัฒนธรรม งานฝีมือ และศิลปะ ที่นำไปสู่กลุ่มที่เรียกว่า “กลุ่มค่าใหม่” [3] รวมทั้งการใช้หลักการตลาด เทคโนโลยีเข้ามาเกี่ยวข้องมากขึ้น การเชื่อมโยงปัญหากับงานหัตถอุตสาหกรรม ด้วยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งมีชีวิตกับสภาพแวดล้อมที่เป็นวิถีเฉพาะของชุมชน แสดงความคิดเห็นใหม่ด้วยระบบนิเวศ ที่นำหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงมาสร้างสรรค์เป็นงานออกแบบโดยใช้วัฒนธรรม ภูมิปัญญาชาวบ้าน วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในบริบทของงานหัตถ-อุตสาหกรรม [4] ที่มีพืชเศรษฐกิจของชุมชนบ้านถ้ำเสือจำนวนมาก รวมกับสมบัติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างสรรค์ได้อย่างชัดเจน คือ 1) สับปะรด 2) กล้วย [5] และ 3) ไม้ ซึ่งผู้วิจัยสำรวจในพื้นที่ชุมชนบ้านถ้ำเสือพบว่าไม้เป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังเป็นพืชเศรษฐกิจ

เป็นไม้โตเร็ว โดยนายอลงกรณ์ พลบุตร บรรยายพิเศษ “เศรษฐกิจไทยบนฐานไม้เศรษฐกิจ” ในงานวันไม้เศรษฐกิจไทย 2561 [6] กล่าวว่า “ไม้ เป็นพืชเศรษฐกิจลำดับที่สองรองจากยางพาราที่ทางรัฐบาลจะใช้เป็นยุทธศาสตร์ของชาติในการพัฒนาประเทศ และเป็นไม้เศรษฐกิจนาร่องในการรณรงค์ให้มีการปลูกให้เพิ่มมากขึ้น จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะส่งเสริมและต่อยอดความรู้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด” ดังนั้น 3 วัสดุหลักจึงเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของชุมชน ที่จะสามารถนำมาพัฒนาต่อยอดให้เกิดประโยชน์สูงสุด รวมถึงการใช้กรรมวิธีในการผลิตแปรรูปให้เป็นวัสดุร่วมสมัย ด้วยกรรมวิธีการผลิตวัสดุทางอุตสาหกรรมให้สอดคล้องกับบริบทของสังคมในปัจจุบัน ควบคู่กันไปกับพัฒนาสร้างสรรค์เป็นผลิตภัณฑ์สำหรับชุมชนต่อไปได้ องค์ความรู้ที่ได้จะสร้างความสัมพันธ์ให้กับกลุ่มจังหวัด ชุมชนต่าง ๆ เป็นเสมือนเครือข่ายที่ต้องมีความเกี่ยวข้องกัน การขับเคลื่อนด้วยยุทธศาสตร์ใหม่ให้เจริญเติบโต พร้อมกับการพัฒนาสู่งานหัตถอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืนสู่ชุมชนในรูปแบบที่ชุมชนมีส่วนร่วม โดยมีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างบริบทของงานหัตถอุตสาหกรรม สมบัติของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในพื้นที่ชุมชนบ้านถ้ำเสือ อำเภอแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี 2) เพื่อทดลองวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หาสมบัติทางกายภาพ และกระบวนการผลิตงานหัตถอุตสาหกรรมสำหรับชุมชนบ้านถ้ำเสือ อำเภอแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี

2. ระเบียบวิธีวิจัย

1. ผู้วิจัยได้ดำเนินการค้นคว้าดังต่อไปนี้

• การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง และการวิจัยเชิงปฏิบัติแบบมีส่วนร่วม [7]

2. สร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย โดยใช้แบบสอบถาม แบบสอบถามแบบปลายเปิด การสังเกต และการสัมภาษณ์เชิงลึก

3. การเก็บข้อมูล

• ศึกษาวัสดุทางการเกษตรที่เหลือใช้ท้องถิ่น เส้นใย และส่วนผสมที่เกี่ยวข้อง ในการอัดพิมพ์ขึ้นรูปเพื่อสร้างสรรค์งานหัตถอุตสาหกรรม

• ผลที่ได้จากการศึกษาภาคเอกสาร การศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหาภัยพิบัติการสร้างความรู้

• ผลการทดลองของชุมชน และนักศึกษาในการเรียนรู้ผลของการวิจัย ที่ได้จากการทดลองผลงาน จากการสร้างงานของผู้วิจัยเพื่อนำเสนอการสร้างสรรค์เพื่อการออกแบบงานหัตถอุตสาหกรรม

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

• ข้อมูลจากการเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งหมด ผู้วิจัยนำมาสังเคราะห์เนื้อหาจากการส่งวัสดุทดสอบจากกรมวิทยาศาสตร์บริการ

5. สรุปผลการทดลอง เพื่อพัฒนาการออกแบบ

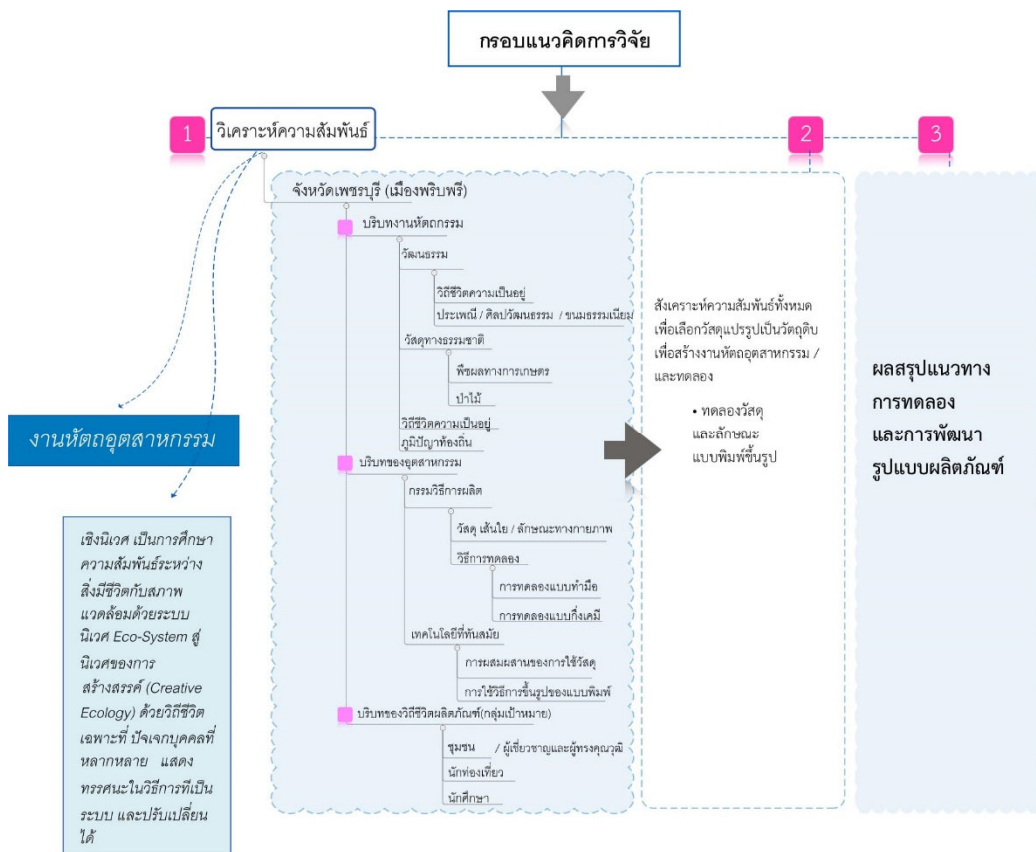
ผู้วิจัยใช้กรอบเพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยตามวัตถุประสงค์ ดังนี้

• ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างบริบทของงานหัตถอุตสาหกรรมระหว่างชุมชน วิถีความเป็นอยู่ ภูมิปัญญา วัฒนธรรม ศาสนา ประเพณี สภาพแวดล้อม และวิเคราะห์ลักษณะวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร สมบัติทางกายภาพในชุมชนบ้านถ้ำเสือ และกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบได้ [8]

• ศึกษาวิธีการทดลอง จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร สมบัติทางกายภาพที่ใช้วิธีกึ่งเคมี ในกรอบของการทดลองที่เหมาะสม รวมทั้งศึกษาการขึ้นรูปโดยใช้แบบพิมพ์ขึ้นรูปในการผลิตงานหัตถอุตสาหกรรม [9]

• ศึกษาการสร้างสรรค์ เพื่อการออกแบบงานหัตถอุตสาหกรรม โดยใช้ปัจจัยของการสร้างสรรค์งานหัตถกรรมสู่อุตสาหกรรมสร้างสรรค์ และนำหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียงเป็นแนวทางปฏิบัติ [4]

• ศึกษาหลักการพื้นฐานของการออกแบบสี วัสดุ และกระบวนการหลังการออกแบบ (CMF) [10]



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

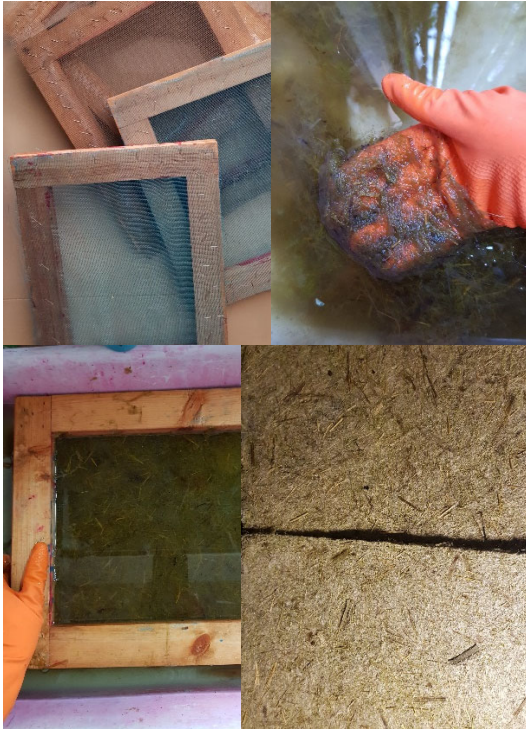
3. ผลการศึกษา

การทดลองครั้งที่ 1 เป็นการทวนการทดลองจากการศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยการทดลองใช้เศษวัสดุทางการเกษตร 2 ชนิด คือ กาบกล้วย และใบไผ่ (ไผ่แนะะ) โดยคำนวณอัตราส่วนผสมเป็นร้อยละ หรือต่อครั้ง 2 กิโลกรัม ต่อการใช้โซดาไฟร้อยละ 10-15 [11] ผลสรุปส่วนใหญ่ให้ความคิดเห็นในเรื่องของใช้อัตราส่วนของการใช้โซดาไฟ ในปริมาณร้อยละ 10-15 ของปริมาณวัสดุแห้งที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม โดยมีวิธีการทดลองดังนี้ 1) ใช้ระยะเวลาในการต้มนาน 2 ชั่วโมง 2) เมื่อเยื่อเปื่อย แล้วนำไปล้างน้ำจนความสิ้นของเยื่อหมด 3) ร่อนในตะแกรง โดยการทดลองเลือกใช้ชนิดของตะแกรงร่อนที่แตกต่างกันคือ ชนิดตาข่ายไนลอน ตาข่ายมุ้งลวด และตาข่ายที่เป็นผ้าสกรีน

4) ตากแดดใช้เวลา 2-3 ชั่วโมง และนำเข้าตากในที่ร่ม โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ครั้ง ครั้งที่ 1 ใช้กากกล้วย ร้อยละ 50 ต่อใบไม้ร้อยละ 50 ครั้งที่ 2 ใช้กากกล้วย ร้อยละ 100 และครั้งที่ 3 ใช้ใบไม้ร้อยละ 100 ทดลอง เพื่อให้สามารถกำหนดวิธีการ และบททวนการศึกษา ของข้อมูลกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยได้



รูปที่ 2 การเตรียมเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
กากกล้วยเพื่อตากแดด/กากกล้วยแห้ง



รูปที่ 3 ผลการทดลองกากกล้วยร้อยละ 50 :
ใบไผ่ร้อยละ 50



รูปที่ 5 ผลการทดลองกากกล้วยร้อยละ 100



รูปที่ 4 ผลการทดลองต้มใบไผ่แฉะร้อยละ 100

การทดลองครั้งที่ 2 การทดลองหาคุณสมบัติของเยื่อกระดาษ จากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อหาความเหมาะสม โดยการใช้สูตรการหาปริมาณตารางสามเหลี่ยม Triaxial Blend Diagram [9] ของส่วนผสมของเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 3 ชนิด เพื่อการสร้างสรรค์งานออกแบบหัตถอุตสาหกรรม โดยให้วัสดุจากกากกล้วย แทน A ให้วัสดุจากใบไผ่ แทน B และให้วัสดุจากใบสับปะรด แทน C แทน และปริมาณการคำนวณสูตรเป็นร้อยละ [9] และมีส่วนผสมของน้ำเป็นส่วนประกอบหลัก จากการต้มเยื่อด้วยกรรมวิธีการผลิตแต่สมัยโบราณ มีการใช้ส่วนผสมของน้ำด่างซี้เถ้าเป็นตัวทำการย่อยให้เยื่อเปื่อย [12] ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้กรรมวิธีการทำน้ำด่างซี้เถ้า ใช้วิธีการหมักด้วยอัตราส่วนของน้ำและซี้เถ้าที่ได้จากการเผาจากทางมะพร้าวที่มีอยู่ในชุมชน 1:1 ส่วน ใช้เวลา 10-14 วัน แทนการใช้โซดาไฟ หรือ "สารประกอบชนิดหนึ่ง ชื่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นของแข็งสีขาว ดูดความชื้น

และละลายน้ำได้ดี ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมทำสบู่ เส้นใยเรยอน" โซดาไฟถูกใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวัน และยังใช้ประโยชน์ได้อีกมากมาย เช่น ในการผลิตเยื่อ กระดาษสบู ผลิตภัณฑ์ซักฟอก เคมีภัณฑ์ และอื่น ๆ

การทำน้ำด่างซีเถ้า ต้องใช้ในปริมาณต่อครั้งเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับการทดลองแต่ละสูตร และผลของการต้มเยื่อเมื่อทดลองครั้งแรกในการต้มส่วนผสมน้ำ 1 กิโลกรัม น้ำด่างซีเถ้า 2 กิโลกรัม ใช้เวลาต้ม 1.30 ชั่วโมง เยื่อของวัสดุ C ยังไม่เห็นผลหรือเปื่อยยุ่ย ผู้วิจัยจึงทดลองวิธีที่ 2 คือการแช่น้ำด่างทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วต้มใหม่อีกครั้ง ผลสรุปที่ได้ คือ เยื่อไม่แสดงผลหรือไม่สามารถที่จะใช้กรรมวิธีของการใช้น้ำด่างซีเถ้าได้ ในขณะทดลอง และคงต้องใช้เวลามากพอสมควรในการผลิตน้ำด่างซีเถ้า รวมถึงเวลาในการต้ม ผู้วิจัยจึงเลือกใช้โซดาไฟ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แทนการใช้น้ำด่างซีเถ้า เนื่องจากประหยัดระยะเวลาในการต้มได้มาก การเตรียมเยื่อมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ต้มเยื่อแต่ละชนิดแยกกันเนื่องจากคุณสมบัติของเศษวัสดุมีความแตกต่างกัน โดยใช้สูตร [13] ในการต้มก่อนแยกเยื่อเพื่อชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้
- 2) ล้างทำความสะอาดเยื่อ ให้ความรู้สึกว่าความลื่นของเยื่อเหลือน้อยที่สุด
- 3) ต้มคลอรีน โดยใช้ น้ำ 20 กิโลกรัม: คลอรีน 100 กรัม ชั่งน้ำหนัก
- 4) เตรียมน้ำเพื่อใช้ปั่นระยะเวลาขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้
- 5) เตรียมตะแกรงเพื่อร่อนเยื่อตามระดับความหนา ระดับความหนาแบบบาง = a น้ำรวมเยื่อ 3 กิโลกรัม ระดับความหนาแบบกลาง = b น้ำรวมเยื่อ 4.5 กิโลกรัม ระดับความหนาแบบหนาที่สุด = c น้ำรวมเยื่อ 6 กิโลกรัม
- 6) ตากแดด 10-13 ชั่วโมง

กรณีที่เกิดเศษมีการหลุด ไม่เรียบ เกิดจากการร่อนเยื่อที่มีขนาดหนาเกินไป และ/หรือ ระยะเวลาของการตากแดดที่ใช้เวลานานเกินไป

ตารางที่ 1 ส่วนผสมการต้มเยื่อต่อครั้ง

เศษวัสดุ : กิโลกรัม	น้ำ : กิโลกรัม	โซเดียมไฮดรอกไซด์ : กรัม	เวลา : ชั่วโมง
กากกล้วย 12	24	200	1.30
ใบไม้ 4	40	400	1.30
ใบสับปะรด 2	20	200	1.30

ตารางที่ 2 ส่วนผสมการต้มเยื่อของเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของชุมชนบ้านลำเสือ จากการทดลองตามอัตราส่วนตารางสามเหลี่ยม Triaxial Blend Diagram [9]

สูตรที่	A	B	C	ร้อยละ/ กิโลกรัม
	ร้อยละ/ กิโลกรัม	ร้อยละ/ กิโลกรัม	ร้อยละ/ กิโลกรัม	
1(8)	60/12	20/4	20/4	100/20
2(9)	40/8	20/4	40/8	100/20
3(10)	40/8	40/8	20/4	100/20
4(11)	20/4	20/4	60/12	100/20
5(12)	20/4	40/8	40/8	100/20
6(13)	20/4	60/12	20/4	100/20
7(14)	-	100/20	-	100/20

** 1) ให้น้ำหนักร้อยละ 100 เท่ากับ 20 กิโลกรัม 2) ให้กากกล้วยแทน A ให้ใบไม้ แทน B และให้ใบสับปะรด (พันธุ์ฉีกตา) แทน C



รูปที่ 6 ทดลองการต้มเยื่อทดลองครั้งที่ 2 แบบใช้สูตรการหาปริมาณตารางสามเหลี่ยม Triaxial Blend Diagram [9]

การทดลองครั้งที่ 2 ผลสรุปทางกายภาพการทดลองผลจากทั้งหมด 7 สูตรการทดลอง แบ่งระดับความหนาเป็น 3 ระดับ โดยชั่งปริมาณเยื่อของเส้นใยก่อนการร่อน เพื่อจะได้ปริมาณความหนาแบบบาง = a, แบบหนานปานกลาง = b, และแบบหนา = c โดยได้กระดาษที่มีสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันดังนี้



รูปที่ 10 สมบัติทางกายภาพกระดาษเส้นใยพีช 4(11a)



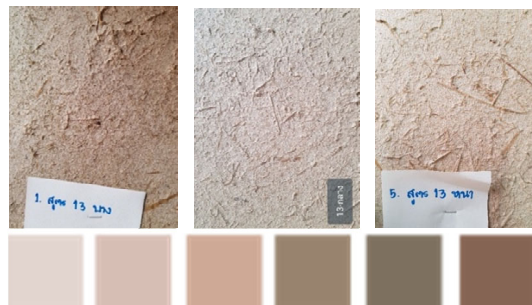
รูปที่ 7 สมบัติทางกายภาพกระดาษเส้นใยพีช 1(8a)



รูปที่ 11 สมบัติทางกายภาพกระดาษเส้นใยพีช 5(12a)



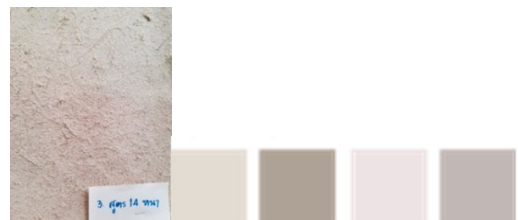
รูปที่ 8 สมบัติทางกายภาพกระดาษเส้นใยพีช 2(9a)



รูปที่ 12 สมบัติทางกายภาพกระดาษเส้นใยพีช 6(13a)



รูปที่ 9 สมบัติทางกายภาพกระดาษเส้นใยพีช 3(10a)



รูปที่ 13 สมบัติทางกายภาพกระดาษเส้นใยพีช 7(14a)

ผู้วิจัยขอรับการบริการสอบเทียบจาก One Stop Service ของกรมวิทยาศาสตร์บริการ ถนนพระรามที่ 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ เลขที่คำร้องเลขรับ: L62/01728 ในวันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2562 [14] โดยมีรายการทดสอบรวม 7 สูตรตัวอย่าง ใช้ตัวอย่างการทดสอบแบบระดับความหนาแบบบาง a เท่านั้น และมาตรฐานการทดลองอ้างอิง จากมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน กระดาษเส้นใยพีช [15] สำหรับการทดสอบ ดังนี้

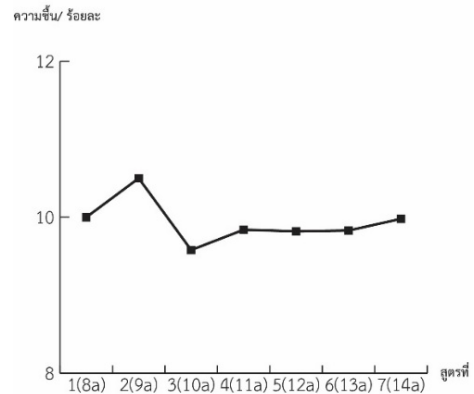
- 1) PP-NM-TRS-T00 กระดาษ: ความต้านแรงฉีกขาด (MD/CD)
- 2) PP-NM-MOT-T00 กระดาษ: ความชื้น
- 3) PP-NM-BWS-T00 กระดาษ (สมุดนักเรียน): น้ำหนักเฉลี่ยมาตรฐาน

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบผลิตภัณฑ์กระดาษเส้นใยพีช ระดับความหนาแบบบาง (a) [14]

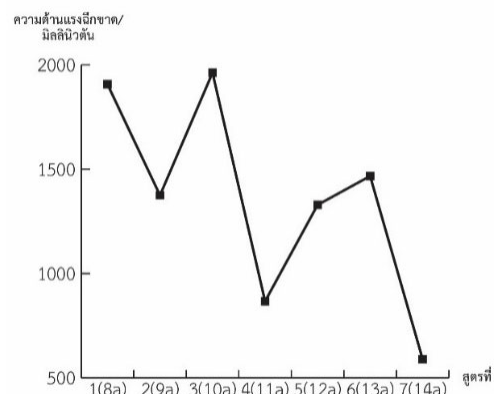
สูตรที่	น้ำหนักมาตรฐาน (กรัม/ตารางเมตร)	ความต้านแรงฉีกขาด (มิลลินิวตัน)	ความชื้น (ร้อยละ)	หมายเหตุ
1(8a)	166	1907	10.0	**
2(9a)	168	1375	10.5	
3(10a)	201	1962	9.58	*
4(11a)	228	867	9.84	
5(12a)	200	1329	9.82	
6(13a)	336	1467	9.83	***
7(14a)	279	589	9.98	

* ระดับความเหมาะสม

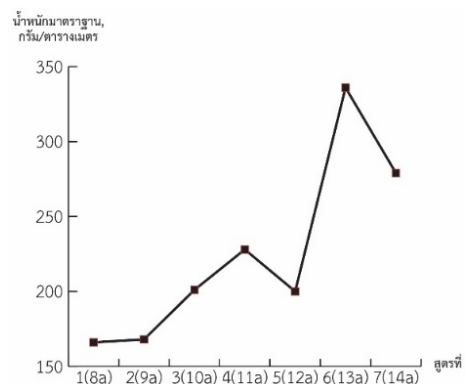
จากการทดสอบกระดาษเส้นใยพีช ขนาด 45X85 เซนติเมตร เลขหมายปฏิบัติการ L62/01782.1, L62/01782.2, L62/01782.3 ... วิธีการทดลองตามมาตรฐาน ISO536:2012 , ISO1974:2012 และ ISO287:2017 นั้น จากสูตรของการทดลอง ทดสอบส่วนที่ 1 น้ำหนักมาตรฐานโดยรวมเฉลี่ยได้เท่ากับ 220 กรัม/ตารางเมตร ทดสอบส่วนที่ 2 ความต้านทานแรงฉีกขาดที่มีความแข็งแรงมากที่สุดคือสูตรที่ 3(10a) มีความต้านทานแรงฉีกขาดอยู่ที่ 1,962 มิลลินิวตัน



รูปที่ 12 กราฟแสดงค่าความชื้นของแต่ละสูตรทดลอง ด้วยมาตรฐานการทดลองแบบ PP-NM-MOT-T00 กระดาษ: ความชื้น



รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าความต้านแรงฉีกขาดของแต่ละสูตรทดลองด้วยมาตรฐานการทดลองแบบ PP-NM-TRS-T00 กระดาษ: ความต้านแรงฉีกขาด (MD/CD)



รูปที่ 14 กราฟแสดงขนาดน้ำหนักของแต่ละสูตรทดลอง ด้วยมาตรฐานการทดลองแบบ PP-NM-BWS-T00 กระดาษ (สมุดนักเรียน): น้ำหนักเฉลี่ยมาตรฐาน

จากการทดสอบกระดาสเส้นใยพืช ขนาด 45X85 เซนติเมตร เลขหมายปฏิบัติการ L62/01782.1, L62/01782.2, L62/01782.3 ... วิธีการทดลองตามมาตรฐาน ISO536:2012 , ISO1974:2012 และ ISO287:2017 นั้น จากสูตรของการทดลอง ทดสอบส่วนที่ 1 น้ำหนักมาตรฐานโดยรวมเฉลี่ยได้เท่ากับ 220 กรัม/ตารางเมตร ทดสอบส่วนที่ 2 ความต้านทานแรงฉีกขาดที่มีความแข็งแรงมากที่สุดคือสูตรที่ 3(10a) มีค่าความต้านทานแรงฉีกขาดอยู่ที่ 1,962 มิลลินิวตัน ความแข็งแรงลำดับที่สองคือสูตรที่ 1(8a) ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดอยู่ที่ 1,907 มิลลินิวตัน ความแข็งแรงลำดับที่สามคือสูตรที่ 6(13a) ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดอยู่ที่ 1,467 มิลลินิวตัน ตามลำดับ ทดสอบส่วนที่ 3 ความชื้นของกระดาสโดยรวมทั้ง 7 สูตรการทดลองพบว่าระดับความชื้นอยู่ในเกณฑ์ปกติ คือระดับที่ร้อยละ ± 10 ซึ่งมีความสมบูรณ์สามารถนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์หรือบรรจุภัณฑ์ ตามคุณสมบัติของการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้น



รูปที่ 15 กระดาสจากการทดลอง



รูปที่ 16 การทดสอบกระบวนการผลิตด้วยการตัดด้วยเครื่องตัด Ruizhou



รูปที่ 17 การทดสอบกระบวนการผลิต การขึ้นรูปด้วยวิธีการพับด้วยมือ



รูปที่ 18 การทดสอบกระบวนการพิมพ์บนพื้นผิวของกระดาษด้วยระบบการพิมพ์สกรีน



รูปที่ 19 การทดลองกระบวนการผลิต การขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดความร้อน Bamboo บริษัท กษมาเฮริคอปเตอร์ จำกัด [16]

จากการทดลอง กระบวนการผลิตการขึ้นรูปด้วยวิธีการ 1) ลักษณะของการขึ้นรูปด้วยมือ โดยสร้างสรรค์เป็นบรรจุภัณฑ์ขั้นที่สอง สำหรับสินค้าผลิตภัณฑ์ชุมชน เช่น ถ้วยฉาบ ทองม้วน ฯลฯ สมบัติของกระดาษจากเส้นใยพืชชนิดแบบบาง มีความเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป ในลักษณะที่ทำด้วยตนเอง 2) กระบวนการผลิตแบบการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดความร้อนแบบกึ่งอัตโนมัติ ใช้แป้งข้าวเหนียว หรือแป้งมันสำปะหลัง ผสมน้ำในอัตราส่วน 1:1 เป็นตัวประสานแทนการใช้กาว และใช้ฟ็อกกี้ฉีดหรือทาบนเนื้อกระดาษที่ผลิตได้แล้วนำมาซ้อนกัน ด้วยการปรับตั้งค่าความร้อนที่ 140-160 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลา 40-60 วินาที ต่อชิ้น [17] และ 3) การทดลองการพิมพ์บนกระดาษจากเส้นใยพืช ด้วยรูปแบบการพิมพ์สกรีนด้วยการใช้สีชนิดจมน้ำ และสียาง มีความเหมาะสมกับพื้นผิวของกระดาษ

4. สรุปและอภิปรายผล

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างบริบทของวัฒนธรรมภูมิปัญญาทางการเกษตร เป็นวิธีการดำเนินชีวิตที่สืบทอดจากรุ่นสู่รุ่น และเชื่อมโยงกับการประกอบอาชีพในส่วนอื่นที่สามารถต่อยอดให้ชุมชนมีศักยภาพในการพัฒนาชุมชนและครอบครัวได้มากขึ้น งานหัตถกรรมอุตสาหกรรมกับชุมชนบ้านถ้ำเสือถือเป็นแนวคิดใหม่ องค์ความรู้ที่สามารถสร้างได้จากศึกษาสิ่งที่มีอยู่ในชุมชนให้เกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในพื้นที่ที่ใช้เป็นการทดลองเพื่อหาสมบัติทางกายภาพ กระบวนการผลิตงานหัตถอุตสาหกรรมสำหรับชุมชนบ้านถ้ำเสือ อำเภอแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี โดยศึกษาวัฒนธรรมภูมิปัญญาทางการเกษตรพืชเศรษฐกิจของชุมชนต้นแบบ บ้านถ้ำเสือ อำเภอแก่งกระจาน จากข้อมูลปฐมภูมิและการสัมภาษณ์ผู้นำชุมชนพบว่า พื้นที่ใช้ทำการเกษตรที่สำคัญตามลำดับคือ 1) สับปะรด 24,681 ไร่ 2) มะนาว 12,986 ไร่ และ 3) ถั่วลิสง 9,041 ไร่ พืชที่มีการเพาะปลูกมาก [1] และ

ใช้ส่วนของใบไม้ ที่เป็นไม้เศรษฐกิจโตเร็วตามแผนการพัฒนาเศรษฐกิจให้มีพื้นที่สีเขียวให้เพิ่มมากขึ้น [6] จากการทำการทดสอบเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ด้วยวิธีการการต้มเยื่อทดลองหาคุณสมบัติของเยื่อกระดาษจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพื่อหาความเหมาะสมในการสร้างสรรคงานออกแบบหัตถอุตสาหกรรม โดยให้วัสดุจากกากกล้วย แพน A ให้วัสดุจากใบไม้ แพน B และให้วัสดุจากสับประรด แพน C โดยการใช้สูตรการหาปริมาณตารางสามเหลี่ยม Triaxial Blend Diagram [9] ใช้โซดาไฟ ในประมาณร้อยละ 10-15 ของน้ำหนักวัสดุแห้ง เพื่อหาสมบัติทางกายภาพในการเกิดวัสดุใหม่ กระบวนการผลิตงานหัตถอุตสาหกรรมในรูปแบบที่เหมาะสม ลักษณะของเส้นใยที่ใช้ในการทดลองเส้นใยที่ได้จากส่วนอื่น ๆ ที่ไม่ใช่เนื้อไม้ของพืชชั้นสูงเรียกว่า Non-Wood Fibers ซึ่งจำแนกออกเป็น Grass Fibers คือเส้นใยที่ได้จากส่วนที่เป็นมัดท่อ และลำเลียง (Vascular Bundles) ของพืชใบชนิดเลี้ยงเดี่ยวจำพวกข้าว ข้าวโพด อ้อย และไม้ เป็นต้น หรือ Leaf Fibers เส้นใยที่ได้จากใบของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว เช่น เส้นใยที่ได้จากปอมะนิลา (Musa Textiles) และใบสับประรด เป็นลักษณะทางโครงสร้างของเส้นใยและการเชื่อมติดกันของเส้นใย [18] ได้ผลสรุปและวิเคราะห์จากรายการทดสอบรวม 7 สูตร โดยใช้สูตรตัวอย่างการทดสอบแบบระดับความหนาแบบบาง (a) มาตรฐานการทดลอง อ้างอิงจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกระดาษเส้นใยพืช [15] สำหรับการทดสอบ สรุปผลดังนี้

- 1) ทดสอบส่วนที่ 1 น้ำหนักมาตรฐาน โดยรวมเฉลี่ยทั้ง 7 สูตร ได้เท่ากับ 220 กรัม/ตารางเมตร การควบคุมการผลิตค่อนข้างยากเพราะเป็นงานทำมือ
- 2) ทดสอบส่วนที่ 2 ความต้านทานแรงฉีกขาดที่มีความแข็งแรงมากที่สุด คือสูตรที่ 3(10a) มีค่าความต้านทานแรงฉีกขาดอยู่ที่ 1,962 มิลลินิวตัน ความแข็งแรงลำดับที่สองคือสูตรที่ 1(8a) ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดอยู่ที่ 1,907 มิลลินิวตัน ความแข็งแรงลำดับที่สาม คือสูตรที่ 6(13a) ค่า

ความต้านทานแรงฉีกขาดอยู่ที่ 1,467 มิลลินิวตัน 3) ทดสอบส่วนที่ 3 ความชื้นของกระดาษ โดยรวมทั้ง 7 สูตร โดยรวมการทดลองพบว่าระดับความชื้นอยู่ในเกณฑ์ปกติ คือระดับร้อยละที่ ± 10 ซึ่งมีความสมบูรณ์สามารถนำพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์หรือบรรจุภัณฑ์ได้ตามคุณสมบัติของการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้นได้

ผลสรุปสมบัติทางกายภาพ ลักษณะพื้นผิวหยาบขึ้นอยู่กับการใช้เวลาในการต้มเยื่อ และความร้อนของเตาต้ม มีรายละเอียดของเส้นใยชัดเจน ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้พิมพ์ในระบบอุตสาหกรรม เนื่องจากพื้นผิวไม่เรียบไม่สามารถเข้าเครื่องพิมพ์ เพื่อพิมพ์ในกระบวนการพิมพ์แบบออฟเซตได้ แต่ยังคงใช้วิธีการพิมพ์แบบพิมพ์สกรีนได้ดี บนกระดาษเส้นใยพืชที่มีวิธีการต้มเยื่อที่ใช้เวลาในการต้มนานถึง 4 ชั่วโมง เพราะเยื่อจะเปื่อยละเอียดมีความสวยงามมากขึ้น ลักษณะของสีของกระดาษตามชนิดและสูตรการผสมมีลักษณะสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน การให้สีสันทอนน้ำตาลเทา สีสไตลโทน Stone Brick และการเกิดลวดลายที่สวยงามเป็นเอกลักษณ์ของการใช้วัสดุได้อย่างงดงาม การทนแรงฉีกขาดของกระดาษจากการทดลอง ลักษณะของกระดาษทุกแผ่นจะมีผงหลุดร่อนออกเป็นขุยเนื่องจากการปั่นให้เยื่อมีความละเอียด แบบชนิดแผ่นบางจะสามารถพับขึ้นรูปเป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้ง่าย มีคุณสมบัติคล้ายกับกระดาษสาที่เหมาะสมสำหรับการทำบรรจุภัณฑ์ถุงกระดาษ การทำบรรจุภัณฑ์แบบกล่องจั่วปึง หรืองานประดิษฐ์ต่าง ๆ แบบชนิดแผ่นหนาแบบปานกลาง และแบบชนิดแผ่นหนายังคงศึกษาหาคุณสมบัติเพื่อพัฒนาออกแบบเป็นงานหัตถอุตสาหกรรมกรรมสำหรับชุมชน และกระบวนการผลิต การขึ้นรูปสามารถทำได้ด้วยวิธีการที่ชุมชนสามารถผลิตใช้และจำหน่ายได้เองคือ 1) ลักษณะของการขึ้นรูปด้วยมือ โดยสร้างสรรค์เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับสินค้าของผลิตภัณฑ์ชุมชน คุณสมบัติของกระดาษจากเส้นใยพืชชนิดแบบบางมีความเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปในลักษณะที่ทำ

ด้วยตนเอง 2) กระบวนการผลิตแบบการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดความร้อนแบบกึ่งอัตโนมัติ ใช้แป้งข้าวเหนียวหรือแป้งมันสำปะหลัง ผสมน้ำในอัตราส่วน 1:1 เป็นตัวประสานแทนการใช้กาว และใช้ฟอกก็ดหรือทาบานเนื้อกระดาษจากเส้นใยพืชแล้วนำมาซ้อนกัน ด้วยการปรับตั้งค่าความร้อนที่ 140 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลา 70 วินาที ต่อชิ้น 3) การทดลองการพิมพ์บนกระดาษจากเส้นใยพืชด้วยรูปแบบการพิมพ์สกรีนมีความเหมาะสมกับพื้นผิว



รูปที่ 21 การบูรณาการงานวิจัยถ่ายทอดองค์ความรู้กับชุมชนบ้านถ้ำเสือ จังหวัดเพชรบุรี เมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2562

การศึกษาวิจัยนี้ ยังคงมีประเด็นในการศึกษาปัจจัยการใช้ประโยชน์ ของวัสดุสำหรับการออกแบบงานหัตถอุตสาหกรรมสำหรับชุมชน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะหมายถึงการจัดการที่ยั่งยืน ไม่ได้ยกเว้นแค่ในส่วนของงานวิทยาศาสตร์ การบรรจุภัณฑ์ และอุตสาหกรรม โดยผลจากการทดลองบทความวิจัยนี้ จะผ่านการสังเคราะห์เพื่อออกแบบ และพัฒนาต้นแบบงานหัตถอุตสาหกรรมสำหรับผลิตภัณฑ์ใหม่ของชุมชนบ้านถ้ำเสือ และสรุปผลงานออกแบบผลิตภัณฑ์หัตถอุตสาหกรรม โดยจัดทำเป็นคู่มือสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีชุมชนมีส่วนร่วม ในการสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ใหม่ ที่ผลิตและจำหน่ายได้เอง เป็นวงจรของการเกิดการผลิตภัณฑ์สร้างสรรค์ด้วยความต้องการแก้ไขปัญหาเรื่องของทรัพยากร และปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มสูงขึ้น เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพ

ภูมิอากาศ เศรษฐกิจแบบหมุนเวียน (Circular Economy) กลายเป็นหลักการพื้นฐานที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในการใช้ทรัพยากร รวมถึงหลักการเศรษฐกิจแบบหมุนเวียน จำเป็นต้องดำเนินการสำหรับการศึกษาวงจรของวัสดุทุกชนิด การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ต่อยอดผลิตภัณฑ์เดิมของชุมชนบ้านถ้ำเสือ เพื่อให้ทุกครัวเรือนสร้างงานหัตถกรรมได้ เกิดเป็นอุตสาหกรรมในครัวเรือนที่เรียกว่า “หัตถอุตสาหกรรม” เมื่อมีระบบการจำหน่ายสร้างรายได้สู่ครัวเรือนและชุมชนแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่ “อุตสาหกรรมสร้างสรรค์” ที่เป็นวงจรของการสร้างสรรค์การผลิต การจัดจำหน่ายสินค้า และบริการที่ใช้การสร้างสรรค์รวมถึงทุนทางปัญญา [19] ที่เป็นปัจจัยพื้นฐานสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน เน้นการปรับปรุงเชิงคุณภาพชีวิตของชุมชนให้ดีขึ้นได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ เชื้อวมั่ง (อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก) ดร.มียอง ซอ (อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม) รศ.อุดมศักดิ์ สาริบุตร (กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก) และคณาจารย์ทุกท่าน ในหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาทัศนศิลป์และการออกแบบ คณะศิลปกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เครื่องมืออุปกรณ์เครื่องตัดกระดาษจากการทดลอง ของคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กลุ่มคุณตฤณี แวยามา และบริษัท กษมา เฮลิคอปเตอร์ จำกัด นำไปสู่ผลลัพธ์ของงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Phetchaburi Provincial Office, *Phetchaburi Province Development Plan (2018-2021)*, Phetchaburi, 2018.
- [2] S. Pimsiri, *Ban Tham Suea Community Leader*, - ed. 2017.

- [3] Ministry of Tourism and Sports, *Action Plan for Developing Potential Tourist Sites of the Country 2015-2017*, Bangkok: Department of Tourism, 2015.
- [4] T. Nakson, *Industrial art craft design*, Bangkok: Triple Group Company Limited, 2017.
- [5] Ministry of Agriculture, Phetchaburi Province. (2015). Sub-district Agricultural Development Plan (3-Year Plan). [Online]. Available: <http://www.phetchaburi.doae.go.th/agriculture%20technology%20transfer%20and%20service%20center/Plan%2056-58/kang/Kangkajan/Kangkajan2.doc>
- [6] C. Kasetsart University, *Economic Wood Day Economic wood industry drives Thailand 4.0 towards sustainable development*, -ed, 2018.
- [7] W. Suttirakan, *Participatory action research and conscious process*, Bangkok: Siam Publisher Public Company Limited, 2017.
- [8] Department of Cultural Promotion, Ministry of Culture, *Culture, Way of life and Wisdom*, 1st ed. Bangkok: RUNGSILP PRINTING Co., Ltd., 2016.
- [9] R. Hopper, *The Ceramic Spectrum: A Simplified Approach to Glaze and Color Development*, 2nd ed. USA: American Ceramic Society publishers, 2008.
- [10] L. A. Chicaíza Becerra, *Cmf Design: the fundamental principles of colour, material and finish design*, 1st ed. Amsterdam: Frame Publishers, 2016.
- [11] S. Khantayayanuwong, *Filament and Paper: Physical Properties*, Kasetsart University: Department of Forestry Products, Faculty of Forestry, 2008.
- [12] W. Chuenwari, *Pulp making from bamboo*, Department of Forestry Products, Faculty of Forestry: Kasetsart University, 1968.
- [13] D. Vayama, *The ratio of boiling pulp from bananas*, Community Service Station Prince of Songkla University, Pattani Campus, 2018.
- [14] Department of Science Service, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Laboratory analysis report no. Wor.0307/3711, 2019.
- [15] Thai Industrial Standards Institute, *Thai Community Product Standard: Plant fiber paper*, Bangkok, 2017.
- [16] A. Thavorn. Kasama Hercules Co., Ltd. (2019). Plate stamping machine from natural materials. [Online]. Available: <https://web.facebook.com/KsmAgriculture>
- [17] A. Thavorn, *Manual of Bamboo Macchine*, Kasama Hercules Co., Ltd. 2020. [Online]. Available: <https://web.facebook.com/KsmAgriculture/>
- [18] S. Khantayanuwong, *Preparation of Pulp and Paper Production*. Kasetsart University: Department of Forestry Products, Faculty of Forestry, 2007.
- [19] C. Vanich Wiroon (translation), *The creative economy : how people make money from ideas*. Bangkok: Amarin Printing and Publishing, 2010.

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

Development and Study on Physical and Sensory Properties of Dark Chocolates Fortified with Anthocyanin from Broken Riceberry Rice

Paradorn Ngamdee* Sureechay Jamkrajang and Siriwan Yankin

Faculty, University Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabphat University
321 Tha Le Chup Sorn, Muang, Lopburi 15000

Received 7 December 2019; Revised 17 May 2020; Accepted 23 July 2020

Abstract

Broken rice of Thai cross breed black rice, Riceberry, was an under-utilized agricultural by-product that contains high content of anthocyanins, the multiple health benefits flavonoid. In this study, these anthocyanins were used to develop healthy dark chocolates. The anthocyanin extract from the broken Riceberry rice was prepared into anthocyanin powder using freeze-drying technique in which maltodextrin was used as a carrier material. Healthy dark chocolates were prepared by replacing cocoa powder with anthocyanin powder by 5, 10 and 15 g/g cocoa powder, which respectively delivers DC5, DC10, and DC15 anthocyanin-fortified dark chocolate bars. The color analysis showed no blooming (undesired white color at the chocolate surface) in all chocolates. The increase the anthocyanin powder content significantly decreased the hardness of the dark chocolates (33.9-27.2 N). Total anthocyanin content (TAC) in the dark chocolates increased respectively as anthocyanin powder content increased. The health benefit of the anthocyanin-fortified dark chocolates was improved as the DPPH antioxidant activity of all treatments was 4-9% higher than that of the control DC0. Sensory evaluation revealed that DC10 received higher liking scores (6.4-7.5) than the DC0 indicating more consumer preference. The anthocyanin-fortified dark chocolate delivers an alternative strategy to improve the health property of chocolates. This application of anthocyanin from the broken Riceberry rice could help increase the value and the utilization of Thai agricultural by-product.

Keywords : Dark Chocolate; Anthocyanin; Broken Riceberry Rice; Sensory Evaluation

* Corresponding Author. Tel.: +669 4601 0222, E-mail Address: ngparadorn@gmail.com

1. Introduction

Anthocyanins are bioactive compounds that have been reported for their multiple health benefits: oxidative stress relief, prevention of cardiovascular diseases, anti-inflammatory activity, anti-carcinogenic activity, and control of diabetes [1]. In addition, anthocyanins have been proposed as a highly feasible functional ingredient to be used in food product development as they provided health-promoting benefits and considerable low cytotoxicity [1], [2]. Daily consumption of anthocyanin at 2.5 mg/kg body weight is considered as safe according to the announcement of FAO and WHO [2].

Riceberry rice, the non-glutinous cross breed black rice of Thailand, contains a high content of anthocyanins [3]. This rice has been cultivated throughout Thailand and mostly marketed in the form of milled rice. Recently, small local mills produced a considerable amount of the broken Riceberry rice as a by-product. However, the utilization of these colored broken rice was limited. Unlike the broken white rice, the broken Riceberry rice is not accepted by noodle factories due to the color contamination issue. As a result, it is sold as a cheap feed stock, which is the underutilization. For this reason, anthocyanins can be extracted from the broken Riceberry rice and used as a healthy functional ingredient in food products.

Chocolate, a worldwide confectionary product, is a promising food model for the application of the

anthocyanin extract as a health promoting ingredient. The color of the regular chocolate is dark brown. For this reason, the addition of the dark purple anthocyanin extract into the chocolate would have less effect on the color of chocolates. In addition, the chocolate products are also considerable unhealthy foods as they contain a high content of saturated fat and sugar (for sweet chocolates). However, the global market value for chocolate products was as high as 103 billion US dollars per annum and is continuously growing [4]. This indicates that people will continue eating chocolates even though they are very unhealthy. To stop people from consuming chocolates, as to protect their health, may not be possible. On the other hand, fortification of health benefits ingredient into the chocolates could be a practical way to reduce the risk of consumer's health. Healthier chocolates were mostly developed via reduction or substitution (or both) the major unhealthy ingredients, saturated fat [5] and sugar [6]. However, reducing the contents of these ingredients is limited as it would basically affect the physicochemical, textural and sensory properties of the chocolate [7]. Alternatively, fortification of healthy ingredients such as bioactive compounds into the chocolate in order to improve its antioxidant property is considered as a feasible strategy.

Recently, only a few published studies reported the fortification of plant bioactive compounds into chocolate products for the improvement of their health properties. Mangosteen pericarp

was used to enhance polyphenol content in chocolate products [8]. The encapsulated powder of anthocyanin-containing black mulberry extract was used to fortify the dark chocolate for a health improvement purpose [9]. These studies indicate a possibility of the application of the anthocyanins as a health improving ingredient in chocolates.

This study aimed to utilize the undervalued broken Riceberry rice to develop healthier dark chocolates. The anthocyanin was extracted from the broken Riceberry rice and processed into anthocyanin powder by using maltodextrin as a carrier. The powder was used to produce dark chocolates by replacing the content of cocoa powder in the regular one. Effects of the anthocyanin powder on the physical, chemical, antioxidant and sensory properties of the chocolates were analyzed.

2. Research Methodology

2.1 Material and Chemicals

The important ingredients for producing dark chocolate were cocoa powder (Tulip brand, Sino-Pacific, Thailand), cocoa butter (KLK-Kepong, Malaysia) and lecithin (Cargill, Netherland). The 99.9% ethanol used for the extraction was of commercial grade (Chemipan, Thailand). The 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (Sigma Aldrich, USA) was used for the antioxidant assay.

2.2 Broken Riceberry rice

The broken Riceberry rice was contributed by a local rice mill in Chon

Sombun Sub-district, Nong Muang District, Lopburi Province, Thailand. The rice was harvested in November 2017. The broken rice sample was collected immediately after the milling and stored in a vacuum sealed metalized bag and kept in a refrigerator at 4 °C.

2.3 Preparation of the Anthocyanin

Powder

The anthocyanin was extracted from the broken rice berry (200 g) by soaking the rice in 400 ml 70% ethanol for 90 min [10]. The soluble fraction was filtered and concentrated using a rotary evaporator (Rotavapor® R-300, Buchi, Switzerland) at 40 °C. The obtained anthocyanin-rich concentrate was diluted with distilled water to the total soluble solid (TSS) of 5 °Brix, which was measured using a refractometer (Atago 3840 PAL- α , China).

To prepare the anthocyanin powder, maltodextrin DE10 (Dong Xiao, China) was used as an encapsulating material. The maltodextrin was dissolved into the previously diluted anthocyanin solution at room temperature until the TSS value of the solution reached 20 °Brix [10]. The solution was frozen in a 500 mL round bottom flask before equipped with a freeze dryer (Martin Christ, Alpha 1-4 LDplus, Germany). The freeze-drying was performed at -80 °C and 0.1 mbar of pressure until the sample was completely dried. The obtained anthocyanin powder was stored in a vacuum sealed metalized plastic bag and kept in a desiccator.

2.4 Preparation of Anthocyanin-Fortified Dark Chocolate

The dark chocolate products supplemented with anthocyanin powder were prepared by replacing the gram content of cocoa powder used in a control chocolate with the anthocyanin powder by 5 (DC5), 10 (DC10) and 15 g/g cocoa powder (DC15). The control chocolate (DC0) was prepared as described by D. Komes et al. [11]; cocoa butter (19.5 g) was melted at 60 °C before cocoa powder (40 g) and sugar (30 g) were added and mixed. The chocolate mixture was removed from the heater and lecithin (0.5 g) was immediately added and mixed. The chocolate mix was cooled down to 40 °C before it was poured into rectangular (long × wide × thick; 60 × 30 × 10 mm) silicone mold. The chocolate bars were left cooling down to the room temperature (26 ± 1 °C) and kept at 4 °C in a refrigerator for at least 24 h before analysis.

2.5 Physical properties analysis

2.5.1 Color

The color of the chocolate was expressed in the CIE expression system. The color coordinate are L^* (0 = black and 100 = white), a^* ($-a^*$ = green and $+a^*$ = red), and b^* ($-b^*$ = blue and $+b^*$ = yellow) [12], which were measured from triplicate samples using a colorimeter (Hunter Lab ColorFlex EZ, USA). The whiteness index (WI) was calculated according to the following equation:

$$WI = 100 - [(100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2]^{0.5}$$

2.5.2 Water Activity

The water activity (a_w) was measured from the homogenized chocolate (2 g) using a water activity meter (Aqualab 4TE, USA). Triplicate samples were measured and the mean value was calculated. Moisture content was determined using AOAC official method 935.29 [13].

2.5.3 Hardness

The chocolate bars were measured for the hardness using TA.XTplus texture analyzer (Stable Micro Systems, UK). The hardness determined the maximum force (N) required to penetrate (at a constant head speed of 1.5 mm/s) a cylindrical flat-end probe ($d = 1.6$ mm) into the chocolate bar (10 mm of thickness) at 20 °C over a distance of 6 mm.

2.6 Chemical Properties Analysis

2.6.1 Preparation of Chocolate

Extracts

The chocolate extracts were used for the analysis of total anthocyanin content (TAC) and antioxidant activity. The pre-freeze chocolate sample (20 g) was ground in a 250 mL Erlenmeyer flask using a small electric handheld blender. The ground chocolate was defatted with 50 mL hexane and the lipid extraction was repeated for two more times. The defatted chocolate was extracted with acidified methanol (1 M HCl:CH₃OH = 15:85 v/v), which targets anthocyanin [14], by vigorously stir using a vortex. The soluble fraction was separated from the non-extractable one using a centrifuge at 5000 rpm for 10 min

and the extraction was repeated for 2 more times with the non-extractable fraction. The supernatant fractions from 3 repeated extractions were combined and the solvents were removed at 40 °C using a rotary evaporator (BÜCHI Rotavapor® R-100, Switzerland). The obtained crude extract was diluted with 95% ethanol to the volume of 10 mL and stored in a 15 mL glass bottle with screw-capped. All the extracts were kept in a freezer at 0 °C for further analysis.

2.6.2 Determination of the Anthocyanin Content

The total monomeric anthocyanin content (TAC) in the broken Riceberry rice extract, the anthocyanin powder, and the chocolates was measured using the pH differential method [15]. Two aliquots of sample solutions (0.1 mL) was diluted in potassium chloride buffer pH 1.0 (3 mL) and sodium acetate buffer pH 4.5 (3 mL) and incubated for 15 min. The absorbances (A) of the incubated solutions were measured at 510 nm and 700 nm using a UV-visible spectrophotometer (Hitachi UH5300, Japan). The TAC in mg/L was calculated using the following equation:

$$TAC (mg/L) = \frac{(A \times MW \times DF \times 1000)}{(\epsilon \times L)}$$

Where $A = (A_{510} - A_{700})$ pH 1.0 – $(A_{510} - A_{700})$ pH 4.5), MW of cyanidin-3-glucoside (C3G) (449.2 g/mol), DF = dilution factor, ϵ = molar absorptivity (26,900 l/mol-cm) and L = path length (1.0 cm).

2.6.3 Determination of Antioxidant Activity

The antioxidant activity of the chocolate extracts against DPPH free radicals was analyzed as described by L. P. Leong and G. Shui [16]. Briefly, the extract (0.1 mL) was diluted in 3 mL DPPH solution (100 μ M in methanol) and the mixture was incubated for 30 min for the reaction. The absorbance of the reaction solution was measured at 515 nm. The percentage DPPH scavenging activity of the extract was calculated regarding the absorbance of the control (the extract was replaced with methanol).

2.7 Sensory Evaluation

The chocolates were determined for sensory attributes: appearance, color, flavor, taste, hardness, texture, and overall acceptance using the 9-point hedonic scale method [17], in which the panelists scored liking level of a chocolate from 1 (dislike extremely) to 9 (like extremely). The untrained panelists were 30 female and 20 male who experience the taste of a chocolate in a previous one-month period. The evaluation was conducted by serving a piece of chocolate (long $\times$ wide $\times$ thick; 30 $\times$ 30 $\times$ 10 mm), which was coded with random three-digit on the container, and served along with mineral drinking water for mouth rinsing between tests.

2.8 Statistical Analysis

The mean $\pm$ standard deviation was calculated from a triplicate experiment. The statistical analysis was analyzed by One-Way ANOVA followed by

Duncan's multiple range test at 95% confidence level ($p \leq 0.05$), which was performed using SPSS v 16.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA).

3. Results and Discussion

3.1 Physical and Chemical Properties of the Anthocyanin Powder

According to the results in **Table 1**, the anthocyanin powder prepared from the broken Riceberry rice extract contain 9.02 C3G/100 g. This anthocyanin powder had a_w value of 0.44 indicated that the powder will not affect the a_w value of the chocolate, which is a critical property that makes chocolates long shelf life food products [18].

Table 1 Physical and chemical properties of the anthocyanin powder

Properties		Anthocyanin powder
TAC (mg C3G/100 g)		9.02 ± 0.01
a_w		0.44 ± 0.01
Moisture content (%)		5.33 ± 0.57
Color	L^*	53.95 ± 0.10
	a^*	3.02 ± 0.02
	b^*	-3.96 ± 0.03

The moisture content of the powder was 5.33%. The anthocyanin powder had positively high L^* value of 53.95 and positive a^* value indicated that the powder color was white with slightly red color.

Table 2 Physical property of the dark chocolates

Samples	Color			WT	a_w^{ns}	Hardness (N)
	L^*	a^*	b^*			
DC0	$18.2^c \pm 0.07$	$4.66^a \pm 0.14$	$3.21^a \pm 0.24$	18.0^c	0.45 ± 0.02	$42.2^a \pm 2.8$
DC5	$21.7^b \pm 0.27$	$3.29^b \pm 0.25$	$1.64^c \pm 0.47$	21.6^b	0.43 ± 0.01	$33.9^b \pm 2.1$
DC10	$21.4^b \pm 0.10$	$3.56^b \pm 0.10$	$2.38^c \pm 0.13$	21.3^b	0.42 ± 0.02	$31.9^c \pm 1.9$
DC15	$23.4^a \pm 0.32$	$4.25^a \pm 0.11$	$2.78^b \pm 0.10$	23.2^a	0.43 ± 0.02	$27.2^d \pm 1.5$

^{a-d} indicate significant difference ($p \leq 0.05$) of the means in the same column. ^{ns} represents an insignificant difference of mean values in the column.

3.2 Physical Properties of Dark Chocolates

The physical properties of the control dark chocolate and the dark chocolates fortified with different anthocyanin powder content are presented in **Table 2**. The color coordinate (L^* , a^* , and b^*) values indicated that the chocolate products were dark in color. The L^* parameter dominated the color of the chocolate due to the high positive values (L^* values

ranged between 18.2-23.4), which was also found in previous report [19]. The added anthocyanin powder changed the appearance of the chocolate toward white color. The L^* value of the DC0 (18.2) was significantly lower ($p \leq 0.05$) than those of DC5, DC10, and DC15. Among the anthocyanin-containing chocolates, the whiteness of the DC5 and DC10 was insignificant difference ($p > 0.05$). The whiteness of the DC15 was significantly higher than those of the DC5 and DC10.

The increase of the L^* values of the DC5, DC10, and DC15 was in accordance with the high L^* value of the anthocyanin powder.

The whiteness index (WI) determines the whiteness of chocolate surface, which is used to evaluate the migration of sugar and/or fat to the chocolate surface (so-called bloomed chocolate) [20]. The bloomed chocolate is determined by the change of the chocolate surface color from glossy brown to grayish white, as well as from small individual white dots to large white spots on the chocolate [20]. The close values between WI and L^* parameters of the same chocolate indicated that no chocolate bloom occurred [19].

The a_w value determines the shelf life of chocolate products. All chocolates, included the control chocolate, had insignificant different a_w values, which ranged between 0.42-0.45. This indicated that these chocolates were not easily spoiled by microbial [18]. The a_w values of the chocolates produced in this study were higher than that of the previous report of H. Farzanmehr and S. Abbasi [21] ($a_w = 0.33$) who also produced the chocolates that contain maltodextrin. The variation of a_w values depending largely on the a_w and moisture values of the raw material [18].

The hardness is a critical property of chocolate bar products [18]. According to **Table 2**, the hardness of the DC5 (33.9 N), DC10 (31.9 N), and DC15 (27.2 N) decreased significantly with the increase of the anthocyanin powder replacement. The anthocyanin powder

consisted of maltodextrin as a major component (approximately 99% regarding the TAC value). The content of the maltodextrin caused a decrease of chocolate hardness was reported by H. Farzanmehr and S. Abbasi [21]. They suggested that the bulky structure of the maltodextrin particle could obstruct the crystallization of the cocoa butter fatty acid chains resulting in softer chocolate than the control one. The hardness of chocolates is controlled by polymorphism of cocoa butter and this is also correlated with the type of the second major solid component e.g. sugar and supplement sweeteners [22].

3.3 Chemical Properties of the Dark Chocolates

The TAC of the dark chocolates is presented in **Fig. 1A**. The control dark chocolate DC0 showed no anthocyanin content. The theoretical TAC of DC5, DC10, and DC15 (0.46, 0.92 and 1.38 mg C3G/100 g, respectively) obtained from the calculation for the TAC that should be presented in the chocolate regarding the added amount, which was calculated as follow: $[(\text{TAC in the anthocyanin powder (9.02 mg C3G/100 g)})/100] \times \text{g of the anthocyanin powder added}$. The apparent TAC obtained from the laboratory analysis using the spectrometric method.

The TAC in DC5, DC10, and DC15 (0.31, 0.66 and 1.01 mg C3G/100 g, respectively) increased consecutively with the content of the anthocyanin powder. However, by comparing to the theoretical TAC of each corresponding

treatments, the apparent TAC was lower by approximate 27-33%. The reasons could be due to the degradation of the anthocyanin by high thermal and neutral pH during the chocolate production process as the anthocyanins are molecules that susceptible to heat, pH, and light [23]. This result agreed with the report of K. Anukulwattana et al. [24] who reported that approximately 42% of the TAC of the cooked Riceberry rice was lost after a cooking as compared to the raw rice. They reported the lower lost value compared to that of this study as the initial TAC of the whole grain Riceberry rice was higher than that in the dark chocolates.

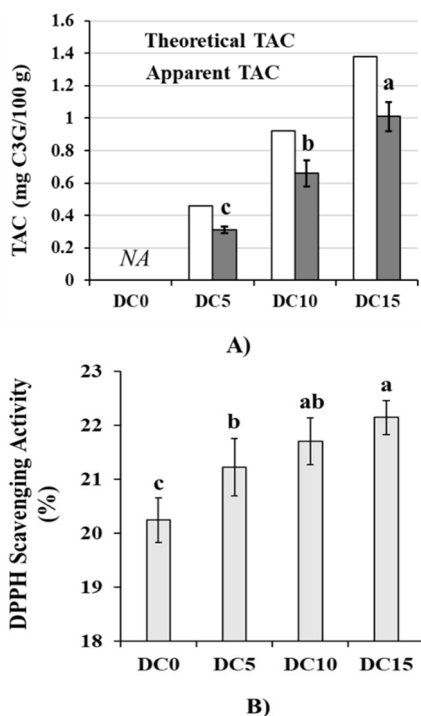


Fig. 1 A) Total monomeric anthocyanin content and B) DPPH scavenging activity of the chocolates. NA = not applicable as the TAC was not detected in the DC0.

^{a-c} indicate significant difference ($p \leq 0.05$).

The percentage of DPPH scavenging activity results in **Fig. 1B**) show that DC5 (21.2 %), DC10 (21.7 %), and DC15 (22.1 %) had significantly higher ($p \leq 0.05$) antioxidant capacity than the control chocolate DC0 (20.2 %). However, the antioxidant property of the anthocyanin-fortified dark chocolates was found to increase by only 4-9% compared to that of the DC0. This could be the result of the replacement of the cocoa powder with the anthocyanin powder. The cocoa powder is a source of flavonoids (mainly catechin and epicatechin) [25], which are considered as antioxidants. In contrast, the maltodextrin, which accounted for approximately 99% of the anthocyanin powder, is not an antioxidant.

The dilution effect of the maltodextrin on the antioxidant activity was also reported by S. Chuaychan and S. Benjakul [26]. They found that the antioxidant activities of the gelatin hydrolysate decreased when the maltodextrin was used as a carrier material. Although the antioxidant activity of the anthocyanin-fortified dark chocolate was increased in a small degree, this chocolate still had the health benefits of the anthocyanin. Anthocyanins had more favorable health-promoting property for using as a functional food ingredient over other flavonoids as they are a considerable low cytotoxicity compound [2], [27], which means that it prevents the cells from harmful substances without damaging the cells. In addition, the content of the anthocyanin at 2.5 mg/kg body weight

could be daily intake by human [2]. Regarding the anthocyanin content in the maximum anthocyanin-fortified D15, this chocolate could provide as much as per 1.01 mg anthocyanins per 100 g serving size, which is much less than the anthocyanin consumption recommendation. Due to this aspect, further increase of the anthocyanin content in the chocolate is

required. The increase of chocolate consumption for the health benefit of the anthocyanin must be avoided due to overconsumption of fat and sugar. On the other hand, the stability and bioavailability of the anthocyanin fortified into the chocolate should be investigated.

Table 3 Sensory characteristics of the anthocyanin-fortified dark chocolates

Chocolate	Sensory attribute (score)						Overall acceptance
	Appearance	Color	Flavor	Taste	Hardness	Texture	
DC0	6.7 ^c ± 0.7	6.0 ^b ± 0.8	5.7 ^b ± 0.6	5.7 ^c ± 0.6	6.1 ^c ± 0.7	5.5 ^c ± 0.8	5.9 ^c ± 0.6
DC5	6.7 ^c ± 0.7	7.3 ^a ± 0.5	6.1 ^{ab} ± 0.7	5.6 ^c ± 0.9	6.1 ^c ± 0.9	5.7 ^c ± 0.9	6.0 ^c ± 0.9
DC10	7.5 ^a ± 0.9	7.5 ^a ± 0.5	6.4 ^a ± 0.7	7.4 ^a ± 0.9	7.3 ^a ± 0.6	7.2 ^a ± 0.8	7.4 ^a ± 0.7
DC15	7.1 ^b ± 0.9	7.4 ^a ± 0.8	6.1 ^{ab} ± 0.8	6.3 ^b ± 1.2	6.8 ^b ± 0.9	6.6 ^b ± 0.9	6.5 ^b ± 0.8

^{a-c} indicate significant difference ($p \leq 0.05$) of the means in the same column.

9-point hedonic score: 1 = dislike extremely, 9 = like extremely.

3.4 Sensory Property of the Dark Chocolate

The acceptance of consumers on the chocolate fortified with the anthocyanin powder was evaluated over sensory attributes using 9-point hedonic score and the results are shown in **Table 3**. The DC5 was not different ($p > 0.05$) from the control chocolate DC0 in term of appearance, flavor, taste, hardness, texture, and overall acceptance attributes. The DC10 and DC15 generally received higher liking scores (6.3 – 7.5) than the DC0 (5.5 – 6.7) for all attributes with the exception of the flavor attribute, in which the DC15 (6.1) had equivalent liking score to the DC0 (6.1). The DC10 received the highest liking scores (6.4–7.5) for all attributes. This indicated that anthocyanin-fortified dark chocolate is a

feasible alternative healthier chocolate for marketing.

4. Conclusion

Anthocyanin-fortified dark chocolates were prepared using the broken Riceberry rice anthocyanin, which was freeze-dried into anthocyanin powder with using maltodextrin as an encapsulating material. The fortification of the anthocyanin powder to the dark chocolate by replacing the cocoa powder generally caused the increase of the lightness of the products while reduce the hardness of ones. The anthocyanin contents in all final chocolate products were lower than the added due to the degradation of the anthocyanin during thermal processing. The health property of the anthocyanin-fortified chocolate

was slightly improved due to the replacement of the cocoa powder caused the loss of some phenolic antioxidants. The consumer preferred dark chocolate with the highest degree of anthocyanin fortification over the regular one. These results indicated that the utilization of anthocyanin from broken Riceberry rice to develop healthy chocolate products was possible. Nevertheless, the increase of anthocyanin fortification content and its bioavailability should be studied before to summarize the health-improving power of the anthocyanin-fortified chocolate.

5. Acknowledgement

The financial support of this work was provided by Thepsatri Rajabhat University (the Fiscal year 2017) through the Research and Development Institute. The authors are greatly appreciated.

6. References

- [1] J. He and M. M. Giusti, "Anthocyanins: natural colorants with health-promoting properties," *Annual Review of Food Science and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 163-187, Apr. 2010.
- [2] M. N. Clifford, "Anthocyanins – nature, occurrence and dietary burden," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 80, no. 7, pp. 1063-1072, May 2000.
- [3] P. Chokchaithanawiwat, V. Rungsardthong, B. Thumthanaruk, C. Puttanlek, D. Uttapap, S. Boonraksa and J. Wonngsa, "Product development of dried noodle from wheat flour and Riceberry rice flour by extrusion," in *Proceeding of 5th International Conference on Agricultural and Biological Science (ABS)*. Macau. 2019. vol. 346, pp. 1-8.
- [4] J.-P. Marelli, D. I. Guest, B. A. Bailey, H. C. Evans, J. K. Brown, M. Junaid, R. W. Barreto, D. O. Lisboa, A. S. Puig, "Chocolate under threat from old and new cacao diseases," *Phytopathology®*, vol. 109, no. 8, pp. 1331-1343, Aug. 2019.
- [5] N. V. Rezende, M. T. Benassi, F. Z. Vissotto, P. P. C. Augusto and M. V. E. Grossmann, "Mixture design applied for the partial replacement of fat with fibre in sucrose-free chocolates," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 62, pp. 598-604. Jun. 2015.
- [6] R. P. Aidoo, E. Appah, D. V. Dewalle, O. A. Emmanuel and K. Dewettinck, "Functionality of inulin and polydextrose as sucrose replacers in sugar-free dark chocolate manufacture – effect of fat content and bulk mixture concentration on rheological, mechanical and melting properties," *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 52, pp. 282-290, Nov. 2016.
- [7] N. Konar, O. S. Toker, S. Oba and O. Sagdic, "Improving functionality of chocolate: a review on probiotic, prebiotic, and/or synbiotic characteristics," *Trends in Food*

- Science & Technology*, vol. 49, pp. 35-44, Mar. 2016.
- [8] S. Y. J. Sim, J. W. Ng, W. K. Ng, C. G. Forde and C. J. Henry, "Plant polyphenols to enhance the nutritional and sensory properties of chocolates," *Food Chemistry*, vol. 200, pp. 46-54, Jun. 2016.
- [9] M. Gültekin-Özgüven, A. Karadağ, Ş. Duman, B. Özkal and B. Özçelik, "Fortification of dark chocolate with spray dried black mulberry (*Morus nigra*) waste extract encapsulated in chitosan-coated liposomes and bioaccessability studies," *Food Chemistry*, vol. 201, pp. 205-212, Jun. 2016.
- [10] T. Laokuldilok and N. Kanha, "Effects of processing conditions on powder properties of black glutinous rice (*Oryza sativa* L.) bran anthocyanins produced by spray drying and freeze drying," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 64, pp. 405-411, Nov. 2015.
- [11] D. Komes, A. Belščak-Cvitanović, A. Škrabal, S. Vojvodić and A. Bušić, "The influence of dried fruits enrichment on sensory properties of bitter and milk chocolates and bioactive content of their extracts affected by different solvents," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 53, pp. 360-369, Sep. 2013.
- [12] R. P. Aidoo, E. O. Afoakwa and K. Dewettinck, "Rheological properties, melting behaviors and physical quality characteristics of sugar-free chocolates processed using inulin/polydextrose bulking mixtures sweetened with stevia and thaumatin extracts," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 62, pp. 592-597, Jun. 2015.
- [13] AOAC, *Official Methods of Analysis of AOAC International 17th Edition*. Gaithersburg, MD: AOAC International, 2000.
- [14] S. Jiamyangyuen, N. Nuengcham-nong and P. Ngamdee, "Bioactivity and chemical components of Thai rice in five stages of grain development," *Journal of Cereal Science*, vol. 74, pp. 136-144, Mar. 2017.
- [15] M. M. Giusti and R. E. Wrolstad, "Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy," in *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, M. M. Giusti and R. E. Wrolstad, 1st ed. John Wiley & Sons, 2001, pp. F1.2.1–F1.2.13.
- [16] L. P. Leong and G. Shui, "An investigation of antioxidant capacity of fruits in Singapore markets," *Food Chemistry*, vol. 76, pp. 69-75, Jan. 2002.
- [17] J. J. Kalva, C. A. Sims, L. A. Puentes, D. J. Snyder and L. M. Bartoshuk, "Comparison of the hedonic general labeled magnitude scale with the hedonic 9-point scale," *Journal of Food Science*, vol. 79, pp. S238-S245, Jan. 2014.
- [18] S. T. Beckett, *The science of chocolate*, 2nd ed. Cambridge, UK. RSC Publishing, 2008.
- [19] V. Briones, J. M. Aguilera and C. Brown, "Effect of surface

- topography on color and gloss of chocolate samples,” *Journal of Food Engineering*, vol. 77, pp. 776-783, Dec. 2006.
- [20] R. Quevedo, E. Valencia, F. Alvarado, B. Ronceros and J. M. Bastias, “Comparison of whiteness index vs. fractal fourier in the determination of bloom chocolate using image analysis,” *Food and Bioprocess Technology*, vol. 6, pp. 1878-1884, Jul. 2013.
- [21] H. Farzanmehr and S. Abbasi, “Effects of inulin and bulking agents on some physicochemical, textural and sensory properties of milk chocolate,” *Journal of Texture Studies*, vol. 40, no. 5, pp. 536-553, Sep. 2009.
- [22] E. O. Afoakwa, A. Paterson and M. Fowler, “Effects of particle size distribution and composition on rheological properties of dark chocolate,” *European Food Research and Technology*, vol. 226, pp. 1259-1268, Apr. 2008.
- [23] A. Castañeda-Ovando, Pacheco- M. d. L. Hernández, M. E. Páez-Hernández, J. A. Rodríguez and C. A. Galán-Vidal, “Chemical studies of anthocyanins: a review,” *Food Chemistry*, vol. 113. pp. 859-871, Apr. 2009.
- [24] K. Anukulwattana, K. Srinual, and A. Halee, “Effects of processing, storage and reheating on the amounts and capacities of the antioxidants of ready-to-eat rice in retort pouch,” *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 41, no. 3, pp. 299-309, Jul. 2018.
- [25] M. Gültekin-Özgüven, İ. Berktaş and B. Özçelik, “Influence of processing conditions on procyanidin profiles and antioxidant capacity of chocolates: optimization of dark chocolate manufacturing by response surface methodology,” *LWT - Food Science and Technology*, vol. 66, pp. 252-259, Mar. 2016.
- [26] S. Chuaychan and S. Benjakul, “Effect of maltodextrin on characteristics and antioxidative activity of spray-dried powder of gelatin and gelatin hydrolysate from scales of spotted golden goatfish,” *Journal of food science and technology*, vol. 53, pp. 3583-3592, Sep. 2016.
- [27] P. Ngamdee, S. Jiamyangyuen, and K. L. Parkin, “Phase II enzyme induction and anti-inflammatory effects of crude extracts and secondary fractions obtained from bran from five black glutinous rice cultivars,” *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 51, no. 2, pp. 333-341, Oct. 2016.

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

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบโพลีฟีนอลในผลิตภัณฑ์อาหารว่างเสริมผงใบหม่อน

จักรกฤษณ์ ทองคำ^{1*} ทวีศักดิ์ เตชะเกรียงไกร² รัชณี คงคาอุยฉาย³ และ ริญ เจริญศิริ⁴

^{1,2} ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

^{3,4} สถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล

^{1,2} 50 ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

^{3,4} 999 ถนนพุทธมณฑลสาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล นครปฐม 73170

รับบทความ 4 มกราคม 2563 แก้ไขบทความ 17 มิถุนายน 2563 ตอรับบทความ 23 กรกฎาคม 2563

บทคัดย่อ

ใบหม่อนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ดีต่อสุขภาพเนื่องจากอุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิด จึงทำให้ใบหม่อนได้รับความนิยมจากผู้บริโภคอย่างกว้างขวาง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการออกฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระโดยรวม ปริมาณสารโพลีฟีนอล ในผลิตภัณฑ์อาหารว่าง 4 ชนิด ได้แก่ ขนมปังจืด ขนมปุยฝ้าย ขนมเปียกปูน และขนมบัวหิมะ ที่เสริมผงใบหม่อนพันธุ์บุรีรัมย์ 60 ในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักแบ่งในสูตรผลิตภัณฑ์ทั้ง 4 ชนิด ผลการวิเคราะห์พบว่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารโพลีฟีนอลในผลิตภัณฑ์ทั้ง 4 ชนิด ที่เสริมผงใบหม่อน มีปริมาณมากขึ้นกว่าอาหารว่างที่ไม่ได้เสริมผงใบหม่อน ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารโพลีฟีนอลในผลิตภัณฑ์ดั้งเดิมทั้ง 4 ชนิดพบแต่เพียงกรดเฟอร์ูลิก (Ferulic Acid) และเมื่อเสริมผงใบหม่อนพบสารโพลีฟีนอล ได้แก่ แคมเฟอรอล (Kaempferol) เควอซีติน (quercetin) และกรดคาเฟอิก (Caffeic Acid) ในปริมาณสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนกรดเฟอร์ูลิก (Ferulic Acid) มีปริมาณลดลง ดังนั้นคุณสมบัติการเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของผงใบหม่อน สามารถใช้เป็นข้อแนะนำในการเสริมในอาหารเพื่อสุขภาพ

คำสำคัญ : สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ; ฟลาโวนอยด์; แคมเฟอรอล; เควอซีติน; กรดคาเฟอิก

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 5133 1747, อีเมล: chukkrit.t@ku.th

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

Antioxidant Activities and Polyphenol Compounds in Snack Products Fortified with Mulberry Leaf Powder

Chukkrit Thongkham^{1*} Taweesak Techakriengkrai² Ratchanee Kongkachuicai³
and Rin Charoensiri⁴

^{1,2} Food and Nutrition Program, Department of Home Economic, Faculty of Agriculture, Kasetsart University

^{3,4} Institute of Nutrition Mahidol University

^{1,2} 50 Paholayothin Road, Lad Yao, Chatuchak, Bangkok, 10900

^{3,4} 999 Phutthamonthon Sai 4 Road, Salaya, Phutthamonthon, Nakhon Pathom, 73170

Received 4 January 2020; Revised 17 June 2020; Accepted 23 July 2020

Abstract

The potential health benefits attributed to mulberry leaf and its bioactive compounds have led to a huge increase of mulberry leaf products in the food market. The objective of this research was to determine total antioxidant activities (FRAP and DPPH assays) and polyphenol compounds in 4 snack products i.e. loaf-bread, puifai (Thai steamed cupcakes), peakpoon (Green coconut sweet pudding) and snow skin mooncake fortified with 10% mulberry leaf powder from “Buri Rum 60” cultivar. The result showed that antioxidant activities and polyphenol contents increased in 4 products fortified with mulberry leaf powder. Ferulic acid was the only phenolic compound found in all original products. Kaempferol, quercetin and caffeic acid were significantly increased, whereas ferulic acid was reduced in the modified formulas. Therefore, these bioactive compounds properties of mulberry leaf powder suggested their possible use for fortifying the healthy foods.

