วารสารวิชชา

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ปีที่ 42 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2566

Vol. 42 No. 2 July - December 2023

วารสารวิชาการสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN (Print) : 0125-2380

ISSN (Online) : 2672-958X

Wichcha Journal

Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

www.nstru.ac.th

วารสารวิชชา
WICHCHA JOURNAL
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
NAKHON SI THAMMARAT RAJABHAT UNIVERSITY

ปีที่ 42 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2566 Vol. 42 No. 2 July – December 2023

เจ้าของ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ที่ปรึกษา ดร.สมปอง รักษาธรรม รักษาราชการแทนอธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
บรรณาธิการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมรักษ์ รอดเจริญ
ผู้ช่วยบรรณาธิการ ดร.ธัชชา สามพิมพ์

นโยบาย

1. วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช เป็นวารสารวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตีพิมพ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524
2. วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช เป็นเอกสารวิชาการแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการเผยแพร่ให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงแบบออนไลน์ได้แบบเสรีโดยผ่านกระบวนการประเมินจากจากผู้ประเมินอิสระ (peer review) ที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง ในรูปแบบผู้ประเมินอิสระและผู้แต่งไม่ทราบชื่อซึ่งกันและกัน (double-blind review)

ขอบเขตงาน

ขอบเขตของบทความวิจัย (research article) และบทความวิชาการ (academic article) ที่ลงตีพิมพ์ในวารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช เป็นบทความในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประกอบด้วยด้านวิทยาศาสตร์กายภาพ วิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และวิศวกรรมศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการและงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. เพื่อเป็นสื่อส่งเสริมการสร้างความรู้และองค์ความรู้ในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อเป็นเวทีนำเสนอผลงานทางวิชาการของบุคลากรในมหาวิทยาลัยและบุคคลทั่วไป

ประเภทบทความ

วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ตีพิมพ์บทความฉบับเต็มในรูปแบบบทความวิจัย (research article) และบทความวิชาการ (academic article) ตามขอบเขตงาน

กระบวนการพิจารณาบทความ

บทความทุกบทความที่ได้รับการพิจารณาลงตีพิมพ์ในวารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ได้รับการพิจารณาจากผู้ประเมินอิสระ (peer review) ที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง จากหลากหลายหน่วยงาน อย่างน้อย 3 ท่าน ในรูปแบบผู้ประเมินอิสระและผู้แต่งไม่ทราบชื่อซึ่งกันและกัน (double-blind review) และบทความหรือข้อคิดเห็นใด ๆ ที่ปรากฏในวารสารที่เป็นวรรณกรรมของผู้เขียน บรรณาธิการหรือมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วย

ค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์

วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ไม่เก็บค่าธรรมเนียมในการตีพิมพ์

เกี่ยวกับวารสาร

ชื่อวารสาร : วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ISSN ฉบับตีพิมพ์ : 0125-2380
ISSN ฉบับอิเล็กทรอนิกส์ : 2672-958X
เว็บไซต์วารสาร : https://www.tci-thaijo.org/index.php/wichcha/index

กำหนดเผยแพร่ : เผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ (ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน และฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม)

จัดพิมพ์โดย : สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
เลขที่ 1 หมู่ที่ 4 ตำบลท่างิ้ว อำเภอเมืองนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280

บรรณาธิการที่ปรึกษา ประกอบด้วย

ศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ใบไม้	ราชบัณฑิต สาขาชีววิทยา
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ กาญจนกิจ	คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.สมปอง เตชะโต	คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สังวรณ์ กิจทวี	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.นภพร ทัศนัยนา	นักวิชาการอิสระ อดีตรองศาสตราจารย์ คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ จริยานุกูล	นักวิชาการอิสระ อดีตผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

กองบรรณาธิการ ประกอบด้วย

ศาสตราจารย์ ดร.เสาวภา อังสุภานิช	คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง จุฑาเกตุ	คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.สุวัจน์ ธัญรส	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ชิตณรงค์ ศิริสถิตย์กุล	สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แววศักดิ์	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง
รองศาสตราจารย์ ดร.วัฒนพงศ์ เกิดทองมี	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิศิโรตม์ เกตุแก้ว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
รองศาสตราจารย์ ดร.การุณ ทองประจุแก้ว	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุเปญญา จิตตพันธ์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รองศาสตราจารย์ ดร.นคร กกแก้ว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงศ์ โอทอง	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรศักดิ์ สวัสดี	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สงรักษ์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง
ดร.ปิยรัษฎ์ ปริญญาพงษ์ เจริญทรัพย์	สำนักงานโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (อพ.สธ.)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระยุทธ สุดสมบูรณ์	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑามาศ ศุภพันธ์	คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งนภา พิมเสน	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ดร.ศณัทชา ธีระชุนห์	คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ผู้ประเมินอิสระหรือพิชญพิจารณ์ (Peer review) ตรวจสอบทางวิชาการประจำฉบับ

รองศาสตราจารย์ ดร.เทพปัญญา เจริญรัตน์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจภรณ์ ประภักดี	คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.พรรัตน์ สินชัยพานิช	สถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สมชัย อนุสนธิ์พรเพิ่ม	คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รองศาสตราจารย์ ดร.สุเปญญา จิตตพันธ์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ วงศ์ราษฎร์	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
รองศาสตราจารย์วรพงศ์ บุญช่วยแทน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์สุดา วันจันทึก	คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ กางโสภา	คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จีราภรณ์ อินทสาร	คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑามาศ ร่มแก้ว	คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณานิกา แซ่แง่ ชูกลิ่น	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศักดิ์ แซ่เลี่ยว	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากรณ์ ดำสุด	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรนุช ฉายศิริโชติ	โรงเรียนการเรือน มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิสาพร มูหะมัด	คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภา โซ๊ะสลาม	ภาควิชาวิทยาศาตร์ คณะศิลปศาสตร์และ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย หาระโคตร	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา เหลียวตระกูล	คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิราภรณ์ ชื่นบาล	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย อำคา	คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงศ์ โอทอง	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมรักษ์ รอดเจริญ	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายชล สุขญาณกิจ	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริอร อิศรางกูร ณ อยุธยา	วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ หู้เต็ม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดมเดชา พลเยี่ยม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ ร.ต.ต. ดร.ธีระพงษ์ แสนทวีสุข	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ดร.ธิติกานต์ บุญแข็ง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.สันติ ขำตรี	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ผู้ตรวจทานภาษาต่างประเทศประจำฉบับ

นางสาวนฤภร ธิติประเสริฐ	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน/
นางสาวธนสินี ไชยมงคล	ศูนย์ภาษา สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ฝ่ายจัดการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมรักษ์ รอดเจริญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑามาศ ศุภพันธ์
ดร.สาวิตรี ฤทธิช่วย
ดร.ศณัทชา ธีระชุนห์
นางสาวกันต์ฤทัย จรจรัส

ปก เสือผินการพิมพ์
พิมพ์ที่ เสือผินการพิมพ์
439 ถนนศรีธรรมโศก ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80000
โทร. 090-2895246 e-mail: pued2548@gmail.com

สารบัญ

หน้า

บทความวิจัย

การผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกะและแบบกึ่งกะ 1
ประภา โช๊ะสลาม ธัญญ์ธิดี เจริญธนภัสร์ และรัชพล พะวงศ์รัตน์*

การศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปและสมบัติทางกลของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว 16
วรพงค์ บุญช่วยแทน* ธัญวลัย จิรันดร รัสมนต์ ยุระพันธุ์ ชาตรี หอมเขียว จตุพร ใจดำรง
ศศิประภา เต็มสิริมงคล และปณทัศน์ หนูเขียว

ผลของแรงเสียดทานของผนังภาชนะต่อรูปแบบของการพาในการสั่นแนวตั้งสำหรับวัสดุเม็ด 32
ภาณุพัฒน์ ชัยวร สุภารัตน์ หาญขว้าง วิไลพร ลักษมีวาณิชย์ และเพ็ญศรี ประมุขกุล*

การศึกษากิจกรรมฟาโกไซติกของกากถั่วเหลืองที่หมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* TISTR 2664 47
กมลศรี นวลคำ วรรณวิภา ชื่นชม ภัทราวดี เก่งกว่าสิงห์ หนึ่งนุช ไชยวรรณ์
วิโรจน์ เตชะภูริปัญญา และวัชรี กัลยาลัง*

ผลของการเสริมธาตุสังกะสีต่อการสะสมธาตุสังกะสีในต้นอ่อนทานตะวันงอก 63
อนันต์ พิริยะภัทรกิจ* พรกมล รูปเลิศ ปุญญพัฒน์ พลพิมพ์ และพัชรี เดชเลย์

ประสิทธิภาพของแบคทีเรียที่คัดเลือกในการบำบัดปรอทในดิน 70
สุมาลี ใบพลูทอง ศศิธร หาสิน อนัญญา โพธิ์ประดิษฐ์ และอภิชญา สวัสดี*

การพัฒนาผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากเมล็ดประ 80
จุรีภรณ์ นวนมุสิก* ปุญญาเพชร เดชเพชรธรักษ์ จตุพร คงทอง สิริกุล เพชรหวล
และสุภาวิณี ยอดพิจิตร

การศึกษาอัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสานที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สำเร็จรูป 94
และคุณสมบัติทางกายภาพบางประการของกระถางจากวัสดุทดแทน
สถาพร เรืองรุ่ง* นพรัตน์ เชื้อคำฮด ชนากานต์ คูณแก้ว ขวัญหทัย นาจารย์ และสุมาลิน ฝางคำ

การตอบสนองของการเจริญเติบโตและคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ในระยะดอก 109
บานเต็มที่ที่ฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ภายใต้สภาวะขาดน้ำ
เสาวลักษณ์ บันเทิงสุข* และวราลักษณ์ บุญมาชัย

การใช้แป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์คุกกี้ 124
น้ำฝน ชูพูล* รุ่งทิพย์ รัตนพล และจินตนา เจริญเนตรกุล

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับ **134**

การผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัว โดยการหมักแบบกะและแบบกึ่งกะ

Biogas Production from Co-Digestion of Pretreated Spent Grounds Coffee with Cow Dung (Manure) by Batch and Fed-Batch Fermentation

ประภา โซ๊ะสลาม[1] ธัญญ์ธิดี เจริญธนภัสร์[2] และรัชพล พะวงศ์รัตน์[3*]

Prapa Sohsalam[1] Thuntidee Charoenthanaphat[2] and Ratchapol Pawongrat[3*]

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวด้วยกระบวนการหมักแบบกะและกึ่งกะ โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว 4 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก (คิดเป็นร้อยละ 10 ของปริมาณของแข็งทั้งหมด) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 วัน จากผลการทดลองด้วยกระบวนการหมักแบบกะ พบว่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) มีผลต่อปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น โดยที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 24:1 (C:N 24:1) จะได้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุด คือ 44.50 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ดังนั้นอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 24:1 จึงถูกนำมาศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยวิธีการหมักแบบกึ่งกะ โดยแบ่งเติมสารอินทรีย์เข้าระบบ คือ เติมทุก 2 วัน จำนวน 2 ครั้ง (แบบที่ 1) และเติมทุก 3 วัน จำนวน 2 ครั้ง (แบบที่ 2) เป็นเวลา 15 วัน จากผลการทดลองพบว่า แบบที่ 1 จะได้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุด คือ 38.00 มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย มีปริมาณขององค์ประกอบที่เป็นแก๊สมีเทน (CH_4) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เท่ากับร้อยละ 20.12 และ 6.47 โดยปริมาตร ตามลำดับ

คำสำคัญ: แก๊สชีวภาพ กากกาแฟ มูลวัว การหมักแบบกะ การหมักแบบกึ่งกะ

[1] สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

[2] สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

[3] สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวผลิตภัณฑ์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

[*] Corresponding author e-mail: rafaelford@yahoo.com

Received: 5 September 2022, Revised: 3 October 2022, Accepted: 17 October 2022

Abstract

This research aimed to investigate the biogas production from co-digestion of pretreated spent ground coffee and cow manure in batch and fed-batch fermentation processes at 35°C. The ratio of pretreated coffee grounds to cow manure was 4:1 representing 10% of the total solids solid material. The experimental results of the batch fermentation process were showed that the carbon-to-nitrogen ratio (C:N ratio) of coffee grounds with cow manure at 24:1 has maximum biogas yield of 44.50 milligram per gram volatile solids (ml/g-VS). Therefore, this optimum C:N ratio (24:1) was used for biogas production in a semi-batch fermentation process. However, when adding organic substances to the system every 2 days, which was 3 times for 15 days, the maximum biogas content was Type 1 (the maximum accumulated biogas was 38.00 ml/g-VS) and the amount of methane and carbon dioxide were 20.12% and 6.47%.

Keywords: Biogas, Spent grounds coffee, Cow dung, Batch fermentation, Fed-batch fermentation

บทนำ

สืบเนื่องจากการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วและการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก นำไปสู่ความต้องการใช้ทรัพยากรทางด้านพลังงานเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเชื้อเพลิงลดน้อยลง และราคาพลังงานปรับตัวสูงขึ้น ทำให้ต้องมีการพัฒนาหาแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อลดการพึ่งพาพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล และลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก (นัฐวุฒิ และคณะ, 2566) แก๊สชีวภาพ (biogas) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ซึ่งแก๊สชีวภาพมีแก๊สมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบหลัก เป็นพลังงานสะอาดสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงหุงต้ม ผลิตไฟฟ้า หรือผลิตความร้อนได้ โดยแก๊สมีเทน 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทดแทนแก๊สหุงต้มได้ประมาณ 0.46 กิโลกรัม หรือผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 2.09 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561) ส่งผลให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในครัวเรือนได้ การผลิตแก๊สชีวภาพสามารถทำได้หลายแหล่งวัตถุดิบแต่การผลิตแก๊สชีวภาพจากชีวมวล (biomass) ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่มีจำนวนมาก โดยเฉพาะประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีวัตถุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) ซึ่งเป็นกลุ่มของชีวมวลที่มีองค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) เช่น ฟางข้าว ซังข้าวโพด ชานอ้อย เป็นต้น (อรุณี, 2555) ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้การย่อยสลายของจุลินทรีย์เป็นไปได้ยาก จึงจำเป็นต้องมีการปรับสภาพ (pretreatment) โดยอาจใช้วิธีทางเคมี กายภาพ หรือชีวภาพ เพื่อที่จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ (Zheng *et al*, 2014) โดยชีวมวลที่ผ่านการปรับสภาพจะถูกนำมาหมักร่วมกับของเสียจากปศุสัตว์ เช่น มูลวัว เนื่องจากมีเชื้อจุลินทรีย์จำนวนมากที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ (Corro *et al*, 2013) การผลิตแก๊สชีวภาพนิยมใช้กระบวนการ

หมักเพื่อแก๊สชีวภาพที่แตกแตกต่างกัน แต่ที่น่าสนใจ คือ กระบวนหมักแบบกะ เป็นการหมักที่มีการเติมอินทรีย์วัสดุในการหมักเพียงครั้งเดียว และแบบกึ่งกะเป็นการหมักที่มีการแบ่งเติมอินทรีย์วัสดุตามสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อลดปัญหาการสะสมของสารอินทรีย์ที่มีผลต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ (กิตติยา และคณะ, 2559) นอกเหนือจากวัสดุชีวมวลที่ได้จากภาคเกษตรกรรมแล้ว ในปัจจุบันวัสดุที่เหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม เช่น กากกาแฟ ยังเป็นหนึ่งแหล่งวัตถุดิบที่น่าสนใจ กาแฟถือว่าเป็นเครื่องดื่มที่ได้รับความนิยม ในประเทศไทยมีการบริโภคและนำเข้ากาแฟเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2560 จำนวน 1,350 ตัน เป็น 1,415 ตัน ในปี พ.ศ. 2564 คิดเป็นร้อย 2.9 และมีแนวโน้มที่สูงขึ้นในอนาคต (International Coffee Organization, 2022) ซึ่งในกระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูปนั้นจะมีกากกาแฟเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก คาดว่าในปี พ.ศ. 2565 จะมีกากกาแฟเหลือทิ้งประมาณ 290,000 ตันต่อปี (ณัฐพงศ์, 2562) นอกจากกากกาแฟจะเป็นชีวมวลทางอุตสาหกรรมที่เหลือทิ้งแล้วยังมีโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ได้ยาก การปรับสภาพจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับโครงสร้างทั้งทางเคมีและทางกายภาพส่งผลให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นเชื้อเพลิงได้ และยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ (นฤภัทร และพัชรี, 2558; จุฑาภรณ์ และนาวิน, 2560; รพีพรรณ, 2560; ณัฐพงศ์, 2562)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับการใช้มูลวัวด้วยกระบวนหมักแบบกะและแบบกึ่งกะเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด นอกจากนี้การนำกากกาแฟมาใช้ประโยชน์สามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม รวมถึงลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ผลิตเป็นพลังงานใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ก่อให้เกิดความยั่งยืนและมั่นคงต่อไปในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างกากกาแฟและมูลวัว

เก็บตัวอย่างกากกาแฟ (จากร้านคาเฟ่ไทยสไตล์ จังหวัดราชบุรี) นำไปตากผึ่งแดด เป็นเวลา 2-3 วัน แล้วนำมาบดเพื่อลดขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 1-2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างใส่ถุงพลาสติกปิดปากถุงให้สนิท ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยเครื่อง fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) ศึกษาโครงสร้างภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio)

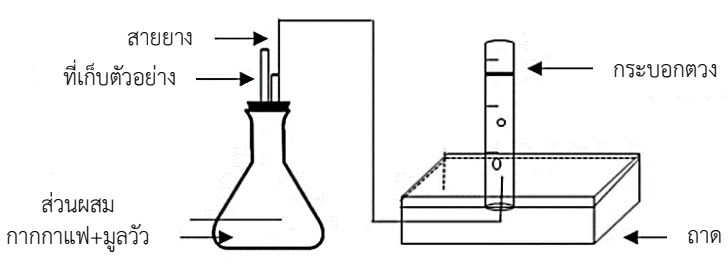
เก็บตัวอย่างมูลวัวแห้งจากโคเนื้อ (CD) (จากคณะสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม) นำไปตากแดด เป็นเวลา 2-3 วัน จากนั้นนำมาบดเพื่อลดขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 1-2 มิลลิเมตร ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid: TS) ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (volatile solids: VS) ศึกษาโครงสร้างภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน จากนั้นเก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิท เพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป

2. การปรับสภาพของกากกาแฟ

การปรับสภาพเพื่อเตรียมตัวอย่างกากกาแฟโดยวิธีทางเคมี ดัดแปลงมาจากวิธีการของ จุฑาภรณ์ และนาวิน (2560) โดยนำกากกาแฟจำนวน 1,000 กรัม แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อัตราส่วน 1:10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 32 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำ จนน้ำล้างมีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นกลาง (ความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ศึกษาโครงสร้างภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยเครื่อง FT-IR จากนั้นเก็บกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพ (pretreated coffee: PC) ไว้ในภาชนะที่ปิดสนิท เพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป

3. การศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกะ (batch fermentation)

การศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกะ ดัดแปลงวิธีการมาจากวิธีการของ Pilanee *et al*. (2011) โดยกำหนดอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่แตกต่างกันคือ 21:1 24:1 และ 27:1 ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว (PC:CD) เท่ากับ 4:1 โดยน้ำหนัก (คิดเป็นร้อยละ 10 ของปริมาตรทั้งหมด) เติมน้ำกลั่นปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร ในชุดอุปกรณ์การผลิตแก๊สชีวภาพ (ภาพที่ 1) ทำการไล่อากาศในขวดรูปชมพู่โดยใช้แก๊สไนโตรเจน ปิดด้วยจุกยาง ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (35 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 15 วัน หรือจนกว่าปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นคงที่ ทำการบันทึกปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นโดยวิธีการแทนที่น้ำทุก ๆ 3 วัน วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นรายวัน ปริมาณแก๊สสะสม และคุณสมบัติทางกายภาพของวันแรกและวันสุดท้ายของการหมัก



ภาพที่ 1 ชุดอุปกรณ์การผลิตแก๊สชีวภาพ
ที่มา: ดัดแปลงจากกิตติยา และคณะ (2559)

4. การศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกึ่งกะ (fed-batch fermentation)

การผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟร่วมกับมูลวัวโดยใช้กระบวนการหมักแบบกึ่งกะ ทำการทดลองคล้ายกับการผลิตแก๊สชีวภาพโดยใช้กระบวนการหมักแบบกะ โดยกำหนดค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจ เท่ากับ 24:1 มีการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ แบบที่ 1 เติมทุก 2 วัน จำนวน 2 ครั้ง และแบบที่ 2 เติมทุก 3 วัน จำนวน 2 ครั้ง โดยอัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว แบ่งเติมสารอินทรีย์เข้าระบบครั้งแรก 12:3 โดยน้ำหนัก และเติมครั้งละ 4:1 โดยน้ำหนัก เติมเข้าในระบบแบบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ทำการบันทึกแก๊สที่เกิดขึ้นโดยวิธีการแทนที่น้ำทุกวัน วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นรายวัน ปริมาณแก๊สสะสม วิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟฟี (gas chromatography: GC) (ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 8A, Japan) ได้แก่ แก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และคุณลักษณะทางเคมีของวันแรกและวันสุดท้ายของการหมัก

5. การวิเคราะห์

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟที่ไม่ผ่านการปรับและผ่านการปรับสภาพและมูลวัว โดยดัดแปลงมาจากวิธีการของ Horwitz (1980) วิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่าย ปริมาณของแข็งแขวนลอย (suspended soilds: SS) ค่าซีโอดี (chemical oxygen demand: COD) การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด โดยดัดแปลงจากวิธีการของมั่นสิน (2551) การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Walkley and Black (1934) การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส ได้แก่ ปริมาณแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟฟี การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยเครื่อง FT-IR โดยสแกนในช่วงความยาวคลื่น 4,000-600 เซนติเมตร$^{-1}$ เปรียบเทียบกับ Avicel (เซลลูโลสทางการค้า)

6. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ขั้นตอนในการวิจัยและผลการทดลองทำทั้งหมด 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (one-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาคุณลักษณะทางเคมีเบื้องต้นของกากกาแฟและมูลวัว

กากกาแฟเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณเซลลูโลสค่อนข้างต่ำแต่ปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูง เมื่อเทียบกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทอื่น ๆ โดยการปรับสภาพจะช่วยกำจัดลิกนินซึ่งมีสมบัติไปห่อหุ้มหรือเคลือบโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ลิกนินจึงเป็นเหมือนผนังป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าถึงวัตถุดิบได้ง่ายขึ้น (รัชพล, 2558) จากผลการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ของกากกาแฟที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพและมูลวัว จากตารางที่ 1