Keywords : Bioactive Compounds; Flavonoid; Kaempferol; Quercetin; Caffeic Acid

* Corresponding Author. Tel.: +668 5133 1747, E-mail Address: chukkrit.t@ku.th

1. บทนำ

การดำรงชีวิตของคนในสังคมปัจจุบันนั้นมีความเร่งรีบและต้องทำงานแข่งขันกับเวลามากขึ้น ส่งผลต่อพฤติกรรมของผู้บริโภคที่เปลี่ยนไป ทำให้ผู้บริโภคได้รับคุณค่าทางโภชนาการไม่ครบถ้วน เป็นเหตุให้เกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (Non communicable disease : NCD) ตามมา เช่น โรคอ้วน โรคเบาหวาน โรคหลอดเลือดและสมอง โรคมะเร็ง เป็นต้น จากการศึกษาค้นคว้าวิจัยแล้วว่า สารต้านอนุมูลอิสระสามารถช่วยป้องกันการเกิดโรคต่าง ๆ ได้ เช่น โรคความดัน โรคหลอดเลือดหัวใจ โรคเบาหวาน โรคอัลไซเมอร์ [1] สารต้านอนุมูลอิสระถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์เสริมอาหารหลายชนิด โดยธรรมชาติแล้ว สารต้านอนุมูลอิสระเหล่านี้จะพบได้ในพืชผัก ผลไม้ชนิดต่าง ๆ เครื่องเทศ และชา

ชาเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระธรรมชาติที่สำคัญ พืชสมุนไพรท้องถิ่นของไทยที่ได้รับความนิยมในการทำชาในปัจจุบัน คือ ใบหม่อน จากการศึกษางานวิจัยพบว่าใบหม่อน (*Morus alba* L.) มีสารต้านอนุมูลอิสระหลายชนิดในกลุ่มโพลีฟีนอล มีสารฟลาโวนอยด์ คือ รูทีน (Rutin) เควอซิติน (Quercetin) แคม페อรอล (Kaempferol) และสารฟลาโวนอยด์ชนิดอื่น ๆ เป็นจำนวนมาก [2] สารประกอบโพลีฟีนอลหรือฟลาโวนอยด์มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันหรือเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ มีผลป้องกันโรคหัวใจและหลอดเลือด [3]-[5] โรคมะเร็งตับอ่อน [6], [7] เนื้องอกลำไส้ใหญ่ [8] ลดความเสี่ยงการเกิดมะเร็งกระเพาะอาหาร และหลอดเลือดอาหาร [9] และลดการเกิดมะเร็งปอด [10] นอกจากนี้ยังพบว่า ใบหม่อนยังมีสารพกวอัลคาลอยด์ 1-ดีออกซีโนจิริมัยซิน (1-Deoxynojirimycin, DNJ) ที่สามารถช่วยลดระดับน้ำตาล [11]-[13] มีผลลดระดับน้ำตาลในเลือดสัตว์ทดลอง [14] กรดแกมมาอะมิโนบิวทิริก (Gamma-aminobutyric Acid, GABA) มีผลลดความดันเลือด และลดการอักเสบในสมองของผู้ได้รับอุบัติเหตุทางสมอง

[15] มีสารกลุ่มไฟโตสเตอรอล (Phytosterol) ลดระดับไขมันในเลือด (คอเลสเตอรอล) อีกทั้งไม่พบผลข้างเคียงจึงปลอดภัยต่อผู้บริโภค [16] ชาใบหม่อนมีรสชาติเฉพาะตัวไม่มีรสฝาดและไม่ขม และมีสารเคเฟอีนน้อยมาก น้อยกว่าใบชา 200 เท่า หรือพบเพียงร้อยละ 0.01 หรือไม่พบเลย และไม่ต้องกังวลกับอาการท้องผูก อีกทั้งยังมีราคาค่อนข้างถูกเมื่อเทียบกับชาชนิดอื่น ๆ

ผู้วิจัยได้ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของผงใบหม่อน ที่เสริมในอาหารว่าง 4 ชนิด ได้แก่ ขนมปังจืด ขนมปุยฝ้าย ขนมเปียกปูน และขนมบัวหิมะในปริมาณร้อยละ 5 ร้อยละ 10 และร้อยละ 15 ของน้ำหนักแป้งแต่ละชนิด พบว่า การเสริมผงใบหม่อนในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักแป้งในอาหารว่างทั้ง 4 ชนิดได้รับการยอมรับมากที่สุด [21] ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้ผงใบหม่อนที่มีสารต้านอนุมูลอิสระมาเสริมในผลิตภัณฑ์อาหารว่างทั้ง 4 ชนิดในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักแป้งแต่ละชนิด เพื่อให้ทราบถึงปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์อาหารว่างที่เสริมผงใบหม่อนทั้ง 4 ชนิด ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพที่มีประโยชน์เพื่อส่งเสริมสุขภาพหรือป้องกันโรคต่าง ๆ โดยผลิตภัณฑ์เหล่านี้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารว่างที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ขนมปังสามารถรับประทานแทนข้าว เป็นอาหารที่มีสารอาหารคาร์โบไฮเดรตเป็นหลัก และสามารถให้พลังงานกับร่างกายได้ ตลอดทั้งเป็นที่รู้จักและนิยมบริโภคทั้งคนไทยและคนต่างชาติ ขนมปุยฝ้ายจัดเป็นขนมเศรษฐกิจที่ใช้ได้เกือบทุกเทศกาล และในงานพิธีมงคลต่าง ๆ สามารถสร้างรายได้ให้กับผู้ประกอบการอย่างแพร่หลาย ขนมเปียกปูน เป็นขนมไทยที่มักใช้น้ำใบเตยเป็นส่วนประกอบซึ่งให้รสชาติฉ่ำชื่น (คลอโรฟิลล์) จึงมีแนวความคิดในการใช้ผงใบหม่อนซึ่งมีสีเขียวมาแทนน้ำใบเตยซึ่งคาดว่าจะได้คุณค่าเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะสารต้านอนุมูลอิสระ และขนมบัวหิมะเป็นขนมมงคลที่เป็นที่รู้จักของคนไทยเชื้อสายจีนเป็นอย่างดี นิยมใช้ในพิธีมงคล และเทศกาลงานต่าง ๆ

จึงถูกคัดเลือกเป็นอีกหนึ่งตัวอย่างในการทดลองในครั้งนี้ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์อาหารว่างมีคุณค่าทางโภชนาการมากยิ่งขึ้น ตลอดทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ยกระดับรายได้ของกลุ่มเกษตรกรที่ปลูกหม่อนเลี้ยงไหม ส่งเสริมให้มีการใช้ผงใบหม่อนให้เป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง ตลอดทั้งผู้บริโภคผลิตภัณฑ์ที่เสริมผงใบหม่อนจะได้คุณค่าสารต้านอนุมูลอิสระในผงใบหม่อนที่เสริมลงในอาหารว่าง และถือเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ของอาหารเพื่อสุขภาพ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัตถุดิบ

ผงใบหม่อนสำเร็จรูปพันธุ์บุรีรัมย์ 60 จากศูนย์หม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระนางเจ้าพระบรมราชินีนาถ จ.นครราชสีมา เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำไปใช้

2.2 การเตรียมตัวอย่างอาหารว่าง

2.2.1 ขนมปังจืด ส่วนประกอบในการเตรียมขนมปังจืด [17] ได้แก่ แป้งขนมปัง 800 กรัม แป้งสาลี 200 กรัม นมผง 7 กรัม ยีสต์ 20 กรัม น้ำเย็น 520 กรัม น้ำตาลทราย 200 กรัม เกลือป่น 6 กรัม ไข่ไก่ 2 ฟอง และเนยสด 200 กรัม

วิธีทำ ร่อนแป้งทั้ง 2 ชนิดเข้าด้วยกัน ใส่เนยผงและยีสต์ เคล้าให้เข้ากัน ผสมน้ำเย็น เกลือ น้ำตาลทราย ไข่ไก่ เข้าด้วยกัน เทใส่ในส่วนผสมของแป้ง นวดพอเข้ากัน ใส่เนยสดลงไปผสมให้เข้ากัน แล้วนวดต่อจนแป้งเนียน พักส่วนผสมแป้ง 20 นาที แล้วนำมานวดไล่อากาศออก จากนั้นตัดแป้งเป็นก้อน ก้อนละ 200 กรัม คลึงก้อนกลมใส่พิมพ์พักไว้ให้ขึ้นเป็น 2 เท่า นำเข้าอบอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เมื่อขนมเหลืองสุกนำออกจากเตา ทาเนยสดให้ทั่ว พักวางให้เย็น

2.2.2 ขนมปังจืดเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10

ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ใช้เตรียมขนมปังจืดเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10 รวมทั้งวิธีทำคล้ายกับการทำขนมปังจืด ยกเว้นเสริมผงใบหม่อนลงไปร้อยละ 10 ของน้ำหนักแป้งทั้งหมด

2.2.3 ขนมปุยฝ้าย ส่วนประกอบในการเตรียมขนมปุยฝ้าย [18] ได้แก่ แป้งเค้ก 600 กรัม ผงฟู 8 กรัม น้ำเปล่า 240 กรัม (ส่วนที่ 1) สารเพิ่มปริมาตร 45 กรัม น้ำตาลทราย 400 กรัม ไข่เป็ด 4 ฟอง นมข้นหวาน 250 กรัม น้ำเปล่า 240 กรัม (ส่วนที่ 2) และน้ำมันาว 1 ช้อนโต๊ะ

วิธีทำ ร่อนแป้งกับผงฟูเข้าด้วยกันแล้วพักไว้ ตีสารเพิ่มปริมาตรกับน้ำส่วนที่ 1 ด้วยความเร็วสูง 2 นาที ลดความเร็วลงต่ำ 3 นาที ใส่ น้ำตาลทรายทีละน้อย ตีด้วยความเร็วปานกลาง 5 นาที ใส่ไข่ตีด้วยความเร็วปานกลาง 5 นาที ลดความเร็วลงต่ำใส่นมข้นหวาน น้ำเปล่า ส่วนที่ 2 ผสมให้เข้ากัน ใส่แป้งที่ร่อนแล้วให้หมด ตีด้วยความเร็วสูง 2 นาที และลดความเร็วลงต่ำ 1 นาที ใส่ น้ำมันาว ผสมให้เข้ากัน ตักส่วนผสมออกจากเครื่อง ตักใส่พิมพ์ที่รองด้วยกระดาษ นำไปนึ่งในลังถึงที่มีน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที

2.2.4 ขนมปุยฝ้ายเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10 ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ใช้เตรียมขนมปุยฝ้ายเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10 รวมทั้งวิธีทำคล้ายกับการทำขนมปุยฝ้าย ยกเว้นเสริมผงใบหม่อนลงไปร้อยละ 10 ของน้ำหนักแป้งทั้งหมด

2.2.5 ขนมเปียกปูน ส่วนประกอบในการเตรียมขนมเปียกปูน [19] ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า 60 กรัม แป้งมันสำปะหลัง 10 กรัม น้ำเปล่า 240 กรัม น้ำปูนใส 300 กรัม น้ำตาลปึก 150 กรัม

วิธีทำ ผสมแป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลังรวมกัน ผสมน้ำเปล่า น้ำปูนใส น้ำตาลปึกรวมกัน คนให้น้ำตาลละลาย เทส่วนผสมของเหลวใส่ส่วนผสมแป้ง โดยใส่ทีละน้อยนวดจนแป้งรวมตัวเป็นก้อนมีลักษณะนุ่มมือ ประมาณ 15 นาที ใส่ของเหลวที่เหลือจนหมดผสมให้

เข้ากัน จากนั้นใส่กระทะทองเหลือง ยกขึ้นตั้งไฟกวน โดยใช้ไฟแรง กวนจนส่วนผสมรวมกันเป็นก้อน ลดไฟลง ใช้ไฟปานกลาง กวนจนแป้งร้อนจากกระทะทองเหลือง เทใส่ถาด พักให้เย็นแล้วตัดเป็นชิ้น

2.2.6 ขนมหั้วเป็ญนเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10 ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ใช้เตรียมขนมหั้วเป็ญนเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10 รวมทั้งวิธีทำคล้ายกับการทำขนมหั้วเป็ญน ยกเว้นเสริมผงใบหม่อนลงไปร้อยละ 10 ของน้ำหนักแป้งทั้งหมด

2.2.7 ขนมหั้วเป็ญน ส่วนประกอบในการเตรียมขนมหั้วเป็ญน [20] ส่วนผสมของตัวแป้ง ได้แก่ แป้งขนมโก๋ 120 กรัม น้ำตาลไอซิ่ง 100 กรัม น้ำต้มสุก 140 กรัม และเนยขาว 40 กรัม ส่วนผสมของตัวไส้ ได้แก่ นมข้นจืด 400 กรัม ไข่ไก่ 300 กรัม น้ำตาลทราย 400 กรัม แป้งสาลี 175 กรัม และเนยสด 175 กรัม

วิธีทำส่วนผสมตัวแป้ง ทำแป้งเป็นบ่อตรงกลางผสมน้ำตาลไอซิ่ง น้ำต้มสุก เข้าด้วยกัน เทลงในบ่อแป้งผสมให้เข้ากันใส่เนยขาว นวดจนส่วนผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน แบ่งแป้งก้อนละ 15 กรัม ห่อไส้ก้อนละ 20 กรัม คลึงแป้งให้เป็นแผ่นกลม ห่อไส้ให้มิด อัดลงพิมพ์เคาะ บรรจุลงภาชนะ วิธีทำส่วนผสมตัวไส้ ผสมส่วนผสมทุกอย่างเข้าด้วยกัน คนพอให้น้ำตาลละลาย วางส่วนผสมลงในลังถึงคนทุก 5 นาที ด้วยตระกร้อมือจนส่วนผสมขึ้น

2.2.8 ขนมหั้วเป็ญนเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10 ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ใช้เตรียมขนมหั้วเป็ญนเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10 รวมทั้งวิธีทำคล้ายกับการทำขนมหั้วเป็ญน ยกเว้นเสริมผงใบหม่อนลงไปร้อยละ 10 ของน้ำหนักแป้งทั้งหมด

2.3 การตรวจวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทาง

ชีวภาพ

วิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระของอาหารว่างทั้ง 4 ชนิด และอาหารว่างที่เสริมผงใบหม่อนที่ระดับร้อยละ

10 ของน้ำหนักแป้งแต่ละชนิด ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมเป็นที่ยอมรับของผู้ชิม ตามงานวิจัยของจักรกฤษณ์ และคณะ [21]

1. วิเคราะห์การออกฤทธิ์ของสารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) เทียบกับสารมาตรฐาน Trolox คัดแปลงจาก I.F. Benzie และ J.J. Strain [22] และ DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) เทียบกับสารมาตรฐาน L-ascorbic acid ตามวิธีของ P. Loypimai และคณะ [23]

2. วิเคราะห์ปริมาณโพลีฟีนอลทั้งหมดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu Colorimetric Method เทียบกับสารมาตรฐาน Gallic Acid ที่ความยาวคลื่น 765 nm ตามวิธีของ M. Kopjar และคณะ [24]

3. วิเคราะห์สารประกอบโพลีฟีนอลด้วยวิธี HPLC คัดแปลงจาก D.Y. Zhang และคณะ [25]

วิเคราะห์ผลการทดลองโดยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในตัวอย่งอาหารว่างก่อนเสริมและหลังเสริมผงใบหม่อนโดยใช้สถิติ Paired Samples T-test ที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติร้อยละ 95

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในอาหารว่าง และอาหารว่างเสริมผงใบหม่อนแสดงในตารางที่ 1 และ 2

จากการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP และ DPPH พบว่าอาหารว่างทั้ง 4 ชนิดมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอยู่แล้ว และเพิ่มมากขึ้นเมื่อเสริมด้วยผงใบหม่อน โดยที่ขนมปังจืดเสริมผงใบหม่อนมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี FRAP และ DPPH เท่ากับ $934.35 \pm 1.00 \mu\text{moles TE}/100\text{g}$ และ $80.54 \pm 3.10 \text{ mgAA}/100\text{g}$ ตามลำดับ ขนมหั้วเป็ญนเสริมผงใบหม่อนมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ $645.11 \pm 13.85 \mu\text{moles}$

ตารางที่ 1ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ในอาหารว่างและอาหารว่างเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10

อาหารว่าง	FRAP(μ moles TE/100g)	P-value
ขนมปังจืด	188.37 $\pm$ 10.74	0.013
ขนมปังจืดเสริมผงใบหม่อน	934.35 $\pm$ 1.00	
ขนมปุยฝ้าย	123.65 $\pm$ 3.59	0.015
ขนมปุยฝ้ายเสริมผงใบหม่อน	645.11 $\pm$ 13.85	
ขนมเปียกปูน	215.54 $\pm$ 11.62	0.038
ขนมเปียกปูนเสริมผงใบหม่อน	266.39 $\pm$ 15.90	
ขนมบัวหิมะ	91.01 $\pm$ 2.39	0.031
ขนมบัวหิมะเสริมผงใบหม่อน	499.40 $\pm$ 25.82	

ตารางที่ 2ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ในอาหารว่างและอาหารว่างเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10

อาหารว่าง	DPPH (mgAA/100g)	P-value
ขนมปังจืด	27.57 $\pm$ 1.03	0.035
ขนมปังจืดเสริมผงใบหม่อน	80.54 $\pm$ 3.10	
ขนมปุยฝ้าย	76.14 $\pm$ 1.30	0.189 ^{ns}
ขนมปุยฝ้ายเสริมผงใบหม่อน	79.40 $\pm$ 0.11	
ขนมเปียกปูน	36.72 $\pm$ 0.29	0.045
ขนมเปียกปูนเสริมผงใบหม่อน	48.73 $\pm$ 0.91	
ขนมบัวหิมะ	18.71 $\pm$ 0.69	0.018
ขนมบัวหิมะเสริมผงใบหม่อน	51.78 $\pm$ 2.04	

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

TE/100g และ 79.40 $\pm$ 0.11 mgAA/100g ตามลำดับ ขนมบัวหิมะเสริมผงใบหม่อนมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ 499.40 $\pm$ 25.82 μ moles TE/100g และ

51.78 $\pm$ 2.04 mgAA/100g ตามลำดับ และขนมเปียกปูนเสริมผงใบหม่อนมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ 266.39 $\pm$ 15.90 μ moles TE/100g และ 48.73 $\pm$ 0.91 mgAA/100g ตามลำดับ

ด้วยวิธีของ FRAP (ตารางที่ 1) อาหารว่างที่เสริมผงใบหม่อนจะมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากกว่าอาหารว่างที่ไม่ได้เสริมผงใบหม่อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ในอาหารว่างทั้ง 4 ชนิด ด้วยวิธี DPPH (ตารางที่ 2) พบว่า ขนมปังจืด ขนมเปียกปูน และขนมบัวหิมะที่เสริมผงใบหม่อนมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากกว่าที่ไม่เสริมผงใบหม่อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) แต่ขนมปุยฝ้ายเสริมผงใบหม่อนมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากกว่าขนมปุยฝ้ายที่ไม่เสริมผงใบหม่อนอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

จากตารางที่ 3 ปริมาณสารโพลีฟีนอลทั้งหมดโดยวิธี Folin-Ciocalteu Colorimetric Method เทียบกับสารมาตรฐาน Gallic Acid พบว่า ขนมปังจืด ขนมปุยฝ้าย ขนมเปียกปูน และขนมบัวหิมะ มีปริมาณโพลีฟีนอล 128.66 $\pm$ 5.40, 37.46 $\pm$ 1.42, 72.63 $\pm$ 4.25 และ 47.01 $\pm$ 0.28 mg gallic acid equivalent/100 g ตามลำดับ และเมื่อเสริมผงใบหม่อนในอาหารว่างพบว่าปริมาณโพลีฟีนอลมากขึ้นในอาหารว่างทั้ง 4 ชนิด โดยที่ขนมปังจืดเสริมผงใบหม่อนมีปริมาณสารโพลีฟีนอล 228.97 $\pm$ 12.08 mg GAE/100 g ขนมปุยฝ้ายเสริมผงใบหม่อนมีปริมาณโพลีฟีนอล 113.81 $\pm$ 1.35 mg GAE/100 g ขนมเปียกปูนเสริมผงใบหม่อนมีปริมาณโพลีฟีนอล 85.41 $\pm$ 3.04 mg GAE/100 g และปริมาณโพลีฟีนอลในขนมบัวหิมะเสริมผงใบหม่อนมีปริมาณ 87.96 $\pm$ 0.50 mg GAE/100 g ขนมปุยฝ้าย ขนมเปียกปูน และขนมบัวหิมะที่เสริมผงใบหม่อนมีปริมาณสารโพลีฟีนอลมากกว่าอาหารว่างที่ไม่ได้เสริมผงใบหม่อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ส่วนขนมปังจืดที่เสริมผงใบหม่อนมีปริมาณสารโพลีฟีนอลมากกว่าขนมปังจืดที่ไม่ได้เสริมผงใบหม่อนอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

ตารางที่ 3 ปริมาณสารโพลีฟีนอลทั้งหมดในอาหารว่างและอาหารว่างเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10

อาหารว่าง	Total polyphenol (mg gallic acid equivalent/100 g)	P-value
ขนมปังจืด	128.66±5.40	0.078 ^{ns}
ขนมปังจืดเสริมผงใบหม่อน	228.97±12.08	
ขนมปุยฝ้าย	37.46±1.42	0.000
ขนมปุยฝ้ายเสริมผงใบหม่อน	113.81±1.35	
ขนมเปียกปูน	72.63±4.25	0.043
ขนมเปียกปูนเสริมผงใบหม่อน	85.41±3.04	
ขนมบัวหิมะ	47.01±0.28	0.009
ขนมบัวหิมะเสริมผงใบหม่อน	87.96±0.50	

หมายเหตุ ^{ns} ค่าในแนวตั้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05)

ตารางที่ 4 สารประกอบโพลีฟีนอลที่พบในขนมปังจืดและขนมปังจืดเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10

ชนิดและปริมาณสารประกอบ โพลีฟีนอล (µg/100 g)	ขนมปังจืด	ขนมปังจืดเสริมผงใบหม่อน ร้อยละ 10	P-value
Apigenin	ND	ND	0.026
Ferulic acid	740.38±13.79	639.19±8.04	
Hesperetin	ND	ND	
Kaempferol	ND	2,209.22±37.75	
Luteolin	ND	ND	0.008
Myricetin	ND	ND	
Naringenin	ND	ND	
Quercetin	ND	6,060.82±109.41	
p-Coumaric acid	ND	ND	0.011
Sinapic acid	ND	ND	
Caffeic acid	ND	7,098.68±173.04	

หมายเหตุ ND = not detected

ตารางที่ 5 สารประกอบโพลีฟีนอลที่พบในขนมปุยฝ้ายและขนมปุยฝ้ายเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10

ชนิดและปริมาณสารประกอบ โพลีฟีนอล (µg/100 g)	ขนมปุยฝ้าย	ขนมปุยฝ้ายเสริมผงใบหม่อน ร้อยละ 10	P-value
Apigenin	ND	ND	0.124 ^{ns}
Ferulic acid	218.57±5.85	185.72±3.32	
Hesperetin	ND	ND	0.015
Kaempferol	ND	1,292.05±44.37	
Luteolin	ND	ND	ND
Myricetin	ND	ND	
Naringenin	ND	ND	

ตารางที่ 5 สารประกอบโพลีฟีนอลที่พบในขนมปุยฝ้ายและขนมปุยฝ้ายเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10 (ต่อ)

ชนิดและปริมาณสารประกอบ โพลีฟีนอล ($\mu\text{g}/100\text{ g}$)	ขนมปุยฝ้าย	ขนมปุยฝ้ายเสริมผงใบหม่อน ร้อยละ 10	P-value
Quercetin	ND	3,372.51 $\pm$ 133.23	0.018
<i>p</i> -Coumaric acid	ND	ND	
Sinapic acid	ND	ND	
Caffeic acid	ND	4,069.67 $\pm$ 82.68	0.009

หมายเหตุ ^{ns} ค่าในแนวนอนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$), ND = not detected

ตารางที่ 6 สารประกอบโพลีฟีนอลที่พบในขนมเปียกปูนและขนมเปียกปูนเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10

ชนิดและปริมาณสารประกอบ โพลีฟีนอล ($\mu\text{g}/100\text{ g}$)	ขนมเปียกปูน	ขนมเปียกปูนเสริมผงใบหม่อน ร้อยละ 10	P-value
Apigenin	ND	ND	
Ferulic acid	439.85 $\pm$ 3.52	399.27 $\pm$ 3.63	0.001
Hesperetin	ND	ND	
Kaempferol	ND	373.58 $\pm$ 9.55	0.012
Luteolin	ND	ND	
Myricetin	ND	ND	
Naringenin	ND	ND	
Quercetin	ND	558.92 $\pm$ 21.34	0.017
<i>p</i> -Coumaric acid	ND	ND	
Sinapic acid	ND	ND	
Caffeic acid	ND	2,761.58 $\pm$ 57.18	0.009

หมายเหตุ ND = not detected

ตารางที่ 7 สารประกอบโพลีฟีนอลที่พบในขนมบัวหิมะและขนมบัวหิมะเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10

ชนิดและปริมาณสารประกอบ โพลีฟีนอล ($\mu\text{g}/100\text{ g}$)	ขนมบัวหิมะ	ขนมบัวหิมะเสริมผงใบหม่อน ร้อยละ 10	P-value
Apigenin	ND	ND	
Ferulic acid	355.75 $\pm$ 6.11	330.57 $\pm$ 8.08	0.035
Hesperetin	ND	ND	
Kaempferol	ND	1,173.54 $\pm$ 14.23	0.005
Luteolin	ND	ND	
Myricetin	ND	ND	
Naringenin	ND	ND	
Quercetin	ND	2,508.86 $\pm$ 28.25	0.005
<i>p</i> -Coumaric acid	ND	ND	
Sinapic acid	ND	ND	
Caffeic acid	ND	3,177.36 $\pm$ 38.80	0.005

หมายเหตุ ND = not detected

จากตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์สารประกอบโพลีฟีนอลในขนมปังจืดและขนมปังจืดเสริมผงใบหม่อน แสดงให้เห็นว่า ขนมปังจืดมี Ferulic Acid $740.38 \pm 13.79 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ และเมื่อเสริมผงใบหม่อนในขนมปังจืดพบว่า Ferulic Acid มีปริมาณ $639.19 \pm 8.04 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่พบว่ามีสารฟลาโวนอยด์ชนิดอื่นเพิ่มขึ้น คือ Kaempferol, Quercetin และ กรดฟีนอลิกชนิด Caffeic Acid ในปริมาณ $2,209.22 \pm 37.75$, $6,060.82 \pm 109.41$ และ $7,098.68 \pm 173.04 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ ตามลำดับ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ไม่พบในขนมปังจืดสูตรมาตรฐาน

จากตารางที่ 5 ขนมปังฝ้ายมี Ferulic Acid $218.57 \pm 5.85 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ ซึ่งเป็นกรดฟีนอลิกที่มีมากในธัญพืช เมื่อเสริมผงใบหม่อนในขนมปังฝ้าย ปริมาณ Ferulic Acid $185.72 \pm 3.32 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ ลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่มีฟลาโวนอยด์ คือ Kaempferol, Quercetin และ กรดฟีนอลิกชนิด Caffeic Acid ในปริมาณ $1,292.05 \pm 44.37$, $3,372.51 \pm 133.23$ และ $4,069.67 \pm 82.68 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ ตามลำดับ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 6 ขนมปังเปียกปูน ทำจากแป้งและน้ำตาลมีปริมาณ Ferulic Acid $439.85 \pm 3.52 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ เมื่อเสริมผงใบหม่อนปริมาณ Ferulic Acid $399.27 \pm 3.63 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่มีฟลาโวนอยด์ คือ Kaempferol, Quercetin และ กรดฟีนอลิกชนิด Caffeic Acid มีปริมาณ 373.58 ± 9.55 , 558.92 ± 21.34 และ $2,761.58 \pm 57.18 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ ตามลำดับ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 7 ขนมปังหิมะทำจากแป้งซึ่งมี Ferulic Acid $355.75 \pm 6.11 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ เมื่อเสริมผงใบหม่อน ทำให้เหลือ Ferulic Acid $330.57 \pm 8.08 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ ซึ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ปริมาณ

ฟลาโวนอยด์ที่เพิ่มขึ้น คือ Kaempferol, Quercetin และ กรดฟีนอลิกชนิด Caffeic Acid ในปริมาณ $1,173.54 \pm 14.23$, $2,508.86 \pm 28.25$ และ $3,177.36 \pm 38.80 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

วิจารณ์ผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP และ DPPH ในอาหารว่างและอาหารว่างเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10 (ตารางที่ 1 และ 2) พบว่า ขนมปังจืดเสริมผงใบหม่อนมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมาก เป็นไปได้ว่า กระบวนการให้ความร้อนในขนมปังจืด โดยการอบที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส จะช่วยสลายพันธะโคเวเลนต์ในผงใบหม่อนและปลดปล่อยสารต้านอนุมูลอิสระออกมา เช่น ฟลาโวนอยด์ แคโรทีนอยด์ โพลีฟีนอล [11] จึงทำให้ขนมปังจืดเสริมผงใบหม่อนที่ได้มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงมากขึ้น ขนมปังฝ้ายเสริมผงใบหม่อนซึ่งอุณหภูมิในการนึ่งขนมปังฝ้ายอยู่ที่อุณหภูมิน้ำเดือด 100 องศาเซลเซียส ทำให้การสลายพันธะโคเวเลนต์และปลดปล่อยสารต้านอนุมูลอิสระออกมามีมากขึ้น ทำให้ขนมปังฝ้ายเสริมผงใบหม่อนมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากขึ้น ส่วนอุณหภูมิในการทำขนมปังหิมะเป็นอุณหภูมิห้องปกติไม่สัมผัสความร้อนไม่มีการเพิ่มพื้นที่การสัมผัสอากาศมากเหมือนการกวน ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในขนมปังหิมะเสริมผงใบหม่อนจึงมีค่าไม่มากเท่าขนมปังจืดเสริมผงใบหม่อนและขนมปังฝ้ายเสริมผงใบหม่อน และขนมปังเปียกปูนเสริมผงใบหม่อนมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระน้อยที่สุด ซึ่งวิธีทำขนมปังเปียกปูนนั้นจะต้องใช้การกวนซึ่งเป็นการเพิ่มอากาศให้กับขนมปังเปียกปูนทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นจึงทำให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในขนมปังเปียกปูนเสริมผงใบหม่อนที่ได้มีค่าน้อย

การหาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระทั้ง 2 วิธี ค่าที่ได้จากวิธีของ DPPH มีค่าต่ำกว่าวิธี FRAP เนื่องจากค่า DPPH

ค่อนข้างเสถียรไม่ว่าต่อปฏิกิริยาเหมือนอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในร่างกายจริงจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ซ้ำทำให้ค่าการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริง [26] อีกทั้งสารประกอบฟีนอลในใบหม่อนส่วนใหญ่เป็นสารประกอบฟีนอลที่ละลายได้ดีในน้ำ และวิธี FRAP ก็มีความเหมาะสมกับการตรวจสอบสารประกอบฟีนอลที่ละลายในน้ำมากกว่าแบบ DPPH จึงทำให้วิธี FRAP มีค่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากกว่าวิธี DPPH [27]

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารโพลีฟีนอลทั้งหมดในอาหารว่างและอาหารว่างเสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10 (ตารางที่ 3) พบว่า เมื่อเสริมผงใบหม่อนในอาหารว่างปริมาณโพลีฟีนอลจะมากขึ้นในอาหารว่างทั้ง 4 ชนิด โดยที่ปริมาณสารโพลีฟีนอลจะมากที่สุดในขนมปังจืดเสริมผงใบหม่อน และมีปริมาณน้อยที่สุดในขนมเปียกปูนเสริมผงใบหม่อน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2 ที่พบปริมาณฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในขนมปังจืดเสริมผงใบหม่อนมีปริมาณมากที่สุดและขนมเปียกปูนเสริมผงใบหม่อนมีปริมาณน้อยที่สุด กรรมวิธีการทำขนมเปียกปูนนั้นต้องกวนแป้งอยู่ตลอดเวลาเป็นการทำให้พื้นที่ผิวของขนมสัมผัสอากาศอยู่ตลอดเวลาในขณะการกวน ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจึงลดน้อยลงเพราะถูกออกซิไดซ์ด้วยออกซิเจน ดังนั้นปริมาณโพลีฟีนอลและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในขนมเปียกปูนเสริมผงใบหม่อนจึงมีปริมาณน้อย ส่วนขนมบัวหิมะซึ่งไม่สัมผัสความร้อน ไม่สัมผัสอากาศ ไม่มีการเติมออกซิเจนให้กับขนมมากนัก จึงไม่มีการทำลายสารโพลีฟีนอลในผงใบหม่อนแต่ก็ไม่มีความร้อนมาทำลายพันธะโควาเลนต์และปลดปล่อยสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น โพลีฟีนอล ทำให้โพลีฟีนอลในขนมบัวหิมะเสริมผงใบหม่อนมีปริมาณไม่มากนัก ดังนั้นควรประกอบอาหารหรือขนมด้วยวิธีที่ไม่สัมผัสอากาศหรือสัมผัสให้น้อยที่สุด ไม่ให้ออกซิเจนไปทำลายสารต้านอนุมูลอิสระหรือสารโพลีฟีนอล

สารโพลีฟีนอลมีประโยชน์หลายประการสารกลุ่มนี้มีผลต่อคุณภาพของอาหาร จากรายงานในปัจจุบันพบว่าสารโพลีฟีนอลพบมากในผลไม้ ผักและเครื่องดื่ม จะเป็นสารกลุ่มฟลาโวนอยด์และกรดฟีนอลิก มีคุณสมบัติในการต้านออกซิเดชัน ด้านการตายของเซลล์ ด้านสารก่อมะเร็ง ด้านการอักเสบ [28] ป้องกันเนื้อเยื่อและ DNA จากการถูกทำลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของอนุมูลอิสระในร่างกายได้ [29] ป้องกันโรคหัวใจ และหลอดเลือดสมอง เนื่องจากช่วยลดคอเลสเตอรอลชนิด LDL และไตรกลีเซอไรด์ และช่วยเพิ่มระดับ HDL ลดความดันโลหิตและระดับน้ำตาลในเลือด [30]

ในการวิเคราะห์สารประกอบโพลีฟีนอลที่พบในอาหารว่างและอาหารว่างเสริมผงใบหม่อน (ตารางที่ 4-7) ได้วิเคราะห์ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ 7 ชนิด ได้แก่ Apigenin, Hesperetin, Kaempferol, Luteolin, Myricetin, Naringenin, Quercetin และกรดฟีนอลิก 4 ชนิด ได้แก่ Ferulic Acid, *p*-Coumaric Acid, Sinapic Acid, Caffeic Acid ซึ่งผลิตภัณฑ์อาหารว่างสูตรมาตรฐานจะพบแต่ Ferulic Acid เพียงอย่างเดียว ในขณะที่ผลิตภัณฑ์อาหารว่างที่เสริมผงใบหม่อนจะพบ Ferulic Acid, Kaempferol, Quercetin และ Caffeic Acid โดยที่ปริมาณ Kaempferol, Quercetin และ Caffeic Acid เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับสูตรมาตรฐาน ส่วนฟลาโวนอยด์และกรดฟีนอลิกอื่น ๆ ที่ไม่พบในอาหารว่างและอาหารว่างเสริมผงใบหม่อนเนื่องจากไม่ใช่สารที่พบได้ในผงใบหม่อน ส่วนใหญ่เป็นสารที่พบในผักและผลไม้อื่น ๆ เช่น Apigenin พบทั่วไปในผักและผลไม้ เช่น ผักชี คื่นช่าย หัวหอม แอปเปิลและส้ม เป็นต้น Luteolin พบในพืชทั่วไป เช่น โหระพา ชาคาโมไมล์ แครอท น้ำมันมะกอก บรอกโคลี โรสแมรี่ ออริกาโน ผักชีฝรั่ง และเปลือกถั่วลิสง [31] Myricetin พบทั่วไปในพืชผักและผลไม้ *p*-Coumaric Acid พบในถั่วลิสง แครอท พริกสีเขียวยาสตอเบอร์รี่ สับปะรด มะเขือเทศ และกระเทียม เป็นต้น

อาหารว่างทั้ง 4 ชนิด ทำจากแป้งซึ่งเป็นธัญพืช ดังนั้นจึงมีกรดฟีนอลิกชนิด Ferulic Acid ซึ่ง Ferulic Acid เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ พบมากในธัญพืชต่าง ๆ Ferulic Acid มีทั้งรูปแบบอิสระและเชื่อมติด (Bound Form) [32] Ferulic Acid เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ จึงถูกใช้สำหรับต่อต้านการแก่ (Aging) ป้องกันการเกิดเซลล์มะเร็ง โรคหัวใจ ไข้หวัด รักษาสุขภาพของกล้ามเนื้อ ต่อต้านผลกระทบจากรังสีอัลตราไวโอเลต จึงป้องกันมะเร็งผิวหนังได้ [33] หลังจากเสริมผงใบหม่อนปริมาณ Ferulic Acid ลดลงเนื่องจากปริมาณแป้งต่อ 100 กรัมในอาหารว่างที่เสริมผงใบหม่อนลดน้อยลง โดยมีผงใบหม่อนเข้าไปแทนที่อีกทั้งเป็นไปได้ว่าผงใบหม่อนไปจับ Ferulic Acid ทำให้การทดสอบ Ferulic Acid มีปริมาณลดลงในอาหารว่างเสริมผงใบหม่อน ขนมน้ำผึ้ง ขนมน้ำตาล และขนมน้ำผลไม้ที่เสริมผงใบหม่อน ปริมาณ Ferulic Acid จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ขนมน้ำผลไม้ที่เสริมผงใบหม่อนจะมีปริมาณ Ferulic Acid ลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ฟลาโวนอยด์เป็นรงควัตถุ (Pigment) ที่มีความคงตัวต่อความร้อน และปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นกลุ่มสารที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุมูลออกซิเจน (Reactive Oxygen Species: ROS) จากผลดังแสดงในตารางที่ 4-7 จะเห็นได้ว่าอาหารว่างที่เสริมผงใบหม่อนจะพบฟลาโวนอยด์ในกลุ่มฟลาโวนอล (Flavonols) 2 ชนิด ได้แก่ Kaempferol และ Quercetin สอดคล้องกับงานวิจัยของรัตติยา (2544) [34] ได้วิเคราะห์หาสารสำคัญหรือสารออกฤทธิ์ที่มีสรรพคุณทางเภสัชศาสตร์ พบว่าในใบหม่อนมีสาร Kaempferol และ Quercetin ซึ่งเป็นสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่มีคุณสมบัติป้องกันการดูดซึมของน้ำตาลในลำไส้เล็ก ทำให้กระแสเลือดหมุนเวียนดี และหลอดเลือดแข็งแรง ป้องกันการสร้างเม็ดสีเมลานินในเซลล์ ยับยั้งการเกิดสารก่อมะเร็งเม็ดเลือด มะเร็งเต้านม และมะเร็ง

ลำไส้ใหญ่ ลดอาการแพ้ต่าง ๆ และยืดอายุเม็ดเลือดขาว
สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายทางลำไส้เล็ก และไม่
เปลี่ยนแปลงสภาพ

นอกจากนี้ยังพบกรดฟีนอลิกในกลุ่มกรดไฮดรอกซีซินนามิก (Hydroxycinnamic Acid) คือ Caffeic Acid ในอาหารว่างที่เสริมผงใบหม่อน Caffeic Acid เป็นสารพฤกษเคมีที่พืชสร้างขึ้น จัดเป็นกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งอาจอยู่ในรูปกรดอิสระหรือจับกันเป็นโอลิโกเมอร์ หรือเชื่อมด้วยสารประกอบอินทรีย์ในรูปของกลูโคไซด์และเอสเทอร์ เป็นสารเมแทบอลิต์ที่เกิดขึ้นในวิถีฟีนิลโพรพานอยด์ และเป็นสารตั้งต้นสำหรับวิถีชีวสังเคราะห์ลิกนิน Caffeic Acid พบในผลไม้ ผัก เครื่องเทศ และเครื่องดื่ม กรดคาเฟอิกฟีนิลเอสเทอร์ (Caffeic Acid Phenethyl Ester, CAPE) ใช้ประโยชน์ทางยาเป็นสารประกอบที่มีฤทธิ์ต้านสารก่อมะเร็ง ด้านภาวะการอักเสบ และมีคุณสมบัติในการช่วยปรับระบบภูมิคุ้มกัน จากการศึกษาพบว่า Caffeic Acid สามารถต้านออกซิเดชัน สามารถกำจัดอนุมูลอิสระ และโครงสร้างมีความเสถียร สามารถป้องกันการเกิดออกซิเดชันของกรดลิโนเลอิก (Linoleic Acid) และ Low-density Lipoprotein (LDL) ป้องกันเนื้อเยื่อและ DNA จากการถูกทำลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน [35] ขนมหังจืดเสริมผงใบหม่อนมีปริมาณ Kaempferol, Quercetin และกรดฟีนอลิกชนิด Caffeic Acid มากที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ ลือชัย (2560) [11] พบว่า การหมักเป็นผลทำให้แอลกอฮอล์ที่ยีสต์สร้างขึ้นในระหว่างการหมักสกัดสารออกฤทธิ์สำคัญออกจากใบหม่อน รวมทั้งเอนไซม์ β -glucosidase ที่ยีสต์สร้างขึ้นในระหว่างการหมัก ช่วยเร่งการสลายไกลโคไซด์ของสารประกอบฟีนอลที่มีโครงสร้างซับซ้อนให้ได้โมเลกุลของสารที่มีโครงสร้างเล็กลง ส่งผลให้ปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ทั้งหมดสูงขึ้น ปริมาณกรดฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ที่สูงขึ้น ทำให้ขนมหังจืดเสริมผงใบหม่อนมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP และ DPPH สูงขึ้น

ส่งผลดีต่อสุขภาพ รองลงมาเป็นขนมปุยฝ้ายเสริมผงใบหม่อน ขนมบัวหิมะเสริมผงใบหม่อน และมีปริมาณน้อยที่สุด คือ ขนมเปียกปูนเสริมผงใบหม่อน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารโพลีฟีนอลทั้งหมดในตารางที่ 1, 2 และ 3 ที่ขนมปังจิตเสริมผงใบหม่อนมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณสารโพลีฟีนอลทั้งหมดมากที่สุด รองลงมาเป็นขนมปุยฝ้ายเสริมผงใบหม่อนขนมบัวหิมะเสริมผงใบหม่อน และขนมเปียกปูนเสริมผงใบหม่อน

4. สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณสารโพลีฟีนอลทั้งหมด และสารประกอบโพลีฟีนอล พบว่า อาหารว่างที่เสริมผงใบหม่อนร้อยละ 10 มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากขึ้นกว่าอาหารว่างที่ไม่ได้เสริมผงใบหม่อน ในปริมาณที่แตกต่างกัน สอดคล้องกับปริมาณสารโพลีฟีนอล โดยมีปริมาณมากในขนมปังจิตเสริมผงใบหม่อน และมีปริมาณน้อยในขนมเปียกปูนเสริมผงใบหม่อน ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของอาหารว่างเสริมผงใบหม่อนทั้ง 4 ชนิด จะแปรผันตรงกับปริมาณสารโพลีฟีนอล มีสารกลุ่มฟลาโวนอยด์เป็นสารออกฤทธิ์ คือ Kaempferol, Quercetin, Caffeic Acid

การวิจัยครั้งนี้เป็นข้อมูลสนับสนุนว่า ผงใบหม่อนมีศักยภาพนำไปใช้เป็นส่วนผสมในอาหาร เนื่องจากมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณสารโพลีฟีนอลสูง สามารถนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณศูนย์หม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระนางเจ้าพระบรมราชินีนาถ จ.นครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงใบหม่อนในการทำผลิตภัณฑ์อาหารว่าง ขอขอบคุณสถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการ

วิเคราะห์หาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์อาหารว่างที่เสริมผงใบหม่อน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Katsube, Y. Yamasaki, M. Iwamoto and S. Oka, "Hyaluronidase-inhibiting polysaccharide isolated and purified from hot water extract of sporophyll of *Undaria pinnatifida*," *Food Science and Technology Research*, vol. 9, no. 1, pp. 25-29, 2003.
- [2] T. Theppakorn. *Tea*, Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2014.
- [3] R. Surasiang, P. Tinchana, P. Wiwacharn, S. Boonman, P. Noppasene, S. Chantarawich, C. Sangsiri and T. Kajonphol. "Determination of total phenolic compound, antioxidant activity and vitamin c in 8 mulberry leaf lines," *Agricultural science Journal*, vol. 46, no. 3, pp. 381-384, 2015.
- [4] M. Hertog, E. Feskens, D. Kromhout, P. Hollman and M. Katan, "Dietary antioxidant flavonoids and risk of coronary heart disease: the Zutphen Elderly Study," *The lancet*, vol. 342, no. 8878, pp. 1007-1011, 1993.
- [5] K. Imai and K. Nakachi, "Cross sectional study of effects of drinking green tea on cardiovascular and liver diseases," *British Medical Journal*, vol. 310, no. 6981, pp. 693-696, 1995.
- [6] S. Mizuno, S. Watanabe, K. Nakamura, M. Omata, H. Oguchi, H. Ohyanagi, T. Fujiki and

- K. Motojima, "A multi-institute case-control study on the risk factors of developing pancreatic cancer," *Japanese journal of clinical oncology*, vol. 22, no. 4, pp. 286-291, 1992.
- [7] W. A. Zatonski, P. Boyle, K. Przewozniak, P. Maisonneuve, K. Drosik and A. M. Walker, "Cigarette smoking, alcohol, tea and coffee consumption and pancreas cancer risk: a case-control study from Opole, Poland," *International journal of cancer*, vol. 53, no. 4, pp. 601-607, 1993.
- [8] S. Kono, K. Shinchu, N. Ikeda, F. Yanai and Imanishi, "Physical activity, dietary habits and adenomatous polyps of the sigmoid colon: a study of self-defense officials in Japan," *Journal of clinical epidemiology*, vol. 44, no. 11, pp. 1255-1261, 1991.
- [9] J. Weisburger, "Tea antioxidants and health," *Antioxidant In health and disease series*, pp. 469-486, 1996.
- [10] Y. Xu, C. Ho, S. Amin, C. Han and F. Chung, "Inhibition of tobacco-specific nitrosamine-induced lung tumorigenesis in A/J mice by green tea and its major polyphenol as antioxidants," *Cancer Research*, vol. 52, no. 14, pp. 3875-3879, 1992.
- [11] L. Butkhup, "The Antioxidant and Phytochemical Profiles of Healthy Alcoholic Beverage form Mulberry Leaf Green Teas," in *The 13th Mahasarakham University Research Conference*, Division of Research Facilitation and Dissemination Mahasarakham University, Mahasarakham, 2017, pp. 368-378.
- [12] A. Sribudsarakhum. "Mulberry leaf and diabetes mellitus" *Thai Journal of Phytopharmacy*, vol. 32, pp. 3-9, 2014.
- [13] K. Anurkkanapakron, P. Wongsinkongmain, B. Chornrai, T. Thongcheen, S. Phadungphat, Y. Metametha and R. Butraporn, "The effect of mulberry leaf extract in controlling blood conditions, hyperglycemia after meals," *Journal of Thai Traditional & Alternative Medicine*, vol. 6, no. 1, pp. 341-350, 2008.
- [14] F. Chen, N. Nakashima, M. Kimura, N. Asano and S. Koya, "Potentiating effects on pilocarpine-induced saliva secretion, by extracts and N-containing sugars derived from mulberry leaves, in streptozocin-diabetic mice," *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, vol. 18, no. 12, pp. 1676-1680, 1995.
- [15] P. D. Lyden, C. Jackson-Friedman and L. Lonzo-Doktor, "Medical therapy for intracerebral hematoma with the gamma-aminobutyric acid-A agonist muscimol," *Stroke*, vol. 28, no. 2, pp. 387-391, 1997.
- [16] Y. Banchobphutsa, "The efficacy of Morus alba leaf tea in Patens with Dyslipidemia," M.S. Thesis, Mae Fah Luang Univ., 2011.
- [17] M. Thongkham, "Documentation for teaching Bakery," Chiangmai Polytechnic College, Chiangmai, 2018.

- [18] M. Thongkham, "Documentation for teaching Thai dessert," Chiangmai Polytechnic College, Chiangmai, 2018.
- [19] C. Chaengkit, "Documentation for teaching Thai dessert," Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, 2016.
- [20] M. Thongkham, "Documentation for teaching Chinese food," Chiangmai Polytechnic College, Chiangmai, 2018.
- [21] C. Thongkham, T. Techakriengkrai and R. Kongkachuicai. "Nutritional values of snack products added with mulberry Leaf tea Powder Buri Rum 60," *RMUTP Research Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 119-127, 2019.
- [22] I. F. Benzie, and J. J. Strain, "The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": the FRAP assay," *Analytical biochemistry*, vol. 239, no. 1, pp. 70-76, 1996.
- [23] P. Loypimai, A. Moongngam, and P. Chottanom, "Effects of Ohmic Heating on Lipase Activity, Bioactive Compounds and Antioxidant Activity of Rice Bran," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 3, no. 4, pp. 3642-3652, 2009.
- [24] M. Kopjar, V. Piližota, J. Hribar, and M. Simčić, "Total phenol content and antioxidant activity of water solution of plant extracts," *Croatian Journal of Food Science and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 1-7, 2009.
- [25] D. Y. Zhang, Y. Wan, J. Y. Hao, R. Z. Hu, C. Chen, X. H. Yao, W. G. Zhao, Z. Y. Liu, and L. Li, "Evaluation of the alkaloid, polyphenols, and antioxidant contents of various mulberry cultivars from different planting areas in eastern China," *Industrial Crops and Products*, vol. 122, pp. 298-307, 2018.
- [26] N. Limsetho, "Antioxidant Activities Assay in Mixture of Tea Leaves (*Camellia sinensis* Ktze.) Mulberry Leaves (*Morus alba* L.) and Horse Radish Leaves (*Moringa oleifer* Lam)," Songkhla Rajabhat Univ., Songkhla, 2014.
- [27] M. Pianpakdee, "Retention of mulberry leaf extract by The interaction between polymers," M.S. Thesis Degree, Faculty of Science, Chulalongkorn Univ., 2013.
- [28] W. Suttana. "Anticancer activities of flavonoids: mechanisms of actions," *Srinagarind Medical Journal*, vol. 28, no. 4, pp. 567-582, 2013.
- [29] L. Butkhup, "Dietary polyphenols and their biological effects," *Journal Science Technology MSU*, vol. 31, no. 4, pp. 443-455, 2011.
- [30] C. Phanichayakulwichian, L. Watcharamat, P. Phongphancharoen, R. Phanarunothai, N. Wimonkasem and W. Supakitkanchana, "Assorted Knowledge about food for health and beauty. Chapter 1 Polyphenol: antioxidant," in *Japa Journal: Food & Health. The 15th International Processing*,

- Filling and Packaging Event for Asia: 13–16 June 2007, BITEC, Bangkok, 2007.
- [31] S. Wanichwecharuang, (2012, September 2). Biopolymer with high anti-cancer effect. [Online]. Available: <http://www.petro.mat.org/home/project/>
- [32] T. W. Na, “Ferulic acid: natural substance, high Safety Value,” *Food Journal*, vol. 44, no. 1, pp. 30-34, 2014.
- [33] P. Wichaiphong, “Biological Science Project,” Department of Science Service, Bangkok, 2010.
- [34] R. Samransakun, “Total polyphenol content and antioxidant activity of mulberry leaves and mulberry tea from some sources in Thailand,” M.S. thesis, Dept. Food Chemistry and Medical Nutrition, Chulalongkorn Univ., Bangkok, 2001.
- [35] A. S. Meyer, M. Heinonen and E.N. Frankel. “Antioxidant interactions of catechin, cyanidin, caffeic acid, quercetin, and ellagic acid on human LDL oxidation,” *Food Chemistry*, vol. 61, no. 1-2, pp. 71-75, Jan. 1998.

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

ผลของจิ้งหรีดผง โปรตีนถั่วเหลืองสกัด และแซนแทนกัมที่มีต่อคุณภาพ คุกกี้แป้งข้าวเจ้า

พงศ์พิพัฒน์ สนม และ กมลวรรณ แจ่มชัด*

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

รับบทความ 1 พฤษภาคม 2563 แก้ไขบทความ 13 มิถุนายน 2563 ตอรับบทความ 23 กรกฎาคม 2563

บทคัดย่อ

คุกกี้จากแป้งข้าวเจ้าเป็นผลิตภัณฑ์ขนมอบปราศจากกลูเตน จิ้งหรีดผงและโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเป็นแหล่งของโปรตีนทางเลือกที่ให้คุณค่าทางโภชนาการ แซนแทนกัมเป็นไฮโดรคอลลอยด์ชนิดหนึ่งที่มีผลต่อเนื้อสัมผัสของคุกกี้ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของจิ้งหรีดผง โปรตีนถั่วเหลืองสกัด และแซนแทนกัมต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของคุกกี้แป้งข้าวเจ้า จากศึกษาการแทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแหล่งโปรตีน 2 ชนิด คือจิ้งหรีดผงร้อยละ 25 และ 35 ร่วมกับโปรตีนถั่วเหลืองสกัดร้อยละ 0, 25 และ 35 ที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยการจัดสิ่งทดลองแบบแฟคทอเรียล (2x3) ในแผนการทดลองสุ่มสมบูรณ์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณจิ้งหรีดผง หรือลดปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การศึกษาผลของปริมาณแซนแทนกัมที่ร้อยละ 0, 0.14, 0.28 และ 0.42 ต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ พบว่าเมื่อปริมาณแซนแทนกัมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ ความชื้น และความแข็งของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ขณะที่คะแนนความชอบด้านความแข็ง และความชอบโดยรวมมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังนั้นสูตรที่เหมาะสมของคุกกี้แป้งข้าวเจ้า คือ ทดแทนแป้งข้าวเจ้าด้วยจิ้งหรีดผงร้อยละ 25 โปรตีนถั่วเหลืองสกัดร้อยละ 35 และไม่ใส่แซนแทนกัม

คำสำคัญ : คุกกี้; แป้งข้าวเจ้า; จิ้งหรีดผง; โปรตีนถั่วเหลืองสกัด; แซนแทนกัม

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 2562 5007, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: fagikwj@ku.ac.th

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

Effect of Cricket (*Acheta Domesticus*) Powder, Soy Protein Isolate and Xanthan Gum on the Qualities of Rice Flour-based Cookies

Pongpipat Sanom and Kamolwan Jangchud*

Department of product development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University
50 Ngamwongwan Road, Ladyao, Chatuchak, Bangkok, 10900

Received 1 May 2020; Revised 13 June 2020; Accepted 23 July 2020

Abstract

Rice flour-based cookies are gluten-free products. Cricket powder and isolated soy protein are alternative protein sources, which can provide desirable nutrition. Xanthan gum is one of the hydrocolloids affecting the texture of cookies. This study investigated the effect of cricket powder (CP), isolated soy protein (ISP) and xanthan gum on the physical, chemical and sensory qualities of rice flour-based cookies. The substitution of rice flour with two protein sources, CP (25 and 35%) and ISP (0, 25, and 35%) in the cookie formulations, which were evaluated for their qualities using a 2x3 factorial arrangement in a completely randomized design. The result showed that when CP increased or ISP decreased, the diameter of the product significantly ($p \leq 0.05$) increased but the hardness of the product significantly ($p \leq 0.05$) decreased. The effect of xanthan gum (0, 0.14, 0.28 and 0.42%) on the quality of products was also evaluated. It indicated that the increase in xanthan gum content significantly ($p \leq 0.05$) increased water activity, moisture content and hardness of product while the liking score for hardness and overall liking significantly ($p \leq 0.05$) decreased. Therefore, the optimal formula of rice flour cookies was 25% CP and 35% ISP for rice flour replacement without xanthan gum.

Keywords : Cookies; Rice Flour; Cricket Powder; Isolated Soy Protein; Xanthan Gum

* Corresponding Author. Tel.: +66 2562 5007, E-mail Address: fagikwj@ku.ac.th

1. บทนำ

คูกี้เป็นอาหารว่างชนิดหนึ่งในกลุ่มขนมอบที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องด้วยรสชาติที่หลากหลาย พกพาสะดวก และบริโภคได้ทุกช่วงวัย ซึ่งตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบัน แป้งสาลีเป็นส่วนประกอบหลักชนิดหนึ่งในคูกี้ซึ่งมีกลูเตนที่เป็นโปรตีนทำให้เกิดอาการแพ้กับผู้ป่วยด้วยโรคเซลิแอค (Celiac Disease) [1] ดังนั้นการนำแป้งจากแหล่งวัตถุดิบชนิดอื่น เช่น แป้งข้าวเจ้า ที่ไม่มีกลูเตนมาใช้เป็นส่วนผสมทดแทนแป้งสาลีในขนมอบ จึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้บริโภคที่แพ้กลูเตน เช่น การผลิตแครกเกอร์จากแป้งข้าวเจ้าที่มีคุณภาพและเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับแครกเกอร์จากแป้งสาลี เมื่อใช้คาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสร้อยละ 1.5 หรือ ไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 1.5 [2] การพัฒนาคูกี้ปราศจากกลูเตนที่มีส่วนผสมของแป้งข้าวเจ้าและแป้งบัควีต พบว่าปริมาณแป้งข้าวเจ้าต่อแป้งบัควีตที่เหมาะสมคือ 90:10 และ 80:20 [3] ดังนั้นนอกจากจะนำมาเป็นส่วนผสมเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากกลูเตนแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ข้าวเจ้าอีกด้วย

สารอาหารโปรตีนมีความจำเป็นต่อผู้บริโภคทุกวัย โดยเฉพาะวัยเด็กและวัยรุ่นเพื่อเสริมสร้างกล้ามเนื้อ และเป็นแหล่งพลังงานสำหรับกิจกรรมต่างๆ [4] ดังนั้นการเสริมโปรตีนในอาหารจึงมีความสำคัญ และคูกี้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารว่างที่ได้รับความนิยม จึงเหมาะที่จะนำพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เสริมโปรตีน โดยแหล่งของโปรตีนสามารถเลือกได้ทั้งจากสัตว์และจากพืช จิ้งหรีดเป็นแมลงที่เป็นแหล่งโปรตีนที่น่าสนใจ นำมาใช้เป็นส่วนผสมในอาหารได้ มีโปรตีนประมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนักแห้ง มีกรดอะมิโนที่สำคัญ ได้แก่ กรดกลูตาเมต ฟีนอลอะลานีน ลูซีน และวาเลีน เป็นต้น [5] จิ้งหรีดเป็นแมลงในกลุ่มที่มีการนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเชิงพาณิชย์มากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลิตภัณฑ์อาหารว่าง [6] สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์

จากจิ้งหรีดผงในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ พบว่าสามารถใช้จิ้งหรีดผงร้อยละ 10 ทดแทนแป้งสาลีในขนมปังเพื่อเพิ่มคุณค่าทางอาหาร และมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค [7] จากการศึกษาการใช้จิ้งหรีดผงเพื่อทดแทนแป้งสาลีในมัฟฟิน พบว่าปริมาณจิ้งหรีดผงที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 2 [8] และการศึกษาคุณภาพของขนมปังจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวโพด พบว่าการใช้จิ้งหรีดผงที่ร้อยละ 20 ให้ขนมปังที่มีคุณภาพดีและมีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 12.52 [9]

โปรตีนถั่วเหลืองสกัดจัดเป็นแหล่งโปรตีนจากพืชที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง มีการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารอย่างแพร่หลาย โดยใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มคุณค่าทางอาหารและปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสให้กับผลิตภัณฑ์ [10] เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนสูงอยู่ในช่วงร้อยละ 80-95 มีกรดอะมิโนที่สำคัญ ได้แก่ ลูซีน ฟีนอลอะลานีน ไสซีน และวาเลีน เป็นต้น [11]

แซนแทนกัมเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่มีผลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส สามารถกักเก็บความชุ่มชื้น เพิ่มความคงตัวให้กับผลิตภัณฑ์ [12] และยังทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับผลิตภัณฑ์อาหารที่ปราศจากกลูเตนอีกด้วย [13] งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำแซนแทนกัมไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ปราศจากกลูเตน ได้แก่ การศึกษาผลของแซนแทนกัมต่อเนื้อสัมผัสของเค้กจากแป้งข้าวเจ้าและข้าวโพด พบว่าปริมาณแซนแทนกัมที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 0.3 และ 0.4 ให้เค้กที่มีความแน่นเหนือน้อยกว่า และมีปริมาตรมากกว่าที่แซนแทนกัมร้อยละ 0.2 [14] มีการศึกษาผลของแซนแทนกัมที่ร้อยละ 1.5, 2.5 และ 3.5 ต่อสมบัติของขนมปังปราศจากกลูเตน ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด และควินัว พบว่าแซนแทนกัมร้อยละ 1.5-2.5 เป็นปริมาณที่เหมาะสม ให้ขนมปังมีค่าความแน่นเนื้อลดลง ค่าความยืดหยุ่นและปริมาตรจำเพาะสูงขึ้น [15] และการศึกษาการใช้แซนแทนกัมช่วงร้อยละ 0.5-1.5 ในส่วนผสมของบิสกิตจากแป้งข้าวเจ้าผสมแป้งถั่วลูกไก่

พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแซนแทนกัม ทำให้บิสกิตมีความแข็งแรงลดลง แต่ไม่มีผลต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัส [16]

จากการรวบรวมผลงานวิจัย พบว่ามีการศึกษาผลของจิ้งหรีดผงในผลิตภัณฑ์คุกกี้ที่มีแป้งสาลีเป็นส่วนผสม แต่ยังไม่มีการวิจัยที่ศึกษาผลของจิ้งหรีดผงและโปรตีนถั่วเหลืองสกัด และไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์คุกกี้จากแป้งข้าวเจ้าที่ปราศจากกลูเตน ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของจิ้งหรีดผง โปรตีนถั่วเหลืองสกัด และแซนแทนกัม ต่อคุณภาพของคุกกี้จากแป้งข้าวเจ้าที่มีจิ้งหรีดผงและโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเป็นแหล่งของโปรตีน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกให้แก่ผู้บริโภค และยังเป็นการส่งเสริมให้เกิดการขยายตลาดของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีแมลงเป็นส่วนผสม นอกจากแมลงจะเป็นแหล่งโปรตีนแล้วยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วนอีกด้วย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัตถุดิบและการวิเคราะห์คุณภาพ

จิ้งหรีดผงพันธุ์ทองแดงลายร้อนผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช จากห้างหุ้นส่วนจำกัด นิท ฟู้ดส์ ประเทศวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีตามวิธีการของ AOAC [17] สำหรับโปรตีนถั่วเหลืองสกัดได้จากบริษัทอาร์เซอร์แดเนียลส์ มิดแลนด์ ประเทศสหรัฐอเมริกา วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพโดยการวัดค่าสีของจิ้งหรีดผง และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

2.2 การศึกษาปริมาณแป้งข้าวเจ้าต่อคุณภาพของคุกกี้

ศึกษาผลของปริมาณแป้งข้าวเจ้าต่อคุณภาพของคุกกี้เพื่อหาสูตรพื้นฐานของคุกกี้แป้งข้าวเจ้า โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) เพื่อศึกษาอัตราส่วนแป้งข้าวเจ้า (ตราใบหยก) ต่อส่วนผสมชนิดอื่นที่ไม่รวมแป้ง

3 ระดับ คือ 38:100, 44:100 และ 50:100 โดยน้ำหนักมีปริมาณส่วนผสมชนิดอื่นคงที่ ได้แก่ เนยจืด 40 กรัม น้ำตาลทราย 24 กรัม ไข่ไก่ 24 กรัม น้ำ 9.6 กรัม ผงฟู 0.4 กรัม เกลือ 0.4 กรัม และวานิลลา 1.6 กรัม ส่วนผสมและกรรมวิธีการผลิตดัดแปลงมาจาก A. G. Roberts [18] มีกรรมวิธีการผลิตคือ ร่อนแป้งข้าวเจ้าและผงฟูเข้าด้วยกัน และพักไว้ ตีเนยจืดกับน้ำตาลทรายให้เข้ากันด้วยเครื่องตีผสมยี่ห้อ KitchenAid รุ่น OFM5K5SSWH ด้วยความเร็วปานกลาง 2 นาที จากนั้นเติมไข่ไก่ เกลือ และวานิลลาลงไป ตีผสมด้วยความเร็วสูง 5 นาที จนได้เนื้อครีมที่เนียน จากนั้นนำส่วนผสมแป้งที่เตรียมไว้ผสมให้เข้ากันด้วยความเร็วต่ำ 2 นาที จนเนียนเป็นเนื้อเดียวกัน นำเบทเทอร์ที่ได้ไปพักในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4-8 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วหยอดลงบนถาดอบเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ± 0.5 เซนติเมตร โดยแต่ละชิ้นหนัก 4.0 ± 1.0 กรัม นำไปอบด้วยเตาอบไฟฟ้ายี่ห้อ Teka รุ่น HI605 ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และอบต่อที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที นำคุกกี้มาพักให้เย็นบนตะแกรง และนำมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพโดยการวัดค่าความแข็ง วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ (9-Point Hedonic Scale)

2.3 การศึกษาผลของปริมาณจิ้งหรีดผงและโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อคุณภาพของคุกกี้แป้งข้าวเจ้า

เลือกสูตรที่มีปริมาณแป้งข้าวเจ้าที่เหมาะสม ที่ได้จากข้อ 2.2 มาศึกษาโดยจัดสิ่งทดลองแบบแฟคทอเรียล 2×3 ในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ศึกษาปริมาณส่วนผสมที่เป็นแหล่งโปรตีน 2 ชนิด ได้แก่ ปริมาณจิ้งหรีดผง 2 ระดับ คือ ร้อยละ 25 และ 35 และปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัด 3 ระดับ คือ ร้อยละ 0,

25 และ 35 โดยเติมลงไปทดแทนปริมาณแป้งข้าวเจ้า ทั้งนี้ปริมาณของจิ้งหรีดผงและโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ระดับต่ำสุดเป็นปริมาณที่สามารถกล่าวอ้างทางโภชนาการของคุกกี้ได้ว่าเป็นแหล่งของโปรตีน เมื่อผสมส่วนผสมแล้ว มีกรรมวิธีการผลิตคุกกี้ตามวิธีการผลิตข้อ 2.2 จากนั้นนำคุกกี้มาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพโดยการวัดค่าความแข็ง และประเมินคุณภาพทางประสาทด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ

2.4 การศึกษาผลของแซนแทนกัมต่อคุณภาพคุกกี้แป้งข้าวเจ้า

เลือกสูตรที่เหมาะสมที่ได้จากผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบสูงและมีปริมาณโปรตีนสูงจากผลการทดลองข้อที่ 2.3 มาศึกษาผลของแซนแทนกัมต่อคุณภาพคุกกี้ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ศึกษาปริมาณแซนแทนกัม 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0, 0.14, 0.28 และ 0.42 เตรียมสารละลายแซนแทนกัม โดยนำแซนแทนกัมละลายในน้ำที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 30 กรัม พักไว้ให้เย็น มีกรรมวิธีผลิตตามข้อ 2.2 โดยเติมสารละลายแซนแทนกัมสลับกับส่วนผสมแป้ง และวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพโดยการวัดค่าสี ความแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) วิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ และนำคุกกี้สูตรที่เหมาะสมมาวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

2.5 การวิเคราะห์คุณภาพ

2.5.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

2.5.1.1 วัดค่าสีในระบบ CIE L^* a^* b^* ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ Minolta รุ่น CM 3500D ประเทศญี่ปุ่น โดยตั้งค่าสภาวะในการวัดของเครื่องให้บันทึกค่า L^* a^* และ b^* โดยค่าความสว่าง L^* มีค่า 0-100 โดย 0 หมายถึงวัตถุสีดำ 100 หมายถึง

วัตถุสีขาว a^* (+ หมายถึงวัตถุมีสีแดง, - หมายถึงวัตถุมีสีเขียว) และ b^* (+ หมายถึงวัตถุมีสีเหลือง, - หมายถึงวัตถุมีสีน้ำเงิน) ทำการวัดค่า 3 ซ้ำ

2.5.1.2 วัดค่าความแข็งโดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) ยี่ห้อ Stable Micro Systems รุ่น TA.XT plus ประเทศอังกฤษ หัววัดชนิด Three-point Bending ใช้ความเร็วในการทดสอบที่ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยกดขึ้นคุกกี้ลงร้อยละ 50 ของความสูงคุกกี้ ทำการวัดค่า 10 ซ้ำ

2.5.1.3 วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยใช้เวอร์เนีย (Vernier Caliper) วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของคุกกี้ 3 ตำแหน่งต่อคุกกี้ 1 ชิ้น ทำการวัดค่า 3 ซ้ำ

2.5.1.4 วัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) ด้วยเครื่องวัดค่า a_w ยี่ห้อ Decagon Aqua Lab รุ่น 3TE ประเทศสหรัฐอเมริกา ทำการวัดค่า 3 ซ้ำ

2.5.2 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

วิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณตามวิธีการของ AOAC [17] ได้แก่ ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใยหยาบ และคาร์โบไฮเดรต

2.5.3 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ประเมินด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ (9-Point Hedonic Scale) ในคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ กลิ่นโดยรวม รสหวาน กลิ่นรสโดยรวม ความแข็ง และความชอบโดยรวม ประเมินโดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน

2.6 การประเมินผลทางสถิติ

นำข้อมูลคุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัส มาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และหากสิ่งทดลองมีความแตกต่าง จะทำการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS® เวอร์ชัน 12

3. ผลและวิจารณ์การทดลอง

3.1 คุณภาพวัตถุดิบ

จิ้งหรีดผง มีลักษณะเป็นผงหยาบสีน้ำตาลดำ มีกลิ่นรสเฉพาะตัว โดยอาหารที่ใช้เลี้ยงเป็นปัจจัยที่สำคัญ ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อกรดไขมันซึ่งเป็นองค์ประกอบของแมลง [19] ซึ่งกลิ่นรสของจิ้งหรีดนั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณลิพิดที่เป็นองค์ประกอบในจิ้งหรีด [20] จิ้งหรีดผงมีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เท่ากับ 45.24, 6.03 และ 20.15 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณพบว่า มีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ เถ้า และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 3.27, 60.80, 21.24, 7.10, 3.77 และ 3.82 โดยน้ำหนักเปียกตามลำดับ สำหรับโปรตีนถั่วเหลืองสกัด มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองครีม มีกลิ่นเฉพาะของถั่ว มีค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง และค่าความเป็นสีเหลือง เท่ากับ 87.07, 1.03 และ 1.89 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ พบว่าโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ เถ้า และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 6.30, 84.33, 3.75, 0.17, 4.69 และ 0.76 โดยน้ำหนักเปียกตามลำดับ

3.2 การศึกษาปริมาณแป้งข้าวเจ้าต่อคุณภาพของคุกกี้

การศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณแป้งข้าวเจ้าเพิ่มขึ้นทำให้คุกกี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง และมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ที่อัตราส่วนแป้งข้าวเจ้าต่อส่วนผสมชนิดอื่นเท่ากับ 50:100 ได้คุกกี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุด (3.63 เซนติเมตร) และมีค่าความแข็งมากที่สุด (9.75 นิวตัน) (ตารางที่ 1) ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเจ้าในสูตร ทำให้แป้งดูดน้ำมากขึ้น ส่งผลให้เบทเทอร์มีความหนืดมากขึ้น และมีการแผ่กระจายตัวลดลง จึงทำให้คุกกี้ที่ควบคุม

น้ำหนักแต่ละชิ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง นอกจากนี้เมื่อแป้งข้าวเจ้าซึ่งทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของคุกกี้มีปริมาณสูงขึ้น ยังส่งผลให้คุกกี้มีความแข็งมากขึ้นอีกด้วย

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยวิธีการให้คะแนนความชอบต่อคุณลักษณะต่าง ๆ ของคุกกี้ที่มีแป้งข้าวเจ้าเป็นส่วนผสมในระดับต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเจ้าทำให้คุกกี้มีคะแนนความชอบในคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ กลิ่นรส เนย และรสหวานไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่มีผลทำให้คะแนนความชอบด้านกลิ่นโดยรวม ความแข็ง และความชอบโดยรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 2) ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเจ้าในสูตร นอกจากจะทำให้คุกกี้ที่ได้มีกลิ่นแป้งข้าวเจ้ามากขึ้นแล้ว ยังทำให้มีความแข็งมากขึ้นอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งทางกายภาพที่วัดได้ ส่งผลให้ความชอบรวมลดลง ดังนั้นจึงเลือกสูตรที่มีอัตราส่วนของแป้งข้าวเจ้าต่อส่วนผสมชนิดอื่นเท่ากับ 38:100 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีคะแนนความชอบโดยรวมอยู่ในระดับชอบปานกลาง (7.6) ไปศึกษาผลของการเติมแหล่งโปรตีนลงในคุกกี้ต่อไป

3.3 ผลของปริมาณจิ้งหรีดผงและโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อคุณภาพของคุกกี้แป้งข้าวเจ้า

การวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าจิ้งหรีดผงที่เติมระดับร้อยละ 25 และ 35 มีอิทธิพลต่อค่า L^* , b^* , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความแข็งของคุกกี้ โปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีอิทธิพลต่อค่า b^* , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความแข็งคุกกี้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การวิเคราะห์คุณภาพด้านกายภาพของคุกกี้พบว่ามีความสว่างปานกลาง โดยมีความอยู่ในช่วง 49.32–53.50 เมื่อพิจารณาที่แต่ละระดับของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด พบว่าการเพิ่มปริมาณจิ้งหรีดผงส่งผลให้

คุกกี้มีค่า L^* และ b^* ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากจิ้งหรีดผงมีสีน้ำตาลดำ จึงทำให้คุกกี้มีความสว่างและความเป็นสีเหลืองลดลง และพบว่าเมื่อปริมาณจิ้งหรีดผงเพิ่มขึ้นที่แต่ละระดับของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด มีผลให้ความแข็งของคุกกี้มีค่าลดลง แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคุกกี้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุมาจากปริมาณไขมันในจิ้งหรีดผง ซึ่งมีส่วนประกอบอยู่ถึงร้อยละ 21.24 และที่แต่ละระดับของจิ้งหรีดผงเมื่อปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคุกกี้มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 3) เนื่องจากโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีความสามารถในการอุ้มน้ำ [21] จึงทำให้แบทเทอร์ของคุกกี้มีความหนืดมาก การแผ่กระจายตัวจึงลดลง เมื่อนำมาอบทำให้ได้คุกกี้ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง นอกจากนี้พบว่าสมบัติการอุ้มน้ำของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดทำให้คุกกี้มีเนื้อสัมผัสนุ่มและแน่น ส่งผลให้การแตกหักยากขึ้น และทำให้ค่าความแข็งที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่าจิ้งหรีดผงมีอิทธิพลต่อคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ กลิ่นโดยรวม และความชอบโดยรวมของคุกกี้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยพบว่าเมื่อปริมาณจิ้งหรีดผงเพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าคะแนนความชอบด้านคุณลักษณะดังกล่าวมีแนวโน้มลดลง แต่ไม่มีผลต่อคะแนนความชอบด้านรสหวาน กลิ่นรสโดยรวม และความแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p > 0.05$) (ตารางที่ 4) และพบอิทธิพลของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ และความชอบโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ที่แต่ละระดับของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด เมื่อปริมาณจิ้งหรีดผงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความชอบโดยรวมลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากกลิ่นรสเฉพาะของจิ้งหรีด และความรู้สึกสากกระหว่างกลืนผลิตภัณฑ์ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาถึงการเพิ่มปริมาณจิ้งหรีดผงในขนมปัง ส่งผลให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ลดลง [7] อย่างไรก็ตาม ขนาดของจิ้งหรีดผงมีผลต่อเนื้อสัมผัสของคุกกี้ ดังนั้น การลดขนาดของจิ้งหรีดผงให้เล็กกว่า 60 เมช จะเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดความรู้สึกสากกระหว่างกลืนผลิตภัณฑ์ได้

สำหรับสูตรที่มีจิ้งหรีดผงร้อยละ 35 และโปรตีนถั่วเหลืองสกัดร้อยละ 25 และสูตรที่มีจิ้งหรีดผงร้อยละ 35 และโปรตีนถั่วเหลืองสกัดร้อยละ 35 ของแป้งข้าวเจ้า พบว่าแม้ผู้ทดสอบจะให้คะแนนความชอบโดยรวมอยู่ในระดับชอบปานกลาง แต่มีข้อเสนอแนะว่าผลิตภัณฑ์มีกลิ่นอับของแมลง และมีเนื้อสัมผัสที่ระคายเคืองระหว่างกลืน จึงอาจจะไม่ใช่เป็นที่ยอมรับหากบริโภคในปริมาณมาก ดังนั้นจึงคัดเลือกสูตรที่มีปริมาณจิ้งหรีดผงหรือโปรตีนถั่วเหลืองสกัดสูง ร่วมกับคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุดเพื่อนำไปศึกษาผลของแซนแทนกัมต่อคุณภาพคุกกี้ ได้สูตรที่มีปริมาณจิ้งหรีดผงร้อยละ 25 ของแป้งผสมและโปรตีนถั่วเหลืองสกัดร้อยละ 35 ของแป้งข้าวเจ้า

ตารางที่ 1 ค่าความแข็งและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคุกกี้ที่มีอัตราส่วนแป้งข้าวเจ้าต่อส่วนผสมอื่นต่างกัน

อัตราส่วนแป้งข้าวเจ้าต่อส่วนผสมอื่น (โดยน้ำหนัก)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม.)	ความแข็ง (นิวตัน)
38:100	3.93 ± 0.07^a	7.38 ± 1.26^b
44:100	3.78 ± 0.11^b	9.05 ± 1.16^a
50:100	3.63 ± 0.07^c	9.75 ± 1.27^a

หมายเหตุ ^{a-c}ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรแตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 2 คะแนนความชอบที่มีต่อคุณลักษณะต่างๆของคุกกี้ที่มีอัตราส่วนแป้งข้าวเจ้าต่อส่วนผสมอื่นต่างกัน

อัตราส่วนแป้งข้าวเจ้าต่อส่วนผสมอื่น	ลักษณะปรากฏ ^{ns}	กลิ่นโดยรวม	กลิ่นรสเนย ^{ns}	รสหวาน ^{ns}	ความแข็ง	ความชอบโดยรวม
38:100	6.9 ± 1.4	7.5 ± 0.8 ^a	7.1 ± 1.1	7.3 ± 0.8	7.3 ± 1.2 ^a	7.6 ± 0.8 ^a
44:100	7.2 ± 1.3	7.6 ± 0.9 ^a	7.1 ± 0.9	7.3 ± 0.9	7.2 ± 1.4 ^a	7.1 ± 1.0 ^b
50:100	7.3 ± 1.1	7.3 ± 1.0 ^b	6.9 ± 1.2	7.1 ± 0.9	6.8 ± 1.2 ^b	7.2 ± 0.8 ^b

หมายเหตุ ^{a-b} ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรแตกต่างกันในแนวนอนเดียวกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

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

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของคุกกี้แป้งข้าวเจ้าที่มีจิ้งหรีดผงและโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในระดับต่าง ๆ

จิ้งหรีดผง (ร้อยละ)	โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (ร้อยละ)	ค่าสี			เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	ความแข็ง (นิวตัน)
		L*	a* ^{ns}	b*		
25	0	53.50 ± 0.49 ^a	8.86 ± 0.21	29.23 ± 0.33 ^a	3.86 ± 0.05 ^b	6.52 ± 0.76 ^b
	25	51.36 ± 0.52 ^{bc}	8.93 ± 0.40	27.97 ± 0.91 ^b	3.13 ± 0.10 ^d	8.02 ± 0.59 ^a
	35	52.91 ± 1.18 ^{ab}	8.93 ± 0.65	27.91 ± 1.30 ^b	2.97 ± 0.06 ^d	8.01 ± 0.54 ^a
35	0	49.90 ± 0.63 ^{cd}	9.10 ± 0.62	26.05 ± 0.81 ^c	4.26 ± 0.21 ^a	4.95 ± 0.58 ^d
	25	50.27 ± 0.76 ^{cd}	9.25 ± 0.43	25.56 ± 0.17 ^c	3.33 ± 0.06 ^c	5.87 ± 0.54 ^c
	35	49.32 ± 1.98 ^d	8.76 ± 0.21	24.98 ± 0.70 ^c	3.04 ± 0.13 ^d	7.56 ± 0.78 ^a

หมายเหตุ ^{a-d} ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรแตกต่างกันในแนวดิ่งเดียวกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4 คะแนนความชอบที่มีต่อคุณลักษณะต่าง ๆ ของคุกกี้แป้งข้าวเจ้าที่มีจิ้งหรีดผงและโปรตีนถั่วเหลืองสกัดในระดับต่าง ๆ