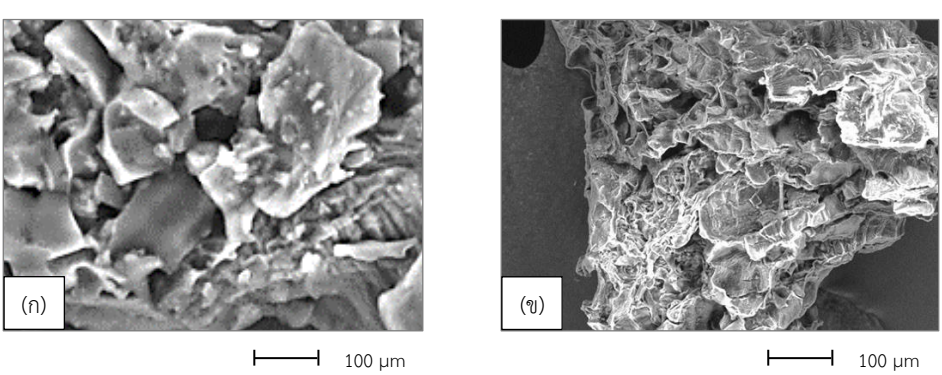
พบว่าเซลลูโลสมีการเพิ่มปริมาณขึ้นจากร้อยละ 3.50 เป็นร้อยละ 7.48 ส่วนลิกนินมีปริมาณลดลงจากร้อยละ 38.15 เป็นร้อยละ 17.37 นอกจากนี้องค์ประกอบอื่น ๆ ได้แก่ สารประกอบอนินทรีย์ เช่น เถ้ามีปริมาณลดลงจากร้อยละ 49.65 เป็นร้อยละ 20.50 แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพโดยสารละลายด่างส่งผลต่อโครงสร้างของตัวอย่างและองค์ประกอบทางเคมีโดยเฉพาะเซลลูโลสและลิกนิน สอดคล้องกับงานวิจัยของสิริวรรณ (2561) และน้ำหนักตัวอย่างที่เหลือหลังการปรับสภาพคิดเป็นร้อยละ 75.58 ส่วนมูลวัวมีปริมาณเซลลูโลสเท่ากับร้อยละ 2.16 ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ (2561) ที่กล่าวไว้ว่ามูลวัวส่วนใหญ่มีปริมาณเซลลูโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 1.60-4.40

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพและมูลวัว

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	กากกาแฟ		มูลวัว
	ไม่ผ่านการปรับสภาพ	ผ่านการปรับสภาพ	
เซลลูโลส	3.50±0.08	7.48±0.24	2.16±0.04
เฮมิเซลลูโลส	29.48±0.44	33.87±0.27	30.01±0.05
ลิกนิน	38.15±0.45	17.37±0.15	15.92±0.15
อื่น ๆ (เถ้า)	49.65±0.21	20.50±0.42	51.90±0.10
น้ำหนักที่เหลือ	100.00±0.00	75.58±0.11	

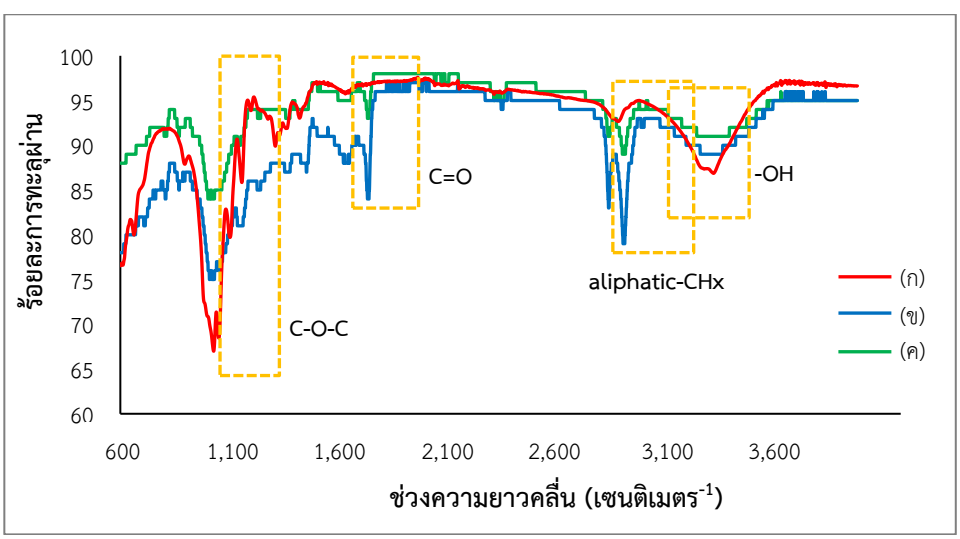
หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างภายนอกบริเวณพื้นที่ผิวของกากกาแฟโดยกล้องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เปรียบเทียบระหว่างกากกาแฟที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ภาพที่ 2 ก) และกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพ (ภาพที่ 2 ข) พบว่ากากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพมีพื้นที่ผิวสัมผัสและรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้เพิ่มโอกาสในการย่อยสลายของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของรัชพล (2558) กล่าวว่าการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะมีความเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการกำจัดส่วนที่ไม่เป็นระเบียบของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกไป เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



ภาพที่ 2 ลักษณะโครงสร้างภายนอกบริเวณพื้นที่ผิวของกากกาแฟที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ก) และที่ผ่านการปรับสภาพ (ข)

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของกากกาแฟด้วยเครื่อง FT-IR โดยศึกษาโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ด้วยการดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟาเรด เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 3 พบว่าลักษณะของพีคที่ปรากฏจำแนกออกได้ 3 ช่วงหลัก ๆ ตามหมู่ฟังก์ชันที่เป็นส่วนประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยช่วงเลขคลื่น 2,922-2,923 เซนติเมตร$^{-1}$ แสดงการสั่นของ aliphatic-CHx ซึ่งเป็นโครงสร้างของเซลลูโลส ช่วงเลขคลื่น 1,638-1,743 เซนติเมตร$^{-1}$ แสดงหมู่ C=O แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส และช่วงความยาวคลื่น 1,010-1,029 เซนติเมตร$^{-1}$ แสดงการสั่นของหมู่ C-O-C ใน arty-alkyl ether ของลิกนิน เมื่อพิจารณาความเปลี่ยนแปลงระหว่าง FT-IR spectrum ของกากกาแฟที่ไม่ผ่านการปรับสภาพกับกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ Avicel พบว่าเมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้มีปริมาณของลิกนินลดลง ส่วนปริมาณของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสิริวรรณ (2561) ที่พบว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อโครงสร้างทางเคมีของลิกนินทำให้สัดส่วนปริมาณเซลลูโลสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การนำตัวอย่างประเภทลิกโนเซลลูโลสที่ผ่านการปรับสภาพไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีศักยภาพมากขึ้น



ภาพที่ 3 FT-IR spectrum ของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพ Avicel (เซลลูโลสทางการค้า) (ก) กากกาแฟที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ข) และกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพ (ค)

นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีเบื้องต้นของกากกาแฟที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพและมูลวัว (ตารางที่ 2) พบว่าในส่วนของกากกาแฟมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงจาก 9.25 เป็น 7.80 สำหรับปริมาณของแข็งทั้งหมดมีปริมาณลดลงจาก 866.67 มิลลิลิตรต่อกรัม เป็น 765.48 มิลลิลิตรต่อกรัม และปริมาณของแข็งระเหยง่ายมีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 489.72 มิลลิลิตรต่อกรัม เป็น 550.46 มิลลิลิตรต่อกรัม จะเห็นได้ว่าการปรับสภาพนั้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะเบื้องต้นทางเคมีของกากกาแฟ เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปทำให้สารอินทรีย์บางส่วนในกากกาแฟลดลง แต่สามารถเพิ่มองค์ประกอบของปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพและการปรับสภาพยังส่งผลต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ให้ง่ายมากขึ้น ทำให้ขั้นตอนการผลิตแก๊สเกิดขึ้นได้มากขึ้นเช่นกัน (กิตติยา และคณะ, 2559) ในขณะที่มูลวัวมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 64.19 มิลลิลิตรต่อกรัม และปริมาณของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 13.33 มิลลิลิตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของจุฑาภรณ์ และนาวิน (2560) มีปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณของแข็งระเหยง่ายมีค่าน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากมูลวัวที่ใช้เป็นมูลวัวแห้งที่ผ่านการย่อยสลายมาแล้วทำให้ปริมาณของสารอินทรีย์ในมูลที่ใช้อาจจะแตกต่างจากมูลวัวสด และการสุ่มตัวอย่างมาจากแหล่งที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2 คุณลักษณะทางเคมีเบื้องต้นของกากกาแฟที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพและมูลวัว

ลักษณะทางเคมี	กากกาแฟ		มูลวัว
	ไม่ผ่านการปรับสภาพ	ผ่านการปรับสภาพ	
ความเป็นกรด-ด่าง	9.25±0.28	7.80±0.12	8.25±0.15
ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (มิลลิลิตรต่อกรัม)	489.72±1.37	550.46±1.26	13.33±1.18
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (มิลลิลิตรต่อกรัม)	886.67±1.82	765.48±3.02	64.19±1.06

หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

2. ผลการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกะ

จากการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัว พบว่าในระยะเวลา 3 วันแรก ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นรายวันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัวที่อัตราส่วน 24:1 ให้ปริมาณแก๊สชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 44.50 มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย ซึ่งอาจอยู่ในช่วงของอะซิโดจีเนซิส (acidogenesis) และเริ่มลดลงเนื่องจากเข้าสู่ช่วงเมทาโนจีเนซิส (methanogenesis) ชุดควบคุมช่วงวันที่ 6 มีแนวโน้มการผลิตที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการหมักร่วมกันของกากกาแฟร่วมกับมูลวัวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ เมื่อเทียบกับการใช้มูลวัวเพียงอย่างเดียวและกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพ เนื่องจากมีการผสมมูลวัวที่ทำหน้าที่เหมือนเป็นแหล่งจุลินทรีย์ และอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 24:1 ดีที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kim *et al.* (2017) ส่งผลให้ขั้นตอนการผลิตเมทาโนจีเนซิสเกิดได้อย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 3 ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุดของของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่แตกต่างกันในการหมักแบบกะ เป็นระยะเวลา 15 วัน

อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (โดยน้ำหนัก)	ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสม (มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย)
กากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพ (21:1)	28.08±2.58[d]
กากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพ (24:1)	35.10±2.31[c]
กากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพ (27:1)	28.75±0.43[d]
มูลวัว (21:1)	35.50±1.19[c]
อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว (21:1)	36.00±0.29[c]
อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว (24:1)	44.50±1.53[a]
อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว (27:1)	39.50±1.32[b]

หมายเหตุ: - a b และ c เป็นค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)
- ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

จากตารางที่ 3 แสดงปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมระหว่างชุดควบคุม (แบบกะ) และอัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว ที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่แตกต่างกัน โดย อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัวที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 24:1 ให้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงที่สุดเท่ากับ 44.50 มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมแต่ละอัตราส่วน จากรายงานการวิจัยของ Kim *et al.* (2017) กล่าวว่าค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนของกากกาแฟที่เท่ากับ 23:1 เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ และเป็นช่วงที่เหมาะสม คือ อยู่ในช่วงของ 20-30 (Yen and Brune, 2007) ถ้าค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงมากแบคทีเรียในกลุ่มเมทาโนเจน (methanogen) จะใช้ไนโตรเจนหมดอย่างรวดเร็วส่งผลให้การผลิตแก๊สต่ำ ในทางกลับกันถ้าค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำมาก ๆ จะทำให้ไนโตรเจนมีมากเกินไปและไปเกาะกันเป็นแอมโมเนีย ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 8.50 และเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่ผลิตมีเทนได้

การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีในวันแรกและวันสุดท้ายของการผลิตแก๊สชีวภาพ จากตารางที่ 4 พบว่าแต่ละอัตราส่วนมีปริมาณสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายในวันแรกของระบบจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเวสารัชและคณะ (2558) ที่กล่าวว่าการหมักแบบกะเป็นการหมักที่มีการเติมวัสดุในการหมักเพียงครั้งเดียว ดังนั้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณสารอินทรีย์ (ค่าปริมาณของแข็งระเหยง่าย) จะลดลง เพราะจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างต่อเนื่อง โดยผลการทดลองมีการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 7.95-17.50 การกำจัดปริมาณของแข็งระเหยง่ายอยู่ในช่วงร้อยละ 16.84-48.50 ส่วนช่วงอุณหภูมิในการศึกษา พบว่าอยู่ในช่วง 32-35 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 6-7 สอดคล้องกับกิตติยา และคณะ (2559) เพราะเมทาโนเจนทนต่ออุณหภูมิที่ต่ำหรือสูงมากเกินไป โดยการทำงานของระบบนี้จะอยู่ในช่วงเมโซฟิลิก (mesophilic period) (ประมาณ 20-45 องศาเซลเซียส) และค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวภาพนั้นควรจะอยู่ในช่วง 6.8-7.2

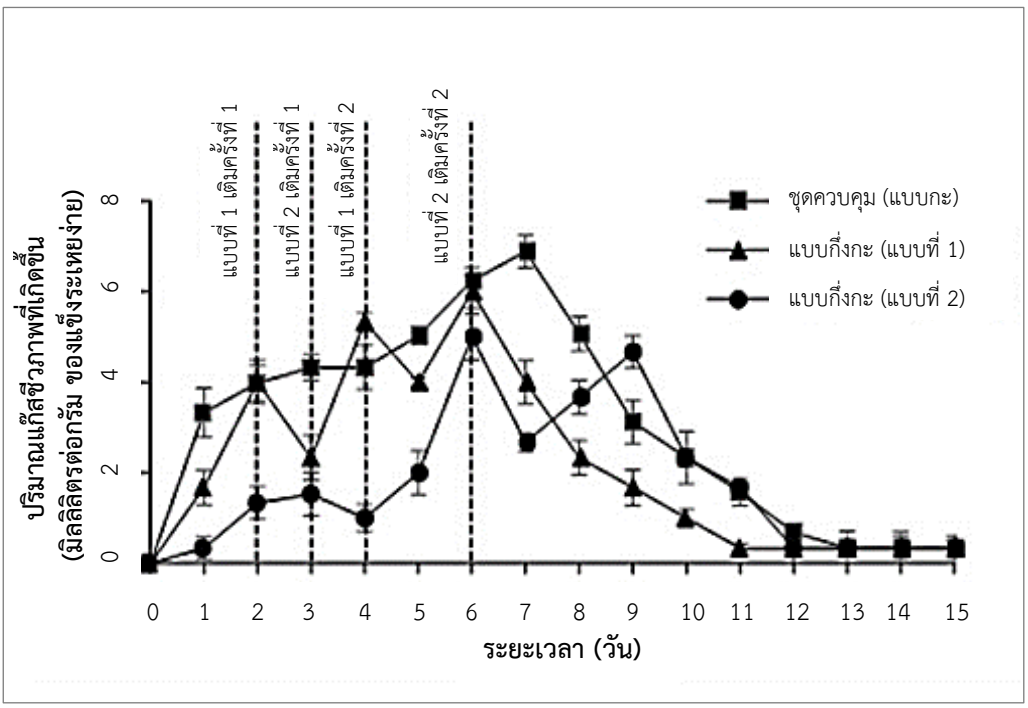
ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีในวันแรกและวันสุดท้ายของการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกะ ในอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่แตกต่างกันใน วันที่ 0 และวันที่ 15

อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (โดยน้ำหนัก)	ลักษณะทางเคมี (มิลลิลิตรต่อกรัม)	วันที่ 0	วันที่ 15	ร้อยละการกำจัด
มูลวัว (21:1)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	526.18±0.01	484.37±1.59	7.95
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	330.17±1.59	274.57±0.78	16.84
มูลวัว (24:1)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	564.46±0.87	513.49±0.89	9.03
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	327.15±0.01	255.17±0.36	22.00
มูลวัว (27:1)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	550.78±1.69	500.22±1.89	9.18
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	362.46±2.89	286.27±2.69	21.02
มูลวัว (21:1)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	300.13±0.36	275.89±1.98	8.08
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	60.48±1.89	46.47±5.69	23.16
อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว (21:1)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	600.14±1.91	548.48±4.32	8.61
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	331.47±0.89	248.47±1.58	25.04
อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว (24:1)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	663.27±0.01	547.2±2.69	17.50
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	434.58±1.58	223.79±1.01	48.50
อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว (27:1)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	598.38±0.96	545.35±0.89	8.86
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	343.45±0.23	249.18±1.55	27.45

หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

3. ผลการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกึ่งกะ

จากการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวในกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ โดยใช้อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมจากการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกะเท่ากับ 24:1 ทำการศึกษารูปแบบการเติมสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ การหมักแบบกึ่งกะ แบบที่ 1 เติมวันที่ 2 และ 4 และแบบที่ 2 เติมวันที่ 3 และ 6 จากภาพที่ 4 พบว่าการผลิตแก๊สทั้งสองแบบจะเกิดปริมาณแก๊สชีวภาพดีในช่วง 7 วันแรก จากนั้นจะเริ่มลดลงและคงที่ตั้งแต่วันที่ 12 โดยทั้งสองแบบจะมีปริมาณแก๊สชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากทุกครั้งหลังจากที่มีการแบ่งเติมสารอินทรีย์ลงไปในระบบซึ่งทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เรื่อย ๆ และแปรสภาพเป็นแก๊สมีเทนได้ ในขณะที่การเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักเพียงครั้งเดียว (แบบกะ) ทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์และแปรสภาพเป็นแก๊สมีเทนได้ดีในช่วงแรก นอกจากนี้สารอาหารมีจำกัดต่อความต้องการของจุลินทรีย์ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพที่ลดลง โดยพบว่า แบบที่ 1 สามารถผลิตแก๊สได้ดีกว่าจึงส่งผลให้ผลิตแก๊สชีวภาพได้ดีกว่า



ภาพที่ 4 ปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกึ่งกะที่อัตราส่วนการเติมสารอินทรีย์ ๆ เป็นระยะเวลา 15 วัน

ปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพสะสมที่ได้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุม (แบบกะ) และการหมักแบบกึ่งกะ (แบบที่ 1 และแบบที่ 2) พบว่าชุดควบคุม (แบบกะ) มีปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมเท่ากับ 47.65 มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การหมักแบบกึ่งกะ แบบที่ 1 มีแนวโน้มการผลิตแก๊สชีวภาพสะสมได้ดีกว่า แบบที่ 2 ซึ่งมีปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมเท่ากับ 38.00 มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย และ 27.67 มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น พบว่าชุดควบคุม (แบบกะ) และการหมักกึ่งกะ แบบที่ 1 ให้ปริมาณแก๊สมีเทนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับร้อยละ 18.40 และ 20.12 โดยปริมาตร ตามลำดับ ส่วนปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าชุดควบคุม (แบบกะ) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับร้อยละ 22.80 โดยปริมาตร ดังตารางที่ 5 ซึ่งจากการทดลอง พบว่าปริมาณของแก๊สมีเทนที่ได้มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกันตามทฤษฎี (ร้อยละ 50-70) ซึ่งอาจจะมีปัจจัยมาจากหลายสาเหตุ เช่น แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นอาจจะยังมีสัดส่วนของความชื้นค่อนข้างสูง จึงควรเพิ่มขั้นตอนในการกำจัดความชื้นเพื่อให้มีสัดส่วนของแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น เช่น การใช้ตัวดูดความชื้น (Mamun and Tori, 2017) นอกจากนี้อาจเกิดจากระบบการหมักที่เป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์ มีการรบกวนระบบเนื่องจากขั้นตอนการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ การที่วัสดุหมักอัดตัวกันแน่นมีผลต่อการกวนผสมส่งผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยตรงทำให้ได้แก๊สมีเทนค่อนข้างต่ำ (รัชพล, 2558)

ตารางที่ 5 ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพในวันที่มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้นสูงสุดของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกึ่งกะที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 24:1 เป็นระยะเวลา 15 วัน

การผลิตแก๊สชีวภาพ	ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสม (มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย)	ร้อยละโดยปริมาตร	
		แก๊สมีเทน	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
ชุดควบคุม (แบบกะ)	47.65±12.33[a]	18.40±1.13[a]	22.80±2.30[a]
แบบกึ่งกะ แบบที่ 1	38.00±9.30[b]	20.12±0.94[a]	6.47±0.71[b]
แบบกึ่งกะ แบบที่ 2	27.67±6.82[c]	9.75±0.51[b]	4.10±0.47[b]

หมายเหตุ: - a b และ c เป็นค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)
- ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

ผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีในวันแรกและวันสุดท้ายของการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกึ่งกะที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 24:1 พบว่าชุดควบคุม (แบบกะ) และแบบกึ่งกะ แบบที่ 1 และแบบที่ 2 ในวันสุดท้ายมีปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายที่ลดลงจากวันแรก ซึ่งบอกถึงความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของเชื้อจุลินทรีย์ โดยการหมักแบบกึ่งกะมีร้อยละการกำจัดของ ปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วง 12.97-20.70 และร้อยละการกำจัดปริมาณของแข็งระเหยง่าย อยู่ในช่วง 41.97-53.12 ซึ่งแบบที่ 1 มีร้อยละการกำจัดมากที่สุด ดังตารางที่ 6 และอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการผลิตแก๊สชีวภาพเฉลี่ยอยู่ที่ 34 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงมีโซฟิลิคเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 5.0-6.0

ตารางที่ 6 ผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีในวันแรกและวันสุดท้ายของการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกึ่งกะ ที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 24:1

การผลิตแก๊สชีวภาพ	ลักษณะทางเคมี (มิลลิลิตรต่อกรัม)	วันที่ 0	วันที่ 15	ร้อยละการกำจัด
ชุดควบคุม (แบบกะ)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	779.17±1.25	647.53±0.69	16.89
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	434.58±7.95	238.19±1.77	46.34
แบบกึ่งกะ แบบที่ 1	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	589.15±1.98	677.2±0.85	20.70
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	434.52±0.58	203.71±5.41	53.12
แบบกึ่งกะแบบที่ 2	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	559.82±2.01	487.2±1.85	12.97
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	454.58±0.92	263.79±0.01	41.97

หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

การอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับการใช้มูลวัวด้วยกระบวนหมักแบบกะและแบบกึ่งกะ พบว่ากากกาแฟเป็นชีวมวลทางอุตสาหกรรมเหลือทิ้งที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ได้ยาก จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ทั้งทางเคมีและทางกายภาพส่งผลให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ (รพีพรรณ, 2560; ณัฐพงศ์, 2562) แต่ทั้งนี้ในส่วนของการการผลิตแก๊สชีวภาพ พบว่าปริมาณของแก๊สมีเทนที่ได้มีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบตามทฤษฎี (ร้อยละ 50-70) ซึ่งอาจจะมีปัจจัยมาจากหลายสาเหตุ เช่น แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นอาจจะยังมีสัดส่วนของความชื้นค่อนข้างสูง จึงควรเพิ่มขั้นตอนในการกำจัดความชื้นเพื่อให้มีสัดส่วนของแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น เช่น การใช้ตัวดูดความชื้น (Mamun and Tori, 2017) อีกทั้งอาจเกิดจากระบบการหมักที่ยังไม่สมบูรณ์ เนื่องจากขั้นตอนการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ การอัดตัวกันของวัสดุหมักส่งผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้ได้แก๊สมีเทนค่อนข้างต่ำ (รัชพล, 2558)

สรุปผลการวิจัย

การปรับสภาพกากกาแฟก่อนการผลิตแก๊สชีวภาพจะช่วยเพิ่มศักยภาพของวัตถุดิบในการนำไปใช้ผลิตแก๊ส เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทั้งทางเคมีและทางกายภาพ ส่งผลให้การทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ง่ายมากขึ้น ส่วนในการผลิตแก๊สชีวภาพพบว่าในสภาวะการหมักแบบกะที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 24:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยเมื่อนำไปผลิตแก๊สชีวภาพ พบว่าในสภาวะการหมักแบบกะจะให้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 44.50 มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย มีปริมาณแก๊สมีเทนร้อยละ 18.40 และปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 22.80 ส่วนในสภาวะการหมักแบบกึ่งกะ โดยการเติมสารอินทรีย์ทุก 2 วัน เป็นเวลา 2 ครั้ง (แบบที่ 1) ได้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 38.00 มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย มีปริมาณแก๊สมีเทนร้อยละ 20.12 และปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 6.47 จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวมีศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยสามารถใช้ได้ทั้งวิธีการหมักแบบกะและแบบกึ่งกะ ทั้งนี้หากมีการศึกษาเพิ่มเติมก็สามารถเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบที่สามารถนำไปต่อยอดเป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากหลักสูตรวิทยาศาสตร์ชีวภาพ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2561). *คู่มือฝึกอบรมภาคปฏิบัติด้านพลังงานทดแทน การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบต่าง ๆ*. อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

กิตติยา ป้อมเงิน ประภา โซ๊ะสลาม และรัชพล พะวงศ์รัตน์. (2559). การผลิตแก๊สชีวภาพจากผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการนึ่งร่วมกับมูลวัวโดยกระบวนการหมักแบบกะ. *วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์*, 8(3), 129-139.

จุฑาภรณ์ ชนะถาวร และนาวิน พูดน้อย. (2560). การหมักร่วมของกากกาแฟและเปลือกเมล็ดกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลโคเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 (วิทยาลัยพลังงานทดแทน)* (หน้า 112-119). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

ณัฐพงศ์ ตันติวัฒนพันธ์. (2562). กากกาแฟ จากแก้วกาแฟสู่แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนสำหรับผลิตภัณฑ์ชีวภาพ. *วารสารสิ่งแวดล้อม*, 23(1), 1-8.

นฤภัทร ตั้งมั่นคงวรกูล และพัชรี ปรีดาสุริยะชัย. (2558). การศึกษากากกาแฟและกากชามาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิงอัดแท่ง. *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 7(13), 15-26.

นัฐวุฒิ เพ็ชรชาติ พิมพ์ชนก ธาตรีวิจิตร หนึ่งหทัย ธราพร ศราวุฒิ ชูโลก และนวรัตน์ สีตะพงษ์. (2566). สมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวลอัดแท่งและถ่านชีวมวลอัดแท่งจากเปลือกกระท้อนและเปลือกมังคุด. *วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 42(1), 39-49.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. (2551). *คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ*. (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รพีพรรณ กองตมู. (2560). กากกาแฟ: มูลค่าเพิ่มและการใช้ประโยชน์. ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 5* (หน้า 342-350). ราชบุรี: มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง.

รัชพล พะวงศ์รัตน์. (2558). ศักยภาพและการใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ. *วารสารวิชาการปทุมวัน*, 5(14), 67-78.

เวสารัช สุนทรชัยบรูณ์ ธัญวิทย์ พลายงาม และรัชพล พะวงศ์รัตน์. (2558). การปรับสภาพขุยมะพร้าวเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนร่วมกับมูลวัว. *วารสารวิชาการและวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร*, 9(2), 19-31.

สิริวรรณ ลี้ศิริสรรพ์. (2561). สมบัติของเส้นใยใบสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี. *กรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 7(7), 25-31.

อรุณี ศุภสินสาธิต. (2555). พลังงานจากชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสสูง. *วารสารสิ่งแวดล้อม*, 17(2), 36-43.

อุตสาหกรรมฐานชีวภาพ. (2561). บทที่ 33 รายละเอียดข้อมูลสารเคมีชีวภาพประเภทลิกนิน (lignin). ใน *รายงานการศึกษาฉบับสมบูรณ์ โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลพื้นฐานอุตสาหกรรมชีวภาพ* (หน้า 1-16). กรุงเทพ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

Corro, G., Paniagua, L., Pal, U., Bañuelos, F. and Rosas, M. (2013). Generation of biogas from coffee-pulp and cow dung co-digestion: Infrared studies of post combustion emissions. *Energy Conversion and Management*, 74, 471-481, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.017.

Horwitz, W. (1980). *Official methods of analysis of the association of official analytical chemists.* (13th ed). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.

International Coffee Organization. (2022). *World coffee consumption*. Retrieved 9 June 2022, from: https://www.ico.org/Market-Report-21-22-e.asp.

Kim, J., Kim, H. and Lee, C. (2017). Ulva biomass as a co-substrate for stable anaerobic digestion of spent coffee grounds in continuous mode. *Bioresource Technology*, 241, 1182-1190, doi: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.012.

Mamun, M.R.A. and Tori, S. (2017). Enhancement of methane concentration by removing contaminants from biogas mixtures using combined method of absorption and adsorption. *International Journal of Chemical Engineering*, 17, doi: https://doi.org/10.1155/2017/7906859.

Pilanee, V., Waraporn, A., Wuttinunt, K. and Sarima, S. (2011). The potential of coconut husk utilization for bioethanol production. *Kasetsart Journal : Natural Science*, 45(1), 159-164.

Walkley, A. and Black, I.A. (1934). An examination of degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-37.

Yen, H.W. and Brune, D. (2007). Anaerobic co-digestion of algae sludge and waste paper to produce methane. *Bioresource Technology*, 98(1), 130-134, doi: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.010.

Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F. and Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 42, 35-53, doi: https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.01.001.

การศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปและสมบัติทางกลของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว

The Study of Compression Process and Mechanical Properties of Food Containers from Coconut Shell Fiber

วรพงค์ บุญช่วยแทน[1*] ธัญวลัย จิรันดร[2] รัสมนต์ ยุระพันธุ์[3] ชาตรี หอมเขียว[4]
จตุพร ใจดำรงค์[1] ศศิประภา เต็มสิริมงคล[1] และปณทัศน์ หนูเขียว[1]
Worapong Boonchouytan[1*] Tanwalai Chirandorn[2] Russamon Yuraphan[3]
Chatree Homkhiew[4] Jatuporn Jaidumrong[1] Sasiprapa Temsirimongkon[1]
and Panathat Nukhiao[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว และศึกษาสมบัติทางกลของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว ปัจจัยในการศึกษา คือ การอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 2 ระดับ คือ 150 และ 170 องศาเซลเซียส และเวลาในการอัดขึ้นรูปร้อน 3 ระดับ คือ 4 6 และ 8 นาที ที่ความดันกดอัด 1,000-2,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางกล ประกอบด้วย ความต้านทานแรงกดอัดด้านบน ความต้านทานแรงกดอัดด้านข้าง ความต้านทานแรงดึง และการดูดซึมน้ำ ผลการทดสอบพบว่า ค่าการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านบนและด้านข้างเฉลี่ยสูงสุด 1.90 และ 2.58 เมกะปาลคาส ตามลำดับ ที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 8 นาที ค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 2.48 เมกะปาลคาส ที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 8 นาที และค่าการดูดซึมน้ำช้าสุด 14 นาที 36 วินาที ที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 170 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 8 นาที ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว คือ การอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 8 นาที เนื่องจากได้ภาชนะบรรจุอาหารที่มีผิวสัมผัสที่เรียบทั่วกันทั้งภาชนะ มีความแข็งแรง คงสีธรรมชาติเดิม และมีสมบัติทางกลที่ดี นอกจากนี้ผลการประเมินความพึงพอใจในภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว พบว่ามีค่าคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ย 3.19 คะแนน ที่ระดับความพึงพอใจปานกลาง

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[2] สาขาวิชาศึกษาทั่วไป คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[3] สาขาวิชาระบบสารสนเทศ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[4] สาขาวิชาวิศวกรรมการอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[*] Corresponding author e-mail: worapong.b@rmutsv.ac.th

Received: 19 November 2022, Revised: 23 February 2023, Accepted: 3 March 2023

คำสำคัญ: กระบวนการอัดขึ้นรูป ภาชนะบรรจุอาหาร เส้นใยเปลือกมะพร้าว

Abstract

The objectives of this research were to study the production of the food package made of coconut husk fiber and properties of the food package made of coconut husk fiber. Factors in the study were hot compression molding with two levels of temperature, 150 and 170 degrees Celsius and three levels of time required in the hot compression molding process, namely, 4, 6, and 8 minutes at 1,000-2,000 pound-force per square inch. Mechanical properties were measured, which included the maximum average compressive strength of the top view, the maximum average compressive strength of the side view, the maximum average tensile strength, and water absorption. The test results indicated that the maximum average compressive strength of the top view and side view was 1.90 and 2.58 mega Pascal (MPa) at 150 degrees Celsius. The time required for the hot compression molding was 8 minutes, and the maximum tensile strength of the was 2.48 MPa at 150 degrees Celsius. The time required for the hot compression molding was 8 minutes, and water absorption was 14 minutes 60 seconds at 170 degrees Celsius. The time required for the hot compression molding was 8 minutes. Therefore, the appropriate status for the hot compression molding process of the food package made of coconut husk fiber was 150 degrees Celsius for 8 minutes as the package had an overall smooth texture and was strong. Its natural color can be maintained with good mechanical properties. According to the survey on satisfaction with the food package made of coconut husk fiber, it was found that the mean satisfaction score was 3.19, at a moderate level.

Keywords: Compression process, Food containers, Coconut shell fiber

บทนำ

บรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมกำลังได้รับความสนใจมากขึ้นจากหลาย ๆ กลุ่มอายุ สาเหตุเนื่องมาจากการตื่นตัวจากมลพิษทางสิ่งแวดล้อมและภัยธรรมชาติต่าง ๆ ที่เกิดเพิ่มขึ้นในทุกปี สาเหตุทั้งจากการตัดไม้ทำลายป่า ของเสียจากอุตสาหกรรม และการเผาขยะซึ่งมีปริมาณมากขึ้นและกำจัดได้ยากในปัจจุบัน นอกจากนี้กลุ่มประเทศธุรกิจหลัก ๆ ที่ได้เล็งเห็นความสำคัญของผลิตภัณฑ์รักษ์สิ่งแวดล้อมและผลิตภัณฑ์ทดแทนพลาสติก ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่มีความมั่นคงและมีความพร้อมในด้านวัตถุดิบมวลชีวภาพ (biomass) ทั้งผลิตผลทางการเกษตรมากมาย จึงเป็นโอกาสดีในการนำมาวิจัยและพัฒนาเป็นพลาสติกชีวภาพ

ปัจจุบันมีการศึกษาการนำผลิตผลทางการเกษตรมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกชีวภาพหรือบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ (ลดามาศ และคณะ, 2559) เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร แต่ปัญหาที่เกิดขึ้น คือ บรรจุภัณฑ์หรือพลาสติกชีวภาพที่ได้ยังมีข้อจำกัดในการใช้ เนื่องจากเสียรูปได้ง่ายเมื่อได้รับความชื้นหรือสัมผัสกับสารเคมีต่าง ๆ สมบัติเชิงกลไม่ดี ไม่ยืดหยุ่น แตกเปราะได้ง่าย เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติโดยการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นหรือเติมสารเติมแต่งเพิ่มสมบัติ และราคาที่แพงกว่าพลาสติกจากปิโตรเคมี จึงทำให้การนำไปใช้งานยังอยู่ในวงจำกัด

เส้นใยธรรมชาติโดยทั่วไป เช่น ปอ ปอกระเจา ป่านศรนารายณ์ ป่าน ไผ่ เส้นใยมะพร้าว เส้นใยกล้วย เส้นใยสัปปะรด เส้นใยไหม ฝ้าย ไม้ เป็นต้น เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่สามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติม (filler) ซึ่งมีข้อดีหลายประการ เนื่องจากมีราคาถูก ความหนาแน่นต่ำ ความแข็งแรง ความคงทน โดยในบรรดาเส้นใยเหล่านี้ เส้นใยมะพร้าวเป็นเส้นใยที่มีการเพาะปลูกเป็นจำนวนมากในประเทศไทย และมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น เป็นวัสดุประดับพื้นเส้นใย และเชือก เป็นต้น เนื่องจากมีสมบัติที่ผิวนอกแข็ง มีความทนทาน แต่อย่างไรก็ตามเส้นใยมะพร้าวที่เป็นเศษเหลือจากโรงงานผลิตเส้นใยมะพร้าวซึ่งมีปริมาณมากยังมีการนำมาใช้ประโยชน์อยู่น้อย (ศิริพร และคณะ, 2558) โดยมะพร้าวมีปริมาณการปลูกเพิ่มขึ้นในปีพ.ศ. 2564 มีเนื้อที่ให้ผลผลิตคาดว่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.796 ไร่ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปีพ.ศ. 2563 ร้อยละ 2.31 การส่งออกมะพร้าวผลของไทยในปีพ.ศ. 2564 คาดว่าจะมีปริมาณการส่งออกมะพร้าวผลเพิ่มขึ้นกว่าในปีพ.ศ. 2563 เนื่องจากปริมาณผลผลิตมะพร้าวผลภายในประเทศเพิ่มขึ้น โดยตั้งแต่เดือนมกราคมถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2564 มีการส่งออกมะพร้าวผลปริมาณ 132,251 ตัน มูลค่า 110.25 ล้านเหรียญสหรัฐ (Global Trade Atlas (GTA), 2564) และมีปริมาณการส่งออกสินค้ากะทิสำเร็จรูปในปีพ.ศ. 2563 ปริมาณ 271,711 ตัน คิดเป็นมูลค่า 427.88 ล้านเหรียญสหรัฐ (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์, 2564) ซึ่งผลจากการดำเนินการส่งออกและจำหน่ายในประเทศ พบว่ามีเศษเหลือใช้จากกระบวนการผลิตคือ “เส้นใยเปลือกมะพร้าว” นิยมใช้ทำพรมเช็ดเท้า เสื่อ เชือก ทำที่นอน เก้าอี้นวมสปริง และเครื่องเรือนอื่น ๆ ในลักษณะเดียวกัน แต่จากการนำมาใช้งานยังไม่สอดรับกับสมบัติเด่นของเส้นใยเปลือกมะพร้าว คือ ความเหนียวของเส้นใยและการยึดติดกันอย่างเหนียวแน่น ในอดีตมีผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง โดยนำวัสดุทางการเกษตรมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังนั้นจึงขอยกตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้ ปัตติยา และคณะ (2565) ศึกษาคุณสมบัติของภาชนะที่ผลิตจากเส้นใยหญ้าขจรจบและเส้นใยผักตบชวา และศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการทำภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยทดลองผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ ทั้งหมด 12 สูตร จากนั้นศึกษาคุณสมบัติของภาชนะ ได้แก่ การวัดความหนาโดยใช้ไมโครมิเตอร์ (micrometer) การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ การทดสอบแรงดึง และการหาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ ศศิกานต์ และคณะ (2562) ศึกษาการผลิตโฟมที่ย่อยสลายได้จากแป้งข้าวเจ้าเสริมแรงด้วยเส้นใยจากผักตบชวา มีปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบด้วย เส้นใยผักตบชวาร้อยละ 0-20 กลีเซอรอลร้อยละ 0-15 และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 0-7.5 โดยใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นวัตถุดิบหลัก ใช้กลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ ใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารเติมแต่ง ใช้เส้นใยผักตบชวาเป็นสารเสริมแรง และใช้น้ำเป็นตัวช่วยในการผสมส่วนประกอบทั้งหมดเข้าด้วยกัน และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของโฟมที่ได้ ประกอบด้วย

ค่าความทนต่อแรงดัดโค้ง ค่าการดูดซับน้ำ ทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA เพื่อหาค่าความแปรปรวนของการทดลอง สิปราง และคณะ (2564) มุ่งเน้นสร้างเครื่องมือและเทคโนโลยีเครื่องอัดร้อนเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในกระบวนการทดลองผลิตวัสดุทดแทนจากใบข้าวโพดและเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยเครื่องอัดร้อนที่ออกแบบขึ้นนี้ สามารถควบคุมอุณหภูมิความร้อนได้ถึง 140 องศาเซลเซียส กำหนดแรงอัดด้วยระบบไฮโดรลิคได้ถึง 2,500 กิโลกรัมหรือเท่ากับ 2.5 ตัน ควบคุมระยะเวลาในการอัดแบบอัตโนมัติ ลดามาศ และคณะ (2559) มุ่งเน้นหาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในเขตพื้นที่จังหวัดเชียงรายมาใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมทดแทนการใช้ถุงพลาสติก โดยได้นำใบสับปะรด ใบข้าวโพด และฟางข้าวมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยทำการแปรรูปวัสดุทางการเกษตรดังกล่าวเป็นเส้นใยเพื่อศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ต้นแบบเพื่อศึกษาการนำไปใช้จริง กิตติศักดิ์ และคณะ (2564) ออกแบบและสร้างเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากวัสดุธรรมชาติเพื่อนำมาทำการอัดขึ้นรูปภาชนะใส่อาหาร ประกอบด้วยปั้มลมขนาด 8 บาร์ กระบอกลมนิวเมติกส์ ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า วาล์วควบคุมต่าง ๆ และชุดรับแรงกดรวมถึงแม่พิมพ์ ภาชนะใส่อาหาร ซึ่งเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากวัสดุธรรมชาตินี้สามารถอัดขึ้นรูปภาชนะใส่อาหารได้ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร ได้ครั้งละ 1 ชิ้น จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ได้นำเสนอผลการศึกษาที่แตกต่างกันในวัสดุที่นำมาผลิตเป็นภาชนะและการออกแบบและสร้างเครื่องอัดขึ้นรูปที่มีศักยภาพที่ต่างกัน

ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อมเพื่อตอบโจทย์สังคม คือ การศึกษาวิจัยเพื่อนำเอาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร คือ เส้นใยเปลือกมะพร้าว มาแปรรูปในรูปแบบของวัสดุทดแทน โดยศึกษาปัจจัยที่เหมาะสม ประกอบด้วย อุณหภูมิและเวลาในการอัดขึ้นรูปร้อน ศึกษาสมบัติทางกล ประกอบด้วย ความต้านทานแรงกดอัดด้านบน ความต้านทานแรงกดอัดด้านข้าง ความต้านทานแรงดึง และการดูดซึมน้ำ และการประเมินความพึงพอใจในภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว รวมถึงการพัฒนาเครื่องมือให้เหมาะสมตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบจนกระทั่งผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ เพื่อให้เหมาะกับวัตถุดิบแต่ละชนิด ซึ่งความสำเร็จจากการวิจัยนี้จะช่วยเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรและประเทศ และเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ของประเทศให้มีศักยภาพในการแข่งขันในตลาดโลกมากยิ่งขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว มีขั้นตอนกระบวนการอัดขึ้นรูป (วรพงค์ และชาตรี, 2565) และการทดสอบสมบัติทางกล ดังนี้

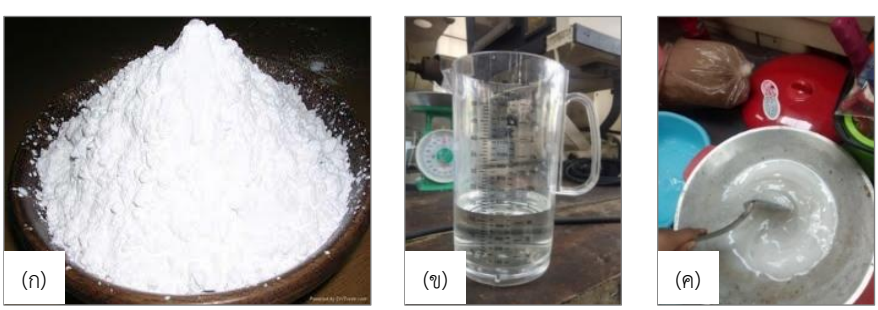
1. การเตรียมเส้นใยเปลือกมะพร้าว

เส้นใยเปลือกมะพร้าวเป็นวัสดุหลักในการขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหาร โดยการนำเปลือกมะพร้าว ดังภาพที่ 1 (ก) มาเข้าสู่การแยกเส้นใยและขุยจากเปลือกมะพร้าวด้วยเครื่องแยกเส้นใยและขุยจากเปลือกมะพร้าว ดังภาพที่ 1 (ข) จะได้เส้นใยเปลือกมะพร้าวที่มีขนาดความยาวเฉลี่ย 1-2 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.2-0.5 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 1 (ค)

ภาพที่ 1 การเตรียมเส้นใยเปลือกมะพร้าว โดยมีเปลือกมะพร้าว (ก) เครื่องแยกเส้นใยและขุยจากเปลือกมะพร้าว (ข) และเส้นใยเปลือกมะพร้าว (ค)