จิ้งหรีดผง (ร้อยละ)	โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (ร้อยละ)	ลักษณะปรากฏ	กลิ่นโดยรวม	รสหวาน ^{ns}	กลิ่นรสโดยรวม ^{ns}	ความแข็ง ^{ns}	ความชอบโดยรวม
25	0	7.1 ± 1.7 ^a	7.8 ± 1.1 ^a	7.4 ± 1.3	7.2 ± 1.2	7.4 ± 1.5	7.6 ± 1.2 ^a
	25	7.0 ± 1.3 ^a	7.5 ± 1.2 ^{ab}	7.0 ± 1.4	7.6 ± 1.0	7.3 ± 1.7	7.8 ± 0.9 ^a
	35	6.7 ± 1.4 ^b	7.4 ± 1.5 ^{ab}	7.3 ± 1.3	7.3 ± 1.3	7.0 ± 1.6	7.7 ± 0.8 ^a
35	0	6.5 ± 2.0 ^{abc}	7.4 ± 1.2 ^{ab}	7.2 ± 1.4	7.5 ± 1.0	7.3 ± 1.7	7.6 ± 1.3 ^a
	25	6.0 ± 1.5 ^c	6.9 ± 1.3 ^b	7.0 ± 1.4	6.9 ± 1.5	7.3 ± 1.5	7.0 ± 1.3 ^b
	35	6.1 ± 1.3 ^c	7.0 ± 1.2 ^b	6.9 ± 1.5	7.0 ± 1.1	7.1 ± 1.6	6.9 ± 1.2 ^b

หมายเหตุ ^{a-c} ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรแตกต่างกันในแนวดิ่งเดียวกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

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

3.4 ผลของแขนแทนกัมต่อคุณภาพคูกี้แบ่งข้าวเจ้า

นำสูตรที่ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงจากผลการทดลองข้อ 3.3 มาศึกษาผลของแขนแทนกัมต่อคุณภาพคูกี้ ผลการการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปริมาณแขนแทนกัมมีอิทธิพลต่อค่า L^* , a^* , b^* , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, ความแข็ง, a_w และความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คูกี้แต่ละสูตรมีสีน้ำตาล และมีค่าความสว่างระดับปานกลางอยู่ในช่วง 48.21–51.44 ค่า a^* อยู่ในช่วง 9.92–11.90 และค่า b^* อยู่ในช่วง 24.16–27.76 (ตารางที่ 5) เมื่อปริมาณแขนแทนกัมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคูกี้มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 6) การเพิ่มปริมาณแขนแทนกัมทำให้คูกี้มีการเกาะตัวกันมากขึ้น ต้องใช้แรงมากเพื่อทำให้คูกี้แตก จึงส่งผลให้มีค่าความแข็งมากขึ้น แขนแทนกัมเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่มีผลต่อ

เนื้อสัมผัสของคูกี้ โดยหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของไฮโดรคอลลอยด์จะจับกับน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้ค่าความสามารถในการจับกับน้ำ (Water Holding Capacity) ของแป้งในส่วนผสมมีค่ามากขึ้น [22] และสอดคล้องกับการศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่างชนิดกัน ได้แก่ กัมอาคาเซีย กัวกัม แขนแทนกัม คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส ต่อคุณภาพคูกี้ พบว่าการเพิ่มไฮโดรคอลลอยด์ลงไป แป้งข้าวฟ่างและแป้งสาลีทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของแป้งเพิ่มขึ้น และพบว่าคูกี้ที่ใส่แขนแทนกัมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุด [23] นอกจากนี้แขนแทนกัมยังมีผลทำให้คูกี้หลังอบมีปริมาณความชื้น และค่า a_w สูงขึ้น (ตารางที่ 6) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาปฏิกิริยาจากแป้งข้าวผสมแป้งถั่วลูกไก่ปราศจากกลูเตน ที่พบว่าค่าความชื้น และค่า a_w เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแขนแทนกัม [16]

ตารางที่ 5 ค่าสีของคูกี้แบ่งข้าวเจ้าที่มีปริมาณแขนแทนกัมต่างกัน

แขนแทนกัม (ร้อยละ)	ค่าสี		
	L^*	a^*	b^*
0	51.44 ± 0.35 ^a	9.92 ± 0.30 ^c	27.76 ± 0.37 ^a
0.14	50.13 ± 0.76 ^b	12.23 ± 0.22 ^a	24.16 ± 1.01 ^d
0.28	50.06 ± 0.40 ^b	11.90 ± 0.89 ^a	25.26 ± 0.49 ^c
0.42	51.07 ± 0.54 ^a	10.91 ± 0.54 ^b	27.08 ± 0.66 ^b

หมายเหตุ ^{a-e} ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรแตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 6 ค่าคุณภาพทางกายภาพและเคมีของคูกี้แบ่งข้าวเจ้าที่มีปริมาณแขนแทนกัมต่างกัน

แขนแทนกัม (ร้อยละ)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	ความแข็ง (นิวตัน)	a_w	ความชื้น (ร้อยละ)
0	3.53 ± 0.05 ^a	5.95 ± 0.46 ^d	0.31 ± 0.01 ^d	2.13 ± 0.04 ^c
0.14	3.34 ± 0.04 ^b	11.70 ± 2.44 ^c	0.42 ± 0.00 ^c	2.15 ± 0.04 ^c
0.28	3.20 ± 0.03 ^c	18.83 ± 2.36 ^b	0.45 ± 0.00 ^b	3.47 ± 0.02 ^b
0.42	3.22 ± 0.03 ^c	21.91 ± 2.57 ^a	0.51 ± 0.00 ^a	4.33 ± 0.02 ^a

หมายเหตุ ^{a-c} ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรแตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่าปริมาณแซนแทนกัมมีอิทธิพลต่อคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ ความแข็ง และความชอบโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$ โดยปริมาณแซนแทนกัมส่งผลให้ค่าคะแนนความชอบคุณลักษณะดังกล่าวลดลง (ตารางที่ 7) เนื่องจากปริมาณแซนแทนกัมที่เพิ่มขึ้น ทำให้คุกกี้มีขนาดเล็กลง ความหนาเพิ่มขึ้น เนื้อสัมผัสของคุกกี้มีความนุ่มและแน่นมากขึ้น จึงส่งผลให้คะแนนความชอบด้านความแข็ง และความชอบโดยรวมลดลง จากการศึกษาพบว่าผู้ทดสอบชอบคุกกี้ที่มีการเกาะตัวกันดี มีเนื้อสัมผัสไม่นุ่มและแน่นเกินไป แสดงได้จากค่าคะแนนความชอบด้านความแข็งของสูตรที่ไม่ได้ใส่แซนแทนกัมมีคะแนนมากที่สุดเท่ากับ 7.2 ซึ่งมีค่าความแข็งที่วัดได้น้อยที่สุดเท่ากับ 5.95 นิวตัน (ตารางที่ 6) และพบว่าสูตรนี้ได้รับคะแนนความชอบทุกคุณลักษณะสูงสุดอยู่ในระดับชอบปานกลาง โดยได้รับคะแนนความชอบ

โดยรวมเท่ากับ 7.2 ดังนั้นจึงได้สูตรคุกกี้ที่เหมาะสมประกอบด้วยจึงหรีดผงร้อยละ 25 โปรตีนถั่วเหลืองสกัด ร้อยละ 35 โดยไม่ใส่แซนแทนกัม จะเห็นได้ว่าในการศึกษานี้ไม่จำเป็นต้องใส่แซนแทนกัมในสูตรคุกกี้แบ่งข้าวเจ้าที่มีโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเป็นส่วนผสม เนื่องจากสมบัติด้านความสามารถในการอุ้มน้ำที่ดีของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดนั้นสามารถช่วยด้านการเกาะตัวกันและเนื้อสัมผัสของคุกกี้ได้อย่างเหมาะสม และสูตรที่ได้นี้ยังมีปริมาณโปรตีนสูง จากการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนพบว่าคุกกี้มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 26.14 คิดเป็น 7.84 กรัม ต่อคุกกี้ 30 กรัม หรือหนึ่งหน่วยบริโภค ดังนั้นคุกกี้สูตรนี้สามารถกล่าวอ้างทางโภชนาการได้ว่า “เป็นแหล่งของโปรตีน” เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 10-19 ของปริมาณโปรตีน (50 กรัม) ที่แนะนำให้บริโภคต่อวันสำหรับคนไทย หรือคิดเป็น 5-9.5 กรัม ต่ออาหารหนึ่งหน่วยบริโภค [24]

ตารางที่ 7 คะแนนความชอบที่มีต่อคุณลักษณะต่าง ๆ ของคุกกี้แบ่งข้าวเจ้าที่มีปริมาณแซนแทนกัมต่างกัน

แซนแทนกัม (ร้อยละ)	ลักษณะปรากฏ	กลิ่นโดยรวม ^{ns}	รสหวาน ^{ns}	กลิ่นรสโดยรวม ^{ns}	ความแข็ง	ความชอบ โดยรวม
0	7.3±1.2 ^a	7.2±1.1	7.3±1.2	6.8±1.7	7.2±0.9 ^a	7.2±1.0 ^a
0.14	5.5±1.8 ^b	6.8±0.7	6.8±1.3	6.4±1.4	6.3±1.3 ^b	6.4±1.1 ^b
0.28	6.4±1.6 ^b	6.8±0.9	7.0±1.0	6.9±1.0	6.3±1.2 ^b	6.5±1.0 ^b
0.42	6.3±1.7 ^b	6.8±1.0	7.1±0.9	6.8±1.4	6.4±1.9 ^b	6.5±1.5 ^b

หมายเหตุ ^{a-c} ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรแตกต่างกันในแนวดังเดียวกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

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

4. สรุป

ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณจึงหรีดผงทำให้ค่าความแข็งของคุกกี้ลดลง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคุกกี้มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองสกัดส่งผลให้ค่าความแข็งของคุกกี้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง และแซนแทนกัมที่เติมลงไปส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคุกกี้มีค่า

ลดลง ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี และค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น โดยคุกกี้จากแบ่งข้าวเจ้ามีปริมาณจึงหรีดผงและโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เหมาะสมเท่ากับ ร้อยละ 25 และ 35 ของแบ่งข้าวเจ้าตามลำดับ และไม่ต้องใส่แซนแทนกัม ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณโปรตีนมากถึงร้อยละ 26.14 จึงจัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแหล่งของโปรตีนทางเลือกให้แก่ผู้บริโภค

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Duangruthai, J. Wipawan and W. Rungtiwa, *Bread and gluten-free bakery*, 1st ed. Bangkok: Petchprakai Publishers, 2017.
- [2] N. Nammakuna, S. Suwansri, P. Thanasukan and P. Ratanatriwong “Effects of hydrocolloids on quality of rice crackers made with mixed-flour blend,” *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, vol. 2, no. 4, pp. 780–787, 2009.
- [3] A. Torbica, M. Hadnađev and T. D. Hadnađev, “Rice and buckwheat flour characterisation and its relation to cookie quality,” *Food Research International*, vol. 48, no. 1, pp. 277–283, 2012.
- [4] World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations and United Nations University, *Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition*, 1st ed. Geneva: WHO Press, pp. 79–89, 2007.
- [5] L. Yi, C. M. M. Lakemond, L. M. C. Sagis, V. Einner-Schadler, A. van Huis and M. A. J. S. van Boekel, “Extraction and characterisation of protein fractions from five insect species,” *Food Chemistry*, vol. 141, pp. 3341–3348, 2013.
- [6] Global New Products Database. (2018, November 30). Cricket [Online]. Available: <http://www.gnpd.com/database/cricket>.
- [7] A. Osimani, V. Milanovic, F. Cardinali, A. Roncolini, C. Garofalo, F. Clementi, M. Pasquini, M. Mozzon, R. Foligni, N. Raffaelli, F. Zamporlini and L. Aquilanti, “Bread enriched with cricket powder (*Acheta domestica*): A technological microbiological and nutritional evaluation,” *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 48, pp. 150–163, 2018.
- [8] P. Pauter, M. Rózsanska, P. Wiza, S. Dworczak, N. Grobelna, P. Sarbak and P. L. Kowalczewski, “Effects of the replacement of wheat flour with cricket powder on the characteristics of muffins,” *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, vol. 17, no. 3, pp. 227–233, 2018.
- [9] C. da Rosa Machado and R. C. S. Thys, “Cricket powder (*Gryllus assimilis*) as a new alternative protein source for gluten-free breads,” *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 56, pp. 102180, 2019.
- [10] P. Singh, R. Kumar, S. N. Sabapathy and A. S. Bawa, “Functional and edible uses of soy protein products,” *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 7, pp. 14–28, 2008.

- [11] M. Sugano, *Soy in Health and Disease Prevention*, 1st ed. New York: CRC Press Publishers, 2006.
- [12] A. Nussinovitch, *Hydrocolloid Applications: Gum technology in food and the other industries*, 1st ed. London: Blackie Academic & Professional Publishers, 1997.
- [13] C. M. Rosell and R. Garzon, *Food Microstructure and Its Relationship with Quality and Stability*, 1st ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2018.
- [14] L. D. Preichardt, C. T. Vendruscolo, M. A. Gularte and A. S. Moreira, "The role of xanthan gum in the quality of gluten free cakes: improved bakery products for coeliac patients," *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 46, pp. 2591–2597, 2011.
- [15] C. R. Encina-Zelada, V. Cadavez, F. Monteiro, J. A. Teixeira and U. Gonzales-Barron, "Combined effect of xanthan gum and water content on physicochemical and textural properties of gluten-free batter and bread," *Food Research International*, vol. 111, pp. 544–555, 2018.
- [16] S. Benkadri, A. Salvador, M. N. Zidoune and T. Sanz, "Gluten-free biscuits based on composite rice-chickpea flour and xanthan gum," *Food Science and Technology International*, vol. 24, no. 7, pp. 607–616, 2018.
- [17] Association of Official Analytical Chemists, *Official Methods of Analysis*, 19th ed. Maryland: AOAC International Publishers, 2012.
- [18] A. G. Roberts, *Gluten-free baking classics*, 2nd ed. Chicago: Surrey Books Publishers, 2008.
- [19] S. G. F. Bukkens, "Insect in the human diet: nutrition aspects," in *Ecological Implications of Minilivestock: Potential of Insect, Rodents, Frogs and Snails*, M. G. Paoletti, ed., New Hampshire: Science Publishers, 2005, pp. 545–577.
- [20] J. C. Ribeiro, R. C. Lima, M. R. G. Maia, A. A. Almeida, A. J. M. Fonseca, A. R. J. Cabrita and L. M. Cunha, "Impact of defatting freeze-dried edible crickets (*Acheta domesticus* and *Gryllobates sigillatus*) on the nutritive value, overall liking and sensory profile of cereal bars," *LWT- Food Science and Technology*, vol. 113, pp. 1–7, 2019.
- [21] S. A. O. Adeyeye, A. O. Adebayo-Oyetoro and S. A. Omoniyi, "Quality and sensory properties of maize flour cookies enriched with soy protein isolate," *Cogent Food and Agriculture*, vol. 3, pp. 1–11, 2017.
- [22] C. M. Rosell, J. A. Rojas and C. B. de Barber, "Influence of hydrocolloids on dough rheology and bread quality," *Food Hydrocolloids*, vol. 15, pp. 75–81, 2001.
- [23] R. Devisetti, R. Ravi and S. Bhattacharya, "Effect of Hydrocolloids on Quality of Proso

Millet Cookie,” *Food and Bioprocess Technology*, vol. 11, pp. 2298–2308, 2015.

[24] *Nutrition labeling*, Notification of the Ministry of Public Health 182, 1998.

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

การผลิตไก่อบโองโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกล

วรรณวิมล พุ่มโพธิ์¹ วิษณุวัฒน์ คงงาม² สุรียา หล้าบัววงศ์² ภาณุวัฒน์ อาวาส² และ
ภูมิใจ สอาดโณม^{2*}

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

^{1,2} 41/1 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

รับบทความ 17 เมษายน 2563 แก้ไขบทความ 11 กรกฎาคม 2563 ตอบรับบทความ 15 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเตาอบโองสำหรับการผลิตไก่อบโองโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกล และหาปริมาณไฟฟ้าและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการผลิตไก่อบโอง รวมทั้งหาสมบัติทางกายภาพด้านสี ความนุ่ม ปริมาณผลผลิต และความสามารถในการอุ้มน้ำของไก่อบโอง โดยใช้รังสีอินฟราเรดไกลที่ 1,000 1,200 และ 1,400 วัตต์ อบไก่อบโองที่มีมวลเริ่มต้นประมาณ 1,650 กรัม จนไก่อบโองมีมวลสุดท้ายต่ำกว่า 1,220 กรัม จากผลการทดลอง พบว่า การผลิตไก่อบโองที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลสูงใช้ปริมาณไฟฟ้าและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าการผลิตไก่อบโองที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ส่วนเนื้ออกไก่อบโองที่รังสีอินฟราเรดไกล 1,400 วัตต์ มีความสว่าง (ค่า L) มากกว่า แต่มีสีแดง (ค่า a) และสีเหลือง (ค่า b) น้อยกว่าส่วนเนื้ออกไก่อบโองที่รังสีอินฟราเรดไกล 1,000 วัตต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม ความสว่าง (ค่า L) สีแดง (ค่า a) และสีเหลือง (ค่า b) ของส่วนเนื้ออกไก่อบโองที่รังสีอินฟราเรดไกล 1,200 วัตต์ ไม่มีความแตกต่างกับค่าความสว่าง (ค่า L) สีแดง (ค่า a) และสีเหลือง (ค่า b) ของส่วนเนื้ออกไก่อบโองที่รังสีอินฟราเรดไกล 1,000 และ 1,400 วัตต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แรงเฉือนและความสามารถในการอุ้มน้ำของไก่อบโองมีค่ามากขึ้นเมื่อระดับรังสีอินฟราเรดไกลเพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่า ระดับรังสีอินฟราเรดไกล (1,000 1,200 และ 1,400 วัตต์) ไม่มีผลต่อปริมาณผลผลิตของไก่อบโองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

คำสำคัญ : ไก่อบ; เตาอบโอง; รังสีอินฟราเรดไกล

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

Production of Roasted Chicken in Jar Using Heat Transfers from Far-infrared Ray

Wanvimon Pumpho¹ Visanuwat Khon-ngam² Suriya Labuawong²

Panuwat Arwat² and Poomjai Sa-adchom^{2*}

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

² Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

^{1,2} 41/1 Paholayothin Road, Mai Ngam, Muang, Tak, 63000

Received 17 April 2020; Revised 11 July 2020; Accepted 15 September 2020

Abstract

The objectives of this research were to construct a jar oven for the production of roasted chicken using heat from far-infrared radiation and to find the amount of electricity and specific energy consumption used in the production of roasted chicken. The physical properties in terms of color, softness, cooking yield, and water holding capacity of roasted chicken were also investigated. By using far-infrared radiation at electrical power levels of 1,000, 1,200 and 1,400 watts to roast marinated chicken, which had an initial mass of about 1,650 grams until the mass of the roasted chicken had a lower than 1,220 grams. From the experimental results, it was found that the production of roasted chicken at far-infrared radiation with a high electrical power level requires significantly less electricity and specific energy consumption than that with low electrical power level ($P \leq 0.05$). Roasted chicken breasts with far-infrared radiation at 1,400 watts had significantly higher lightness (L value) but lower redness (a value) and yellowness (b value) than those of 1,000 watts ($P \leq 0.05$). However, lightness (L value), yellowness (b value), and redness (a value) of the roasted chicken breast with far-infrared radiation at 1,200 watts were not significantly different from those at 1,000 and 1,400 watts ($P > 0.05$). The shear force and water holding capacity of roasted chicken were significantly increased when the electrical power levels of far-infrared radiation increased ($P \leq 0.05$). Moreover, the electrical power levels of far-infrared radiation (1,000 1,200 and 1,400 watts) did not significantly affect the cooking yield of roasted chicken ($P > 0.05$).

Keywords : Roasted Chicken, Jar Oven, Far-infrared Ray

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

1. บทนำ

ปัจจุบันประชากรทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จึงมีความต้องการอาหารที่เพียงพอสำหรับการบริโภค เนื้อไก่เป็นอีกแหล่งอาหารที่คนไทยนิยมบริโภค โดยในปี พ.ศ. 2558-2562 การบริโภคเนื้อไก่ของคนไทยเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 6.34 ต่อปี (ในปี พ.ศ. 2562 มีปริมาณการบริโภคเนื้อไก่ 1.59 ล้านตัน) [1] เนื้อไก่อังมีคุณค่าทางโภชนาการสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นแหล่งของโปรตีนที่สำคัญ และมีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับเนื้อสัตว์อื่น ๆ เช่น เนื้อหมู เนื้อวัว และเนื้อแกะ เป็นต้น นอกจากนี้ เนื้อไก่สามารถนำมาประกอบอาหารหลายประเภทซึ่ง “ไก่ย่าง” เป็นอาหารอย่างหนึ่งที่คนไทยนิยมรับประทานเนื่องจากมีรสชาติอร่อย โดยการผลิตไก่ย่างมีความแตกต่างกันตามวิธีการอบย่างและลักษณะการปรุงรสของเครื่องเทศ เช่น ไก่ย่างสมุนไพร ไก่ย่างโบราณ และไก่อบโอ่ง เป็นต้น ขั้นตอนการผลิตไก่ย่างโดยทั่วไปมี 2 ขั้นตอน คือ 1) นำไก่สดมาล้างให้สะอาดแล้วหมักในเครื่องเทศ และ 2) ย่างไก่บนเตาถ่านที่มีตะแกรงเหล็กหรืออบย่างไก่ในโอ่ง ทั้งนี้ผู้ย่างต้องมีความชำนาญคอยควบคุมการย่างและหลีกเลี่ยงควันไฟเนื่องจากการหยดของน้ำและน้ำมันจากไก่ทำให้ไฟลุกได้ง่าย และอาจเกิดการไหม้เกรียมของอาหาร [2] โดยอาหารปิ้งย่างมีสารอันตรายต่าง ๆ ได้แก่ สารไพโรไลเซต (Pyrolysates) เป็นสารที่พบมากในส่วนที่ไหม้เกรียมของเนื้อสัตว์ และสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon) เป็นสารเริ่มต้นของสารก่อมะเร็ง (Precarcinogen) ซึ่งเป็นสารชนิดเดียวกับสารในควันบุหรี่ ไอเสียเครื่องยนต์ และควันจากเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงของโรงงานอุตสาหกรรม [3]

สำหรับไก่อบโอ่งได้มีการพัฒนารูปแบบเตาอบและเทคนิคการอบอย่างต่อเนื่อง โดย T. Kanasri et al. [2] ได้พัฒนาเตาอบย่างไก่ประหยัดพลังงานโดยใช้เทคนิคการสะสมความร้อนจากเตาถ่าน ห้องอบย่างไก่ทำจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร มีขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 58 เซนติเมตร และความสูง 140 เซนติเมตร พื้นด้านล่างถังเจาะเป็นช่องรูสำหรับวางเตาถ่าน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 20 เซนติเมตร ในห้องอบย่างไก่มีราวเหล็กจำนวน 2 ชั้น ซึ่งสามารถแขวนไก่ได้ชั้นละ 4 ตัว และใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนผลการทดลอง พบว่า เตาอบย่างไก่อ้นี้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนร้อยละ 31 และสามารถอบย่างไก่ในช่วงอุณหภูมิ 270-320 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ S. Thongdaeng and B. Lamlerd [4] ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาอบไก่ 3 รูปแบบ คือ เตาอบแบบไม่หุ้มฉนวน เตาอบแบบหุ้มฉนวน และเตาอบแบบดัดแปลงจากโอ่งน้ำ โดยเตาอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร และความสูง 100 เซนติเมตร ใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน ไก่ที่ใช้อบมีมวลเฉลี่ย 1 กิโลกรัม อบไก่ครั้งละ 5 ตัว และใช้ภาพถ่ายทางความร้อนวัดค่าอุณหภูมิที่ผิวเตาอบ ผลการทดลองพบว่า เตาอบแบบหุ้มฉนวนมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดเมื่อเทียบกับเตาอบแบบอื่น ๆ โดยเตาอบแบบหุ้มฉนวนใช้เวลาอบไก่ 34 นาที และใช้ถ่านทั้งหมด 300 กรัม ภาพถ่ายทางความร้อนแสดงให้เห็นว่า เตาอบแบบหุ้มฉนวนมีอุณหภูมิที่ผิวเตาอบต่ำกว่าเตาอบแบบไม่หุ้มฉนวนและแบบดัดแปลงจากโอ่งน้ำ ทำให้เตาอบแบบหุ้มฉนวนเกิดการสูญเสียความร้อนน้อย ส่งผลให้ใช้เวลาอบย่างสั้น และมีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ต่ำ

อย่างไรก็ตาม การผลิตไก่อบโอ่งดังกล่าวข้างต้นยังมีข้อจำกัดในส่วนของการอบย่างที่มีความสุกไม่สม่ำเสมอ และผู้ย่างต้องคอยควบคุมการอบย่างไก่ รวมทั้งราคาเชื้อเพลิงประเภทถ่านไม้มีแนวโน้มสูงขึ้น ดังนั้นคณะผู้วิจัยเห็นว่า การผลิตไก่อบโอ่งควรนำความร้อนจากหลอดรังสีอินฟราเรดไกลมาแทนความร้อนจากเตาถ่าน ทั้งนี้รังสีอินฟราเรดไกลสามารถแผ่รังสีทะลุเข้าไปในเนื้อผลิตภัณฑ์ ทำให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์สั่นแล้วเกิดความร้อน และเกิดการแพร่ออกไปยังผิวผลิตภัณฑ์

ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์นั้นแห้งลง [5], [6] รังสีอินฟราเรดไกลยังช่วยกระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอและทั่วถึงประหยัดพลังงาน ลดเวลาอบแห้ง และช่วยให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้มีคุณภาพดี [7], [8] นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยยังเห็นว่า การผลิตไก่อบโอ่งควรพัฒนาให้ไก่สามารถหมุนได้ในขณะอบโอ่งเพื่อทำให้ไก่มีความสุกอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งตัว

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเตาอบโอ่งสำหรับการผลิตไก่อบโอ่งโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกล และหาปริมาณไฟฟ้าและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการผลิตไก่อบโอ่ง รวมทั้งหาสมบัติทางกายภาพด้านสี ความนุ่ม ปริมาณผลผลิต และความสามารถในการอุ้มน้ำของไก่อบโอ่ง ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ นี้มีประโยชน์ต่อการผลิตไก่อบโอ่งโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกลของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนการแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรและอาหาร ตำบลไม้งาม อำเภอมือง จังหวัดตาก

2. อุปกรณ์และวิธีการ

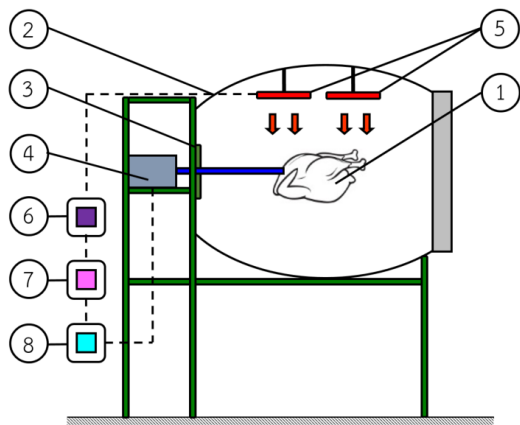
2.1 วัสดุุดิบ

2.1.1 ไก่สด (ไก่เนื้อพันธุ์ลูกผสม (Hybrid) หรือไก่กระเทย) ที่ไข่อบโอ่งมีมวลเฉลี่ยตัวละ 1,650 กรัม

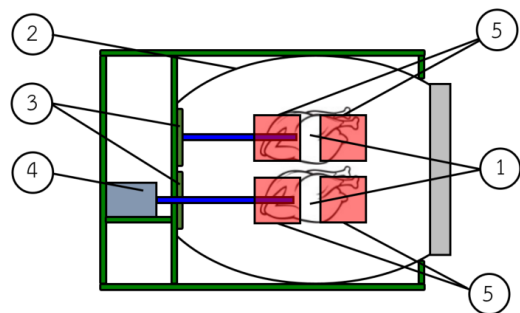
2.1.2 เครื่องปรุงรส ได้แก่ กระเทียม พริกไทย เกลือป่น รากผักชีหั่น ซีอิ๊วหวาน น้ำตาลทราย น้ำตาลปี๊บ และผงปรุงรสน้ำหอมรสดี

2.2 เตาอบโอ่งสำหรับการผลิตไก่อบโอ่งโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกล

ส่วนประกอบและลักษณะของเตาอบโอ่งสำหรับการผลิตไก่อบโอ่งโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกลแสดงดังรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ การทำงานของเตาอบโอ่งนี้เริ่มจากบรรจุไก่ที่หมักแล้วจำนวน 2 ตัว ๆ ละประมาณ 1,650 กรัม (หมายเลข 1) ในเตาอบโอ่งซึ่งทำจากดินเผาเคลือบ โดยส่วนปากและ



(ก) มุมมองด้านข้างเตาอบโอ่ง



(ข) มุมมองด้านบนเตาอบโอ่ง

- (1) ไก่ที่หมักแล้ว (2) เตาอบโอ่ง (3) เฟืองโซ่ (4) มอเตอร์
(5) หลอดรังสีอินฟราเรดไกล (6) เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า
(7) เครื่องปรับโวลต์ และ (8) มิเตอร์ไฟฟ้า

รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเตาอบโอ่งสำหรับการผลิตไก่อบโอ่งโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกล

กันโอ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 43 เซนติเมตร ส่วนตัวโอ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร และมีความสูง 58 เซนติเมตร (หมายเลข 2) จากนั้นไก่หมักถูกหมุนด้วยความเร็ว 10.5 รอบต่อนาที โดยขับเคลื่อนด้วยเฟืองโซ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.6 เซนติเมตร 45 ฟัน จำนวน 2 อัน (หมายเลข 3) และมอเตอร์ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น GM-SB ขนาด 200 วัตต์ (หมายเลข 4) ไก่หมักถูกให้ความร้อนโดยหลอดรังสีอินฟราเรดไกลยี่ห้อ Infrapara รุ่น AW-2-800 ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 4 หลอด (หมายเลข 5) ซึ่งติดตั้งที่ผนังด้านบนของเตา

อบโอ่ง โดยใช้ระดับกำลังไฟฟ้าของหลอดรังสีอินฟราเรดไกลที่ 1,000 1,200 และ 1,400 วัตต์ ซึ่งควบคุมด้วยเครื่องวัดกระแสไฟฟ้ายี่ห้อ Sanwa รุ่น DCM60L (หมายเลข 6) และเครื่องปรับโวลต์ยี่ห้อ Sangi ขนาด 8 A 220 V (หมายเลข 7)



(ก) ลักษณะภายนอกของเตาอบโอ่ง



(ข) ลักษณะภายในของเตาอบโอ่ง

รูปที่ 2 ลักษณะของเตาอบโอ่งสำหรับการผลิตโก๋หมัก
โดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกล

โดยรังสีอินฟราเรดไกลจะแผ่รังสีทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อผลิตภัณฑ์ ทำให้โมเลกุลของน้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์สั่นแล้วเกิดความร้อน และเมื่อถึงระยะความหนาผลิตภัณฑ์ที่รังสีอินฟราเรดไกลไม่สามารถทะลุ

ผ่านเข้าไปในเนื้อผลิตภัณฑ์ได้จะมีการนำความร้อนในเนื้อผลิตภัณฑ์ชั้นต่อไป ทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์เกิดการแพร่ออกไปยังผิวผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์นั้นแห้งลง เมื่อผ่านกระบวนการอบโอ่งแล้วอากาศร้อนจะไหลออกด้านข้างซ้ายของเตาอบโอ่งเพื่อระบายความชื้นออกจากเตาอบโอ่ง ทั้งนี้การไหลของอากาศร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมนี้เป็นการพาความร้อนแบบตามธรรมชาติ และปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตโก๋หมักโอ่งถูกวัดด้วยมิเตอร์ไฟฟ้ายี่ห้อ Dai-ichi รุ่น DD28 (หมายเลข 8)

2.3 วิธีการทดลอง

2.3.1 การหมักโก๋

นำโก๋สด (โก๋เนื้อพันธุ์ลูกผสม (Hybrid) หรือโก๋กระเทย) ที่มีมวลตัวละ 1.5-1.6 กิโลกรัม (อายุโก๋อยู่ระหว่าง 6-7 สัปดาห์ [9] จากตลาดสดเทศบาล อำเภอเมือง จังหวัดตาก มาหมักกับส่วนผสมปรุงรสตามอัตราส่วน (โก๋สด 1 ตัว (1.5-1.6 กิโลกรัม) กระเทียม 20 กลีบ รากผักชีหั่น 2 ช้อนโต๊ะ พริกไทย 10 เม็ด เกลือป่น 2 ช้อนชา ซีอิ๊วหวาน 1 ช้อนโต๊ะ น้ำตาลทราย 1 ช้อนโต๊ะ น้ำตาลปี๊บ 1 ช้อนโต๊ะ และผงปรุงรสน้ำส้ม 2 ช้อนโต๊ะ) โดยนำโก๋สดมาคลุกเคล้ากับพริกไทย กระเทียม และรากผักชีที่โขลกละเอียด แล้วใส่เกลือป่น ซีอิ๊วหวาน น้ำตาลปี๊บ และน้ำตาลทราย คลุกให้เข้ากัน หมักไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชั่วโมง 30 นาที แล้วเก็บไว้ในภาชนะเพื่อรออบในเตาอบโอ่ง

2.3.2 การอบโอ่งโก๋หมัก

นำโก๋ที่หมักแล้วมาเสียบที่แทงหมูนซึ่งอยู่ในเตาอบโอ่ง แล้วเปิดสวิตช์มอเตอร์เพื่อทำให้โก๋หมุนด้วยความเร็ว 10.5 รอบต่อนาที และเปิดสวิตช์หลอดรังสีอินฟราเรดไกลแล้วควบคุมกำลังไฟฟ้าของหลอดรังสีอินฟราเรดไกลที่ 1,000 1,200 และ 1,400 วัตต์ อบโอ่งจนโก๋สุกและค่อนข้างแห้ง (โดยใช้สายตาและการสัมผัสเนื้อโก๋ตรวจวิเคราะห์ตามลักษณะทั่วไปของโก๋อย่างมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน โก๋ย่าง มพช.1028/2548 [10])

ทั้งนี้จากการทดลองเบื้องต้น (Preliminary Experiment) เมื่อนำไก่หมักก่อนอบโอ่งมีมวลเฉลี่ยเท่ากับ $1,645.67 \pm 9.66$ กรัม มาอบโอ่งโดยใช้ความร้อนจากเตาถ่านจะได้ไก่อบโอ่งที่มีลักษณะทั่วไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ไก่ย่าง มพช.1028/2548 และมีมวลเฉลี่ยหลังอบโอ่งเท่ากับ $1,216.17 \pm 1.31$ กรัม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ในแต่ละการทดลอง (การผลิตไก่อบโอ่งหมูนโดยใช้ความร้อนจากถังฮีตอินฟราเรดไกลที่ 1,000 1,200 และ 1,400 วัตต์) ใช้ไก่หมักมีมวลเริ่มต้นประมาณ 1,650 กรัม อบจนไก่มีมวลสุดท้ายต่ำกว่า 1,220 กรัม (ในการอบช่วงสุดท้ายจะตรวจสอบมวลไก่อบโอ่งทุก ๆ 10 นาที ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลยี่ห้อ Sunford รุ่น KAH-5000S ความละเอียด 0.1 กรัม)

การผลิตไก่อบโอ่งหมูนโดยใช้ความร้อนจากถังฮีตอินฟราเรดไกลนี้ได้ทดลองอยู่ภายในอาคารปฏิบัติการ ชั้น 1 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยภายในเตาอบโอ่งก่อนการผลิตไก่อบโอ่งเท่ากับ 33 ± 2 องศาเซลเซียส

2.4 การหาปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไก่อบโอ่ง

ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไก่อบโอ่งถูกวัดด้วยมิเตอร์ไฟฟ้ายี่ห้อ Dai-ichi รุ่น DD28 ในหน่วย กิโลวัตต์-ชั่วโมง

2.5 การหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการผลิตไก่อบโอ่ง

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการผลิตไก่อบโอ่ง คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไก่อบโอ่งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากไก่อบโอ่ง โดยหาจากสมการที่ (1) [11]

$$SEC = \frac{E_{elec}}{M_w} \quad (1)$$

โดยที่

SEC = ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการผลิตไก่อบโอ่ง (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม)

E_{elec} = ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไก่อบโอ่ง (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

M_w = ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากไก่อบโอ่ง (กิโลกรัม)

2.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของเนื้อไก่

2.6.1 สี

นำเนื้อไก่อบโอ่ง (ส่วนเนื้ออก) หั่นออกเป็น 3 ส่วน โดยหั่นขวางเส้นใยกล้ามเนื้อ ใช้หัววัดสีวางทาบลงบนเนื้อไก่ในแนวหน้าตัด และอ่านค่าจากเครื่องวัดสียี่ห้อ Minolta รุ่น CR-231 โดยค่าสีแสดงในเทอมของตัวแปร L a และ b โดยค่า L แสดงค่าความสว่าง a แสดงค่าสีแดงและสีเขียว b แสดงค่าสีเหลืองและน้ำเงิน ทั้งนี้แต่ละชุดการทดลองวัด 3 ซ้ำ

2.6.2 ความนุ่ม

ความนุ่มของเนื้อไก่อบโอ่งวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer) ยี่ห้อ Stable Micro Systems รุ่น TAXT.Plus โดยความนุ่มพิจารณาจากค่าแรงเฉือน (Shear force) ที่กระทำต่อชิ้นเนื้อไก่อบโอ่ง (ส่วนเนื้ออก) ขนาด $1.0 \times 2.0 \times 0.5$ เซนติเมตร ซึ่งใช้หัวทดสอบแบบ Warner-Bratzler blade ตามวิธีการของ Wattanachant et al. [12] กำหนดให้ความเร็วหัวทดสอบ (Cross-head Speed) 2 มิลลิเมตรต่อวินาที และวัดค่าแรงเฉือนตามขวางเส้นใยกล้ามเนื้อ ทั้งนี้แต่ละชุดการทดลองวัด 3 ซ้ำ ๆ ละ 5 ชิ้น

2.6.3 ปริมาณผลผลิต

ปริมาณผลผลิต (Cook Yield) ของไก่อบโอ่งหาได้จากสมการที่ (2) [13]

$$CY = \frac{W_s}{W_r} \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่

CY = ปริมาณผลผลิตของโก๋บโอง (ร้อยละ)

W_s = มวลโก๋หลังอบโอง (กรัม)

W_r = มวลโก๋ก่อนอบโอง (กรัม)

ทั้งนี้แต่ละชุดการทดลองวัด 3 ซ้ำ

2.6.4 ความสามารถในการอุ้มน้ำ

ซึ่งมวลตัวอย่างเนื้อโก๋บโอง 5 กรัม นำตัวอย่างมาสับให้ละเอียด แล้วห่อด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 จำนวน 2 แผ่น จากนั้นนำตัวอย่างบรรจุลงในหลอดเซนตริฟิวส์ แล้วใส่ลงในโรเตอร์ นำไปเซนตริฟิวส์ที่ 9,000 รอบ นาน 10 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งมวลตัวอย่างหลังเซนตริฟิวส์ ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water Holding Capacity) ของโก๋บโองหาได้จากสมการที่ (3) [14]

$$WHC = W_{bs} - \frac{(W_{bs} - W_{fs})}{W_{bs}} \times 100\% \quad (3)$$

โดยที่

WHC = ความสามารถในการอุ้มน้ำของโก๋บโอง (ร้อยละ)

W_{bs} = มวลตัวอย่างเนื้อโก๋บโองก่อนปั่นเหวี่ยง (กรัม)

W_{fs} = มวลตัวอย่างเนื้อโก๋บโองหลังปั่นเหวี่ยง (กรัม)

ทั้งนี้แต่ละชุดการทดลองวัด 3 ซ้ำ

2.7 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ปริมาณการใช้ไฟฟ้า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และสมบัติทางกายภาพของโก๋บโองด้านสี ความนุ่ม ปริมาณผลผลิต และความสามารถในการอุ้มน้ำใช้โปรแกรม SPSS วิเคราะห์ผลทางสถิติแบบ One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตโก๋บโอง

ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตโก๋บโองโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกลที่ 1,000 1,200 และ 1,400 วัตต์ แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า การผลิตโก๋บโองที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลสูงใช้ปริมาณไฟฟ้าเฉลี่ยน้อยกว่าการผลิตโก๋บโองที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากการผลิตโก๋บโองที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลสูง ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่ามาก น้ำในผลิตภัณฑ์จึงระเหยได้เร็ว ส่งผลให้ใช้เวลาอบแห้งและปริมาณไฟฟ้าน้อยกว่าการผลิตโก๋บโองที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลต่ำ

ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตโก๋บโองโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกลแสดงดังตารางที่ 2 พบว่า การผลิตโก๋บโองที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลสูงมีค่าไฟฟ้าเฉลี่ยน้อยกว่าการผลิตโก๋บโองที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ส่วนค่าถ่านที่ใช้ในการผลิตโก๋บโองโดยใช้ความร้อนจากเตาถ่านแสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ค่าถ่านเฉลี่ยที่ใช้ผลิตโก๋บโองโดยใช้ความร้อนจากเตาถ่านเท่ากับ 27.41 ± 1.09 บาทต่อครั้ง ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตโก๋บโองโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกลกับเตาถ่าน พบว่า ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการผลิตโก๋บโองโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกลที่ 1,000 1,200 และ 1,400 วัตต์ มีราคาถูกกว่าค่าถ่านเฉลี่ยที่ใช้ในการผลิตโก๋บโองโดยใช้ความร้อนจากเตาถ่านร้อยละ 60.56 61.80 และ 63.04 ตามลำดับ

นอกจากนี้ การเปรียบเทียบกำลังการผลิตโก๋บโองโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกลกับเตาถ่านแสดงดังตารางที่ 4 พบว่า การอบโองโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกลมีกำลังการผลิตโก๋บโองน้อยกว่าการอบโองโดยใช้ความร้อนจากเตาถ่าน

ตารางที่ 1 ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไก่บ่งโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกล

รังสีอินฟราเรดไกล (วัตต์)	การทดลอง	เวลาบ่ง (นาท)	เวลาบ่งเฉลี่ย (นาท)	ปริมาณไฟฟ้า (กิโลวัตต์·ชั่วโมง)	ปริมาณไฟฟ้าเฉลี่ย (กิโลวัตต์·ชั่วโมง)
1,000	ครั้งที่ 1	210		3.56	
	ครั้งที่ 2	220	216.67	3.60	3.60±0.05 ^a
	ครั้งที่ 3	220		3.65	
1,200	ครั้งที่ 1	180		3.53	
	ครั้งที่ 2	190	183.33	3.42	3.49±0.06 ^b
	ครั้งที่ 3	180		3.52	
1,400	ครั้งที่ 1	140		3.34	
	ครั้งที่ 2	150	146.67	3.41	3.38±0.04 ^c
	ครั้งที่ 3	150		3.38	

หมายเหตุ อักษรต่างกันในคอลัมน์เดียวกันให้ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 2 ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไก่บ่งโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกล

รังสีอินฟราเรดไกล (วัตต์)	การทดลอง	ปริมาณไฟฟ้า (กิโลวัตต์·ชั่วโมง)	ค่าไฟฟ้า (บาท)	ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย (บาท)
1,000	ครั้งที่ 1	3.56	10.68	
	ครั้งที่ 2	3.60	10.80	10.81±0.14 ^a
	ครั้งที่ 3	3.65	10.95	
1,200	ครั้งที่ 1	3.53	10.59	
	ครั้งที่ 2	3.42	10.26	10.47±0.18 ^b
	ครั้งที่ 3	3.52	10.56	
1,400	ครั้งที่ 1	3.34	10.02	
	ครั้งที่ 2	3.41	10.23	10.13±0.11 ^c
	ครั้งที่ 3	3.38	10.14	

หมายเหตุ 1. คำนวณค่าไฟฟ้าหน่วยละ 3 บาท [15]

2. อักษรต่างกันในคอลัมน์เดียวกันให้ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 3 ค่าถ่านที่ใช้ในการผลิตไก่บ่งโดยใช้ความร้อนจากเตาถ่าน

การทดลอง	เวลาบ่ง (นาท)	ปริมาณถ่านที่ใช้ (กรัม)	ค่าถ่านที่ใช้ (บาท)	ค่าถ่านเฉลี่ยที่ใช้ (บาท)
ครั้งที่ 1	140	2,293.5	28.67	
ครั้งที่ 2	130	2,140.2	26.75	27.41±1.09
ครั้งที่ 3	130	2,144.6	26.81	

หมายเหตุ ถ่านที่ใช้ทำจากไม้มะขาม มวลถ่านเริ่มต้นที่ใช้เท่ากับ 3,250 กรัม และค่าถ่านไม้มะขามที่ใช้ 12.5 บาทต่อกิโลกรัม

(อ้างอิงราคาถ่านไม้มะขามจากตลาดสดเทศบาล จ.ตาก ในวันที่ 15 มีนาคม 2563)

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบกำลังการผลิตไก่บ่งโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกลกับเตาถ่าน

วิธีการผลิตไก่บ่ง	การทดลอง	เวลาบ่ง (นาที)	เวลาบ่งเฉลี่ย (นาที)	กำลังการผลิตไก่บ่ง (ตัวต่อชั่วโมง)
ใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกล	1,000 วัตต์	ครั้งที่ 1	210	0.55
		ครั้งที่ 2	220	
		ครั้งที่ 3	220	
	1,200 วัตต์	ครั้งที่ 1	180	0.65
		ครั้งที่ 2	190	
		ครั้งที่ 3	180	
	1,400 วัตต์	ครั้งที่ 1	140	0.82
		ครั้งที่ 2	150	
		ครั้งที่ 3	150	
ใช้ความร้อนจากเตาถ่าน	ครั้งที่ 1	140	133.33	0.90
	ครั้งที่ 2	130		
	ครั้งที่ 3	130		

หมายเหตุ การทดลองแต่ละครั้งใช้ไก่หมักจำนวน 2 ตัว

3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการผลิตไก่บ่ง

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการผลิตไก่บ่งแสดงดังตารางที่ 5 พบว่า การผลิตไก่บ่งที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลสูงมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ยน้อยกว่าการผลิตไก่บ่งที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากการผลิตไก่บ่งที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลสูงใช้ปริมาณไฟฟ้าเฉลี่ยน้อยกว่าการผลิตไก่บ่งที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลต่ำ (แสดงดังตารางที่ 1)

ตารางที่ 5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการผลิตไก่บ่ง

รังสีอินฟราเรดไกล (วัตต์)	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (กิโลวัตต์·ชั่วโมงต่อกิโลกรัม)
1,000	4.16 ± 0.06^a
1,200	4.02 ± 0.04^b
1,400	3.86 ± 0.09^c

หมายเหตุ อักษรต่างกันในคอลัมน์เดียวกันให้ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ M. Nachaisin et al. [16] ที่พบว่า การเพิ่มระดับกำลังของรังสีอินฟราเรดไกลจาก 1 เป็น 2 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งข้าวไรซ์เบอร์รี่สำเร็จรูปมีค่าลดลง

3.3 สมบัติทางกายภาพของไก่บ่ง

3.3.1 สี

ผลการทดสอบสมบัติด้านสีของส่วนหนังไก่บ่งแสดงดังตารางที่ 6 พบว่า ส่วนหนังไก่บ่งที่รังสีอินฟราเรดไกล 1,400 วัตต์ มีความสว่าง (ค่า L) น้อยกว่า แต่มีสีแดง (ค่า a) และสีเหลือง (ค่า b) มากกว่า ส่วนหนังไก่บ่งที่รังสีอินฟราเรดไกล 1,000 วัตต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากหนังไก่อยู่ภายนอกเนื้อไก่ หนังไก่จึงได้รับความร้อนปริมาณมากจากรังสีอินฟราเรดไกล การอบไก่โดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกลที่ระดับกำลังสูง ๆ ทำให้ส่วนหนังไก่มีอุณหภูมิสูงขึ้นรวดเร็ว ส่งผลให้ส่วนหนังไก่

เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบเมลลาร์ด (Maillard Reaction) มากกว่าการอบโอ่งโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกลที่ระดับกำลังต่ำ ๆ อย่างเด่นชัด ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ U. Teeboonma et al. [17] ที่ได้อบแห้งเนื้อวัวด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งพบว่า การเปลี่ยนของสีเนื้อวัวอบแห้งเพิ่มขึ้น (สีเนื้อวัวอบแห้งมีสีเข้มขึ้น) เมื่อระดับรังสีอินฟราเรดไกลสูงขึ้น จาก 370 เป็น 640 วัตต์ อย่างไรก็ตาม ค่าสีแดง (ค่า a) และสีเหลือง (ค่า b) ของส่วนหนังไก่อบโอ่งที่รังสีอินฟราเรดไกล 1,200 วัตต์ ไม่มีความแตกต่างกับค่าสีแดง (ค่า a) และสีเหลือง (ค่า b) ของส่วนหนังไก่อบโอ่งที่รังสีอินฟราเรดไกล 1,000 และ 1,400 วัตต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ทั้งนี้ไก่สดส่วนหนังมีค่า L a และ b เท่ากับ 56.60 ± 0.26 2.11 ± 0.16 และ 2.96 ± 0.18 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ยังแสดงผลการทดสอบสมบัติด้านสีของส่วนเนื้อไก่อบโอ่ง พบว่า ส่วนเนื้อไก่อบโอ่งที่รังสีอินฟราเรดไกล 1,400 วัตต์ มีความสว่าง (ค่า L) มากกว่า แต่มีสีแดง (ค่า a) และสีเหลือง (ค่า b) น้อยกว่า ส่วนเนื้อไก่อบโอ่งที่รังสีอินฟราเรดไกล 1,000 วัตต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq0.05$) เนื่องจากการอบเนื้อสัตว์ที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลสูง ทำให้อุณหภูมิเนื้อสัตว์สูงขึ้น โปรตีนในเนื้อสัตว์จึงเกิดการเสียสภาพธรรมชาติ (Protein Denaturation) และมีการรวมตัวกันเป็นก้อนของโปรตีนซาร์โคพลาสมิก (Sarcoplasmic Protein) และโปรตีนไมโอไฟบริลลา (Myofibrillar Protein) [18] ส่งผลให้เนื้อสัตว์มีสีอ่อนลงและมีความสว่างมากขึ้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ L. Christensen et al. [19] ที่ได้วัดสีเนื้อหมูที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนเป็นเวลานาน (Prolonged Heat Treatment) ซึ่งพบว่า เนื้อหมูมีค่าความสว่าง (ค่า L) เพิ่มขึ้น แต่มีค่าสีแดง (ค่า a) ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 58 เป็น 63 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม ค่าสี (ค่า L a และ b) ของส่วนเนื้อไก่

อบโอ่งที่รังสีอินฟราเรดไกล 1,200 วัตต์ ไม่มีความแตกต่างกับค่าสี (ค่า L a และ b) ของส่วนเนื้อไก่อบโอ่งที่รังสีอินฟราเรดไกล 1,000 และ 1,400 วัตต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ทั้งนี้ไก่สดส่วนเนื้ออกมีค่า L a และ b เท่ากับ 49.63 ± 0.29 2.86 ± 0.13 และ 1.62 ± 0.15 ตามลำดับ

3.3.2 ความนุ่ม

ตารางที่ 7 แสดงผลการทดสอบสมบัติด้านความนุ่มของไก่อบโอ่ง พบว่า แรงเคี้ยวเนื้อไก่มีค่ามากขึ้นเมื่อระดับรังสีอินฟราเรดไกลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq0.05$) เนื่องจากการอบโอ่งที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลสูง ทำให้อุณหภูมิเนื้อสัตว์สูงขึ้น โปรตีนในเนื้อสัตว์จึงเกิดการสูญเสียสภาพธรรมชาติ [18] โครงสร้างของเนื้อสัตว์จึงเกิดการหดตัวมากขึ้น ส่งผลให้เนื้อไก่มีความแข็งเพิ่มขึ้น (มีความนุ่มน้อย) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ P. Sa-adchom et al. [20] ที่อบแห้งเนื้อปลาด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ซึ่งพบว่า เนื้อปลาอบแห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส มีการหดตัวและความแข็งมากกว่าเนื้อปลาอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.3.3 ปริมาณผลผลิต

ผลการทดสอบสมบัติด้านปริมาณผลผลิตของไก่อบโอ่งแสดงดังตารางที่ 7 พบว่า ระดับรังสีอินฟราเรดไกล (1,000 1,200 และ 1,400 วัตต์) ไม่มีผลต่อปริมาณผลผลิตของไก่อบโอ่งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เนื่องจากการทดลองได้ควบคุมมวลไก่หมักก่อนอบโอ่งประมาณ 1,650 กรัม และมวลไก่อบโอ่งสุดท้ายต้องต่ำกว่า 1,220 กรัม ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตในแต่ละการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน

3.3.4 ความสามารถในการอุ้มน้ำ

ตารางที่ 7 แสดงผลการทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการอุ้มน้ำของไก่อบโอ่ง พบว่า

ความสามารถในการอุ้มน้ำของไก่อบโองมีค่าลดลงเมื่อระดับรังสีอินฟราเรดไกลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากเมื่อเนื้อสัตว์ได้รับความร้อน โครงสร้างของโปรตีนในเนื้อสัตว์เกิดการหดตัว ทำให้ช่องว่างระหว่างเส้นใยกล้ามเนื้อและรอบ ๆ เนื้อเยื่อเกี่ยวพันเอนโดไมเซียม (Endomysium) ลดลง และมีการหดตัวมากขึ้นที่อุณหภูมิสูง (ที่ระดับรังสีอินฟราเรด

ไกลสูง) ซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียน้ำและการลดลงของความสามารถในการอุ้มน้ำของเนื้อสัตว์ [21] ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ S. Kerdpiroon [18] ที่ใช้กระบวนการซูวีตในการผลิตเนื้อวัวสด ซึ่งพบว่า เนื้อวัวสดมีความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการซูวีตสูงขึ้นจาก 55 เป็น 65 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบสมบัติด้านสีของส่วนหนังและอกไก่อบโอง

รังสีอินฟราเรดไกล (วัตต์)	ค่าสีของส่วนหนังไก่อบโอง			ค่าสีของส่วนเนื้ออกไก่อบโอง		
	ค่า L	ค่า a	ค่า b	ค่า L	ค่า a	ค่า b
1,000	40.49±0.59 ^a	14.18±0.25 ^b	24.61±0.51 ^b	55.73±0.61 ^b	8.58±0.23 ^a	14.36±0.65 ^a
1,200	38.67±0.65 ^b	14.62±0.20 ^{ab}	25.12±0.54 ^{ab}	56.38±0.57 ^{ab}	8.22±0.30 ^{ab}	13.28±0.48 ^{ab}
1,400	37.31±0.61 ^c	14.87±0.24 ^a	25.87±0.47 ^a	57.26±0.66 ^a	7.82±0.28 ^b	12.33±0.62 ^b

หมายเหตุ: อักษรต่างกันในคอลัมน์เดียวกันให้ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบสมบัติด้านความนุ่ม ปริมาณผลผลิต และความสามารถในการอุ้มน้ำของไก่อบโอง

รังสีอินฟราเรดไกล (วัตต์)	แรงเฉือนของไก่อบโอง (นิวตัน)	ปริมาณผลผลิตของไก่อบโอง (ร้อยละ)	ความสามารถในการอุ้มน้ำของไก่อบโอง (ร้อยละ)
1,000	5.51±0.38 ^c	73.64±0.72 ^a	80.93±2.19 ^a
1,200	5.98±0.42 ^b	73.55±0.46 ^a	69.20±1.93 ^b
1,400	6.82±0.39 ^a	73.69±0.51 ^a	52.67±2.05 ^c

หมายเหตุ: อักษรต่างกันในคอลัมน์เดียวกันให้ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4. สรุป

การผลิตไก่อบโองที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลสูง ใช้ปริมาณไฟฟ้าและความสิ้นเปลืองพลังงานจำพวบน้อยกว่าการผลิตไก่อบโองที่ระดับรังสีอินฟราเรดไกลต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไก่อบโองโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกลที่ 1,000 1,200 และ 1,400 วัตต์ มีราคาถูกกว่าค่าถ่านที่ใช้ในการผลิตไก่อบโองโดยใช้ความร้อนจากเตาถ่านร้อยละ 60.56 61.80 และ 63.04 ตามลำดับ ส่วนเนื้ออกไก่อบโองที่รังสีอินฟราเรดไกล 1,400 วัตต์ มีความสว่าง (ค่า L) มากกว่า แต่มีสีแดง (ค่า a) และสีเหลือง (ค่า b) น้อยกว่าส่วนเนื้ออกไก่อบโองที่รังสีอินฟราเรด

ไกล 1,000 วัตต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม ค่าสี (ค่า L a และ b) ของส่วนเนื้ออกไก่อบโองที่รังสีอินฟราเรดไกล 1,200 วัตต์ ไม่มีความแตกต่างกับค่าสี (ค่า L a และ b) ของส่วนเนื้ออกไก่อบโองที่รังสีอินฟราเรดไกล 1,000 และ 1,400 วัตต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แรงเฉือนและความสามารถในการอุ้มน้ำของไก่อบโองมีค่ามากขึ้นเมื่อระดับรังสีอินฟราเรดไกลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่า ระดับรังสีอินฟราเรดไกล (1,000 1,200 และ 1,400 วัตต์) ไม่มีผลต่อปริมาณผลผลิตของไก่อบโองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ในงานวิจัยต่อไปควรพัฒนาเตาอบไก่อบโองสำหรับการผลิตไก่อบโองโดยใช้ความร้อนจาก

รังสีอินฟราเรดไกลให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้สามารถบรรจุไก่อบโอ่งได้จำนวนมาก รวมทั้งควรวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุนของเตาอบโอ่งสำหรับการผลิตไก่อบโอ่งโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรดไกลเพื่อเป็นประโยชน์ในเชิงพาณิชย์

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการวิจัยเพื่อบูรณาการการเรียนการสอนร่วมกับงานวิจัยและบริการวิชาการของนักศึกษาปฏิบัติงานวิจัยร่วมกับอาจารย์ต่อผลผลิตงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ประจำปี 2563 ทั้งนี้ความคิดเห็นในบทความวิจัยเป็นของผู้รับทุน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Agricultural Economics, *Important Agricultural Products Situation and Trends in 2020*. Bangkok: Office of Agricultural Economics, 2019.
- [2] T. Kanasri, S. Mongmechai, P. Prasertsang and S. Yinde, "Development of direct fired oven a grill chicken using charcoal," *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, vol. special, pp. 670-673, 2014.
- [3] S. Makmaitree, "Food consumption behavior for safety from toxic substances," *NKRAFA Journal of Science and Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 118-129, Jan.-Dec. 2018.
- [4] S. Thongdaeng and B. Lamlerd, "Thermal image technique and thermal efficiency comparison of fired oven chicken," *Udon Thani Rajabhat University Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 67-79, Jul.-Dec. 2018.
- [5] P. Sa-adchom and T. Swasdisevi, "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] N. Boudhrioua, N. Bahloul, I.B. Slimen and N. Kechaou, "Comparison on the total phenol contents and the color of fresh and infrared dried olive leaves," *Industrial Crops and Product*, vol. 29, no. 2-3, pp. 412-419, 2009.
- [7] M. Vogt, "Infrared drying lowers energy costs and drying times," *Plastics, Additives and Compounding*, vol. 9, no. 5, pp. 58-61, 2007.
- [8] P. Kongpoopha, 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.
- [9] S. Srisongkram, "Effect of stocking density on growth, carcass and meat quality of broilers," Seminar report, Dept. Animal Sci., Prince of Songkla University, Songkla, Thailand, 2017.
- [10] Thai Industrial Standards Institute, *Thai Community Product Standard: Roast Chicken (TCPS 1028/2548)*. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute, 2005.
- [11] N. Kansaard, A. Khruakaew, P. Saesong and P. Sa-adchom, "Effect of hot air velocity on

- preserved tomatoes drying using combined conveyor system and hot air,” *RMUTP Research Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 1-13, Jan.-Jun. 2018.
- [12] S. Wattanachant, S. Benjakul and D.A. Ledward, “Effect of heat treatment on changes in texture, structure and properties of Thai indigenous chicken muscle,” *Food Chemistry*, vol. 93, no. 2, pp. 337-348, 2005.
- [13] B.A. Showell, J.R. Williams, M. Duvall, J.C. Howe, K.Y. Patterson, J.M. Roseland and J.M. Holden, *USDA Table of Cooking Yields for Meat and Poultry*. Maryland: U.S. Department of Agriculture, 2012.
- [14] M. Zheng, Y.W. Huang, S.O. Nelson, P.G. Bartley and K.W. Gates, “Dielectric properties and thermal conductivity of marinated shrimp and channel catfish,” *Journal of Food Science*, vol. 63, no. 4, pp. 668-672, 1998.
- [15] T. Klathae and P. Jitpat, “Compressive strength and water absorption properties of concrete block containing crushed oyster shell,” *RMUTP Research Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 25-38, Jan.-Jun. 2019.
- [16] M. Nachaisin, P. Pumnam, W. Jansopha, N. Ananaur and W. Pharanat, “Specific energy consumption and drying kinetics of far-infrared dried,” *Journal of Science & Technology, Ubon Ratchathani University*, vol. special, pp. 71-76, Oct. 2016.
- [17] U. Teeboonma, T. Suwanakoot and S. Soponronnarit, “Beef drying using infrared radiation,” *KKU Engineering Journal*, vol. 33, no. 2, pp. 169-180, Mar.-Apr. 2006.
- [18] S. Kerdpi boon, “Using of sous-vide process to beef steak ready to cook and beef mussaman curry production,” Research report, Dept. Agro-Industry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2015.
- [19] L. Christensen, P. Ertbjerg, M.D. Aaslyng and M. Christensen, “Effect of prolonged heat treatment from 48°C to 63°C on toughness, cooking loss and color of pork,” *Meat Science*, vol. 88, no. 2, pp. 280-285, 2011.
- [20] 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.
- [21] G. Offer and J. Trinick, “On the mechanism of water holding capacity in meat, the swelling and shrinking of myofibrils,” *Meat Science*, vol. 8, no. 4, pp. 245-281, 1983.

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

การวิเคราะห์การผสมพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

ยศฐา ศรีเทพ* ญัฐกรณ์ หงษ์คำ และ พัทธระ ตะโคตร

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

41/20 ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

รับบทความ 20 พฤษภาคม 2563 แก้ไขบทความ 24 กรกฎาคม 2563 ตอรับบทความ 15 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เน้นการตรวจสอบสมบัติเชิงกลและการปรับความเข้ากันได้ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) เป็นวัสดุผสมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่ง PLA ถูกผสมกับ TPS ที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 50, และ 70 โดยน้ำหนัก และสารช่วยยืดสายโซ่โมเลกุล 2 phr โดยเครื่องผสมภายในที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส วัสดุผสมถูกฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส จากการทดสอบแรงดึงพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ TPS เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานแรงดึงและมอดูลัสมีแนวโน้มลดลง สันฐานวิทยาถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่ามีความแตกต่างทางสันฐานวิทยาที่ชัดเจนเมื่อ PLA ถูกผสมกับ TPS แต่สารช่วยยืดสายโซ่โมเลกุลสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ดีขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า เมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้นอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g), อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และอุณหภูมิการตกผลึก (T_c) ลดลง นอกจากนี้สารช่วยยืดสายโซ่โมเลกุลไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนต่อวัสดุผสม การวิเคราะห์ความเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุผสมลดลงเมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้น เนื่องจากการสลายตัวของ TPS ใน PLA อย่างไรก็ดี เมื่อทดสอบการทนความร้อนเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตัวอย่าง PLA เกิดการเสียรูป ในขณะที่ TPS ไม่เกิดการเสียรูป เมื่อ PLA ผสมกับ TPS วัสดุผสมจึงเกิดการเสียรูปลดลงตามปริมาณของ TPS ที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : พอลิแลคติกแอซิด; เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช; การฉีดขึ้นรูป

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

Characterization of Bioplastics Poly (lactic acid) Blended with Thermoplastic Starch

Yottha Srithep* Nutthagorn Hongkhaum and Padchara Takhot

Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University
41/20 Kamriang Kantarawichai Mahasarakham 44150

Received 20 May 2020; Revised 24 July 2020; Accepted 15 September 2020

Abstract

This research was concentrated on characterized mechanical properties and adjusted compatibility of poly (lactic acid) (PLA) with thermoplastic starch (TPS) as biodegradable polymers composites. PLA was blended with TPS at the proportion of 10, 20, 30, 50, and 70 wt% as well as 2 phr chain extender by an internal mixer at 200°C. The blended materials were then injection molded at 230°C. Tensile testing showed that as the amount of TPS increase, the elongation at break tended to increase but the tensile strength and modulus tended to decrease. The morphology was investigated by scanning electron microscope. It was found that distinct phase between PLA and TPS was observed. Yet, adding the chain extender clearly improved the compatibility between PLA and TPS. The blended materials were also analyzed by differential scanning calorimetry method to study thermal properties. It was found that, as the amount of TPS increased, the glass transition temperature (T_g), melting temperature (T_m), and cold crystallization temperature (T_{cc}) decreased. Additionally, chain extenders did not affect thermal properties. The thermal stability of the composites decreased when increasing the amount of TPS because of the degradation of TPS in PLA. However, when heated at 100°C for 1 hr, the PLA sample bent while TPS did not bend. When PLA was mixed with TPS, the composite was bent according to adding TPS.

Keywords : Poly (lactic acid); Thermoplastic Starch; Injection Molding

* Corresponding Author. Tel: +669 1061 4566, E-mail: yottha.s@msu.ac.th

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำพอลิเมอร์มาใช้งานในชีวิตประจำวันในด้านต่าง ๆ มากขึ้น เช่น บรรจุภัณฑ์ การแพทย์ อุตสาหกรรมยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องนุ่งห่ม เป็นต้น [1] เมื่อพิจารณาในด้านบรรจุภัณฑ์พบว่ามีความโน้มแน้มปริมาณการใช้งานสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งพอลิเมอร์ที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไปนั้นผลิตมาจากสารตั้งต้นที่มาจากปิโตรเคมีและต้องใช้เวลาในการย่อยสลายหลายร้อยปี หรือบางประเภทไม่สามารถย่อยสลายได้ จึงเกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมจากขยะที่มาจากพอลิเมอร์สูงขึ้น [2] เมื่อเกิดการตระหนักถึงปัญหาดังกล่าว พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Polymers) จึงได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์เหล่านี้มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid, PLA) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพที่นิยมนำมาใช้ในปัจจุบัน จัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ซึ่งได้จากการดแลคติก (Lactic Acid) ที่ได้มาจากผลผลิตทางการเกษตรประเภทแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง เป็นต้น [3], [4] โดยเริ่มต้นจากการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาล แล้วนำไปหมักด้วยจุลินทรีย์เกิดเป็นกรดแลคติก นำมาผ่านกระบวนการทางเคมีได้แลคไทด์ (Lactide) ที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน จากนั้นผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) เพื่อเปลี่ยนเป็น PLA สมบัติของ PLA สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีความปลอดภัยกับการใช้งานที่ต้องสัมผัสอาหาร จึงได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมอาหารและยา [5] แต่ด้วยต้นทุนที่สูงและความเปราะบางของ PLA เป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้งาน

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch) เป็นพลาสติกชีวฐาน (Bio-based Plastic) จัดอยู่ในกลุ่มที่มาจากธรรมชาติโดยตรง ไม่เป็นพิษ ย่อยสลายได้โดยการฝังกลบและโดยการกระทำของจุลินทรีย์

ที่สามารถหาใหม่ทดแทนได้ มีพืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด มันสำปะหลัง และถั่วต่าง ๆ เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกและสามารถเกิดใหม่ได้ตามธรรมชาติในเวลาอันสั้น โดยทั่วไปแล้วแป้งไม่สามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการทางความร้อนเหมือนพลาสติกทั่วไปเนื่องจากเกิดการไหม้และเสื่อมสภาพก่อนหลอม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาแป้งให้เป็นเทอร์โมพลาสติก เพื่อให้สามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการเดียวกับพลาสติกทั่วไป การพัฒนาแป้งให้เป็นเทอร์โมพลาสติกเพื่อให้สามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการทางความร้อน ทำได้โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ลงในแป้งด้วยสถานะที่เหมาะสม จะได้โครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของแป้ง ทำให้แป้งสามารถหลอมขึ้นรูปได้ กระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างกิ่งผลึกของแป้งให้เป็นโครงสร้างอสัณฐาน [6] เช่น เมื่อผสม Glycerol กับสารในกลุ่ม Polyol ที่มีมวลโมเลกุลสูง จะทำให้เสถียรภาพทางความร้อนและสมบัติเชิงกลดีขึ้น แต่ทำให้ค่าแรงฉีกของการผสมสูงขึ้น [7]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกลของ PLA เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและเป็นแนวทางในการลดปัญหาด้านต้นทุนของ PLA โดยการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ซึ่งเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้จากการพลาสติกไซเซชัน (Plasticization) ของแป้งโดยใช้ Glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ภายใต้ความร้อน ทำให้แป้งไม่ไหม้ในระหว่างการผสมกับพอลิเมอร์ เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่เกิดตามธรรมชาติได้ แต่พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ TPS นั้นยังไม่สามารถผสมเข้ากันได้ ส่งผลให้มีสมบัติทางกลที่ไม่ดี ซึ่งการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง TPS กับ PLA สามารถทำได้โดยการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) เพื่อให้ PLA ผสมกับ TPS ได้ดีขึ้น ทั้งนี้เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งยังไม่มีการวิจัยที่ศึกษาก่อนหน้านี้



รูปที่ 1 โครงสร้างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช [8]

2. ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกลของ PLA เพื่อลดความแข็ง โดยการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้จากการพลาสติกไซเซชันของแป้งโดยใช้ Glycerol เป็นพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ใช้คือร้อยละ 10, 20, 30, 50, และ 70 โดยที่อัตราส่วนปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชร้อยละ 50 เติมสารช่วยยืดสายโซ่โมเลกุล (Chain Extender) 2 phr ซึ่งได้ศึกษาการเติมสารช่วยยืดสายโซ่โมเลกุลที่อัตราส่วนร้อยละ 50 เนื่องจากมีปริมาณ PLA และ TPS เท่ากันเพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของวัสดุทั้งสอง

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

2.1.1 การเตรียมเครื่องมือและวัสดุ

เตรียมพอลิแลคติกแอซิด PLA เกรด Luminy L175 จากบริษัท Corbion (ประเทศไทย) มีน้ำหนักโมเลกุล: 210,000 g/mol, ความหนาแน่น: 1.24 g/cm³, อัตราการไหล: 8 g/10 min, อุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g): 60°C, จุดหลอมเหลว (T_m): 175°C แป้งมันสำปะหลัง จากบริษัทเกรียง (เกีย่งไต) ค้าแป้ง จำกัด พลาสติกไซเซอร์ ชนิดกลีเซอรอล (Glycerol) จากบริษัท เคมีภัณฑ์ และสารช่วยยืดสายโซ่โมเลกุล (CE) ที่ใช้คือ Joncryl ADR 4368-C มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาว จากบริษัท BASF The chemical Company (USA)

นำวัสดุมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ทำการผสมแป้งมันและ Glycerol เพื่อได้เป็น TPS ที่อัตราส่วนร้อยละ 30:70 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำ PLA และ TPS ผสมกันที่อัตราส่วนร้อยละ

100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 50:50, 70:30 และ 0:100 โดยน้ำหนัก โดยที่อัตราส่วน 50:50 ผสม CE 2 phr ทำการผสมโดยเครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ (internal mixer) อุณหภูมิในการผสมคงที่ 200°C ความเร็วรอบที่ 60 รอบต่อนาที เวลาในการผสม 6 นาที ปลดปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง

นำพอลิเมอร์ที่ได้จากการผสมเข้าเครื่องบด (Plastic Crushing Machine) เพื่อเตรียมทำการฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) ที่อุณหภูมิ 230°C เป็นชิ้นงานรูปดรัมเบลเพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ต่อไป

2.1.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

นำตัวอย่างที่ผ่านการผสมและฉีดขึ้นรูปแล้วมาทดสอบ Tensile Test ตามมาตรฐาน ASTM D638-10 ซึ่งมีความเร็วในการดึง 50 mm/min โดยชิ้นงานยาว 57 mm กว้าง 13 mm หนา 3.2 mm ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Narin Instrument Co. Ltd., รุ่น NRI-TS500-2S) มี Initial Load ประมาณ 0.5 N ที่อุณหภูมิห้อง ทำการทดลองดึง 5 ครั้งต่อตัวอย่าง และผลที่ได้ถูกนำมาหาค่าเฉลี่ย

2.1.3 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology Analysis)

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของตัวอย่างพื้นผิวแตกหักถูกทดสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) รุ่น LEO 1450VP 10 กิโลโวลต์ โดยตัวอย่างทั้งหมดถูกพ่นเคลือบทองด้วยชั้นบาง 20 นาโนเมตร ก่อนทำการวิเคราะห์

2.1.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal Properties Analysis)

ทดสอบด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) โดยใช้เครื่อง DSC-4000 จากบริษัท PerkinElmer (USA) เป็นการวิเคราะห์ทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พลังงาน และเอนทัลปี โดยตัดชิ้นงาน 3-5 มิลลิกรัม ใส่ในถาดอลูมิเนียม นำเข้าเครื่องทดสอบ เริ่มให้ความร้อนแก่ตัวอย่างตั้งแต่ 0 ถึง 250 °C ที่อัตรา 10 °C/min ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน เพื่อศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึกเมื่อได้รับความร้อน (T_c) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) พลังงานที่ใช้ในการเกิดผลึก (ΔH_c) และพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว (ΔH_m) ของตัวอย่าง

2.1.5 การทดสอบความเสถียรภาพทางความร้อน (Thermo Gravimetric Analysis)

นำชิ้นงานที่ผ่านการผสมและการฉีดขึ้นรูปแล้วมาทำการทดสอบด้วยเครื่อง TGA 4000 (Perkin-Elmer, USA) โดยให้อุณหภูมิ 320°C ค้างไว้เป็นเวลา 60 นาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจน ด้วยอัตรา 10 °C/min เพื่อวิเคราะห์ร้อยละของน้ำหนักคงเหลือต่อเวลาของแต่ละตัวอย่าง

2.1.6 การทดสอบการทนความร้อน (Heat Resistance Analysis)

เพื่อแสดงให้เห็นในเชิงคุณภาพว่าความต้านทานความร้อนของแท่งตัวอย่างที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่มีการแนวน้ำหนักการเสียรูปเนื่องจากความร้อน โดยชิ้นงานเหล่านี้จะถูกลงไว้ในเตาอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 60 นาที เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแต่ละตัวอย่าง โดยอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้าของ Srithep et.al. [9]

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

ผลการทดสอบแรงดึงของ PLA/TPS ที่อัตราส่วนต่าง ๆ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) พบว่า PLA บริสุทธิ์มีค่าความเค้นสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 54.6 MPa ส่วน TPS มีค่าความเค้นต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 5.7 MPa เมื่อเพิ่มปริมาณ TPS ใน PLA ที่ 10, 20, 30, 50, และ 70% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความเค้นมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติม CE ในตัวอย่าง PLA+50%TPS ค่าความเค้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เติม CE ส่วนค่าความเครียดพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณ TPS 30% มีค่าความเครียดสูงสุด แต่เมื่อผสม TPS มากกว่า 30% ความเครียดกลับมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเมื่อเติม CE ในตัวอย่าง PLA+50%TPS จะเห็นว่าค่าความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับไม่เติม CE ดังแสดงในรูปที่ 2

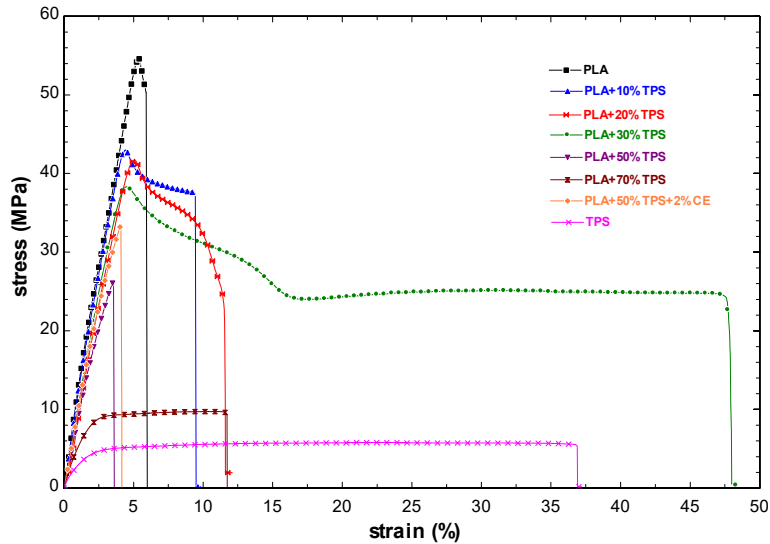
เมื่อวิเคราะห์ค่า Young's Modulus พบว่า PLA บริสุทธิ์มีค่าสูงสุดประมาณ 9.9 MPa ส่วน TPS มีค่าต่ำสุดประมาณ 0.2 MPa เมื่อเพิ่มปริมาณ TPS ใน PLA จะเห็นว่าค่า Young's Modulus มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยในช่วงปริมาณ TPS 10-50% แต่เมื่อผสม TPS มากกว่า 50% ตัวอย่างมีค่า Young's Modulus ลดลงอย่างมาก จากที่อัตราส่วน TPS 70% จะเห็นว่ามีค่า Young's Modulus ลดลงเหลือประมาณ 0.9 MPa และเมื่อเติม CE ในตัวอย่าง PLA+50%TPS ส่งผลให้ค่า Young's Modulus มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เติม CE โดยสรุปตามตารางที่ 1

เมื่อวิเคราะห์ค่า Tensile Strength พบว่า PLA บริสุทธิ์มีค่าสูงสุดประมาณ 54.6 MPa ส่วน TPS มีค่าต่ำสุดประมาณ 5.7 MPa เมื่อผสม TPS ใน PLA จะเห็นว่า Tensile Strength มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเติม CE ในตัวอย่าง

PLA+50% TPS ส่งผลให้ค่า Tensile Strength เพิ่มขึ้นประมาณ 7% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เติม CE

ในส่วนของค่า % Elongation at Break พบว่า PLA บริสุทธิ์มีค่าประมาณ 6% ส่วน TPS มีค่าประมาณ 36% เมื่อผสม TPS ใน PLA พบว่ามีแนวโน้มการยืดตัว

เพิ่มขึ้นตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้น จนถึงที่อัตราส่วน PLA+30%TPS ตัวอย่างสามารถยืดตัวได้สูงสุด และเมื่อผสม TPS มากกว่า 30% การยืดตัวมีแนวโน้มลดลง และเมื่อเติม CE ในตัวอย่าง PLA+50%TPS มีค่าการยืดตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เติม CE



รูปที่ 2 Stress-strain Curve ของ PLA, TPS และ PLA/TPS ที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 1 Tensile Testing of PLA, TPS and PLA/TPS Blends