2. การเตรียมวัสดุประสาน

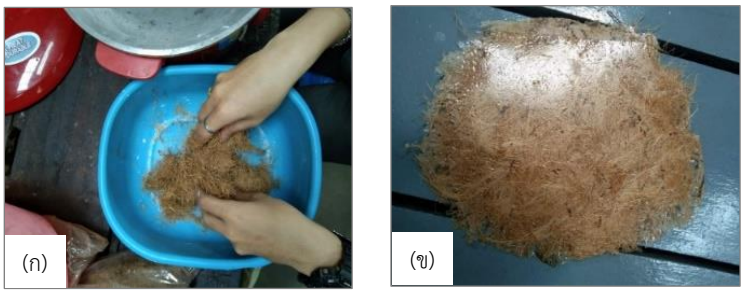
โดยการใช้น้ำปริมาณ 50-100 มิลลิลิตร ดังภาพที่ 2 (ข) มาตั้งไฟจนร้อนที่อุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส จากนั้นใส่ตัวประสาน (แป้งมันสำปะหลัง) ปริมาณ 40-60 กรัม ดังภาพที่ 2 (ก) ใส่ลงไปในน้ำแล้วทำการกวนให้เข้ากัน ใช้ระยะเวลาในการกวน 5-10 นาที จนได้แป้งเปียกสำหรับใช้เป็นวัสดุประสานในการขึ้นรูปต่อไป ดังภาพที่ 2 (ค)



ภาพที่ 2 การเตรียมวัสดุประสาน ประกอบด้วย แป้งมันสำปะหลัง (ก) กระบอกตวง (ข) และวัสดุประสาน (ค)

3. การเตรียมแผ่นใยอัดจากเปลือกมะพร้าว

โดยการผสมวัสดุทั้งสอง คือ เส้นใยเปลือกมะพร้าว ปริมาณ 10-30 กรัม กับวัสดุประสาน ปริมาณ 5-10 กรัม มาผสมให้เข้ากันดี ดังภาพที่ 3 (ก) จากนั้นนำวัสดุที่ผสมเข้ากันแล้วมากระจายให้ทั่วแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมพื้นผ้า ขนาดกว้าง 15-30 เซนติเมตร ยาว 17-40 เซนติเมตร จากนั้นอัดขึ้นรูปร้อนให้เป็นแผ่น ที่ความดันกดอัด 2,800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิ 140-200 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 2-5 นาที จะได้แผ่นใยอัดจากเปลือกมะพร้าว ดังภาพที่ 3 (ข)



ภาพที่ 3 การเตรียมแผ่นใยอัดจากเปลือกมะพร้าว ประกอบด้วย การผสมวัสดุทั้งสอง (ก) และแผ่นใยอัดจากเปลือกมะพร้าว (ข)

4. การอัดขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว

โดยการนำแผ่นใยอัดจากเปลือกมะพร้าวจากกระบวนการก่อนหน้ามาอัดขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวด้วยการอัดขึ้นรูปร้อน สอดคล้องกับกิตติศักดิ์ และคณะ, (2564) ด้วยแม่พิมพ์ภาชนะบรรจุอาหาร โดยอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 2 ระดับ คือ 150 และ 170 องศาเซลเซียส และเวลาในการอัดขึ้นรูปร้อน 3 ระดับ คือ 4 6 และ 8 นาที ที่ความดันกดอัด 1,800 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ดังตารางที่ 1 จากนั้นนำภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวออกจากแม่พิมพ์ จะได้ภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวที่พร้อมนำไปทดสอบสมบัติทางกลต่อไป ดังภาพที่ 4

ตารางที่ 1 ปัจจัยในการทดลองอัดขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว

ลำดับ	อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน (องศาเซลเซียส)	เวลาในการอัดขึ้นรูปร้อน (นาที)	ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ทดสอบ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
1	150	4	0.171
2	150	6	0.171
3	150	8	0.171
4	170	4	0.171
5	170	6	0.171
6	170	8	0.171

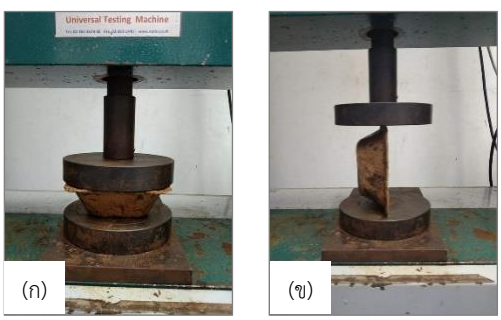
ภาพที่ 4 ภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว

5. การทดสอบสมบัติทางกลของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว

ประกอบด้วย ความต้านทานแรงกดอัดด้านบน ความต้านทานแรงกดอัดด้านข้าง ความต้านทานแรงดึง และการดูดซึมน้ำ

5.1 การทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านบนและความต้านทานแรงกดอัดด้านข้าง

โดยทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D790-10 ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine, ยี่ห้อ NRI รุ่น TS500-50) แรงที่ใช้ในการกดอัดสูงสุด 5 กิโลนิวตัน ความเร็วที่ใช้ในการกดชิ้นงาน (crosshead speed) เท่ากับ 1.3 มิลลิเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการทดสอบหาค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 10 ชิ้น ทดสอบในแต่ละสูตร โดยมีการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านบน ดังภาพที่ 5 (ก) และทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านข้าง ดังภาพที่ 5 (ข)



ภาพที่ 5 การทดสอบความต้านทานแรงกดอัด โดยทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านบน (ก) และทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านข้าง (ข)

5.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

โดยทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D828 ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบแรงดึงของกระดาษและกระดาษแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine, ยี่ห้อ NRI รุ่น TS500-50) แรงที่ใช้ในการดึงสูงสุด 5 กิโลนิวตัน ความเร็วที่ใช้ในการกดชิ้นงานเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการทดสอบหาค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 10 ชิ้น ทดสอบในแต่ละสูตร ดังภาพที่ 6

ภาพที่ 6 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

5.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

โดยทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D779 ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบความต้านทานต่อน้ำของกระดาษและวัสดุแผ่นอื่น ๆ โดยใช้สีผสมอาหารผสมกับน้ำในอัตราส่วน สีผสมอาหาร 1.5 กรัม กับน้ำ 100 มิลลิลิตร จากนั้นหยดลงบนพื้นผิวของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว แล้วเริ่มจับเวลาตั้งแต่น้ำสัมผัสกับพื้นผิวของภาชนะบรรจุอาหาร จนกระทั่งน้ำได้ซึมผ่านเข้าไปในภาชนะบรรจุอาหาร โดยใช้วิธีการจับเวลา ซึ่งทำการทดสอบหาค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 5 จุดในแต่ละสูตร ดังภาพที่ 7

ภาพที่ 7 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

6. การประเมินความพึงพอใจในภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว

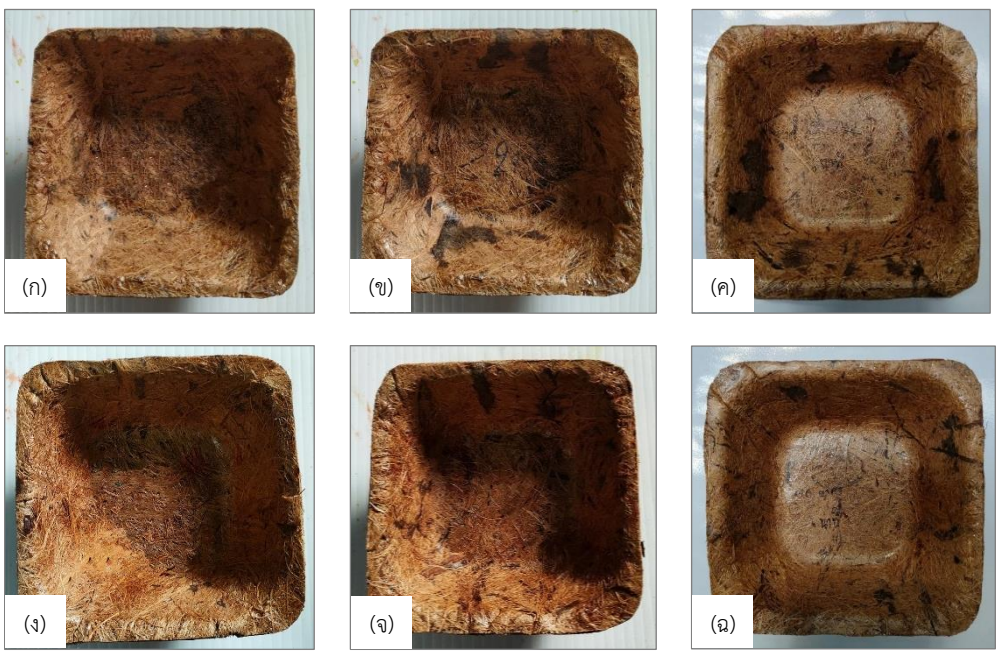
การผลิตภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวต้นแบบ แล้วนำมาวัดค่าระดับความพึงพอใจของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว โดยมุ่งเน้นกลุ่มเป้าหมาย 4 กลุ่ม ได้แก่ ผู้ประกอบการร้านอาหาร ผู้ใช้บริการร้านอาหาร อาจารย์ และนักศึกษา จำนวนทั้งหมด 100 คน โดยมีเกณฑ์ในการให้คะแนนระดับความพึงพอใจ และคำนวณค่าเฉลี่ยของระดับความพึงพอใจตามเกณฑ์ของแต่ละข้อ

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว โดยการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 2 ระดับ คือ 150 และ 170 องศาเซลเซียส และเวลาในการอัดขึ้นรูปร้อน 3 ระดับ คือ 4 6 และ 8 นาที ที่ความดันกดอัด 1,000-2,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ผลการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส เส้นใยเปลือกมะพร้าวสามารถอัดขึ้นรูปได้ดีและผิวสัมผัสของเส้นใยเปลือกมะพร้าวมีความเรียบ ดังภาพที่ 8 (ก-ค) ที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 170 องศาเซลเซียส เส้นใยเปลือกมะพร้าวสามารถอัดขึ้นรูปได้ดีและผิวสัมผัสมีความเรียบทั้งที่ก้นและรอบ ๆ ภาชนะบรรจุอาหารแต่ไม่ดีเท่าที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 8 (ง-ฉ) ซึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจึงทำให้เส้นใยมีสีที่เปลี่ยนไปแต่ไม่มาก แต่ที่น่าสังเกตผลการศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวที่มีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว พบว่าทุกอุณหภูมิสามารถขึ้นรูปเป็น

ภาชนะบรรจุอาหารได้ทั้งหมด โดยที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส พบว่าเส้นใยเปลือกมะพร้าวมีผิวเรียบและเส้นใยเรียงตัวกันได้ดีและยึดเกาะกันแน่น ดังภาพที่ 8 (ก-ค) และที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 170 องศาเซลเซียส พบว่าเส้นใยเปลือกมะพร้าวมีผิวเรียบแต่มีสีเปลี่ยนไป ดังภาพที่ 8 (ง-ฉ)



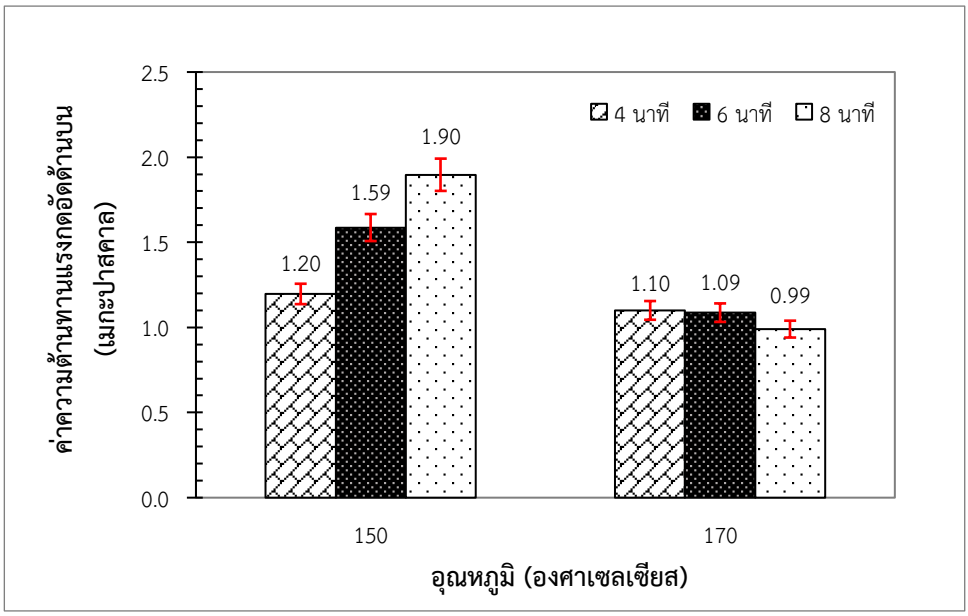
ภาพที่ 8 ผลการศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส เวลา 4 นาที (ก) 6 นาที (ข) 8 นาที (ค) และที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 170 องศาเซลเซียส เวลา 4 นาที (ง) 6 นาที (จ) 8 นาที (ฉ)

2. ผลการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านบน

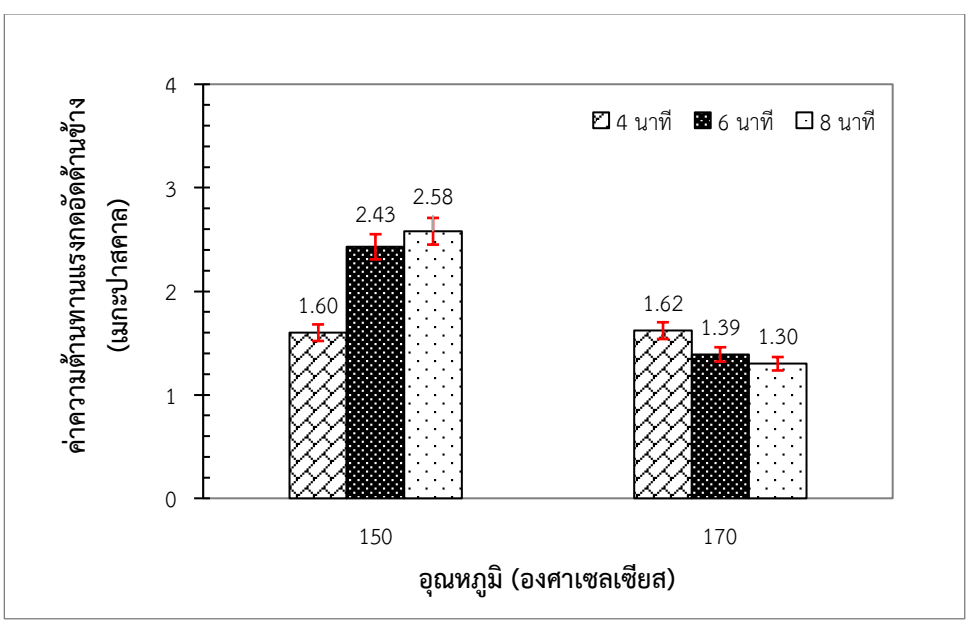
พบว่าค่าการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านบนสูงที่สุดที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส เวลา 8 นาที มีค่าแรงกดอัดด้านบนเท่ากับ 1.90 เมกะปาสคาล (MPa) และค่าการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านบนต่ำที่สุดที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 170 องศาเซลเซียส เวลา 8 นาที มีค่าแรงกดอัดด้านบนเท่ากับ 0.99 เมกะปาสคาล ดังภาพที่ 9

3. ผลการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านข้าง

พบว่าค่าการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านข้างสูงที่สุดที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส เวลา 8 นาที มีค่าแรงกดอัดด้านข้างเท่ากับ 2.58 เมกะปาสคาล และค่าการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านข้างต่ำที่สุดที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 170 องศาเซลเซียส เวลา 8 นาที มีค่าแรงกดอัดด้านข้างเท่ากับ 1.30 เมกะปาสคาล ดังภาพที่ 10



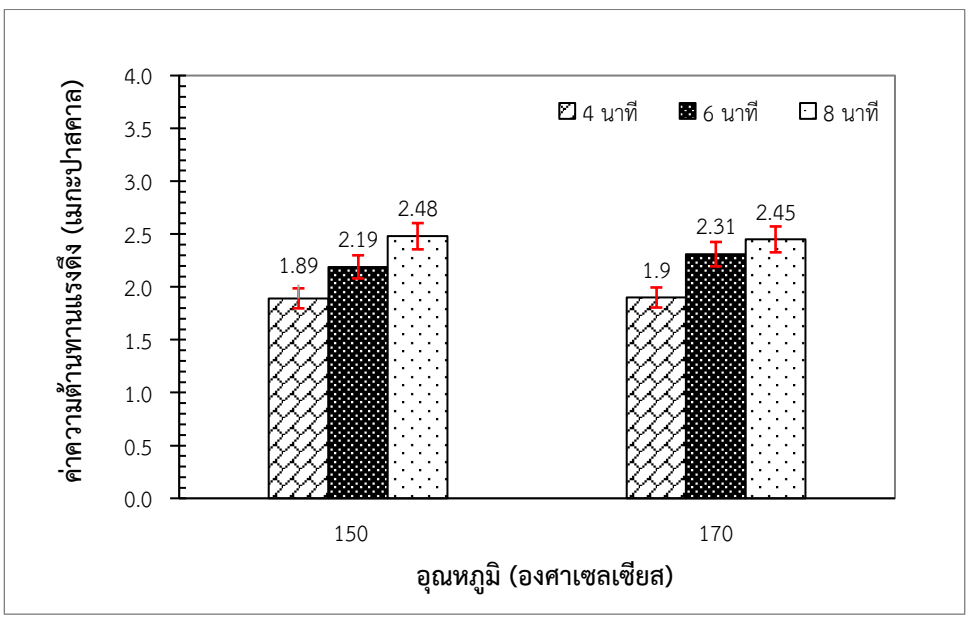
ภาพที่ 9 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดอัดด้านบนของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 และ 170 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 10 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดอัดด้านข้างของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 และ 170 องศาเซลเซียส

4. ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง

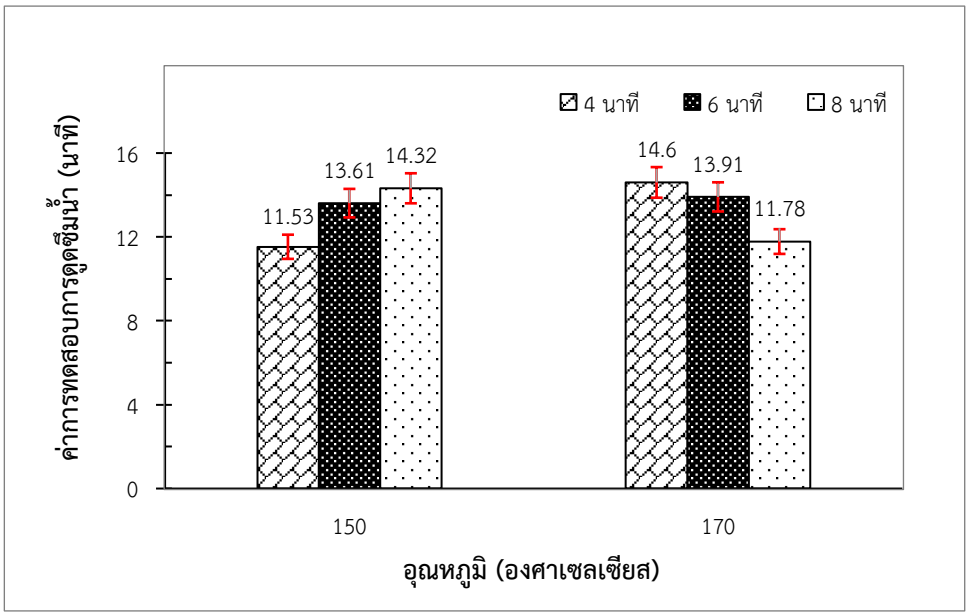
พบว่าค่าการทดสอบความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส เวลา 8 นาที มีค่าแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 2.48 เมกะปาสคาล และค่าความต้านทานแรงดึงต่ำที่สุดที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 170 องศาเซลเซียส เวลา 4 นาที มีค่าแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด 1.90 เมกะปาสคาล ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 และ 170 องศาเซลเซียส

5. ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

พบว่าภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวที่มีการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เวลา 4 นาที มีค่าการดูดซึมน้ำช้าสุดอยู่ที่ 14 นาที 36 วินาที และการอัดขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 4 นาที มีค่าการดูดซึมน้ำเร็วสุดอยู่ที่ 11 นาที 53 วินาที ซึ่งจากค่าการทดสอบการดูดซึมน้ำในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวที่อุณหภูมิ 150 และ 170 องศาเซลเซียส เวลา 4 6 และ 8 นาที มีค่าการทดสอบการดูดซึมน้ำช้าสุดและเร็วสุด ต่างกันเป็นเวลา 3 นาที 7 วินาที สรุปได้ว่าปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน มีผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบค่าการทดสอบการดูดซึมน้ำของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 และ 170 องศาเซลเซียส

6. ผลจากการทดสอบสมบัติทางกลและสภาวะการอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว

พบว่าที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส เวลา 8 นาที เป็นสภาวะการอัดขึ้นรูปภาชนะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวมีการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิไม่สูงมากและเวลาที่มากขึ้น ทำให้เส้นใยที่ถูกอัดตัวกันแน่นไม่เกิดการเสียหาย จึงทำให้ผิวสัมผัสมีลักษณะทางกายภาพที่เรียบทั่วกันทั้งภาชนะ มีความแข็งแรง และยังคงสีธรรมชาติเดิมไม่มีสีที่เปลี่ยนไป มีค่าการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านบน 1.90 เมกะปาสคาล ค่าการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านข้าง 1.30 เมกะปาสคาล ค่าความต้านทานแรงดึง 2.48 เมกะปาสคาล และค่าการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 14 นาที 32 วินาที เหมาะสำหรับการใส่อาหารมากกว่า ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบมีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว

7. ผลจากการวัดค่าระดับความพึงพอใจโดยรวมของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว

พบว่าคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยโดยรวมอยู่ที่ 3.19 คะแนน ซึ่งอยู่ในช่วงระดับความพึงพอใจปานกลาง โดยค่าเฉลี่ยของความพึงพอใจในภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวมากที่สุด 3 อันดับแรก ได้แก่ อันดับที่ 1 คือ ผลิตภัณฑ์สามารถตอบโจทย์ด้านอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เฉลี่ย 4.13 อันดับที่ 2 คือ สีสันและความสวยงามของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย 3.87 อันดับที่ 3 คือ ผลิตภัณฑ์สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เฉลี่ย 3.47 นอกจากนี้พบว่าความพึงพอใจน้อยที่สุด คือ ขนาดของผลิตภัณฑ์มีความเหมาะสมแก่การใช้งาน เฉลี่ย 2.44 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าระดับความพึงพอใจของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว

ลำดับ	รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ระดับความพึงพอใจ
1	ผิวสัมผัสของผลิตภัณฑ์ เช่น ความเรียบ	3.67	มาก
2	กลิ่นไม่พึงประสงค์ของผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูป	2.72	ปานกลาง
3	ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์	3.11	ปานกลาง
4	สีสันและความสวยงามของผลิตภัณฑ์	3.87	มาก
5	รูปทรงของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมแก่การใช้งาน	2.73	ปานกลาง
6	ความเหมาะสมในการใช้งานจริง	3.14	ปานกลาง
7	ขนาดของผลิตภัณฑ์มีความเหมาะสมแก่การใช้งาน	2.44	น้อย
8	ประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์	2.69	ปานกลาง
9	ผลิตภัณฑ์สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย	3.47	มาก
10	ผลิตภัณฑ์สามารถตอบโจทย์ด้านอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม	4.13	มากที่สุด
	เฉลี่ย	3.19	ปานกลาง

การอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูปร้อนภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว พบว่า ทุกอุณหภูมิสามารถอัดขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหารได้ทั้งหมด โดยที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส ทำให้ภาชนะมีผิวที่เรียบ เส้นใยเรียงตัวกันได้ดีและยึดเกาะกันแน่น และที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 170 องศาเซลเซียส ทำให้ภาชนะมีผิวที่เรียบแต่มีสีที่เปลี่ยนไป เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เส้นใยโดนความร้อนมากขึ้น จึงทำให้เส้นใยเกิดความเสียหายเมื่อโดนความร้อนมากเกินไป สีของเส้นใยจึงเปลี่ยนไปแต่ไม่มาก สามารถนำไปใช้งานได้ จึงสรุปได้ภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวสามารถขึ้นรูปได้ทั้งหมด แต่ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป จึงทำให้ภาชนะบรรจุอาหารมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันไปในแต่ละอุณหภูมิและแต่ละเวลา ขึ้นกับเงื่อนไขอุณหภูมิใดและเวลาใดที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด ในการนำไปใช้งานเป็นภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว สอดคล้องกับสิปราง และคณะ (2564) จากการศึกษางานวิจัยของศศิกานต์ และคณะ (2562) อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของวัสดุประสานในแม่พิมพ์ได้ว่า เริ่มจากเมื่อใส่วัตถุดิบที่มีวัสดุประสานโดยมีแป้งกับน้ำเป็นส่วนประกอบลงไปในแม่พิมพ์ที่ร้อน อุณหภูมิในแม่พิมพ์สูงทำให้น้ำที่ผสมอยู่กับวัสดุประสานจะเริ่มระเหยกลายเป็นไอ แป้งจะเกิดเป็นเจล โดยกระบวนการเจลาติไนซ์-เซชั่น (gelatinixation) และมีความหนืดเพิ่มขึ้น ความดันภายในแม่พิมพ์จะสูงขึ้น จากนั้นอุณหภูมิภายในสูงขึ้นจนน้ำในแม่แบบระเหยออกกลายเป็นไอบริเวณขอบของแม่พิมพ์ ความดันของไอน้ำที่อยู่ภายในแม่พิมพ์เกิดการขยายตัวทำให้แป้งกลายเป็นโพรงอากาศ เนื้อแป้งที่อยู่ภายในจะเกิดการกระจายตัวจนเต็มแม่พิมพ์ และแป้งที่เป็นส่วนเกินจะระบายตัวออกมาทางช่องขอบของแม่พิมพ์ จากนั้นน้ำจะระเหยออกจนหมด โพรงอากาศจะเริ่มแห้ง และเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้าย คือ ความดันภายในแม่พิมพ์และอุณหภูมิที่สูงจะทำให้วัสดุประสานเกิดการแห้งตัว สุดท้ายนำชิ้นงานออกจากแม่แบบ ในประเด็นของการทดสอบสมบัติทางความร้อนเป็นการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน

(thermogravimetric analysis: TGA) โดยที่งานวิจัยครั้งนี้ไม่ได้ดำเนินการทดสอบ แต่ดำเนินการศึกษาวิเคราะห์เทียบกับเส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน (วรรธนพร และคณะ, 2565) พบว่าเส้นใยลูกปาล์มน้ำมันมีการเสถียรทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 300-425 องศาเซลเซียส และพบว่าการสลายตัวในช่วงแรกเป็นการสลายตัวของเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งปกติสารเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของเส้นใยธรรมชาติจะสลายตัวที่ช่วงอุณหภูมิ 194-386 องศาเซลเซียส (Mohanty *et al*., 2006)

ด้านการทดสอบสมบัติทางกล ประกอบด้วย (1) การทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านบน พบว่าค่าการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านบนสูงที่สุดที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส เวลา 8 นาที มีค่าแรงกดอัดด้านบนเท่ากับ 1.90 เมกะปาสคาล ชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปด้วยในอุณหภูมิที่ไม่สูงเกินไป และใช้เวลาสูงขึ้นทำให้เส้นใยมีการเรียงตัวกันได้ดี และยึดเกาะกันแน่น เส้นใยไม่เกิดความเสียหายเพราะไม่โดนความร้อนมากเกินไป แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเวลามากขึ้นทำให้เส้นใยเกิดความเสียหายทำให้ภาชนะบรรจุอาหารมีความเปราะและแข็ง ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวมีค่าการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านบนสูงสุดและต่ำสุดต่างกันอยู่ที่ 0.91 เมกะปาสคาล จึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน มีผลต่อค่าความต้านทานแรงกดอัดด้านบนของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว สอดคล้องกับศศิกานต์ และคณะ (2562) (2) การทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านข้าง พบว่าค่าการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านข้างสูงที่สุดที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส เวลา 8 นาที มีค่าแรงกดอัดด้านข้างเท่ากับ 2.58 เมกะปาสคาล ซึ่งจากค่าการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านข้าง ที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไป และใช้เวลามากขึ้นทำให้เส้นใยมีการเรียงตัวกันได้ดี และยึดเกาะกันแน่น เส้นใยไม่เกิดความเสียหายเพราะไม่โดนความร้อนมากเกินไป แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและเวลามากขึ้นทำให้เส้นใยเกิดความเสียหายภาชนะบรรจุอาหารมีความเปราะและแข็ง ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว มีค่าการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านข้างสูงสุดและต่ำสุดต่างกันอยู่ที่ 1.28 เมกะปาสคาล จึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน มีผลต่อค่าความต้านทานแรงกดอัดด้านข้างของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว (3) การทดสอบความต้านทานแรงดึง พบว่าค่าการทดสอบความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส เวลา 8 นาที มีค่าแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 2.48 เมกะปาสคาล ซึ่งจากค่าการทดสอบความต้านทานแรงดึงที่อุณหภูมิต่างกันและใช้เวลามากขึ้นทำให้เส้นใยมีการเรียงตัวกันได้ดีและยึดเกาะกันแน่น สอดคล้องกับปัตติยา และคณะ (2565) ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวมีค่าการทดสอบความต้านทานแรงดึงสูงสุดและต่ำสุดต่างกันอยู่ที่ 0.56 เมกะปาสคาล จึงสรุปได้ว่าปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว สอดคล้องกับจุฑาทิพย์ และคณะ (2563) พบว่าเวลาคงรูปและเวลาในการคงรูปสมบูรณ์มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการคงรูปเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายิ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอัดมากขึ้นและเวลามากขึ้นย่อมส่งผลต่อสมบัติของวัสดุเช่นกัน (4) การทดสอบการดูดซึมน้ำ พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นทำให้เส้นใยมีการเรียงตัวกันดีมากขึ้น จะเห็นได้ว่าในทุก ๆ ที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อนเมื่อเพิ่มเวลาขึ้นค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน สอดคล้องกับบุษบา และคณะ (2554) และศศิกานต์ และคณะ (2562) โดยปัจจัยที่มีผลต่อการจัดเรียงตัวของเส้นใยเปลือกมะพร้าวในการอัดขึ้นรูป

ประกอบด้วย การจัดเรียงเส้นใยก่อนการอัดขึ้นรูป ความร้อนจากการอัดขึ้นรูป แรงดันอัดขึ้นรูป และเวลาในการอัดขึ้นรูป ซึ่งทำให้ภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวที่มีการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เวลา 4 นาที มีค่าการดูดซึมน้ำช้าสุดอยู่ที่ 14 นาที 36 วินาที

สรุปผลการวิจัย

1. ภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวสามารถอัดขึ้นรูปร้อนได้ทุกอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส ทำให้ภาชนะมีผิวสัมผัสเรียบและมีความหนาแน่นมาก และที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 170 องศาเซลเซียส ทำให้ภาชนะมีผิวสัมผัสเรียบ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้เส้นใยเกิดความเสียหาย จึงทำให้มีสีเปลี่ยนไปแต่ไม่มากนัก สามารถนำไปใช้งานเป็นภาชนะบรรจุอาหารได้ ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าวจึงอยู่ที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูป 150 องศาเซลเซียส เวลา 8 นาที

2. การทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านบนของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว ที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส เวลา 8 นาที มีค่าความต้านทานแรงกดอัดด้านบนสูงสุดเท่ากับ 1.90 เมกะปาสคาล

3. การทดสอบความต้านทานแรงกดอัดด้านข้างของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว ที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส เวลา 8 นาที มีค่าความต้านทานแรงกดอัดด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 1.30 เมกะปาสคาล

4. การทดสอบความต้านทานแรงดึงของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว ที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส เวลา 8 นาที มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 2.48 เมกะปาสคาล

5. การทดสอบการดูดซึมน้ำของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว ที่อุณหภูมิอัดขึ้นรูปร้อน 150 องศาเซลเซียส เวลา 8 นาที มีค่าการดูดซึมน้ำช้าอยู่ที่ 14 นาที 36 วินาที

6. การวัดค่าระดับความพึงพอใจโดยรวมของภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยเปลือกมะพร้าว พบว่ามีค่าคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 3.19 คะแนน ซึ่งอยู่ในช่วงระดับความพึงพอใจปานกลาง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการจัดสรรงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปี พ.ศ. 2565 ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์ การวิจัยและพัฒนานวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

เอกสารอ้างอิง

กิตติศักดิ์ เมืองกลาง ณัฐพงษ์ รักด่านกลา ณัฐวุฒิ ดงกระโทก ทักษ์ดนัย จันทีนอก และธรรณธร ชิดการ. (2564). เครื่องขึ้นรูปภาชนะจากวัสดุธรรมชาติ. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 6*(2), 65-76.

จุฑาทิพย์ อาจชมภู สุวัฒน์ รัตนพันธ์ ฉัตรชัย แก้วดี และวีระยุทธ สุดสมบูรณ์. (2563). สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไม้เทียมโดยกระบวนการอัดขึ้นรูป. *วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช,* 39(1), 84-98.

บุษบา สร้อยระย้า ชมภูนุช เผื่อนพิภพ ดวงกมล ตั้งสถิตพร อัชชา ศิริพันธุ์ และประพาฬภรณ์ ธีรมงคล. (2554). การพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อมจากเส้นใยกล้วยสำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูป. *รายงานวิจัย.* มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

ปัตติยา ช่ออังชัน ชุตินันท์ คชสีห์ กัญญารัตน์ คงมั่น และธิดารัตน์ พรหมมา. (2565). ศึกษาคุณสมบัติของภาชนะที่ผลิตจากเส้นใยหญ้าขจรจบและเส้นใยผักตบชวา. *การประชุมวิชาการระดับชาติสำหรับนักศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏกาแพงเพชร ครั้งที่ 2.* กำแพงเพชร.

ลดามาศ เบ็ญชา ณัฐวดี ช่อเจริญ ญาณสินี สุมา และนิตย์ตะยา ผาสุกพันธุ์. (2559). ความเป็นไปได้เบื้องต้นในการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในพื้นที่จังหวัดเชียงราย. *การประชุมวิชาการระดับชาติ "นเรศวรวิจัย ครั้งที่ 12 : วิจัยและนวัตกรรมกับการพัฒนาประเทศ".* พิษณุโลก.

วรพงค์ บุญช่วยแทน และชาตรี หอมเขียว. (2565). ส่วนผสมและกรรมวิธีการผลิตบรรจุภัณฑ์จากเส้นใยเปลือกมะพร้าว. *อนุสิทธิบัตรไทย เลขที่ 2203001405*. กรุงเทพฯ: กรมทรัพย์สินทางปัญญา กระทรวงพานิชย์.

วรรธนพร ชีววุฒิพงศ์ ชาตรี หอมเขียว และสุรสิทธิ์ ระวังวงศ์. (2565). การศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและขี้เลื่อยไม้ยางพารา. *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*, 14(1), 31-46.

ศศิกานต์ สุวรรณประทีป อดุลย์ หาญวังม่วง และสมพงษ์ พิริยายนต์. (2562). การผลิตโฟมบรรจุภัณฑ์จากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยเซลลูโลสจากผักตบชวา. *รายงานวิจัย.* มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.

ศิริพร เต็งรัง ประยูร เอ็นมาก ภัสสร เลียบวัน มงคล ตุ่นเฮ้า คุรุวรรณ์ ภามาตย์ พุทธินันท์ จารุวัฒน์ นกศักดิ์ ลอยเลิศ สุปรียา ศุขเกษม วิมลวรรณ วัฒนวิจิตร โกเมศ สัตยาวุธ ศุภมาศ กลิ่นขจร จารุวรรณ์ รัตนสกุลธรรม สาเริง ช่างประเสริฐ รังสิทธิ์ ศิริมาลา และมานพ คันธามารัตน์. (2558). วิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์. *รายงานวิจัย.* กรมวิชาการเกษตร.

ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์. (2564). *ปลูกมะพร้าว*. สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2565, จาก: https://tradereport.moc.go.th/TradeThai.aspx.

สิปราง เจริญผล นวลนภา จุลสุทธิ และรัชนิกร กุสลานนท์. (2564). การใช้กระบวนการอัดร้อนใบข้าวโพดเพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทน สำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์. *วารสารสังคมศาสตร์วิชาการ,* 14(1), 113-124.

Global Trade Atlas (GTA). (2564). *มูลค่าส่งออก*. สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2565, จาก: https://ihsmarkit.com/products/maritime-global-trade-atlas.html.

Mohanty, S., Verma, S.K. and Nayak, S.K. (2006). Dynamic mechanical and thermal properties of MAPE treated jute/HDPE composites. *Composites Science and Technology,* 66(3-4), 538-547, doi: https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.06.014.

ผลของแรงเสียดทานของผนังภาชนะต่อรูปแบบของการพาในการสั่นแนวตั้งสำหรับวัสดุเม็ด

The Effects of Container Wall Friction on the Vertical Vibrating Convection Pattern for Granular Materials

ภาณุพัฒน์ ชัยวร[1] สุภารัตน์ หาญขว้าง[1] วิไลพร ลักษมีวาณิชย์[1] และเพ็ญศรี ประมุขกุล[1*]

Panupat Chaiworn[1] Suparat Hankwang[1] Vilaiporn Luksameevanish[1] and Pensri Pramukkul[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของแรงเสียดทานของผนังภาชนะต่อรูปแบบการพาในการสั่นแนวตั้งสำหรับวัสดุเม็ด โดยใช้อนุภาคทรงกระบอก 2 ขนาด ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร จำนวน 460 อนุภาค และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร จำนวน 115 อนุภาค นำมาจัดเรียงแบบสุ่มในภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าจากวัสดุต่างชนิดที่มีแรงเสียดทานผนังแตกต่างกัน ได้แก่ อะคริลิค กระดาษฟอยล์ ผ้ากำมะหยี่ และกระดาษทรายเบอร์ 400 จากนั้นสั่นด้วยแอมพลิจูดเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ความถี่ 12.21 เฮิร์ต และความเร่งไร้มิติเท่ากับ 3 ผลการทดลองพบว่าวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านบนของกลุ่มจะเคลื่อนที่มาทางด้านข้างของภาชนะ แล้วเคลื่อนที่มาบริเวณกลางภาชนะและเคลื่อนไปด้านบนอีกครั้ง เป็นการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ เรียกว่า “การพา” วัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะด้วยทิศทวนเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะด้วยทิศตามเข็มนาฬิกา สำหรับภาชนะที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะเท่ากับ 0.790 และ 0.825 วัสดุเม็ดเคลื่อนที่ได้เร็วและพลังงานจลน์มีค่ามาก ส่วนภาชนะที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่าเท่ากับ 0.376 และ 0.432 วัสดุเม็ดที่อยู่บนกลุ่มวัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่ลงด้านข้างแต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังบริเวณศูนย์กลางกลุ่มวัสดุเม็ดได้ เนื่องจากพลังงานจลน์ของวัสดุเม็ดมีค่าน้อย

คำสำคัญ: วัสดุเม็ด การพา สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน การสั่นในแนวดิ่ง

[1] ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

[*] Corresponding author e-mail: pensri_pra@cmru.ac.th

Received: 20 October 2022, Revised: 11 March 2023, Accepted: 30 March 2023

Abstract

The research aimed to study the effects of container wall friction on the vertical vibrating convection pattern for granular materials. The both cylindrical particles of sizes used were diameter 6 millimeters (mm), length 6 centimeters (cm), at 460 particles and diameter 12 mm, length 6 cm, at 115 particles, respectively, which were randomly and layered placed inside rectangular containers with different wall friction such as acrylic, foil, velvet, and No. 400 sandpaper. The granular materials were vertically vibrated with the amplitude of 5 mm, the frequency of 12.21 Hertz (Hz) and dimensionless acceleration of 3. The results revealed that the granular materials were on granular media. After that the granular materials slowly moved to the side, center and top of the containers again. The movement in one cycle is called "convection". The materials on the left moved sideways in anticlockwise direction and those on the right moved sideways in the clockwise direction. In case of friction coefficient between granular materials and wall being 0.790 and 0.825, the granular materials could move fast causing kinetic energy. When the friction coefficient between granular materials and wall is 0.376 and 0.432, the materials would move to the side and were unable to move to the center. Their movement was static, or they hardly moved due to low friction coefficient between granular materials and wall, making the materials moved slowly and yielding low kinetic energy.

Keywords: Granular material, Convection, Coefficient of friction, Vertical vibration

บทนำ

วัสดุเม็ด (granular material) คือ กลุ่มของอนุภาคของแข็งที่มีช่องว่างระหว่างอนุภาค สามารถแทรกด้วยของไหล เช่น น้ำหรืออากาศ วัสดุเหล่านี้มีรูปร่างต่าง ๆ เช่น ทรงกลม ทรงกระบอก และรูปร่างอื่น ๆ ที่อยู่รวมกันจำนวนหนึ่ง วัสดุเม็ดถือว่าเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีการศึกษาพฤติกรรมตามสถานการณ์เงื่อนไขทางปัจจัยทั้งภายในและภายนอกต่าง ๆ เนื่องจากวัตถุดิบส่วนใหญ่ที่ถูกใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมอยู่ในรูปของวัสดุเม็ด เช่น ทราย เม็ดพลาสติก และผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรม ซึ่งกระบวนการผลิตวัตถุดิบต่าง ๆ จะถูกนำไปผ่านกระบวนการสั่นเพื่อให้ผสมกันหรือเพื่อแยกตัวออกจากกัน สำหรับวัสดุประเภทนี้เมื่อถูกนำมาสั่นหรือเขย่าแล้วจะเกิดปรากฏการณ์หลาย ๆ อย่างภายในระบบ เช่น การก่อตัว (arching) การกอง (heaping) การแยก (segregation) คลื่นผิว (surface waves) การพา (convection) เป็นต้น นอกจากนี้การวัดความเร็วปลายในการตกของโลหะทรงกลมที่มีรัศมีแตกต่างกันซึ่งความเร็วปลายของโลหะทรงกลมมีค่าเพิ่มขึ้นตามรัศมีของโลหะทรงกลมที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อนำความเร็วปลายไปคำนวณหาค่าความเร็วปลายถือเสมือนแล้วนำความเร็วปลายถือเสมือนไปหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายถือเสมือนกับรัศมีกำลังสอง

แสดงให้เห็นว่าวิธีการวัดความเร็วปลายของการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมในกลีเซอรีนเป็นแนวทางในการศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุในของเหลวทั่วไปได้ (อภินทร์รัตน์ และคณะ, 2022)

ปัจจุบันมีวัตถุดิบอยู่มากมายที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตโดยการสั่นหรือการหมุนภายใต้การทำงานของเครื่องจักรเพื่อคัดแยกวัตถุดิบที่มีขนาด น้ำหนัก สี และคุณภาพที่แตกต่างกันไป เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคและเพื่อเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบ พฤติกรรมการพาจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุเม็ดถูกสั่นหรือเขย่าทำให้เม็ดวัสดุที่อยู่ด้านล่างบริเวณตรงกลางของระบบเคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นสู่ผิวอิสระด้านบน แล้วจึงเคลื่อนที่ไปด้านข้าง ต่อจากนั้นจึงเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างของระบบ ในที่สุดจะเคลื่อนที่เข้าสู่ตรงกลางของระบบอีกครั้งเป็นการครบรอบการพา 1 รอบ (สกนธ์, 2552) รูปแบบการพาคล้ายกับชนิดของการหมุนวนของของไหล ซึ่งเป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่น่าสนใจ แม้จะมีการศึกษาถึงปรากฏการณ์การพาโดยนักวิจัยหลาย ๆ ท่านก็ตาม และยังมีสันนิษฐานว่าแรงเสียดทานระหว่างเม็ดวัสดุกับผนังภาชนะจะลากอนุภาคใกล้ผนังด้านข้างลง (Chaiworn *et al*., 2014) แต่การศึกษายังไม่มีผู้ใดตอบได้ว่าแรงเสียดทานระหว่างเม็ดวัสดุกับผนังที่มีค่ามากหรือน้อย มีผลต่อการเกิดการพาอย่างไร นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่กล่าวถึงแรงต่าง ๆ เช่น ผลกระทบของปริมาณความชื้นที่มีต่อความลึกของวัสดุเม็ดสมมติว่าการมีความชื้นไม่มีผลต่อระยะแรงเฉื่อย (Zhang *et al*., 2023) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของแรงเสียดทานของผนังภาชนะต่อรูปแบบของการพาในการสั่นแนวตั้งสำหรับวัสดุเม็ดรูปทรงกระบอก โดยใช้ผนังภาชนะต่างชนิดกัน ได้แก่ อะคริลิค ผ้ากำมะหยี่ และกระดาษทราย โดยคณะผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองใช้ระบบการสั่นแนวตั้งที่มีความเร่งไร้หน่วยในการสั่น (the dimensionless vibration acceleration) ซึ่งเป็นปริมาณที่รวมความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลในการสั่น คือ ความถี่ในการสั่น (f) และแอมพลิจูดในการสั่น (A) ต่อค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลก (g) โดยมีสมการความสัมพันธ์ คือ $\Gamma = A(2\pi f)^2 / g$ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ทั้งในด้านอุตสาหกรรม การอธิบายธรรมชาติที่ซับซ้อน และเป็นแนวทางในการสร้างชุดการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ต่อไปในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