Sample	Young's Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)
PLA	9.91±2.1	54.61±1.7	6.24±0.6
PLA+10%TPS	9.74±1.3	42.98±3.5	9.83±1.1
PLA+20%TPS	8.18±2.5	41.65±3.2	12.1±1.7
PLA+30%TPS	8.14±1.8	38.3±2.8	48.28±3.0
PLA+50%TPS	7.79±1.1	26.88±2.9	3.73±0.8
PLA+70%TPS	0.93±0.6	9.74±1.5	11.69±1.2
PLA+50%TPS+2%CE	7.67±1.3	33.37±2.2	4.52±1.5
TPS	0.25±0.7	5.78±0.9	36.45±2.9

จากผลข้างต้น เนื่องจากแรงของพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ลดลงซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงให้มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกโดยการเติม Glycerol เพื่อลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ของแป้ง เมื่อได้รับแรงดึงจึงไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์ได้น้อย ทำให้โพลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้

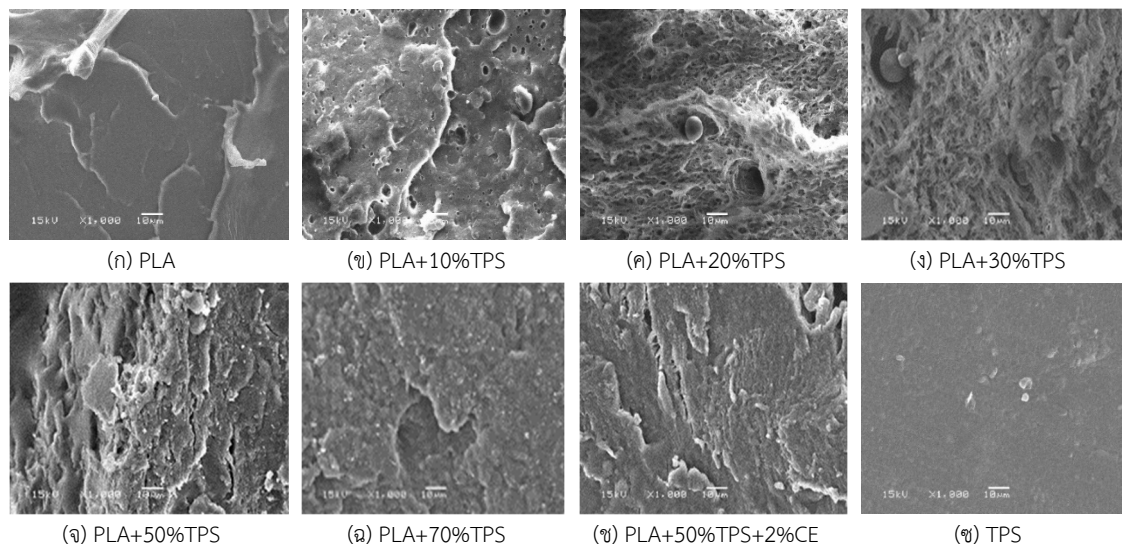
ง่าย [10] เมื่อ TPS ผสมใน PLA ปริมาณสูงทำให้ PLA มีพฤติกรรมคล้าย TPS จึงทำให้ความแข็งแรงลดลง ส่งผลให้ PLA มีค่าความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงลดลง ส่วนการยืดตัวมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่หากผสม TPS สูงกว่า 30% การยืดตัวจะลดลง อาจเนื่องมาจากการแยกเฟสของ PLA และ TPS เมื่อผสม TPS ในปริมาณสูงมาก

เกินไป ซึ่งเมื่อเติม CE ที่อัตราส่วน PLA+50%TPS พบว่าค่า Young's Modulus มีค่าใกล้เคียงกัน ค่า Tensile Strength และค่า % Elongation at Break มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เติม CE แสดงให้เห็นว่า CE มีผลต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ TPS เล็กน้อย

3.2 ผลของการทดสอบสัณฐานวิทยา

การทดสอบสัณฐานวิทยาของลักษณะผิวที่แตกหักโดยใช้กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงดังรูปที่ 3(ก) PLA บริสุทธิ์ พบว่ามีผิวแตกหักที่เรียบ ซึ่งเป็นพฤติกรรมการแตกแบบเปราะของ PLA [11] จาก รูปที่ 3(ข), (ค), (ง) และ (จ) คือ PLA ผสม TPS 10, 20, 30 และ 50% ตามลำดับ จะเห็นว่าพื้นผิวแตกหักเริ่มมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะ

พฤติกรรมของการแตกแบบเหนียว [12] โดยสอดคล้องกับสมบัติทางกล และเมื่อผสม TPS 70% จากรูปที่ 3(ฉ) พื้นผิวแตกหักกลับมามีลักษณะเรียบ เริ่มมีลักษณะผิวแตกหักคล้ายกับ TPS จากรูปที่ 3(ช) เนื่องจากเมื่อผสม TPS ในปริมาณมากส่งผลให้วัสดุมีลักษณะผิวคล้าย TPS มากขึ้น โดย TPS มีความเป็น amorphous สูง พื้นผิวแตกหักจึงมีความเป็นเนื้อเดียวกัน โดย glycerol เข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งแล้วเข้าไปแทนที่อยู่ระหว่างโมเลกุลของแป้งแทน [8] เมื่อเติม CE ในอัตราส่วน PLA/50%TPS จากรูปที่ 3(ซ) พบว่า มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เติม CE ดังแสดงใน รูปที่ 3(จ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า CE สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ของ PLA และ TPS ให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น



รูปที่ 3 SEM Surface Images ของ PLA, TPS และ PLA/TPS ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

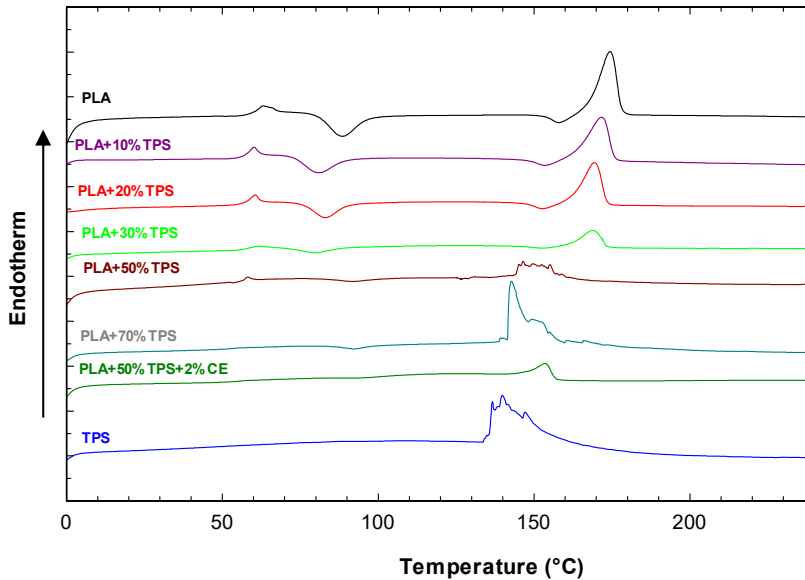
3.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

จาก DSC Thermograms ของตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าต่างๆ จากค่า T_g พบว่า

PLA มีค่า T_g เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 62°C เมื่อผสม TPS ค่า T_g มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้น จนเมื่อผสม TPS มากกว่า 50% ค่า T_g ไม่ปรากฏขึ้นเนื่องจาก TPS ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ให้กับ PLA ทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ง่าย จึงเริ่มเปลี่ยนสถานะ

ได้ง่ายขึ้น [13] เมื่อเติม CE ในอัตราส่วน PLA+50%TPS พบว่าไม่ปรากฏค่า T_g เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เติม CE ซึ่งมีค่า T_g ที่ 58°C นั่นคือ CE มีผลทำให้ PLA

และ TPS ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น จึงมีพฤติกรรมคล้าย TPS ได้ง่ายขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 สรุปได้ตามตารางที่ 2



รูปที่ 4 DSC thermograms ของ PLA, TPS และ PLA/TPS ที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 2 สมบัติทางความร้อนของ PLA, TPS และ PLA/TPS ที่อัตราส่วนต่างๆ

samples	T_g ($^\circ\text{C}$)	cold crystallization		Melting	
		T_{cc} ($^\circ\text{C}$)	ΔH_{cc} (J/g)	T_m ($^\circ\text{C}$)	ΔH_m (J/g)
PLA	62.43	88.44	24.69	174.32	67.33
PLA+10%TPS	60.98	81.78	12.32	171.52	53.53
PLA+20%TPS	60.29	83.02	14.23	169.26	44.45
PLA+30%TPS	60.25	80.01	4.50	168.80	17.46
PLA+50%TPS	58.91	91.62	2.81	146.58	18.38
PLA+70%TPS	-	92.54	2.21	142.76	49.20
PLA+50%TPS+2%CE	-	-	-	153.65	13.49
TPS	-	-	-	139.74	60.18

หมายเหตุ สัญลักษณ์ - คือ ไม่ปรากฏดังกล่าวกว่าค่าในการทดสอบที่อุณหภูมิ 0-250 $^\circ\text{C}$

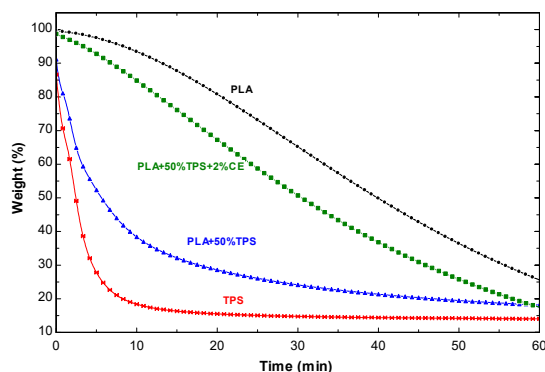
จากการวิเคราะห์ค่า T_{cc} พบว่า PLA เมื่อผสม TPS ค่า T_{cc} มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นไปได้ง่าย จึงเกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ ต่ำลง [14] และกลับมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสม TPS

มากกว่า 30% เช่นเดียวกันกับค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิด ผลึกเมื่อได้รับความร้อน มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้น จนที่อัตราส่วน TPS 100% ไม่ปรากฏค่า T_{cc} ส่วนตัวอย่างที่เติม CE มีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า T_g เมื่อวิเคราะห์ค่า T_m พบว่า PLA เมื่อผสม TPS มี

แนวโน้มของ T_m ลดลงตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อผสมพลาสติกไซเซอร์มากขึ้น ยิ่งจะส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนจึงหลอมเหลวได้ง่ายขึ้น [15] ในส่วนของค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว มีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า T_m แต่เมื่อผสม TPS มากกว่า 50% พบว่ามีการใช้พลังงานในการหลอมเหลวสูงขึ้น เมื่อเติม CE ในอัตราส่วน PLA+50%TPS มีค่า T_m สูงขึ้น และใช้พลังงานในการหลอมเหลวลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เติม CE

3.4 ผลการทดสอบความเสถียรทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

เปอร์เซ็นต์น้ำหนักคงเหลือ 50% ($T_{50\%}$) ที่อุณหภูมิ 320°C เป็นเวลา 60 นาที ของ PLA, TPS และ PLA ผสม TPS 50% พบว่า PLA, TPS และ PLA+50%TPS มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักคงเหลือ 50% ประมาณ 52, 24 และ 14% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า PLA เมื่อผสม TPS มีผลทำให้มีความเสถียรทางความร้อนลดลงตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปริมาณ TPS เพิ่มขึ้น คือปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เพิ่มมากขึ้น จึงไปทำลายพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งมากขึ้น ทำให้สายตัวทางความร้อนได้ง่าย และเมื่อเติม CE ลงในตัวอย่าง PLA+50%TPS พบว่ามีค่า $T_{50\%}$ เพิ่มขึ้นประมาณ 26% เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เติม CE ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่า CE ช่วยเชื่อมสายโซ่โมเลกุลของ PLA ที่ถูกทำลายเนื่องจากน้ำและความร้อนจากการหลอมผสมและฉีดขึ้นรูป โดยการทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์กลายเป็นโครงร่างที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น จึงทำให้ความเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุผสมเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 สรุปผลตามตารางที่ 3



รูปที่ 5 TGA curves ของ PLA, TPS, PLA+50%TPS และ PLA+50%TPS เติม 2%CE

ตารางที่ 3 การทดสอบทางความร้อนด้วย TGA ที่ 50% เวลา 60 min ที่อุณหภูมิ 320°C ของ PLA, TPS, PLA+50%TPS และ PLA+50%TPS เติม 2%CE

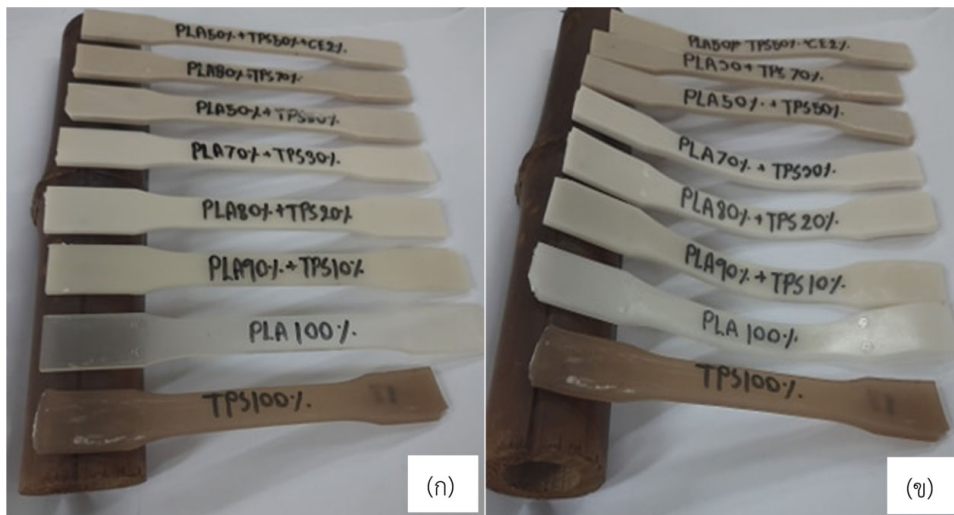
ตัวอย่าง	$T_{50\%}$ (%)	SD
PLA	65.19	±0.7
PLA+50%TPS	24.14	±1.1
PLA+50%TPS+2%CE	50.72	±1.5
TPS	14.76	±0.9

3.5 ผลการทดสอบการทนความร้อน

ตัวอย่างขึ้นงานที่ขึ้นรูปโดยการฉีดของ PLA, PLA ผสม TPS ที่อัตราส่วน 10, 20, 30, 50, 70 และ 100% และ PLA ผสม 50%TPS เติม 2%CE แสดงในรูปที่ 6 สำหรับ รูปที่ 6(ก) คือตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องพบว่า มีลักษณะตรงแข็ง โดยเป็นรูปดรัมเบลตามแม่พิมพ์การฉีดขึ้นรูป เมื่อนำมาผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 6(ข) พบว่า PLA เกิดการเสียรูปมากที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิทดสอบอยู่ระหว่างอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมเหลว ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการขยับตัว จึงเกิดการเสียรูปเกิดขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ TPS ใน PLA จะเห็นว่าตัวอย่างมีการเสียรูปลดลงตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผล DSC โดยค่า

ΔH_{cc} มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ TPS เพิ่มขึ้น คือสายโซ่โมเลกุลสามารถจัดเรียงตัวได้เป็นระเบียบมากขึ้น จึงเกิดการเสียรูปเนื่องจากความร้อนที่ 100°C ลดลงตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเติม CE ลงในตัวอย่าง PLA+50%TPS ตัวอย่างเกิดการเสียรูปมากกว่าตัวอย่างที่ไม่เติม CE อาจเนื่องมาจาก CE ส่งผลให้ปริมาณผลึก

ในตัวอย่างลดลง นั่นคือสายโซ่โมเลกุลจัดเรียงตัวเป็นระเบียบยากขึ้น เนื่องจาก CE อาจเชื่อมต่อโมเลกุลแบบ branch เกิดโซ่ข้างสั้น ๆ ส่งผลให้ลดความเป็นผลึก เพราะรบกวนโครงสร้างผลึก เมื่อได้รับความร้อนจึงเสียรูปได้ง่ายกว่าชิ้นงานที่มีผลึกสูง [9]



รูปที่ 6 การทนความร้อนของ PLA, TPS ของ PLA/TPS ที่อัตราส่วนต่างๆ (ก) ที่อุณหภูมิห้อง และ (ข) หลังจากอบที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 60 นาที

4. สรุป

การศึกษางานวิจัยในครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลของ PLA ในด้านความแข็งแรง ให้มีความยืดหยุ่น มีการยืดตัวได้สูงขึ้น เพื่อประยุกต์ใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการความเหนียว โดยการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิไเซอร์ที่ได้จากการพลาสติกไซเซชันของน้ำมันสำปะหลังจากการเติม Glycerol เพื่อลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้ง พบว่า PLA ที่ผสม TPS มีแนวโน้มของค่า Young's Modulus และ Tensile Strength ลดลง ส่วนค่า % Elongation at Break มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเมื่อใช้ TPS 30% จะส่งผลให้ค่าการยืดตัวมีค่าสูงสุดประมาณ 48% ซึ่งเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งาน ในด้านสมบัติทางความร้อน

จะเห็นว่าเมื่อ TPS เพิ่มขึ้นตัวอย่างมีค่า T_g , T_m และพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลวลดลง ในส่วนของความเสถียรทางความร้อนของน้ำหนักคงเหลือ 50% ที่อุณหภูมิคงที่ 320°C เปอร์เซ็นต์น้ำหนักคงเหลือมีปริมาณลดลง และการทดสอบการทนความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C ของ PLA เมื่อผสม TPS สามารถทนความร้อนได้ดีขึ้นตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวชี้ว่า TPS ทำให้ PLA เกิดการยืดตัวได้สูงขึ้น คือมีความเหนียวเพิ่มขึ้น และเมื่อเติม CE ในตัวอย่าง PLA ผสม TPS 50% พบว่า สามารถช่วยให้การผสมเป็นเนื้อเดียวกันและสายโซ่โมเลกุลยาวขึ้น ทำให้ความเสถียรทางความร้อนเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจาก CE ทำให้เกิดโครงสร้างเป็น branch ทำให้ความเป็นผลึกลดลงและการทนความร้อนลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ในการสนับสนุนทุนในการทำโครงการทางวิศวกรรมเพิ่มเติม เพื่อใช้ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Herrera, H. Roch, A. M. Salaberria, M. A. Pino-Orellana, J. Labidi, S. C. M. Fernandes, *et al.*, "Functionalized blown films of plasticized polylactic acid/chitin nanocomposite: Preparation and characterization," *Materials & Design*, vol. 92, pp. 846-852, 2016.
- [2] D. Garlotta, "A Literature Review of Poly(Lactic Acid)," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 9, pp. 63-84, 2001.
- [3] R. Datta and M. Henry, "Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies — a review," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 81, pp. 1119-1129, 2006.
- [4] Y. Srithep, O. Veang-in, and A. Lamom, "Effect of solvents on polylactide fiber morphology prepared by electrospinning process," *RMUTSB Acad. J.*, vol. 7, pp. 216-224, 2019.
- [5] C. J. Weber, V. Haugaard, R. Festersen, and G. Bertelsen, "Production and applications of biobased packaging materials for the food industry," *Food Additives & Contaminants*, vol. 19, pp. 172-177, 2002.
- [6] A. Buléon, P. Colonna, V. Planchot, and S. Ball, "Starch granules: structure and biosynthesis," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 23, pp. 85-112, 1998.
- [7] X. Qiao, Z. Tang, and K. Sun, "Plasticization of corn starch by polyol mixtures," *Carbohydrate Polymers*, vol. 83, pp. 659-664, 2011.
- [8] P. Baytahe, "Improvement of mechanical properties and moisture adsorption of thermoplastic starch using amide derivatives," *Silpakorn University*, 2012.
- [9] Y. Srithep, P. Nealey, and L.-S. Turng, "Effects of annealing time and temperature on the crystallinity and heat resistance behavior of injection-molded poly (lactic acid)," *Polymer Engineering & Science*, vol. 53, 2013.
- [10] W. Lerdwijitjarud, A. Sittattrakul, and J. Keawpara, "The production potential of thermoplastics prepared from starch," *Technology & InnoMAg*, vol. 35, Aug.-Sep. 2008.
- [11] O. Veang-in and Y. Srithep, "Characterization of Polymer Composites between Poly (lactic acid) and Poly (butylene succinate) with Chain Extender," *J Sci Technol MSU*, vol. 36, pp. 517-526, 2017.
- [12] R. Homklin and N. Hongsriphan, "Mechanical and Thermal Properties of PLA/PBS Co-continuous Blends Adding Nucleating Agent," *Energy Procedia*, vol. 34, pp. 871-879, 2013.
- [13] N. Petchwattana, "Plasticization of Poly (vinyl chloride)," *Journal of science & technology, Ubon Ratchathani University*, vol. 13, pp. 30-41, 2011.

- [14] G. Wypych, *Handbook of plasticizers: Third edition*, 2017.
- [15] O. Veang-in and Y. srithep, "Characterization of Using Low Molecular Weight Poly (lactic acid) as a Plasticizer in High Molecular Weight Poly (lactic acid)," in *Proceeding of The 33rd Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand*. 2-5 July 2019, Udon Thani, Thailand, 2019.

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

ประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

ครรชิต เงินคำคง^{1*} นิธิวัฒน์ จำรูญรัตน์¹ จิรายุ หนูคำ¹ ณัฐพงศ์ กันศรี¹ ณัฐพล วงศ์ชาติ¹
นันทน์ภัส เงินคำคง² และพิสิฐ ศรีสุริยจันทร์²

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

² คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

¹ เลขที่ 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

² เลขที่ 155 หมู่ 2 ตำบลแม่เหียะ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50100

รับบทความ 5 มิถุนายน 2563 แก้ไขบทความ 24 กรกฎาคม 2563 ตอรับบทความ 15 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญต่อโลก ปัจจุบันการใช้กระบวนการทางชีวภาพเพื่อกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสัญญาณที่ดีในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นชีวมวลในกระบวนการสังเคราะห์แสง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นถึงประสิทธิภาพของสาหร่ายในการกักเก็บคาร์บอน และผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการเจริญของสาหร่าย การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเลือกสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในอาหารเหลวสูตรซารุค ในถังปฏิกรณ์ขนาด 8 ลิตร โดยให้แสงธรรมชาติ และให้อากาศด้วยเครื่องเติมอากาศตลอด 24 ชั่วโมง ทำการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 100) ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm ตามลำดับ เป็นเวลา 30 วัน ผลการศึกษา พบว่าสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.01 vvm มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเท่ากับ 0.35 ± 0.01 ต่อวัน ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย 0.85 ± 0.00 ค่ามวลสาหร่ายแห้ง 600.00 ± 10.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 96.83 ± 0.76 อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ $1,128.00 \pm 10.00$ มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ค่าการะบรทุกคาร์บอน 20.41 ± 0.26 กรัมต่อวัน และค่าการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 30 วัน อยู่ที่ร้อยละ 3.15 ± 0.02 , 3.11 ± 0.02 และ 3.07 ± 0.06 ที่อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm ตามลำดับ

คำสำคัญ : การกักเก็บคาร์บอน; การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์; สาหร่ายสไปรูลินา RMUTL

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

CO₂ Sequestration Efficiency by *Spirulina* sp. RMUTL

Khanchit Ngoenkhamkhong^{1*} Nithiwat Jumroonrat¹ Jirayu Mookam¹
Nattapong Kansri¹ Nuttapon Wongkhat¹ Nannaphat Ngoenkhamkhong² and
Phisit Seesuriyachan²

¹ Faculty of Engineering, Rajamagala University of Thecnology Lanna

² Faculty of Agro-Industry, Chiang Mai University

¹ 128 Huay Kaew Road, Mueang, Chiang Mai 50300

² 155 Mae-Hea, Mueang, Chiang Mai 50100

Received 5 June 2020; Revised 24 July 2020; Accepted 15 September 2020

Abstract

Increasing concentrations of CO₂ in the atmosphere is causing severe environmental destruction to the earth. Bio-sequestration of CO₂ is a promising way to completely sequester CO₂ by converting it into biomass by way of photosynthesis. The current research focused on biomass productivity and CO₂ sequestration efficiency using microalgae. The experiment choose *Spirulina* sp. RMUTL by cultivating in working volume 8 liters bioreactor with zarrouk's medium for 24-hrs with light nature and aeration air. The CO₂ (100%) was flushed into the medium with a flow rate were 0.01, 0.02 and 0.03 vvm respectively. The period of all experiments were 30 days. The results showed that the maximum specific growth rate, OD₅₆₀, algae biomass productivity, efficiency of CO₂ reduction, CO₂ fixation rate and carbon loading rate were 0.35±0.01 d⁻¹, 0.85±0.00, 600.00±10.00 mg.L⁻¹, 96.83±0.76%, 1,128.00±18.80 mg.L⁻¹.d⁻¹ and 20.41±0.26 g. d⁻¹ with 0.01 vvm CO₂ flow rate. The average CO₂ sequestration over 30 days were 3.15±0.03, 3.11±0.02 and 3.07±0.07% in 0.01, 0.02 and 0.03 vvm CO₂ flow rate respectively.

Keywords : CO₂ Sequestration; Carbon Dioxide Reduction; *Spirulina* sp. RMUTL

* Corresponding Author. Tel.: +668 6184 7248, E-mail Address: Kunchit2516@hotmail.com

1. บทนำ

สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโลกที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง อันมีสาเหตุมาจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในช่วงปฏิวัติอุตสาหกรรมในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศกำลังพัฒนา ซึ่งเป็นตัวเร่งสำคัญที่ก่อให้เกิดการสะสมของปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศทำให้ปรากฏการณ์ก๊าซเรือนกระจกและความเสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีแนวโน้มรุนแรงมากขึ้นในทุกภูมิภาคของโลก อาทิ อุณหภูมิเฉลี่ยที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นในฤดูน้ำหลาก และน้อยลงในฤดูน้ำแล้ง จำนวนวันที่อากาศร้อนเพิ่มมากขึ้นและจำนวนวันที่อากาศเย็นลดลง โดยส่งผลให้เกิดภัยธรรมชาติ เช่น อุทกภัย ภัยแล้ง และวาตภัย ที่รุนแรงและบ่อยครั้งขึ้นเป็นต้น ซึ่งกระทบต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมในหลายสาขา รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศ ชนิดพันธุ์พืช ชนิดพันธุ์สัตว์ การย้ายถิ่นฐานของประชากร และการแพร่กระจายของโรค โดยเฉพาะภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [1] ซึ่งรายงานของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) ได้ระบุให้เป็นภูมิภาคที่มีความเปราะบางสูงต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือภาวะโลกร้อน (Global Warming) และปัญหานี้นับวันทวีความรุนแรงมากขึ้น ทั้งในแง่พื้นที่ สภาพอากาศที่ส่งผลกระทบต่อชีวิตประจำวันของประชาชน และผลลัพธ์ที่ตามมาซึ่งอาจยากจะฟื้นกลับมา หลายชาติทั่วโลกและประเทศไทยได้ร่วมการประชุมนานาชาติเกี่ยวกับปัญหาดังกล่าว ซึ่งปัจจุบันเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ [2] โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างต่อเนื่อง โดยมุ่งเน้นในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ประโยชน์ผ่าน

กระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ซึ่งในปัจจุบันเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสาหร่ายมีการเติบโตโดยใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน และใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์แสง ซึ่งจำเป็นต้องใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารอาหารหลักเพื่อการเติบโตและสร้างมวล ซึ่งเป็นวิธีที่จะช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอน [3] ในขณะเดียวกันสาหร่ายขนาดเล็กยังสามารถกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตได้อีกด้วย นั่นถือว่าเป็นการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างถาวรหรือได้อย่างเป็นระยะเวลายาวนาน อีกทั้งยังพบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เติมลงไปในระหว่างการเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กสามารถกระตุ้นอัตราการผลิตสารชีวมวล โดยสาหร่ายขนาดเล็กสายพันธุ์ *Chorococcum littorale* สามารถเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ให้กลายเป็นสารชีวมวลได้สูงถึง 16.70 กรัมต่อลิตรต่อวัน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สาหร่ายขนาดเล็กเป็นทางเลือกที่เหมาะสมและมีแนวโน้มมากที่สุดในการใช้เพื่อดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สาหร่ายจึงเป็นสิ่งมีชีวิตอีกชนิดหนึ่งที่ช่วยบรรเทาปรากฏการณ์โลกร้อนเช่นเดียวกับพืชทั่วไป [4]

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาถึงประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL โดยคณะผู้วิจัยได้วางกรอบแนวคิดและตั้งสมมุติฐานของการศึกษา โดยศึกษาถึงอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม ส่งผลให้สาหร่ายมีการกักเก็บคาร์บอน รวมไปถึงการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้สาหร่ายเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมิประโยชน์อย่างมาก และยังช่วยแก้ไขปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมควบคู่ไปด้วย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 สาหร่ายที่ใช้ในการศึกษา

สาหร่ายที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ *Spirulina* sp. RMUTL ได้มาจากหลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา เลี้ยงในอาหารเหลวสูตร Zarrouk's Medium และสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาทุกชนิดเป็น Analytical Grade (AR)

2.2 ขั้นตอนการวิจัย

2.2.1 ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมหัวเชื้อสาหร่ายและการเพิ่มปริมาณ

ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายให้ได้ตามปริมาตรที่ต้องการ โดยนำหัวเชื้อสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL มาเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร Zarrouk's Medium โดยใช้หัวเชื้อเริ่มต้นมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 0.10 ทำการเพาะเลี้ยงจนมีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายอยู่ที่ 0.80 ใช้ระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงประมาณ 45 วัน มาถ่ายลงถังขนาด 80 ลิตร ที่บรรจุอาหารเหลว ปริมาตร 50 ลิตร เพื่อทำการเพิ่มปริมาณสาหร่าย โดยใช้แสงจากธรรมชาติและให้อากาศจากเครื่องปั๊มอากาศผ่านหัวทรายเพื่อช่วยกวนน้ำป้องกันการตกตะกอนของเซลล์สาหร่าย ตลอด 24 ชั่วโมง ทำการเลี้ยงสาหร่ายจนมีค่าการดูดกลืนแสง (Optical Density) อยู่ในช่วง 0.30-0.50 โดยใช้เครื่อง UV- Visible Spectrophotometer (Biochrom Libra Model S12; UK) เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อตั้งต้นในการทดลองขั้นต่อไป

2.2.2 ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการเติมก๊าซที่แตกต่างกันของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

นำหัวเชื้อสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงไว้ โดยมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 0.30-0.50 มาทำการศึกษาโดย

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ข้ำ โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร พื้นที่ทำการ 8 ลิตร ในชุดการทดลองที่ 1 (ชุดควบคุม) ให้อากาศจากเครื่องปั๊มอากาศผ่านหัวทรายเพื่อช่วยกวนน้ำป้องกันการตกตะกอนของเซลล์สาหร่าย ในขณะที่ชุดที่ 2 ซึ่งเป็นชุดการทดลองนั้นทำการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 100) ที่อัตราการไหล 0.01 vvm ตลอดเวลาการทดลองโดยใช้เครื่องวัดจ่ายสารเคมี (Watson Marlow Model 502S; UK) ในการวัดจ่ายปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเวลา 30 วัน โดยให้แสงธรรมชาติและให้อากาศจากเครื่องปั๊มอากาศผ่านหัวทรายเพื่อช่วยกวนน้ำป้องกันการตกตะกอนของเซลล์สาหร่าย ตลอด 24 ชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 วัน หลังจากนั้นทำการทดลองซ้ำเดิมและเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จาก 0.01 เป็น 0.02 และ 0.03 vvm (vvm = ปริมาตรก๊าซต่อปริมาตรอาหารต่อนาที) ตามลำดับ

2.2.3 ศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่าย

ศึกษาการเจริญเติบโตของสาหร่ายในรูปของค่าการดูดกลืนแสง รูปค่ามวล [6] เพื่อดูแนวโน้มการเจริญเติบโตของสาหร่าย รวมไปถึงอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate; μ) โดยนำค่ามวลสาหร่ายมาคำนวณ เพื่อดูแนวโน้มอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย ดังสมการที่ (1) [6]

$$\mu = \ln(N_2 - N_1) / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

โดยที่

μ = อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (ต่อวัน)

N_1 = มวลสาหร่ายเริ่มต้นการทดลอง (กรัมต่อลิตร)

N_2 = มวลสาหร่ายวันเก็บตัวอย่าง (กรัมต่อลิตร)

t_1 = ระยะเวลาเริ่มต้นการทดลอง (วัน)

t_2 = ระยะเวลาวันเก็บตัวอย่าง (วัน)

2.2.4 ศึกษาค่าความเป็นกรดต่าง

โดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (Sartorius Meter PP-50; Germany)

2.2.5 ประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าสู่ชุดการทดลอง (Influent of CO₂) และทำการวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหลือจากการใช้ของสาหร่ายที่ออกจากชุดการทดลอง (Effluent of CO₂) โดยใช้เครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซ (Biogas 5000 Geotek; UK) ต่อเข้ากับชุดการทดลอง (ถังปฏิกิริยา) และทำการตรวจวัดทุก ๆ 2 วัน ตลอดการทดลองในชุดการทดลอง แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2) [7]

Efficiency of CO₂ reduction

$$= \frac{(Influent\ of\ CO_2 - Effluent\ of\ CO_2)}{Influent\ of\ CO_2} \times 100 \quad (2)$$

2.2.6 ศึกษาอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL (CO₂ Fixation Rate)

โดยนำค่ามวลสาหร่ายมาคำนวณหาอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายแต่ละชนิด ทำการศึกษาทุก ๆ 2 วัน ตลอดการทดลอง ดังสมการที่ (3) [8]

$$CO_2\ fixation\ rate = 1.88 \times biomass \quad (3)$$

2.2.7 ศึกษาการกักเก็บคาร์บอนของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL (CO₂ Sequestration)

โดยคำนวณจากสมการที่ (4) [9]

CO₂ Sequestration

$$= \frac{(In\ of\ CO_2 - Out\ of\ CO_2)}{dt} \quad (4)$$

โดยที่

In of CO₂ = ร้อยละก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าสู่ระบบ

Out of CO₂ = ร้อยละก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากระบบ

dt = ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป

2.2.8 ศึกษาภาระบรรทุกคาร์บอน (Carbon Loading Rate; CLR.) ที่คิดเข้าสู่ระบบคิดเทียบกับค่าเฉลี่ยชีวมวลของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

โดยคำนวณจากสมการที่ (5)

$$CLR = \frac{CO_2\ Influent}{Conc.\ of\ microalgae} \quad (5)$$

โดยที่

CO₂ Influent = ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ระบบ (กรัมต่อวัน)

Conc. of microalgae = น้ำหนักของสาหร่ายทั้งหมดในถังไบโอรีเอคเตอร์ (กรัม)

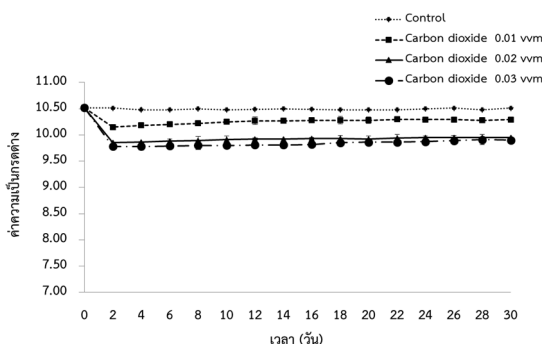
2.3 การรวบรวมข้อมูล

นำข้อมูลความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย มวลสาหร่าย อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ ประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภาระบรรทุกคาร์บอน และการกักเก็บคาร์บอนของสาหร่ายที่อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่างกันมาวิเคราะห์ความแตกต่างโดยเปรียบเทียบทุกคู่พร้อมกันในแนวนอนด้วยวิธี Tukey simultaneous ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม Minitab version 16 (Minitab Inc., USA)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ค่าความเป็นกรดต่าง

จากการศึกษาการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าความเป็นกรดต่างของอาหารเหลวของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL มีค่าความเป็นกรดต่างของอาหารเหลวเมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 100) ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02, 0.03 vvm และชุดควบคุม พบว่า มีค่าความเป็นกรดต่างของอาหารเหลวอยู่ระหว่าง 10.15 ± 0.04 - 10.52 ± 0.01 , 9.85 ± 0.01 - 10.52 ± 0.01 , 9.75 ± 0.04 - 10.52 ± 0.01 และ 10.48 ± 0.01 - 10.52 ± 0.01 ตามลำดับ (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความเป็นกรดต่างของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

3.2 ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย

Spirulina sp. RMUTL

จากการศึกษาการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความหนาแน่นสูงสุดของเซลล์สาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL (ตารางที่ 1) พบว่ามีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 100) ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02, 0.03 vvm และชุดควบคุม คือ 0.85 ± 0.00 , 0.77 ± 0.02 , 0.62 ± 0.01 และ 0.58 ± 0.01 ตามลำดับ

จากการศึกษาพบว่า เมื่อมีการเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นค่า

ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL มีแนวโน้มลดลง และค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายในทุกชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายมากกว่าชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL เนื่องจากสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ในทุกชุดการทดลองมีการนำเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญจึงทำให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นสาหร่ายจะเข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตช้าลง ทำให้ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายมีแนวโน้มลดลง เมื่อสาหร่ายเข้าสู่ระยะหยุดการเจริญเติบโต ทำให้ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น การเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.01 vvm มีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุดของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL สูงที่สุดต่อวัน จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยง

3.3 มวลสาหร่ายแห้ง (Algae Biomass)

จากการศึกษาการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมวลสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL พบว่า ค่ามวลสาหร่ายเมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 100) ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02, 0.03 vvm และชุดควบคุม คือ 600.00 ± 10.00 , 425.00 ± 8.66 , 391.67 ± 18.93 และ 378.33 ± 70.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และยังพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดต่างและมวลสาหร่าย พบว่า การเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อมวลสาหร่าย โดยชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.01 vvm มีมวลสาหร่ายมากกว่าชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.02, 0.03 vvm และชุดควบคุม จากรายงานวิจัยของ Z. Xianhai et al.

[10] พบว่า ค่าความเป็นกรดต่างมีผลต่อค่ามวลสาหร่าย และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และยังพบว่า สาหร่าย *Spirulina platensis* จะเจริญเติบโตได้ดีจะมี ค่าความเป็นด่างอยู่ที่ 9.00 และมีค่ามวลสาหร่ายมากถึง 5,410 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนรายงานการวิจัยของ

M.A.C. de Oliveira et al. [11] พบว่า ค่าความเป็น กรดต่างที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina maxima* อยู่ในช่วง 8.50-9.50 ทำให้มีค่ามวลสาหร่าย และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะที่สูง

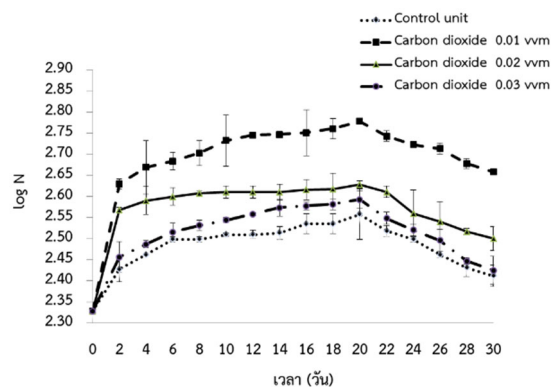
ตารางที่ 1 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุด (OD_{560}) มวลสาหร่ายแห้ง สูงสุด (Algae Biomass) อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (Specific Growth Rate) ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02, 0.03 vvm และชุดควบคุม

Parameter	CO ₂ flow rates			
	Control	0.01 vvm	0.02 vvm	0.03 vvm
OD_{max}	0.58±0.01D	0.85±0.00A	0.77±0.02B	0.62±0.01C
Algae biomass _{max} (mg/L)	378.33±70.06B	600.00±10.00A	425.00±8.66B	391.67±18.93 B
μ_{max} (d ⁻¹)	0.12±0.03B	0.35±0.01A	0.28±0.01A	0.15±0.04B

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ย (±S.D.) ในแถวแนวนอนอักษรภาษาอังกฤษกำกับ (A, B, C และ D) ต่างกันแสดงว่ามีความ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยวิธี Tukey simultaneous



รูปที่ 2 สาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ที่ได้จากการศึกษากำลังขยาย 1,500X (Scanning Electron Microscope; JEOL JSM-5910LV)



รูปที่ 3 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการ เจริญของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

3.4 ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate; μ)

จากการศึกษาการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มี ต่อค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย

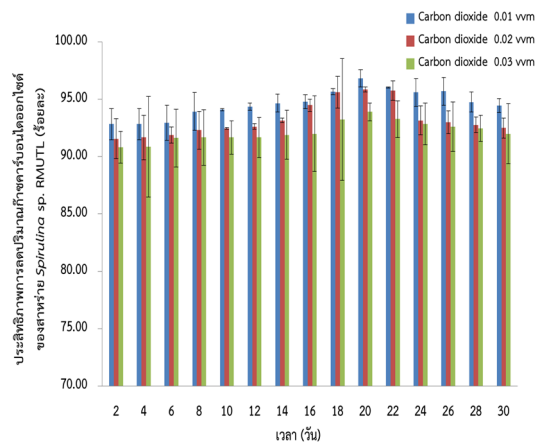
Spirulina sp. RMUTL พบว่า อัตราการเจริญเติบโต จำเพาะสูงสุดของสาหร่ายที่อัตราการไหล 0.01, 0.02, 0.03 vvm และชุดควบคุม คือ 0.35±0.01, 0.28±0.01, 0.15±0.04 และ 0.12±0.03 ต่อวัน ตามลำดับ และยัง พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง log N และเวลา เมื่อมีการ

เติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL มีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 3) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะในทุกชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะมากกว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่อย่างไรก็ตามอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีส่วนสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่แตกต่างกันไป [12]

3.5 การลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Efficiency of CO₂ Reduction) ค่าอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Fixation Rate) ค่าภาระบรรจุคาร์บอน (Carbon Loading Rate; CLR.) และการกักเก็บคาร์บอน (CO₂ Sequestration) ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

จากการศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL พบว่า ชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยที่ร้อยละ 94.63±1.02, 93.26±1.47 และ 92.17±0.88 ตามลำดับ (ตารางที่ 2) และลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในวันที่ 20 คือ ร้อยละ 96.83±0.76, 95.87±0.21 และ 93.90±0.79 ตามลำดับ (รูปที่ 4) เมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อยๆ ลดลงเพราะว่าอัตราการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL เมื่อเวลานานขึ้นเริ่มอิ่มตัว

จากการศึกษายังพบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดต่างกับประสิทธิภาพการลดก๊าซ



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

คาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่สุดในวันที่ 20 อยู่ที่ร้อยละ 96.83±0.76 ซึ่งมีความเป็นด่างอยู่ที่ 10.28±0.01 สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ B. Melanie et al. [13] พบว่า ค่าความเป็นกรดต่างมีผลต่อประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina platensis* ผลการศึกษาพบว่าสาหร่าย *Spirulina platensis* มีความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 9.50-10.00 มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ระหว่างร้อยละ 90-100 ส่วนงานวิจัยของ Z. Xianhai et al. [10] พบว่า *Spirulina platensis* มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องมีอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดเวลาโดยมีอัตราการเติมอยู่ที่ 20 มิลลิเมตรต่อลิตรต่อวัน และ C. Alison [14] ทำการศึกษาการใช้สาหร่ายในการบำบัดน้ำเสียและลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า สาหร่าย *Spirulina maxima* มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ถึงร้อยละ 98 แสดงถึงสาหร่าย *Spirulina* sp. สามารถทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นสูง ๆ ได้ดี สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ

F. M. Salih [15] พบว่า สาหร่าย *Cyanidium caldarium* และสาหร่าย *Scenedesmus* sp. สามารถทนต่อปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ (% Volume/Volume) 100 และ 80 ตามลำดับ ซึ่งมีศักยภาพในการที่จะลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย (Efficiency of CO₂ Reduction) อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ย (CO₂ Fixation Rate) ภาระบรรทุกคาร์บอนเฉลี่ย (Carbon Loading Rate; CLR.) และการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 30 วัน (CO₂ Sequestration) ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm

Parameter	CO ₂ flow rates		
	0.01 vvm	0.02 vvm	0.03 vvm
Efficiency of CO ₂ reduction _{ave} (%)	94.63±1.02A	93.26±1.47B	92.17±0.88C
CO ₂ fixation rate _{ave} (mg.L ⁻¹ .d ⁻¹)	943.50±170.90A	707.30±101.90B	617.90±91.70B
CLR _{ave} (g.d ⁻¹)	20.41±0.26A	54.44±0.83B	93.49±1.50C
CO ₂ sequestration _{ave} (%)	3.15±0.03A	3.11±0.02A	3.07±0.07A

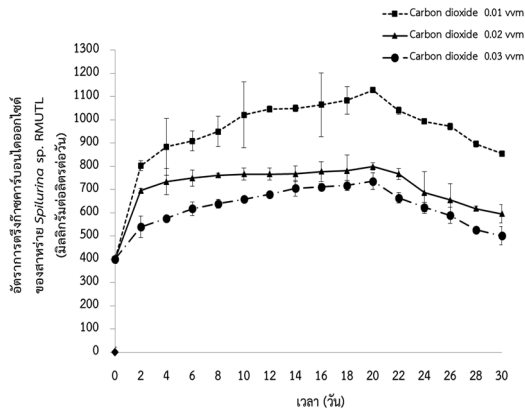
หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ย (±S.D.) ในแถวแนวนอนอักษรภาษาอังกฤษกำกับ (A, B และ C) ต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยวิธี Tukey Simultaneous

จากการศึกษาอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL พบว่า ชุดการทดลองที่เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm มีอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยอยู่ที่ 943.50±170.90, 707.30±101.90 และ 617.90±91.70 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ (ตารางที่ 2) และมีอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สูงสุดในวันที่ 20 คือ 1,128.00±18.80, 799.00±16.30 และ 736.30±35.60 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ (รูปที่ 5) จากรายงานวิจัยของ M. Michele Greque de and C. Jorge Alberto Viera [16] พบว่า สาหร่าย *Spirulina* sp. มีอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 413 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ส่วนสาหร่าย *Spirulina platensis* มีอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 920 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน [17] และ 220 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน [18] ส่วนค่าภาระบรรทุกคาร์บอน (Carbon Loading Rate; CRL.) ที่เข้าสู่ระบบคิดเทียบกับค่าเฉลี่ยมวลสาหร่าย *Spirulina* sp.

RMUTL ที่อยู่ในระบบมีค่าเท่ากับ 20.41±0.26, 54.44±0.83 และ 93.49±1.50 กรัมต่อวัน ตามลำดับ

จากตารางที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยสูงสุดที่อัตราการไหล 0.01 vvm คือ ร้อยละ 94.63±1.02 เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไปวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลที่ 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) ส่วนค่าอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL เฉลี่ยสูงสุด คือ 943.50±170.90 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน และเมื่อนำข้อมูลอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลทั้ง 3 ชนิด ไปวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของลักษณะอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย พบว่า อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลที่ 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm มีความ

แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ส่วนอัตราการไหลที่ 0.02 และ 0.03 vvm ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)



รูปที่ 5 อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL

จากการศึกษาผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการกักเก็บคาร์บอนของสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL พบว่า ค่าการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 30 วัน เมื่อเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 100) ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm อยู่ที่ร้อยละ 3.15 ± 0.03 , 3.11 ± 0.02 และ 3.07 ± 0.07 ตามลำดับ (ตารางที่ 2) เมื่อนำข้อมูลค่าการกักเก็บคาร์บอนของสาหร่ายที่ได้จากการศึกษาไปวิเคราะห์หาค่าความแตกต่างของลักษณะการกักเก็บคาร์บอนของสาหร่าย พบว่า อัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลที่ 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

4. สรุป

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกักเก็บคาร์บอน รวมไปถึงศึกษาอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน และให้ผลผลิตที่ดี ในอัตราการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 100) ที่อัตราการไหล 0.01, 0.02 และ 0.03 vvm ผลการศึกษา พบว่า ที่อัตราการไหล 0.01 vvm การเจริญเติบโตของสาหร่าย

และประสิทธิภาพในการกักเก็บคาร์บอนดีกว่าที่อัตราการไหล 0.02 vvm และ 0.03 vvm โดยสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด 0.35 ± 0.01 ต่อวัน มีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุด 0.85 ± 0.00 มวลสาหร่ายสูงสุด 600.00 ± 10.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดร้อยละ 96.83 ± 0.76 อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด $1,128.00\pm18.80$ มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ส่วนค่าภาระบรรจุคาร์บอนที่เข้าสู่ระบบคิดเทียบกับค่าเฉลี่ยมวลสาหร่าย *Spirulina* sp. RMUTL ที่อยู่ในระบบมีค่าเท่ากับ 20.41 ± 0.26 กรัมต่อวัน และค่าการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 30 วัน อยู่ที่ร้อยละ 3.15 ± 0.02

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้สาหร่ายเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีประโยชน์อย่างมาก สามารถนำไปประยุกต์ใช้การกำจัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดมลพิษเป็นจำนวนมาก และยังช่วยแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมควบคู่ไปด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้ทุนอุดหนุนจากสำนักงานประสานงานโครงการวิจัยการพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานความหลากหลายทางชีวภาพ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, *Report of Climate Change, 1st ed.* Thailand: Text & Journal Public Company Limited, 2016.
- [2] Thairath. (2020, December 14). Climate Change. [Online]. Available: www.thairath.co.th/news/foreign/1723933

- [3] J.-W., Ahn, K. Hwangbo, S. Y. Lee, H.-G. Choi, Y.-L. Park, J. R. Liu and W.-J. Jeong, "Shorth communication anew arctic *Chlorella* species for biodiesel production," *Bioresource Technology*, vol. 125, pp. 340-343, Dec. 2012.
- [4] P. Chitsanuphong, "Feasibility study of carbon dioxide recycling using a biological wastewater treatment system for industrial sources," *Journal of Enviromental management*, vol. 11, pp. 106-133, Dec. 2015.
- [5] A. Toledo-Cervantes, M. Marcia, N. Eberto and R. Sergio, "Carbon dioxide fixation and lipid storage by *Scenedesmus obtusiusculus*," *Bioresource Technology*, vol. 130, pp. 652-658, Dec. 2012.
- [6] H. Seyedmahdi, A. Abbas, A. saeed, H. Mohamad Sadegh and M. Fatemeh, "Growht response of *Spirulina platensis* PCC9108 to elevated CO₂ levels and flue gas," *Biological Journal of Microorganism*, vol. 2, no. 8, pp. 29-36, Nov. 2014.
- [7] K. Chien-Y, C. Sheng-Yi, H. Tzu-Ting, D. Le, H. Ling-Kang and L. Chih-Shern, "Abitity of a mutant strain of the microalgae *Chlorella* sp. to capture carbon dioxide for biogas upgrading," *Applied Energy*, vol. 93, pp. 176-183, Jan. 2012.
- [8] H. Shih-Hsin, C. Chun-Yen, L. Duu-Jong and C. Jo-Shu, "Perspectives on microalgal CO₂-emission mitigation systems-A review," *Biotechnology Advances*, vol. 29, pp. 189-198, Nov. 2010.
- [9] K. Wriju, G. Anuradda and M. Suparna, "Estimation of carbon dioxide sequestration potential of microalgae grown in a batch photobioreactor," *Bioresource Technology*, vol. 180, pp. 370-375, Jan. 2015.
- [10] Z. Xianhai, D. Michael K., Z. Shiduo, Z. Xia, W. Mengyang, C. Xiao Dong, N. I-Son, J. Keju and L. Yinghua, "Autotrophic cultivation of *Spirulina platensis* for CO₂ fixation and phycocyanin production," *Chemical Engineering Journal*, vol. 183, pp. 192-197, Dec. 2011.
- [11] M.A.C. de Oliveira, M.P.C. Monterio, P.G. Robb and S.G.F. Lewite, "Growth and Chemical composition of *Spirulina maxima* and *Spirulina patensis* biomass at different temperature," *Aquaculture International*, vol. 7, pp. 261-275, Jul. 1999.
- [12] E. Suali and R. Sarbatly, "Conversion of microalgae to biofuel," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 4316-4342, Aug. 2012.
- [13] B. Melanie, D. Ignacio, D. Antonio, S. Armando Gonzalez and M. Raul, "Microalgal-Biotechnology as a platform for an integral biogas upgrading and nutrient removal from anaerobic effluents," *Environmental Science & Technology*, vol. 48, pp. 573-581, Dec. 2013.
- [14] C. Alison, *Use of microalgae in wastewater treatment to remove*

- contaminants and purify biogas*, 1st ed, Canady: University of Guelph, 2011.
- [15] F. M. Salih, "Microalgae tolerance to high concentrations of carbon dioxide: A review," *Environmental Protection*, vol. 2, pp. 648-654, Jan. 2011.
- [16] M. Michele Greque de and C. Jorge Alberto Vieira, "Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors," *Biotechnol Lett*, vol. 29, pp. 1349-1352, May. 2007.
- [17] A. Kumar, X. Yuan, A.K. Sahu, S.J. Ergas, H. Van Langenhove, and J. Dewulf, "A hollow fiber membrane photo-bioreactor for CO₂ sequestration from combustion gas coupled with wastewater treatment: a process engineering approach," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 85, pp. 387-394, Mar. 2010.
- [18] E.B. Sydney, W. Sturm, J.C. de Carvalho, V. Thomaz-Soccol, C. Larroche, A. Pandey, and C.R. Soccol, "Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae," *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 5892-5896, Aug. 2010.

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

การตรวจวัดปริมาณฟอสเฟตในน้ำผิวดินจังหวัดลพบุรี ด้วยระบบวิเคราะห์แบบโพลีเมรีซิงโพลีเมอร์อย่างง่าย

ปิยวรรณ พันสี^{1*} จันทิรา กออินทร์¹ และ ดวงใจ นาคะปรีชา²

¹ สาขาวิชาเคมี (หลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

² ภาควิชาเคมี และศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

¹ 321 ถนนนารายณ์มหาราช ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000

² 272 ถนนพระรามที่ 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400

รับบทความ 26 เมษายน 2563 แก้ไขบทความ 28 กรกฎาคม 2563 ตอบรับบทความ 15 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบวิเคราะห์แบบโพลีเมรีซิงโพลีเมอร์อย่างง่ายสำหรับตรวจวัดปริมาณฟอสเฟตแบบอัตโนมัติในตัวอย่างน้ำด้วยวิธีโพลีเมรีซิงโพลีเมอร์ ในขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่างถูกฉีดเข้าสู่ระบบโดยก่อนตัวอย่างจะถูกผสมเข้ากับกระแสรีเอเจนต์ ซึ่งมีสารละลายกรดแอสคอร์บิกเป็นตัวรีดิวซ์ ทำให้เกิดเป็นสารเชิงซ้อนสีน้ำเงิน และตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารที่ 880 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สภาวะที่เหมาะสมของระบบนี้คืออัตราการไหลของสารละลายตัวพา 2 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาตรของสารตัวอย่าง 1,000 ไมโครลิตร ความยาวท่อผสมสาร 60 เซนติเมตร และความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก 0.020 โมลต่อลิตร ระบบนี้มีความน่าเชื่อถือ มีความไวในการวิเคราะห์สูง ใช้รีเอเจนต์ปริมาณน้อย และวิเคราะห์ได้รวดเร็ว (52 ตัวอย่างต่อ 1 ชั่วโมง) โดยขีดจำกัดของการตรวจวัด (LOD) มีค่าเท่ากับ 0.015 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ค่าความเที่ยงตรง (% RSD) จากการฉีดสารละลายมาตรฐาน 0.50 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัสต่อลิตรในระบบจำนวน 10 ครั้ง เท่ากับร้อยละ 1.81 ระบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำผิวดินในจังหวัดลพบุรีโดยจากการเทียบปริมาณวิเคราะห์ของระบบวิเคราะห์แบบโพลีเมรีซิงโพลีเมอร์กับวิธีมาตรฐาน พบว่าให้ผลสอดคล้องกันทางสถิติแบบ pair t-test ($t_{\text{stat}} 0.04 < t_{\text{crit}} 2.36$) ระบบวิเคราะห์แบบโพลีเมรีซิงโพลีเมอร์นี้ไม่มีการรบกวนจากอาร์เซนและซิลิเกตสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำธรรมชาติ

คำสำคัญ : การวิเคราะห์แบบโพลีเมรีซิงโพลีเมอร์; ฟอสเฟต; น้ำผิวดิน

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

Determination of Phosphate in Surface Water of Lopburi Province Using a Simple Flow Injection Analytical System

Piyawan Phansi^{1*} Jantira Koin¹ and Duangjai Nacapricha²

¹ Department of Chemistry (Education program), Faculty of Science and Technology,
Thepsatri Rajabhat University

² Department of Chemistry and Center of Excellence for Innovation in Chemistry, Faculty of Science,
Mahidol University

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

² 272 Rama VI Road, Phayathai, Ratchathewi, Bangkok, 10400, Thailand

Received 26 April 2020; Revised 28 July 2020; Accepted 15 September 2020

Abstract

A simple flow injection analytical system for an automatic determination of phosphate in water samples using the molybdenum blue method was developed. Samples were injected and mixed with ascorbic acid used as a reducing agent. The absorbance of the resulting molybdenum blue complex was measured at 880 nm by a spectrophotometer. The optimal conditions of this system were 2 mL/min of carrier flow rate, 1,000 μ L of sample volume, 60 centimeters of mixing tube length, and 0.020 mol/L of ascorbic acid. The proposed method showed reliability, high sensitivity, spend small amount of reagents and samples, and fast sample throughput (52 samples/hour). The limit of detection (LOD) was 0.015 mg P/L of phosphate. Precision obtained injecting a phosphate standard solution of 0.50 mg P/L ($n=10$) was 1.81%. This system can be applied to determination of phosphate content in surface water samples in Lopburi province by comparing with a standard method. It was found that obtained from the developed system agreed well with the standard method using the pair t -test ($t_{\text{stat}} 0.04 < t_{\text{crit}} 2.36$). This flow injection analysis system has no effect from arsenate and silicate interference for the analysis of natural water samples.

Keywords : Flow Injection Analysis; Phosphate; Surface Water

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

1. บทนำ

มลพิษทางน้ำเป็นหนึ่งในปัญหาระดับโลกที่สำคัญ เนื่องจากคุณภาพน้ำส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด [1] ซึ่งปัญหาของมลพิษทางน้ำมีสาเหตุหลักมาจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น สารเคมี น้ำทิ้งจากบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม หรือจากการเกษตร เป็นต้น [2], [3] นอกจากนี้ปัญหามลพิษทางน้ำยังเกิดได้เองตามธรรมชาติ เช่น การเกิดน้ำท่วมหรืออุทกภัย เป็นต้น ไม่กี่ปีที่ผ่านมาเกิดอุทกภัยครั้งใหญ่ที่สุดของประเทศไทยในรอบกว่า 50 ปีในช่วงเดือนกรกฎาคม - ธันวาคม [4]-[8] วิกฤตน้ำท่วมไม่เพียงส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของผู้นคนและสัตว์น้ำเท่านั้น แต่ยังส่งผลกระทบต่อภาคเศรษฐกิจต่าง ๆ ในประเทศไทยโดยเฉพาะการเกษตรและการประมง [5] การปนเปื้อนของน้ำเป็นผลมาจากอุทกภัยครั้งใหญ่ทำให้เกิดปัญหารุนแรง [8], [9] ดังนั้นวิธีที่รวดเร็วและเชื่อถือได้สำหรับการประเมินคุณภาพน้ำในหลาย ๆ พื้นที่ในช่วงเวลาเดียวกันจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการตรวจสอบคุณภาพน้ำได้อย่างทัน่วงที

ฟอสเฟตเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สามารถบ่งชี้ในการประเมินคุณภาพน้ำในห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม ซึ่งฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ ฟอสฟอรัสในรูปแบบออร์โธฟอสเฟต (PO_4^{3-}) เป็นรูปแบบที่ใช้โดยพืชที่มักพบในน้ำตามธรรมชาติ แต่หากปริมาณฟอสเฟตที่เพิ่มสูงขึ้นในน้ำช่วยกระตุ้นการเติบโตของแพลงก์ตอนและพืชน้ำ เช่น สาหร่ายเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว [10] พืชเหล่านี้ใช้ออกซิเจนจำนวนมากและป้องกันไม่ให้แสงแดดส่องลงสู่ก้นน้ำ ทำให้ปลาและสิ่งมีชีวิตในน้ำจำนวนมากอาจตายเนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำและนำไปสู่มลพิษทางน้ำที่เรียกว่ายูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งค่าฟอสเฟตในน้ำผิวดินไม่ควรเกิน 0.1 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร (mg P/L) [11] ดังนั้นการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตในน้ำจึงมีความจำเป็นเพื่อสามารถนำข้อมูลมาวางแผนการในการป้องกันและแก้ไขปัญหามลพิษทางน้ำ

วิธีมาตรฐานที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตในน้ำคือวิธีโมลิบดีนัมบลู (Molybdenum Blue Method) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยการเทียบสี (Colorimetric Method) คือการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟอสเฟตกับโมลิบดีตในสารละลายกรด เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีเหลืองของโมลิบดีนัมฟอสเฟต จากนั้นรีดิวซ์สารประกอบดังกล่าวด้วยตัวรีดิวซ์ ได้แก่ ทิน (II) คลอไรด์ หรือ กรดแอสคอร์บิก จะได้ ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีน้ำเงินและตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660-880 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ [12]

ปัจจุบันมีการนำเทคนิคการวิเคราะห์แบบไหลมาใช้ในการวิเคราะห์อย่างกว้างขวาง เช่น การวิเคราะห์แบบไหลชนิดโพลินเจกชัน (Flow Injection Analysis, FIA) และการวิเคราะห์แบบไหลตามลำดับ (Sequential Injection Analysis, SIA) ซึ่งเป็นระบบอัตโนมัติที่ช่วยให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำสูง ลดการใช้ปริมาณสารเคมี และสามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว และไม่ต้องรอให้สารทำปฏิกิริยาจนถึงจุดสมดุล (Equilibrium Time) [13]-[15]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาระบบวิเคราะห์แบบไหลชนิดโพลินเจกชันอย่างง่ายสำหรับวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตในน้ำผิวดินด้วยวิธีโมลิบดีนัมบลู โดยใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นสารรีดิวซ์ และตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร โดยสภาวะศึกษาในการทดลองนี้ได้แก่ อัตราการไหลของสารละลายตัวพา ปริมาตรของสารตัวอย่าง ความยาวท่อผสมสาร ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก และผลการรบกวนจากอาร์เซนิตและซิลิเกต ระบบวิเคราะห์โพลินเจกชันอย่างง่ายนี้นำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำในเขตจังหวัดลพบุรี ซึ่งเป็นชุมชนท้องถิ่นที่มีแหล่งน้ำผิวดินสำคัญหลายแห่งที่นำมาใช้การเกษตร การประมง และการดำรงชีวิตประจำวัน

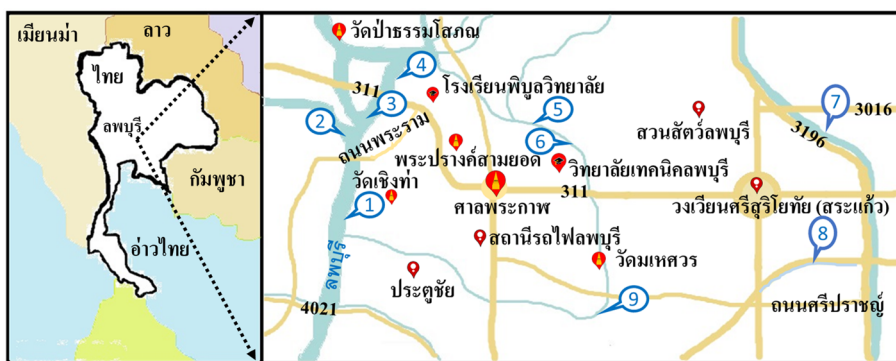
2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเกรดสำหรับวิเคราะห์ (AR grade) และน้ำปราศจากไอออน (Sartorius, arium® advance EDI, สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน) ในการเตรียมสารมาตรฐานและรีเอเจนต์ทั้งหมด สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต หรือ R1 เข้มข้น เท่ากับ 9.71 มิลลิโมลต่อลิตร โดยผสมระหว่างแอมโมเนียมโมลิบเดต $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Ajax Finechem, เครือรัฐออสเตรเลีย) และเติมกรดทาร์ทริก $(\text{CHOCHCOOH})_2$, Ajax Finechem, เครือรัฐออสเตรเลีย) 2.410 กรัมต่อลิตร ซึ่ง R1 เตรียมในสารละลายกรดซัลฟริก (H_2SO_4 , Lab Scan, ประเทศไอร์แลนด์) เข้มข้น 0.6 โมลต่อลิตร [13] สารละลายกรดแอสคอร์บิก (R2) $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$, Chem-supply, เครือรัฐออสเตรเลีย) 0.020 โมลต่อลิตร ซึ่งใช้เป็นสารละลายรีดิวซ์เอเจนต์ สารละลายฟอสเฟตเข้มข้นเริ่มต้น 100

มิลลิลิตรฟอสฟอรัสต่อลิตร โดยจากโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4 , Ajax Finechem, เครือรัฐออสเตรเลีย) ที่ผ่านการอบที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้ว และสารละลายฟอสเฟตเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิลิตรฟอสฟอรัสต่อลิตร จะถูกนำมาเจือจางเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

ในการศึกษาตัวรบกวนในการวิเคราะห์ค่าฟอสเฟต มีการเตรียมละลายอาร์เซนเนตและสารละลายซิลิเกต โดยสารละลายอาร์เซนเนตเข้มข้น 50 มิลลิกรัมอาร์เซนิกต่อลิตร (mg As/L) เตรียมจากโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซนเนตเฮปตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, Alfa Aesar, อินเดีย) และสารละลายซิลิเกตเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมซิลิเกตต่อลิตร (mg Si/L) เตรียมจากโซเดียมเมตะซิลิเกตเพนตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Daejung, เกาหลี) สารละลายอาร์เซนเนตและสารละลายซิลิเกตถูกนำมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการทดลองต่อไป



รูปที่ 1 แผนที่แสดงบริเวณที่เก็บน้ำตัวอย่างในการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟต

2.2 การเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ได้เก็บตัวอย่างน้ำตามแนวแม่น้ำลพบุรี และคลองในบริเวณเขตพื้นที่อำเภอเมืองลพบุรี จังหวัด ลพบุรี วันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2562 จำนวน 9 จุด ดังแสดงในแผนที่ในรูปที่ 1 และทำการเก็บตัวอย่าง แสดงในตารางที่ 1 อุณหภูมิของน้ำตัวอย่างอยู่ระหว่าง 29 - 30 องศาเซลเซียส โดยกรองตัวอย่างด้วยแผ่นเยื่อ

กรองที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร (Cellulose Acetate Membrane, Satorious Stedium Biotech, สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน) แล้วเก็บในขวดพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน และเก็บรักษาในตู้แช่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนการวิเคราะห์นำตัวอย่างออกมาจากตู้แช่และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) โดยตัวอย่างเก็บไม่เกิน 2 วัน [13]

ตารางที่ 1 พิกัดของการเก็บตัวอย่างน้ำ

จุดที่	ละติจูด	ลองจิจูด
1	14° 47' 54.1"N	100° 36' 27.2"E
2	14° 48' 17.4"N	100° 36' 29.5"E
3	14° 48' 21.7"N	100° 36' 36.9"E
4	14° 48' 23.7"N	100° 36' 38.2"E
5	14° 48' 21.2"N	100° 37' 00.2"E
6	14° 48' 15.2"N	100° 37' 04.8"E
7	14° 48' 20.9"N	100° 37' 08.3"E
8	14° 47' 46.7"N	100° 38' 17.7"E
9	14° 47' 39.2"N	100° 37' 02.9"E

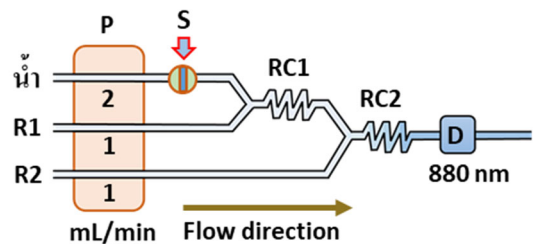
2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

ระบบโพลินเจกชันสำหรับการวิเคราะห์ฟอสเฟตประกอบด้วยปั๊มแบบลูกกลิ้ง (Leab Fluid, BT101 S, สารานุกรมรัฐประชาชนจีน) โดยใช้ร่วมกับท่อปั๊มแบบไทกอน (Tygon Tube) เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.02 มิลลิเมตร โดยปั๊มตัวที่ 1 จะต่อกับวาล์วแบบ 6 ช่อง (Upchurch, Model V-450, สหรัฐอเมริกา) เพื่อใช้ในการฉีดสารละลายตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าไปในระบบ ในระบบเชื่อมด้วยท่อ FTFE (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มิลลิเมตร) เชื่อมต่อกับท่อช่วยผสม (Reaction Coil) ยาว 60 เซนติเมตร (RC1 และ RC2) ทำจากท่อขนาดเดียวกันพันขดเป็นเกลียว เพื่อช่วยผสมสารตัวอย่างกับสารรีเอเจนต์ R1 และ R2 ให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง

สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Thermo Scientific, Evolution 201 UV-Visible Spectrophotometer, สหรัฐอเมริกา) โดยใช้โฟลทิวเซลล์ชนิดควอตซ์ (Quartz Flow Cell, Thermo Fisher Scientific, Model 268-857400, สหรัฐอเมริกา) ที่มีทางผ่านของแสง 10 มิลลิเมตร ปริมาตร 160 ไมโครลิตร

2.4 การปฏิบัติงานของระบบโพลินเจกชัน

สารละลายตัวอย่างหรือสารละลายมาตรฐานจะถูกฉีดเข้าสู่ระบบโดยวาล์วฉีดสารตัวอย่าง ซึ่งกำหนดปริมาตรตัวอย่างโดยใช้ท่อกำหนดปริมาตร (Injection loop) ขนาด 1000 ไมโครลิตร โดยท่อนโซนของสารตัวอย่างนี้จะเข้าไปในกระแสของน้ำที่ขับเคลื่อนโดยปั๊มแบบลูกกลิ้ง ด้วยอัตราการไหลคงที่ 2 มิลลิิตรต่อนาที ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวพาสารละลายตัวอย่างไปทำปฏิกิริยากับสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (R1) และสารละลายกรดแอสคอร์บิก (R2) ตามลำดับ ซึ่งขับเคลื่อนรีเอเจนต์ R1 และ R2 ถูกด้วยปั๊ม ด้วยอัตราการไหลคงที่ 1 มิลลิิตรต่อนาที เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินและด้วยวัดค่าการดูดกลืนของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบโพลินเจกชันที่พัฒนาขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ฟอสเฟต ประกอบด้วยปั๊ม (P) วาล์ว (V) ท่อช่วยผสม (RC1 และ RC2) สารตัวอย่างหรือสารมาตรฐาน (S) สารละลายรีเอเจนต์ (R1 และ R2) และเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (D)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

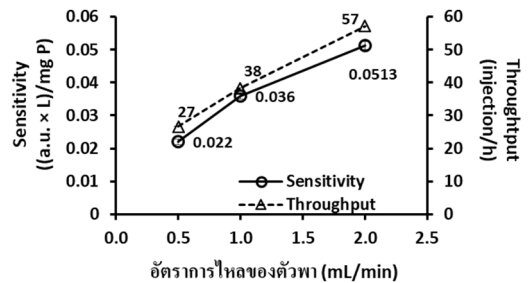
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการวิเคราะห์ฟอสเฟตด้วยระบบโพลินเจกชัน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลของสารละลายตัวพา ปริมาตรของสารตัวอย่าง ความยาวท่อผสมสารและความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก หลังจากนั้นจะใช้

สภาวะที่เหมาะสมศึกษาผลของตัวรับกวน ประยุกต์ใช้ในวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำผิวดิน และการตรวจสอบการใช้ได้ของวิธี

3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระบบ

3.1.1 ผลของอัตราการไหลของกระแสตัวพา

ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำเป็นตัวพา (Carrier) สารละลายตัวอย่างเข้าสู่ระบบ ซึ่งการอัตราการไหลของกระแสตัวพาจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของสาร และความรวดเร็วในการวิเคราะห์สาร ในการทดลองนี้ศึกษาอัตราการไหลของกระแสตัวพา 0.5, 1 และ 2 มิลลิลิตรต่อนาที โดยอัตราการไหลของรีเอเจนต์คงที่ได้แก่ สารละลายสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (R1) และสารละลายสารละลายกรดแอสคอร์บิก (R2) มีอัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้ปริมาตรตัวอย่าง 500 ไมโครลิตร และใช้ท่อผสมสารที่ 1 (RC1) และท่อผสมสารที่ 2 (RC2) ยาว 60 เซนติเมตร โดยฉีดสารละลายมาตรฐาน 0.50–1.00 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความไวของกระแสตัวพาจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินมากขึ้น ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของสารเพิ่มขึ้น และเมื่อค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานมาพล็อตกราฟมาตรฐาน และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายตัวพากับค่าความไว และค่าจำนวนตัวอย่างต่อชั่วโมงในการวิเคราะห์ (Sample Throughput) พบว่าการเพิ่มความไวของกระแสตัวพาตั้งแต่ 0.5–2 มิลลิลิตรต่อนาทีนี้จะทำให้ค่าความไวในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้น ซึ่งความไวในการวิเคราะห์ได้จากความชันของกราฟมาตรฐาน และการเพิ่มอัตราการไหลก็ทำให้ได้จำนวนตัวอย่างต่อชั่วโมงมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มความไวของกระแสตัวพานี้จะไปช่วยให้ตัวอย่างหรือสารละลายมาตรฐานผสมกับรีเอเจนต์ได้ดีมากขึ้น และลดการเจือจางของท่อนโซนสารตัวอย่างในกระแสตัวพา (ดังรูปที่ 3) แต่หากใช้กระแสตัวพามากกว่า 2 มิลลิลิตร



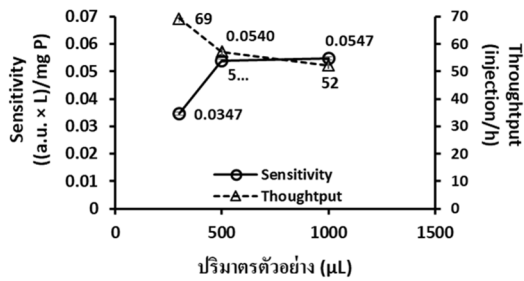
รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายตัวพากับค่าความไว และค่าจำนวนตัวอย่างต่อชั่วโมงในการวิเคราะห์

ต่อนาที จะทำให้ความไวของท่อนโซนสารละลายผ่านบริเวณตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงไวเกินไป ซึ่งทำให้การตรวจวัดคลาดเคลื่อนได้ง่ายเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องตรวจวัด ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกความไวของกระแสตัวพาที่ 2 มิลลิลิตรต่อนาที

3.1.2 ผลของปริมาตรของสารตัวอย่าง

สำหรับการศึกษาผลของปริมาตรตัวอย่างซึ่งกำหนดโดยท่อกำหนดปริมาตร (Injection Loop) ซึ่งปริมาตรตัวอย่างที่ศึกษาได้แก่ 300, 500 และ 1,000 ไมโครลิตร โดยฉีดสารละลายมาตรฐาน 0.50–1.00 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ในกระแสตัวพาที่ 2 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของสารละลายรีเอเจนต์ R1 และสารละลาย R2 1 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้ท่อผสมสารที่ 1 (RC1) และท่อผสมสารที่ 2 (RC2) ยาว 60 เซนติเมตร

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาตรของสารตัวอย่างจะทำให้ค่าความไวในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเพิ่มปริมาตรตัวอย่างจาก 300 เป็น 500 ไมโครลิตร และเมื่อเพิ่มปริมาตรตัวอย่างเป็น 1,000 ไมโครลิตร ความไวในการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการเพิ่มปริมาตรตัวอย่างนี้จะทำให้ค่าจำนวนตัวอย่างต่อชั่วโมงในการวิเคราะห์ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4 ในการทดลองนี้เลือกปริมาตรตัวอย่าง 1,000 ไมโครลิตร



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของสารตัวอย่างกับค่าความไว และค่าจำนวนตัวอย่างต่อชั่วโมงในการวิเคราะห์

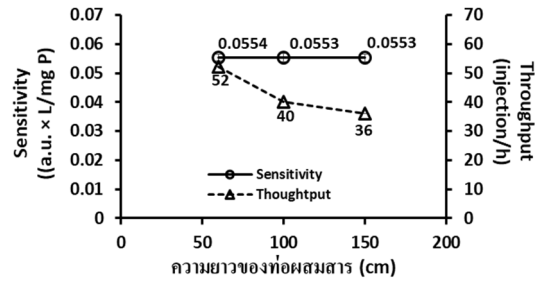
เนื่องจากให้ความไวในการวิเคราะห์มากที่สุด และเพื่อรองรับตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของฟอสเฟตในปริมาณที่ต่ำ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของกมลทิพย์ เสรีนันทชัยและคณะ (2557) ที่ได้ใช้ระบบโพลินเจกชันสำหรับการวิเคราะห์ฟอสเฟตโดยใช้ปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบลู และใช้สแตนด์แนสคลอไรด์เป็นสารรีดิวซ์ [13]

3.1.3 ผลของความยาวท่อผสมสาร

จากการศึกษาผลของความยาวของท่อผสมสาร (Reaction Coil) ที่ตำแหน่ง RC1 และ RC2 ของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีการใช้ความยาวของท่อผสมสาร 60, 100 และ 150 เซนติเมตร โดยกำหนดให้อัตราการไหลของกระแสตัวพาเท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อนาที สารละลายสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (R1) และสารละลาย สารละลายกรดแอสคอร์บิก (R2) คือ 1 มิลลิลิตรต่อนาทีและปริมาตรตัวอย่างขนาด 1,000 ไมโครลิตร ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความยาวของท่อผสมสาร ความไวในการวิเคราะห์คงที่ ในขณะที่ค่าจำนวนตัวอย่างต่อชั่วโมงในการวิเคราะห์ลดลง ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกใช้ความยาวของท่อผสมสารที่ตำแหน่ง RC1 และ RC2 เท่ากับ 60 เซนติเมตร

3.1.4 ผลของความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก

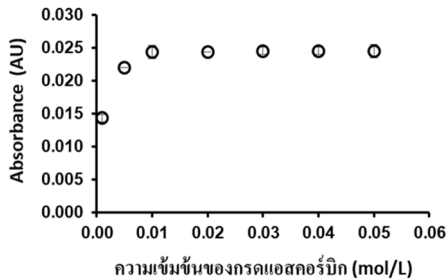
ในการทดลองนี้ใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นสารรีดิวซ์เพื่อเปลี่ยนสารแอมโมเนียมโมลิบโดฟอสเฟต ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีเหลือง เป็นสารประกอบ



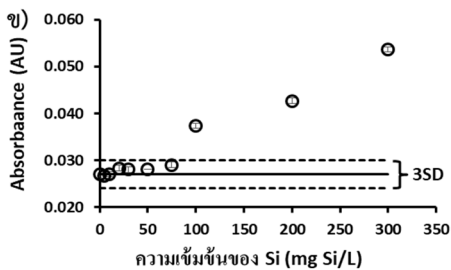
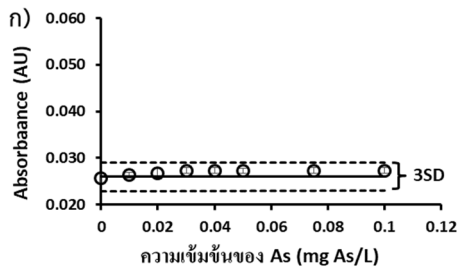
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของท่อผสมสาร ค่าความไว และค่าจำนวนตัวอย่างต่อชั่วโมงในการวิเคราะห์

โมลิบดีนัมบลู ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีฟ้า โดยศึกษาความเข้มข้นของแอสคอร์บิกตั้งแต่ 0.001–0.050 โมลต่อลิตร โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (R1) เท่ากับ 9.71 มิลลิโมลต่อลิตร ซึ่งเตรียมในกรดคลอริก 0.6 โมลต่อลิตร [13] โดยในการทดลองฉีดสารละลายมาตรฐาน 0.50 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตรลงในระบบดังแสดงที่รูปที่ 1 ที่สภาวะที่เหมาะสม (Optimal Conditions) คือ อัตราการไหลของกระแสตัวพาเท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อนาที สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (R1) และสารละลาย สารละลายกรดแอสคอร์บิก (R2) คือ 1 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาตรตัวอย่างขนาด 1,000 ไมโครลิตร ความยาวของท่อผสมสาร 60 เซนติเมตร ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกตั้งแต่ 0.001–0.010 โมลต่อลิตร ค่าการดูดกลืนของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มมากขึ้น และมีค่าคงที่ตั้งแต่ 0.010–0.050 โมลต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชนิสรา ปัญญาธิง และคณะ (2560) ที่ศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสในดินโดยใช้ระบบไฮโดรไดนามิกซีเควนเชียลอินเจกชัน ซึ่งใช้ปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบลูในการวิเคราะห์และใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นสารรีดิวซ์ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สีฟ้าเพิ่มขึ้น และเกิดผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกันเมื่อความเข้มข้นของกรด

แอสคอร์บิกมีค่าระหว่าง 0.5–2.0 ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร (% w/v หรือ 0.028–0.011 โมลต่อลิตร) [16]



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกและค่าการดูดกลืนแสงของสาร



รูปที่ 7 กราฟแสดงผลของการศึกษาความสามารถของระบบวิเคราะห์ที่ทนต่อการรบกวนของ ก) อาร์ซีเนต และ ข) ซิลิเกต โดยใช้ความเข้มข้นของฟอสเฟต 0.50 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร

แม้ว่าผลการทดลองงานวิจัยนี้จะพบว่าความเข้มข้นของแอสคอร์บิกที่ 0.010 และ 0.020 โมลต่อลิตรจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สีฟ้าในปริมาณที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เนื่องจากกรดแอสคอร์บิกเป็นสารที่ไม่เสถียรจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก 0.020 โมลต่อลิตร เพื่อให้มั่นใจว่าความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกนั้นเพียงพอต่อการทดลองในแต่ละวัน

ดังนั้นในการทดลองนี้ สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตของระบบนี้คือ อัตราการไหลของสารละลายตัวพา 2 มิลลิตรต่อนาที ปริมาตรของสารตัวอย่าง 1,000 ไมโครลิตร ความยาวท่อผสมสาร 60 เซนติเมตร และความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก 0.020 โมลต่อลิตร

3.2 การศึกษาผลของตัวรบกวน

เนื่องจากซิลิเกตและอาร์ซีเนตเป็นตัวรบกวนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ได้เช่นเดียวกันกับฟอสเฟตและเป็นตัวรบกวนที่สำคัญในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ [14], [18] ดังนั้นในการทดลองนี้จึงศึกษาการรบกวนของซิลิเกตและอาร์ซีเนตต่อปฏิกิริยาในระบบการวิเคราะห์ฟอสเฟตโดยเตรียมตัวรบกวนที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ผสมกับสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร แล้วฉีดลงในระบบ (รูปที่ 1) ซึ่งสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (R1) มีการเติมกรดทาร์ทาริกคลงไปเพื่อช่วยการรบกวนการวิเคราะห์ [13] ในการทดลองนี้ ศึกษาความเข้มข้นของอาร์ซีเนตตั้งแต่ 0.01–0.10 มิลลิกรัมอาร์ซีนิกต่อลิตร (mg As/L) และศึกษาความเข้มข้นของซิลิเกต 5 - 300 มิลลิกรัมซิลิเกตต่อลิตร (mg Si/L) ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถทนอาร์ซีเนตได้มากกว่า 0.10 มิลลิกรัมอาร์ซีนิกต่อลิตร และทนซิลิเกตได้ถึง 75 มิลลิกรัมซิลิเกตต่อลิตร (รูปที่ 7) ซึ่งในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไปมีอาร์ซีเนตและซิลิเกตไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมอาร์ซีนิกต่อลิตร [18] และ 28 มิลลิกรัมซิลิเกตต่อลิตร [19] ตามลำดับ

3.3 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบโฟลอิน

เจคชัน

จากการฉีดสารละลายมาตรฐานลงในระบบโฟลอินเจคชันที่สภาวะที่เหมาะสม ได้ช่วงการใช้งานของกราฟมาตรฐานในช่วง 0.04–1.25 มิลลิกรัมฟอสฟอรัส

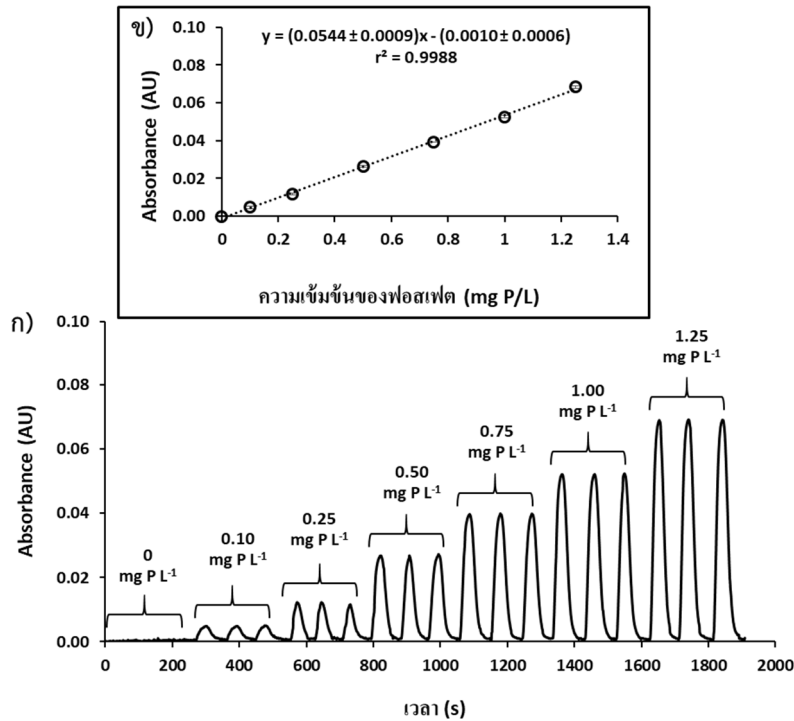
ต่อลิตร โดยลักษณะของสัญญาณ (Flow Profile) และสมการเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 8 ขีดจำกัดของการตรวจวัด หรือค่า LOD มีค่าเท่ากับ 0.015 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร และจากการศึกษาค่าความเที่ยงตรง (Precision) จากการฉีดสารละลายมาตรฐาน 0.50 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ในระบบจำนวน 10 ครั้ง ได้ค่าความเที่ยง (% RSD) เท่ากับ 1.81 % โดยระบบมีความเร็วในการวิเคราะห์ตัวอย่าง 52 ตัวอย่างต่อ 1 ชั่วโมง

โดยปกติแล้วปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำด้วยวิธีโฟลอินเจกชันได้แก่ปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบลูซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงิน และปฏิกิริยาวานาโดโมลิบดีนัมซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบสีเหลือง [14] ซึ่งระบบโฟลอินเจกชันที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำในงานวิจัยนี้ใช้ปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบลูโดยใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นสารรีดิวซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบโฟลอินเจกชันในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้ระบบโฟลอินเจกชันในการวิเคราะห์ฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำถือว่าระบบมีความคล้ายคลึงกันในแง่ของปฏิกิริยาที่ใช้ แต่มีความแตกต่างกันของรายละเอียดของการออกแบบระบบการขับเคลื่อนสารให้เกิดผลิตภัณฑ์สารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินก่อนตรวจวัดด้วยตัวตรวจวัด เช่น การออกแบบระบบ การออกแบบอัตราการไหลของสารปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ ความยาวของท่อผสมสาร ผลของความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก เป็นต้น ซึ่งระบบที่ใช้ในงานนี้ถือว่าเป็นระบบอย่างง่าย มีความซับซ้อนน้อยกว่าระบบโฟลอินเจกชันอื่น ๆ ในการการตรวจวัดฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำ แต่มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดฟอสเฟตได้ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 2) เช่น บางระบบมีการใช้ปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบลูโดยใช้ทิน (II) คลอไรด์ หรือกรดแอสคอร์บิกเป็นสารรีดิวซ์ซึ่งจะได้สารผลิตภัณฑ์ที่ดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตรและ

880 นาโนเมตร ตามลำดับ [20] ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารรีดิวซ์เป็นกรดแอสคอร์บิกเนื่องจากเป็นสารละลายที่เตรียมได้ง่ายและละลายได้ในน้ำ ในงานวิจัยอื่น ๆ ได้มีการออกแบบระบบเพิ่มเติมเพื่อวัตถุประสงค์การทดลองต่างกัน เช่น งานวิจัยของ Aufitsch, S. et al ได้ใช้ปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบลูโดยใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นสารรีดิวซ์ แต่ใช้ระบบแบบรีเวอร์สโฟลอินเจกชันอะนาลิซิส (reversed flow injection analysis, rFIA) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาของการรบกวนการวิเคราะห์จากความแตกต่างระหว่างค่าดัชนีหักเหของแสงที่ผ่านกระแสน้ำตัวอย่างน้ำกร่อยและรีเอเจนต์ [17] และงานวิจัยของ Neves, M.S.A.C. et al ใช้ปฏิกิริยาวานาโดโมลิบดีนัมตรวจวัดผลิตภัณฑ์สารสีเหลือง โดยในระบบมีการใช้ Liquid Waveguide Capillary Cell (LWCC) ซึ่งมีราคาสูงเพื่อเพิ่มความไวในการตรวจวัด (Sensitivity) [21]

3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและการตรวจสอบการใช้ได้ของวิธี

ระบบการไหลแบบโฟลอินเจกชันอย่างง่ายนี้ นำไปประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณฟอสเฟตในแหล่งน้ำที่สำคัญในเขตอำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี โดยมีการเก็บตัวอย่างน้ำ 9 จุด (รูปที่ 1 และตารางที่ 1) จากผลการทดลองพบว่าตัวอย่างที่เก็บจากจุดที่ 1-4 และ 8 มีค่าฟอสเฟตไม่ค่าเกินมาตรฐานน้ำผิวดิน ส่วนตัวอย่างที่ 5-6 และ 9 มีค่าฟอสเฟตเกินมาตรฐานเนื่องจากบริเวณดังกล่าวใกล้กับแหล่งชุมชนและร้านอาหาร จึงอาจมีการปล่อยน้ำทิ้งจากครัวเรือนลงสู่แหล่งน้ำ และจากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ฟอสเฟตจากระบบการไหลแบบโฟลอินเจกชันกับวิธีวิเคราะห์แบบมาตรฐานโมลิบดีนัมบลูแบบแบทช์ (batch method) ของ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA) [22]



รูปที่ 8 ลักษณะของสัญญาณที่ได้ ก) และกราฟมาตรฐาน ข) จากการวิเคราะห์ด้วยระบบโพลินเจกชันโดยการฉีดสารละลายมาตรฐานในระบบด้วยภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของระบบโพลินเจกชันของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้ระบบโพลินเจกชันในการวิเคราะห์ฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำ

งานวิจัย	ปฏิกิริยาที่ใช้	ตัวอย่าง	LOD (mg P/L)	จำนวนตัวอย่างต่อ ชั่วโมง
[20]	โมลิบดีนัมบลู (รีดิซ์ด้วยทิน (II) คลอไรด์ หรือกรดแอสคอร์บิก)	น้ำธรรมชาติ น้ำดื่ม	0.01	ไม่ระบุ
[13]	โมลิบดีนัมบลู (รีดิซ์ด้วยทิน (II) คลอไรด์)	น้ำกร่อย	0.016	15
[17]	โมลิบดีนัมบลู (รีดิซ์ด้วยกรดแอสคอร์บิก)	น้ำกร่อย	0.002	ไม่ระบุ
[21]	วานาโนโมลิบดีน	น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน	0.017	60
งานวิจัยนี้	โมลิบดีนัมบลู (รีดิซ์ด้วยกรดแอสคอร์บิก)	น้ำผิวดิน	0.015	52

ตามหลักสถิติแบบ paired *t*-test พบว่าผลการทดลองที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสองวิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยค่า $t_{\text{stat}} 0.04 < t_{\text{crit}} 2.36$ นอกจากนี้ผลการศึกษาค่าร้อยละการได้กลับคืน (% Recovery) ที่ได้จากการการเติมสารละลายมาตรฐาน 0.25 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ลงไปในแต่ละตัวอย่างแล้วนำไปวิเคราะห์และคำนวณ พบว่ามีค่า

ร้อยละการได้กลับคืนอยู่ในช่วง 97–104 % ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยหลาย ๆ งาน เช่น งานวิจัยของ S. Auflitsch et al. [17] ที่พบว่าระบบการวิเคราะห์ฟอสเฟตด้วยระบบไหลแบบโพลินเจกชันสามารถวิเคราะห์ฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และได้ผลการทดลองสอดคล้องกับการวิเคราะห์แบบดั้งเดิม (Batch Method) [13]

ตารางที่ 3 ปริมาณฟอสเฟตในตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ด้วยระบบการไหลแบบโพลินเจคชัน เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์แบบมาตรฐานโมลิตินัมบลูแบบแบทช์

ตัวอย่างน้ำ	ระบบการไหลแบบโพลินเจคชัน			วิธีมาตรฐาน (มิลลิกรัมฟอสฟอรัส ต่อลิตร $\pm$ SD)
	เดิมสารมาตรฐาน (มิลลิกรัมฟอสฟอรัส ต่อลิตร)	ฟอสเฟตในน้ำ (มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อ ลิตร $\pm$ SD)	ร้อยละการได้กลับคืน (%)	
ตัวอย่างที่ 1	0	0.097 ± 0.01	98	0.082 ± 0.02
	0.25	0.332 ± 0.01		
ตัวอย่างที่ 2	0	0.080 ± 0.01	99	0.070 ± 0.02
	0.25	0.317 ± 0.01		
ตัวอย่างที่ 3	0	0.091 ± 0.02	102	0.100 ± 0.02
	0.25	0.336 ± 0.01		
ตัวอย่างที่ 4	0	0.087 ± 0.03	101	0.084 ± 0.04
	0.25	0.329 ± 0.02		
ตัวอย่างที่ 5	0	0.130 ± 0.01	97	0.150 ± 0.03
	0.25	0.363 ± 0.01		
ตัวอย่างที่ 6	0	0.117 ± 0.01	102	0.112 ± 0.01
	0.25	0.361 ± 0.02		
ตัวอย่างที่ 7	0	0.210 ± 0.02	104	0.225 ± 0.02
	0.25	0.459 ± 0.03		
ตัวอย่างที่ 8	0	0.073 ± 0.01	98	0.080 ± 0.03
	0.25	0.308 ± 0.02		
ตัวอย่างที่ 9	0	0.254 ± 0.03	97	0.220 ± 0.04
	0.25	0.487 ± 0.02		

4. สรุป

ระบบการวิเคราะห์แบบไหลอย่างง่ายที่พัฒนาขึ้นมานี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตในตัวอย่างน้ำผิวดินได้ พบว่าให้ผลสอดคล้องกันทางสถิติแบบ pair t-test ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้จึงมีความน่าเชื่อถือ มีความไวในการวิเคราะห์สูง และวิเคราะห์ได้รวดเร็ว 52 ตัวอย่างต่อ 1 ชั่วโมง จึงเป็นระบบวิเคราะห์ที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ควบคุมคุณภาพน้ำที่มีจำนวนตัวอย่างปริมาณมาก

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์วิทยาศาสตร์ และมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Liu, Y.P. Cai, G.H. Huang and C. Dong, "Interval-parameter chance-constrained fuzzy multi-objective programming for water pollution control with sustainable wetland management," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 13, pp. 2316-2335, Mar. 2012.

- [2] D.K. Tank and C.P.S. Chandel, "A hydrochemical elucidation of the groundwater composition under domestic and irrigated land in Jaipur City," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 166, no. 1-4, pp. 69-77, Jul. 2010.
- [3] P. Palma, P. Alvarenga, V.L. Palma, R.M. Fernandes, A.M.V.M. Soares and I.R. Barbosa, "Assessment of anthropogenic sources of water pollution using multivariate statistical techniques: A case study of the Alqueva's reservoir, Portugal," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 165, no. 1-4, pp. 539-552, Jun. 2010.
- [4] D. Komori, S. Nakamura, M. Kiguchi, A. Nishijima, D. Yamazaki, S. Suzuki, A. Kawasaki, K. Ok and T. Oki, "Characteristics of the 2011 Chao Phraya River flood in Central Thailand," *Hydrological Research Letters*, vol. 6, pp. 41-46, Apr. 2012.
- [5] P. Rakwatin, T. Sansena, N. Marjang and A. Rungsipanich, "Using multi-temporal remote-sensing data to estimate 2011 flood area and volume over Chao Phraya River basin, Thailand," *Remote Sensing Letters*, vol. 4, no. 3, pp. 243-250, Mar. 2013.
- [6] S. Koontanakulvong and P. Santitamnanon, "Lessons learned and information technology roles in Thailand floods 2011," in *Proceeding of Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*, Sendai, Japan, August 26-29, 2013, pp. 298-302.
- [7] C. Inchaisri, P. Supikulpong, E. Vannamettee, S. Luengyosluechakul, S. Khanda, T. Tashnakajankorn, K. Ajariyakhajorn, J. Sasipreeyajan and M. Techakumpu, "The effect of a catastrophic flood disaster on livestock farming in Nakhon Sawan province, Thailand," *Tropical Animal Health and Production*, vol. 45, no. 4, pp. 917-922, Nov. 2013.
- [8] Y. Chaturongkasumrit, P. Techaruvichit, H. Takahashi, B. Kimura and S. Keeratipibul, "Microbiological evaluation of water during the 2011 flood crisis in Thailand," *Science of The Total Environment*, vol. 463-464, pp. 959-967, Oct. 2013.
- [9] L. Lebel, J.B. Manuta and P. Garden, "Institutional traps and vulnerability to changes in climate and flood regimes in Thailand," *Regional Environmental Change*, vol. 11, no. 1, pp. 45-58, Mar. 2011.
- [10] B.Y. Spivakov, T.A. Maryutina and H. Muntau, "Phosphorus speciation in water and sediments," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 71, no. 11, pp. 2162-2176, Jan. 1999.
- [11] G. Hanrahan, M. Gledhill, P.J. Fletcher and P.J. Worsfold, "High temporal resolution field monitoring of phosphate in the River Frome using flow injection with diode array detection," *Analytica Chimica Acta*, vol. 440, no. 1, pp. 55-62, Aug. 2001.
- [12] L. Drummond and W. Maher, "Determination of phosphorus in aqueous solution via formation of the phosphoantimonymolybdenum blue

- complex,” *Analytica Chimica Acta*, vol. 302, no. 1, pp. 69-74, Feb. 1995.
- [13] K. Sereenonchai, S. Chan-Eam, P. Phansi and D. Nacapricha “Development of high-throughput flow-injection system for analysis of salinity and phosphate in fresh Water and brackish water,” *Thai Science and Technology Journal*, vol. 22, no. 2, pp. 158-171, Apr. 2014.
- [14] J.M. Estela and V. Cerdà, “Flow analysis techniques for phosphorus: An overview,” *Talanta*, vol. 66, no. 2, pp. 307-331, Apr. 2005.
- [15] S. Chaneam, K. Kaewyai, T. Mantim, R. Chaisuksant, P. Wilairat and D. Nacapricha, “Simultaneous and direct determination of urea and creatinine in human urine using a cost-effective flow injection system equipped with in-house contactless conductivity detector and LED colorimeter,” *Analytica Chimica Acta*, vol. 1073, pp. 54-61, May 2019.
- [16] C. Panyaying, M. Kanna and S. Somnam, “The determination of available phosphorus in soils using an economic hydrodynamic sequential injection system,” *Thai Science and Technology Journal*, vol. 25, no. 1, pp. 124-136, Jan. 2017.
- [17] S. Auflitsch, D.M.W. Peat, I.D. McKelrie and P.J. Worsfold, “Determination of dissolved reactive phosphorus in estuarine waters using a reversed flow injection manifold,” *Analyst*, vol. 122, no. 12, pp. 1477-1480, Dec. 1997.
- [18] O.V. Shuvaeva, O.S. Koshcheeva and N.F. Beisel, “Arsenic speciation in water by high-performance liquid chromatography with electrothermal atomic absorption detection,” *Journal of Analytical Chemistry*, vol. 57, no. 11, pp. 1037-1041, Jan. 2002.
- [19] J.Z. Zhang, C.J. Fischer and P.B. Ortner, “Optimization of performance and minimization of silicate interference in continuous flow phosphate analysis,” *Talanta*, vol. 49, no. 2, pp. 293-304, Jun. 1999.
- [20] ISO 15681-1 :2004 (en). “Water quality - Determination of orthophosphate and total phosphorus contents by flow analysis (FIA and CFA) - Part 1: Method by flow injection analysis (FIA)”. *British Standard*, 2009, pp. 1-19.
- [21] M.S.A.C. Neves, M.R.S. Souto, I.V. Tóth, M.C. Drumond and A.O.S.S. Rangel, “Spectrophotometric Flow System Using Vanadomolybdophosphate Detection Chemistry and a Liquid Waveguide Capillary Cell for the Determination of Phosphate with Improved Sensitivity in Surface and Ground Water Samples”. *Talanta*, vol. 77, no. 2, pp. 527-532, Mar. 2008.
- [22] E.W. Rice, R.B. Baird, A.D. Eaton and L.S. Clesceri, “Standard methods for the examination of water and wastewater”. 20th ed., *American Public Health Association, Washington, USA*, 2012, pp. 155-156.

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

การทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวหอมนิลที่มีผลต่อลักษณะทางเคมีกายภาพ กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมั่นโถว

สุพิชญา คำคม*

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

96 ถนนปรีดิพนมยงค์ ตำบลประตูลี้ อำเภอเมืองพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 10300

รับบทความ 14 เมษายน 2563 แก้ไขบทความ 12 สิงหาคม 2563 ตอรับบทความ 15 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิลต่อลักษณะทางเคมีกายภาพ กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมั่นโถว ซึ่งผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ถูกทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิลที่ระดับร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 การวัดค่าสี (ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*)) ของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวด้วยเครื่องวัดสี พบว่าค่า L^* และ b^* ของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวลดลง ในขณะที่ค่า a^* เพิ่มขึ้นตามระดับของแป้งข้าวหอมนิลที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 30 ลักษณะทางกายภาพประกอบด้วยค่าความแข็ง ค่าความยืดหยุ่นและค่าความสามารถในการเกาะรวมกันของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อทดแทนด้วยแป้งข้าวหอมนิลเนื่องจากการโครงสร้างแป้งโดถูกทำลาย ซึ่งความแข็งของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการทดแทนด้วยแป้งข้าวหอมนิลเพิ่มขึ้น (ร้อยละ 0 ถึง 30) แต่ค่าความยืดหยุ่นและค่าความสามารถในการเกาะรวมกันของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวลดลงเมื่อทดแทนด้วยแป้งข้าวหอมนิล ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด/แอนโทไซยานินทั้งหมด และกิจกรรมต้านออกซิเดชัน (DPPH, FRAP และ ABTS) ของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระดับการทดแทนด้วยแป้งข้าวหอมนิลเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 30 จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการทดแทนด้วยแป้งข้าวหอมนิลร้อยละ 20 สามารถผลิตหมั่นโถวที่ดีต่อสุขภาพ และเป็นที่ยอมรับ รวมทั้งมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด/สารแอนโทไซยานินทั้งหมด และกิจกรรมต้านออกซิเดชันสูงขึ้น

คำสำคัญ : หมั่นโถว; แป้งข้าวหอมนิล;ฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน; สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด;
สารแอนโทไซยานินทั้งหมด

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

Substitution of wheat flour with Hom Nil rice flour affects physicochemical characteristics, antioxidant activities, and sensory acceptance of Chinese steamed bread (Mantou)

Supichaya Khumkhom*

Faculty of Science and Technology, Phranakorn Si Ayutthaya Rajabhat University

96 Pridi Banomyong, Pratu chai, Phranakhon Si Ayutthaya, Phranakhon Si Ayutthaya, 13000

Received 14 April 2020; Revised 12 August 2020; Accepted 15 September 2020

Abstract

This study investigated the effects of partial replacement of wheat flours with Hom Nil rice flour on the physicochemical characteristics, antioxidant activities, and sensory acceptance of chinese steam bread (Mantou). Mantou was made with wheat flours partially substituted with Hom Nil rice flour at the level of 0%, 10%, 20% and 30%. Colour parameters (lightness (L^*), redness (a^*) and yellowness (b^*)) of Mantou were measured using a Hunter colorimeter and found that L^* and b^* values of Mantou decreased while a^* value increased with increase in level of Hom Nil rice flour from 0 to 30%. Physical characteristics, including hardness, springiness, and cohesiveness, of Mantou were significantly affected with substitution due to the disruption of dough structure. The hardness of Mantou increased with the increasing of the Hom Nil rice flour substitution (0%-30%), in contrast with springiness and cohesiveness. The total phenolic/anthocyanin contents and antioxidant activities (DPPH, FRAP and ABTS) of Mantou increased with increasing Hom Nil rice flour level up to 30%. These results suggested that the substitution of 20 % Hom Nil rice flour would produce healthy and acceptable Mantou with higher total phenolic/anthocyanin contents and antioxidant activities.

Keywords : Mantou; Hom Nil Rice Flour; Antioxidant Activities; Total Phenolic Content; Total Anthocyanin Content

* Corresponding Author. Tel.: +668 6051 7754, E-mail Address: supichaya_culinary@hotmail.com

1. บทนำ

ข้าว (Rice) เป็นธัญพืชที่มีความสำคัญกับประเทศไทยและของโลก เนื่องจากข้าวเป็นอาหารหลักประเภทคาร์โบไฮเดรตและเป็นแหล่งของพลังงานของประชากรมากกว่าครึ่งโลก ข้าวอุดมไปด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน วิตามิน และเกลือแร่ [1]-[3] สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทตามลักษณะของรงควัตถุ (Pigment) ที่พบได้แก่ ข้าวไม่มีสี (Non-pigmented Rice) และข้าวมีสีหรือข้าวที่มีรงควัตถุ (Pigmented Rice) [2] ซึ่งข้าวมีสีหมายถึงข้าวที่มีรงควัตถุหรือสารให้สีกระจายอยู่ในส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ด ทำให้เมล็ดข้าวมีสีตามธรรมชาติที่แตกต่างกัน เช่น มีสีม่วง ดำ แดง น้ำเงิน หรือน้ำตาลแดง [4], [5] รงควัตถุที่ให้สีที่อยู่ในเยื่อหุ้มเมล็ด คือ สารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compound) และแคโรทีนอยด์ (Carotenoid) ซึ่งมีมากกว่าข้าวไม่มีสี [1], [6], [7] จากรายงานการวิจัย พบว่าสารเหล่านี้ที่พบในข้าวมีสีมีผลในการป้องกันการเกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรังต่าง ๆ ได้แก่ ป้องกันโรคมะเร็ง เช่น มะเร็งเต้านม [8], [9], [4] มะเร็งลำไส้ [10] มะเร็งตับ มะเร็งรังไข่ และมะเร็งต่อม [11], [12] ป้องกันเบาหวาน [13]-[15] ด้านการอักเสบ [16]-[18] รวมทั้งยังมีฤทธิ์ในการต่อต้านออกซิเดชัน (Antioxidation) [19], [20], [5] จากความสำคัญและประโยชน์ที่พบในข้าวมีสีจึงทำให้ผู้บริโภคที่รักสุขภาพหันมาให้ความสนใจบริโภคข้าวมีสีมากขึ้น ซึ่งข้าวมีสีที่เป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกในของประเทศไทยมีหลากหลายพันธุ์ เช่น ข้าวสังข์หยด ข้าวมันปู ข้าวมะลิแดง ข้าวไรซ์เบอร์รี่ และข้าวหอมนิล เป็นต้น

ข้าวหอมนิล (Hom Nil Rice) เป็นข้าวมีสีที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ 78.09) โปรตีน (ร้อยละ 9.68) ไขมัน (ร้อยละ 3.71) วิตามิน (ร้อยละ 4.58) [3] รวมทั้งยังมีสารประกอบฟีนอลิกในปริมาณ 588.28 mg GAE/100g และสารแอน

โทไซยานินเท่ากับ 65.85 mg CyGE/100g [7] แกมมา-โอริซานอล (γ -Oryzanol) แอลฟา-โทโคฟีรอล (α -Tocopherol), แกมมา-โทโคฟีรอล (γ -Tocopherol) เท่ากับ 4.58, 30.54 และ 5.13 mg/g ตามลำดับ [7] จากประโยชน์ของสารพฤกษเคมีเหล่านี้ที่มีอยู่ในข้าวหอมนิลจึงทำให้นักวิจัยมีความสนใจในการนำข้าวมีสีชนิดนี้มาแปรรูป และพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารชนิดต่าง ๆ เช่น ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากข้าวหอมนิล [21] และผลิตภัณฑ์คุกกี้ที่ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิล [22] เป็นต้น

หมั่นโถว (Steamed Stuffed Bun หรือ Mantou) เป็นผลิตภัณฑ์ขนมึ่งที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงในการรับประทานเป็นอาหารหลักหรือรับประทานเป็นอาหารว่าง ทั้งนี้สามารถรับประทานได้ทุกเพศทุกวัย ทุกโอกาส ไม่ว่าจะเป็นเวลาและสถานที่ใด เหมาะกับสถานการณ์ปัจจุบันที่ผู้บริโภคมีความเร่งรีบในการทำงาน ต้องการความสะดวกสบาย และต้องการอาหารพร้อมรับประทานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหมั่นโถวเป็นอาหารว่างที่มีต้นกำเนิดมาจากประเทศจีน มีลักษณะเนื้อนุ่มละเอียดที่เกิดจากกระบวนการหมักระหว่างแป้งสาลี น้ำและยีสต์ โดยยีสต์จะทำหน้าที่ช่วยให้ก้อนแป้งขึ้นฟู โดยการใช้น้ำตาลชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการย่อยแป้งและน้ำตาลที่เติมลงไป ได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแอลกอฮอล์ ส่งผลให้แป้งโด (Dough) มีสภาพเป็นกรดอ่อน และกลูเตนเกิดการอ่อนตัว มีลักษณะยืดหยุ่น มีรูอากาศ และมีกลิ่นเฉพาะตัว เนื่องจากผลิตภัณฑ์หมั่นโถวมีวัตถุดิบหลักที่สำคัญ คือ แป้งสาลีซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการน้อยที่ประกอบด้วยไขมัน (ร้อยละ 2.3) เกล็ด (ร้อยละ 1.03) และใยอาหาร (ร้อยละ 0.59) รวมทั้งมีสารประกอบฟีนอลิกเพียง 8.23 mg GAE/100g เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหอมนิล [23] จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจในการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ สารพฤกษเคมี และฤทธิ์การต้านออกซิเดชันให้กับผลิตภัณฑ์หมั่นโถวด้วยการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิล

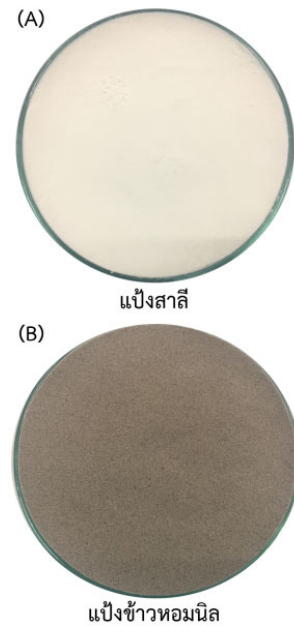
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพและฤทธิ์การต้านออกซิเดชันเมื่อทดสอบด้วยวิธี DPPH, FRAP และ ABTS ของแป้งข้าวหอมนิล รวมทั้งศึกษาอัตราส่วนระหว่างแป้งสาลี และแป้งข้าวหอมนิลที่เหมาะสมต่อลักษณะของสี เนื้อสัมผัส ปริมาณสารพฤกษเคมี ฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน และการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมั่นโถว ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ และต่อยอดในการผลิตขาลาเปาจากแป้งข้าวหอมนิลในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต และเป็นทางเลือกหนึ่งของผู้บริโภคที่รักสุขภาพ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.2 การเตรียม การวิเคราะห์ปริมาณสารพฤกษเคมี และฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของแป้งข้าวหอมนิล

นำข้าวหอมนิลที่ซื้อจากร้านอยุธยาวิเลี่ยนตราทิพ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งการเตรียมแป้งข้าวหอมนิล (Hom Nil Rice Flour) ดัดแปลงจากของ [24] ด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน (Hot Air Oven Drying) คัดเลือกสิ่งสกปรกออก และใส่ในถาด ๆ ละ 300 กรัม หลังจากนั้นนำไปให้อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องบดละเอียด (Hammer Mill) เมื่อบดเสร็จแล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงร่อนที่ความละเอียด 100 Mesh และเก็บแป้งข้าวหอมนิลไว้ในถุงลามิเนทกันความชื้นที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป (รูปที่ 1) หลังจากนั้นนำแป้งข้าวหอมนิลไปวิเคราะห์ปริมาณสารพฤกษเคมี ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Content) สารแอนโทไซยานินทั้งหมด (Total Anthocyanin Content) และฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันเมื่อทดสอบด้วยวิธี DPPH Radical Scavenging Ability (DPPH) วิธี Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) และวิธี ABTS Radical

Cation Inhibition Antioxidant (ABTS) โดยทำการเปรียบเทียบกับแป้งสาลี (Wheat Flour)



รูปที่ 1 (A) แป้งสาลี และ (B) แป้งข้าวหอมนิล

2.3 การศึกษาปริมาณการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวหอมนิลที่เหมาะสมต่อลักษณะทางเคมีกายภาพ และประสิทธิภาพในการต้านออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์หมั่นโถว

ทำการศึกษาปริมาณการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวหอมนิลที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์หมั่นโถว จำนวน 4 สูตร ได้แก่ ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ของปริมาณแป้งสาลีทั้งหมด โดยส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 1 กรรมวิธีการผลิตหมั่นโถวด้วยวิธีสปันจ์-โดดัดแปลงวิธีการ [25] มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ **ขั้นตอนที่ 1** เป็นขั้นตอนของการเตรียมส่วนของสปันจ์ เริ่มต้นด้วยการผสมแป้งตามอัตราส่วนในข้อ 2.1 (นำมาร้อยละ 70) กับยีสต์ (8 กรัม) ด้วยเครื่องผสมแบบสองแขน ในขณะที่ผสมมีการเติมน้ำเย็น (165 กรัม) และน้ำตาลส่วนผสมนาน 10 นาที หลังจากนั้นพักก้อน สปันจ์ไว้ในตู้หมักแป้งที่อุณหภูมิ 35 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ

70 นาน 2 ชั่วโมง **ขั้นตอนที่ 2** เป็นขั้นตอนของการเตรียมโด เริ่มต้นจากการร่อนแป้ง (อีกร้อยละ 30) นมผง (20 กรัม) และผงฟู (5 กรัม) ให้เข้ากัน และนำน้ำตาลทราย (100 กรัม) เกลือ (3 กรัม) และน้ำเย็น (60 กรัม) มาผสมและคนให้ละลายเข้ากัน ใส่แป้งโดที่เตรียมไว้ในเครื่องนวดสองแขน ค่อย ๆ เติมส่วนผสมของเหลวจากนั้นฉีกแป้งปั่นจี่ใส่ในส่วนผสมโดโดยนวดจนเข้ากัน สุดท้ายเติมเนยขาวปริมาณ 30 กรัม นวดตีส่วนผสมจนก้อนโดเรียบเนียน หลังจากนั้นพักก้อนโดในตู้หมักแป้งที่อุณหภูมิ 35 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70 อีกเป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นนำก้อนแป้งโดออกมาใส่อากาศ ตัดแบ่งเป็นก้อน ๆ ละ 30 กรัม คลึงให้กลมเรียบเนียน และนำไปใส่ในตู้หมักแป้งอีกครั้ง ภายใต้สภาวะเดียวกัน นาน 30 นาที (แป้งโดมีลักษณะขึ้นฟูเป็นสองเท่าจากเดิม) จากนั้นนำไปใส่ในลังถึง และนึ่งด้วยไอน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที [26]

ตารางที่ 1 ส่วนผสมและปริมาณการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวหอมนิลในระดับที่แตกต่างกัน

ส่วนผสม (กรัม)	ปริมาณการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวหอมนิล (ร้อยละ)			
	0	10	20	30
สปันจ์				
แป้งสาลี	300	270	240	210
แป้งข้าวหอมนิล	0	30	60	90
น้ำเย็น	165	165	165	165
ผงยีสต์	3	3	3	3
โด				
แป้งสาลี	200	180	160	140
แป้งข้าวหอมนิล	0	20	40	60
นมผง	20	20	20	20
น้ำตาลทราย	25	25	25	25
เกลือ	3	3	3	3
น้ำเย็น	160	160	160	160
ขอตเหนียว	25	25	25	25

2.4 การวิเคราะห์ลักษณะสีและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิล

นำผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ถูกทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิลใน 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ของปริมาณแป้งสาลีทั้งหมด มาวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดค่าสี รุ่น Color Quest XE (Hunter Lab, USA) โดยค่าสีที่วัด ได้แก่ ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) รวมทั้งวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ผลิตได้ด้วยเครื่องทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร (Food Texture Analyzer, Stable Micro Systems, UK) ได้แก่ ค่าความแข็ง (Hardness) ค่าความสามารถเกาะรวมกัน (Cohesiveness) และค่าความยืดหยุ่น (Springiness) วิธีการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ Texture Profile Analysis ใช้หัววัด Cylindrical Probe (P/100) ทำการเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์หมั่นโถวหนึ่งใหม่ หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที และนำตัวอย่างมาวางไว้กึ่งกลางของเครื่องวิเคราะห์ภายใต้สภาวะของการวัดมีดังต่อไปนี้ Pre-test และ Post-test Speed (4.00 mm/s), Test speed (4 mm/s), Trigger Force (5 N) และ Distance 10.0 mm [26] หลังจากนั้นเปรียบเทียบลักษณะดังกล่าวระหว่างผลิตภัณฑ์หมั่นโถวสูตรควบคุมกับสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวหอมนิลที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของปริมาณแป้งสาลีทั้งหมด

2.5 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และแอนโทไซยานินทั้งหมดในผลิตภัณฑ์หมั่นโถว

นำผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิลทั้ง 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ของปริมาณแป้งสาลีทั้งหมด นำมาอบที่

อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบด และร่อนผ่านตะแกรงร่อนความละเอียด 100 mesh และเก็บตัวอย่างผงหมั่นโถวในถุงลามิเนทกันความชื้นที่ -20 องศาเซลเซียส การเตรียมสารสกัดจากตัวอย่างผงหมั่นโถวตามวิธีการของ [21] โดยชั่งตัวอย่างผงหมั่นโถวปริมาณ 5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 80 (ปริมาตรต่อปริมาตร) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (สำหรับการวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด) ในขณะที่การเตรียมสารสกัดสำหรับการวิเคราะห์แอนโทไซยานินทั้งหมด นำตัวอย่างผงหมั่นโถวปริมาณ 5 กรัม มาสกัดด้วย Acidified Methanol (Methanol: 1 M HCl (85:15, ปริมาตรต่อปริมาตร)) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำตัวอย่างสารสกัดไปปั่นหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 7,000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที [27] หลังจากนั้นนำสารละลายที่สกัดได้มาวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และสารแอนโทไซยานินด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (PerkinElmer UV/VIS Spectrometer Lambda 25, USA) ตามวิธีการของ [27], [28] และคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดจากกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก (Gallic Acid Equivalent: GAE) ในรูปของมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้งหมั่นโถว [22] ในขณะที่สารแอนโทไซยานินคำนวณในรูปของมิลลิกรัมสมมูลของไซยานิดิน 3 กลูโคไซด์ (Cyaniding-3-Glucoside Equivalent: CyGE) ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้งหมั่นโถว (mg CyGE/100g) [27], [28] โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

2.6 การทดสอบฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์หมั่นโถว

นำสารละลายที่สกัดได้จากข้อ 2.5 มาทดสอบฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH, FRAP และ ABTS ตามวิธีการของ [28]-[30] และคำนวณหาฤทธิ์ใน

การต้านออกซิเดชันในรูปของมิลลิกรัมสมมูลของโทรล็อกซ์ (Trolox Equivalent, TE) ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้งหมั่นโถว (mg TE/100g) ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

2.7 การประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมั่นโถว

นำผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมมะลิทั้ง 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ของปริมาณแป้งสาลีทั้งหมด มาประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส ได้แก่ ด้านลักษณะที่ปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมด้วยวิธี 9-point Hedonic Scale โดยให้คะแนนตั้งแต่ 1 ถึง 9 (9 = ชอบมากที่สุด ถึง 1 = ไม่ชอบมากที่สุด) โดยใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน ซึ่งเป็นนักศึกษาในสาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

2.8 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การทดลองนี้วางแผนการทดลองแบบแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วยวิธี Analysis of Variance (ANOVA) และวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS Version (SPSS Inc., USA)

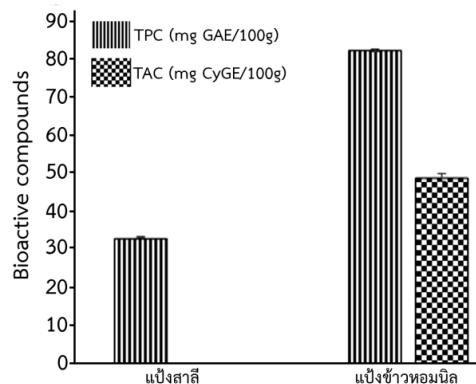
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารพฤกษเคมีและฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของแป้งข้าวหอมมะลิ

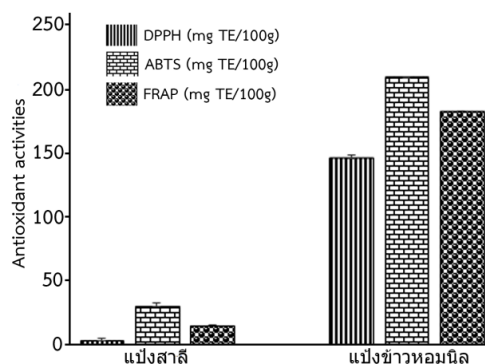
ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารพฤกษเคมี ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสารแอนโทไซยานิน

ทั้งหมดในแป้งข้าวหอมนิลเปรียบเทียบกับแป้งสาลี แสดงดังรูปที่ 2 พบว่าแป้งข้าวหอมนิลมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสารแอนโทไซยานินทั้งหมดเท่ากับ 82.49 mg GAE/100g และ 48.98 mg CyGE/100g ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าในแป้งสาลี (สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 33.23 mg GAE/100g และสารแอนโทไซยานินทั้งหมดเท่ากับ 0.00 mg CyGE/100g) (รูปที่ 2) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแป้งข้าวหอมนิลมีปริมาณสารพฤกษเคมี (ทั้งสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสารแอนโทไซยานินทั้งหมด) มากกว่าในแป้งสาลีถึง 2.48 และ 48.98 เท่าตามลำดับ แตกต่างจากรายงานการวิจัยของ [7] พบว่าในแป้งข้าวหอมนิลมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสารแอนโทไซยานินเท่ากับ 588.28 mg GAE/100g และ 65.85 mg CyGE/100g ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแหล่งที่มาของข้าวหอมนิล แหล่งที่ปลูก และชนิดของพันธุ์ที่ต่างกัน [31] พบว่าข้าวสีม่วงดำ (ข้าวเหนียวลิ้มผัว ข้าวมะลิสีสุรินทร์ และข้าวไรซ์เบอร์รี่) มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกอยู่ในช่วง 7.92-11.55 $\mu\text{g/g}$ สูงกว่าพันธุ์ข้าวสีแดง (ข้าวลิ้นเหล็ก ข้าวทับทิมชุมแพ และข้าวมะลิโกเมนสุรินทร์) และสีขาว (พันธุ์ Fs Ro49, Fs Ro60, Fs Ro59 ดอกมะลิ 105 กข 21 และ กข 43) ที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกอยู่เพียง 2.37-8.90 $\mu\text{g/g}$ [31]

ผลการทดสอบฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของแป้งสาลีและแป้งข้าวหอมนิลเมื่อทดสอบด้วยวิธี DPPH, FRAP และ ABTS แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าแป้งข้าวหอมนิลมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันเท่ากับ 147.20, 209.72 และ 183.24 mg TE/100g ตามลำดับ ซึ่งมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันมากกว่าในแป้งสาลีที่มีค่าเท่ากับ 3.21, 30.83 และ 15.07 mg TE/100g ตามลำดับ (รูปที่ 3) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแป้งข้าวหอมนิลมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันเมื่อทดสอบด้วยวิธี DPPH, FRAP และ ABTS สูงกว่าแป้งสาลีถึง 45.86, 6.80 และ 12.16 เท่า ตามลำดับ (รูปที่ 3)



รูปที่ 2 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) และสารแอนโทไซยานินทั้งหมด (TAC) ในแป้งสาลีและแป้งข้าวหอมนิล



รูปที่ 3 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันที่ทดสอบด้วยวิธี DPPH, FRAP และ ABTS ในแป้งสาลี และแป้งข้าวหอมนิล

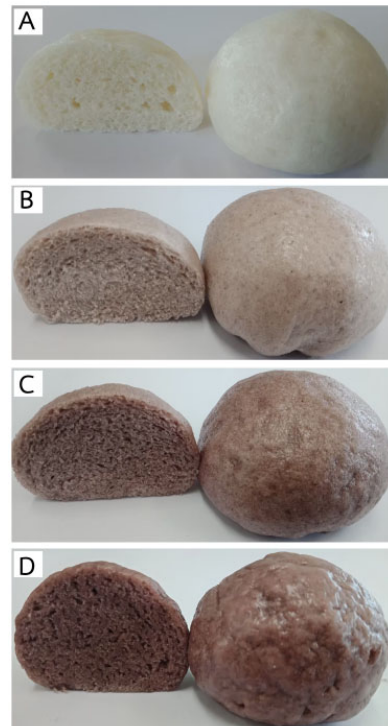
เนื่องจากในแป้งข้าวหอมนิลประกอบด้วยสารประกอบฟีนอลิกหลายชนิดที่สำคัญ ซึ่ง Ferulic Acid มีปริมาณมากที่สุด รองลงมา คือ Protocatechuic Acid, *p*-Coumaric Acid, Vanillic Acid, Gallic Acid, Sinapic Acid, Chlorogenic Acid, Syringic Acid, และ Caffeic Acid และสารแอนโทไซยานิน ได้แก่ Cyanidin-3-glucoside, Pelargonidin และ Malvidin [7] ซึ่งสารเหล่านี้ที่มีอยู่ในแป้งข้าวหอมนิลจัดเป็นสารต้านออกซิเดชัน จากรายงานการวิจัยของ [31] ทำการศึกษาฤทธิ์การต้านออกซิเดชันในข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ได้แก่ ข้าวเหนียวลิ้มผัว ข้าวมะลิสีสุรินทร์ ข้าว

ไรซ์เบอร์รี่ ข้าวสาลีเหล็ก ข้าวทับทิมชุมแพ โกเมนสุรินทร์ พันธุ์ Fs Ro49, Fs Ro60, Fs Ro59 ดอกมะลิ 105 กข 21 และ กข 43 ด้วยวิธี DPPH และ ABTS พบว่ากลุ่มข้าวสีม่วง-ดำ (ข้าวเหนียวลิ้มผัว ข้าวมะลิสุรินทร์ และข้าวไรซ์เบอร์รี่) มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันสูงกว่าพันธุ์ข้าวกลุ่มสีแสด และสีขาว เนื่องจากข้าวสีม่วงดำมีปริมาณสาร Ferulic Acid, Protocatechuic Acid, *p*-Coumaric Acid และ Vanillic Acid อยู่ในปริมาณสูงกว่าข้าวพันธุ์อื่น ๆ

3.2 ผลของการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วย แป้งข้าวหอมนิลที่เหมาะสมต่อลักษณะสี และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมั่นโถว

ลักษณะสีของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิลในปริมาณที่ต่างกัน (ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ของปริมาณแป้งสาลีทั้งหมด) แสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 4 พบว่าการทดแทนด้วยแป้งข้าวหอมนิลในผลิตภัณฑ์หมั่นโถวมีผลต่อค่า L^* , a^* และ b^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ใช้แป้งสาลีร้อยละ 100 มีค่า L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 81.09, -0.53 และ 8.43 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิลในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 30 ส่งผลให้ค่า L^* และ b^* ของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) จาก 81.09 เป็น 45.46 และจาก 9.31 เป็น 8.43

(ตารางที่ 2) ในขณะที่ค่า a^* ซึ่งแสดงค่าความเป็นสีแดงของตัวอย่างผลิตภัณฑ์หมั่นโถว (ตารางที่ 2) พบว่าค่า a^* ผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ถูกทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิลร้อยละ 10, 20 และ 30 ของปริมาณแป้งสาลีทั้งหมด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยค่า a^* เพิ่มขึ้นจาก -0.53 เป็น 5.22, 7.53 และ 9.64 ตามลำดับ (ตารางที่ 2)



รูปที่ 4 ผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิลที่ระดับร้อยละ 0 (A), 10 (B), 20 (C) และ 30 (D) ของปริมาณแป้งสาลีทั้งหมด

ตารางที่ 2 ค่าสีของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวหอมนิลในระดับที่ต่างกัน

ปริมาณการทดแทนแป้งสาลี ด้วยแป้งข้าวหอมนิล (ร้อยละ)	ค่าสีของผลิตภัณฑ์หมั่นโถว		
	ค่าความสว่าง (L^*)	ค่าความเป็นสีแดง (a^*)	ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*)
0	81.09±0.46a	0.53±0.03d	9.31±0.05a
10	66.47±0.53b	5.22±0.08c	8.82±0.03b
20	57.08±0.24c	7.53±0.16b	8.72±0.05b
30	45.46±0.79d	9.64±0.13a	8.43±0.08c

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์หมักโกลที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ด้วยการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวหอมมะลิมีลักษณะสีม่วง-แดงเพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 4) เนื่องจากในแป้งข้าวหอมมะลิมีรงควัตถุสีม่วง-แดงของสารกลุ่มแอนโทไซยานิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [7] พบว่าสารในกลุ่มแอนโทไซยานินที่มีปริมาณมากที่สุดในแป้งข้าวหอมมะลิ คือ Cyanidin-3-glucoside รองลงมาคือ Pelargonidin และ Malvidin ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ [32] ได้ทำการศึกษาผลิตภัณฑ์หมักโกลที่ทดแทนด้วยแป้งถั่วแดงที่ประกอบด้วยสารแอนโทไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุที่ให้สีแดง ม่วงหรือน้ำเงิน เมื่อนำไปวัดค่าสี พบว่าผลิตภัณฑ์หมักโกลที่ทดแทนด้วยแป้งถั่วแดงในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 40 มีผลทำให้ค่า a^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) จาก 0.27 เป็น 8.43 ในขณะที่ค่า L^* จาก 89.64 เป็น

67.30 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หมักโกลมีสีแดงคล้ำ เช่นเดียวกับ [33] พบว่าการทดแทนด้วยแป้งมันม่วงในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 40 มีผลทำให้ค่า a^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ในขณะที่ค่า L^* และ b^* ลดลง ในขณะที่ [34] ได้พัฒนาผลิตภัณฑ์หมักโกลด้วยการเสริมแป้งมันฝรั่ง พบว่าการเสริมแป้งมันฝรั่งในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 35 มีผลทำให้ค่า a^* และ b^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) จาก -1.07 เป็น 0.12 และเพิ่มขึ้นจาก 13.15 เป็น 15.87 จากสารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์ ในขณะที่ค่า L^* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หมักโกลมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะเห็นว่าลักษณะสีของผลิตภัณฑ์หมักโกลขึ้นอยู่กับรงควัตถุที่มีอยู่ในแป้ง และปริมาณการใช้

ตารางที่ 3 ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมักโกลที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวหอมมะลิในระดับที่แตกต่างกัน

ปริมาณการทดแทนแป้งสาลี ด้วยแป้งข้าวหอมมะลิ (ร้อยละ)	ค่าเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมักโกล		
	ค่าความแข็ง (นิวตัน)	ค่าความยืดหยุ่น (มิลลิเมตร)	ค่าความสามารถเกาะรวมกัน
0	2.52±0.18d	-11.14±0.07a	0.86±0.04a
10	4.54±0.07c	10.53±0.10b	0.78±0.03b
20	4.92±0.05b	9.54±0.07c	0.72±0.03c
30	5.14±0.06a	8.74±0.08d	0.63±0.02d

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ผลการศึกษาปริมาณการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมมะลิที่ระดับร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ของปริมาณแป้งสาลีทั้งหมดต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมักโกล แสดงดังตารางที่ 3 พบว่าผลิตภัณฑ์หมักโกลที่ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมมะลิในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 30 ของปริมาณแป้งสาลีทั้งหมด ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หมักโกลมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 2.52 เป็น 5.14

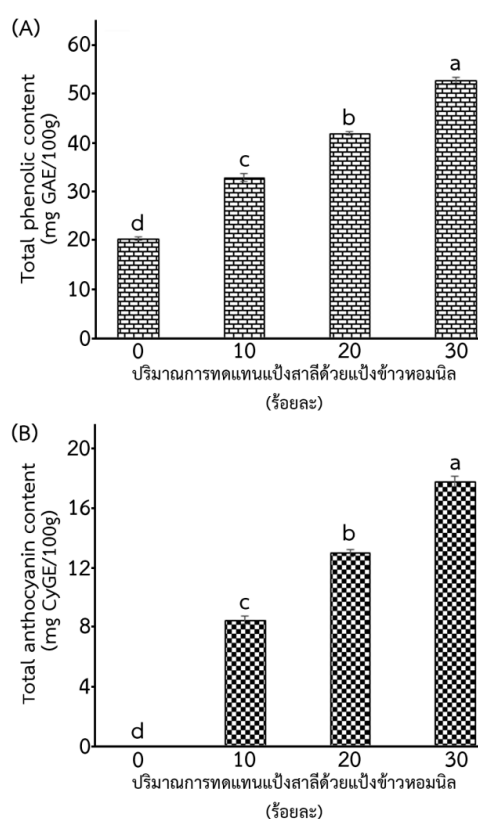
นิวตัน ซึ่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์หมักโกลสูตรที่ถูกทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวหอมมะลिर้อยละ 30 มีค่าความแข็งสูงสุด เท่ากับ 5.14 นิวตัน (ตารางที่ 3) ในขณะที่ค่าความยืดหยุ่นและค่าความสามารถในการเกาะรวมกันของผลิตภัณฑ์หมักโกลมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) จาก 11.14 เป็น 8.74 มิลลิเมตร และจาก 0.86 เป็น 0.63 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่าการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมมะลิ

ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์หมั่นโถวมีลักษณะแข็งเพิ่มขึ้น แต่ความยืดหยุ่นและความสามารถเกาะรวมกันลดลง เนื่องจากการทดแทนด้วยแป้งข้าวหอมนิลในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ปริมาณโปรตีนกลูเตน (Gluten) ที่มีอยู่ในแป้งสาธิตมีค่าลดลง (ถูกเจือจางลง) ดังนั้นผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ส่วนผสมของแป้งสาธิตร้อยละ 100 (สูตรควบคุม) จึงมีความสามารถในการเกาะรวมกัน การกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการหมักโดยยีสต์หรือผงฟูได้ดีกว่า รวมทั้งมีความนุ่มและความยืดหยุ่นสูง ซึ่งลักษณะที่ผลิตภัณฑ์หมั่นโถวมีความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อทดแทนแป้งข้าวหอมนิลในปริมาณที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ [33] พบว่าการทดแทนแป้งสาธิตด้วยแป้งมันม่วง (ร้อยละ 5-50) แป้งมันฝรั่ง (ร้อยละ 0-35) [34] แป้งถั่วแดง (ร้อยละ 10-40) [32] รำข้าวโอ๊ต (ร้อยละ 5 ถึง 15) [35] การเสริมผงเมลลิตแอลกอฮอล์ (ร้อยละ 0-20) [36] และแป้งบัววิท (ร้อยละ 5-15) [37] ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมั่นโถว คือ มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ความยืดหยุ่นและการเกาะรวมตัวกันมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม

3.3 ผลของการศึกษาปริมาณการทดแทนแป้งข้าวสาธิตด้วยแป้งข้าวหอมนิลที่เหมาะสมต่อปริมาณสารพฤกษเคมีในผลิตภัณฑ์หมั่นโถว

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารพฤกษเคมี ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสารแอนโทไซยานินในผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ทั้ง 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ของปริมาณแป้งสาธิตทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าการทดแทนแป้งสาธิตบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิลในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 30 มีผลทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสารแอนโทไซยานินทั้งหมดในผลิตภัณฑ์หมั่นโถวเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

(รูปที่ 5) โดยผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ถูกทดแทนแป้งสาธิตบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิลร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ของปริมาณแป้งสาธิตทั้งหมด มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 20.41, 33.00, 42.00 และ 52.93 mg GAE/100g ตามลำดับ (รูปที่ 5A) และมีสารแอนโทไซยานินเท่ากับ 0.00, 8.49, 13.03 และ 17.81 mg CyGE/100g ตามลำดับ (รูปที่ 5B) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่มีส่วนผสมของแป้งข้าวหอมนิลเหล่านี้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสารแอนโทไซยานินทั้งหมดเพิ่มขึ้น 1.62 และ 1.62 เท่า ตามลำดับ (รูปที่ 5A และ 5B)

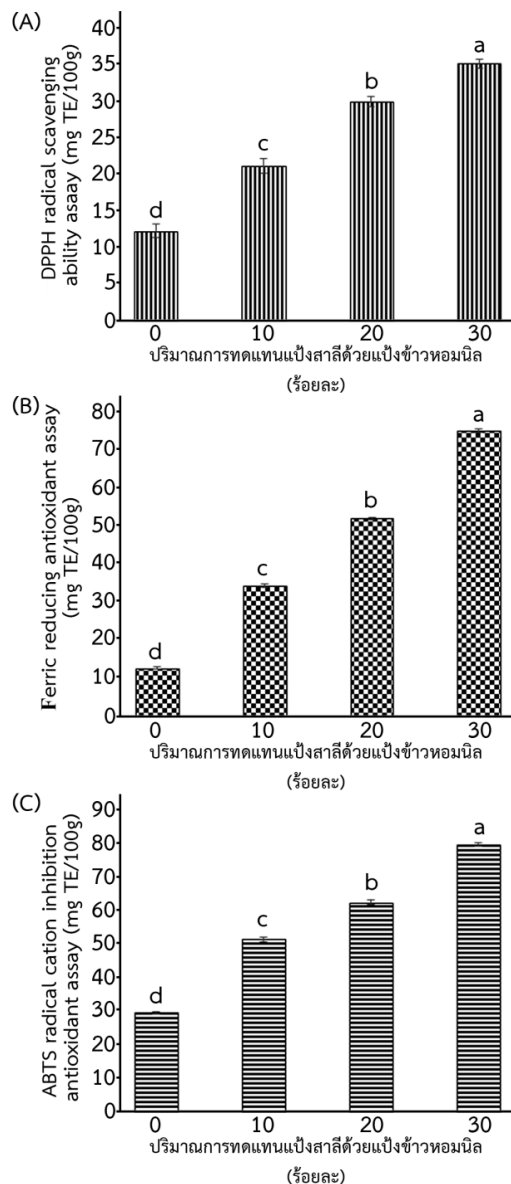


รูปที่ 5 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (A) และสารแอนโทไซยานินทั้งหมด (B) ในผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ทดแทนแป้งสาธิตด้วยแป้งข้าวหอมนิลในระดับที่แตกต่างกัน (หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันบนแท่งกราฟแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$))

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อปริมาณการทดแทนด้วยแป้งข้าวหอมนิลเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ปริมาณสารพฤกษเคมีเพิ่มขึ้น โดยสารพฤกษเคมีที่สำคัญที่พบมากในแป้งข้าวหอมนิล ได้แก่ protocatechuic acid, ferulic acid และ cyanidin-3-glucoside สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ [32] พบว่าผลิตภัณฑ์หมักโกลที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 40 มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยเพิ่มขึ้นจาก 63.06 เป็น 127.67 mg GAE/100g

3.4 ผลของการศึกษาปริมาณของการทดแทนแป้งข้าวสาลีด้วยแป้งข้าวหอมนิลที่เหมาะสมต่อฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์หมักโกล

ผลการทดสอบฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน เมื่อทดสอบด้วยวิธี DPPH, FRAP และ ABTS ในผลิตภัณฑ์หมักโกลที่ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิลในปริมาณที่แตกต่างกัน (ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ของปริมาณแป้งสาลีทั้งหมด) แสดงดังรูปที่ 6 พบว่าการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิลในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 30 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หมักโกลมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) (รูปที่ 6) การทดสอบฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH พบว่าผลิตภัณฑ์หมักโกลมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 12.23 เป็น 35.23 mg TE/100g (รูปที่ 6A) ส่วนการทดสอบด้วยวิธี FRAP เพิ่มขึ้นจาก 12.45 เป็น 75.36 mg TE/100g (รูปที่ 6B) ในขณะที่การทดสอบด้วยวิธี ABTS ผลิตภัณฑ์หมักโกลมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้นจาก 29.32 เป็น 79.76 mg TE/100g (รูปที่ 6C) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์หมักโกลที่มีส่วนผสมของแป้งข้าวหอมนิลในปริมาณที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้มีฤทธิ์การต้าน



รูปที่ 6 ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์หมักโกลที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวหอมนิลในระดับที่แตกต่างกัน เมื่อทดสอบด้วยวิธี DPPH (A), FRAP (B) และ ABTS (C) (หมายเหตุ ตัวอักษรที่ต่างกันบนแท่งกราฟแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$))

ออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้น โดยผันแปรตามปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและสารแอนโทไซยานินทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์หมักโกล สอดคล้องกับ

รายงานของ [32] ทำการทดสอบฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของหมันโถวทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วแดงด้วยวิธี DPPH, FRAP และ ABTS พบว่าการทดแทนในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 40 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หมันโถวมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) โดยการทดสอบด้วยวิธี DPPH เพิ่มขึ้นจาก 80.31 เป็น 236.67 $\mu\text{M TE}/100\text{g}$ การทดสอบด้วยวิธี ABTS เพิ่มขึ้นจาก 785.00 เป็น 1153.67 $\mu\text{M TE}/100\text{g}$ และการทดสอบด้วยวิธี FRAP เพิ่มขึ้นจาก 396.04 เป็น 703.75 $\mu\text{M TE}/100\text{g}$

นอกจากนี้ [38] ได้ทำการทดสอบฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์หมันโถวที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวฟ่างแดงและแป้งข้าวฟ่างขาว (ร้อยละ 0 ถึง 30) ด้วยวิธี ABTS พบว่าผลิตภัณฑ์หมันโถวที่ทดแทนด้วยแป้งข้าวฟ่างแดง (ร้อยละ 30) มีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันสูงกว่าหมันโถวที่ทดแทนด้วยแป้งข้าวฟ่างสีขาว ในขณะที่ [39] ได้ทำการศึกษาฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี ABTS ในผลิตภัณฑ์หมันโถวที่เสริมผงชาเขียว พบว่าปริมาณการเสริมผงชาเขียวที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 4 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หมันโถวมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4 การประเมินลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมันโถวที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวหอมนิลในระดับที่แตกต่างกัน

ลักษณะทางด้านประสาทสัมผัส	ปริมาณการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวหอมนิล (ร้อยละ)			
	0	10	20	30
ลักษณะที่ปรากฏ	6.98±0.17c	7.28±0.11ab	8.02±0.20a	6.25±0.14d
สี	7.11±0.26c	7.48±0.34b	7.88±0.21a	6.08±0.35d
กลิ่น	6.91±0.45c	7.31±0.30b	8.08±0.36a	7.38±0.41d
รสชาติ	7.14±0.40c	7.54±0.51ab	7.88±0.15a	7.05±0.10cd
เนื้อสัมผัส	7.28±0.07c	7.88±0.35ab	8.00±0.21a	6.77±0.19d
ความชอบโดยรวม	7.28±0.45c	7.78±0.21ab	8.28±0.42a	6.91±0.25d

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

3.5 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมันโถว

ผลการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมันโถวที่ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิลร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ของปริมาณแป้งสาลีทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัส ได้แก่ ด้านลักษณะที่ปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์หมันโถวสูตร

ควบคุม (ร้อยละ 0) ทั้งนี้ผู้ทดสอบให้คะแนนการยอมรับผลิตภัณฑ์หมันโถวที่ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิลร้อยละ 20 สูงกว่าผลิตภัณฑ์หมันโถวที่ถูกทดแทนด้วยแป้งข้าวหอมนิลร้อยละ 0, 10 และ 30 ของปริมาณแป้งสาลีทั้งหมด และมีค่าคะแนนเฉลี่ยทางด้านลักษณะที่ปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงสุด และมีค่าคะแนนเท่ากับ 8.42, 7.88, 8.18, 7.98, 8.40 และ 8.28 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับความชอบปานกลางถึงชอบมาก เนื่องจากผลิตภัณฑ์หมันโถวมีเนื้อสีม่วงอ่อนเป็นที่พึงพอใจของผู้

ทดสอบมากกว่าผลิตภัณฑ์หมั่นโถวเนื้อสีขาว ในขณะที่ผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ทดแทนด้วยแป้งข้าวหอมนิลร้อยละ 30 มีลักษณะเนื้อสีม่วงเข้มคล้ำมากเกินไป ลักษณะเนื้อสัมผัสค่อนข้างแข็งกระด้าง รวมทั้งการขึ้นฟูต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าสีและเนื้อสัมผัสที่ พบว่าการเพิ่มระดับการทดแทนด้วยแป้งข้าวหอมนิล จะส่งผลถึงลักษณะของสีและเนื้อสัมผัส รวมทั้งจะส่งผลให้ค่าคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสในทุก ๆ ด้านมีค่าคะแนนลดลง (ตารางที่ 4)

4. สรุป

ผลการศึกษาปริมาณการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งข้าวหอมนิลที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ พบว่าปริมาณแป้งข้าวหอมนิลที่เหมาะสมสำหรับทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์หมั่นโถว คือ ร้อยละ 20 ของปริมาณแป้งสาลีทั้งหมด และผู้บริโภคให้การยอมรับในระดับความชอบปานกลางถึงชอบมาก โดยลักษณะของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวที่ได้มีความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความยืดหยุ่นและค่าความสามารถในการเกาะรวมกันลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) ค่าสีของผลิตภัณฑ์หมั่นโถวมีความสว่างลดลง ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดงมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์หมั่นโถวมีสีม่วงแดงเพิ่มขึ้น และเมื่อนำผลิตภัณฑ์หมั่นโถวไปวิเคราะห์ปริมาณสารพฤกษเคมี พบว่า ผลิตภัณฑ์หมั่นโถวมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและสารแอนโทไซยานินทั้งหมด รวมทั้งมีฤทธิ์การต้านออกซิเดชันสูงกว่าหมั่นโถวสูตรควบคุม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ประจำปีงบประมาณ 2560 และขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และ

เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยาที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการดำเนินการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Shao, Z. Hu, Y. Yu, R. Mou, Z. Zhu and T. Beta, "Phenolic acids, anthocyanins, proanthocyanidins, antioxidant activity, minerals and their correlations in non-pigmented, red, and black rice," *Food Chemistry*, vol. 239, pp. 733-741, Jun. 2018.
- [2] S. Kraithong, S. Lee and S. Rawdkuen, "Physicochemical and functional properties of Thai organic rice flour," *Journal of Cereal Science*, vol. 79, pp. 259-266, Jun. 2018.
- [3] N. Tangsrianugul, R. Wongsagonsup and M. Supphantharika, "Physicochemical and rheological properties of flour and starch from Thai pigmented rice cultivars," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 137, pp. 666-675, Jun. 2019.
- [4] G. Pereira-Caro, G. Cros, T. Yokota and A. Crozier, "Phytochemical profiles of black, red, brown, and white rice from the Camargue region of France," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 61, pp. 7976-7986, Aug. 2013.
- [5] D.K. Verma and P.P. Srivastav, "Bioactive compounds of rice (*Oryza sativa* L.): Review on paradigm and its potential benefit in human health," *Trends in Food*

- Science & Technology*, vol. 97, pp. 355-365, Jan. 2020.
- [6] V. Melini, G. Panfili, A. Fratianni and R. Acquistucci, "Bioactive compounds in rice on Italian market: pigmented varieties as a source of carotenoids, total phenolic compounds and anthocyanins, before and after cooking," *Food Chemistry*, vol. 277, pp. 119-127, Oct. 2019.
- [7] J. Ratseewo, N. Meeso and S. Siriamornpun, "Changes in amino acids and bioactive compounds of pigmented rice as affected by far-infrared radiation and hot air drying," *Food Chemistry*, vol. 306, pp. 125644, Oct. 2020.
- [8] E.A. Hudson, P.A. Dinh, T. Kokubun, M.S.J. Simmonds and A. Gescher, "Characterization of potentially chemopreventive phenols in extracts of brown rice that inhibit the growth of human breast and colon cancer cells," *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, vol. 9, no. 11, pp. 1163-1170, Nov. 2000.
- [9] K. Pintha, S. Yodkeeree and P. Limtrakul, "Proanthocyanidin in red rice inhibits MDA-MB-231 breast cancer cell invasion via the expression control of invasive proteins," *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, vol. 38, no. 4, pp. 571-581, Jan. 2015
- [10] G.M. Forster, K. Raina, A. Kumar, S. Kumar, R. Agarwal, M.H. Chen, J.E. Bauer, A.M. McClung and E.P. Ryan, "Rice varietal differences in bioactive bran components for inhibition of colorectal cancer cell growth," *Food Chemistry*, vol. 141, pp. 1545-1552, Nov. 2013.
- [11] R.D. Verschoyle, P. Greaves, H. Cai, R.E. Edwards, W.P. Steward and A.J. Gescher, "Evaluation of the cancer chemopreventive efficacy of rice bran in genetic mouse models of breast, prostate and intestinal carcinogenesis," *British Journal of Cancer*, vol. 96, pp. 248-254, Jan. 2007.
- [12] M.E. Norhaizan, S.K. Ng, M.S. Norashareena and M.A. Abdah, "Antioxidant and cytotoxicity effect of rice bran phytic acid as an anticancer agent on ovarian, breast and liver cancer cell lines," *Malaysian Journal of Nutrition*, vol. 17, pp. 367-375, Dec. 2011.
- [13] P.Tantipaiboonwong, K. Pintha, W. Chaiwangyen, T. Chewonarin, K. Pangjit, O. Chumphukam, N. Kangwan and M. Suttajit, "Anti-hyperglycaemic and anti-hyperlipidaemic effects of black and red rice in streptozotocin-induced diabetic rats," *ScienceAsia*, vol. 43, pp. 281-288, Sep. 2017.
- [14] E.E. Hlaing, P. Piamrojanaphat, N. Lailerd, N. Phaonakrop and S. Roytrakul, "Anti-diabetic activity and metabolic changes in purple rice bran supplement type 2 diabetic rats by proteomics," *International Journal of Pharmacognosy*

- and *Phytochemical Research*, vol. 9, no. 3, pp. 428-436, Mar. 2017.
- [15] S.M. Boue, K.W. Daigle, M.H. Chen, H. Cao and M.L. Heiman, "Antidiabetic potential of purple and red rice (*Oryza sativa* L.) bran extracts," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 64, pp. 5345-5353, Jun. 2016.
- [16] Y. Niu, B. Gao, M. Slavin, X. Zhang, F. Yang, J. Bao, H. Shi, Z. Xie and L.L. Yu, "Phytochemical compositions, and antioxidant and anti-inflammatory properties of twenty-two red rice samples grown in Zhejiang," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 54, pp. 521-527, Dec. 2013.
- [17] T. Kitisin, N. Saewan and N. Luplertlop, "Potential anti-inflammatory and antioxidative properties of Thai colored-rice extracts," *Plant Omics*, vol. 8, no. 1, pp. 69-77, Jan. 2015.
- [18] P. Limtrakul, S. Yodkeeree, P. Pitchakarn and W. Punfa, "Anti-inflammatory effects of proanthocyanidin-rich red rice extract via suppression of MAPK, AP-1 and NF- κ B pathways in raw 264.7 macrophages," *Nutrition Research and Practice*, vol. 10 no. 3, pp. 251-258, Jun. 2016.
- [19] Y.P. Huang and H.M. Lai, "Bioactive compounds and antioxidative activity of colored rice bran," *Journal of Food and Drug Analysis*, vol. 24, pp. 564-574, Mar. 2016.
- [20] F.M. Bhat and C.S. Riar, "Characterizing the pigmented traditional rice cultivars grown in temperate regions of Kashmir (India) for free and bound phenolics compounds and in vitro antioxidant properties," *Journal of Cereal Science*, vol. 76, pp. 253-262, Jul. 2017.
- [21] J. Tirasarot and C. Thanomwong, "Production of healthy beverage from "Homnil" rice," *KKU Science Journal*, vol. 43, pp. 395-402, Jul.-Sep. 2015.
- [22] A. Rodmui and O. Jitwaropas, "Production of cookies using wheat flour partial substituted with Hom nin rice flour," *Journal of Food Technology, Siam University*, vol. 3, no. 1, pp. 37-42, Jun. 2006-May. 2007.
- [23] M. Kaur, V. Singh and R. Kaur, "Effect of partial replacement of wheat flour with vary levels of flaxseed flour on physicochemical, antioxidant and sensory characteristics of cookies," *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, vol. 9, pp 14-20, Dec. 2017.
- [24] N. Onanong, *Rice : Science and Technology*, 3rd ed. Bangkok: Kasetsart University Press, 2013.
- [25] C. Jitana and N. Onanong, *Basic Baking Science and Technology*, 11st ed. Bangkok: Kasetsart University Press, 2011.
- [26] K. supichaya, "Effect of partial replacement of wheat flour with purple sweet potato flour on physicochemical properties and antioxidant activities of

- steamed bun (Mantou),” *Thai Journal of Burapha Science*, vol. 25, no. 2, pp. 664-679, May-Aug. 2020.
- [27] Y. Shao, F. Xu, X. Sun, J. Bao and T. Beta, “Identification and quantification of phenolic acids and anthocyanins as antioxidants in bran, embryo and endosperm of white, red and black rice kernels (*Oryza sativa* L.),” *Journal of Cereal Science*, vol. 59, pp. 211-218, Mar. 2014.
- [28] J. Kubola, S. Siriamornpun and N. Meeso, “Phytochemical, vitamin C and sugar content of Thai fruits,” *Food Chemistry*, vol. 126, pp. 972-981, Jun. 2011.
- [29] T. Belwal, P. Dhyani, I.D Bhatt, R.S. Rawal and V. Pande, “Optimization extraction conditions for improving phenolic content and antioxidant activity in *Berberis asiatica* fruits using response surface methodology (RSM),” *Food Chemistry*, vol. 207, pp. 115-124, Sep. 2016.
- [30] Q.H. Gao, P.T. Wu, J.R. Liu, C.S. Wu, J.W. Parry and M. Wang, “Physico-chemical properties and antioxidant capacity of different jujube (*Ziziphus jujube* Mill.) cultivars grown in loess plateau of China,” *Scientia Horticulturae*, vol. 130, pp. 67-72, Aug. 2011.
- [31] V. Jansom, C. Jansom and N. Lerdvuthisophon, “The Relationship between Color Values in Rice to Phenolic Acids, Flavonoids, and Antioxidants,” *Journal of the Medical Association of Thai*, vol. 103, pp. 80-86, Mar. 2020.
- [32] H. Wiangwalai and K. Phuworg, “Effect of red bean flour substituted for wheat flour on physicochemical properties and free radical scavenging activities in steamed bun,” *Thai Journal of Science and Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 534-543, Aug. 2018.
- [33] T. Zhang, F. Zhang, Y. Cao, H. Zhang, Z. Yang and H. Li, “Effect of whole purple potato flour on dough properties and quality of steamed bread,” *Journal of Food Research*, vol. 8, no. 4, pp. 122-130, Jul. 2019.
- [34] L. Xing-li, M. Tai-hua, S. Hong-nan, Z. Miao and C. Jing-wang, “Influence of potato flour on dough rheological properties and quality of steamed bread,” *Journal of Integrative Agriculture*, vol. 15, no. 11, pp. 2666-2676, Mar. 2016.
- [35] L. Wenjun, B. Margaret, S. Luca and B. Charles, “The Effect of Oat Bran on the Dough Rheology and Quality of Chinese Steamed Bread,” *Grain & Oil Science and Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 126-130, Sep. 2018.
- [36] F. Zhu and J. Li, “Physicochemical properties of steamed bread fortified with ground linseed (*Linum usitatissimum*,” *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 54, pp. 1670-1676, Nov. 2019.

- [37] W. Liu, M. Brennan, L. Serventi and C. Brennan, "Buckwheat flour inclusion in Chinese steamed bread: potential reduction in glycemic response and effects on dough quality," *European Food Research and Technology*, vol. 243, pp. 727–734, Sep. 2017.
- [38] G. Wu, Y. Shen, Y. Qi, H. Zhang, L. Wang, H. Qian, X. Qia, Yan Li and S. K. Johnson, "Improvement of in vitro and cellular antioxidant properties of Chinese steamed bread through sorghum addition," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 91, pp. 77-83, Jan. 2018.
- [39] J. Ning, G. G. Hou, J. Sun, Z. Zhang and X. Wan, "Effects of green tea powder on the quality attributes of hard red winter wheat flour and Chinese steamed bread," *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 54, pp. 576-582, Oct. 2019.