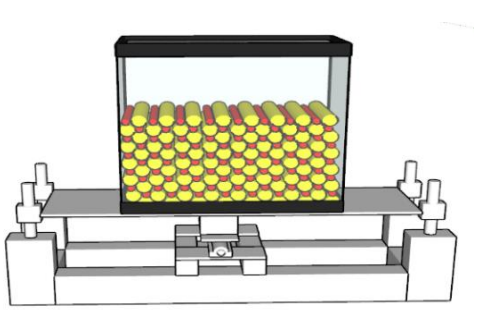
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย วัสดุเม็ด ผนังชนิดต่าง ๆ กล่องอะคริลิค เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง และเครื่องสั่นแนวดิ่ง การทดลองเริ่มจากการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังชนิดต่าง ๆ โดยตัดวัสดุเม็ด ได้แก่ ไม้ฮิโนกิทรงกระบอก 2 ขนาด ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร จำนวน 460 อนุภาค และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร จำนวน 115 อนุภาค และตัดวัสดุผนัง ได้แก่ อะคริลิค (acrylic) ผ้ากำมะหยี่ (velvet) กระดาษฟอยล์ (foil) พลาสติก (polyethylene: PE) ไม้ฮิโนกิ (Hinoki) กระดาษทรายเบอร์ 400 (sandpaper: SP n.400) และกระดาษทรายเบอร์ 600 (SP n.600) ขนาดของภาชนะรูปสี่เหลี่ยมมีความกว้าง 15 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร ความหนา 6 เซนติเมตร นำวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ ที่ตัดตามขนาดที่ต้องการติดบนฐานของเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง หมุนรอกที่อยู่ด้านข้างของเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียงจนกระทั่งลูกเหล็กเคลื่อนที่ตกลงจากฐานของเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง (ภาพที่ 1) บันทึกภาพ คำนวณหาค่ามุมและ

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จากนั้นเลือกชนิดของผนังที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังอยู่ในช่วงที่ต่างกัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการพาของกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง โดยนำชนิดของผนังที่เลือกมาติดบริเวณด้านข้างของกล่องอะคริลิคทั้ง 2 ข้าง บรรจุวัสดุเม็ดลงในกล่องอะคริลิคแบบสุ่ม จากนั้นสั่นด้วยแอมพลิจูดเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ความถี่ 12.21 เฮิร์ต ความเร่งไร้มิติ (Γ) เท่ากับ 3 และเวลาการสั่นสูงสุด 600 วินาที (ภาพที่ 2) โดยทำการทดลอง 2 ลักษณะ ได้แก่ เริ่มต้นการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสุ่มและแบบชั้น และบันทึกการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดโดยการถ่ายวีดิโอ แล้วนำมาวิเคราะห์หาลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด อัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ด และพลังงานจลน์ของวัสดุเม็ดในแนวตั้ง โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอแทรคเกอร์ ในการทดลองนี้มุ่งเน้นไปที่วัสดุเม็ดรูปทรงกระบอกและไดนามิกจะถูกควบคุมโดยการสั่นในแนวตั้ง และแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคในขั้นต้น คณะผู้วิจัยศึกษาการเคลื่อนที่วัสดุเม็ดตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน และแรงต้าน (F) ที่กระทำกับวัสดุเม็ดสามารถแบ่งออกเป็นองค์ประกอบต่อไปนี้ (Zhang *et al*., 2023)

$$m_G \frac{dv}{dt} = F = m_G g - \alpha v^2 - \beta v - \gamma$$

โดยที่ m_G คือ มวลของโพรเจกไทล์ (projectile) g คือ ความเร่งโน้มถ่วง v คือ ความเร็วชั่วขณะของวัสดุเม็ด α คือ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความเค้นเฉือย β คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาค γ คือ พารามิเตอร์ของวัสดุเม็ด-ผนัง

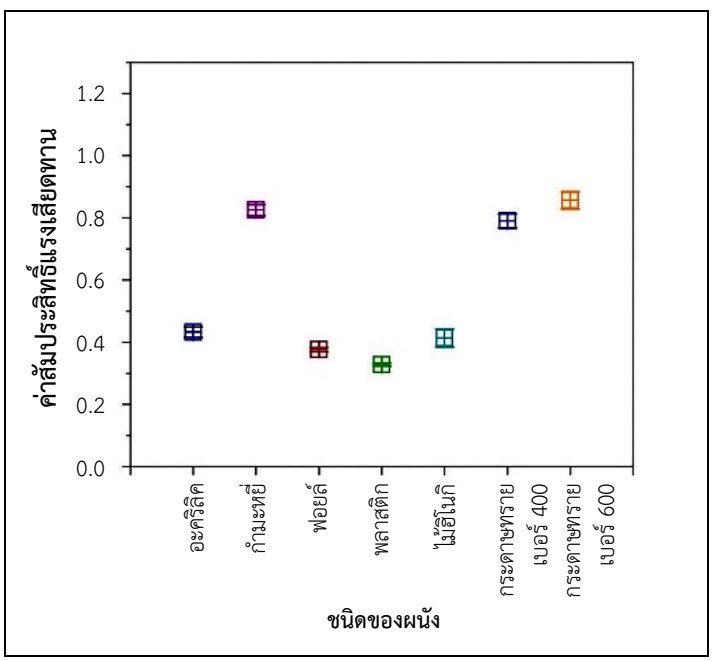
ภาพที่ 1 การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง



ภาพที่ 2 การติดตั้งวัสดุเม็ดภายใต้ระบบการสั่นในแนวตั้งด้วยค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ความถี่ 12.21 เฮิร์ต และความเร่งไร้มิติเท่ากับ 3

ผลการวิจัย

เมื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ฮิโนกิทรงกระบอกกับผนังชนิดต่าง ๆ พบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ฮิโนกิกับผนังอะคริลิคมีค่า 0.432 อนุภาคไม้ฮิโนกิกับผนังผ้ากำมะหยี่มีค่า 0.825 อนุภาคไม้ฮิโนกิกับกระดาษฟอยล์มีค่า 0.376 อนุภาคไม้ฮิโนกิกับพลาสติกมีค่า 0.328 อนุภาคไม้ฮิโนกิกับไม้ฮิโนกิมีค่า 0.413 อนุภาคไม้ฮิโนกิกับกระดาษทรายเบอร์ 400 มีค่า 0.790 และอนุภาคไม้ฮิโนกิกับกระดาษทรายเบอร์ 600 มีค่า 0.856 ทั้งนี้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ฮิโนกิกับผนังอะคริลิค ผนังกระดาษฟอยล์ ผนังพลาสติก และผนังไม้ฮิโนกิมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ฮิโนกิกับผนังผ้ากำมะหยี่ ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และกระดาษทรายเบอร์ 600 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 3



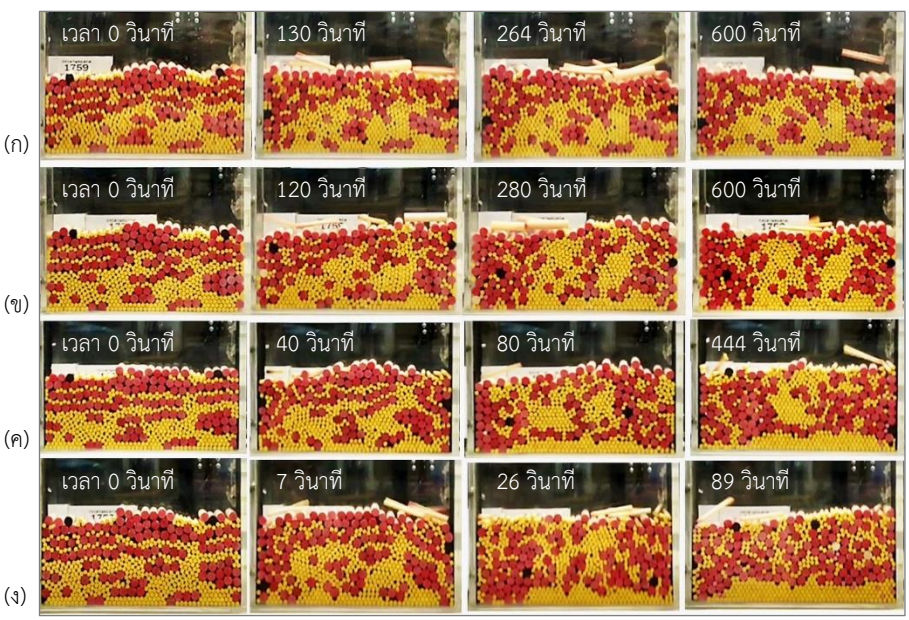
ภาพที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ฮิโนกิและผนังชนิดต่าง ๆ

เนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีค่าใกล้เคียงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ฮิโนกิกับผนังไม้ฮิโนกิ และกลุ่มที่มีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอนุภาคไม้ฮิโนกิกับไม้ฮิโนกิ ดังนั้นจึงเลือกวัสดุผนัง 3 ชนิด ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ (μ = 0.376) ผนังอะคริลิค (μ = 0.432) และผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 (μ = 0.790) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการพาของกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง โดยวิเคราะห์อนุภาคขนาดใหญ่ 2 อนุภาค (อนุภาคสีดำ) ทั้ง 4 ประเด็นดังนี้

1. การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดในภาชนะที่มีแรงเสียดทานผนัง

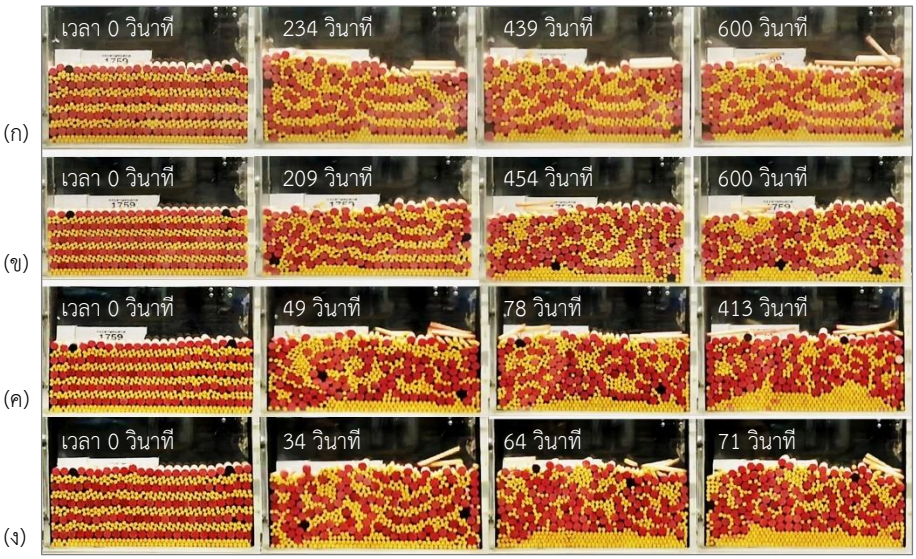
วัสดุเม็ดเคลื่อนที่จากด้านบนของกลุ่มมาบริเวณด้านข้างของภาชนะผ่านผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิค จนกระทั่งเวลาผ่านไป 600 วินาที วัสดุเม็ดไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณตรงกลางของภาชนะได้ โดยการเคลื่อนที่จะอยู่ที่เดิมหรือแทบจะไม่เคลื่อนที่ โดยจะทำการทดลอง

แบ่งเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ เริ่มต้นการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสุ่มและแบบชั้น ดังภาพที่ 4 (ก และ ข) เริ่มต้นโดยการทดลองลักษณะการจัดเรียงวัสดุแบบสุ่ม ส่วนวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังผ้ากำมะหยี่และผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 วัสดุเม็ดจะค่อย ๆ เคลื่อนที่จากด้านบนมาทางด้านข้างของภาชนะแล้วเคลื่อนที่มาบริเวณกลางภาชนะและเคลื่อนที่สู่ด้านบนของภาชนะอีกครั้ง เป็นการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ เรียกว่า “การพา” (สกนธ์, 2552) โดยวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของภาชนะจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะตามทิศทวนเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาภาชนะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะตามทิศตามเข็มนาฬิกา (Wibowo *et al.*, 2016) ซึ่งวัสดุเม็ดที่ไม่สามารถเกิดการพาได้ เป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่าน้อย ดังภาพที่ 4 (ค และ ง) แสดงให้เห็นว่าแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีผลต่อความสามารถในการพา (Klongboonjit and Campbell, 2008)



ภาพที่ 4 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่ใช้วัสดุผนังชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ (μ = 0.376) (ก) ผนังอะคริลิค (μ = 0.432) (ข) ผนังกระดาษ ทรายเบอร์ 400 (μ = 0.790) (ค) และผนังกำมะหยี่ (μ = 0.825) (ง) เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่ม

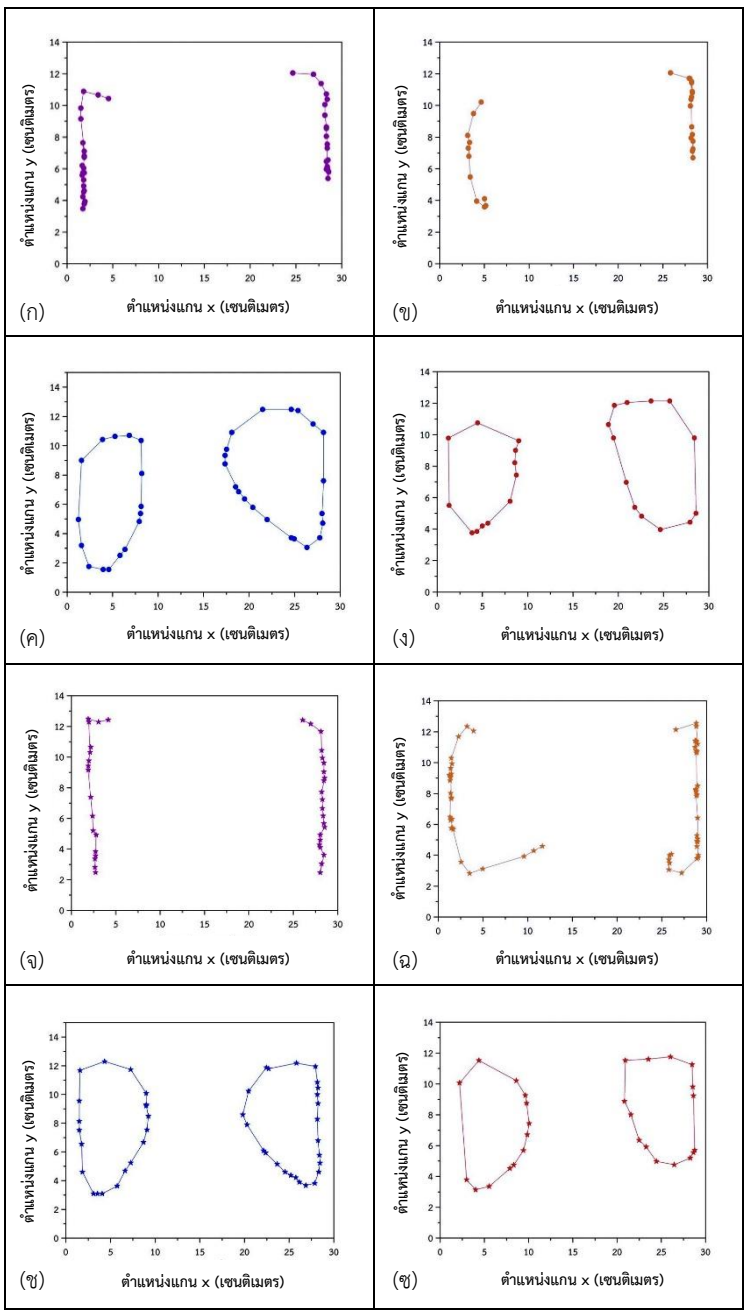
ในทำนองเดียวกันเริ่มต้นโดยการทดลองลักษณะการจัดเรียงแบบชั้น ดังภาพที่ 5 (ก และ ข) พบว่าวัสดุเม็ดเริ่มต้นจะอยู่ด้านบน จากนั้นวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของภาชนะเคลื่อนที่มายังด้านข้างของภาชนะด้วยทิศทวนเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาของภาชนะจะเคลื่อนที่มายังด้านข้างของภาชนะด้วยทิศตามเข็มนาฬิกา วัสดุเม็ดเคลื่อนที่ลงมาด้านล่าง จนกระทั่งเวลาผ่านไป 600 วินาที วัสดุเม็ดยังเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งเดิม สำหรับการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดจากวัสดุผนังอะคริลิค จะเกิดการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับผนังกระดาษฟอยล์ ดังภาพที่ 5 (ค และ ง) แต่วัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของภาชนะจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างของภาชนะมายังบริเวณตรงกลางของภาชนะแล้วเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งเดิมจนกระทั่งเวลาผ่านไป 600 วินาที ทำให้ไม่เกิดการพา



ภาพที่ 5 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่ใช้วัสดุผนังชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ (μ = 0.376) (ก) ผนังอะคริลิค (μ = 0.432) (ข) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 (μ = 0.790) (ค) และผนังกำมะหยี่ (μ = 0.825) (ง) เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบขั้น

2. รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด

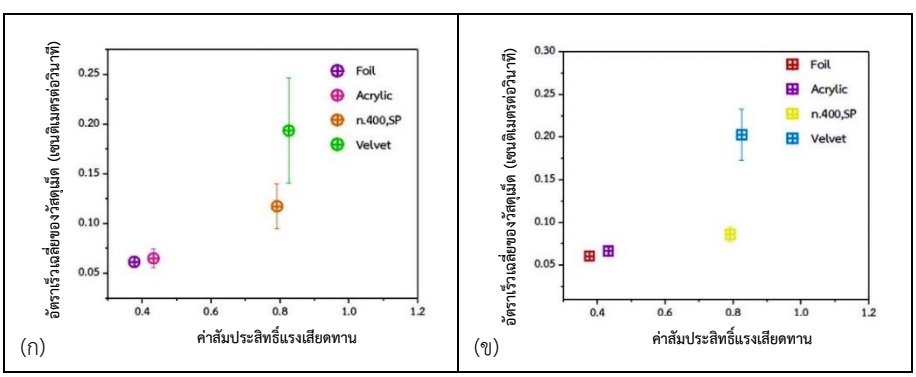
จากการทดลองสังเกตการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดในภาชนะที่มีแรงเสียดทานด้านข้างที่ต่างกันภายใต้การสั่นที่มีความเร่งไร้มิติและความถี่เดียวกันโดยการถ่ายวีดิโอ และนำไปวิเคราะห์วีดิโอโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอแทรคเกอร์ โดยติดตามวัสดุที่อยู่บริเวณข้างผนังทั้ง 2 ด้าน วัสดุมีการเคลื่อนที่เป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดจากผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิก พบว่าแรงเสียดทานไม่มีแรงพอที่จะทำให้เกิดการพาครบเป็นวงซึ่งจะมีรูปแบบการพาที่เสมือนหยุดนิ่ง (Zhang *et al*., 2023) ดังภาพที่ 6 (ก และ ข) ส่วนวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังผ้ากำมะหยี่และกระดาษทรายเบอร์ 400 จะเกิดการพาครบ 1 รอบ วัสดุเม็ดจะเกิดการพาเป็นแนว 2 วง บริเวณด้านซ้ายและด้านขวาของภาชนะ และในทำนองเดียวกันกับกรณีเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบชั้นแสดงในภาพที่ 6 (จ และ ฉ) ส่วนภาพที่ 6 (ค และ ง) เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะจะลากวัสดุเม็ดที่ใกล้ผนังด้านข้างลงมาบริเวณด้านข้างภาชนะ ถ้าแรงเสียดทานมีค่ามากพอก็จะช่วยให้วัสดุเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางระบบได้ แต่ถ้าแรงเสียดทานมีค่าน้อยหรือไม่เพียงพอวัสดุเม็ดก็ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางของระบบได้ และในทำนองเดียวกันกับกรณีเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบชั้นดังภาพที่ 6 (ช และ ซ) ซึ่งแสดงในเห็นว่ารูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดทั้ง 2 กรณี ทำให้เกิดการพามีลักษณะเป็นวงรี 2 วง ขนาดไม่เท่าในกรณีจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสุ่มและมีลักษณะคล้ายกันในกรณีมีการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบชั้น



ภาพที่ 6 รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่ม ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ (μ = 0.376) (ก) ผนังอะคริลิค (μ = 0.432) (ข) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 (μ = 0.790) (ค) และผนังผ้ากำมะหยี่ (μ = 0.825) (ง) เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบชั้น ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ (μ = 0.376) (จ) ผนังอะคริลิค (μ = 0.432) (ฉ) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 (μ = 0.790) (ช) และผนังผ้ากำมะหยี่ (μ = 0.825) (ซ)