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

ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำมันข้าวโพดสามสายพันธุ์

รุ่งทิwa วงศ์ไพศาลฤทธิ์* และ วิชาญ พงษ์สานต์ศิริ

คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

149 ถนนเจริญกรุง แขวงยานนาวา เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

รับบทความ 30 พฤษภาคม 2563 แก้ไขบทความ 13 สิงหาคม 2563 ตอรับบทความ 15 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

การวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยด์ ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl Scavenging Capacity (DPPH) และวิธี 1, 10-Phenanthroline (Phen) ของผลิตภัณฑ์น้ำมันข้าวโพด 3 สายพันธุ์ คือสายพันธุ์ราชินีทับทิมสยาม (นมข้าวโพดสีม่วง) สายพันธุ์สวีทไวท์ (นมข้าวโพดสีขาว) สายพันธุ์สวีท (นมข้าวโพดสีเหลือง) พบว่าผลิตภัณฑ์นมข้าวโพด 3 ชนิด ได้แก่ นมข้าวโพดสีม่วง นมข้าวโพดสีขาว นมข้าวโพดสีเหลือง มีปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด เท่ากับ 0.45 ± 0.00 0.29 ± 0.02 และ 0.68 ± 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ปริมาณแอนโทไซยานินซึ่งวัดโดยวิธีฟิเออซติฟเฟอเรนเซียล มีค่าเท่ากับ 2.86 ± 0.01 1.71 ± 0.03 และ 0.80 ± 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด เท่ากับ 12.00 ± 0.02 10.05 ± 0.00 และ 8.62 ± 0.09 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับร้อยละ 96.50 ± 0.10 47.10 ± 0.01 และ 60.91 ± 0.08 ตามลำดับ และมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ Phen เท่ากับ 133.98 ± 0.76 111.17 ± 0.48 และ 86.61 ± 0.98 มิลลิกรัม/ลิตรตามลำดับ

คำสำคัญ: นมข้าวโพด; สายพันธุ์; ราชินีทับทิมสยาม (สีม่วง); สวีทไวท์ (สีขาว); สวีท (สีเหลือง); DPPH; Phen

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

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

Antioxidant Activity of 3 Varieties of Corn Milk

Rungthiwa Wongpaisanrit* and Wichan Pongsankeeree

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

Received 30 May 2020; Revised 13 August 2020; Accepted 15 September 2020

Abstract

The purpose of this research was to analyze carotenoid content, anthocyanin content, phenolic compound content and the antioxidant activity by 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl scavenging capacity (DPPH) and 1, 10-Phenanthroline (Phen). In the 3 varieties of corn milk which were the Queen Ruby Siam strain (Purple corn milk), (White corn milk), Sweet strain (Yellow corn milk). It was found that the samples of 3 types of corn milk have total carotenoid content were 0.45 ± 0.00 , 0.29 ± 0.02 and 0.68 ± 0.00 mg/l respectively. Anthocyanin content measured by pH-differential method were 2.86 ± 0.01 , 1.71 ± 0.03 and 0.80 ± 0.01 mg/l respectively. The total amount of phenolic compounds were 12.00 ± 0.02 , 10.05 ± 0.00 and 8.62 ± 0.09 mg/l respectively. The ability to resist free radicals by DPPH method were equal to 96.50 ± 0.10 , 47.10 ± 0.01 and 60.91 ± 0.08 respectively. The antioxidant activity using Phen method were 133.98 ± 0.76 , 111.17 ± 0.48 and 86.61 ± 0.98 mg/l respectively.

Keywords : Corn Milk; Species; Tubtim Siam (Purple); Sweet White (White); Sweet (Yellow) ; DPPH; Phen

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

1. บทนำ

ข้าวโพดหวาน เป็นข้าวโพดที่ปลูกมากทั่วโลก ผู้ปลูกรายใหญ่ของโลก ได้แก่ สหรัฐอเมริกา ฝรั่งเศส อิตาลี และแคนาดา ส่วนเอเชียมีผู้ปลูกรายใหญ่ ได้แก่ ประเทศญี่ปุ่น ไต้หวัน และไทย โดยประเทศไทยมีแหล่งเพาะปลูกสำคัญ ได้แก่ ภาคเหนือ เช่น จังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย ลำพูน ลำปาง ภาคตะวันออก เชียงเหนือ เช่น จังหวัดหนองคาย นครพนม ภาคกลาง เช่น จังหวัดกาญจนบุรี ราชบุรี นครปฐม สุพรรณบุรี ส่วนภาคใต้ เช่น จังหวัดชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช และสตูล [1] เกษตรกรมักปลูกข้าวโพดหวานในฤดูฝนช่วงเดือนพฤษภาคม และเก็บเกี่ยวในเดือนกรกฎาคม สิงหาคม และตุลาคม และปลูกหลังการเก็บเกี่ยวข้าวในเดือนตุลาคม - พฤศจิกายน และเก็บเกี่ยวในเดือนกุมภาพันธ์- มีนาคม [2]

การจำหน่ายผลผลิตมีทั้งการจำหน่ายแก่โรงงานเพื่อแปรรูปเป็นข้าวโพดหวานกระป๋อง การส่งออกต่างประเทศ และนำมาบริโภคภายในประเทศ รูปแบบการจำหน่ายในประเทศมักพบนำฝักสดมาขายตามท้องตลาดการเกษตร ตลาดสด และมักพบการขายเป็นข้าวโพดหวานต้มหรือข้าวโพดหวานย่างไฟตามข้างถนนของพื้นที่แปลงปลูกด้านประโยชน์และคุณค่าทางอาหาร พบว่า ข้าวโพดหวานต้มช่วยลดความเสี่ยงโรคหัวใจ และมะเร็งได้ ข้าวโพดหวานต้มสามารถปลดปล่อยสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญชื่อ กรดเฟอร์ูลิก (Ferulic Acid) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยระบบภูมิคุ้มกันในร่างกายมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้กรดเฟอร์ูลิกยังนิยมใช้สำหรับต้านการแก่ของเซลล์ ป้องกันเซลล์มะเร็งโรคหัวใจ ใช้หัตถ์ ต้านผลกระทบจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต ช่วยป้องกันมะเร็งผิวหนังจากแสงแดด [1]

“นํ้านมข้าวโพด” หรือ “นมข้าวโพด” เป็นอีกผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการแปรรูปข้าวโพดหวานให้เป็นเครื่องดื่มที่อุดมไปด้วยสารอาหารที่มีคุณประโยชน์มากมาย เช่น วิตามินเอ เบต้า-แคโรทีน แคลเซียมและ

เป็นการเพิ่มมูลค่าผลิตผลทางการเกษตรอีกทางหนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรภาครัฐให้การส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรมากขึ้นเพื่อเพิ่มมูลค่าของสินค้าเกษตรและเป็นการเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรด้วย ซึ่งในปัจจุบันการแปรรูปผลผลิตการเกษตรมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทั้งลักษณะอุตสาหกรรมท้องถิ่นและอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ [3]

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาผลิตภัณฑ์นํ้านมจากข้าวโพด โดยจะศึกษาคุณภาพทางกายภาพ คุณภาพทางเคมี ปริมาณแคลอรีที่น้อย ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและการต้านอนุมูลอิสระของนํ้านมข้าวโพดทั้ง 3 สายพันธุ์ที่เกษตรกรนิยมปลูกและที่มั่งคั่งวัตถุแตกต่างกัน 3 สี คือ สายพันธุ์ราชินีทับทิมสยาม (สีม่วง) สายพันธุ์สวีทไวท์ (สีขาว) สายพันธุ์สวีท (สีเหลือง) ซึ่งมีปริมาณแคลอรีที่น้อย ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและการต้านอนุมูลอิสระแตกต่างกัน [4]-[6] ซึ่งคาดว่าจะเป็นการสร้างคุณลักษณะและเพิ่มมูลค่าของข้าวโพดให้สูงขึ้นอีกด้วย และอาจใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประกอบธุรกิจหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP) โดยนำวัตถุดิบจากท้องถิ่นเพื่อสร้างอัตลักษณ์ให้กับสินค้าที่มีความแตกต่างจากที่อื่น โดยแทรกข้อมูลสารแอนติออกซิแดนต์ที่เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าให้กับผู้ประกอบการในอนาคตได้

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ศึกษากรรมวิธีการผลิตนํ้านมข้าวโพด 3

สายพันธุ์

โดยใช้ข้าวโพด 3 สายพันธุ์ ได้แก่ สายพันธุ์ราชินีทับทิมสยาม (สีม่วง) สายพันธุ์สวีทไวท์ (สีขาว) สายพันธุ์สวีท (สีเหลือง) ไปต้มนาน 30 นาที จากนั้นผ่านเอาเฉพาะเมล็ดแล้ว ชั่งน้ำหนัก 2,000 กรัม แล้วเติมนํ้าสะอาดลงไป 4,000 กรัม จากนั้นนำไปปั่นโดยใช้เครื่อง

ปั่นผสม (ปั่นนาน 30 วินาที) วัดค่าปริมาตรและปรับความหวานเท่ากับ 6 องศาบริกซ์ (โดยเติมน้ำตาลทราย) นำส่วนผสมของน้ำข้าวโพดทั้งหมดไปต้มโดยใช้ไฟปานกลาง [4], [5] พอเดือดให้เติมน้ำตาล คนจนน้ำตาลละลาย ยกลงแล้วตั้งทิ้งไว้ให้อุ่น แล้วนำมากรองเอากากข้าวโพดออกโดยใช้ตะแกรงขนาด 50 mesh และกรองซ้ำด้วยตะแกรงขนาด 50 mesh จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที พออุ่นค่อยบรรจุใส่ขวดพลาสติก PET ขนาด 5 ลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปแช่ในตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิ 6-8 องศาเซลเซียส

2.2 ศึกษาการวัดค่าสีของนมข้าวโพด

นำตัวอย่างนมข้าวโพดแต่ละตัวอย่างมาวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (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 แต่ถ้าค่า a* ที่เป็นลบ แสดงว่าตัวอย่างเป็นสีเขียว และในค่า b* ที่เป็นบวก แสดงว่าตัวอย่างเป็นสีเหลือง แต่ถ้าค่า b* เป็นลบแสดงว่าตัวอย่างเป็นสีน้ำเงิน

2.3 ศึกษาการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

pH และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Total Soluble Solid; TSS) ของนมข้าวโพด

2.3.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง

นำนมข้าวโพดแต่ละตัวอย่างมาวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยใช้เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH -Meter) แล้วบันทึกค่าที่วัดได้

2.3.2 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Total Soluble Solid; TSS)

วัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้โดยใช้เครื่องวัดความหวาน (Hand Refractometer)

2.4 ศึกษาปริมาณแคโรทีนอยด์ของนมข้าวโพด

ปิเตนมข้าวโพดตัวอย่างละ 5 มิลลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิตร แล้วสกัดตัวอย่างด้วยอะซิโตน 25 มิลลิตร เขย่าแล้วกรองตัวอย่าง จากนั้นนำสารละลายส่วนใสที่สกัดได้ใส่ในหลอดทดลอง นำสารที่สกัดได้ไปวัดที่ความยาวคลื่น 470, 645 และ 663 นาโนเมตร (nm) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libra s22) แล้วบันทึกค่าที่วัดได้เป็นค่าดูดกลืนคลื่นแสง โดยทดลอง 3 ซ้ำ และนำมาคำนวณโดยใช้สูตรดังต่อไปนี้ [6]

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

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

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

โดยที่

A = ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Abs)

V = ปริมาตรของอะซิโตน (ml)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (g)

2.5 ศึกษาปริมาณแอนโทไซยานินโดยวิธีพีเอช-

ดิฟเฟอเรนเชียล (pH-differential)

2.5.1 ปิเตตัวอย่างนมข้าวโพด ตัวอย่างละ 1 มิลลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ pH1 ให้ครบ 10 มิลลิตร แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร และ 700 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libra s22) โดยทดลอง 3 ซ้ำ [5], [7]

2.5.2 ปิเตตัวอย่างนมข้าวโพด ตัวอย่างละ 1 มิลลิตร ปรับปริมาตร โซเดียมอะซิเตท pH4.5 ให้ครบ 10 มิลลิตร แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร และ 700 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libra s22) โดยทดลอง 3 ซ้ำ [5], [7] และนำมาคำนวณโดยใช้สูตรดังต่อไปนี้

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

โดยที่

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

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

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

$$306.7 \text{ g/mol-1 (pelargonidin-3-glucoside)}$$

$$\text{DF} = \text{Dilution Factor}$$

$$\epsilon = \text{Molar Extinction Coefficient; } 26,900$$

$$\text{L.mol-1.cm-1, cyanidin-3-glucoside, } 31,100$$

$$\text{L.mol-1.cm-1, pelargonidin-3-glucoside}$$

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

2.6 ศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Content)

นำตัวอย่างนมข้าวโพดทั้ง 3 สายพันธุ์ (ถั่วเหลือง, ถั่วเขียว และถั่วดำ) นำไปปั่นเหวี่ยงและนำส่วนใสมาวิเคราะห์ โดยบีบตัวอย่างนมมาตัวอย่างละ 0.30 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นละลาย Folin-Ciocalteu เข้มข้นร้อยละ 10 (โดยปริมาตรต่อปริมาตร) จำนวน 1.50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นละลาย โซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้นร้อยละ 7.5 (ร้อยละ 7.5 Na_2CO_3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในน้ำกลั่น) จำนวน 3.00 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 10 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายผสมกัน และตั้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที (ถ้าสารละลายขุ่นนำไปปั่นเหวี่ยงและนำเอาสารละลายใสมาวิเคราะห์) เมื่อเกิดปฏิกิริยา สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงิน แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libra s22) โดยทดลอง 3 ซ้ำ และนำไปคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดจากกราฟมาตรฐานของ กรดแกลลิก [6], [8], [9]

2.7 การศึกษาความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยวิธี DPPH (1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl)

การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวอย่างนมข้าวโพด 3 สายพันธุ์ ซึ่งจะอาศัยการติดตามความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระ DPPH [1] ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่ทำให้สารละลายมีสีม่วงและสามารถดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร โดยจะเปรียบเทียบกับสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันมาตรฐานคือวิตามินซี (ซึ่งละลายน้ำได้ดี) โพรพิลแกลเลต (Propylgallate; PG) และบีเอชเอหรือบิวทิลไฮดรอกซีโทลูอีน (Butylated Hydroxyanisole; BHA) (ซึ่งสารมาตรฐานทั้ง 2 ชนิดละลายในน้ำมันจึงละลายแอลกอฮอล์ได้ดี)

2.7.1 การวัดความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยวิธี DPPH (2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)

บีบตัวอย่างนมข้าวโพดตัวอย่างละ 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองแต่ละหลอด จากนั้นเติมน้ำกลั่นละลายต่าง ๆ ลงไปดังนี้คือสารละลาย DPPH เข้มข้นร้อยละ 0.188 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในแอลกอฮอล์ร้อยละ 95) จำนวน 0.72 มิลลิลิตร สารละลายแอลกอฮอล์ร้อยละ 40 จำนวน 5.18 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วย Vortex Mixer พร้อมกับจับเวลาทันที เมื่อครบ 30 นาที แล้วถ่ายสารละลายลงในคิวเวต นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libra s22) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ สำหรับปฏิกิริยาควบคุม (Control) จะใช้น้ำกลั่น, แอลกอฮอล์ร้อยละ 40, แอลกอฮอล์ร้อยละ 95 อย่างละ 0.1 แทนสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันมาตรฐาน และหลอดที่เป็น Blank จะเตรียมเหมือนปฏิกิริยาควบคุมแต่จะเติมแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 จำนวน 0.72 มิลลิลิตร แทนสารละลาย DPPH โดยแต่ละการทดลองทำ 3 ซ้ำ

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

2.8 ศึกษาการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 1, 10-Phenanthroline (Phen)

2.8.1 การเตรียมสารละลายของการต้านสารปฏิกิริยาออกซิเดชันมาตรฐาน

ซึ่งวิตามินซี โพรพิลแกลเลต และ BHA ซึ่งเป็นสารปฏิกิริยาออกซิเดชันมาตรฐานอย่างละ 0.1 กรัม จำนวน 2 ชุด ชุดที่ 1 ปรับปริมาตรด้วยเมทานอล ให้ครบ 10 มิลลิลิตร และชุดที่ 2 ปรับ ปริมาตร ด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 10 มิลลิลิตร โดยปิเปตสารละลายมาหลอดละ 0.10 มิลลิลิตร เติมสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.2 (โดยมวลต่อปริมาตร) จำนวน 1.00 มิลลิลิตร เติมสารละลาย 1,10-Phenanthroline เข้มข้นร้อยละ 0.5 (โดยมวลต่อปริมาตร) จำนวน 0.5 มิลลิลิตร

ปรับปริมาตรด้วยเมทานอลให้ครบ 10 มิลลิลิตร เขย่าและเก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libra s22) โดยทดลอง 3 ซ้ำ

2.8.2 การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 1, 10-Phenanthroline (Phen)

นำตัวอย่างนมข้าวโพดทั้ง 3 สายพันธุ์ (ถ้าขุนนำไปปั่นเหวี่ยงและนำส่วนใสมาวิเคราะห์) โดยปิเปตตัวอย่างนมมาตัวอย่างละ 0.60 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองแต่ละหลอด ปิเปตสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.2 (โดยมวลต่อปริมาตร) จำนวน 1.00 มิลลิลิตร เติมสารละลาย 1,10-Phenanthroline เข้มข้นร้อยละ 0.5 (โดยมวลต่อปริมาตร) จำนวน 0.5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยเมทานอลให้ครบ 10 มิลลิลิตร เขย่าและเก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libra s22) โดยทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นนำไปคำนวณหาฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระจากกราฟมาตรฐานเพอร์ริสซัลเฟต

ตารางที่ 1 คุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์นมข้าวโพดทั้ง 3 ชนิด

ชนิดของนมข้าวโพด	คุณภาพทางกายภาพ			คุณภาพทางเคมี	
	ค่าสี			pH *	° Brix *
	L*	a*	B*		
สูตร 1 (สีม่วง)	57.94±0.09 ^a	7.26±0.03 ^a	13.12±0.04 ^a	6.80±0.01 ^a	5.10±0.06
สูตร 2 (สีขาว)	81.38±0.09 ^b	2.62±0.04 ^b	42.26±0.03 ^c	7.20±0.02 ^b	4.20±0.04
สูตร 3 (สีเหลือง)	79.41±0.09 ^b	2.64±0.03 ^b	6.46±0.04 ^b	7.45±0.01 ^b	4.30±0.05

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

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษากิจกรรมวิธีการผลิตน้ำนมข้าวโพด

ผลการศึกษากรรมวิธีการน้ำนมข้าวโพด 3 สายพันธุ์ โดยศึกษาคุณภาพทางกายภาพโดยน้ำนมข้าวโพดแต่ละตัวอย่างมาวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสีในระบบ L*, a*,

b* และศึกษาคุณภาพทางเคมีโดยน้ำนมข้าวโพดแต่ละตัวอย่างมาวัดค่าการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และค่า ° Brix ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 1 พบว่า สายพันธุ์ข้าวโพดมีผลต่อค่าสี pH และค่าของแข็งที่ละลายได้ในน้ำหรือค่าความหวาน (° Brix) ของผลิตภัณฑ์และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) โดย

นมข้าวโพดสีม่วงมีค่าความสว่าง (L^*) ต่ำกว่านมข้าวโพดสีขาวและนมข้าวโพดสีเหลือง เนื่องจากมีปริมาณแอนโทไซยานินอยู่สูงซึ่ง แอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่ให้สีแดงจนถึงม่วงจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสว่างน้อยและมีค่าความเป็นสีแดงสูงกว่านมข้าวโพดสีขาวและสีเหลือง นอกจากนี้ความแตกต่างระหว่างพันธุ์แล้วปริมาณสารดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สภาพภูมิอากาศ สถานที่ปลูกและอายุเก็บเกี่ยว [4]

3.2 ผลการศึกษาปริมาณแคโรทีนอยด์ ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำนมข้าวโพด

ผลการศึกษาปริมาณแคโรทีนอยด์ ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำนมข้าวโพด 3 สายพันธุ์ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 เห็นได้ว่านมข้าวโพดสีเหลืองมีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงสุด ซึ่งแคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุหรือสารสี (Pigment) ที่ให้สีเหลือง ส้ม แดง และส้ม-แดง และเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) จากธรรมชาติที่ช่วยต้านโรคมะเร็งและโรคหัวใจ [1]

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่านมข้าวโพดสีม่วงมีปริมาณแอนโทไซยานินสูงสุด ซึ่งแอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่ให้สีแดง ม่วง และน้ำเงิน เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ช่วยชะลอความเสื่อมของเซลล์ ช่วยลดอัตราเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจและเส้นเลือดอุดตันในสมองด้วยการยับยั้งไม่ให้เลือดจับตัวเป็นก้อน ชะลอความเสื่อมของดวงตา ช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค [4], [5], [7]

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่านมข้าวโพดสีม่วงมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดทั้งนี้เนื่องจากว่ามีปริมาณแอนโทไซยานินมาก รวมทั้งมีแคโรทีนอยด์รวมอยู่ในผลิตภัณฑ์ด้วยซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของพรชัยและคณะที่พบว่าสายพันธุ์และอายุเก็บเกี่ยวมีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการ

การต้านออกซิเดชันแตกต่างกัน โดยสายพันธุ์ที่มีเมล็ดมีสีเข้มมีปริมาณสารดังกล่าวสูงกว่ากลุ่มที่ไม่มีสี [4]

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่านมข้าวโพดสีม่วงมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH สูงสุดซึ่งจะสังเกตได้ว่า เมื่อผลิตภัณฑ์มีปริมาณแคโรทีนอยด์และแอนโทไซยานินมาก จะทำให้ผลิตภัณฑ์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมากและมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากตามไปด้วยซึ่งที่ตัดดาวและคณะได้กล่าวไว้ว่าข้าวโพดอาจเป็นแหล่งของสารพฤกษเคมีที่มีประโยชน์ต่อการรักษาโรคมะเร็งทั้งเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ [2]

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่านมข้าวโพดสีม่วงมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ Phen สูงสุดซึ่งจะสังเกตได้ว่า เมื่อผลิตภัณฑ์มีปริมาณแคโรทีนอยด์และแอนโทไซยานินมาก จะทำให้ผลิตภัณฑ์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมากและมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากตามไปด้วย [4], [5], [7], [9]

กล่าวโดยสรุปพันธุ์มีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและความสามารถในการต้านออกซิเดชันแตกต่างกัน โดยกลุ่มข้าวโพดพันธุ์ที่มีสีเข้มมีปริมาณสารดังกล่าวสูงกว่ากลุ่มที่ไม่มีสี ซึ่งพรชัยได้กล่าวไว้ว่าชนิดของสารประกอบฟีนอลิกที่เป็นองค์ประกอบหลักเมื่อตรวจสอบด้วยวิธี HPLC คือ Ferulic Acid และ p-coumaric Acid [4]

4. สรุป

แคโรทีนอยด์และแอนโทไซยานินจัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิกซึ่งความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ จากการทดลองพบว่าเมื่อมีปริมาณแคโรทีนอยด์และแอนโทไซยานินสูงส่งผลให้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงตามและทำให้มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากตามไปด้วย

สายพันธุ์ข้าวโพดมีผลต่อปริมาณแคโรทีนอยด์ ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก

และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ โดยสีของเมล็ดมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความสามารถในการต้านออกซิเดชัน โดยนมข้าวโพดสีม่วงมีปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระหรือความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงกว่านมข้าวโพดที่ผลิตจากข้าวโพดที่มีเมล็ดสีขาวและเหลือง

สายพันธุ์ข้าวโพดมีผลต่อปริมาณแคโรทีนอยด์ ปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกซึ่งปริมาณสารดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างพันธุ์ อุณหภูมิ สภาพภูมิอากาศ สถานที่ปลูกและอายุเก็บเกี่ยว

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์, สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่อำนวยความสะดวกงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Thanyalakaporn Tieoyong. (2019, April 13). Sweet corn and sweet corn planting. [Online]. Available: <https://www.nfc.or.th/content/6944>

[2] K. Vayuparp, *Specialty Corn Research and development*, Research project report, Department of Agriculture, 2015.

[3] P. Pitakpakorn, "Corn milk consumption behavior of consumers in Bangkok Metropolitan area," Master of Business Administration in Marketing, Srinakharinwirot University, 2003.

[4] B. Harakotr, B. Suriharn, R. Tangwongchai and K. Lertrat. "Profile of phenolic compounds and antioxidant capacity in waxy corn at different maturation stages," *KHON KAEN AGR. J.*, vol. 43, SUPPL. 1, pp. 311-316, 2015.

[5] B. Harakotr, B. Suriharn, R. Tangwongchai, M. P. Scott and K. Lertrat, "Anthocyanin, phenolics and antioxidant activity changes in purple waxy corn as affected by traditional cooking," *Food Chemistry*, vol. 164, pp. 510-517, 2014.

[6] Q. P. Hu 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.

[7] R. Zhang, L. Huang, Y. Deng, J. Chi, Y. Zhang, Z. Wei and M. Zhang, "Phenolic content and antioxidant activity of eight representative sweet corn varieties grown in South China," *International Journal of Food Properties*, vol. 20, no. 12, pp. 3043-3055, 2017.

[8] T. Paseephol, R. Prathum and S. Suriyakhan, "Phytochemical constituents and total phenolic content of bicolor corn silk (*Zea mays* hair) extracts," *HON KAEN AGR. J.*, vol. 46, SUPPL. 1, pp. 1315-1320, 2018.

[9] Y. Yao, W. Sang, M. Zhou and G. Ren, "Antioxidant and α -glucosidase inhibitory activity of colored grains in China," *J. Agri. Food Chem.* vol. 58, pp. 770-774, 2010

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

การเสริมกำลังคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

รัตนศักดิ์ หงษ์ทอง* อภัย เบ็ญจพงศ์ และ ธรรมมา เจียรธรวานิช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

รับบทความ 16 มีนาคม 2563 แก้ไขบทความ 21 สิงหาคม 2563 ตอรับบทความ 15 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เกิดจากคลอไรด์มีความรุนแรงและกินพื้นที่เป็นวงกว้าง ไม่จำเป็นที่โครงสร้างต้องสัมผัสกับน้ำทะเลหรือน้ำกร่อยโดยตรง แม้แต่โครงสร้างที่อยู่ห่างออกมาก็ยังได้รับผลกระทบกับปัญหาเหล่านี้ด้วย เมื่อโครงสร้างคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับผลกระทบจากคลอไรด์ เหล็กเสริมที่อยู่ภายในจะเกิดการกัดกร่อนจนทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก การโก่งตัว และรูปแบบการวิบัติของคาน หากไม่มีการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังความสามารถต่าง ๆ เหล่านี้ จะลดลงอย่างต่อเนื่องจนไม่ปลอดภัยต่อการใช้งานอีกต่อไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังให้โครงสร้างที่เสื่อมสภาพกลับมาใช้งานได้อย่างปลอดภัย งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการเสริมกำลังคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในลักษณะที่ต่างกัน 4 รูปแบบ เพื่อศึกษาหาแนวทางการเสริมกำลังที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ผลการศึกษาพบว่า การเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ทั้ง 4 รูปแบบ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย แต่ไม่สามารถเพิ่มความเหนียวของคานที่เกิดการเสื่อมสภาพให้กลับมาใกล้เคียงกับคานที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพได้ การเสริมกำลังที่สามารถเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้สูงสุดคือ การเสริมกำลังในรูปแบบตาราง และการเสริมกำลังรูปแบบที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ทำมุม 45 องศากับความยาวคานสามารถป้องกันรอยร้าวในแนวแยงได้ดีที่สุด

คำสำคัญ : คานลิก; เสื่อมสภาพ; เสริมกำลัง; คาร์บอนไฟเบอร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 9511 3185, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: rattanasak.h@mail.rmutk.ac.th

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

Strengthening of Deteriorated Reinforced Concrete Deep Beam Caused by Chloride with Carbon Fiber Sheets

Rattanasak Hongthong* Apai Benjaphong and Thamma Jairtalawanich

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep
2 Nanglinchee Road, Thungmahamek, Sathon, Bangkok, 10120

Received 16 March 2020; Revised 21 August 2020; Accepted 15 September 2020

Abstract

Deterioration of reinforced concrete deep beam structure caused by chloride is severe and takes up wide area even though the structure is not exposed to sea water or brackish water. Even the structure which is far from sea water or brackish water is affected by this problem. When the reinforced concrete deep beam structure is affected by chloride, steel reinforced inside the structure is corroded resulting in reducing the cross-sectional area of the reinforced steel affecting load capacity, deflection and beam failure. If there is no repair or strengthening, such capabilities are continuously reduced until it is no longer safe to use the beam. Therefore, it is necessary to repair or strengthening the deteriorated structure to be safely used. This research investigated strengthening of deteriorated reinforced concrete deep beam caused by chloride with 4 formats of carbon Fiber sheets to seek guidelines for the most efficient strengthening. The result showed that the strengthening by the 4 format of carbon fiber sheet could increase ultimate load capability yet could not improve ductility of the deteriorated beam to become close to the beam that is not deteriorated. The strengthening that could increase the maximum ultimate load capability was the table format strengthening. In addition, the strengthening that the carbon fiber making 45 degrees with the length of the beam could best prevent diagonal cracks.

Keywords : Deep Beam; Deterioration; Strengthening; Carbon Fiber

* Corresponding Author. Tel.: +668 9511 3185, E-mail Address: rattanasak.h@mail.rmutk.ac.th

1. บทนำ

คานเหล็กเป็นองค์อาคารช่วงสั้นที่มีความลึกประสิทธิภาพสูง ACI 318-14 [1] ระบุว่าคานเหล็กที่มีอัตราส่วนความยาวไม่เกิน 4 เท่าของความลึกหรือระยะห่างจากฐานรองรับมาถึงน้ำหนักที่มากกระทำแบบจุดต้องมีค่าไม่เกินกว่า 2 เท่าของความลึก การถ่ายแรงภายในของคานเหล็กจะมีพฤติกรรมคล้ายโครงข้อหมุน เหล็กเสริมทำหน้าที่คล้ายคอร์ดล่างและคอร์ดบน คอนกรีตทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงอัดจากบริเวณที่น้ำหนักบรรทุกจากภายนอกมากระทำสู่ฐานรองรับคล้ายชิ้นส่วนแนวทแยงในโครงข้อหมุน เรียกว่า ท่อนรับแรงอัดในแนวทแยง ภายในท่อนรับแรงอัดในแนวทแยงจะมีหน่วยแรงดึงในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวแกนของท่อนรับแรงอัด เมื่อหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าเกินกว่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ทำให้เกิดการแตกร้าวตามแนวแกนของท่อนรับแรงอัด เรียกรอยร้าวชนิดนี้ว่าการแตกร้าวที่เอวคาน หรือการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในแนวทแยง (Diagonal Crack) จึงจำเป็นต้องมีเหล็กเสริมที่เอวคาน (Web Reinforcement) เพื่อทำหน้าที่ป้องกันรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น เหล็กเสริมที่เอวคานไม่เพียงทำหน้าที่ป้องกันการแตกร้าวตามแนวทแยงของคานเท่านั้น แต่ยังมีส่วนกับรูปแบบการแตกร้าวและรูปแบบการวิบัติของคานเหล็กอีกด้วย [2]-[3] ดังนั้นหากคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพเหล็กเสริมที่เอวคานถูกกัดกร่อนจากสนิม อาจทำให้รูปแบบการแตกร้าว และรูปแบบการวิบัติของคานเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ยิ่งไปกว่านั้น จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เมื่อเหล็กเสริมที่เอวคานถูกกัดกร่อนจากสนิม จะทำให้เกิดผลกระทบกับการโค้งตัวและกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคานลดลง [4]-[5] ไม่เพียงแต่เหล็กเสริมบริเวณเอวคานที่ส่งผลต่อคานเหล็ก A. Iman and A. Azad [6] ได้ทำการศึกษาการเสื่อมสภาพของคานเหล็กที่เกิดการกัดกร่อน เฉพาะเหล็กเสริมรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว พบว่าเมื่อเหล็กเสริม

รับแรงดึงถูกกัดกร่อนจากสนิม ความแกร่ง (Stiffness) และน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคานมีค่าลดลง ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อคานเหล็กเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์โดยที่เหล็กเสริมที่เอวคานและเหล็กเสริมรับแรงดึงถูกกัดกร่อนย่อมส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก

โดยทั่วไปโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อม แต่เมื่อต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เช่น บริเวณชายฝั่งทะเล เหล็กเสริมที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีตมักเกิดการผุกร่อนจากสนิม ปกติเหล็กเสริมที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีตจะถูกป้องกันการกัดกร่อนด้วยความเป็นต่างของคอนกรีต แต่เมื่อความเป็นต่างของคอนกรีตถูกทำลายจากคลอไรด์ไอออน (Chloride Ions) จนกระทั่งอยู่ในระดับวิกฤติ หากมีปริมาณน้ำและออกซิเจนอย่างเพียงพอ เหล็กเสริมที่อยู่ภายในจะถูกกัดกร่อนจากสนิม [7] การเกิดสนิมไม่เพียงแต่ทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง ยังทำให้เกิดการแตกร้าว และเกิดการหลุดล่อนของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอยู่ ซึ่งมีสาเหตุมาจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดสนิมทำให้เกิดแรงดันภายในเนื้อของคอนกรีต เกิดการแตกร้าวและหลุดล่อนตามแนวเหล็กเสริม เป็นผลให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพิ่มขึ้น [8] การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดจากคลอไรด์จึงมีความรุนแรง และยังกินพื้นที่เป็นวงกว้าง เพราะไม่จำเป็นที่โครงสร้างต้องสัมผัสกับน้ำทะเลหรือน้ำกร่อยโดยตรง แม้แต่โครงสร้างที่อยู่ห่างออกมาในรัศมีประมาณ 2 กิโลเมตร ก็ยังได้รับผลกระทบกับปัญหาเหล่านี้ด้วย [9]

ปัญหาการเสื่อมสภาพไม่เพียงจะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรม และกำลังรับน้ำหนักประลัยของโครงสร้างเท่านั้น การเสื่อมสภาพยังส่งผลให้รูปแบบการวิบัติเปลี่ยนแปลงไปจากที่วิศวกรได้ออกแบบไว้ โครงสร้างที่เสื่อมสภาพเหล่านี้จึงจำเป็นต้องได้รับการบำรุงรักษา

หรือซ่อมแซม เพื่อให้ปลอดภัยและกลับมาใช้งาน ได้ดังเดิม การซ่อมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่นิยม ในปัจจุบันรูปแบบหนึ่งคือ การเสริมกำลังคานจาก ภายนอกด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (FRP) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา และมีความเหนียวสูง ทนต่อการกัดกร่อน ที่สำคัญสามารถติดตั้งและกำหนดทิศทางได้อย่าง สะดวก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเสริมกำลังคานเหล็ก คอนกรีตที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ด้วยแผ่น คาร์บอนไฟเบอร์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ เพื่อหารูปแบบที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลัง รับน้ำหนักบรรทุกทุกให้ได้ดีที่สุด

2. ระเบียบวิธีวิจัย

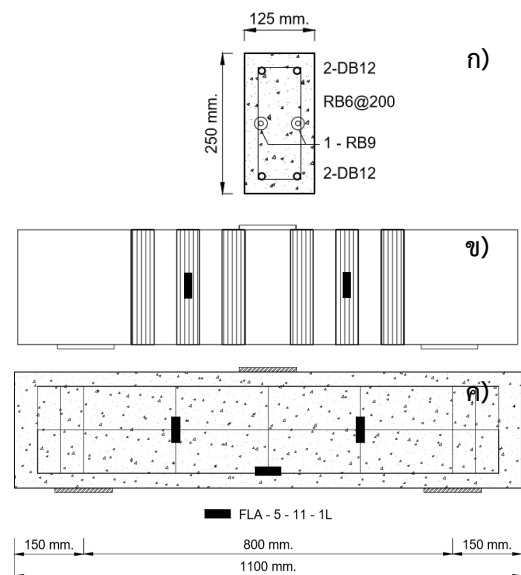
การศึกษาเรื่องการเสริมกำลังคานเหล็กคอนกรีต เสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ ได้ทำการ ทดสอบตัวอย่างคานทั้งหมด 6 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น ตัวอย่างที่คานไม่เกิดการเสื่อมสภาพ (D0M) จำนวน 1 ตัวอย่าง ตัวอย่างที่เกิดการเสื่อมสภาพ (D3M) จำนวน 1 ตัวอย่าง และตัวอย่างคานที่เกิดการเสื่อมสภาพ เช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 2 แต่นำมาเสริมกำลังด้วยแผ่น คาร์บอนไฟเบอร์จำนวนในรูปแบบที่แตกต่างกัน 4 ตัวอย่าง (D3MS1-D3MS4) การเร่งให้คานเกิด การเสื่อมสภาพในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการสร้างสภาวะ แวดล้อมจำลองเพื่อเร่งให้เหล็กเสริมที่อยู่ภายใน คอนกรีตเกิดการกัดกร่อนจากสนิม

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เริ่มต้นจากศึกษางานวิจัย ที่เกี่ยวข้องกับคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก สร้างตัวอย่าง ที่ใช้ในการทดสอบ สร้างสภาวะแวดล้อมจำลองให้คาน เกิดการเสื่อมสภาพ เสริมกำลังโครงสร้างคานคอนกรีต และทำการทดสอบแบบทำลายเพื่อศึกษาพฤติกรรม ต่าง ๆ ของคาน

2.1.1 การเตรียมเครื่องมือและวัสดุ

ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีขนาด $0.125 \times 0.25 \times 1.10$ เมตร มีอัตราส่วนช่วงการเค้นต่อ ความลึกประสิทธิภาพ 1.85 คอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีต ผสมเสร็จ มีกำลังอัดประลัยที่ 28 วันเท่ากับ 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (รูปทรงกระบอก) เหล็ก เสริมรับแรงอัดและแรงดึงใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก 4,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (SD 40 T) สำหรับ เหล็กเสริมตามขวาง ใช้เหล็กผิวเรียบประกอบด้วยเหล็ก เสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 และ 9 มิลลิเมตร มี กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก 2,400 กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร (SR 24)



รูปที่ 1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและตำแหน่งที่ติดตั้ง อุปกรณ์วัดความเครียด

แบบขยายหน้าตัด และการจัดเรียงเหล็กเสริม สำหรับตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 1(ก) งานวิจัยนี้ทุกตัวอย่างได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัด ความเครียด (Strain Gauge) ยี่ห้อ TML รุ่น FLA-5-11-1L สามารถวัดความเครียดได้สูงสุด (Strain Limit) $50,000 \times 10^{-6}$ Strain ไว้ที่เหล็กเสริมรับแรงดึง 1

ตำแหน่ง และที่เหล็กปลอกรับแรงเฉือน 2 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 1(ค) นอกจากนี้ก่อนทำการทดสอบแบบทำลายยังได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดไว้ที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในบริเวณช่วงการเฉือนดังแสดงในรูปที่ 1(ข) อีกจำนวน 2 ตำแหน่ง

2.1.2 การสร้างสภาวะแวดล้อมจำลอง

การสร้างสภาวะแวดล้อมจำลองเป็นการเร่งให้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเกิดการเสื่อมสภาพในห้องปฏิบัติการดังแสดงในรูปที่ 2 เพราะหากรอให้คอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพตามธรรมชาติต้องใช้เวลาาน วิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้เพื่อระยะเวลาในการเสื่อมสภาพคือ การใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอกโดยนำขั้วบวก (Anode) ต่อเข้ากับเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในเนื้อคอนกรีต ส่วนขั้วลบ (Cathode) ต่อเข้ากับแผ่นอลูมิเนียม และนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) การศึกษาที่ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความต่างศักย์ 5 โวลต์ ขั้วบวกเข้ากับเหล็กเสริมรับแรงดึง (DB12) และเหล็กเสริมตามขวาง (RB 9) ส่วนขั้วลบต่อเข้ากับแผ่นอลูมิเนียม สารละลายที่ใช้มีความเข้มข้นร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนักของน้ำ ระหว่างกระบวนการเร่งปฏิกิริยามีการเปลี่ยนสารละลาย และทำความสะอาดทุกสัปดาห์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2 การสร้างสภาวะแวดล้อมจำลอง

2.1.3 การเสริมกำลังคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

หลังจากสร้างสภาวะแวดล้อมจำลองเร่งให้คานเกิดการเสื่อมสภาพ จากนั้นจึงนำคานลึกคอนกรีตเสริม

เหล็ก 4 ตัวอย่าง มาเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้ยี่ห้อ Sikawrap-230C/45 มีลักษณะเส้นใยทิศทางเดียว (Uni-Direction) ดังแสดงในรูปที่ 3(ก) มีกำลังรับแรงดึงเฉลี่ยอยู่ 43,832 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 2.34 เมกกะกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และใช้ Sikadur 330 เป็นเรซินวัสดุประสานระหว่างผิวของคานคอนกรีตกับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ดังรูปที่ 3(ข)



รูปที่ 3 แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และวัสดุประสาน

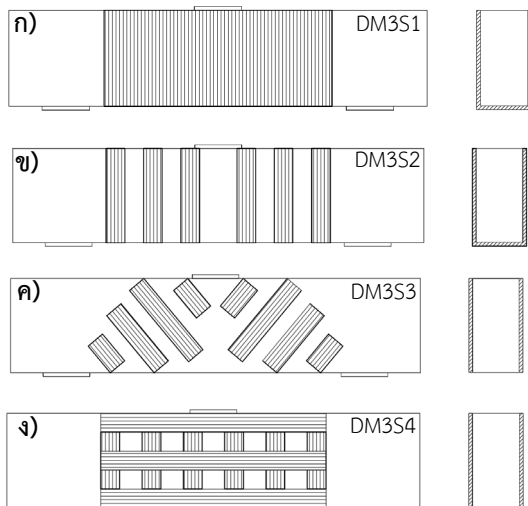
การติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ใช้การติดตั้งแบบเปียก (Wet Lay Up) ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง 1508-51 [10]



รูปที่ 4 แสดงการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

ก่อนทำการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ต้องเตรียมผิวคานคอนกรีตโดยทำความสะอาดและขัดผิวให้สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4(ก) ทำการเตรียมวัสดุประสานใช้อัตราส่วนตามที่คู่มือของผลิตภัณฑ์ระบุไว้ ดังรูปที่ 4(ข)

ต่อจากนั้นจึงทาเรซินที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานลงบนพื้นผิวคอนกรีตดังรูปที่ 4(ค) ติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ตามทิศทางที่ต้องการเสริมกำลัง พร้อมไล่ฟองอากาศที่ถูกขังอยู่ระหว่างแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และผิวของคอนกรีตดังรูปที่ 4(ง) หลังจากทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้วห้ามรบกวนตัวอย่างที่ได้รับการเสริมกำลังจนกว่าวัสดุประสานจะได้รับการบ่มเป็นเวลาอย่างน้อย 1 สัปดาห์



รูปที่ 5 รูปแบบการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์



รูปที่ 6 การทดสอบแบบทำลาย

การเสริมกำลังสำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนของคานาเหล็ก คอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพจากคลอไรด์ ดังนั้นการเสริมกำลังจึงติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ด้านข้าง

ของคานาคานเป็นหลัก ตัวอย่าง D3MS1 ติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในลักษณะพันรอบ 3 ด้าน (U Wrap) ดังแสดงในภาพที่ 5(ก) ตัวอย่าง D3MS2 ติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบพันรอบ 3 ด้านเช่นกัน แต่แผ่นที่ใช้จะมีลักษณะแบบแถบ (Strip) ขนาด 5 เซนติเมตร และทำการติดในบริเวณช่วงการเฉือนของคาน โดยที่แต่ละแผ่นติดห่างกัน 4 เซนติเมตร เรียกการติดตั้งลักษณะนี้ว่าการพันรอบบางส่วน (U Strip) ดังแสดงในรูปที่ 5(ข) ตัวอย่าง D3MS3 ติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในลักษณะที่ป้องกันการแตกร้าวที่เอวคาน (Web-Shear Crack) จึงติดตั้งในทิศทางที่ตั้งฉากกับท่อนรับแรงอัดในแนวทแยง หรือทำมุม 45 องศากับความยาวคาน การติดตั้งรูปแบบนี้ใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ขนาด 5 เซนติเมตรและวางห่างกัน 4 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5(ค) สำหรับตัวอย่างสุดท้ายคือตัวอย่าง D3MS4 เลือกติดตั้งในลักษณะตาราง แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้มีความกว้าง 5 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 5(ง)

2.1.4 การทดสอบแบบทำลาย (Destructive Test)

การทดสอบแบบทำลาย ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Jinan Liangong ทดสอบน้ำหนักได้ 200 ตัน การทดสอบใช้แรงกระทำสถิตแบบ 3 จุด (Three-Point Flexural Test) เพื่อป้องกันการวิบัติเฉพาะแห่ง (Local Failure) ได้ทำการติดตั้งแผ่นเพลทหนา 10 มิลลิเมตรไว้ในบริเวณฐานรองรับและบริเวณที่น้ำหนักภายนอกมากระทำ ระหว่างการทดสอบได้ทำการเก็บข้อมูลความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึง เหล็กปลอกรับแรงเฉือน และที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ จากอุปกรณ์วัดความเครียด นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดการโก่งตัว (Deflection) ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบด้วยการติดตั้ง Dial Gauge ยี่ห้อ Misumi ซึ่งมีความละเอียดในการอ่านค่า 0.01 มิลลิเมตรไว้ที่กึ่งกลางคาน และติดตั้ง Linear Variable Displacement Transducer (LVDT) ยี่ห้อ TML มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ที่บริเวณ

ฐานรองรับดังแสดงในรูปที่ 6 สำหรับอุปกรณ์วัดความเครียดและ LVDT ถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Data Locker) ยี่ห้อ TML รุ่น TDS-530 หลังจากนั้นจึงส่งข้อมูลไปบันทึกผลในเครื่องคอมพิวเตอร์ต่อไป

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลของการสร้างสภาวะแวดล้อมจำลองในห้องปฏิบัติการ

งานวิจัยนี้ใช้การสร้างสภาวะแวดล้อมจำลองในห้องปฏิบัติการเพื่อเร่งให้คานเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพโดยกำหนดให้เกิดการกัดกร่อนที่เหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมที่เอนคาน หลังจากทำการทดสอบแบบทำลายได้ทำการทุบตัวอย่างคาน เพื่อตรวจสอบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นหลังจากเร่งปฏิกิริยา ผลการเร่งปฏิกิริยาด้วยกระแสไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงการกัดกร่อนของสนิมบนเหล็กเสริมรับแรงดึง ดังแสดงในรูป 7(ก) และเหล็กเสริมที่เอนคานดังแสดงในรูปที่ 7(ข)



รูปที่ 7 เหล็กเสริมที่อยู่ภายในตัวอย่างคานคอนกรีตหลังสร้างสภาวะแวดล้อมจำลอง

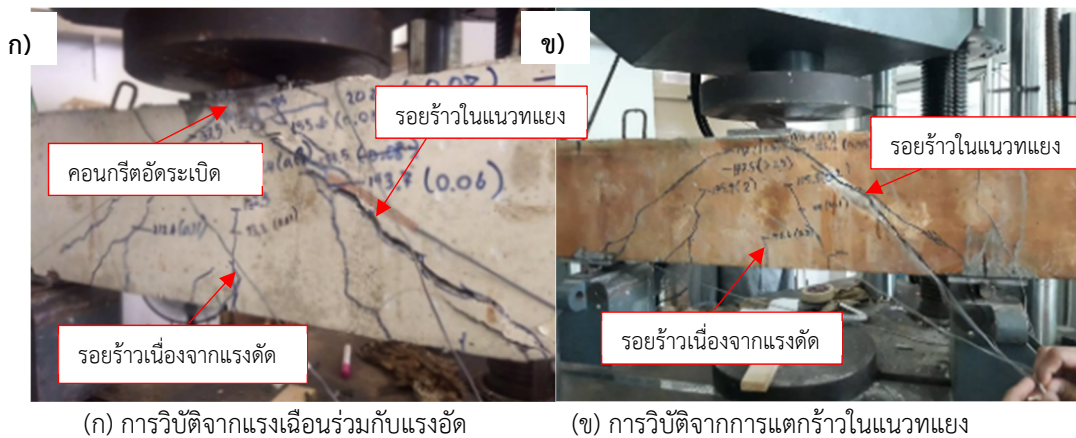
3.2 ผลการทดสอบแบบทำลาย

การทดสอบแบบทำลายมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ ของคาน เช่น รูปแบบการแตกร้าว (Crack Pattern) รูปแบบการวิบัติ (Mode of Failure)

กำลังรับน้ำหนักประลัย (Ultimate Load) การโก่งตัว (Deflection) และความเครียดที่เกิดขึ้นบนเหล็กปลอก รับแรงดึงและแรงเฉือน โดยนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกัน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเป็นพื้นฐานในการเสริมกำลังคานลึคคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดการเสื่อมสภาพ

3.2.1 รูปแบบการแตกร้าว (Crack Pattern)

ระหว่างทำการทดสอบแบบทำลาย ได้ทำการสังเกตรูปแบบการแตกร้าวของตัวอย่างคานที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ (DOM) เพื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เกิดการเสื่อมสภาพแต่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง (D3M) พบว่าตัวอย่าง DOM เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดที่กึ่งกลางคานมีทิศทางทำมุม 90 องศากับความยาวคาน หลังจากนั้นจึงเกิดการแตกร้าวในแนวทแยงมีทิศทางทำมุมประมาณ 45 องศากับความยาวคาน การแตกร้าวในแนวทแยงจะหยุดขยายตัว เมื่อจุดปลายของรอยร้าวเคลื่อนตัวเข้าใกล้กับบริเวณที่น้ำหนักบรรทุกทุกจากเครื่องทดสอบมากระทำสักระยะหนึ่ง ในขณะที่รอยร้าวจากแรงดัดยังขยายตัวสูงขึ้น และรอยร้าวในแนวทแยงมีความกว้างเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด หลังจากนั้นคอนกรีตที่อยู่ระหว่างปลายด้านบนรอยของร้าวในแนวทแยงกับบริเวณที่น้ำหนักบรรทุกทุกมากระทำ จึงอัดระเบิด (Crushing) เป็นสาเหตุให้คานวิบัติ เรียกการวิบัติรูปแบบนี้ว่า การวิบัติจากแรงเฉือนร่วมกับแรงอัด (Shear Compression Failure) ดังแสดงในรูปที่ 8(ก) สำหรับตัวอย่าง D3M รูปแบบการแตกร้าวคล้ายกับตัวอย่าง DOM แต่จะแตกต่างกันที่ เมื่อเกิดการแตกร้าวในแนวทแยง การขยายตัวของรอยร้าวในแนวทแยงจะไปหยุดอยู่ใต้บริเวณที่น้ำหนักบรรทุกทุกเพียงครู่เดียว ปลายด้านบนของรอยร้าวจะเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณที่น้ำหนักบรรทุกทุกมากระทำ ส่วนปลายด้านล่างจะเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณฐานรองรับ เป็นเหตุให้คานเกิดการวิบัติอย่างฉับพลัน และการวิบัติเกิดขึ้นเร็วกว่าคานที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ เรียกการวิบัติรูปแบบนี้ว่า การวิบัติจาก



รูปที่ 8 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

การแตกหักในแนวทแยง (Diagonal Failure) ดังแสดงในรูปที่ 8(ข) อีกประการหนึ่งที่เกิดขึ้นได้คือ ความกว้างของรอยร้าวในแนวทแยงสำหรับตัวอย่าง DOM จะมีขนาดกว้างกว่าตัวอย่าง D3M อย่างชัดเจน

นอกจากนี้ยังพบว่ารอยร้าวเนื่องจากแรงดัดแรก (First Flexural Crack) จะปรากฏเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกทุก 3.75 และ 2.69 ตัน และรอยร้าวในแนวทแยงแรก (First Diagonal Crack) จะปรากฏเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกทุก 13.40 และ 11.98 ตัน สำหรับตัวอย่างคาน DOM และ D3M ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพ จะส่งผลต่อรูปแบบการวิบัติ ความกว้างของรอยร้าวในแนวทแยง และยังทำให้รอยร้าวจากแรงดัดรวมทั้งรอยร้าวในแนวทแยงปรากฏขึ้นเร็วกว่าเดิมอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การเสื่อมสภาพของคานลิกไม่มีผลต่อรูปแบบการแตกหักของคาน

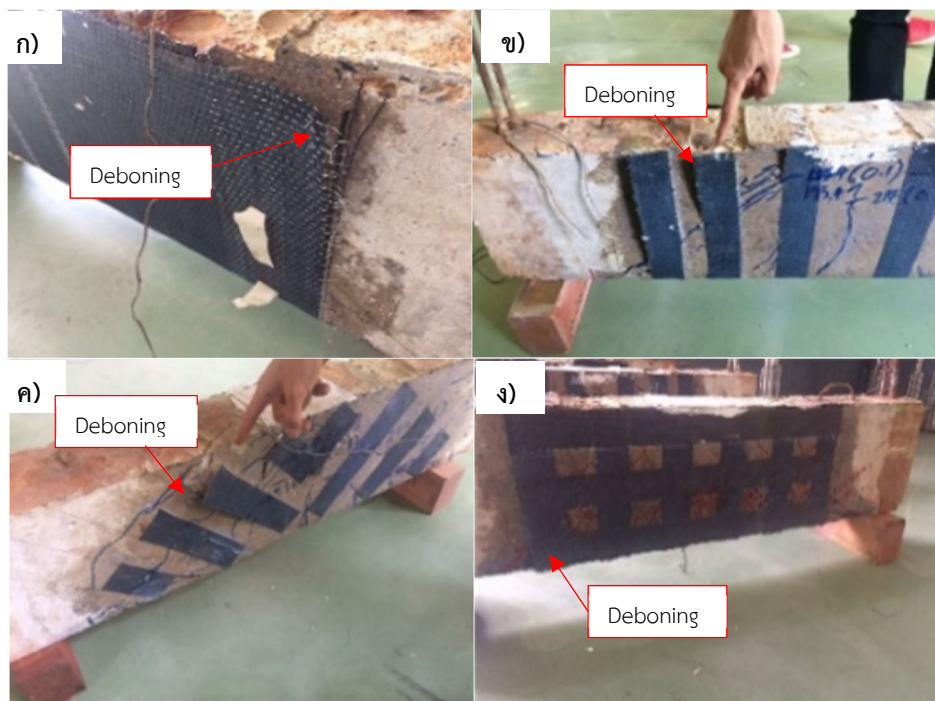
3.2.2 น้ำหนักประลัย (Ultimate Load)

น้ำหนักประลัยเป็นน้ำหนักบรรทุกสูงสุดก่อนที่จะทำให้โครงสร้างเกิดการวิบัติ น้ำหนักประลัยทำการบันทึกได้จากเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ ผลการทดสอบน้ำหนักประลัยสำหรับคานทุกตัวอย่างแสดงไว้ในตารางที่ 1 เมื่อนำตัวอย่างที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ (DOM) และตัวอย่างที่เสื่อมสภาพ (D3M) มาเปรียบเทียบกันพบว่ามีย่านน้ำหนักประลัย 21.26 ตัน และ

17.77 ตัน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อตัวอย่างคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคานมีค่าลดลง

เมื่อนำตัวอย่างที่เกิดการเสื่อมสภาพ (D3M) มาเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เกิดการเสื่อมสภาพแต่ได้รับการเสริมกำลัง (D3MS1–D3MS4) พบว่า ตัวอย่างที่ได้รับการเสริมกำลังมีน้ำหนักประลัยมากกว่าตัวอย่างที่เกิดการเสื่อมสภาพ แสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังทั้ง 4 รูปแบบสามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคานลิกที่เสื่อมสภาพได้ นอกจากนี้เมื่อนำกลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการเสริมกำลังมาเปรียบเทียบกันพบว่า ตัวอย่าง D3MS1 D3MS2 D3MS3 และ D3MS4 มีน้ำหนักบรรทุกประลัย 22.84 23.84 22.48 และ 25.42 ตัน ตามลำดับ ทุกตัวอย่างมีรูปแบบการวิบัติที่เหมือนกันคือ เกิดการหลุดล่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่จุดปลายของแผ่น (FRP Deboning) เนื่องจากวัสดุประสานสูญเสียกำลัง ดังแสดงในรูปที่ 9

การเสริมกำลังที่สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้สูงที่สุดคือตัวอย่าง D3MS4 มีน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 25.42 ตัน สาเหตุสำคัญที่ทำให้ตัวอย่าง D3MS4 เพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้สูงที่สุด คือ การติดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในรูปแบบตารางที่จะสามารถยับยั้งหน่วยแรงดึง



รูปที่ 9 การวิบัติของตัวอย่างคานที่ได้รับการเสริมกำลัง (ก) ตัวอย่าง D3MS1 (ข) ตัวอย่าง D3MS2
(ค) ตัวอย่าง D3MS3 (ง) ตัวอย่าง D3MS4

จากแรงดัดและหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นภายในท่อนรับแรงอัดในแนวทแยงได้ หรือกล่าวได้ว่าสามารถป้องกันการแตกร้าวของคานได้ในสองทิศทาง ทั้งการแตกร้าวที่เกิดจากแรงดัดและการแตกร้าวในแนวทแยง ซึ่งแตกต่างจากการเสริมกำลังรูปแบบอื่นที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์สามารถป้องกันการแตกร้าวได้เพียงทิศทางเดียว

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบแบบทำลาย

ตัวอย่าง	น้ำหนัก ประลัย (ตัน)	การโก่งตัวที่ สภาวะประลัย (มม.)	รูปแบบ การวิบัติ
D0M	21.26	7.20	SC
D3M	17.77	5.15	DF
D3MS1	22.84	5.45	FRP Deboning
D3MS2	23.84	5.06	FRP Deboning
D3MS3	22.48	5.22	FRP Deboning
D3MS4	25.42	4.36	FRP Deboning

SC คือ Shear Compression Failure และ DF คือ Diagonal Failure

3.2.3 การโก่งตัว (Deflection)

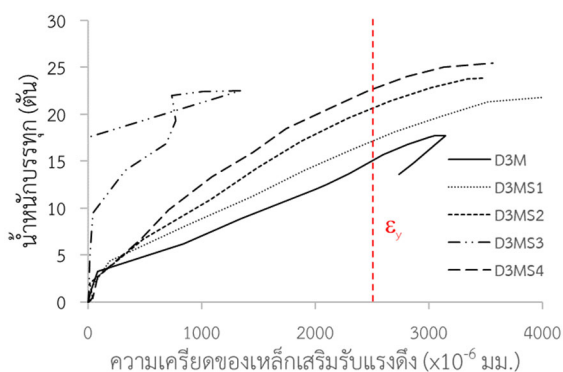
การโก่งตัวของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถบ่งบอกถึงความเหนียวของโครงสร้างได้ ยิ่งคานคอนกรีตมีค่าการโก่งตัวสูงแสดงว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงที่อยู่ภายในมีกำลังถึงจุดครากก่อนที่คานคอนกรีตจะเกิดการวิบัติ ค่าการโก่งตัวที่แสดงในตารางที่ 1 เป็นค่าการโก่งตัวก่อนที่โครงสร้างจะเกิดการวิบัติหรือที่สภาวะประลัย

ผลการทดสอบพบว่า ตัวอย่างคานที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ D0M มีค่าการโก่งตัวเท่ากับ 7.20 มิลลิเมตร และเมื่อคานเกิดการเสื่อมสภาพ D3M มีค่าการโก่งตัวเพียง 5.15 มิลลิเมตร ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อคานลิกคอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพ ค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลง หรือกล่าวได้ว่าความเหนียวของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าลดลงเมื่อคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพ สำหรับตัวอย่างคานที่ได้รับการเสริมกำลังพบว่า การเสริมกำลังตัวอย่าง D3MS1

D3MS2 D3MS3 และ D3MS4 มีค่าการโก่งตัว 5.45 5.06 5.22 และ 4.36 มิลลิเมตรตามลำดับ ผลการทดสอบได้สอดคล้องกับผลการการศึกษาของ A. Saidy et al. [11] และ R. Azam [12] ที่ระบุว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์สำหรับคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กไม่มีผลต่อการโก่งตัวหรือความเหนียวของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดการเสื่อมสภาพ

3.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึง

เมื่อตัวอย่างคานที่ทำการทดสอบ เริ่มรับน้ำหนักบรรทุกที่ผิวล่างของคานจะเกิดหน่วยแรงดึงขึ้น หากหน่วยแรงดึงมีค่ามากกว่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ที่ผิวล่างของคานจะเกิดการแตกร้าวในทิศทางที่ตั้งฉากกับความยาวคาน (รอยร้าวเนื่องจากแรงดัด) ส่งผลให้คอนกรีตสูญเสียกำลังต้านทานแรงดึง เหล็กเสริมจึงเริ่มทำหน้าที่ต้านทานหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นแทน งานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดไว้ที่เหล็กเสริมรับแรงดึงในตำแหน่งกึ่งกลางคาน เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับเหล็กเสริมรับแรงดึงเมื่อคานเกิดการเสื่อมสภาพและได้รับการเสริมกำลัง ผลกระทบที่เกิดขึ้นแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่บันทึกได้ระหว่างการทดสอบ แสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กรับแรงดึง

จากผลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำกับความเครียดที่เหล็กเสริมพบว่า น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้ความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงดึงมีหน่วยแรงถึงจุดครากมีค่าเท่ากับ 15.06 18.11 19.54 และ 22.54 ตัน สำหรับตัวอย่าง D3M D3MS1 D3MS2 และ D3MS4 ตามลำดับ แต่ตัวอย่าง D3MS3 ไม่สามารถบันทึกค่าได้เนื่องจากอุปกรณ์วัดความเครียดชำรุดเสียหาย หากพิจารณาน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้ความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงดึงมีหน่วยแรงถึงจุดคราก ผลการทดสอบตามตัวอย่างที่กล่าวไว้ข้างต้นแสดงให้เห็นว่า น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เหล็กเสริมรับแรงดึงมีหน่วยแรงถึงจุดครากสำหรับตัวอย่างที่ได้รับการเสริมกำลัง มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง หรือกล่าวได้ว่าการเสริมกำลังสามารถลดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมรับแรงดึงได้ เนื่องจากแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เข้ามาทำหน้าที่ช่วยป้องกันหน่วยแรงดึงหรือยับยั้งความกว้างรอยร้าวที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ตัวอย่างที่ได้รับการเสริมกำลังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง ผลการทดสอบสอดคล้องกับการศึกษาของ A. M S และ P. Philip [13] สำหรับตัวอย่างที่สามารถลดหน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงดึงได้สูงที่สุดคือตัวอย่าง D3MS4 ซึ่งเสริมกำลังในรูปแบบตาราง เนื่องจากการเสริมกำลังในรูปแบบตาราง มีการติดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ผิวล่างของคาน และมีทิศทางของเส้นใยขนานกับความยาวคานดังรูปที่ 5(ง) จึงทำให้สามารถป้องกันหน่วยแรงดึงหรือยับยั้งการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดได้ดีกว่าการเสริมกำลังรูปแบบอื่น เป็นผลให้หน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่าต่ำกว่าทุกตัวอย่างที่ได้รับการเสริมกำลัง

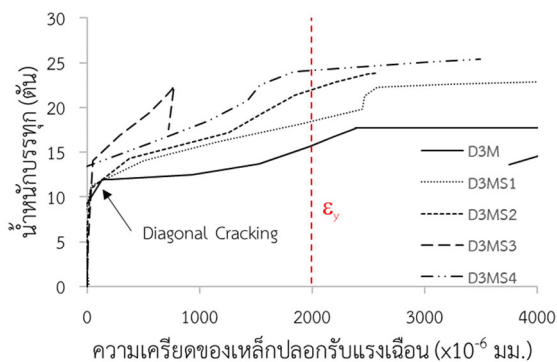
3.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กปลอกรับแรงเฉือน

โดยทั่วไปคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นคานที่เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเป็นหลัก การแตกร้าวของคานลิกมักเกิดจากท่อนรับแรงอัดรูปขวดใน

แนวทแยงที่ทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงจากจุดที่น้ำหนักบรรทุกทุกภายนอกมากระทำไปสู่ฐานรองรับ ภายในท่อนรับแรงอัดจะมีการกระจายตัวของหน่วยแรงดึงในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวแกนของท่อนรับแรงอัด ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวตามแนวแกนของท่อนรับแรงอัด ดังนั้นจำเป็นต้องมีเหล็กเสริมตามขวางที่ประกอบด้วยเหล็กปลอกรับแรงเฉือน และเหล็กเสริมที่เอวคานในแนวนอนเพื่อป้องกันรอยร้าวและการวิบัติที่จะเกิดขึ้นตามมา งานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดไว้ที่เหล็กปลอกเพื่อเก็บข้อมูลความเครียดของคานที่เสื่อมสภาพ และคานที่ได้รับการเสริมกำลัง

ความเครียดที่เหล็กปลอกรับแรงเฉือนแสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกระหว่างการทดสอบ ก่อนที่คานเกิดการแตกร้าวในแนวทแยงจะไม่มีหน่วยแรงเกิดขึ้นที่เหล็กปลอกรับแรงเฉือน เห็นได้จากค่าความเครียดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่ามากกว่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ตัวอย่างคานจะเกิดการแตกร้าวในแนวทแยง เหล็กปลอกรับแรงเฉือนจึงเริ่มทำหน้าที่ป้องกันการแตกร้าว

เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปความกว้างของรอยร้าวจะขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ความเครียดในเหล็กปลอกจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึงจุดครากดังเช่นตัวอย่าง D3M ที่แสดงรูปที่ 11 หลังจากนั้นตัวอย่างคานจึงเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็ว



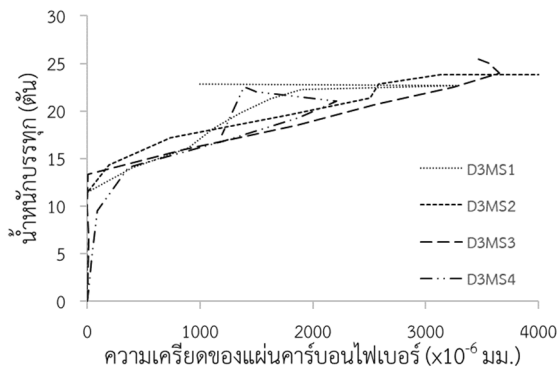
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กปลอกรับแรงเฉือน

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กปลอกรับแรงเฉือน พบว่าน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เหล็กปลอกรับแรงเฉือนมีกำลังถึงจุดครากมีค่าเท่ากับ 15.76 19.24 22.31 และ 24.43 ตัน สำหรับตัวอย่าง D3M D3MS1 D3MS2 และ D3MS4 ตามลำดับ เห็นได้ว่าการเสริมกำลังตัวอย่างคานที่เสื่อมสภาพทุกรูปแบบสามารถช่วยลดความเครียดที่เกิดขึ้นบนเหล็กปลอกรับแรงเฉือน การที่ความเครียดของเหล็กปลอกรับแรงเฉือนลดลง แสดงว่าความกว้างของรอยร้าวในแนวทแยงถูกยับยั้งไว้ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ เป็นผลให้ตัวอย่างคานที่ได้รับการเสริมกำลังเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้ดีมากกว่าคานที่เสื่อมสภาพ อย่างไรก็ตามแม้ว่าตัวอย่าง D3MS3 เหล็กปลอกรับแรงเฉือนมีกำลังไม่ถึงจุดครากแต่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นกลับมีค่าต่ำที่สุด สาเหตุดังกล่าวเกิดจากการเสริมกำลังในรูปแบบทำมุม 45 องศากับแนวคานหรือตั้งฉากกับแนวแกนของท่อนรับแรงอัดในแนวทแยงสามารถป้องกันการแตกร้าวที่เอวคานหรือการแตกร้าวในแนวทแยงได้โดยตรงทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนเหล็กปลอกรับแรงเฉือนมีค่าต่ำกว่าการเสริมกำลังทุกรูปแบบ

3.2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่นำมาใช้ในการเสริมกำลังมีลักษณะที่สามารถรับแรงดึงได้ในทิศทางเดียว มีหน้าที่หลักในการป้องกันการแตกร้าวที่เกิดขึ้น พฤติกรรมของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะคล้ายกับเหล็กปลอกรับแรงเฉือน คือ เมื่อมีการแตกร้าวในแนวทแยงเกิดขึ้น แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะเข้ามาทำหน้าที่รับแรงดึง สังเกตได้ดังรูปที่ 12 ความเครียด ที่เกิดขึ้นบนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในช่วงแรกไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อคานเกิดการแตกร้าวในแนวทแยง หลังจากนั้นแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จึงเริ่มทำหน้าที่รับแรงดึงเพื่อป้องกันการแตกร้าวที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปพฤติกรรมของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เมื่อรับแรงดึง จะมี

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับหน่วยแรงดึงจะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งเกิดการวิบัติ ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมของเหล็กปลอกรับแรงเฉือนที่มีการเสียรูปเมื่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่าเกินกว่าหน่วยแรงที่จุดคราก



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดบนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

ผลการทดสอบสำหรับคานทั้ง 4 ตัวอย่างที่ได้รับการเสริมกำลังพบว่า เกิดการวิบัติในรูปแบบเดียวกันคือ เกิดการหลุดล่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่บริเวณปลายแผ่น ซึ่งเกิดจากการสูญเสียกำลังของวัสดุประสานที่มีหน้าที่ส่งถ่ายหน่วยแรงระหว่างผิวของคอนกรีตกับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ก่อนที่จะตัวอย่างคานจะเกิดการวิบัติ

4. สรุป

4.1 การเสื่อมสภาพของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์ เมื่อเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมที่เอวคานถูกกัดกร่อนจะส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย การโก่งตัว ความกว้างของรอยร้าว และรูปแบบการวิบัติของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ไม่มีผลต่อรูปแบบการแตกร้าวของคาน

4.2 การเสริมกำลังทั้ง 4 รูปแบบ สามารถเพิ่มกำลังต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กได้ โดยรูปแบบที่เพิ่มความสามารถ

ในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้ดีที่สุด คือ การเสริมกำลังในรูปแบบตาราง

4.3 แม้ว่าการเสริมกำลังในรูปแบบตารางสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้สูงสุด แต่การเสริมกำลังในรูปแบบที่ทำมุม 45 องศา กับความยาวคานสามารถป้องกันการเกิดรอยร้าวในแนวทแยง และความเครียดที่เกิดขึ้นบนเหล็กปลอกรับแรงเฉือนได้ดีที่สุด

4.4 การเสริมกำลังทั้ง 4 รูปแบบ ไม่ส่งผลต่อการโก่งตัวของคานลิกคอนกรีตเสริมหลักที่เกิดการเสื่อมสภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนประเภทงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2561 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และห้องปฏิบัติการที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI Standard and Report 318, 2014
- [2] D. Kumar Sahoo, M. Sagar Varma Sagi, B. Singh, and P. Bhargava, "Effect of Detailing of Web Reinforcement on the Behavior of Bottle-shaped Struts," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 303–314, Oct. 2010.
- [3] M. D. Brown and O. Bayrak, "Minimum transverse reinforcement for bottle shape struts," *ACI Structure Journal*, vol. 103, no. 6, pp. 813-826, Nov. 2006.

- [4] C. Suffern, A. El-Sayed, and K. Soudki, "Shear strength of disturbed regions with corroded stirrups in reinforced concrete beams," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 37, no. 8, pp. 1045–1056, Aug. 2010.
- [5] S. Xu, Z. Zhang, R. Li, and B. Qiu, "Experimental Study on the Shear Behavior of RC Beams with Corroded Stirrups," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 15, no. 4, pp. 178–189, Apr. 2017.
- [6] Ashhad Iman and Abul Kalam Azad, "Prediction of residual shear strength of corroded reinforced concrete beam," *International Journal of Advance Structure Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 307–318, Sep. 2016.
- [7] N. Thongkod and W. Yodsudjai, "Repairing structure deteriorated due to chloride with transfer electric ion," *Civil journal*, vol. 17, no. 5, pp. 50–51, Sep.–Oct. 2005.
- [8] W. Yodsudjai, "Steel corrosion occurs in reinforced concrete," *Concrete journal*, vol. 4, Aug. 2008.
- [9] R. Sahamitmongkol, "Deterioration of concrete structure due to contamination chloride in mixture," *Concrete journal*, vol. 6, Apr. 2009.
- [10] Standard Department of Public Works and Town & Country Planning, DPT Standard 1508, 2008.
- [11] A. H. Al-Saidy, A. S. Al-Harthy, K. S. Al-Jabri, M. Abdul-Halim, and N. M. Al-Shidi, "Structural performance of corroded RC beams repaired with CFRP sheets," *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 8, pp. 1931–1938, Jul. 2010.
- [12] R. Azam and K. Soudki, "Structural performance of shear-critical RC deep beams with corroded longitudinal steel reinforcement," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 8, pp. 946–957, Sep. 2012.
- [13] Alexis M S and P. M. Philip, "Shear behavior of RC deep beams retrofitted with CFRP Sheets," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 6, no. 6, pp. 1–4, 2018.

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

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงปรุงรสและผงโรยข้าวจากถั่วเหลืองหมักพื้นบ้าน

สุริวรรณ ราชสม* ญัฐวิภา สีสำ และ สุทธิดา ทากอนแก้ว

วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

รับบทความ 20 พฤษภาคม 2563 แก้ไขบทความ 24 สิงหาคม 2563 ตอรับบทความ 15 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองหมักพื้นบ้านของภาคเหนือ(ถั่วเน่า) และประเมินคุณค่าทางโภชนาการและสารออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์ โดยนำผลิตภัณฑ์ถั่วเหลืองหมักมาทำการอบแห้งจากนั้นนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ผงปรุงรส และผงโรยข้าวรสสา-สาหร่ายและรสหอม-กระเทียม โดยศึกษาสูตรต่างๆ 3 สูตรทดลอง ผลการทดลองพบว่าถั่วเหลืองหมักพื้นบ้านมีศักยภาพในการนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ผงปรุงรส และผงโรยข้าว โดยสูตรที่ดีที่สุดของผงโรยข้าวรสสา-สาหร่ายและรสหอม-กระเทียมคือสูตรที่มีอัตราส่วนของผงถั่วเหลืองหมักพื้นบ้านหรือถั่วเน่าร้อยละ 35 ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคในระดับดี ค่าคะแนนการยอมรับ 7.85 ± 0.36 7.46 ± 0.67 และ 7.44 ± 1.01 สำหรับผลิตภัณฑ์ผงปรุงรส ผงโรยข้าวรสสา-สาหร่ายและผงโรยข้าวรสหอม-กระเทียม ตามลำดับ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ไปวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการทางอาหาร ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ไขมัน และวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ พบว่าผงปรุงรส มีปริมาณโปรตีน ไขมัน และประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระสูงสุด คือ ร้อยละ 43.80, 19.24 และ $3.72 \mu\text{mol TE/g}$ ตามลำดับ และผงโรยข้าวรสสา-สาหร่ายและผงโรยข้าวรสหอม-กระเทียม มีปริมาณร้อยละโปรตีน ไขมัน และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ 29.90, 9.72 และ $1.79 \mu\text{mol TE/g}$ และ 31.70, 20.51 และ $1.96 \mu\text{mol TE/g}$ ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้สามารถนำไปต่อยอดผลิตในเชิงการค้าของชุมชนเพื่อจำหน่ายต่อไปเนื่องจากถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการหมักพบว่ามีคุณค่าทางโภชนาการสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณโปรตีนที่สูงขึ้น

คำสำคัญ: ถั่วเหลืองหมักพื้นบ้าน; ผงปรุงรส; ผงโรยข้าว; ประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระ

*ผู้นิพนธ์ประสานงานโทร: +669 3954 1462, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: sureewan@rmutl.ac.th

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

Development of Seasoning Powder and Furikake-rice Seasoning from Fermented Soy Bean

Sureewan Rajchasom* Nattavipa Seelum and Suttida Takonkeaw

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

Received 20 May 2020; Revised 24 August 2020; Accepted 15 September 2020

Abstract

This research aims to develop the new product from a northern local fermented soy bean which were seasoning powder and furikake-rice seasoning and analyze to observe the nutritional, chemical component and antioxidant of the products. The fermented soy bean was dried using hot air oven to achieve a required moisture content prior to apply to the new product. The best ratio of the dried fermented soybean powder was of 35%. The sensory test was used to evaluate the customer acceptance in these developed products. The results showed that the panelist moderately like the products with the overall acceptable score of 7.85 ± 0.36 for the seasoning powder and 7.46 ± 0.67 and 7.44 ± 1.01 for furikake-rice seasoning in sesame-seaweed and garlic flavors, respectively. The analysis of the nutritional values (protein, fat and antioxidant) of the product were analyzed. The result showed that the seasoning powder has the highest values of nutritional values which were 43.80%, 19.24% and $3.72 \mu\text{mol TE/g}$, for protein, fat and antioxidant respectively. The furikake-rice seasoning sesame-seaweed have the values of protein, fat and antioxidant of 29.90%, 9.72% and $1.79 \mu\text{mol TE/g}$ respectively. The garlic flavor has the values of protein, fat and antioxidant of 31.70%, 20.51%, $1.96 \mu\text{mol TE/g}$, respectively. The developed product would be continuously produced in a commercial product for the local community since the fermented soybean products have high amount of nutrition especially the protein content.

Keywords : Local Fermented Soybean; Seasoning Powder; Furikake-rice Seasoning; Antioxidant

* Corresponding Author. Tel.: +669 3954 1462, E-mail Address: sureewan@rmu.ac.th

1. บทนำ

ถั่วเหลืองเป็นพืชที่อุดมไปด้วยคุณค่าทางอาหารมากมาย ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต โยอาอาหาร แคลเซียม ฟอสฟอรัส เหล็ก ไนอะซิน วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 และวิตามินบี 12 เป็นต้น [1] สารอาหารที่สำคัญที่สุดของพืชตระกูลถั่ว คือ โปรตีน เนื่องจากโปรตีนที่ได้จากถั่วเป็นโปรตีนที่มีราคาถูกกว่าโปรตีนจากสัตว์ องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเหลืองมีความแตกต่างกันขึ้นกับแหล่งเพาะปลูก แต่โดยเฉลี่ยแล้ว ถั่วมีองค์ประกอบทางเคมี ดังนี้ ปริมาณความชื้นร้อยละ 6-10 โปรตีนร้อยละ 37-45 และไขมันร้อยละ 19-22 โดยเฉพาะอย่างยิ่งถั่วเหลืองพันธุ์พื้นบ้านมีปริมาณโปรตีนมากกว่าถั่วเหลืองสายพันธุ์อื่นร้อยละ 49.5 และมีปริมาณไขมันต่ำกว่าร้อยละ 5.4 [2], [3] นอกจากนี้ สารอาหารในถั่วยังช่วยในการกระตุ้นการสร้างเซลล์กระดูก ป้องกันการขาดแคลเซียมในกระดูก และบำรุงประสาท และอุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ Isoflavones, phytic acids, saponin และ oligosaccharides สารที่มีประโยชน์เหล่านี้จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการหมักเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ทำหน้าที่ย่อยแหล่งอาหารทำให้เกิดสารสำคัญระหว่างหมัก เกิดกลิ่นรสเฉพาะในแต่ละผลิตภัณฑ์ และได้สารอาหารที่เพิ่มมากขึ้น เช่น ผลิตภัณฑ์ถั่วเหลืองหมักหรือถั่วเน่า เต้าเจี้ยว เทมเป้ ซีอิ๊ว เป็นต้น [4]

ถั่วเหลืองหมักหรือถั่วเน่าเป็นผลิตภัณฑ์พื้นเมืองของภาคเหนือที่พัฒนามาจากภูมิปัญญาชาวบ้านที่ถ่ายทอดสืบต่อกันมา เชื่อกันว่ามีต้นกำเนิดมาจากไทใหญ่ ในอดีตถั่วเน่าเคยเป็นของบรรณาการที่พญาละคร (เจ้าเมืองลำปาง) เคยถวายเป็นของบรรณาการแก่พญาแม่กุ แห่งเมืองนพบุรี เชียงใหม่ [5] ต่อมาถั่วเน่าเป็นที่นิยมบริโภคโดยทั่วไปในเขตภาคเหนือ เช่น เชียงใหม่ เชียงราย ลำพูน ลำปาง แพร่ และแม่ฮ่องสอน โดยใช้เป็นเครื่องปรุงรสในอาหารพื้นเมือง เช่น ขนมหุ้น (น้ำเงี้ยว) น้ำพริกอ่อง เป็นต้น ถั่วเหลืองหมักเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง การผลิตถั่วเหลืองหมักมี 2

แบบ ได้แก่ การผลิตแบบถั่วเหลืองหมักเปียก และถั่วเหลืองหมักแบบแผ่น ในการผลิตถั่วเน่าเป็นการหมักแบบดั้งเดิม ใช้เชื้อที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ จากรายงานการวิจัยพบว่าจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องคือแบคทีเรียในจีนัส *Bacillus* ชนิดของแบคทีเรียในจีนัสที่พบในกระบวนการหมักถั่วเน่า ได้แก่ *B. subtilis* *B. licheniformis* *B. thermocatenulatus* *B. pumilus* และ *B. megaterium* มีการรายงานว่าพบเชื้อกลุ่มอื่นเช่นกัน เช่น *Lactic acid bacteria* และแบคทีเรียในกลุ่ม cocci ที่ยังระบุชนิดไม่ได้ เชื้อ *B. ssp.* มีบทบาทสำคัญในกระบวนการหมักถั่วเน่า โดยผลิตเอนไซม์มาใช้ในการย่อยโปรตีนในถั่วเหลือง และมีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ได้หลายชนิดที่สำคัญ คือ เอนไซม์โปรติเอส (Proteases) ในกระบวนการย่อยโปรตีนจะได้เปปไทด์สายสั้นๆ และกรดอะมิโน นอกจากนี้ ยังทำให้เกิดสารประกอบเอมีนอิสระในรูปของเกลือแอมโมเนียม และเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของถั่วเน่ามีค่าสูงขึ้น (Alkaline Condition) และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ [6]

นอกจากถั่วเน่าในประเทศไทยแล้วยังพบผลิตภัณฑ์ถั่วเหลืองหมักในอีกหลายประเทศ ได้แก่ Natto ของประเทศญี่ปุ่น Dawadawa หรือ Iru ของประเทศไนจีเรียและอีกหลายประเทศในทวีปแอฟริกา Kinema ของประเทศอินเดียและเนปาล และ Chungkukjang ของประเทศเกาหลี ผลจากการหมักถั่วเหลือง จะได้สารเหนียว ซึ่งเป็นพอลิกลูตามิก Polyglutamic Acid, PGA) พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) และแอมโมเนีย มีผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีกลิ่น และรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์ [7]

ปัจจุบันความนิยมในอาหารพื้นบ้านของคนรุ่นใหม่ได้ลดน้อยลง อีกทั้งการสืบทอดภูมิปัญญาท้องถิ่นก็ไม่เป็นที่สนใจของคนรุ่นใหม่เนื่องจากกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนและยุ่งยาก และที่สำคัญคือราคาผลิตภัณฑ์ต่ำ

ไม่เป็นที่น่าสนใจ การรับประทานและการผลิตถั่วเน่าในพื้นที่ภาคเหนือจึงมีแนวโน้มลดลง แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ชนิดนี้ให้ประโยชน์และคุณค่าทางโภชนาการสูง จึงมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทันสมัยเข้ากับยุคสมัยปัจจุบัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงปรุงรสและผงโรยข้าวจากถั่วเหลืองหมักพื้นบ้านหรือถั่วเน่า ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมกับวิถีชีวิตของคนยุคปัจจุบัน และวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเพื่อเป็นแนวทางในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ให้กับผลิตภัณฑ์พื้นถิ่นภาคเหนือ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัย (Research Methodology) สำหรับศึกษานี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงปรุงรสและผงโรยข้าวจากถั่วเหลืองหมัก การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ และการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์

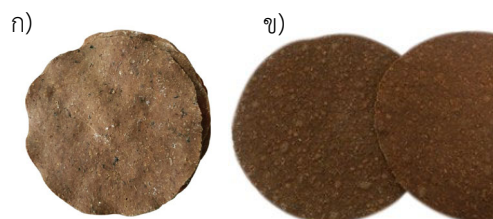
2.1 การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงปรุงรสและผงโรยข้าวจากถั่วเหลืองหมัก

แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

2.1.1 การเตรียมถั่วเหลืองหมักอบแห้ง

ถั่วเหลืองหมักพื้นบ้านหรือถั่วเน่าในการศึกษาค้างนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากหมู่บ้านหนองอ้อ อำเภอฟัว จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งมีลักษณะเป็นถั่วเหลืองหมักแผ่นขนาดเส้นผ่านกลาง 127-152 มิลลิเมตร หนา 1-1.5 มิลลิเมตร น้ำหนักเฉลี่ย 20-22 กรัมต่อแผ่น มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยร้อยละ 12.98 ± 0.59 โดยน้ำหนัก (รูปที่ 1 ก) นำถั่วเหลืองหมักแผ่นมาทำการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 35 นาที [8] โดยผลิตภัณฑ์มีความชื้นสุดท้าย 4.65 ± 0.19 โดยน้ำหนัก (รูปที่ 1 ข) จากนั้นนำถั่วเหลืองหมักแผ่นอบแห้งมาทำการบดด้วยเครื่องปั่นลดขนาดชนิด 2 ใบพัด ยี่ห้อ PHILLIP (รุ่น HR2118, ประเทศไทย)และ

นำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 40 เมช บรรจุในถุงซิปล็อคเก็บไว้ในโถดูดความชื้น



รูปที่ 1 ก) ถั่วหมักพื้นบ้านแผ่น (ถั่วเน่า) ก่อนอบแห้ง ข) ถั่วหมักพื้นบ้านแผ่น (ถั่วเน่า) หลังอบแห้ง

2.1.2 การศึกษาการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์ผงปรุงรสและผงโรยข้าว

นำถั่วเหลืองหมักพื้นบ้านที่ผ่านการอบแห้งในขั้นตอนแรกแล้ว มาพัฒนาเป็นผงปรุงรสและผงโรยข้าว โดยในส่วนของผงปรุงรสนำมาพัฒนาเป็นผงปรุงรสสดดั้งเดิม เนื่องจากประโยชน์ในการนำไปใช้ของผู้บริโภค คือนำไปปรุงรสในอาหารพื้นบ้านซึ่งการทำในรูปแบบผงทำให้เกิดความสะดวกมากขึ้น และในส่วนของผงโรยข้าว นำมาพัฒนาเป็น 2 สูตร คือ รสเงาะ-สาหร่าย และรสหอม-กระเทียม

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมการพัฒนาสูตรผงปรุงรสและผงโรยข้าวรสเงาะ-สาหร่าย

ส่วนผสม	ปริมาณ (ร้อยละ)			
	สูตรอ้างอิง	สูตร	สูตร	สูตร
	[9]	ทดลอง 1	ทดลอง 2	ทดลอง 3
ผักอบแห้ง	17	-	-	-
ผงถั่วหมักอบแห้ง	-	25	30	35
งาขาว	20	25	25	25
งาดำ	20	25	25	25
สาหร่าย	3	13	8	3
น้ำตาลทรายขาว	6	9	9	9
เกลือป่น	2	3	3	3
ซีอิ๊ว	16	-	-	-
น้ำ	16	-	-	-

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมการพัฒนาสูตรผงผงโรยข้าวรสหอม-กระเทียม

ส่วนผสม	ปริมาณ (ร้อยละ)			
	สูตรอ้างอิง [9]	สูตร ทดลอง 1	สูตร ทดลอง 2	สูตร ทดลอง 3
ผงหัวหมักอบแห้ง	-	25	30	35
หอมแดงเจียวป่น	25	29	24	19
กระเทียมป่น	25	24	24	24
พริกป่น	25	2	2	2
โปรตีนเกษตร	20	8	8	8
กะปิกุ้ง	5	-	-	-
น้ำตาลทรายขาว	-	9	9	9
เกลือป่น	-	3	3	3

ในการพัฒนาสูตรรสสา-สาหร่ายวางแผนการทดลองแบบ Mixture design โดยทำการผันแปรปริมาณผงหัวหมักอบแห้งและสาหร่าย โดยให้ปริมาณวัตถุดิบอื่นคงที่และเปรียบเทียบกับสูตรจากงานวิจัยผงโรยข้าวจากผักสลัด [9] ดังแสดงในตารางที่ 1 และในการพัฒนาสูตรเผ็ดวางแผนการทดลองแบบ Mixture design โดยทำการผันแปรปริมาณผงหัวหมักอบแห้งและหอมแดงเจียวป่นโดยให้ปริมาณวัตถุดิบอื่นคงที่และทำการเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์พริกคว่ำกรอบโรยข้าวในท้องตลาด ยี่ห้อไทยไทย ดังแสดงในตารางที่ 2

2.1.3 การทดสอบการยอมรับในผลิตภัณฑ์ผงปรุงรสและผงโรยข้าว

ทำการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ผงปรุงรสและผงโรยข้าวโดยใช้วิธีการประเมินทางประสาทสัมผัส โดยวางแผนการทดลองแบบ Randomized complete block Design (RCBD) ด้วยแบบทดสอบ 9-point hedonic scale (คะแนนเท่ากับ 1 คือไม่ชอบมากที่สุด คะแนนเท่ากับ 9 คือ ชอบมากที่สุด) สำหรับผงปรุงรสทดสอบกับผู้ทดสอบที่บริโภคหัวเผือกหมักเป็นผู้เชี่ยวชาญจำนวน 15 คน

และผงโรยข้าวทั้ง 2 รสชาติ ใช้จำนวนผู้ทดสอบกลุ่มผู้บริโภคทั่วไปทั้งหมด 50 คนโดยผู้ทดสอบจะได้รับตัวอย่างผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวรสสา-สาหร่ายและรสหอม-กระเทียมทั้ง 6 สูตรพร้อมกัน เตรียมโดยนำผงโรยข้าวคลุกกับข้าวสวยในอัตราส่วน 1 : 3 ส่วนแล้วคลุกเคล้าให้เข้ากันก่อนแล้วจึงนำไปประเมินความชอบในคุณลักษณะด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม นำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติ

2.1.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยนำข้อมูลผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผงโรยข้าวจากหัวเผือกหมักแห้ง ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Excel (version 2010) โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey's Test เมื่อได้สูตรที่ดีที่สุดของทั้ง 3 ผลิตภัณฑ์แล้วขั้นตอนต่อไปจึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ คุณค่าทางโภชนาการ และฤทธิ์ด้านอนุมูลอิสระ

2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

2.2.1 การวัดปริมาณความชื้น

ทำการการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (ร้อยละ โดยน้ำหนักเปียก) โดยใช้เครื่องวัดความชื้น (Moisture Analyze, MB54, OHAUS, Switzerland) โดยนำตัวอย่าง จำนวน 1 กรัม ใส่ลงในเครื่องวัดความชื้น (ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อหนึ่งตัวอย่าง) และปรับตั้งค่าการวัดความชื้นที่ อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส อ่านค่าแล้วทำการบันทึกผล

2.2.2 การวัดปริมาณน้ำอิสระ (aw)

วัดด้วยเครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity Meter, Novasina, AW Center, Switzerland) โดยนำผงหัวเผือกหมักแบบแผ่นใส่ลงในกระบอกประมาณ 1/2 ของความสูงของกระบอก และใส่ลงใน

เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ รวบรวมเครื่องแสดงค่าที่วัดได้ ซึ่งจะทำการวัด 3 ซ้ำต่อหนึ่งตัวอย่าง บันทึกค่าที่อ่านได้ และนำมาหาค่าเฉลี่ย

2.3 การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

2.3.1 การหาปริมาณโปรตีน

การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดใช้วิธีเคดาห์ล Kjeldahl Method (AOAC Method 928.08) โดยการนำตัวอย่าง 0.50-1.00 กรัม ใส่ลงใน Kjeldahl Flask เติมนกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4) 20 มิลลิลิตร นำไปย่อยในเครื่อง Kjeldahl Digestion apparatus อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง จนได้สารละลายใสเติมน้ำ 75 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาเติมกรดบอริก 50 มิลลิลิตร ลงใน Flask ขนาด 250 มิลลิลิตร หยด Mixed Indicator ลงไป 4-5 หยด ทำการกลั่น 1 ชั่วโมง แล้วนำไปไทเทรตด้วยกรดเกลือมาตรฐานจนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีม่วง และทำการไทเทรต blank คำนวณปริมาณโปรตีน (Convection Factor = 6.25)

2.3.2 การหาปริมาณไขมัน

ปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์ผงปรุงรสและผงโรยข้าวจากถั่วเหลืองหมักวิเคราะห์โดยใช้วิธี Soxhlet method (AOAC Method 963.15) อบตัวอย่างให้แห้ง ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่อบแล้วประมาณ 2 กรัม (A) ใส่ในกระดาศกรองที่ทราบน้ำหนักเบอร์ 1 ห่อให้เรียบร้อย อบขวดกันกลมให้แห้งที่ 100 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก (B) ต่อบขวดกันกลมเข้ากับระบบกลั่น Soxhlet เติมน Dichloromethane ประมาณ 250 มิลลิลิตร แล้วต้มทิ้งไว้ 8 ชั่วโมง เมื่อกลั่นเสร็จแล้ว นำตัวอย่างและขวดกันกลมไปอบที่ 100 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก (C) คำนวณปริมาณร้อยละของไขมันจากสมการ

ปริมาณไขมันร้อยละโดยน้ำหนัก = $[(C-B)/A] \times 100$

2.3.3 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

การวัดค่าการต้านอนุมูลอิสระใช้วิธี (2,2-Diphenyl- 2- picryl- hydrazyl (DPPH) Radical Scavenging Activity Method [10] โดยนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ผงปรุงรสและผงโรยข้าวมา 1 กรัม เตรียมสารละลายด้วยการผสมกับ 60% EtOH 10 มิลลิลิตร เตรียมสารละลาย DPPH: Tris Buffer : EtOH (1:1:1) ให้พอกับตัวอย่าง เติมนสารละลายดังกล่าวปริมาณ 1.8 มิลลิลิตร ลงไปในหลอดตัวอย่างและมาตรฐาน ให้ปริมาตรสุดท้าย 2.4 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ในห้องมืดไม่ให้โดนแสงที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (Perkin Elmer Spectrum Instrument, SP-UV-200, UK) ที่ความยาวคลื่น 525 นาโนเมตร และใช้สารละลาย 50% EtOH เป็นสารละลายมาตรฐาน จากนั้นคำนวณ %DPPH Inhibition จากสูตร

%DPPH inhibition

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

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการศึกษาแสดงเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงปรุงรส และผงโรยข้าวรสสาหร่ายและรสหอม-กระเทียม ผลการวัดคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระในตัวอย่าง และการวัดคุณค่าทางโภชนาการ

3.1 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์ผงปรุงรส ผงโรยข้าวรสสาหร่ายและรสหอม-กระเทียม

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์ถั่วเหลืองหมักพื้นบ้านปรุงรสแสดงดังตารางที่ 3 จากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์ผงปรุงรส พบว่าผู้บริโภคให้ความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ และความชอบ

โดยรวมอยู่ในระดับชอบถึงชอบปานกลาง โดยมีคะแนนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.00 ถึง 7.85 ซึ่งถือว่ามีความเหมาะสม

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสผงโรยข้าวรสเงา-สาหร่าย 3 สูตร แสดงดังแผนภูมิไข่มวงมม (ตารางที่ 4) จากรูปพบว่าผู้ทดสอบชิมให้ความชอบผงโรยข้าวรสเงา-สาหร่ายทั้ง 3 สูตร อยู่ในระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลางทั้ง 5 คุณลักษณะที่ทดสอบโดยมีคะแนนในช่วง 7.10 ถึง 7.46 และมีความชอบด้านความชอบโดยรวมอยู่ในช่วง 6.66 ถึง 7.46 คือมีความชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง โดยสูตรที่ได้คะแนนความชอบโดยรวมสูงสุด คือสูตรที่ 3 เมื่อทดสอบความแตกต่างทางสถิติพบว่า สูตรที่ 3 มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากสูตรที่ 1 และ 2 แสดงว่าผู้ทดสอบมีความชอบสูตรที่ 3 มากที่สุด และพบว่าผู้ทดสอบให้ความชอบในสูตรที่ 3 สูงกว่า สูตรที่ 1 และ 2 ในทุกๆ ด้าน

ตารางที่ 3 ผลคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคที่มีต่อผงปรุงรสจากถั่วเหลืองหมักพื้นบ้านอบแห้ง (n=15)

คุณสมบัติ	สี	กลิ่น	รสชาติ	ความชอบโดยรวม
ผงปรุงรส	7.20±0.77	7.40±0.73	7.00±0.53	7.85±0.36

หมายเหตุ ตัวเลขที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากผู้ทดสอบชิมที่เป็นผู้เชี่ยวชาญจำนวน 15 คน ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสผงโรยข้าวจากถั่วเหลืองหมักพื้นบ้านอบแห้งรสเงา-สาหร่าย

สูตรที่	สี	กลิ่น	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
1	6.04±0.95 ^a	5.98±0.92 ^b	6.70±0.98 ^b	6.64±0.99 ^a	6.66±1.15 ^b
2	6.08±0.52 ^b	7.06±0.90 ^a	6.74±0.82 ^b	6.86±0.80 ^a	6.84±0.73 ^b
3	7.10±1.52 ^a	7.44±1.40 ^a	7.44±1.56 ^a	7.28±1.29 ^a	7.46±1.48 ^a

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำกับต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อทดสอบด้วยวิธี F-test แบบ one way-ANOVA และจัดกลุ่มโดย Tukey's test

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสผงโรยข้าวจากถั่วเหลืองหมักพื้นบ้านอบแห้งรสหอม-กระเทียม

สูตรที่	สี	กลิ่น	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
1	6.08±0.52 ^b	7.06±0.91 ^b	6.77±0.82 ^a	6.64±0.80 ^a	6.84±0.73 ^b
2	6.04±0.96 ^b	5.98±0.93 ^b	6.70±0.99 ^a	6.64±1.00 ^a	6.66±1.17 ^b
3	7.40±1.56 ^a	7.20±1.08 ^a	6.96±1.26 ^a	7.08±0.96 ^a	7.44±1.01 ^a

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำกับต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อทดสอบด้วยวิธี F-test แบบ one way-ANOVA และจัดกลุ่มโดย Tukey's test

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสเพื่อศึกษาสูตรที่ดีที่สุดสำหรับผงโรยข้าวรสหอม-กระเทียม แสดงดังตารางที่ 5 จากรูปพบว่าผู้ทดสอบชิมให้ความชอบผงโรยข้าวรสหอม-กระเทียมทั้ง 3 สูตรอยู่ในระดับชอบเล็กน้อยถึงปานกลางโดยมีคะแนนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.04 ถึง 7.44 และพบว่าสูตรที่ 3 ได้รับคะแนนความชอบสูงกว่าสูตรที่ 1 และ 2 ในทุกๆ ด้าน และมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยมีคะแนนอยู่ในช่วง 6.96 ถึง 7.44 และมีคะแนนความชอบรวมสูงสุด 7.44 จะเห็นว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบในสูตรที่ 3 สูงสุดทั้ง 2 รสชาติเนื่องจากในถั่วเหลืองหมักอบแห้งมีส่วนประกอบของกรดกลูตามิก (Glutamic Acid) [7] ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการรับรส อูมามิ จะทำให้เกิดรสอูมามิเด่นขึ้นมาเหนือรสอื่น ๆ [11] โดยสูตรที่ 3 มีปริมาณถั่วเหลืองหมักแห้งมากที่สุด จึงมีผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูง คือ ชอบปานกลาง ดังนั้นจึงเลือกสูตรที่ 3 เป็นสูตรที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวรสเงา-สาหร่ายและรสหอม-กระเทียม โดยมีส่วนประกอบของถั่วเหลืองหมักแห้งผงร้อยละ 35

3.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพผลิตภัณฑ์ผงปรุงรส ผงโรยข้าวรสเงา-สาหร่ายและรสหอม-กระเทียม

จากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสและได้คัดเลือกสูตรที่ดีที่สุดคือสูตรที่ 3 ในขั้นต้นนั้น จึงได้นำผง

โรยข้าวและผงปรุงรสมาวัดคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระในตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คุณสมบัติทางกายภาพของผงปรุงรส และผงโรยข้าวจากถั่วเหลืองหมักพื้นบ้านอบแห้ง

ตัวอย่าง	ร้อยละความชื้น	ปริมาณน้ำอิสระ
	ฐานเปียก	(a _w)
ผงปรุงรส	4.84±0.48	0.28±0.01
ผงโรยข้าวรส- สาหร่าย (สูตรที่ 3)	4.45±0.25	0.26±0.01
ผงโรยข้าวรสหอม- กระเทียม (สูตรที่ 3)	5.39±0.15	0.33±0.01

หมายเหตุ ตัวเลขที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของผงปรุงรส และผงโรยข้าวรส-สาหร่ายและรสหอม-กระเทียม จากสูตรที่ได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูงสุดคือ สูตรที่ 3 พบว่าปริมาณความชื้นโดยน้ำหนักเปียกของผงปรุงรส และผงโรยข้าวรส-สาหร่ายและรสหอม-กระเทียมมีค่าร้อยละ 4.84 4.45 และ 5.39 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากปริมาณน้ำอิสระ (a_w) พบว่าผงปรุงรส ผงโรยข้าวรส-สาหร่ายและรสหอม-กระเทียมมีปริมาณน้ำอิสระมีค่า 0.28 0.26 และ 0.33 ตามลำดับ จะเห็นว่าผงโรยข้าวรสหอม-กระเทียมมีปริมาณความชื้นและน้ำอิสระสูงกว่าอีก 2 ผลิตภัณฑ์ เนื่องจากในการนำมาพัฒนาสูตรนั้นในสูตรของผงโรยข้าวรสหอม-กระเทียมมีส่วนผสมบางชนิดที่มีค่าความชื้นสูงรวมอยู่ด้วย ได้แก่ กระเทียมเจียว จึงทำให้ค่าปริมาณความชื้นและน้ำอิสระเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ในการพัฒนาสูตรต้องพิจารณาสัดส่วนให้เหมาะสมด้วย อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน [12] ที่กำหนดไว้เป็นค่าต่ำสุดในอาหารที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำมาใช้เพื่อเจริญเติบโตและใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ต่างๆ เป็นการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารที่เกิดขึ้นจากเชื้อจุลินทรีย์ได้ [13]

3.3 ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ด้วยวัตถุประสงค์ในการส่งเสริมให้ชุมชนนำไปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อการค้าจึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของผงปรุงรสและผงโรยข้าวจากถั่วเหลืองหมักพื้นบ้านอบแห้งที่ได้ถูกพัฒนา โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 คุณค่าทางโภชนาการและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของผงปรุงรสและผงโรยข้าวจากถั่วเหลืองหมักพื้นบ้านอบแห้ง

ตัวอย่าง	คุณค่าทางโภชนาการ		
	โปรตีน (ร้อยละ)	ไขมัน (ร้อยละ)	ฤทธิ์ต้าน อนุมูลอิสระ (μmol TE/g)
ผงปรุงรส	43.80±0.01	19.24±0.04	3.72±0.05
ผงโรยข้าวรส งา-สาหร่าย	29.90±0.60	9.72±0.15	1.79±0.04
ผงโรยข้าวรส หอม-กระเทียม	31.70±0.05	20.51±0.67	1.96±0.15

หมายเหตุ ตัวเลขที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตารางพบว่าผงปรุงรส ผงโรยข้าวรส-สาหร่ายและรสหอม-กระเทียมที่พัฒนามาจากผงถั่วเหลืองหมักพื้นบ้านมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 43.80 29.90 และ 32.70 ตามลำดับ โดยผงปรุงรสมีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดเนื่องจากมีปริมาณถั่วเหลืองหมักผงสูงสุด และพบว่าถั่วเหลืองหมักมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าถั่วเหลืองที่ไม่ผ่านการหมัก เนื่องจากกระบวนการหมักทำให้เกิดเอนไซม์ที่สร้างขึ้นจากจุลินทรีย์ในกลุ่มบาซิลลัส (*Bacillus* sp.) โดยเฉพาะเอนไซม์โปรติเอสที่ย่อยสลาย

โปรตีนให้เป็นกรดอะมิโน ทำให้ปริมาณโปรตีนสูงขึ้นกว่าเดิม [2, 3, 4] รองลงมาคือผงโรยข้าวรสหอม-กระเทียม เนื่องจากผงโรยข้าวรสหอม-กระเทียมมีองค์ประกอบของโปรตีนเกษตรจึงมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าผงโรยข้าวรสงา-สาหร่าย สำหรับปริมาณไขมันพบว่าผงโรยข้าวรสหอม-กระเทียม มีปริมาณไขมันสูงกว่า ผงปรุงรส และผงโรยข้าวรสงา-สาหร่ายมีปริมาณไขมันต่ำสุด คือร้อยละ 20.51 19.24 และ 9.72 ตามลำดับ เนื่องจากในผงโรยข้าวรสหอม-กระเทียมมีส่วนประกอบของหอมแดงเจียวซึ่งมีปริมาณน้ำมันอยู่จึงทำให้ปริมาณไขมันสูงกว่าผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น ส่วนประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระวัดโดยใช้วิธี DPPH Radical Scavenging Ability และคำนวณในรูปของ $\mu\text{mol Trolox Equivalents/g}$ พบว่าผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 มีประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระอยู่ในช่วง 1.79 – 3.72 $\mu\text{mol TE/g}$ ซึ่งใกล้เคียงกับสมุนไพรไทยประเภทตะไคร้ ใบเตย มะรุม เป็นต้น [14] ผงปรุงรสมีประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าผลิตภัณฑ์อื่น รองลงมาได้แก่ ผงโรยข้าวรสหอม-กระเทียม และรสงา-สาหร่าย ตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับ 3.72 1.96 และ 1.79 $\mu\text{mol TE/g}$ เนื่องจากผงปรุงรสมีปริมาณสัดส่วนของถั่วเน่าสูงกว่าผลิตภัณฑ์อีก 2 ชนิด และในผงโรยข้าวรสหอม-กระเทียมมีองค์ประกอบของหอมแดงเจียวและมีปริมาณไขมันสูง จึงเป็นไปได้ว่าประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระที่สูงกว่าผงโรยข้าวรสงา-สาหร่ายมาจากปริมาณน้ำมันในองค์ประกอบของหอมแดงเจียวเนื่องจากน้ำมันมีวิตามินอีซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระเช่นกัน [15]

4. สรุป

จากการศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่จากถั่วเหลืองหมักแบบแผ่นพบว่า ถั่วเหลืองหมักแบบแผ่นที่เป็นภูมิปัญญาของชาวบ้านพื้นถิ่นในภาคเหนือ สามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ทันสมัยสนองต่อความ

ต้องการที่เปลี่ยนแปลงของผู้บริโภคในยุคปัจจุบัน ได้ 2 ผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ผงปรุงรส และผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว ซึ่งจากการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวได้ทดลองไว้ 2 รสชาติ ได้แก่ รสงา-สาหร่าย และรสหอม-กระเทียม พบว่าผู้บริโภคให้คะแนนความชอบอยู่ในระดับความชอบปานกลางถึงมาก และมีคุณสมบัติทางโภชนาการด้านโปรตีน ไขมันและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอยู่ในระดับสูงซึ่งเกิดจากการผ่านกระบวนการหมักจึงมีประโยชน์ต่อผู้บริโภค

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนภายใต้ “โครงการอาจารย์นักวิจัยหน้าใหม่ (New Hands-on Researcher: N-HR 2016)” ประจำปี 2559 จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Nutrition division, Department of health, Ministry of public health, *Nutritive values of Thai foods*, 3rd ed. Bangkok: The War Veterans Organization of Thailand, 2001, pp. 15-20.
- [2] J. Japakaset, C. Wongkhalaung and V. Leelawatcharamas, “Utilization of soybean residue to produce monacolin K-cholesterol lowering agent,” *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 31, no. 1, pp. 35-39, Jan.-Feb. 2009.
- [3] S. Vongpiphan, “Development of functional food from soybean yoghurt for menopause,” M.S. thesis, Dept. Food Tech., Silpakorn Univ., Bangkok, Thailand, 2007.
- [4] N. Rattanapanon, *Effect of processing on food and nutrition in food*, Food science and

- technology, Chiangmai: Faculty of agro industry, Chiangmai University, 2000.
- [5] T. Runnum. (2014, October 15). ThuaNao: Lanna local wisdom food. [Online]. Available: <https://www.stou.ac.th>
- [6] L. KeShun, "Chemistry and Nutritional Value of Soybean Components," *Soybean Chemistry Technology and Utilization*, L. KeShun, New York: Chapman and Hall, 1997, pp. 25-113.
- [7] E. Chukeatirote, S. In-khian, K. Dajantaa and A. Apichartsrangkoon, "Thua Nao-An Indigenous Fermented Soybean of Thailand," *SWU Sci. J.*, vol. 27, no. 1, pp. 197-213, Jun. 2011.
- [8] S. Rajchasom, J. Vuthijamnonk, N. Seelum and S. Takornkwea, "The study of drying condition for local dried fermented soybean (Thua Nao)," *International Journal of Food Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 116-120, Jun. 2019.
- [9] P. Kaewsrittho, N. On-Nom, U. Suttisansanee, T. Winuprasith, R. Chamchan, N. Sriden, A. Aursalung and Y. Sahasakul, "Development of healthy Tom Yum flavoured rice seasoning (Furikake) from vegetable powder," *Agricultural Sci. J.*, vol. 49, no. 2, pp. 165-168, Jun. 2018.
- [10] W. Brand-Williams, M. E. Cuvelier, and C. Berset, "Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 28, no. 1, pp. 25-30, Jan. 1995
- [11] P. Pornchalermp Phong and N. Rattanapanon. (2010, May 10). Glutamic acid. [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com>
- [12] Thai industrial standards institute (2005, September 10). Community product standard Thua-Nao Powder [Online]. Available: <http://app.tisi.go.th>
- [13] R. Phongsawadmanich and P. Vuttijumnon, *Food product shelf-life evaluation and extension*, Bangkok: O.S. printing house, 2017.
- [14] A. Halee and B. Rattanapun, "Study of antioxidant efficacies of 15 Local herbs," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 40, no. 2, pp. 283-293, Dec. 2017.
- [15] World Health Organization (WHO) Food and Agriculture Organization (FAO). *Vitamin and Mineral Requirements in Human Nutrition: Report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation*, Bangkok, Thailand, 21-30 September 1998. WHO, FAO; Geneva, Switzerland: 2004. p. 341.

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

แบบจำลองสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสำหรับการอบแห้งชั้นบางของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ

ศิวกร ศรีธัญญากร กীরติ สุลักษณ์* และ ทวิช จิตรสมบุญ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 25 กุมภาพันธ์ 2563 แก้ไขบทความ 26 สิงหาคม 2563 ตอรับบทความ 15 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสำหรับการอบแห้งชั้นบางของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระในรูปแบบใหม่ โดยออกแบบสร้างเครื่องอบแห้งดังกล่าวเพื่อทดลองผลจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ภายใต้เงื่อนไขอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนในช่วง 60-150 องศาเซลเซียส มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5-15 กิโลกรัม และความเร็วลมร้อน 19 เมตรต่อวินาที ผลแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้นและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นลดลงส่งผลให้เวลาอบแห้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดลองถูกนำไปใช้สอบเทียบแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย 12 แบบจำลอง เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ค่าไคกำลังสอง (χ^2) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เมื่อพิจารณาทั้งอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อนและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ในรูปแบบเชิงเส้นพบว่าแบบจำลองอบแห้งชั้นบางที่นิยมใช้สามารถทำนายผลของอัตราส่วนความชื้นได้แม่นยำ โดยให้ความแม่นยำสูงสุดที่ RMSE=0.0279 χ^2 =0.00084 และ r=0.9938 นอกจากนี้ผลการทดลองยังถูกนำไปใช้สังเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นในรูปแบบใหม่ที่เป็นฟังก์ชันของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น อุณหภูมิลมร้อน และเวลาอบแห้ง แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นอยู่ในรูปฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลที่ประกอบด้วยค่าคงที่แบบจำลองเพียงจำนวน 7 ตัว เมื่อนำไปใช้จำลองผลอัตราส่วนความชื้น พบว่าให้ความแม่นยำเทียบเท่าแบบจำลองที่นิยมใช้ที่แม่นยำสูงสุด ซึ่งใช้ค่าคงที่แบบจำลองถึง 24 ตัว โดยให้ค่าความแตกต่างของผลจำลองเพียงร้อยละ 1.8

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ; การอบแห้งข้าวเปลือก; แบบจำลองอบแห้งชั้นบาง; อัตราส่วนความชื้น; สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

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

Diffusion Coefficient Modelling of Thin-layer Drying of Paddy Using Spouted Free Fall Bed Dryer

Siwakorn Sritunyakorn Keerati Suluksna* and Tawit Chitsomboon

Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

111 University Avenue, Suranaree, Mueang, Nakhon Ratchasima, 30000

Received 25 February 2020; Revised 26 August 2020; Accepted 15 September 2020

Abstract

This research developed a new model to determine the moisture diffusion coefficient for the thin-layer paddy drying with the spouted free-fall bed dryer. The design and construction of the dryer was done to experiment with the drying kinetics. The experiment has studied under conditions of hot air temperature of 60-150 °C, the initial paddy mass of 5 - 15 kg and hot air velocity of 19 m/s. The results showed that the higher hot air temperature and the lower initial paddy mass resulted in a significant reduction in drying time. The experimental results were used to calibrate 12 of the most popular thin-layer drying models to find a suitable one, considering based on the root mean square error (RMSE), chi-squared value (χ^2) and the correlation coefficient (r). It was found that the popular thin layer drying model was able to accurately predict the effect of the moisture ratio, considering both the influence of hot air temperature and the initial paddy mass, in linear models. The highest accuracy was RMSE = 0.0279, χ^2 = 0.00084 and r = 0.9938. In addition, the experimental results have been used to synthesize the new diffusion moisture coefficient, which is a function of initial paddy mass, temperature and drying time. This developed model was based on an exponential function with only 7 model constants. The simulated results observed that the new model achieved the average error only 1.8 percent compared with the best model that uses up to 24 model constants.

Keywords: Spouted Free-fall Bed Dryer; Paddy Drying; Thin-layer Model; Moisture Ratio; Moisture Diffusivity Coefficient

* Corresponding Author. Tel.: +668 9765 6526, E-mail Address: keerati@sut.ac.th

1. บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย การบริโภคข้าวมีความต้องการเพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากร ด้วยการเก็บเกี่ยวข้าวในปัจจุบัน ข้าวมักมีความชื้นสูงในช่วงร้อยละ 25-30 มาตรฐานเปียก ดังนั้นการอบแห้งหลังการเก็บเกี่ยวจึงมีความสำคัญมาก เพื่อคงคุณภาพที่ดีป้องกันการเน่าเสีย ยืดอายุการเก็บรักษา โดยลดความชื้นลง ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 13-14 มาตรฐานเปียก [1] ซึ่งสภาพความชื้นต่ำช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และเชื้อรา การลดความชื้นข้าวเปลือกที่นิยมใช้คือ การตากบนลานปูนซึ่งประหยัดแต่มีข้อเสีย เช่น ขึ้นกับสภาพภูมิอากาศ ใช้เวลาแรงงานและพื้นที่มาก รวมถึงการปนเปื้อนและเสียหายปริมาณสูง ดังนั้น การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเชิงกลจึงช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ปัจจุบันมีเครื่องอบแห้งหลายรูปแบบที่นิยมในเชิงพาณิชย์ โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากไม่ซับซ้อนและต้นทุนต่ำ เช่น เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด เครื่องอบแห้งแบบไหลคลุกเคล้า (LSU) เป็นต้น

เครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดระบบฟลูอิดไดซ์ชันในด้านขนาดอนุภาคที่ใช้อบสามารถอบแห้งวัสดุที่ไวต่อความร้อนสูงได้ดีโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เวลาสัมผัสความร้อนสั้นทำให้อบแห้งที่อุณหภูมิสูงได้ มีการพักตัวในห้องอบแห้งทำให้ความชื้นภายในแพร่ออกมาที่ผิว มีความสม่ำเสมอของคุณภาพหลังการอบ และใช้พลังงานค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่น ดังนั้น เทคนิคแบบเป่าพ่นจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท [1], [2] การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีหล่นอิสระ ซึ่งพบว่าให้อัตราการอบแห้งสูงอบแห้งได้เร็ว ประหยัดพลังงาน และให้ข้าวมีคุณภาพดีในด้านคุณภาพการขัดสีและความขาวของข้าว [3], [4]

การออกแบบห้องอบแห้งแบบทรงกระบอกฐานกรวยนั้น มีตัวแปรต่างๆที่ต้องคำนึงถึง จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีข้อกำหนดของตัวแปรที่ใช้ออกแบบ เพื่อให้เกิดการเป่าพ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพและป้องกันการการเกิด

ขอบเขตนิ่งของวัสดุ (Dead Zone) [5-7] เช่น อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออากาศเข้าต่อเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (D_i/d_p) อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางห้องอบแห้งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออากาศเข้า (D_o/D_i) และมุมเอียงด้านล่างห้องอบแห้ง (Slant Angle) เป็นต้น

การทดลองเพื่อหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมนั้นค่อนข้างใช้เวลาและค่าใช้จ่ายมาก นอกจากนี้วัสดุทางชีวภาพอย่างเช่น ข้าว มีกระบวนการแพร่และการระเหยน้ำภายในเมล็ดที่ซับซ้อน เช่น การไหลแบบโมเลกุลอิสระ (Knudsen Flow) การดูดซึมด้วยระบบคาปิลารี การแพร่ของน้ำในสภาพของเหลวและไอ เป็นต้น ดังนั้นการทำความเข้าใจการทำนายความชื้นโดยใช้แบบจำลองการอบแห้งชั้นบางจึงนิยมกันอย่างแพร่หลาย [4] งานวิจัยที่ศึกษาการจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางกับวัสดุที่หลากหลาย เช่น การอบแห้งหญ้าปักกิ่งด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด [8] การอบแห้งถั่วและเมล็ด [9] การอบแห้งพริกเทคนิคสุญญากาศ [10] การอบแห้งแป้งมันเทศ [11] กากแครอต [12] การอบแห้งข้าวโดยการวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิความร้อน [13] การอบแห้งใบตะไคร้ [14] การอบแห้งโกโก้ และเฮเซลนัท โดยจำลองวัสดุเป็นวงกลมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น [15], [16]

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ส่วนใหญ่ใช้รูปแบบการจำลองโดยมักใช้ความสัมพันธ์ในรูปเชิงเส้นระหว่างความสัมพันธ์ของ $\ln(MR)$ กับเวลา ซึ่งจะได้เป็นค่าคงที่ เช่น การอบแห้งพริกไทยดำด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่น รวมถึงศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นในรูปเชิงเส้น แบบทั่วไปโดยสมมติรูปทรงของพริกไทยดำเป็นทรงกลม [17] การจำลองการแพร่ความชื้นสำหรับการอบแห้งชั้นบางข้าวเปลือก โดยจำลองรูปทรงเมล็ดข้าวเปลือกแบบทรงคล้ายทรงกลมแบนข้าง รูปทรงกลม และรูปทรงกระบอกจำกัด เทียบกับผลการทดลอง พบว่าแบบจำลองการแพร่ความชื้นโดยใช้รูปทรงกลมแบนข้าง ให้ความแม่นยำมากกว่ารูปทรงอื่น ๆ แต่ไม่ต่างกันมากดังนั้น

ห้องอบแห้งหมายเลข (3) ถูกออกแบบให้มีขนาดความจุข้าวเปลือก 15 กิโลกรัม มุมเอียงด้านล่างห้องอบแห้ง (θ) 60 องศา เส้นผ่านศูนย์กลางห้องอบแห้ง (D_o) 30 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางท่ออากาศเข้า (D_i) 4.4 เซนติเมตร ความสูงท่อเป่าพ่น (H_i) 60 เซนติเมตร โดย $D_i/d_p=12$, $D_o/D_i = 6.8$ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไข การเป่าพ่นที่มีเสถียรภาพและป้องกันการเกิดขอบเขตนิ่งของวัสดุ

การทำงาน คือ ลมร้อนที่ขับจากพัดลมผ่านชุดทำความร้อน เป่าพ่นข้าวจากห้องอบแห้งผ่านท่อเป่าพ่นขึ้นด้านบน ซึ่งจะเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลในลักษณะไหลตามกัน จากนั้นข้าวจะหล่นตามแรงโน้มถ่วงอย่างอิสระลงสู่ห้องอบแห้งสวนทางกับลมร้อนที่เป่าพ่น

2.2 การทดลองอบแห้ง

การทดลองอบแห้งด้วยเครื่องเป่าพ่นหล่นอิสระใช้ข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณ 60 ที่เก็บเกี่ยวสดในจังหวัดนครราชสีมา ผ่านเครื่องทำความสะอาดข้าว ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วงร้อยละ 24-26 มาตรฐานเปียก เก็บบรรจุลงไว้ในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4-5 องศาเซลเซียส ก่อนการทดลองอบแห้ง ข้าวเปลือกจะถูกพักที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเป็นเวลา 12 ชั่วโมงเพื่อปรับอุณหภูมิข้าวเปลือกให้เป็นอุณหภูมิโดยรอบเพื่อหลีกเลี่ยงการควบแน่นของไอน้ำ จากนั้นนำข้าวเปลือกชั่งน้ำหนักเริ่มต้น เข้าอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น ภายใต้เงื่อนไขกรณีทดลองดังนี้ อุณหภูมิลมร้อนที่ 60, 80, 100, 120 และ 150 องศาเซลเซียส มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5, 10 และ 15 กิโลกรัม โดยสุ่มเก็บตัวอย่างข้าวครั้งละ 15 กรัมใส่ถุงพลาสติกเพื่อวัดความชื้น จนกระทั่งข้าวมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 13-14 มาตรฐานเปียก

การหาปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวโดยใช้เตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง [3], [4] วิธีการหาความชื้นวัสดุคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$M_s = (w - d) / s \quad (1)$$

โดยที่

M_s = ความชื้นวัสดุ

w = มวลของวัสดุขึ้น (กรัม)

d = มวลของวัสดุแห้ง (กรัม)

เมื่อ $s = w$ จะได้ความชื้นวัสดุแบบมาตรฐานเปียก (M_w) และเมื่อ $s = d$ จะได้ความชื้นวัสดุแบบมาตรฐานแห้ง (M)

2.3 แบบจำลองการอบแห้ง

แบบจำลองที่ใช้ทำการอบแห้งข้าวเปลือกมักนิยามสมการในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย (MR) กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (t) รูปแบบความสัมพันธ์จัดรูปใหม่มักอยู่ในรูปสมการเอกซ์โพเนนเชียลที่มีค่าคงที่ต่างๆ ประกอบในสมการ ตัวอย่างแบบจำลองที่นิยมใช้แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจะเป็นแบบจำลองที่ถูกนำไปใช้ในการสอบเทียบผลการทดลองต่อไป โดย a, b, c, g, h และ k เป็นค่าคงที่แบบจำลองซึ่งมีค่าแตกต่างกันในแต่ละแบบจำลอง

อย่างไรก็ตามในการวิจัยนี้สนใจสมการแบบจำลองการอบแห้งของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น โดยพิจารณาจาก Fick's Second Law ที่ใช้กันแพร่หลายในกระบวนการอบแห้ง อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในวัสดุ บนสมมติฐานเมล็ดข้าวเป็นทรงกลม การแพร่ความชื้นสม่ำเสมอในทุกทิศทาง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นคงที่ ไม่มีการหดตัว [15], [21] ดังสมการที่ (2)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (2)$$

โดยที่

M = ความชื้น (มาตรฐานแห้ง)

r = รัศมี (เมตร)

t = เวลาอบแห้ง (วินาที)

D_{eff} = สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (ตารางเมตร/วินาที)

ภายใต้สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต [16], [21] $M(r,0)=M_o$, $M(r_o,t)=M_e$ และ $dM(0,t)/dt=0$ ผลเฉลยรูปทั่วไปที่เป็นค่าเฉลี่ยบนปริมาตรเมล็ดข้าวแบบทรงกลมแสดงในสมการที่ (3) โดยใช้ความสัมพันธ์ของ Arrhenius (1899) [9], [11], [12] ซึ่งได้นำเสนอรูปแบบของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ดังสมการที่ (4) [22]

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{D_{eff} n^2 \pi^2 t}{r_o^2}\right) \quad (3)$$

$$D_{eff} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{abs}}\right) \quad (4)$$

โดยที่

MR = อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย

r_o = รัศมีของเมล็ดข้าว (เมตร)

D_o = สัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ (ตารางเมตร/วินาที)

E_a = พลังงานกระตุ้น (กิโลจูล/โมล)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (กิโลจูล/โมล-เคลวิน)

T_{abs} = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของลมร้อน (เคลวิน)

ตารางที่ 1 แบบจำลองที่ใช้ทำนายการอบแห้งข้าวเปลือก

No.	Model Name	Equation	References
1	Newton (1921)	$MR = \exp(-kt)$	[4], [8]-[12], [14]-[16]
2	Page (1943)	$MR = \exp(-kt^n)$	[4], [8]-[16], [21], [22]
3	Henderson and Pabis (1961)	$MR = a \exp(-kt)$	[4], [8]-[12], [14]-[16]
4	Two-term (1974)	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt)$	[4], [8]-[16]
5	Wang and Singh (1978)	$MR = 1 + at + bt^2$	[4], [8], [10]-[13], [14], [16]
6	Logarithmic (1984)	$MR = a \exp(-kt) + c$	[4], [8]-[15], [21], [22]
7	Verma et al. (1985)	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	[8], [10]-[15], [21]
8	Modified Page equation II (1993)	$MR = \exp(-k(t/L^2)^n)$	[10], [12], [14], [21], [22]
9	Diffusion approach (1998)	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	[4], [8]-[12], [14], [21]
10	Modified Henderson and Pabis (1999)	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	[4], [8]-[11], [14], [21], [22]
11	Midilli et al. (2002)	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[4], [8], [10]-[15], [21], [22]
12	Jena and Das (2007)	$MR = a \exp(-kt + bt^{1/2}) + c$	[10], [14]

อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย เป็นสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้น ดังสมการที่ (5) [21] ค่าความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกใช้รูปแบบจำลอง Henderson (1952) [4] ดังสมการที่ (6)

$$MR = \frac{\bar{M} - M_e}{M_o - M_e} \quad (5)$$

$$M_e = \frac{1}{100} \left[\frac{\ln(1 - RH)}{C_1 - T_{abs}} \right]^{1/C_2} \quad (6)$$

โดยที่

$\bar{M}$ = ความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใดๆ (มาตรฐานแห้ง)

M_o = ความชื้นเริ่มต้น (มาตรฐานแห้ง)

M_e = ความชื้นสมดุล (มาตรฐานแห้ง)

RH = ความชื้นสัมพัทธ์

$C_1 = -3.146 \times 10^{-6}$ และ $C_2 = 2.464$ เป็นค่าคงที่สำหรับข้าวเปลือก (ขึ้นกับเมล็ดพืชที่ใช้อบแห้ง) [4]

การวิเคราะห์พิจารณาจากค่าตัวแปรทางสถิติ ดังนี้ รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่แสดงถึงไคกำลังสอง (χ^2) และที่แสดงถึงสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ดังสมการที่ (7)-(9) ตามลำดับ [4], [22] เพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองที่ให้ ความแม่นยำในการทำนายผล

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (7)$$

$$\chi^2 = RMSE^2 \left(\frac{N}{N-z} \right) \quad (8)$$

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N MR_{pre,i} MR_{exp,i} - \sum_{i=1}^N MR_{pre,i} \sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{\Delta MR_{pre} \Delta MR_{exp}} \quad (9)$$

เมื่อ

$$\Delta MR_{pre} = \sqrt{N \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N MR_{pre,i} \right)^2}$$

$$\Delta MR_{exp} = \sqrt{N \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N MR_{exp,i} \right)^2}$$

โดยที่

MR_{exp} = อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง

MR_{pre} = อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนาย

N = จำนวนข้อมูล

z = จำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลอง

3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

3.1 การสอบเทียบผลการทดลองด้วย

แบบจำลองการอบแห้ง

ผลการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ ในรูปความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้น (สมการที่ (5)) กับเวลาอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 60, 80, 100, 120 และ 150 องศาเซลเซียส มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5, 10 และ 15 กิโลกรัม ความเร็วลมร้อน 19 เมตรต่อวินาที (จุดสัญลักษณ์ในรูปที่ 3) พบว่าเมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น อัตราส่วนความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เวลาการอบแห้งลดลง [4], [5] เพราะอุณหภูมิลมร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความชื้นที่ผิวเมล็ดแห้งเร็วขึ้น จึงเกิดความแตกต่างของ

ค่าความชื้นของเส้นกราฟความชื้นระหว่างผิวและภายในเมล็ดข้าว ทำให้ความชื้นภายในแพร่ออกมาได้เร็วมากขึ้น การเพิ่มมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นส่งผลให้เวลาการอบแห้งนานขึ้นเพราะมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นที่มากขึ้นส่งผลต่อระยะเวลาของวงรอบการอบแห้งที่นานขึ้น ทำให้ระยะเวลาการสัมผัสระหว่างเมล็ดข้าวเปลือกกับลมร้อนน้อยลง โดยอัตราส่วนความชื้นที่ลดลงเร็วที่สุดที่อุณหภูมิอบแห้งสูงสุดคือ 150 องศาเซลเซียส และมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นน้อยสุดที่ 5 กิโลกรัม

ผลการทดลองถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลสอบเทียบแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางทั้ง 12 แบบจำลอง (ตารางที่ 1) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยพิจารณาแบบจำลองที่ให้ค่า r เข้าใกล้ 1 และให้ค่า RMSE และ χ^2 ต่ำสุด ตัวอย่างผลที่อุณหภูมิลมร้อน 60 องศาเซลเซียส มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5 10 และ 15 กิโลกรัม แสดงในตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาแบบจำลองที่ไม่ขึ้นกับอิทธิพลของมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น (m) และอุณหภูมิลมร้อน (T) พบว่าแบบจำลอง Midilli et al. (2002) มีความแม่นยำที่สุด [11] โดยมีค่า r สูงสุดระหว่าง 0.99960-0.99993 ค่า RMSE และ χ^2 ต่ำสุดระหว่าง 0.00300-0.00941 และ 0.00001-0.00012 ตามลำดับ แบบจำลองที่มีความแม่นยำลำดับถัดมาคือ Jena and Das (2007) และ Modified Handerson and Pabis (1999) ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถทำนายผลกระทบของทั้งอุณหภูมิลมร้อนและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น ค่าพารามิเตอร์ของทั้ง 12 แบบจำลองถูกนำไปจัดรูปตามสมการที่ (10) เมื่อ C เป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลอง อาทิ k, a, b, c (ดูตารางที่ 1)

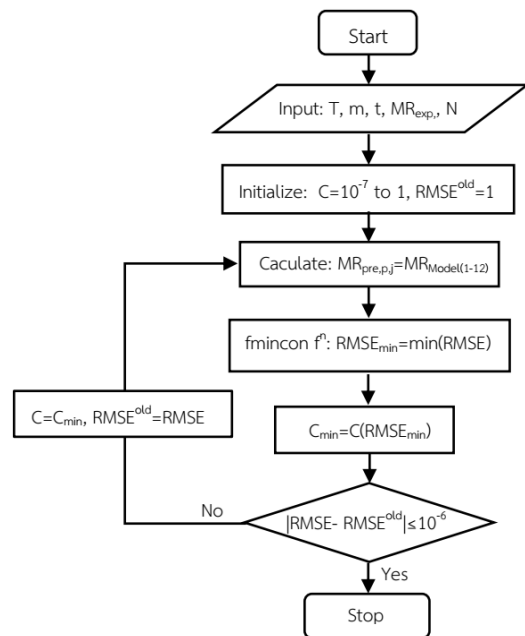
$$C = C_1 + C_2 T + C_3 m + C_4 m T \quad (10)$$

โดย C_1, C_2, C_3 และ C_4 เรียกว่าค่าคงที่ของแบบจำลองด้วยรูปแบบการหาค่าพารามิเตอร์ตามสมการที่ (10) พารามิเตอร์แต่ละตัวจะประกอบด้วยค่าคงที่แบบจำลอง

4 ตัว ดังนั้นจำนวนค่าคงที่ในแบบจำลองมีทั้งหมดเท่ากับ $4z$ ตัว เช่นแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis (1999) มีพารามิเตอร์แบบจำลอง 6 ตัว (a, k, b, g, c, h) จึงทำให้มีค่าคงที่แบบจำลองทั้งหมด 24 ตัว เป็นต้น

การหาค่าคงที่แบบจำลองที่นำไปสู่การได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมด้วยโปรแกรมแมทแล็บ ผ่านฟังก์ชัน Fmincon โดยฟังก์ชันคำนวณแสดงดังรูปที่ 2

ผลการคำนวณให้ค่าคงที่แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับแต่ละแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis (1999) มีความแม่นยำสุด โดยให้ค่า RMSE และค่า χ^2 ต่ำสุดที่ 0.01860 และ 0.00039 ตามลำดับ ค่า r เท่ากับ 0.99719 ส่วนแบบจำลอง Midilli et al. (2002) ให้ความแม่นยำรองลงมา



รูปที่ 2 ฟังก์ชันที่ใช้คำนวณหาค่าคงที่แบบจำลองที่เหมาะสม

ตารางที่ 2 ผลการจำลองการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

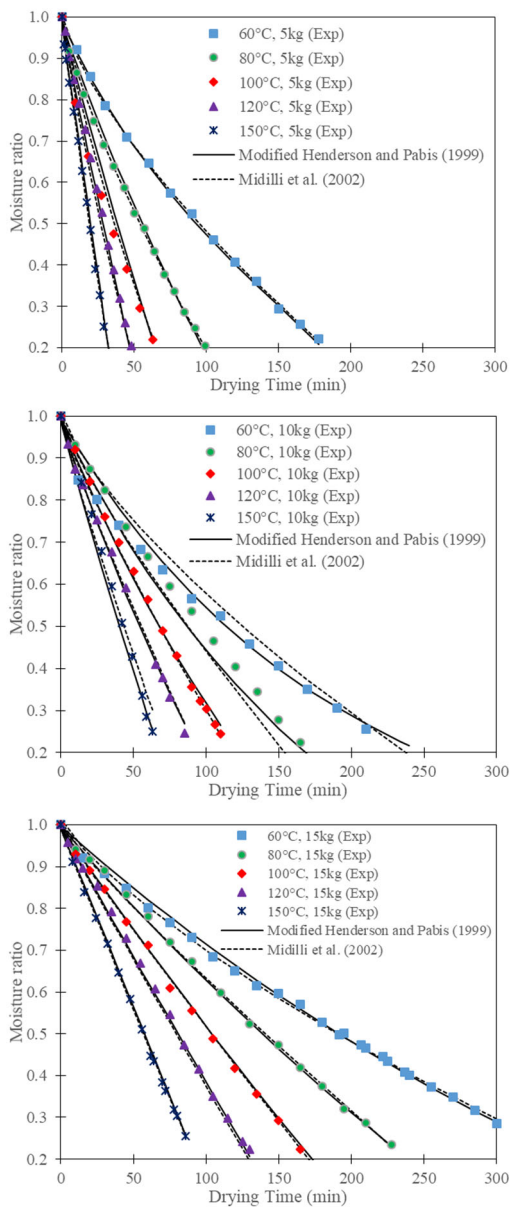
Model No.	z	m = 5 kg			m = 10 kg			m = 15 kg		
		RMSE	χ^2	r	RMSE	χ^2	r	RMSE	χ^2	r
1	1	0.01602	0.00028	0.99799	0.03001	0.00096	0.99457	0.01920	0.00038	0.99581
2	2	0.01438	0.00024	0.99833	0.02709	0.00085	0.99404	0.01629	0.00029	0.99701
3	2	0.01593	0.00030	0.99794	0.02400	0.00066	0.99512	0.01905	0.00039	0.99569
4	4	0.00728	0.00007	0.99956	0.01907	0.00050	0.99689	0.00637	0.00005	0.99951
5	2	0.01399	0.00023	0.99880	0.03620	0.00151	0.99347	0.01284	0.00018	0.99869
6	3	0.00909	0.00011	0.99931	0.02107	0.00055	0.99620	0.00806	0.00007	0.99922
7	3	0.00820	0.00009	0.99952	0.02014	0.00051	0.99663	0.00831	0.00008	0.99935
8	3	0.01438	0.00026	0.99833	0.02709	0.00092	0.99404	0.01629	0.00030	0.99701
9	3	0.00820	0.00009	0.99952	0.02014	0.00051	0.99663	0.01014	0.00012	0.99923
10	6	0.00640	0.00007	0.99966	0.00888	0.00013	0.99933	0.00652	0.00006	0.99949
11	4	0.00552	0.00004	0.99975	0.00572	0.00004	0.99972	0.00469	0.00003	0.99973
12	4	0.00612	0.00005	0.99969	0.00644	0.00006	0.99965	0.00466	0.00003	0.99974

จากรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายโดยใช้แบบจำลอง Modified Henderson and Pabis (1999) และ Midilli et al.

(2002) พบว่าทั้งสองแบบจำลองให้ผลการทำนายสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis (1999) มีความแม่นยำสูงกว่าโดยเฉลี่ยร้อยละ 2.6

ตารางที่ 3 ค่าคงที่แบบจำลองและผลวิเคราะห์ความแม่นยำในการใช้งาน

Model No.	C	Model constants				RMSE	χ^2	r
		C_1	C_2	C_3	C_4			
1	k	-0.01056	0.00034	0.00059	-0.00002	0.05261	0.00282	0.97804
2	k	0.00729	0.00003	-0.00045	0.00000	0.04353	0.00197	0.98457
	n	0.65398	0.00608	0.02146	-0.00032			
3	a	1.05768	-0.00104	-0.00429	0.00010	0.05121	0.00272	0.97874
	k	-0.00791	0.00030	0.00039	-0.00001			
4	a	0.40824	0.01067	0.13148	-0.00106	0.02790	0.00084	0.99380
	k	-0.00505	0.00015	0.00009	0.00000			
	b	0.54817	-0.01030	-0.13173	0.00106			
	g	0.00507	-0.00015	-0.00122	0.00003			
5	a	0.00378	-0.00020	-0.00023	0.00001	0.06693	0.00465	0.96503
	b	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000			
6	a	-0.20787	0.02231	0.06771	-0.00105	0.04019	0.00171	0.98690
	k	0.00540	0.00004	-0.00032	0.00000			
	c	1.20662	-0.02276	-0.06965	0.00111			
7	a	0.30065	-0.00571	-0.08384	0.00064	0.02819	0.00084	0.99352
	k	0.01662	-0.00034	-0.00227	0.00005			
	g	-0.00253	0.00014	-0.00005	0.00000			
8	k	-0.00526	0.00001	0.00098	0.00000	0.02586	0.00071	0.99482
	l	-0.55484	0.00067	0.16700	-0.00003			
	n	1.09021	-0.00019	-0.02029	0.00035			
9	a	3.94726	-0.06902	-0.23008	0.00394	0.02764	0.00081	0.99378
	k	-0.02940	0.00060	0.00201	-0.00002			
	b	1.13633	-0.00001	-0.07070	0.00023			
10	a	0.37246	0.00072	0.04667	-0.00003	0.01860	0.00039	0.99719
	k	0.00661	0.00004	-0.00040	0.00000			
	b	0.02526	-0.00107	-0.00471	0.00009			
	g	0.03146	-0.00059	-0.00188	0.00003			
	c	0.58548	0.00028	-0.04171	-0.00004			
	h	-0.03960	0.00078	0.00378	-0.00007			
11	a	1.00081	-0.00018	0.00192	0.00000	0.02119	0.00048	0.99636
	k	0.01828	0.00000	-0.00072	0.00000			
	n	0.08719	0.01009	0.07547	-0.00118			
	b	0.00272	-0.00009	0.00010	0.00000			
12	a	2.40392	0.01557	-0.13147	-0.00020	0.03353	0.00121	0.99091
	k	-0.00167	0.00003	0.00023	0.00000			
	b	-0.01949	-0.00013	0.00186	0.00001			
	c	-1.36762	-0.01506	0.12540	0.00018			



รูปที่ 3 อัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาอบแห้งที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลอง

3.2 การจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

โดยทั่วไปการวิเคราะห์หาค่า D_{eff} มักพิจารณาจากสมการที่ (3) โดยใช้เพียงพจน์แรก ($n=1$) ด้วยลดความซับซ้อนในการดำเนินการ (ผลของการตัดพจน์ที่ $n \geq 2$ ออกไปทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณร้อยละ 16) จากนั้นจึงจัดรูปอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยใน

รูปแบบลอการิทึมดังสมการที่ (11) หาคำนวนที่เทียบกับเวลา ($d(\ln MR)/dt$) แล้วจัดรูปเพื่อให้ได้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D_{eff}) ตามสมการที่ (12) ในทางปฏิบัติความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) และเวลาอบแห้ง (t) มาจากการทดลอง หากนำทั้งสองตัวแปรไปแสดงผลกราฟในรูป $\ln MR$ เทียบกับ t จะได้ว่า $d(\ln MR)/dt$ ก็คือความชันของกราฟนั่นเอง

$$\ln MR = \ln \left(\frac{6}{\pi^2} \right) - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{r_o^2} \quad (11)$$

$$D_{eff} = - \left(\frac{r_o^2}{\pi^2} \right) \frac{d \ln MR}{dt} \quad (12)$$

งานวิจัยทั่วไปมักกำหนดสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเป็นค่าคงที่ หมายความว่า $d(\ln MR)/dt$ เป็นค่าคงที่ อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงค่าดังกล่าวเปลี่ยนแปลงตามมวล อุณหภูมิ และเวลาอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4 งานวิจัยนี้จึงนำเสนอสมการการแพร่ความชื้นในรูปแบบใหม่ที่ไม่ใช่ค่าคงที่ ซึ่งจากการสืบค้นยังไม่พบงานวิจัยที่นำเสนอในรูปแบบนี้

จากรูปที่ 4 พบว่าลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเหมาะกับการฟิตด้วยฟังก์ชันโพลิโนเมียล ดังนั้นในที่นี้จึงเลือกฟิตข้อมูลดังกล่าวด้วยรูปแบบโพลิโนเมียลอันดับสอง ดังสมการที่ (13)

$$\ln MR_{\text{model}} = At^2 + Bt \quad (13)$$

ค่า A และ B ที่ได้จากการฟิตข้อมูลในสมการที่ (13) เป็นดังตารางที่ 4 พบว่า A และ B เป็นฟังก์ชันของมวล (กิโลกรัม) กับอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) เมื่อนำข้อมูล A และ B ในตารางที่ 4 ไปแสดงกราฟความสัมพันธ์เทียบกับมวลและอุณหภูมิพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวที่เหมาะสมต่อการฟิตได้ด้วยฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ดังนั้นพารามิเตอร์ A และ B จึงถูกจำลองในรูปความสัมพันธ์ดังสมการที่ (14)

$$A = (a_1 \exp(a_2 m) + a_3) \exp\left(-\frac{a_4}{T}\right) \quad (14a)$$

$$a_1 = -0.2285, \quad a_2 = -0.4291, \quad a_3 = -0.0024, \\ a_4 = 488.2244, \quad b_1 = -0.0244, \quad b_2 = -0.0696, \\ b_3 = 50.4989$$

$$B = (b_1 \exp(b_2 m)) \exp\left(\frac{-b_3}{T}\right) \quad (14b)$$

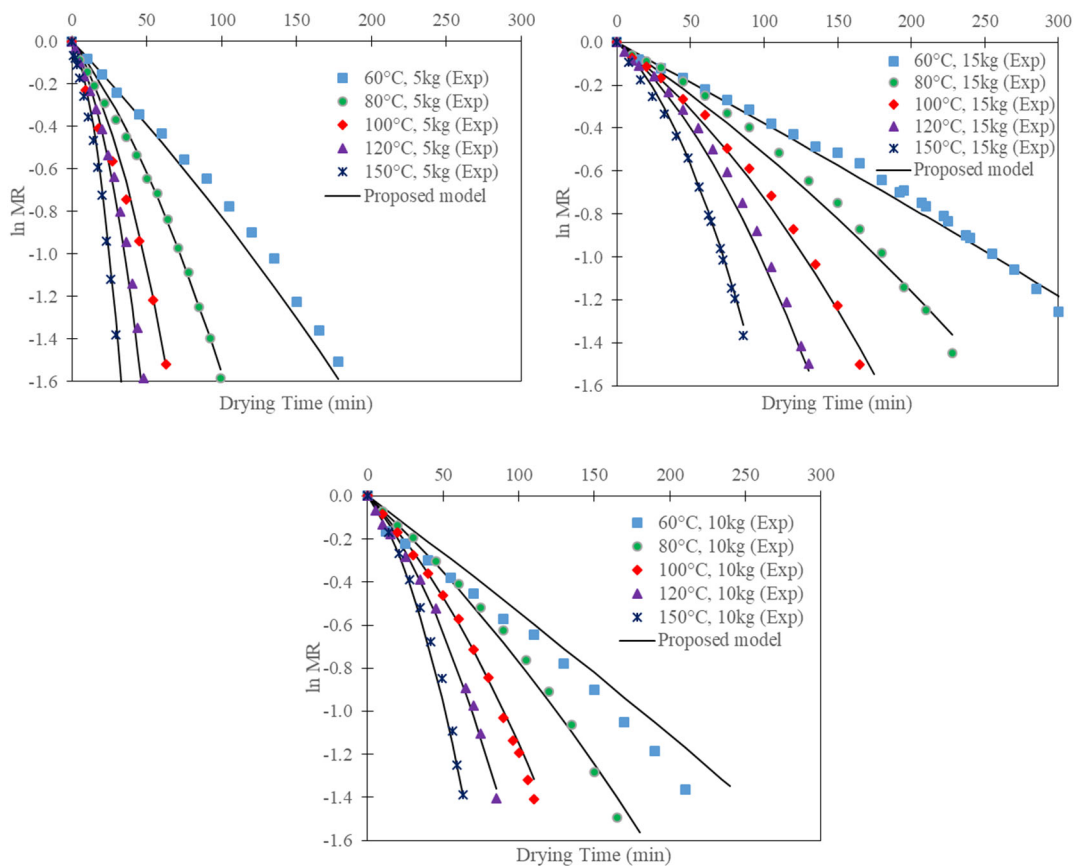
จากสมการที่ (11) จัดรูปใหม่ได้เป็นสมการที่ (15) ดังนี้

โดยค่าคงที่แบบจำลองในสมการที่ (14) เป็นดังนี้

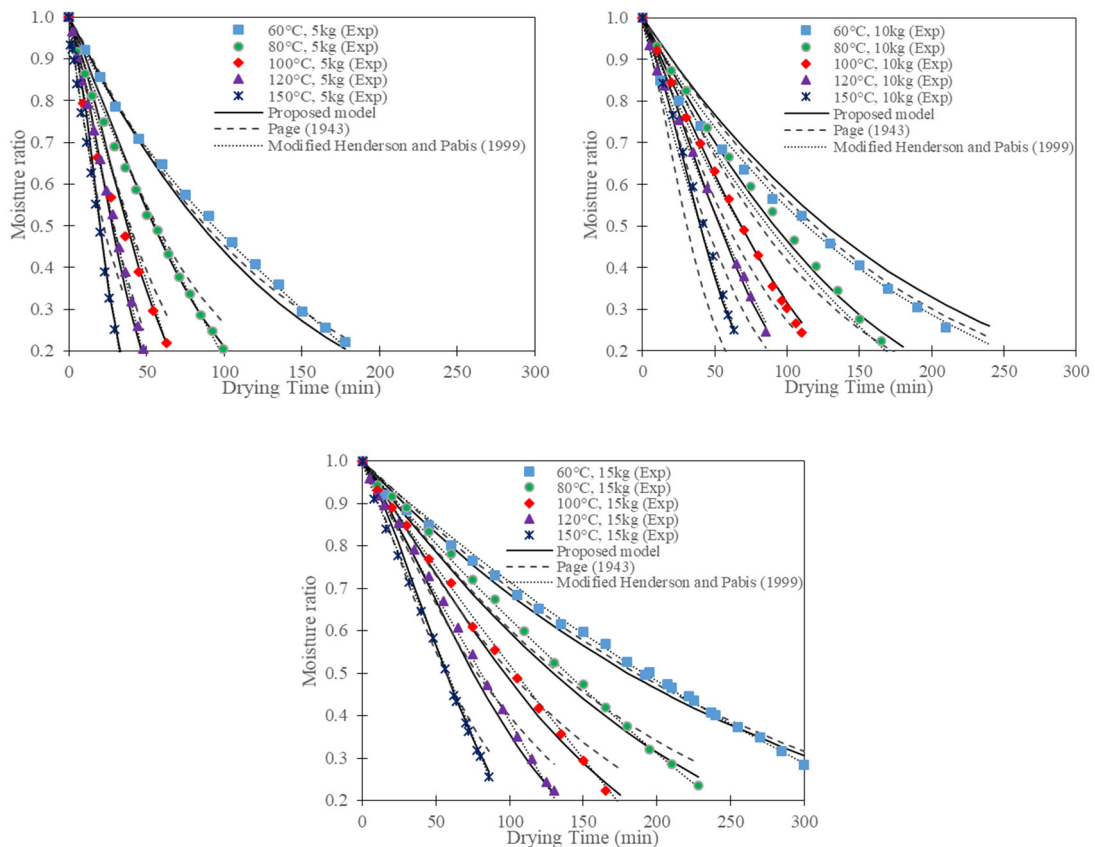
$$D_{eff} = \left(\ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \ln MR \right) \left(\frac{r_o^2}{\pi^2 t} \right) \quad (15)$$

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ A และ B ในสมการที่ (14)

$T(^{\circ}\text{C})$	$m=5\text{kg}$		$m=10\text{kg}$		$m=15\text{kg}$	
	A	B	A	B	A	B
60	-8.52×10^{-6}	-7.41×10^{-3}	-1.62×10^{-6}	-5.23×10^{-3}	-8.08×10^{-7}	-3.69×10^{-3}
80	-6.52×10^{-5}	-9.15×10^{-3}	-1.24×10^{-5}	-6.46×10^{-3}	-6.18×10^{-6}	-4.56×10^{-3}
100	-2.21×10^{-4}	-1.04×10^{-2}	-4.19×10^{-5}	-7.33×10^{-3}	-2.09×10^{-5}	-5.17×10^{-3}
120	-4.98×10^{-4}	-1.13×10^{-2}	-9.45×10^{-5}	-7.97×10^{-3}	-4.73×10^{-5}	-5.63×10^{-3}
150	-1.12×10^{-3}	-1.23×10^{-2}	-2.13×10^{-4}	-8.67×10^{-3}	-1.07×10^{-4}	-6.12×10^{-3}



รูปที่ 4 ลอการิทึมของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้ง



รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลการทำนายจากแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองอื่นและผลการทดลอง

เมื่อกำหนดค่าของ m , T , และ t ในสมการที่ (13), (14) สามารถหาค่าอัตราส่วนความชื้น ที่ $T=60$, 80, 100, 120 และ 150 องศาเซลเซียส ที่ $m=5$, 10 และ 15 กิโลกรัม ตามลำดับดังรูปที่ 5 ผลการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ (สมการที่ (13)-(14)) ใช้ค่าคงที่แบบจำลองเพียง 7 ตัว พบว่าให้ค่า RMSE และค่า χ^2 ต่ำสุดที่ 0.02935 และ 0.00089 ตามลำดับ ค่า r เท่ากับ 0.99421 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ใช้จำนวนค่าคงที่แบบจำลองใกล้เคียงกัน คือ Page (1943) (ตารางที่ 3) ซึ่งใช้ 8 ตัว พบว่าแบบจำลองที่นำเสนอ ให้ความแม่นยำมากกว่า โดยให้ค่าแม่นยำเทียบเท่าแบบจำลอง Verma et al. (1985) ที่ใช้ค่าคงที่แบบจำลองถึง 12 ตัว นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Modified Henderson

and Pabis (1999) ซึ่งถือว่ามีความแม่นยำสูงสุดในจำนวน 12 แบบจำลอง แต่มีการใช้ค่าคงที่แบบจำลองถึง 24 ตัว พบว่าแบบจำลองที่นำเสนอ (ที่ใช้เพียง 7 ตัว) ให้ค่าการทำนายผลที่เทียบเท่ากันโดยให้ผลแตกต่างกันเฉลี่ยเพียงร้อยละ 1.8

4. สรุป

งานวิจัยนี้ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีเป่าพ่นหล่นอิสระ ตามเงื่อนไขการออกแบบเพื่อให้เป่าพ่นได้อย่างเสถียรและป้องกันการเกิดขอบเขตหนึ่งของวัสดุ ผลการทดลองเครื่องอบแห้งพบว่าอุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้นและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้นลดลงส่งผลให้เวลาอบแห้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นได้ศึกษาแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางที่

นิยมใช้ 12 แบบจำลอง เพื่อทำนายผลทดลองการอบแห้ง โดยใช้อุณหภูมิลมร้อน 60-150 องศาเซลเซียส มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น 5-15 กิโลกรัม และความเร็วลมร้อน 19 เมตรต่อวินาที โดยการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตัวแปรในแต่ละกรณี เมื่อพิจารณาทั้งอิทธิพลอุณหภูมิลมร้อนและมวลข้าวเปลือกเริ่มต้น พบว่าแบบจำลอง Modified Henderson and Pabis (1999) เหมาะสมที่สุด

แบบจำลองค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้ใช้ได้ครอบคลุมทั้งปัจจัยผลกระทบอุณหภูมิลมร้อน มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น และเวลาอบแห้ง ผลการจำลองพบว่ามีความแม่นยำสูง โดยให้ค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.02935 และค่า r เท่ากับ 0.99421 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ใช้จำนวนค่าคงที่แบบจำลองใกล้เคียงกัน พบว่าให้ความแม่นยำในการทำนายผลสูงกว่าและเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่มีความแม่นยำสูงสุดในจำนวน 12 แบบจำลองที่นำมาศึกษา พบว่าแบบจำลองที่น่าเสนอให้ผลที่แตกต่างเฉลี่ยเพียงร้อยละ 1.8

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนทุนวิจัย เครื่องมือ และสถานที่ จนนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Thongma, "Paddy Drying by Spouted Bed Technique for Industrial Scale," M.S. thesis, Dept., Energy Tech., King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 1999.
- [2] P. Praneetpolkrang and K. Sathapornprasath, "Application of a Combined Jet Spouted Bed and Ultrasound Waves for Drying of Agricultural Products," *Srinakharinwirot Engineering Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 163-175, 2017.
- [3] S. Meesukchaosumran and T. Chitsomboon, "Effects of resting periods, air temperatures and air velocities on free-fall paddy dryer performances," *Suranaree Journal of Science and Technology*, vol. 25, no. 1, pp. 11-26, Jan. 2018.
- [4] S. Khaengkarn, S. Meesukchaosumran and T. Chitsomboon, "Genetic algorithm for the selection of rough rice drying model for the free-fall paddy dryer," *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 63-75, 2011.
- [5] C. J. Lim and J. R. Grace, "Spouted bed hydrodynamics in a 0.91 m diameter vessel," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 65, no. 3, pp. 366-372, 1987.
- [6] N. Epstein and J. R. Grace, *Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications*, 1st ed. New York: Cambridge University Press, 2011.
- [7] M. J. San José, M. Olazar, R. Llamas, M. A. Izquierdo and J. Bilbao, "Study of dead zone and spout diameter in shallow spouted beds of cylindrical geometry," *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*, vol. 64, no. 3, pp. 353-359, 1996.
- [8] S. Jongjam and U. Teeboonma, "Murdannia Lorifomis Drying Using Infrared-vacuum Technique," *Journal of Science &*

- Technology, Ubon Ratchathani University*, vol. 12, no. 3, pp. 75-85, 2010.
- [9] O. A. Aregbesola, B. S. Ogunsina, A. E. Sofolahan and N. N. Chime, "Mathematical modeling of thin layer drying characteristics of dika (*Irvingia gabonensis*) nuts and kernels," *Nigerian Food Journal*, vol. 33, no. 1, pp. 83-89, Jun. 2015.
- [10] I. Alibas, "Selection of the Best Suitable Thin-Layer Drying Mathematical Model for Vacuum Dried Red Chili Pepper," *Journal of Biological and Environmental Sciences*, vol. 6, pp. 161-170, Jan. 2012.
- [11] H. M. THAO and A. NOOMHORM, "Modeling and effects of various drying methods on sweet potato starch properties," *Walailak Journal of Science and Technology*, vol. 8, pp. 139-158, 2011.
- [12] N. Kumar, B. C. Sarkar and H. K. Sharma, "Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace," *Journal of food science and technology*, vol. 49, no. 1, pp. 33-41, 2012.
- [13] J. Zhang, P. Ma, X. Zhang, B. Wang, J. Wu and X. Xing, "Isothermal drying kinetics of paddy using thermogravimetric analysis," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 134, no. 3, pp. 2359-2365, Dec. 2018.
- [14] S. Mujaffar and S. John, "Thin-layer drying behavior of West Indian lemongrass (*Cymbopogon citratus*) leaves," *Food Science & Nutrition*, Report no. 4, p. 1085, 2018.
- [15] C. L. Hii, C. L. Law and M. Cloke, "Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa," *Journal of Food Engineering*, vol. 90, no. 2, pp. 191-198, Jan. 2009.
- [16] M. Özdemir and Y. Onur Devres, "The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting," *Journal of Food Engineering*, vol. 42, no. 4, pp. 225-233, Jan. 1999.
- [17] G. K. Jayatunga and B. M. W. P. K. Amarasinghe, "Drying kinetics, quality and moisture diffusivity of spouted bed dried Sri Lankan black pepper," *Journal of Food Engineering*, vol. 263, pp. 38-45, 2019.
- [18] O. Hacıhafizoğlu, A. Cihan, K. Kahveci and A. G. B. de Lima, "A liquid diffusion model for thin-layer drying of rough rice," *European Food Research and Technology*, vol. 226, no. 4, pp. 787-793, 2008.
- [19] L. N. Kahyaoglu, S. Sahin and G. Sumnu, "Spouted bed and microwave-assisted spouted bed drying of parboiled wheat," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 90, no. 2, pp. 301-308, 2012.
- [20] M. Khanali, A. Banisharif and S. Rafiee, "Modeling of moisture diffusivity, activation energy and energy consumption in fluidized bed drying of rough rice," *Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 11, pp. 2541-2549, 2016.
- [21] D. I. Onwude, N. Hashim, R. B. Janius, N. M. Nawi and K. Abdan, "Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review," *Comprehensive Reviews in Food*

Science and Food Safety, vol. 15, no. 3, pp. 599-618, 2016.

- [22] Z. Erbay and F. Icier, "A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and

Experimental Results," *Critical reviews in food science and nutrition*, vol. 50, pp. 441-464, 2010.