3. อัตราเร็วเฉลี่ย

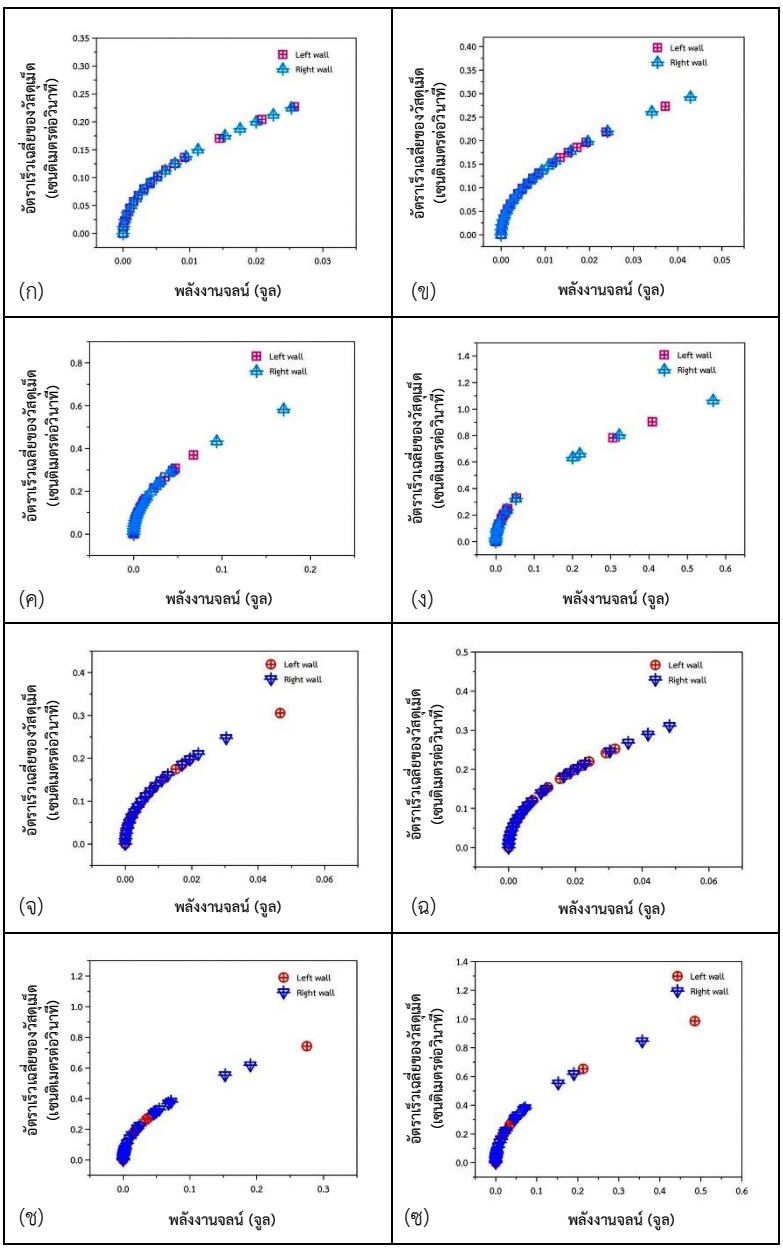
อัตราเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเป็นอัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่วิเคราะห์ 2 อนุภาค คือ วัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายและวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาของภาชนะ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ฮิโนกิกับผนังกระดาษฟอยล์มีค่าเท่ากับ 0.379 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ฮิโนกิกับผนังอะคริลิค ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ที่มีค่า 0.432 0.790 และ 0.825 ตามลำดับ จึงทำให้อัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดมีค่าน้อยที่สุด ด้วยซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.061 เซนติเมตรต่อวินาที ส่วนอัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังผ้ากำมะหยี่มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 0.203 เซนติเมตรต่อวินาที (ภาพที่ 7) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นปัจจัยที่ทำให้อัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดเปลี่ยนไปทั้ง 2 กรณี คือกรณีเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่มและเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบชั้น



ภาพที่ 7 อัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ฮิโนกิกับผนังชนิดต่าง ๆ เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่ม (ก) และเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบชั้น (ข)

4. พลังงานจลน์ในแนวตั้ง

จากการนำวีดิโอที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม พบว่าวัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่ช้าเมื่อผ่านผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิคจึงทำให้พลังงานจลน์มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับพลังงานจลน์ของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่มและแบบชั้น เนื่องจากวัสดุเม็ดเคลื่อนที่เร็วและใช้เวลาน้อย ดังนั้นจึงทำให้รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่ใช้ผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิค วัสดุเม็ดไม่สามารถเคลื่อนที่ไปบริเวณกลางภาชนะได้ (ภาพที่ 8) ซึ่งสนับสนุนงานวิจัยของ Fortini and Huang (2015) ที่มีการตรวจสอบการเริ่มต้นของการพาที่ผนังในวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นสะเทือนในแนวตั้งโดยใช้การทดลองและการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์แบบสองมิติ พบว่าการพาที่เกิดจากผนังเกิดขึ้นภายในบริเวณผิวบนจะกระดอนของพื้นที่ตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความถี่ แอมพลิจูด และความเร่งไร้มิติ เป็นต้น ซึ่งวัสดุเม็ดจะมีพฤติกรรมเหมือนลูกบอลกระดอนระหว่างการทดลองและการจำลองสำหรับการเร่งความสั่นสะเทือนสูงสุดที่มีการพาจะเริ่มม้วนวนเป็นวง ทำให้อัตราเร็วของการม้วนพาภายในภาชนะส่งผลต่อพลังงานที่เกิดขึ้นของวัสดุเม็ดเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 8 พลังงานจลน์กับอัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังชนิดต่าง ๆ เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่ม ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ (μ = 0.376) (ก) ผนังอะคริลิค (μ = 0.432) (ข) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 (μ = 0.790) (ค) และผนังผ้ากำมะหยี่ (μ = 0.825) (ง) และเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบชั้น ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ (μ = 0.376) (จ) ผนังอะคริลิค (μ = 0.432) (ฉ) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 (μ = 0.790) (ช) และผนังผ้ากำมะหยี่ (μ = 0.825) (ซ)

การอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยเรื่องผลของการเสียดทานของผนังภาชนะต่อรูปแบบของการพาในการสั่นแนวตั้งสำหรับวัสดุเม็ด ภายใต้การศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะชนิดต่าง ๆ และรูปแบบการจัดเรียงวัสดุเม็ด โดยในที่นี้ใช้วัสดุเม็ด 2 ขนาดเพื่อเสริมให้เกิดการพา แล้วพิจารณาหัวข้อดังนี้

1. การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด

จากการทดลองพบว่าวัสดุเม็ดจะอยู่ด้านบนของกลุ่มวัสดุเม็ด หลังจากนั้นวัสดุเม็ดจะค่อย ๆ เคลื่อนที่มาทางด้านข้างของภาชนะ แล้วเคลื่อนที่มาบริเวณกลางภาชนะ และเคลื่อนที่สู่ด้านบนของภาชนะอีกครั้ง เป็นการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ เรียกว่า “การพา” โดยวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของภาชนะจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะด้วยทิศทวนเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาของภาชนะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะด้วยทิศตามเข็มนาฬิกา (Wibowo *et al*., 2016) ซึ่งวัสดุเม็ดที่ไม่สามารถเกิดการพาได้เป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่าน้อย ดังนั้นแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีผลต่อความสามารถในการพา (Klongboonjit and Campbell, 2008)

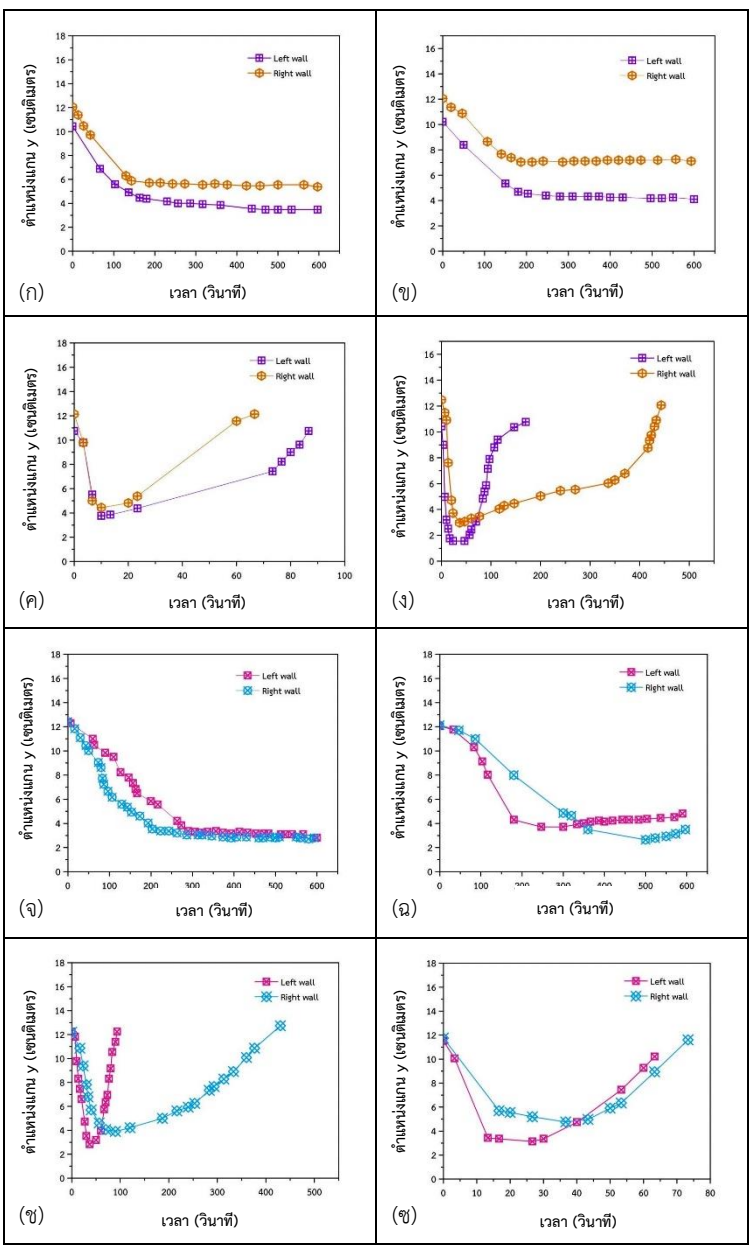
2. รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด

จากการทดลองพบว่าเมื่อวัสดุเม็ดเกิดการพา 1 วง วัสดุเม็ดจะเกิดม้วนการพา 2 วง บริเวณด้านซ้ายและด้านขวาของภาชนะ เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะจะลากวัสดุเม็ดที่ใกล้ผนังด้านข้างลงมาบริเวณด้านข้างภาชนะ (Chaiworn *et al*., 2014) ถ้าแรงเสียดทานมีค่ามากพอก็จะช่วยให้วัสดุเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางระบบได้ แต่ถ้าแรงเสียดทานมีค่าน้อยหรือไม่เพียงพอวัสดุเม็ดก็ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางของระบบได้ นอกจากนี้แล้วลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งแกน x และตำแหน่งแกน y มีลักษณะเป็นวงรี 2 วง ขนาดไม่เท่าในกรณีจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสุ่ม ดังภาพที่ 4 และ 6 และมีลักษณะคล้ายกันในกรณีมีการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบชั้น ดังภาพที่ 5 และ 6 ทั้งนี้มีลักษณะครึ่งวงรี กรณีไม่สามารถเกิดการพา ดังนั้นแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะและการจัดเรียงวัสดุเม็ดมีผลต่อรูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด ซึ่งสนับสนุนการศึกษารูปแบบการพาของวัสดุเม็ดและการแยกตัวแบบแคบบนการสั่นสะเทือนของวัสดุเม็ดพื้นการกระจายตัวเริ่มต้นของวัสดุเม็ดภายในภาชนะจะแตกต่างกัน 2 ส่วนระหว่างผนังของภาชนะ การพาและการแยกของวัสดุเม็ดเปลี่ยนไปในขั้นสุดท้ายทำให้เกิดการพาเป็น 2 วง แบบไม่สมมาตรเช่นเดียวกัน (Liu *et al*., 2017) นอกจากนี้รูปแบบการพาพบว่าแรงขับเคลื่อนที่อยู่เบื้องล่างคือสนามการไหลของแรงเฉือนที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดขึ้นจากผลรวมของการต้านของความเสียดทานของผนังและการดึงแรงโน้มถ่วงลง การเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการพาด้วยแอมพลิจูด และอัตราเร่งไร้มิติ ทำให้อัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความแข็งแรงของการพาและการม้วนการพาภายในการสั่นเช่นกัน (Xue *et al*., 2013)

3. เวลาที่ใช้สำหรับการเกิดการพา

จากการทดลองพบว่าวัสดุเม็ดจะเกิดการพาได้เร็วหรือช้าเป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะ (Chaiworn *et al*., 2014) ถ้าแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่ามากจะทำให้เกิดการพาได้เร็ว แต่ถ้าแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่าน้อยหรือไม่เพียงพอต่อการเคลื่อนที่เข้าสู่ตรงกลางภาชนะ อีกทั้งวัสดุเม็ดที่จัดเรียงเป็นแบบชั้นสามารถเกิดการพาได้เร็วกว่าวัสดุเม็ดที่จัดเรียงแบบสุ่ม ดังนั้นแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะ และ

การจัดเรียงวัสดุเม็ดมีผลเวลาในการเกิดการพา นอกจากนี้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับตำแหน่งแกน y ของผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิคกราฟจะลดลงในช่วงแรกแล้วเป็นเส้นตรงจนกระทั่งถึงเวลาที่กำหนด ส่วนกราฟระหว่างเวลาและตำแหน่งแกน y ของผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ กราฟจะลดลงในช่วงแรกจากนั้นจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงตำแหน่งแกน y เท่ากับเริ่มต้น ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เวลาที่ใช้ในการเกิดการพากับตำแหน่งแกน y เมื่อวัสดุเม็ดเคลื่อนที่ผ่านผนังชนิดต่าง ๆ เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่ม ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ (μ = 0.376) (ก) ผนังอะคริลิค

(μ = 0.432) (ข) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 (μ = 0.790) (ค) และผนังผ้ากำมะหยี่ (μ = 0.825) (ง) และเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบชั้น ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ (μ = 0.376) (จ) ผนังอะคริลิค (μ = 0.432) (ฉ) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 (μ = 0.79) (ช) และผนังผ้ากำมะหยี่ (μ = 0.825) (ซ)

4. อัตราเร็วเฉลี่ย

จากการศึกษาพบว่าอัตราเร็วเฉลี่ยเป็นปฏิภาคตรงกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะ ดังนั้นวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วมากก็จะสามารถเกิดการพาได้เร็วด้วยเช่นกัน ส่วนวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วน้อยอาจจะเกิดการพาได้ช้าหรือไม่สามารถเกิดการพาได้ และความเร่งไร้มิติก็ส่งผลทำให้เกิดการพาและการแยกเช่นกัน ดังภาพที่ 6 ซึ่งสามารถดูได้จากระยะห่างระหว่างตำแหน่งบนเส้นกราฟเมื่อเทียบกับเวลาระหว่างตำแหน่งที่เท่ากัน เมื่อระยะตำแหน่งน้อยแสดงอัตราเร็วที่ช้ากว่าระยะตำแหน่งที่มากจะมีอัตราเร็วที่เร็วกว่า ซึ่งสอดคล้องกับศึกษาเกี่ยวกับการแยกของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นสะเทือนโดยวิธีแบบไม่ต่อเนื่อง อัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคขนาดใหญ่ และระดับการแยกตัวโดยรวมมีความสัมพันธ์กับความกว้างของอัตราเร็วการสั่นสะเทือนและความถี่ไร้มิติ (Qiao *et al*., 2021) นอกจากนี้มีการสร้างแบบจำลองการแยกส่วนแบบบิดแยกของอัตราเร็วและความหนาแน่นของวัสดุเม็ด วัดอัตราเร็วของวัสดุเม็ดและความหนาแน่นของเม็ด ซึ่งรูปแบบนี้แสดงลักษณะการแบ่งแยกในระดับต่าง ๆ ผลกระทบจากอัตราเร็วของวัสดุเม็ดและความหนาแน่นของวัสดุเม็ดในชั้นการไหลเป็นหลัก ซึ่งผลการวัดอัตราเร็วและความหนาแน่นวัสดุเม็ดจากการทดลองสำหรับวัสดุเม็ดที่มีรูปร่างทรงกลมในภาชนะหมุนกึ่งสองมิติ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของวัสดุเม็ดตามทิศทางความลึกของชั้นการไหล (Xiu *et al*., 2023)

5. พลังงานจลน์ในแนวตั้ง

จากการศึกษาพบว่าพลังงานจลน์เป็นปฏิภาคตรงกับอัตราเร็ว โดยปัจจัยที่มีผลต่อพลังงาน ได้แก่ อัตราเร็ว แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะ และการจัดเรียงวัสดุเม็ด นอกจากนี้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์กับอัตราเร็วในแนวตั้ง มีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วในแนวตั้งเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 8 เช่นเดียวกันการทดลองพลังงานที่กระจายไปและสถานการณ์เคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดเล็กในภาชนะปิดแบบกึ่ง 2 มิติภายใต้การสั่นด้วยความถี่คงที่ในแนวตั้งจะถูกตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบการจำลององค์ประกอบแบบไม่ต่อเนื่องกับการทดสอบการทดลองแบบจำลอง DEM (discrete element method) พฤติกรรมพลวัตของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นที่มีแอมพลิจูดและความถี่ที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อพลังงานของวัสดุเม็ดในระบบเช่นกัน (Zhang *et al*., 2022) นอกจากนั้นขนาดของวัสดุเม็ดทั้งระบบส่งผลต่อระบบพลังงานทั้งหมดเช่นเดียวกับการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนขนาดของวัสดุเม็ดต่อการผสมกับวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นสะเทือนแนวตั้ง (Menbari and Hashemnia, 2020)

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลแรงเสียดทานผนังของพฤติกรรมการพาบนกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวดิ่งที่ความถี่และความเร่งไร้มิติเดียวกัน โดยการวิเคราะห์วัสดุเม็ด 2 อนุภาค (อนุภาคสีดำ) พบว่าวัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่จากด้านบนของกลุ่มวัสดุเม็ดมายังด้านข้างภาชนะที่ติดด้วยผนังกระดาษทราย

เบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ จากนั้นเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณกลางภาชนะแล้วเคลื่อนที่สู่ด้านบนอีกครั้ง เป็นการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ เรียกว่า “การพา” โดยเกิดม้วนการพา 2 วง บริเวณด้านซ้ายและด้านขวาของภาชนะ การเกิดการพาของวัสดุเม็ดจากผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ เนื่องจากแรงเสียดทานมีค่ามากทำให้อัตราเร็วในการเคลื่อนที่มากส่งผลทำให้พลังงานจลน์มีค่ามากด้วย เมื่อเทียบกับพลังงานจลน์ของผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิค แต่วัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่จากด้านบนมาด้านข้างของภาชนะผ่านผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิค จากนั้นเคลื่อนที่อยู่บริเวณเดิมหรือแทบจะไม่เคลื่อนที่ ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณกลางภาชนะ จึงไม่เกิดการพา ดังนั้นพฤติกรรมการพาของกลุ่มวัสดุเม็ดที่สั่นในแนวดิ่งภายใต้ความถี่และความเร่งไร้มิติเดียวกัน มีปัจจัยหลักมาจากแรงเสียดทานผนัง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ได้แก่ พลังงานจลน์ และอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ที่มีต่อพฤติกรรมการพาของกลุ่มวัสดุเม็ด

ข้อเสนอแนะ

การออกแบบภาชนะควรออกแบบให้มีความกว้างมากกว่าความยาวของวัสดุเม็ด เนื่องจากขณะสั่นวัสดุอาจจะติดภาชนะได้ ควรเพิ่มความกว้างของภาชนะ เพื่อศึกษาม้วนการพาที่อาจจะเกิดมากกว่าหรือน้อยกว่า 2 วง ควรเพิ่มชนิดวัสดุผนังเพื่อสามารถเปรียบเทียบได้ดีกว่า อาจศึกษาผลแรงเสียดทานผนังของพฤติกรรมการพาของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง โดยให้ผนังด้านหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ และศึกษาผลแรงเสียดทานผนังของพฤติกรรมการพาของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวนอนโดยใช้ความเร่งไร้มิติหลายค่า เพื่อเปรียบเทียบผล และผลงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ทางด้านอุตสาหกรรมและการสร้างชุดกิจกรรมในการสนับสนุนการเรียนรู้วิชาฟิสิกส์และสาขาประยุกต์ทางฟิสิกส์และวิศวกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนในด้านสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือเพื่อใช้ในการทดลองในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

สกนธ์ คล่องบุญจิต. (2552). การศึกษาอิทธิพลของปรากฏการณ์การหมุนวนกับการผสมกันของระบบวัสดุเม็ดกลมในภาชนะบรรจุเชิง 2 มิติด้วยเทคนิคการจำลองเหตุการณ์แบบวัสดุเม็ดนิ่ม. *วิศวสารลาดกระบัง*, 26(4), 31-36.

อภินทร์รัตน์ ขันแกล้ว มนัญชัย ไชยเพศ วิรยา หลังหลี และพิชญา ทิพย์ศรี. (2022). การวัดความเร็วปลายในการตกของโลหะทรงกลมรัศมีแตกต่างกันในกลีเซอรีนโดยใช้ตัวตรวจจับเวลาที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์. *วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช,* 41(2), 1-15.

Chaiworn, P., Chung, F.F. and Liaw, S.S. (2014). Pseudo 2-dimensional trajectory of a particle in vibrating granular bed. *International Journal of Applied Physics and Mathematics,* 4(1), 27-30, doi: https://doi.org/10.7763/IJAPM.2014.V4.249.

Fortini, A. and Huang, K. (2015). Role of defects in the onset of wall-induced granular convection. *Physical Review E,* 91(3), doi: https://doi.org/10.1103/PhysRevE.91.032206.

Klongboonjit, S. and Campbell, C.S. (2008). Convection in deep vertically shaken particle beds. I, *General Features. Physics of Fluids,* 20(10), doi: https://doi.org/10.1063/1.2996134.

Liu, C., Wu, P., Wang, L., Tong, L. and Yin, S. (2017). Patterns of granular convection and separation in narrow vibration bed. *EPJ Web of Conferences,* 140(1), doi: https://doi.org/10.1051/epjconf/201714003031.

Menbari, A. and Hashemnia, K. (2020). Studying the particle size ratio effect on granular mixing in a vertically vibrated bed of two particle types. *Particuology,* 53(1), 100-111, doi: https://doi.org/10.1016/j.partic.2020.01.007.

Qiao, J., Duan, C., Dong, K., Wang, W., Jiang, H., Zhu, H. and Zhao, Y. (2021). DEM study of segregation degree and velocity of binary granular mixtures subject to vibration. *Powder Technology,* 382(1), 107-117, doi: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.12.064.

Wibowo, H.A.C., Ain, T.N., Nugraha, Y.P., Aji, D.P.P., Khotimah, S.N. and Viridi, S. (2016). Experimental study of granular convection in (real) two-dimension Brazil-nut effect. *Journal of Physics: Conference Series,* 739(1), doi: https://doi.org/10.1088/1742-6596/739/1/012053.

Xiu, W., Lib, R., Chen, Q., Sun, Q. Zivkovic, V. and Yang, H. (2023). Prediction of segregation characterization based on granular velocity and concentration in rotating drum. *Particuology,* 73(1), 17-25, doi: https://doi.org/10.1016/j.partic.2022.03.008.

Xue, K., Zheng, Y., Fan, B., Li, F. and Bai, C. (2013). The origin of granular convection in vertically vibrated particle beds: The differential shear flow field. *The European Physical Journal E,* 36(8), 1-11, doi: https://doi.org/10.1140/epje/i2013-13008-1.

Zhang, K., Zhong, H., Chen, T., Kou, F., Chen, Y. and Bai, C. (2022). Dissipation behaviors of granular balls in a shaken closed container. *Mechanical Systems and Signal Processing,* 172(1), doi: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.108986.

Zhang, X., Zhang, D., Wang, Y., Ji, S. and Zhao, H. (2023). Dynamic characteristics of sphere impact into wet granular materials considering suction. *Granular Matter,* 25(1), doi: https://doi.org/10.1007/s10035-022-01304-9.