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

กรรมวิธีการปรับกรดของผักและสลัดด้วยเครื่องปรับสภาพความเป็นกรดภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ

จอมขวัญ สุวรรณรักษ์¹ พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์² เจตนิพัทธ์ บุญยสวัสดิ์¹ ศันสนีย์ ทิมทอง¹
อินท์ธิมา หิรัญอุครวงศ์¹ และ พุดกรอง พันธุ์โหมงค์^{3*}

¹ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

³ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

¹ 168 คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ ถนนศรีอยุธยา เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

² 1 ซอย ฉลองกรุง 1 แขวง ลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

³ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

รับบทความ 9 มกราคม 2563 แก้ไขบทความ 29 กันยายน 2563 ตอรับบทความ 21 ตุลาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากรรมวิธีการปรับกรดของผักและสลัดด้วยเครื่องปรับสภาพความเป็นกรดภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ 4 กรรมวิธี ได้แก่ การปรับกรดในสภาวะความดันบรรยากาศปกติ (กรรมวิธีที่ 1) การปรับกรดในสภาวะสุญญากาศเป็นเวลา 10 (กรรมวิธีที่ 2) และ 20 นาที (กรรมวิธีที่ 3) และการปรับกรดในสภาวะสุญญากาศสลับกับสภาวะบรรยากาศปกติ 1 ชั่วโมง (กรรมวิธีที่ 4) โดยใช้เครื่องปรับสภาพความเป็นกรดที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนควบคุมอุณหภูมิในถังดองและถังที่เป็นตัวกลางนำความร้อน และส่วนควบคุมความดันภายในถังดองให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศ ทำการควบคุมอุณหภูมิและความดันในระหว่างกระบวนการปรับกรดให้คงที่ที่ 40 องศาเซลเซียส และ 0.5 Bar ตามลำดับ โดยใช้โปรแกรม PLC (Programmable Logic Controller) เขียนแลตเตอร์ควบคุมกระบวนการทั้งหมดและแสดงผลในระบบสกาตา (SCADA) ผลการศึกษาพบว่า การปรับกรดในสภาวะปกติที่ความดันบรรยากาศใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลนานกว่าการปรับกรดในสภาวะสุญญากาศทุกกรรมวิธี โดยกรรมวิธีการปรับกรดในสภาวะสุญญากาศ 1 ชั่วโมง สลับกับสภาวะบรรยากาศปกติ 1 ชั่วโมง เป็นวิธีที่ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลสั้นที่สุด คือ 7 ชั่วโมง ภายหลังการปรับกรดทำการบรรจุผักและสลัดลงในขวดแก้วพร้อมน้ำดอง ปิดฝาและนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที พบว่า จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด *Escherichia Coli* และยีสต์รา มีจำนวนไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานของกระทรวงสาธารณสุข และตรวจไม่พบ *Staphylococcus aureus* ภายหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง

คำสำคัญ : เครื่องปรับสภาพความเป็นกรด; สภาวะสุญญากาศ; ผักและสลัด; การดอง

* ผู้นิพนธ์ประสานงานโทร: +668 9430 5499, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: putkrong.p@mail.rmutk.ac.th

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

Acidification Processes of Carving Vegetable Using Acid Conditioning Machine Under Temperature and Pressure Control

Jomkhwun Suwannarak¹ Pimpen Pornchalermp Phong² Jetniphat Bunyasawat¹
Sunsanee Thimthong¹ Intheema Hiranaugkarawong¹ and
Putkrong Phanumong^{3*}

¹ Faculty of Home Economics Technology, Rajjamangala University of Technology Phra Nakorn

² Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

³ Faculty of Science and Technology, Rajjamangala University of Technology Krungthep

¹ 168 Sri Ayutthaya Road, Dusit District, Bangkok 10300

² 1 Soi Chalong Krung 1, Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520

³ 2 Nanglinchi Road, Tungmahamek, Sathorn, Bangkok 10120

Received 9 January 2020; Revised 28 September 2020; Accepted 21 October 2020

Abstract

This research aimed to study the acidification processes of carving vegetable using acid conditioning machine under temperature and pressure control which was developed in this study. Four acidification procedures were done at normal atmospheric pressure (method 1), under vacuum pressure for 10 (method 2) and 20 min (method 3) and vacuum pressure alternating with normal atmospheric pressure for each of 1 hour. There were two main parts of acid conditioning machine including the temperature controller inside the pickle tank and heat conductor tank, and the pressure controller inside the pickle tank. The pickling temperature was stabled at 40°C under the pressure of 0.5 Bar. PLC (Programmable Logic Controller) program was used to write the ladder for controlling all processes and display through SCADA system. The results showed that the acidification method by soaking the carved-rose carrot under vacuum pressure alternating with normal atmospheric pressure showed the shortest time to equilibrium by 7 hours. Then, the carved-rose carrot was packed in the glass jar followed by sterilized in boiling water for 15 minutes and stored at room temperature for 7 days. Total bacteria count, *Escherichia coli* and Yeast-mold were not exceeded than the standard limit. *Staphylococcus aureus* was not detected throughout the storage periods.

Keywords: Acid Conditioning Machine; Vacuum; Vegetable Carving; Pickling

* Corresponding Author. Tel.: +668 9430 5499, E-mail Address: putkrong.p@mail.rmutk.ac.th

1. บทนำ

ผักและผลไม้แกะสลักเป็นงานศิลปะด้านอาหารของไทยที่มีค่าและสืบทอดมาอย่างยาวนานจนถึงปัจจุบัน และได้กลายเป็นเอกลักษณ์ของอาหารไทยอย่างหนึ่ง ในภาคอุตสาหกรรมบริการอาหารนิยมนำมาตกแต่งบนจานอาหารหรือสถานที่ให้บริการ เนื่องจากผักและผลไม้แกะสลักเป็นเนื้อเยื่อพืชที่มีชีวิตยังมีการหายใจและการผลิตเอทิลีนอยู่ตลอดเวลา สารอาหารสะสมต่างๆ ถูกนำมาใช้ในระหว่างกระบวนการหายใจทำให้มีอายุการเก็บรักษาสั้น [1] การนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์จึงทำได้ยาก เพราะเป็นงานฝีมือเฉพาะบุคคล ทำให้การนำไปใช้ประโยชน์ยังอยู่ในวงจำกัด อย่างไรก็ตาม นวัตกรรมผลิตภัณฑ์ผักแกะสลักเป็นตลาดเฉพาะซึ่งยังมีช่องว่างทางการตลาดอีกมากสำหรับผู้ประกอบการที่ต้องการสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ออกมาจำหน่าย เพราะผู้บริโภคมีความต้องการสินค้าที่หลากหลายมากขึ้น

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษากระบวนการผลิตผักแกะสลักบรรจุในภาชนะปิดสนิท โดยกระบวนการผลิตแบบการปรับกรดในอาหาร เพื่อช่วยลดระดับความรุนแรงของการใช้ความร้อนในการฆ่าเชื้อจากระดับสถานะปลอดเชื้อแบบเชิงการค้า (Commercial Sterilization) ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เหลือแค่ระดับการพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurization) ซึ่งใช้ความร้อนอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ส่งผลดีต่อคุณภาพอาหารภายหลังการฆ่าเชื้อให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคและปลอดภัยจากจุลินทรีย์ก่อโรค สามารถเก็บรักษาไว้ได้นานที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องเก็บไว้ในตู้เย็น เพราะการฆ่าเชื้อระดับสถานะปลอดเชื้อแบบเชิงการค้าจะใช้อุณหภูมิสูงทำให้มีผลต่อคุณภาพอาหาร เช่น สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส โดยเฉพาะอาหารบางอย่างซึ่งไวต่อความร้อน เช่น ผลไม้ ทำให้ไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค โดยระยะเวลาในการทำให้ถึงจุดพีเอชสมดุล (Equilibrium pH) ของแครอทและฟักทองแกะสลักลาย

ดอกกุหลาบต้องใช้เวลา 7 วัน ทำให้จำเป็นต้องเก็บรักษาในอุณหภูมิแช่เย็นเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรียคลอสทริเดียมโบ툴ินัม (*Clostridium botulinum*) หรือแบคทีเรียก่อโรคอื่นๆ [2]

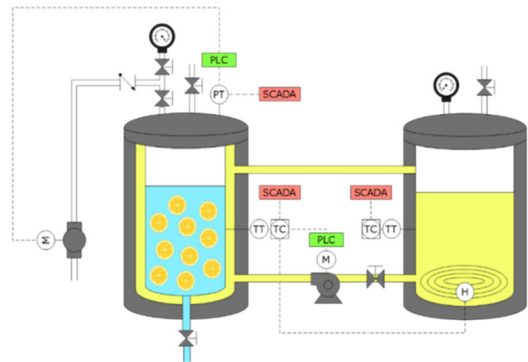
การดองเป็นกรรมวิธีหนึ่งในการถนอมอาหารให้มีความปลอดภัยมากขึ้นและช่วยปรับปรุงด้านรสชาติของอาหาร โดยอาศัยหลักการออสโมซิส (Osmosis) ทำให้ผักและผลไม้ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง เช่น สารละลายน้ำตาล สารละลายเกลือ หรือสารละลายผสมของเกลือและน้ำตาล เป็นต้น ในระหว่างการออสโมซิสจะมีการถ่ายโอนมวลสารระหว่างเซลล์ของผักและผลไม้และสารละลายออสโมติกในลักษณะสวนทางกันผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ที่ทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน โดยน้ำภายในเซลล์ของผักและผลไม้จะแพร่ออกจากเซลล์สู่สารละลายออสโมติก และตัวถูกละลายของสารละลายออสโมติก เช่น น้ำตาล หรือเกลือ จะแพร่เข้าสู่เซลล์ของผักและผลไม้ นอกจากนี้กรดอินทรีย์และเกลือแร่ต่างๆ ที่อยู่ในเซลล์ผักและผลไม้จะแพร่ออกจากเซลล์สู่สารละลายออสโมติกเช่นกัน การถ่ายเทมวลสารดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของสารละลายภายในเซลล์และนอกเซลล์ [3] อย่างไรก็ตาม วิธีการดองมาตรฐานนั้นจะต้องใช้ระยะเวลาเพื่อทำให้เกิดภาวะสมดุลระหว่างเนื้อผักหรือผลไม้และน้ำดอง ทำให้ไม่สามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ วิธีการเตรียมตัวอย่างด้วยระบบสุญญากาศเป็นการดึงอากาศออกจากผลิตภัณฑ์ภายใต้แรงดันสุญญากาศ จากนั้นน้ำดองที่เข้าสู่ระบบจะแทรกซึมเข้าไปแทนที่อากาศที่ถูกดูดออกจากผลิตภัณฑ์ อากาศที่ถูกดึงออกทำให้การดองเป็นไปได้รวดเร็วกว่าวิธีการดองแบบปกติ การเตรียมตัวอย่างสำหรับดองหรือเชื่อมด้วยวิธีการสุญญากาศโดยใช้เครื่องทั่วไบนั้นจะควบคุมอุณหภูมิได้ยาก และไม่สามารถที่จะควบคุมคุณภาพขณะที่ทำการดองได้ ดังนั้นการพัฒนาเครื่องต้นแบบกระบวนการดองระบบสุญญากาศจึงเป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อลดระยะเวลา

ในการดองหรือแช่หมัก และควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามความต้องการได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษากรรมวิธีการปรับกรดของผักและสลักที่เหมาะสม โดยใช้เครื่องปรับสภาพความเป็นกรดภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันบรรยากาศที่พัฒนาขึ้น รวมทั้งศึกษาคุณภาพทางจุลินทรีย์ของผักและสลักที่บรรจุในภาชนะปิดสนิท

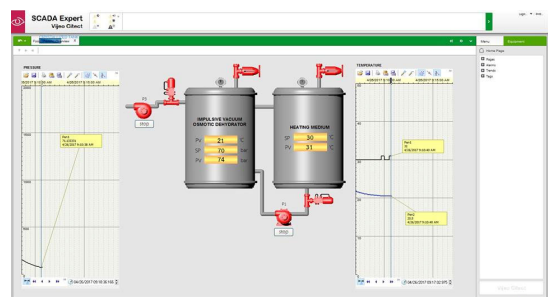
2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 เครื่องปรับสภาพกรดผักและสลักภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ

เครื่องปรับสภาพกรดผักและสลักภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันบรรยากาศที่ได้จากการพัฒนานี้ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนควบคุมอุณหภูมิ และส่วนควบคุมความดัน การควบคุมอุณหภูมิ (รูปที่ 1) ของกระบวนการจะทำให้อุณหภูมิของถังดองและถังที่เป็นตัวกลางนำความร้อนให้มีค่าคงที่ตลอดการทำงานซึ่งจะเป็นระบบปิด (Closed Loop Control) โดยจะใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Temperature Transmitter ; TT) หรืออาร์ทีดีชนิด PT100 (Platinum ความต้านทาน 100 โอห์ม ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส) ทำการวัดอุณหภูมิภายในถังดองและถังที่เป็นตัวกลางนำความร้อน และเป็นส่วนช่วยในการทำ Auto Tuning ค่า Proportional-Integral-Derivative (PID) ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ ซึ่งตัวควบคุมจะส่งสัญญาณไปยังเฟสแองเกิล (Phase Angle) เพื่อเพิ่มลดสัญญาณทางไฟฟ้าในรูปแบบคลื่นรูปซายน์ในการควบคุมการทำงานของขดลวดความร้อน นำค่า PID มาประมวลผลและแสดงกราฟในโปรแกรมสกาตา (SCADA) (รูปที่ 2) และใช้ Modbus RTU มาช่วยในการสื่อสารระหว่าง Temperature Controller กับโปรแกรม PLC เพื่อนำค่า PID มาประมวลผล



รูปที่ 1 ระบบควบคุมอุณหภูมิและความดันของกระบวนการดองในสภาวะสุญญากาศ



รูปที่ 2 ส่วนแสดงผลของกระบวนการดองในโปรแกรม SCADA

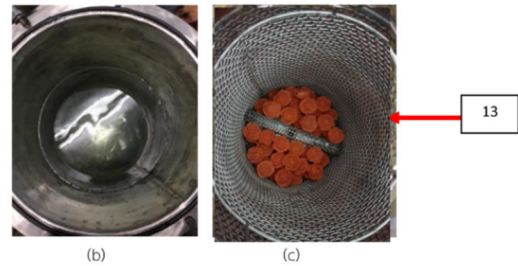
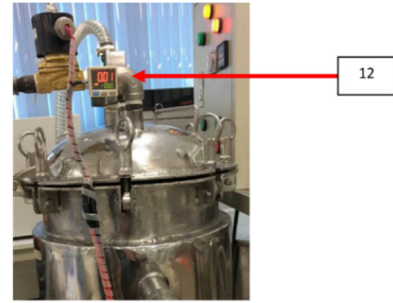
สำหรับการควบคุมความดันภายในถังดองให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศซึ่งเป็นระบบควบคุมวงปิด (Closed Loop Control) ทำเช่นเดียวกับขั้นตอนของการควบคุมอุณหภูมิ โดยจะใช้อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure Transmitter; PT) ที่ติดตั้งบนถังดองเป็นอุปกรณ์วัดความดันภายในถังเพื่อทำการควบคุมแบบป้อนกลับให้กระบวนการ

อุปกรณ์และส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องปรับสภาพกรดสำหรับผักและสลักภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันบรรยากาศแสดงในรูปที่ 3 และ 4 หน้าที่ของอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำงานของเครื่องดองสุญญากาศแสดงในตารางที่ 1 โดยการใช้เครื่องปรับสภาพกรดสำหรับผักและสลักทำดังนี้ บรรจุตัวอย่างในตะแกรงใส่ตัวอย่างแล้ววางตะแกรงลงในถังสุญญากาศ

(4) เติมน้ำดองใส่ลงในถังพักของเหลว (2) และปิดฝาถังให้สนิท เติมน้ำสะอาดลงในถังพักน้ำสำหรับดูดเลี้ยงปั๊ม (11) ให้ได้ระดับครึ่งถัง ปรับตั้งเวลาและความดันให้มีค่าเท่ากับ 0.5 bar เปิดระบบสุญญากาศรอจนกระทั่งเครื่องดูดน้ำดองที่อยู่ในถังพักของเหลวไปยังถังสุญญากาศจนหมด เมื่อครบเวลาต้องตามที่ต้องการเปิดวาล์วเหนือสายยางสำหรับถ่ายของเหลวออก (7) ให้อากาศภายนอกถ่ายเทเข้าสู่ถังสุญญากาศ เพื่อให้ความดันภายในถังเป็นความดันที่บรรยากาศแล้วจึงเปิดฝาดังสุญญากาศเพื่อนำตัวอย่างออก



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของเครื่องดองสุญญากาศ ได้แก่ กล้องควบคุมอุปกรณ์ (1) ถังพักของเหลว (2) สายยางสำหรับลำเลียงของเหลว (3) สายยางดูดอากาศ (4) ถังสุญญากาศ (5) ถังสองชั้นสำหรับเติมน้ำควบคุมอุณหภูมิ (6) สายยางสำหรับถ่ายของเหลวออก (7) สายยางถ่ายเทน้ำที่หล่อเลี้ยงปั๊ม (8) ปั๊ม liquid ring (9) สายยางสำหรับดูดน้ำที่หล่อเลี้ยงปั๊ม (10) ถังพักน้ำสำหรับดูดเลี้ยงปั๊ม (11)



รูปที่ 4 ส่วนประกอบของเครื่องดองสุญญากาศแสดงมุมมองด้านข้าง (a) และมุมมองของถังพักน้ำเชื่อม และมุมมองด้านบนของถังสุญญากาศ แสดงส่วนประกอบ ได้แก่ ตัวปรับความดันสุญญากาศ (12) และตะแกรงใส่ตัวอย่าง (13)

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบ อุปกรณ์ และหน้าที่ในการทำงานของเครื่องดองสุญญากาศ

No.	อุปกรณ์	หน้าที่
1	กล้องควบคุมอุปกรณ์	ป้อนหรือกำหนดข้อมูลอุณหภูมิ และเวลา
2	ถังพักของเหลว	พักน้ำดองก่อนเข้าสู่ระบบ
3	สายยางสำหรับลำเลียงของเหลว	ลำเลียงของเหลวจากถังพักไปยังถังสุญญากาศ
4	สายยางดูดอากาศ	ดูดอากาศออกจากถังหมายเลข 5
5	ถังสุญญากาศ	ใส่ตัวอย่างก่อนทำสุญญากาศและการดอง
6	ถังสองชั้นสำหรับเติมน้ำควบคุมอุณหภูมิ	ควบคุมอุณหภูมิของระบบดอง
7	สายยางสำหรับถ่ายของเหลวออก	ถ่ายเทของเหลวทิ้ง

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบ อุปกรณ์ และหน้าที่ในการทำงานของเครื่องดองสุญญากาศ (ต่อ)

No.	อุปกรณ์	หน้าที่
8	สายยางถ่ายเทน้ำที่หล่อเลี้ยงปั๊ม	ถ่ายเทน้ำที่เลี้ยงปั๊มกลับสู่ถังพัก
9	ปั๊ม liquid ring	ดูดอากาศในถังให้กลายเป็นสภาวะสุญญากาศ
10	สายยางสำหรับดูดน้ำที่หล่อเลี้ยงปั๊ม	ลำเลียงน้ำจากถังพักไปเลี้ยงปั๊ม
11	ถังพักน้ำสำหรับดูดเลี้ยงปั๊ม	กักเก็บน้ำสำหรับปั๊ม
12	ตัวปรับความดันสุญญากาศ	ปรับความดันสุญญากาศมีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1 bar
13	ตะแกรงใส่ตัวอย่าง	ใส่ตัวอย่างและนำตัวอย่างออกภายหลังการดอง

2.2 การเตรียมผักกะสลักและน้ำดอง

ผักที่ใช้ในการทดลองคือ แครอท ในระยะเก็บเกี่ยวทางการค้า ชื้อมาจากตลาดสุวรรณภูมิ เขตตลาดกระบี่ กรุงเทพฯ นำมาชั่งน้ำหนัก ล้างด้วยน้ำประปา และปอกเปลือก นำแครอทที่ปอกเปลือกแล้วมาหั่นเป็นท่อน ท่อนละ 2 เซนติเมตร จากนั้นนำมาหั่นเป็นรูปลูกบาศก์ให้มีน้ำหนักเท่ากับ 14 กรัม เกลาขึ้นแครอทให้เป็นรูปทรงครึ่งวงกลม ใช้มีดแกะสลักสแตนเลสแกะให้เป็นหลอดลายดอกกุหลาบ แครอทแกะสลักดอกกุหลาบที่เตรียมได้จะมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 10.88-11.83 กรัม

ส่วนประกอบของน้ำดองประกอบด้วย น้ำส้มสายชูความเข้มข้นร้อยละ 5 (คิวพี, ประเทศไทย) ร้อยละ 4.46 (w/w), น้ำร้อยละ 66.85 (w/w), เกลือ (บริษัท อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด, ประเทศไทย) ร้อยละ 0.85 (w/w) และน้ำตาลทราย (มิตรผล, ประเทศไทย) ร้อยละ 27.86 (w/w) ผสมส่วนประกอบทั้งหมดให้เข้ากันจะได้ น้ำดองที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2.72 ± 0.05

2.3 การศึกษากรรมวิธีการปรับกรดผักกะสลัก

การทดลองทำโดยนำแครอทแกะสลักดอกกุหลาบแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 0.5 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนแครอทต่อสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการปรับกรดด้วยน้ำดองโดยใช้อัตราส่วนของแครอทต่อน้ำดองคือ 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนัก การทดลองการศึกษากระบวนการปรับกรดของผักกะสลักจะวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) มีทั้งหมด 4 กรรมวิธี แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ในการปรับกรดแครอทแกะสลัก

กรรมวิธี	สภาวะในการปรับกรด	อุณหภูมิ
1	บรรยากาศปกติ จนเข้าสู่สมดุล	-*
2	สภาวะสุญญากาศที่ความดัน 0.5 bar เป็นเวลา 10 นาที ตามด้วยบรรยากาศปกติจนเข้าสู่สมดุล	40°C
3	สภาวะสุญญากาศที่ความดัน 0.5 bar เป็นเวลา 20 นาที ตามด้วยบรรยากาศปกติจนเข้าสู่สมดุล	40°C
4	สภาวะสุญญากาศที่ความดัน 0.5 bar เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สลับกับความดันบรรยากาศปกติ 1 ชั่วโมง จนเข้าสู่สมดุล	40°C

* ไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิในการปรับกรด

สำหรับกรรมวิธีที่ 2 และ 3 การทำสุญญากาศจะทำเฉพาะเนื้อแครอทแกะสลักเท่านั้น ก่อนปล่อยน้ำดองเข้าถังดองและทิ้งไว้ในสภาพบรรยากาศปกติ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล ในขณะที่กรรมวิธีที่ 1 และ 4 จะเป็นกระบวนการปรับกรดโดยแช่เนื้อแครอทแกะสลักในน้ำดองและทิ้งไว้ในสภาวะดังกล่าวจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล โดยสภาวะสมดุลจะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในระหว่างการดองเป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยวิเคราะห์ทุก ๆ 1 ชั่วโมง

ทำการวัดค่าพีเอชโดยใช้เครื่องวัดพีเอช (Lab 855, SI Analytics, Germany) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยใช้เครื่อง Refractometer (HI 96800, HANNA, Romania) ของแครอทแกะสลักและน้ำดองทุกๆ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งเข้าสู่สมดุล ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ๆ ละ 3 ซ้ำ สำหรับการวัดค่าพีเอชและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแครอทแกะสลักทำโดยปั่นเนื้อแครอทด้วยเครื่องปั่นผสมอาหาร และใช้ผ้าขาวบางกรองแยกเอาส่วนน้ำมาวิเคราะห์

2.4 การศึกษาคุณภาพทางจุลินทรีย์ของผักแกะสลักที่บรรจุในภาชนะปิดสนิท

แครอทแกะสลักดอกกุหลาบที่ปรับกรดโดยใช้เครื่องปรับสภาพกรดภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ทำการบรรจุร้อน (Hot Fill) ทำโดยบรรจุแครอทแกะสลักดอกกุหลาบลงในขวดแก้วที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อแล้วขนาด 200 มิลลิลิตร จำนวน 3 ขวดต่อขวด เติมน้ำดองที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสให้ท่วมชิ้นตัวอย่าง และเหลือ Headspace บริเวณคอขวดร้อยละ 10 ของปริมาตรทั้งหมด ปิดด้วยฝาโลหะก่อนนำขวดไปฆ่าเชื้อในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เก็บรักษาแครอทแกะสลักที่บรรจุในภาชนะบรรจุปิดสนิทเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) และภายหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 7 วัน นำตัวอย่างวิเคราะห์จำนวนจุลินทรีย์ได้แก่ จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด [4], *Staphylococcus aureus* [5], *Escherichia coli* [6] และยีสต์รา [7]

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การศึกษากรรมวิธีการปรับกรดผักแกะสลัก

การศึกษากกรรมวิธีในการปรับกรดโดยใช้เครื่องปรับสภาพกรดของผักแกะสลักภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันบรรยากาศเปรียบเทียบกับการ

ปรับกรดในสภาวะความดันปกติแสดงในตารางที่ 3-6 ผลการทดลองพบว่า การใช้เครื่องปรับกรดในสภาวะสุญญากาศและควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส (กรรมวิธีที่ 2-4) สามารถทำให้พีเอชลดลงเร็วกว่าในสภาวะความดันปกติ (กรรมวิธีที่ 1) ซึ่งสังเกตได้จากร้อยละการลดลงของค่าพีเอชในเนื้อแครอทแกะสลัก (ตารางที่ 5) โดยกรรมวิธีที่ 2 และ 4 อัตราเร็วของการลดลงของค่าพีเอชจะแตกต่างจากกรรมวิธีที่ 1 ในช่วงโม่งที่ 3 และ 2 ตามลำดับ โดยมีร้อยละการลดลงเท่ากับ 17.44 และ 17.60 ในขณะที่กรรมวิธีที่ 1 มีร้อยละการลดลงของค่าพีเอชในช่วงโม่งดังกล่าวอยู่ระหว่าง 14.08-15.68 ซึ่งสอดคล้องกับการดองมะม่วงภายใต้ความดันสูง (500 กิโลปาสคาล) สามารถทำให้เกิดลือมีอัตราการแพร่เข้าสู่มะม่วงได้มากกว่าที่ไม่ใช้ความดัน [8] การปรับกรดโดยดองแครอทและน้ำดองในสภาวะสุญญากาศพร้อมๆ กัน (กรรมวิธีที่ 4) พบว่าค่าพีเอช (pH) มีแนวโน้มลดลงได้เร็วกว่าวิธีการปรับกรดวิธีอื่นๆ พีเอชเริ่มต้นของแครอทแกะสลักคือ 6.25 ± 0.00 และภายหลังการดองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ค่าพีเอชของเนื้อแครอทที่วัดได้เท่ากับ 5.21 ± 0.01 คิดเป็นร้อยละการลดลงเท่ากับ 16.64 ซึ่งต่ำกว่ากรรมวิธีอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งมีค่าพีเอชลดลงในช่วงร้อยละ 12.32 – 13.12 และพีเอชเริ่มเข้าสู่สมดุลในช่วงโม่งที่ 7 (พีเอช 4.64 ± 0.01) ซึ่งสังเกตได้จากค่าพีเอชของแครอทแกะสลักมีค่าคงที่และมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ภายหลังการดอง 8-9 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีอื่นๆ ซึ่งจะใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 10 ชั่วโมง (กรรมวิธีที่ 2 และ 3) และสำหรับการดองที่สภาวะความดันปกติ (กรรมวิธีที่ 1) จะใช้เวลานานถึง 11 ชั่วโมง (ตารางที่ 3 และ 5) ที่จะทำให้เกิดสภาวะสมดุลของการดองคือมีร้อยละการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชคงที่ในช่วงร้อยละ 27-28 หลังจาก 12 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับกรายงานผลการปรับกรดของผักแกะสลัก 5 ชนิด ได้แก่

แครอท หัวไชเท้า ฟักทอง มะละกอดิบ และแตงล้น แกะสลักเป็นลายดอกกุหลาบและใบไม้ ที่ต้องในน้ำดอง ปรับกรดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (พีเอช 3.27) ใน กล่องพลาสติกใสที่มีฝาปิดสนิท พบว่า ต้องใช้ระยะเวลา 5-7 วัน จึงจะเริ่มเข้าสู่สมดุล ในขณะที่การ ดองในน้ำดองปรับกรดที่อุณหภูมิห้อง พบว่า มะละกอ

ดิบและแตงล้นเกิดการเน่าเสียในวันที่ 4 ของการเก็บ รักษาโดยมีฝ้าขาวปรากฏขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของน้ำดอง [2] การดองในสภาวะสุญญากาศยังใช้ได้ผลดีกับการดอง ไข่เป็ดอีกด้วย โดยสามารถลดระยะเวลาในการดอง เหลือเพียง 9 สัปดาห์ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดองใน บรรยากาศปกติที่ใช้เวลาถึง 20 สัปดาห์ [9]

ตารางที่ 3 ค่าพีเอชของแครอทแกะสลักดอกกุหลาบและน้ำดองภายหลังการปรับกรดที่เวลาต่างๆ

เวลา (ชม.)	กรรมวิธีที่ 1		กรรมวิธีที่ 2		กรรมวิธีที่ 3		กรรมวิธีที่ 4	
	แครอท	น้ำดอง	แครอท	น้ำดอง	แครอท	น้ำดอง	แครอท	น้ำดอง
0	6.25 ± 0.00 ^a	2.72 ± 0.00 ⁱ	6.25 ± 0.00 ^a	2.72 ± 0.00 ⁱ	6.25 ± 0.00 ^a	2.72 ± 0.00 ^f	6.25 ± 0.00 ^a	2.72 ± 0.00 ⁿ
1	5.46 ± 0.01 ^b	3.18 ± 0.01 ^h	5.43 ± 0.01 ^b	3.19 ± 0.01 ^h	5.48 ± 0.01 ^b	3.15 ± 0.01 ^e	5.21 ± 0.01 ^b	3.19 ± 0.01 ^m
2	5.37 ± 0.01 ^c	3.27 ± 0.01 ^g	5.39 ± 0.01 ^c	3.34 ± 0.01 ^g	5.15 ± 0.01 ^c	3.21 ± 0.01 ^d	5.18 ± 0.01 ^c	3.25 ± 0.00 ^l
3	5.27 ± 0.00 ^d	3.32 ± 0.01 ^f	5.16 ± 0.00 ^d	3.42 ± 0.01 ^{de}	4.98 ± 0.01 ^d	3.24 ± 0.01 ^c	5.01 ± 0.00 ^d	3.28 ± 0.01 ^k
4	5.17 ± 0.00 ^e	3.45 ± 0.01 ^a	4.86 ± 0.01 ^e	3.38 ± 0.01 ^f	4.87 ± 0.01 ^f	3.22 ± 0.01 ^d	4.78 ± 0.02 ^e	3.41 ± 0.00 ^j
5	4.98 ± 0.01 ^f	3.37 ± 0.01 ^d	4.85 ± 0.01 ^e	3.41 ± 0.01 ^e	4.79 ± 0.01 ⁱ	3.24 ± 0.01 ^{bc}	4.79 ± 0.01 ^e	3.44 ± 0.01 ^f
6	4.95 ± 0.00 ^g	3.35 ± 0.01 ^e	4.68 ± 0.00 ^g	3.43 ± 0.01 ^d	4.90 ± 0.00 ^e	3.25 ± 0.01 ^{bc}	4.74 ± 0.01 ^f	3.51 ± 0.01 ^e
7	4.78 ± 0.01 ^h	3.38 ± 0.01 ^d	4.59 ± 0.00 ^h	3.47 ± 0.00 ^c	4.85 ± 0.01 ^g	3.24 ± 0.01 ^c	4.64 ± 0.01 ^g	3.66 ± 0.01 ^d
8	4.81 ± 0.01 ⁱ	3.45 ± 0.01 ^a	4.73 ± 0.01 ^f	3.50 ± 0.03 ^b	4.83 ± 0.00 ^h	3.27 ± 0.00 ^a	4.64 ± 0.01 ^g	3.71 ± 0.00 ^{bc}
9	4.79 ± 0.00 ^j	3.39 ± 0.00 ^c	4.68 ± 0.00 ^g	3.50 ± 0.02 ^b	4.79 ± 0.00 ^j	3.26 ± 0.00 ^b	4.61 ± 0.01 ^h	3.70 ± 0.01 ^c
10	4.71 ± 0.00 ^k	3.43 ± 0.01 ^b	4.58 ± 0.01 ^h	3.48 ± 0.01 ^c	4.68 ± 0.01 ^j	3.25 ± 0.00 ^{bc}	4.61 ± 0.00 ^h	3.72 ± 0.02 ^{ab}
11	4.55 ± 0.00 ^l	3.35 ± 0.00 ^e	4.48 ± 0.00 ^j	3.47 ± 0.01 ^c	4.60 ± 0.01 ^h	3.25 ± 0.01 ^{bc}	4.58 ± 0.01 ⁱ	3.73 ± 0.01 ^a
12	4.48 ± 0.01 ^m	3.33 ± 0.01 ^f	4.51 ± 0.00 ^j	3.53 ± 0.01 ^a	4.60 ± 0.00 ^h	3.24 ± 0.01 ^c	4.53 ± 0.01 ^j	3.37 ± 0.01 ^j

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3) ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันภายในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 4 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (%TSS) ของแครอทแกะสลักดอกกุหลาบและน้ำดองภายหลังการปรับกรดที่เวลาต่างๆ

เวลา (ชม.)	กรรมวิธีที่ 1		กรรมวิธีที่ 2		กรรมวิธีที่ 3		กรรมวิธีที่ 4	
	แครอท	น้ำดอง	แครอท	น้ำดอง	แครอท	น้ำดอง	แครอท	น้ำดอง
0	7.5 ± 0.00 ^j	30.1 ± 0.00 ^b	7.5 ± 0.00 ^m	30.1 ± 0.00 ^a	7.5 ± 0.00 ^l	30.1 ± 0.00 ^a	7.5 ± 0.00 ^m	30.1 ± 0.00 ^a
1	9.0 ± 0.00 ⁱ	28.8 ± 0.00 ^f	9.1 ± 0.01 ^l	29.7 ± 0.05 ^b	8.7 ± 0.00 ^k	29.0 ± 0.00 ^{def}	11.3 ± 0.05 ^l	29.1 ± 0.00 ^b
2	12.0 ± 0.09 ^h	28.6 ± 0.09 ^f	9.6 ± 0.00 ^h	28.3 ± 0.00 ^{fg}	10.7 ± 0.00 ^j	29.1 ± 0.00 ^{cde}	11.5 ± 0.00 ^k	29.1 ± 0.00 ^b
3	13.0 ± 0.00 ^g	28.7 ± 0.00 ^f	11.2 ± 0.00 ^j	29.2 ± 0.00 ^c	12.5 ± 0.00 ⁱ	28.7 ± 0.18 ^{gh}	13.5 ± 0.18 ^j	29.1 ± 0.05 ^b
4	12.5 ± 0.09 ^f	28.6 ± 0.18 ^f	12.9 ± 0.05 ⁱ	29.7 ± 0.05 ^b	13.8 ± 0.05 ^h	28.7 ± 0.14 ^h	15.6 ± 0.05 ^j	28.6 ± 0.05 ^{cd}
5	13.8 ± 0.05 ^e	29.2 ± 0.00 ^e	13.0 ± 0.05 ^h	28.4 ± 0.00 ^{fg}	14.1 ± 0.00 ^g	28.9 ± 0.05 ^{fg}	15.5 ± 0.05 ⁱ	28.7 ± 0.00 ^c
6	13.6 ± 0.00 ^e	29.8 ± 0.31 ^c	13.6 ± 0.00 ^g	29.0 ± 0.23 ^d	14.2 ± 0.00 ^g	29.4 ± 0.00 ^b	16.8 ± 0.00 ^e	28.4 ± 0.00 ^{de}
7	15.8 ± 0.31 ^d	31.1 ± 0.00 ^a	14.8 ± 0.05 ^f	28.9 ± 0.05 ^{de}	15.4 ± 0.00 ^e	29.0 ± 0.05 ^{ef}	16.6 ± 0.05 ^f	28.2 ± 0.05 ^{fg}
8	15.8 ± 0.05 ^d	30.2 ± 0.05 ^b	16.5 ± 0.09 ^e	28.7 ± 0.18 ^e	15.3 ± 0.05 ^f	29.2 ± 0.05 ^{cd}	16.4 ± 0.00 ^f	28.3 ± 0.00 ^{ef}
9	16.6 ± 0.18 ^c	29.6 ± 0.05 ^d	17.3 ± 0.00 ^b	28.5 ± 0.05 ^f	16.1 ± 0.18 ^d	29.0 ± 0.00 ^{def}	17.0 ± 0.00 ^d	28.1 ± 0.05 ^g
10	16.9 ± 0.27 ^b	29.4 ± 0.00 ^d	17.1 ± 0.00 ^c	27.9 ± 0.05 ^h	17.0 ± 0.00 ^c	29.0 ± 0.00 ^{def}	17.7 ± 0.05 ^c	28.2 ± 0.05 ^{fg}
11	17.1 ± 0.00 ^b	29.1 ± 0.05 ^e	17.5 ± 0.05 ^a	28.2 ± 0.05 ^g	17.7 ± 0.05 ^b	29.2 ± 0.23 ^{bc}	18.2 ± 0.23 ^b	28.1 ± 0.05 ^g
12	18.3 ± 0.00 ^a	29.1 ± 0.00 ^e	17.0 ± 0.00 ^d	27.6 ± 0.31 ⁱ	18.5 ± 0.25 ^a	29.1 ± 0.00 ^{cde}	18.4 ± 0.14 ^a	28.2 ± 0.32 ^{ef}

หมายเหตุ: ตัวเลขในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3) ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันภายในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของแครอทและสั้กเท่ากับร้อยละ 7.50±0.00 และผลของการปรับกรดโดยใช้เครื่องปรับสภาพกรดของผักและสั้กภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันบรรยากาศทั้งแครอทและน้ำดองพร้อมกัน (กรรมวิธีที่ 4) ส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงกว่ากรรมวิธีอื่นๆ โดยภายหลังการดอง 1 ชั่วโมง แครอทมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เท่ากับร้อยละ 11.30±0.05 ส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของแครอทจากกรรมวิธีอื่นๆ มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 8.70±0.00 ถึง 9.10±0.01 (ตารางที่ 4) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเนื้อแครอทมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการดองและเมื่อสิ้นสุดกระบวนการดองที่ 12 ชั่วโมง เนื้อแครอทมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 59.24 (ตารางที่ 6) ในขณะที่ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในตัวอย่างน้ำดองลดลงจากปริมาณเริ่มต้น (ร้อยละ 30.10) ร้อยละ 4.98 ในชั่วโมงที่ 4 (ตารางที่ 6) และมีปริมาณคงที่จนกระทั่ง 12 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการดอง ร้อยละของแข็งที่ละลายน้ำได้ของน้ำดองลดลงร้อยละ

6.31 เมื่อเทียบกับชั่วโมงเริ่มต้น (ตารางที่ 6) มีงานวิจัยที่รายงานถึงการใช้เครื่องดองผักแบบความดันอัดอากาศไฮโดรสแตติก พบว่าการใช้ความดัน 5 บาร์อัดน้ำดอง (น้ำเกลือร้อยละ 3 น้ำขาวข้าวร้อยละ 1 และข้าวสุกร้อยละ 1) เข้าไปในเนื้อผักก่อนการดองผักกุ่ม ผักเสี้ยนหน่อไม้ และแตงกวา เป็นเวลา 10 นาที และกะหล่ำปลีเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำมาหมักต่อในภาชนะบรรจุปิดสนิท พบว่า สามารถลดระยะเวลาในการดองได้ 1-2 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีการดองแบบปกติ [9] เช่นเดียวกับการดองมะม่วงโดยใช้เครื่องดองความดันไฮโดรสแตติกแบบใช้ความดันสูงและแบบสุญญากาศ พบว่า การดองภายใต้ความดันสูงสามารถทำให้เกลือมีอัตราการแพร่เข้าสู่มะม่วงได้มากกว่าที่ไม่ใช้ความดัน และการดองภายใต้ความดันที่ 500 กิโลปาสกาล มีความเหมาะสมมากที่สุด การดองที่มีความเข้มข้นของเกลือร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 6 วัน และความเข้มข้นเกลือร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 4 วัน จะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ดีที่สุด

ตารางที่ 5 ร้อยละการลดลงของค่าพีเอชของแครอทและสั้กดอกกุหลาบ และร้อยละการเพิ่มขึ้นของพีเอชของน้ำดอง ภายหลังการปรับกรดที่เวลาต่างๆ เทียบกับพีเอชเริ่มต้นของแครอทและน้ำดอง

เวลา (ชั่วโมง)	กรรมวิธีที่ 1		กรรมวิธีที่ 2		กรรมวิธีที่ 3		กรรมวิธีที่ 4	
	แครอท	น้ำดอง	แครอท	น้ำดอง	แครอท	น้ำดอง	แครอท	น้ำดอง
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	12.64	14.47	13.12	14.73	12.32	13.65	16.64	14.73
2	14.08	16.82	13.76	18.56	17.60	15.26	17.12	16.31
3	15.68	18.07	17.44	20.47	20.32	16.05	19.84	17.07
4	17.28	21.16	22.24	19.53	22.08	15.53	23.52	20.23
5	20.32	19.29	22.40	20.23	23.36	16.05	23.36	20.93
6	20.80	18.81	25.12	20.70	21.60	16.31	24.16	22.51
7	23.52	19.53	26.56	21.61	22.40	16.05	25.76	25.68
8	23.04	21.16	24.32	22.29	22.72	16.82	25.76	26.68
9	23.36	19.76	25.12	22.29	23.36	16.56	26.24	26.49
10	24.64	20.70	26.72	21.84	25.12	16.31	26.24	26.88
11	27.20	18.81	28.32	21.61	26.40	16.31	26.72	27.08
12	28.32	18.32	27.84	22.95	26.40	16.05	27.52	19.29

ตารางที่ 6 ร้อยละการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (%TSS) ของแครอทและสลัดอกกุหลาบ และร้อยละการลดลงของ %TSS ของน้ำดอกภายหลังการปรับกรดที่เวลาต่างๆ เทียบกับ %TSS เริ่มต้นของแครอทและน้ำดอก

เวลา (ชั่วโมง)	กรรมวิธีที่ 1		กรรมวิธีที่ 2		กรรมวิธีที่ 3		กรรมวิธีที่ 4	
	แครอท	น้ำดอก	แครอท	น้ำดอก	แครอท	น้ำดอก	แครอท	น้ำดอก
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	16.67	4.32	17.58	1.33	13.79	3.65	33.63	3.32
2	37.50	4.98	21.88	5.98	29.91	3.32	34.78	3.32
3	42.31	4.65	33.04	2.99	40.00	4.65	44.44	3.32
4	40.00	4.98	41.86	1.33	45.65	4.65	51.92	4.98
5	45.65	2.99	42.31	5.65	46.81	3.99	51.61	4.65
6	44.85	1.00	44.85	3.65	47.18	2.33	55.36	5.65
7	52.53	-3.32	49.32	3.99	51.30	3.65	54.82	6.31
8	52.53	-0.33	54.55	4.65	50.98	2.99	54.27	5.98
9	54.82	1.66	56.65	5.32	53.42	3.65	55.88	6.64
10	55.62	2.33	56.14	7.31	55.88	3.65	57.63	6.31
11	56.14	3.32	57.14	6.31	57.63	2.99	58.79	6.64
12	59.02	3.32	55.88	8.31	59.46	3.32	59.24	6.31

อย่างไรก็ตาม การดองแบบสุญญากาศที่ความเข้มข้นของเกลือร้อยละ 10 และ 15 โดยน้ำหนัก จะต้องใช้เวลามากกว่า 9 วัน จึงจะมีปริมาณเกลือถึงจุดสมดุลและใกล้เคียงกับมะม่วงสุรดองเค็มที่ดองด้วยวิธีปกติ [8] สอดคล้องกับอลิษาและคณะ [10] ที่รายงานว่า การนำมะม่วงมาอัดความดันที่ 500 กิโลปาสกาล เป็นเวลา 3 วัน ที่ความเข้มข้นของน้ำเกลือร้อยละ 10, 12 และ 15 โดยน้ำหนัก พบว่า ปริมาณเกลือจะแพร่เข้าสู่มะม่วงได้มากขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของเกลือเพิ่มขึ้น โดยการอัดความดันโดยใช้น้ำเกลือความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 3 วัน จะส่งผลให้มะม่วงดองมีลักษณะทางกายภาพและเคมีใกล้เคียงกับมะม่วงดองที่ดองในสภาวะปกติมากที่สุด

3.2 คุณภาพทางจุลินทรีย์ของผักแกละสลักปรับกรดที่บรรจุในภาชนะปิดสนิท

คุณภาพทางจุลินทรีย์ของแครอทและสลัดอกกุหลาบที่ปรับกรดโดยใช้เครื่องปรับสภาพกรดของผัก

แกละสลักภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ก่อนทำการบรรจุร้อนแล้วนำไปทำการฆ่าเชื้อในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา จุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์รา มีจำนวนน้อยกว่า 10 CFU/g *E. coli* มีจำนวนน้อยกว่า 3 MPN/g และตรวจไม่พบ *S. aureus* (ตารางที่ 7) ตามเกณฑ์มาตรฐานสำหรับอาหารที่บรรจุในภาชนะปิดสนิทตามประกาศของกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 355 กำหนดให้ จุลินทรีย์ทั้งหมดมีจำนวนไม่เกิน 1,000 ต่ออาหาร 1 กรัม ยีสต์รา มีจำนวนไม่เกิน 100 ต่ออาหาร 1 กรัม และต้องตรวจพบแบคทีเรียโคลิฟอร์มน้อยกว่า 3 ต่ออาหาร 1 กรัม [11] ดังนั้น จำนวนจุลินทรีย์ในแครอทแกละสลัดอกกุหลาบจึงไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 7 จำนวนจุลินทรีย์ของแครอทแกะสลักกุหลาบที่ปรับกรดโดยใช้เครื่องปรับสภาพกรดของผักแกะสลักและเก็บรักษาในขวดแก้วที่มีฝาปิดสนิทเป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง

Days	Total bacteria count (cfu/g)	<i>Staphylococcus aureus</i> (/0.1 g)	<i>E. coli</i> (MPN/g)	Yeast & Mold (cfu/g)
0	< 10	Not Detected	< 3	< 10
1	< 10	Not Detected	< 3	< 10
2	< 10	Not Detected	< 3	< 10
3	< 10	Not Detected	< 3	< 10
4	< 10	Not Detected	< 3	< 10
5	< 10	Not Detected	< 3	< 10
6	< 10	Not Detected	< 3	< 10
7	< 10	Not Detected	< 3	< 10

4. สรุป

เครื่องปรับสภาพความเป็นกรดภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันบรรยากาศที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถลดระยะเวลาในการดองแครอทแกะสลักดอกกุหลาบได้ โดยกรรมวิธีที่เหมาะสมคือ การปรับกรดของการดองแครอทและน้ำดองในสภาวะสุญญากาศ (0.5 bar) พร้อมๆ กัน และควบคุมอุณหภูมิในการดองที่ 40°C ใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุล 7 ชั่วโมง และสามารถลดระยะเวลาในการดองเมื่อเปรียบเทียบกับกรดองแบบปกติได้ 5-7 วัน แครอทแกะสลักที่ปรับกรดแล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องในขวดแก้วปิดสนิทโดยกรรมวิธีบรรจรร้อนเป็นเวลา 7 วัน ไม่มีการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรคและจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุให้อาหารเน่าเสียตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษา เครื่องปรับสภาพความเป็นกรดภายใต้การควบคุมอุณหภูมิและความดันบรรยากาศที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปขยายผลเพื่อใช้สำหรับผักและผลไม้แกะสลักชนิดอื่นๆ รวมไปถึงอาหารที่ใช้กรรมวิธีการถนอมอาหารโดยการดองได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และศูนย์ความเป็นเลิศทางนวัตกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของศูนย์ความเป็นเลิศทางนวัตกรรมอาหาร ที่อำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Suwannarak., P. Phanumong and N. Rattanapanone, "Physiological changes of fruit and vegetable carving," *Chiang Mai University Journal of Natural Science*, vol 13, no. 1, pp. 77-86, 2014.
- [2] J. Suwannarak., C. Phuenpipitop, N. Rattanapanone, S. Thimthong, S. Chantakul and P. Phanumong, "Vegetable-craved processing in Hermetically seal container," *RMUTP Research Journal*, vol. 11, no. 2, 2017.
- [3] W. Yuenyongputtakal. "Factors Influencing on Dewatering by Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables," *Burapha Science Journal*, vol. 18, no 1, pp. 226-233, 2013.
- [4] Bacteriological Analytical Manual (BAM). (2018, Feb 10). Chapter 3: Aerobic Plate Count. [Online]. Available: <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-aerobic-plate-count>.
- [5] Bacteriological Analytical Manual (BAM). (2018, Feb 10). Chapter 12: *Staphylococcus aureus*. [Online]. Available: <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-aerobic-plate-count>.

- fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-staphylococcus-aureus.
- [6] Bacteriological Analytical Manual (BAM). (2018, Feb 10). Chapter 4: Enumeration of *Escherichia coli* and the Coliform Bacteria. [Online]. Available: <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-4-enumeration-escherichia-coli-and-coliform-bacteria>.
- [7] American Public Health Association (APHA). "Compendium of method for the microbiological of food: Chapter 20," 4th ed. American Public Health Association, Washington D.C., USA, 2001.
- [8] N. Sun, H. Liu, X. Zhang, H. Wang, S. Liu, P. Chen, W. Yu and K. Liu, "Physical, chemical properties and structural changes of Zaodan pickled by vacuum decompression technology," *Korean journal for food science of animal resources*, vol 38, no. 2, pp. 291–301, 2018.
- [9] J. KerdKuan, "Mango pickles with hydrostatic pressure from research to industry," *Technology Chaoban*, vol. 19, no. 401, pp. 26, 2007.
- [10] K. Thiminkul, "Research and development of vegetable pickling machine by using the hydro static process and mixed starter solution," *Research and development report*, Department of Agriculture, 2017.
- [11] A. Wiluntho, A. Authapho and C. Nuntheesri. "Production of pickled mango using hydrostatic pressure," *Special Problems Bachelor of Science*, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 2002.
- [12] Ministry of Public Health, "Announcement from the Ministry of Public Health (Issue 355). Food in hermetically sealed containers," *Gazette General Announcement*, vol. 130, Jul. 2013.

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

RMUTP RESEARCH JOURNAL

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร เป็นวารสารสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่และถ่ายทอดผลงานวิจัยและผลงานวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ซึ่งอยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index Centre, TCI Centre) กำหนดการตีพิมพ์เผยแพร่ ปีละ 2 ฉบับ (ราย 6 เดือน) ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน และฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม โดยรับพิจารณาบทความทั้งที่เป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีกรอบของวารสารที่ครอบคลุมในสาขาวิชาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์ประยุกต์ และวิศวกรรมศาสตร์ ทั้งนี้ บทความดังกล่าวผู้เขียนต้องไม่เสนอบทความฉบับเดียวกันกับที่เคยตีพิมพ์ในวารสารอื่นมาก่อน เว้นแต่ผ่านการเรียบเรียงและเพิ่มเนื้อหาใหม่ บทความแต่ละบทความต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิที่ตรงตามสาขาของบทความนั้นอย่างน้อย 2 ท่าน และผู้ทรงคุณวุฒิต้องมาจากหน่วยงานที่ต่างกันกับผู้เขียน อีกทั้งผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความเดียวกันนั้นจะต้องมาจากหน่วยงานที่ต่างกันด้วย ซึ่งจัดประเภทของการ Peer Review เป็นแบบ Double Blinded หมายถึงผู้ทรงคุณวุฒิจะไม่ทราบชื่อผู้เขียน และผู้เขียนจะไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย มีเนื้อหาสำคัญที่อธิบายถึงระเบียบวิธีวิจัย ผลการทดลอง การวิเคราะห์ผล และการสรุปผลที่ชัดเจน

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. Literature review เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลาย ๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง
2. Technical paper เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ใหม่ ๆ
3. Professional practice เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน
4. Policy paper เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่าง ๆ ของหน่วยงาน

2. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

2.1 บทความวิจัย

ก. ส่วนปก ให้แยกออกเป็น 2 หน้า โดยปกหน้าแรกเป็นภาษาไทย และปกหน้าที่สองเป็นภาษาอังกฤษ โดยแต่ละปกหน้าต้องจบในหนึ่งหน้าของตัวเอง ประกอบด้วย

1. ชื่อบทความ (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้นกะทัดรัด ชี้ถึงเป้าหมายหลักของการวิจัย
2. ชื่อผู้เขียนทุกท่าน (Authors) ให้ระบุเฉพาะชื่อ และ นามสกุล โดยไม่ต้องมีคำนำหน้านาม
3. หน่วยงาน/สังกัด และที่อยู่ สำหรับการติดต่อทางไปรษณีย์ ของผู้เขียนทุกท่าน
4. ตัวเลขยก ให้เขียนไว้บนนามสกุล เพื่อระบุว่าเป็นตำแหน่งทางวิชาการและที่อยู่ของผู้เขียนท่านใด

5. **บทคัดย่อ (Abstract) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ** ควรสั้นตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของ การศึกษา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผล และการวิจารณ์ เป็นต้น
6. **คำสำคัญ (Keywords) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ** เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถนำไปใช้ เป็นคำสืบค้นในระบบฐานข้อมูล ประมาณ 3-5 คำ
7. **ผู้พิมพ์ประสานงาน (Corresponding Author)** ให้ทำเครื่องหมาย * ไว้บนนามสกุล และระบุ หมายเลขโทรศัพท์ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (E-mail)

ข. ส่วนเนื้อหา ประกอบด้วย

1. **บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนของความสำคัญและมูลเหตุที่นำไปสู่การวิจัย พร้อมวัตถุประสงค์ และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. **ระเบียบวิธีวิจัย (Research Methodology) หรือ วิธีการทดลอง (Experimental Methods)** เป็นการอธิบายวิธีการดำเนินการวิจัย การทดลอง อุปกรณ์ เครื่องมือ การติดตั้ง และการวัดค่าต่าง ๆ
3. **ผลการทดลองและวิจารณ์ผล หรือ ผลการศึกษาและอภิปรายผล (Results and Discussion)** ควรเสนอผลอย่างชัดเจน ตรงประเด็น เป็นผลที่ค้นพบโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาพร้อมการวิจารณ์ ผล
4. **สรุป (Conclusion)** สรุปสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
5. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการระบุแหล่งทุนสนับสนุนการวิจัย (ถ้ามี) และการ ระบุนหน่วยงานหรือบุคคลที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือการทำวิจัย
6. **เอกสารอ้างอิง (References)** ต้องใช้ตามแบบที่วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร กำหนด อย่างเคร่งครัดและเขียนเอกสารอ้างอิง เฉพาะเอกสารที่นำมาอ้างอิงในเนื้อหาเท่านั้น

2.2 บทความวิชาการ

ก. ส่วนปก มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย

ข. ส่วนเนื้อหา ประกอบด้วย

1. **บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนของที่มาและมูลเหตุของการเขียนบทความ
2. **ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (Results)** เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับ ตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ
3. **สรุป (Conclusion)** สรุปสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
4. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการระบุแหล่งทุนสนับสนุนการวิจัย (ถ้ามี) และการ ระบุนหน่วยงานหรือบุคคลที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือการทำวิจัย
5. **เอกสารอ้างอิง (References)** ใช้รูปแบบที่วารสารฯ กำหนดอย่างเคร่งครัดและเขียนอ้างอิงเฉพาะ เอกสารที่ปรากฏในบทความเท่านั้น

3. รูปแบบการพิมพ์บทความ

ให้ใช้ไฟล์รูปแบบบทความ (Template Form) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <http://journal.rmutp.ac.th/> โดยไฟล์รูปแบบบทความมีการตั้งค่าหน้ากระดาษแล้ว ดังนี้

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
ระยะขอบ	ขอบบน (Top Margin) 2.50 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.00 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.00 ซม. ขอบขวา (Right Margin) 2.00 ซม.	ขอบบน (Top Margin) 2.50 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.00 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.00 ซม. ขอบขวา (Right Margin) 2.00 ซม.
ขนาดกระดาษ	ขนาดกระดาษ A4 (กำหนดเอง) ความกว้าง 19 ซม. ความสูง 27 ซม.	ขนาดกระดาษ A4 (กำหนดเอง) ความกว้าง 19 ซม. ความสูง 27 ซม.
เค้าโครง	หัวกระดาษและท้ายกระดาษ เลือกหน้าคู่ และหน้าคี่ต่างกัน หน้าแรกต่างกัน จากขอบหัวกระดาษ และ ท้ายกระดาษ ตั้งค่า 1.25	หัวกระดาษและท้ายกระดาษ เลือกหน้า คู่และหน้าคี่ต่างกัน หน้าแรกต่างกัน จากขอบหัวกระดาษ และ ท้ายกระดาษ ตั้งค่า 1.25
รูปแบบตัวอักษร	TH SarabunPSK	Times New Roman
หมายเลขหน้า	ตำแหน่ง ด้านบน ไม่แสดงหมายเลขหน้าในหน้าแรก หน้าคี่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนขวา หน้าคู่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนซ้าย ขนาดตัวอักษร 14	ตำแหน่ง ด้านบน ไม่แสดงหมายเลขหน้าในหน้าแรก หน้าคี่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนขวา หน้าคู่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนซ้าย ขนาดตัวอักษร 14
การย่อหน้า	ส่วนปก ย่อ 1.00 ซม. ส่วนเนื้อหา ย่อ 1.00 ซม.	ส่วนปก ย่อ 1.00 ซม. ส่วนเนื้อหา ย่อ 1.00 ซม.
จำนวนหน้าทั้งหมด	8-12 หน้า	8-12 หน้า
ชื่อวารสาร (ภาษาไทย)	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคู่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา เอียง) “วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร ปีที่ x ฉบับที่ x...xxxx- xxxx,xxx”	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคู่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา เอียง) “วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร ปีที่ x ฉบับที่ x...xxxx- xxxx,xxx”
ชื่อวารสาร (ภาษาอังกฤษ)	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคี่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา เอียง) “RMUTP Research Journal, Vol. ..., No. ...,xxxx-xxxx,xxx”	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคี่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา เอียง) “RMUTP Research Journal, Vol. ..., No. ...,xxxx-xxxx,xxx”

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
การพิมพ์ส่วนบุคคล	พิมพ์เต็มหน้ากระดาษ (พิมพ์ 1 คอลัมน์)	พิมพ์เต็มหน้ากระดาษ (พิมพ์ 1 คอลัมน์)
การพิมพ์ส่วนเนื้อหา	พิมพ์ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์กว้าง 7.1 ซม. ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.8 ซม.	พิมพ์ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์กว้าง 7.1 ซม. ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.8 ซม.
ข้อบทความ	ทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 22 ตัวตรงหนา จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ	ชื่อภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 16 ตัวตรงหนา จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ
ชื่อผู้เขียน	ทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 18 ตัวตรงไม่หนา จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ	ชื่อภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 12 ตัวตรง ไม่หนา จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ
ตัวเลขยกบนนามสกุล	ขนาดตัวอักษรเท่ากับชื่อและนามสกุล แต่ทำเป็นตัวยอก	ขนาดตัวอักษรเท่ากับชื่อและนามสกุล แต่ทำเป็นตัวยอก
หน่วยงาน/สังกัด และที่อยู่	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาดตัวอักษร 14	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาดตัวอักษร 11
ชื่อบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 20 (ตัวตรง หนา) จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ
เนื้อหาบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาดตัวอักษร 14	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาดตัวอักษร 12
ชื่อคำสำคัญ	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 14 (ตัวหนา)	ภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 12 (ตัวหนา)
คำสำคัญ	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 ตัวตรง บาง ใส่เครื่องหมาย Semicolon (;) ระหว่างคำ	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 12 ตัวตรง บาง ใส่เครื่องหมาย Semicolon (;) ระหว่างคำ
ชื่อผู้สนับสนุนประสานงานหมายเลขโทรศัพท์และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 13 (ตัวเอียง หนา)	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 10 (ตัวเอียง หนา)

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
ชื่อหัวเรื่องใหญ่	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 18 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย ประกอบด้วย 1. บทนำ 2. วิธีการทดลอง หรือ วิธีการศึกษา 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลหรือ ผลการศึกษาและอภิปรายผล 4. สรุป 5. กิตติกรรมประกาศ และ 6. เอกสารอ้างอิง	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย ประกอบด้วย 1. Introduction 2. Research Methodology 3. Results and Discussion 4. Conclusion 5. Acknowledgement and 6. References
ชื่อหัวเรื่องรอง	TH SarabunPSK ขนาด 16 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย	Times New Roman ขนาด 12 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย
ชื่อหัวเรื่องย่อย	TH SarabunPSK ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย	Times New Roman ขนาด 12 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย
เนื้อหาบทความ	TH SarabunPSK ขนาด 14	Times New Roman ขนาด 12
ชื่อตาราง	TH SarabunPSK 14 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “ ตารางที่ ” ต้องเป็นตัวหนา จัดชิดขอบซ้าย	Times New Roman 12 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “ Table 1 ” ต้องเป็นตัวหนา จัดชิดขอบซ้าย
ชื่อรูป	TH SarabunPSK 14 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “ รูปที่ ” ต้องเป็นตัวหนา จัดกึ่งกลางคอลัมน์	Times New Roman 12 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “ Fig. 1. ” ต้องเป็นตัวหนา จัดกึ่งกลางคอลัมน์
สมการ	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 สัญลักษณ์หรือตัวแปรที่เขียนในสมการจะต้องมีรูปแบบเดียวกันกับสัญลักษณ์หรือตัวแปรที่อยู่ในคำอธิบายหรือในเนื้อหา และให้จัดชิดขอบซ้ายสุดเสมอ ส่วนเลขบอกลำดับสมการ ให้เขียนลำดับเลขใส่ในวงเล็บและจัดชิดขวาสุด	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 สัญลักษณ์หรือตัวแปรที่เขียนในสมการจะต้องมีรูปแบบเดียวกันกับสัญลักษณ์หรือตัวแปรที่อยู่ในคำอธิบายหรือในเนื้อหา และให้จัดชิดขอบซ้ายสุดเสมอ ส่วนเลขบอกลำดับสมการ ให้เขียนลำดับเลขใส่ในวงเล็บและจัดชิดขวาสุด
คำอธิบายตัวแปรจากสมการ	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 จัดชิดขอบซ้ายสุด เครื่องหมาย “=” ของตัวแปรในแต่ละบรรทัดต้องตรงกันในแนวดิ่ง	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 จัดชิดขอบซ้ายสุด เครื่องหมาย “=” ของตัวแปรในแต่ละบรรทัดต้องตรงกันในแนวดิ่ง

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
เนื้อหาในตาราง / แผนภูมิ	TH SarabanPSK 12 ตัวบาง	Times New Roman 10 ตัวบาง
การอ้างอิงในเนื้อเรื่อง และการอ้างอิง ท้ายเรื่อง	ให้ดูจากข้อที่ 5. การอ้างอิง	ให้ดูจากข้อที่ 5. การอ้างอิง

4. การส่งต้นฉบับบทความ

การส่งต้นฉบับบทความ ผู้เขียนสามารถส่งบทความออนไลน์ ได้ที่ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/RMUTP/index> หรือสอบถามข้อมูลได้ที่ กองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร 399 ถนนสามเสน แขวงวชิรพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300 โทรศัพท์ 0 2665 3777 ต่อ 6645 โทรสาร 0 2665 3860

5. จริยธรรม บทบาท และหน้าที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จัดทำวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้หลักธรรมาภิบาลและเคร่งครัดในด้านจริยธรรม บทบาท และหน้าที่ต่อสังคมอย่างแท้จริง มีการ แต่งตั้งกองบรรณาธิการภายในและภายนอกโดยผู้บริหารสูงสุดของมหาวิทยาลัย กำหนดหน้าที่และความรับผิดชอบอย่างชัดเจน สามารถปฏิบัติงานได้อย่างโปร่งใสและมีความเป็นอิสระในการพัฒนาวารสารให้ก้าวหน้าและมีคุณภาพ การจัดทำวารสารเป็นการเชื่อมต่อบุคคลหรือกลุ่มบุคคล 3 ส่วน ประกอบด้วย 1) ผู้เขียน 2) บรรณาธิการ และกองบรรณาธิการวารสาร และ 3) ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ภายใต้การตรวจสอบ คุณภาพวารสารโดย ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) ทั้งนี้เพื่อให้วารสารมีคุณภาพเป็นไปตามหลักสากล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จึงได้กำหนดจริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้เขียน บรรณาธิการ และกองบรรณาธิการวารสาร และผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ไว้ดังต่อไปนี้

5.1 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้เขียน

5.1.1 บทความที่ผู้เขียนยื่นเข้ามายังวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร เพื่อให้พิจารณานั้น จะต้องไม่ไปยื่นต่อวารสารอื่นใดในคราวหรือเวลาเดียวกัน เว้นแต่ไม่ผ่านการพิจารณาและได้รับเอกสารยืนยันผลการพิจารณาจากกองบรรณาธิการแล้ว จึงจะสามารถดำเนินการยื่นต่อวารสารอื่นใดได้

5.1.2 ผู้เขียนต้องไม่ทำการคัดลอกผลงานทางวิชาการของผู้เขียนอื่น และไม่ตีพิมพ์ซ้ำผลงานของตนเอง (Self-Plagiarism) ไม่ลักลอกผลงานของตนเอง สำหรับข้อมูลอื่นใดของผู้เขียนอื่นที่ผู้เขียนนำมาใช้ในบทความจะต้องทำการเขียนอ้างอิงในส่วนเนื้อหาของเนื้อหาและอ้างอิงส่วนท้ายให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ

5.1.3 ผู้เขียนจะต้องนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง การวิเคราะห์ หรือการคำนวณอย่างตรงไปตรงมา ไม่บิดเบือนข้อมูล (Fabrication or Misrepresentation) จากความเป็นจริงและไม่สร้างหลักฐานเท็จเพื่อรองรับผลลัพธ์ของตนเอง

5.1.4 ผู้เขียนจำเป็นต้องกล่าวคำขอบคุณบุคคลหรือหน่วยงานไว้ในกิตติกรรมประกาศ หากผู้เขียนได้รับทุนวิจัยความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ หรือช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งความสำเร็จของบทความฉบับนั้น ๆ

5.1.5 วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ไม่อนุญาตให้เพิ่มเติมบุคคลอื่นใดที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องเข้ามามีชื่ออยู่ในบทความ เช่น ไม่มีส่วนร่วมในการทำวิจัย หรือไม่มีส่วนร่วมในการเขียนบทความนั้น ๆ โดยผู้เขียนทุกท่านที่มีชื่อในบทความจะต้องมีส่วนร่วมรับผิดชอบ

5.2 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของบรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสาร

5.2.1 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร มีบทบาทและหน้าที่ในการพิจารณาบทความเบื้องต้นก่อนรับเข้าสู่กระบวนการของวารสาร ประกอบด้วย การพิจารณาเนื้อหาบทความ กับกรอบของวารสาร การพิจารณารูปแบบการเขียนบทความ การพิจารณาความเข้มข้นของบทความ การลักลอกผลงานทางวิชาการ การเลือกและกำหนดผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ และพิจารณาคุณภาพโดยรวมของบทความ ก่อนเข้าสู่กระบวนการประเมินบทความต่อไป

5.2.2 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องพิจารณาบทความเบื้องต้นบนพื้นฐานคุณธรรมและจริยธรรม โดยไม่เอนเอียงหรือใช้ความรู้สึกส่วนตัวพิจารณาบทความนั้น ต้องไม่มีอคติต่อผู้เขียนหรือต่อหน่วยงานของผู้เขียน

5.2.3 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องกำหนดหรือเลือกผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความที่มีความเชี่ยวชาญตรงตามสาขาของบทความนั้น ๆ โดยผู้ทรงคุณวุฒิที่กำหนดนั้นจะต้องไม่มาจากหน่วยงานเดียวกันกับผู้เขียน และผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความทุกท่านที่ประเมินบทความเดียวกันจะต้องไม่มาจากหน่วยงานเดียวกันด้วย ทั้งนี้เพื่อป้องกันผลประโยชน์ทับซ้อนที่อาจเกิดขึ้น

5.2.4 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องรักษาความลับเกี่ยวกับผู้เขียนและผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ไม่ให้ทราบข้อมูลซึ่งกันและกัน หมายความว่า ผู้ทรงคุณวุฒิที่เป็นผู้ประเมินบทความจะต้องไม่ทราบชื่อผู้เขียนและชื่อหน่วยงาน และผู้เขียนจะต้องไม่ทราบชื่อและหน่วยงานผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ (ประเภทของ Peer Review เป็นแบบ Double Blinded) เพื่อป้องกันปัญหาความขัดแย้งที่อาจเกิดขึ้นได้

5.2.5 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ต้องไม่ตีพิมพ์บทความของตนเองลงในวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ที่กำกับดูแลอยู่โดยไม่มีข้อยกเว้น

5.2.6 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ต้องไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนใด ๆ อันไม่ชอบธรรมและผิดหลักจริยธรรมกับผู้เขียน และกับผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ โดยต้องไม่มีการเรียกรับผลประโยชน์ใด ๆ ทั้งสิ้น

5.2.7 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องควบคุมและกำกับกระบวนการต่าง ๆ ของวารสารอย่างตรงไปตรงมา ไม่เข้าข้างผู้เขียนใด หรือให้ความช่วยเหลือที่ไม่ถูกต้อง ผิดหลักคุณธรรม จริยธรรม และขาดธรรมาภิบาล

5.2.8 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีหน้าที่ต้องให้ความร่วมมือ ควบคุม และกำกับให้วารสารมีความถูกต้องและมีคุณภาพเป็นไปตามที่ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทยกำหนดตามมาตรฐาน

5.3 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

5.3.1 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความมีหน้าที่ประเมินบทความในด้านต่าง ๆ ตามรูปแบบที่วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร กำหนดด้วยความเข้มข้นและให้ข้อเสนอแนะหรือเหตุผลเชิงวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อผู้เขียน

5.3.2 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องประเมินบทความที่ได้รับมอบหมายจากบรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ให้แล้วเสร็จในช่วงระยะเวลาที่กำหนด เพื่อประโยชน์สูงสุดของผู้เขียนบทความ

5.3.3 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องพิจารณาบทความที่ได้รับจากบรรณาธิการหรือกองบรรณาธิการถึงความเชี่ยวชาญของตนเองกับเนื้อหาในบทความ หากเห็นว่าบทความที่ได้รับมีเนื้อหาไม่ตรงตามความเชี่ยวชาญที่แท้จริงจะต้องแจ้งกองบรรณาธิการวารสารให้รับทราบโดยเร็วและปฏิเสธการประเมิน

5.3.4 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องมีหลักจริยธรรมในการประเมินบทความ ไม่เอนเอียงหรือมีอคติต่อเนื้อหาบทความ ต้องไม่ใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่เป็นไปตามหลักทฤษฎีเชิงวิชาการ ปราศจากหลักฐานที่น่าเชื่อถือได้มาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินบทความนั้น ๆ

5.3.5 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องเก็บรักษาความลับ ด้วยการไม่เปิดเผยข้อมูลเนื้อหาในบทความของผู้เขียนแก่บุคคลอื่นใดในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความนั้น

6. การอ้างอิง

การอ้างอิงในบทความวิจัยและบทความวิชาการสำหรับวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กำหนดการอ้างอิงให้เป็นไปตามรูปแบบ IEEE (อ้างอิงจาก <https://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf> หรือที่ http://www.ieee.org/documents/style_manual.pdf) โดยต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น หากบทความที่อ้างอิงมาจากบทความภาษาไทย ต้องแปลเป็นภาษาอังกฤษให้ถูกต้อง สำหรับการใส่อ้างอิงในเนื้อเรื่อง (In-text citations) ให้ใช้เครื่องหมาย [] โดยมีตัวอย่างการเขียน เช่น [1] หรือ [2] หรือ [1], [2] หรือ [1]-[3] หรือ [1], [3]-[8] หรือ [9], [10], [15], [16] หากมีการอ้างอิงซ้ำบทความเดิมให้ใช้หมายเลขเดิม

ในกรณีที่มีการอ้างอิงในเนื้อหาด้วยการกำหนดชื่อผู้แต่งบทความให้เขียนตามตัวอย่าง ดังนี้ K. S. Karukanan [1] หรือ L. A. Hoi and S. D. Woo [2] หรือ P. A. Abarwale et al. [3]

ในส่วนของการอ้างอิงส่วนท้าย (Reference List) จะต้องเรียงตามลำดับบทความที่เขียนอ้างอิงในเนื้อเรื่อง ซึ่งจำแนกรูปแบบการเขียนอ้างอิงส่วนท้ายได้ดังต่อไปนี้

1) การอ้างอิงจากบทความในวารสาร (Journal Articles)

รูปแบบ: [1] Author, "Title of Article," *Title of Journal*, Volume, Issue, Pages. Year.

ตัวอย่าง:

[1] H. Li, Z. Huang, L. Cheng, S. Kong and S. Liu, "Structure and dielectric properties of novel low temperature co-fired Bi₂O₃-RE₂O₃-MoO₃ (RE=Pr, Nd, Sm, and Yb) based microwave ceramics," *Ceramics International Journal*, vol. 43, no. 5, pp. 4570-4575, Apr. 2017.

2) การอ้างอิงจากการนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ (Conference Technical Articles)

รูปแบบ: [1] Author, "Title of paper," in *Title of Conference*, Conference date, Editor, Ed. Location: Publisher, Year, Pages.

ตัวอย่าง:

- [2] T. Fedushchak, M. Uimin, S. Zhuravkov and A. Vosmerikov, "Nanopowder hydrogenation catalysts of diesel fraction components," in *Proceeding of 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Tomsk Polytechnic University Tomsk, Russia, 2012, pp. 1-4.
- [3] W. Herz, M. Süßer, A. Ulbricht and F. Wüchner, "The operation experience with the dual cooling system of the polo coil (two phase-supercritical He)," in *Proceedings of the Sixteenth International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference*, Germany, 1997, pp. 469-472.

3) การอ้างอิงจากหนังสือ (Books)

รูปแบบ: [1] Author. *Title of Book*, Editor, ed. Location: Publisher, Year, Pages.

ตัวอย่าง:

- [4] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, 9th ed. Boston: Pearson, 2013.
- [5] R. M. Burton, B. Obel and G. DeSanctis, *Organizational Design: A Step-by-Step Approach*, 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2011.

4) การอ้างอิงจากบทในหนังสือ

รูปแบบ: [1] J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, Country if not USA: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx-xxx.

ตัวอย่าง:

- [6] L. Stein, "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed. New York: Wiley, 1994, pp. 55-70.
- [7] R. L. Myer, "Parametric oscillators and nonlinear materials," in *Nonlinear Optics*, vol. 4, P. G. Harper and B. S. Wherret, 1st ed. San Francisco, CA: Academic, 1977, pp. 47-160.

5) การอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ (Theses and Dissertations)

รูปแบบ: [1] J. K. Author, "Title of dissertation," Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

[2] J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

ตัวอย่าง:

- [8] J. O. Williams, "Narrow-band analyzer," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Harvard Univ., Cambridge, MA, 1993.
- [9] N. Kawasaki, "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow," M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan, 1993.

6) การอ้างอิงจากสิทธิบัตร (Patents)

รูปแบบ: [1] J. K. Author, "Title of patent," U.S. Patent x xxx xxx, Abbrev. Month, day, year.

ตัวอย่าง:

- [10] J. P. Wilkinson, "Nonlinear resonant circuit devices," U.S. Patent 3 624 125, July 16, 1990.

7) การอ้างอิงจากมาตรฐาน (Standards)

รูปแบบ: [1] *Title of Standard*, Standard number, date.

ตัวอย่าง:

- [11] *IEEE Criteria for Class IE Electric Systems*, IEEE Standard 308, 1969.
- [12] *Letter Symbols for Quantities*, ANSI Standard Y10.5-1968.

8) การอ้างอิงจากคู่มือ (Handbooks)

รูปแบบ: [1] *Name of Manual/Handbook*, x Ed., Abbrev. Name of Co., City of Co., Abbrev. State, year, pp. xx-xx.

ตัวอย่าง:

- [13] *Transmission Systems for Communications*, 3rd Ed., Western Electric Co., Winston-Salem, NC, 1985, pp. 44-60.
- [14] *Motorola Semiconductor Data Manual*, Motorola Semiconductor Products Inc., Phoenix, AZ, 1989.

Academic Article

◆ Magnetic Field Effect on Physicochemical Properties of Water

Pornchai Premkaisorn and Wanpen Wasupongpun

Research Articles

◆ Dye Removal Using *Salacca zalacca* (Sumalee) Seeds Activated Carbon by KOH Activation

Study the Physical Properties of Agricultural Waste for Industries Handicrafts Product, Bantumsue Community Phetchaburi Province

Surapa Wongsuwan Kriangsak Khiaomang and Miyung Seo

◆ Development and Study on Physical and Sensory Properties of Dark Chocolates Fortified with Anthocyanin from Broken Riceberry Rice

Paradorn Ngamdee Sureechay Jamkrajang and Siriwan Yankin

Antioxidant Activities and Polyphenol Compounds in Snack Products Fortified with Mulberry Leaf Powder

Chukkrit Thongkham Taweesak Techakriengkrai Ratchanee Kongkachucai and Rin Charoensiri

◆ Effect of cricket (*Acheta domesticus*) powder, soy protein isolate and xanthan gum on the qualities of rice flour-based cookies

Pongpipat Sanom and Kamolwan Jangchud

Production of Roasted Chicken in Jar Using Heat Transfers from Far-infrared Ray

Characterization of Bioplastics Poly (lactic acid) Blended with Thermoplastic Starch

Yottha Srithep Nutthagorn Hongkhaum and Padchara Takhot

◆ CO₂ sequestration Efficiency by *Spirulina* sp. RMUTL

Nannaphat Ngoenkhamkhong and Phisit Seesuriyachan

Determination of Phosphate in Surface Water of Lopburi Province Using a Simple Flow Injection Analytical System

Piyawan Phansi Jantira Koin and Duangjai Nacapricha

- Substitution of wheat flour with Hom Nil rice flour affects physicochemical characteristics, antioxidant activities, and sensory acceptance of Chinese steamed bread (Mantou)

Supichaya Khumkhom

Antioxidant activity of 3 varieties of corn milk

Rungthiwa Wongpaisanrit and Wichan Pongsankeeree

Strengthening of Deteriorated Reinforced Concrete Deep Beam Caused by Chloride with Carbon Fiber Sheets

Rattanasak Hongthong Apai Benjaphong and Thamma Jaitalawanich

Development of Seasoning Powder and Furikake-Rice Seasoning from Fermented Soy Bean

Sureewan Raichasom Nattavipa Seelum and Suttida Takonkeaw

Diffusion Coefficient Modelling of Thin-layer Drying of Paddy Using Spouted Free Fall Bed Dryer

Siwakorn Sritunyakorn Keerati Suluksna and Tawit Chitsomboon

Acidification Processes of Carving Vegetable Using Acid Conditioning Machine Under Temperature and Pressure Control

Intheema Hiranaugkarawong and Putkrong Phanumong