การศึกษากิจกรรมฟาโกไซติกของกากถั่วเหลืองที่หมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* TISTR 2664

The Study of *In vitro* Phagocytic Activity of Soybean Meal Fermented with *Bacillus subtilis* TISTR 2664

กมลศรี นวลคำ[1] วรรณวิภา ชื่นชม[1] ภัทราวดี เก่งกว่าสิงห์[2] หนึ่งนุช ไชยวรรณ์[1]
วิโรจน์ เตชะภูริปัญญา[3] และวัชรี กัลยาลัง[1*]
Kamonsri Nuankham[1] Wanvipa Chuenchom[1] Pattarawadee Kengkwasingh[2]
Neungnut Chaiyawan[1] Viroj Tachapuripunya[3] and Watcharee Kunyalung[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการกระตุ้นกิจกรรมฟาโกไซติกรวมถึงชนิดและส่วนประกอบของเปปไทด์ในกากถั่วเหลืองที่หมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* TISTR 2664 โดยกากถั่วเหลืองที่ใช้ได้รับจากโรงงานผลิตน้ำมันถั่วเหลืองซึ่งมีองค์ประกอบต่าง ๆ คือ โปรตีน 44.65 เปอร์เซ็นต์ น้ำมัน 1.28 เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 12.08 เปอร์เซ็นต์ เถ้า 6.40 เปอร์เซ็นต์ และใยอาหาร 5.54 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านการหมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 แล้วตรวจสอบด้วย SDS-PAGE พบว่าโปรตีนส่วนใหญ่มีขนาดอยู่ในช่วง 5-29 กิโลดาลตัน และจากการวิเคราะห์ชนิดของเปปไทด์ด้วยวิธี liquid chromatography-mass spectrometry พบว่าประกอบด้วยเปปไทด์ 8,981 ชนิด และผลการทำนายคุณสมบัติเชิงหน้าที่ด้วยโปรแกรมชีวสารสนเทศพบว่ามีคุณสมบัติทางชีวภาพ 10 คุณสมบัติ คือ ฤทธิ์ต้านมะเร็ง ต้านเชื้อรา ลดความดันโลหิต ต้านจุลชีพ ต้านปรสิต ต้านการอักเสบ ต้านไวรัส กระบวนการสื่อสารระหว่างเซลล์ การนำส่งยา และการจับจำเพาะกับเซลล์มะเร็ง โดยผลการทำนายนี้จะมีประโยชน์ต่อการวางแผนการนำเปปไทด์ที่ได้ไปศึกษาเพิ่มเติมเพื่อนำไปสู่การใช้ประโยชน์ ทั้งนี้จากการตรวจสอบด้านความเป็นพิษที่มีต่อเซลล์มาโครฟาจ RAW264.7 โดยเทคนิค MTT พบว่าที่ความเข้มข้น 0-25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ และที่ความเข้มข้น 12.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มีฤทธิ์กระตุ้นกิจกรรมฟาโกไซติกได้สูงสุดที่ 93.27±0.50 เปอร์เซ็นต์ ให้ผลสูงกว่าสารควบคุมเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) และสร้างไนตริกออกไซด์ได้ 48.53±0.35 ไมโครโมลาร์ โดยค่าต่ำกว่าสารควบคุมเชิงบวกในทุกระดับความเข้มข้นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการศึกษานี้บ่งชี้ว่ากากถั่วเหลืองหมักมีคุณสมบัติกระตุ้นภูมิคุ้มกันซึ่งจะเป็น

[1] ศูนย์ความหลากหลายทางชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)
[2] ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมผลิตภัณฑ์สมุนไพร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)
[3] ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[*] Corresponding author e-mail: watcharee@tistr.or.th

Received: 21 March 2023, Revised: 30 March 2023, Accepted: 31 March 2023

แนวทางวิจัยพัฒนาต่อเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารเสริมสุขภาพและเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจต่อไป

คำสำคัญ: กากถั่วเหลืองหมัก *Bacillus subtilis* กิจกรรมฟาโกไซติก เปปไทด์

Abstract

This study aimed to investigate the components and activity of bioactive peptides derived from *Bacillus subtilis* TISTR 2664 fermentation of soybean meal to stimulate phagocytosis. Soybean meal obtained from a soybean oil factory was used as a raw material for fermentation. It contained 44.65% protein, 1.28% oil, 5.54% dietary fiber, 12.08% moisture and 6.40% ash. When fermented with *B. subtilis* TISTR2664 and examined by SDS-PAGE, most of the protein size remained in the range of 5-29 kilo Dalton (kDa). The 8,981 types of peptides in the fermented soybean meal were investigated by Liquid Chromatography-Mass Spectrometry (LC-Q-TOF-MS/MS). Ten biologically active peptides having the following properties were predicted: anticancer, antifungal, antihypertensive antimicrobial antiparasitic anti-inflammatory antivirus cell communication, drug delivery, and tumor homing. Interestingly, the peptides with antihypertensive properties were found in the highest amounts. The results of this prediction will be useful for planning for further laboratory trials of the peptide derived from fermented soybean meal to lead to its utilization. A preliminary laboratory investigation into the toxicity of fermented soybean meal on RAW264.7 mouse macrophages was performed using the MTT assay. No cytotoxicity was observed at less than or equal to 25 milligrams per milliliters (mg/ml), with more than 70% viability of RAW264.7 cells. Moreover, sample concentrations ranging from 3.13 to 25 mg/ml were investigated. The results showed that at a 12.5% concentration, the highest phagocytic activity was induced at 93.27±0.50%, which was significantly higher than that of the positive control ($p < 0.01$). Nitric oxide production at 48.53±0.35 micromolar (μM) was non-significantly different from the positive control at all tested sample concentrations. The result of this study can be used as a guideline for fermented soybean meal research in immune stimulation for further development as a health supplement or as an added economic value.

Keywords: Fermented soybean meal, *Bacillus subtilis*, Phagocytic activity, Peptides

บทนำ

ปัจจุบันการบริโภคผลิตภัณฑ์อาหารจากถั่วเหลืองมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารสู่ความยั่งยืนส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีถั่วเหลืองเป็นองค์ประกอบหลักเพิ่มขึ้น เช่น น้ำมันถั่วเหลือง นมถั่วเหลือง เต้าหู้ ฯลฯ ถั่วเหลืองถือเป็นแหล่งของโปรตีนคุณภาพสูงเนื่องจากมีปริมาณโปรตีนสูงถึง 36-56 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก (Wen *et al.*, 2022) มีกรดอะมิโนที่จำเป็นในสัดส่วนที่เหมาะสม ไขมัน 20 เปอร์เซ็นต์ คาร์โบไฮเดรต 35 เปอร์เซ็นต์ แร่ธาตุ 5 เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 10 เปอร์เซ็นต์ และสารประกอบอื่น ๆ เช่น กรดไขมัน วิตามิน ฟลาโวนอยด์ ไอโซฟลาโวน กรดฟีนอล และซาโปนิน (Medic, 2014) ดังนั้นกากถั่วเหลืองที่เหลือจากการผลิตอาหารจึงเป็นวัตถุดิบราคาถูกที่หาได้ง่ายและมีคุณค่าทางอาหารสูง

คุณสมบัติทางชีวภาพของเปปไทด์ที่ผลิตจากโปรตีนถั่วเหลืองนั้นมีความโดดเด่น ซึ่งเปปไทด์เป็นสารอาหารที่จำเป็นที่เกิดจากการย่อยของโปรตีนด้วยเอนไซม์หรือจากการหมักด้วยจุลินทรีย์ให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง มีความปลอดภัยและคุณประโยชน์หลากหลาย สามารถควบคุมการทำงานของสรีรวิทยาหรือป้องกันโรคความเสื่อมเรื้อรัง (Chatterjee *et al.*, 2018) ช่วยลดความดันโลหิต ภาวะไฮโปโคเลสเทอโรเลมิก ต้านอนุมูลอิสระ ต้านโรคอ้วน ต้านเบาหวาน ต้านมะเร็ง (Singh *et al.,* 2022) การออกฤทธิ์ทางชีวภาพของเปปไทด์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันในการทำหน้าที่ควบคุมระบบทางเดินอาหาร ระบบประสาท ระบบหัวใจและหลอดเลือด ระบบภูมิคุ้มกัน การต้านอนุมูลอิสระ และการยับยั้งเอนไซม์ที่เปลี่ยน angiotensin I ไปเป็น angiotensin II ซึ่งเป็นสาเหตุของการเป็นโรคความดันโลหิตสูง (Korhonen and Pihlanto, 2006; Escudero *et al.,* 2012; Castellano *et al.,* 2013) นอกจากนี้มีรายงานวิจัยเกี่ยวกับเปปไทด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น เปปไทด์ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ในโดจากข้าวสาลีที่หมักด้วยแบคทีเรียแลกติก (Coda *et al.,* 2012) เป็นต้น จากการศึกษาโครงสร้างและการออกฤทธิ์ทางชีวภาพของเปปไทด์ที่ได้จากการย่อยถั่วเหลืองด้วยเอนไซม์ พบว่าเพิ่มความสามารถของเซลล์ RAW264.7 ในการเกิดพิโนไซโทซิส (pinocytosis) และการสร้างไนตริกออกไซด์ Interleukin-6 (IL-6) และ TNF-α (Wen *et al.,* 2022) นอกจากนี้มีรายงานการหมักกากถั่วเหลืองด้วยจุลินทรีย์ผสม 3 สายพันธุ์ คือ *Bacillus subtilis Lactobacillus casei* และ *Hansenula anomala* พบว่าช่วยลดอาการท้องเสียในลูกสุกรได้ดีกว่ากลุ่มควบคุม ($p < 0.05$) (Yuan *et al.*, 2017) เปปไทด์ที่ได้จากถั่วเหลืองมีคุณสมบัติในการปรับสมดุลของระบบภูมิคุ้มกัน ได้แก่ YPFVV MITLAIPVNKPGR MITLAIPVN HCGAPA และ GAPA (Chatterjee *et al.*, 2018; Yoshikawa, 2015) ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวของเปปไทด์จะมีผลดีโดยรวมต่อการทำงานของร่างกายและสุขภาพของผู้บริโภค แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาคุณสมบัติด้านองค์ประกอบของเปปไทด์และกลไกที่มีต่อระบบภูมิคุ้มกันยังมีปริมาณจำกัด

คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำกากถั่วเหลืองมาใช้เป็นวัตถุดิบในการหมักด้วยเชื้อแบคทีเรียเพื่อให้ได้เปปไทด์ เพราะเป็นวัตถุดิบที่มีโปรตีนคุณภาพสูงและมีกรดอะมิโนที่จำเป็นหลายชนิดเป็นองค์ประกอบ อีกทั้งเป็นการนำเอาผลิตผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำมันพืชภายในประเทศมาใช้ประโยชน์ในการเพิ่มมูลค่าด้านอาหารเสริมสุขภาพ โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีต่อระบบภูมิคุ้มกันในการกระตุ้นการจับกินสิ่งแปลกปลอมของเม็ดเลือดขาวหรือการเกิดกิจกรรมฟาโกไซติกของเปปไทด์ที่ได้จากการหมักกากถั่วเหลืองด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR

2664 ที่แยกได้จากถั่วเน่าและมีคุณสมบัติในการสร้างเอนไซม์โปรตีเอส รวมถึงการศึกษาลำดับกรดอะมิโนของเปปไทด์และชนิดของโปรตีน พร้อมการทำนายคุณสมบัติทางชีวภาพเพื่อใช้เป็นข้อมูลที่จะเป็นแนวทางในการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากเปปไทด์สำหรับปรับปรุงคุณภาพของอาหารสัตว์หรืออาหารเสริมสุขภาพต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบในกากถั่วเหลืองที่ได้จากอุตสาหกรรมน้ำมันพืช

ได้รับการสนับสนุนกากถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบจากบริษัท ธนากรผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด ทำการวิเคราะห์ทางเคมีด้วยวิธีตามมาตรฐาน American oil chemists'society โดยวิเคราะห์ความชื้น (moisture) ด้วยวิธี moisture and volatile matter forced draft oven method (AOCs Ba 2a-38) วิเคราะห์ปริมาณไขมัน (oil content) ด้วยวิธี moisture and volatile matter in cottonseed (AOCs Ba 3-38) วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนหยาบ (crude protein) ด้วยวิธี AOA 945.01 วิเคราะห์ปริมาณเยื่อใย (crude fiber) ด้วยวิธี AOCs official method Ba 6-84 และวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (ash) ด้วยวิธี AOCs official method Ba 5a-49

2. การเตรียมตัวอย่างกากถั่วเหลืองหมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664

โดยนำกากถั่วเหลืองผสมด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วน 5 ต่อ 1 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 20 นาที (Zhang *et al.,* 2020) เติมหัวเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 ให้มีปริมาณเชื้อเริ่มต้นประมาณ log 6 โคโลนีต่อกรัม บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทำการตรวจสอบการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย จากนั้นนำตัวอย่างไปทำให้แห้งแบบเยือกแข็ง (freeze dry) และปั่นละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรง 60 เมช (mesh) จากนั้นนำไปละลายด้วยน้ำกลั่นและปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้ได้ 9.5 ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5000g เป็นเวลา 10 นาที ตกตะกอนด้วยความเป็นกรด-ด่าง 4.5 ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5000g เป็นเวลา 10 นาที และปรับให้ได้ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7 นำไปทำให้แห้งแบบเยือกแข็ง ละลายด้วยน้ำกลั่นในอัตรา 1 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ก่อนนำไปทดสอบในขั้นต่อไป และทำการศึกษาขนาดด้วยเทคนิค SDS-PAGE (sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis) ในระบบ tris/tricine buffer system ด้วย 16 เปอร์เซ็นต์ เจลส่วนล่าง (resolving gel)

3. การวิเคราะห์องค์ประกอบเปปไทด์และโปรตีนของกากถั่วเหลืองที่หมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664

โดยวัดปริมาณโปรตีนในตัวอย่างด้วยวิธีของ Lowry *et al*. (1951) โดยใช้เซรั่มอัลบูมินจากวัว (bovine serum albumin) เป็นสารละลายมาตรฐาน จากนั้นละลายตัวอย่างด้วย 2x tricine sample buffer แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วปั่นตกตะกอนที่ 11,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที (Tachapuripunya *et al*., 2021) เก็บส่วนใสเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบเปปไทด์และโปรตีนด้วยเทคนิค SDS-PAGE ในระบบ tris/tricine buffer system ด้วย 12 เปอร์เซ็นต์ เจลส่วนล่าง และ 4 เปอร์เซ็นต์ เจลส่วนบน (stacking gel) จากนั้นย้อม SDS polyacrylamide gel ด้วยสีคูมาซีบลู (coomassie brilliant blue g) บนเครื่องเขย่าข้ามคืน ก่อนล้างสีย้อมด้วยน้ำยา

destain บันทึกภาพเจล ก่อนเก็บรักษาในน้ำกลั่น ย้อมสีที่สองด้วยสีย้อมซิลเวอร์ไนเตรท (silver nitrate) โดยแช่เจลในน้ำยาตรึงเซลล์ (fixative solution) เป็นเวลา 60 นาที ก่อนแช่เจลในน้ำกลั่นข้ามคืน แล้วล้างเจลด้วย 0.02 เปอร์เซ็นต์โซเดียมไทโอซัลเฟต (sodium thiosulfate) และตามด้วยน้ำกลั่น จากนั้นบ่มเจลในสารละลาย 0.1 เปอร์เซ็นต์ซิลเวอร์ไนเตรท เป็นเวลา 20 นาที ล้างเจลในน้ำกลั่น แล้วแช่ใน 3 เปอร์เซ็นต์โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate) จนแถบโปรตีนปรากฏ แล้วหยุดปฏิกิริยาด้วย 5 เปอร์เซ็นต์กรดน้ำส้ม (acetic acid) ทำการถ่ายภาพและวิเคราะห์ภาพเจลเพื่อเปรียบเทียบขนาดของโปรตีนและเปปไทด์

การวิเคราะห์ชนิดของโปรตีนและเปปไทด์ด้วยเทคนิคแมสสเปกโทรเมตรี (mass spectrometry) โดยการใช้วิธี 1D-SDS-PAGE ให้ตัวอย่างโปรตีนเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นของเจลส่วนล่างเพียง 0.5-1.0 เซนติเมตร จากนั้นย้อมเจลด้วยสีคูมาซีบลู และล้างสีส่วนเกินออกด้วยน้ำยา destain แล้วทำการตัดแถบโปรตีนออกจากแผ่นเจล และเตรียมตัวอย่างเปปไทด์จากชิ้นเจลที่ได้ด้วยเทคนิคการย่อยโปรตีนในเจลด้วยเอนไซม์ทริปซิน (in-gel trypsin digestion) เพื่อให้ได้สารละลายเปปไทด์สำหรับการวิเคราะห์ด้วย LC-Q-TOF-MS/MS แล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูล MS/MS ion spectrum ที่ได้ด้วยโปรแกรม MASCOT โดยกำหนดพารามิเตอร์ enzyme = trypsin; fixed modifications = carbamidomethyl; variable modifications = oxidation; mass values = monoisotopic; protein mass = unrestricted; peptide mass tolerance = + 1.2 Da; fragment mass tolerance = + 0.6 Da; max missed cleavage = 1 รวมข้อมูลเปปไทด์ที่มีค่าไอออน (ions scores) มากกว่า 39 และโปรตีนที่ระบุชนิดได้ เพื่อเปรียบเทียบเปปไทด์และโปรตีนจากตัวอย่าง 3 ซ้ำ ทำนายคุณสมบัติของเปปไทด์ที่ได้ด้วยโปรแกรมทำนายทางชีวสารสนเทศซึ่งพัฒนาโดย Tachapuripunya *et al*. (2021) โปรแกรมทำนายนี้ให้หลักการของการเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning) เป็นการเรียนรู้ของโปรแกรมด้วยตัวเอง โดยพัฒนาด้วยโปรแกรม R ใช้อัลกอริทึมในการทำนายหรือจำแนกประเภทข้อมูล โดยใช้การคำนวณ KNN (k-nearest neighbors:) และ random forest algorithms ด้วยข้อมูลเปปไทด์จากฐานข้อมูลเปปไทด์ที่ทราบคุณสมบัติทางชีวภาพจากการทดลองที่มีการเผยแพร่มาก่อน คณะผู้วิจัยนำเปปไทด์เหล่านี้แบ่งเป็นชุดข้อมูลการฝึก (training data) และชุดข้อมูลการทดสอบ (testing data) โดยชุดข้อมูลการฝึกจะใช้ในการพัฒนาโมเดลเพื่อทำนายเปปไทด์แต่ละคุณสมบัติ จากนั้นนำโมเดลการทำนายที่ได้มาทดสอบกับชุดข้อมูลการทดสอบ เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความแม่นยำของการทำนาย แล้วนำโปรแกรมที่ได้นี้มาใช้ทำนายกับเปปไทด์ที่ได้จากการย่อยกากถั่วเหลือง

4. การทดสอบคุณสมบัติการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของตัวอย่างในระดับเซลล์

ทำการเจือจางตัวอย่างทดสอบด้วยอาหารเลี้ยงเซลล์ 5 ระดับ เริ่มจากระดับความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถละลายได้ดี สำหรับตัวอย่างนี้ คือ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แล้วทำการเจือจางต่อไปครั้งละ 2 เท่า คือ 50.00 25.00 12.50 6.25 3.13 และ 0.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เพื่อใช้ในการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์และระดับความเข้มข้นที่มีความปลอดภัย โดยทำให้เซลล์มีชีวิตรอดมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป จะถูกนำไปใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางชีวภาพที่มีต่อระบบภูมิคุ้มกันจากการกระตุ้นให้เกิดกิจกรรมฟาโกไซติกต่อไป ซึ่งการเกิดกิจกรรมฟาโกไซติกนี้เซลล์จะมีการปลดปล่อยสารไนตริกออกไซด์ออกมาด้วย ปริมาณไนตริกออกไซด์ที่มากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการจับกิน

สิ่งแปลกปลอมของเซลล์มาโครฟาจมากยิ่งขึ้น (Zhang *et al*., 2019) ทั้งนี้ทุกการทดสอบทำการทดลอง 4 ซ้ำ ในทุกระดับความเข้มข้น

4.1 การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ (International Standard (ISO 10993-5), 2009)

ทดสอบโดยใช้เซลล์เพาะเลี้ยงชนิด RAW264.7 (mouse macrophage cell line, ATCC® TIB-71™) ที่ความเข้มข้น 1 x 10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ประเมินผลการทดสอบเชิงปริมาณโดยใช้สีของสาร MTT (3-[4, 5-dimethylthiazolyl-2]-2, 5-diphenyltetrazolium bromide) การทดสอบตรวจวัดการมีชีวิตรอดของเซลล์ แล้ววัดความเข้มของสีที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร สารตัวอย่างทดสอบที่สัมผัสกับเซลล์แล้วทำให้เซลล์ตายและเปอร์เซ็นต์การมีชีวิตของเซลล์น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเซลล์กับสารควบคุมเชิงลบ (อาหารเลี้ยงเซลล์) จะจัดสารตัวอย่างทดสอบนั้นว่ามีความเป็นพิษต่อเซลล์ เลือกความเข้มข้นที่ปลอดภัยนำไปศึกษาต่อ

4.2 การทดสอบปริมาณไนตริกออกไซด์ (Zhang *et al*., 2019)

โดยเตรียมเซลล์เพาะเลี้ยง RAW264.7 ให้มีความเข้มข้น 2x10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในจานเพาะเลี้ยงขนาด 24 หลุม เมื่อครบ 24 ชั่วโมง เปลี่ยนอาหารเลี้ยงเซลล์เป็นอาหารชนิด DMEM (dulbecco's modified eagle medium) ที่มีสารละลายตัวอย่างทดสอบที่ผสมกับสารไลโพพอลีแซ็กคาไรด์ (lipopolysaccharide: LPS) ความเข้มข้น 1 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (สารควบคุมเชิงบวก คือ สาร LPS ความเข้มข้น 1 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สารควบคุมเชิงลบ คือ ใช้สารละลายไดโคลฟีแนค (diclofenac) 40 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ผสมกับ LPS แทนตัวอย่าง) บ่มเซลล์ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และ 5 เปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำอาหารเลี้ยงเซลล์ที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณไนตริกออกไซด์ ด้วยชุดทดสอบ Griess reagent kit วิเคราะห์ปริมาณไนไตรท์ (nitrite) โดยนำสารละลายซัลฟานิลาไมด์ (sulfanilamide) และ NED (N-(1-naphthyl) ethylenediamine dihydrochloride) ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 15-30 นาที ใส่สารมาตรฐานไนไตรท์ในความเข้มข้นต่าง ๆ ช่วง 0-100 ไมโครโมล หลุมละ 50 ไมโครลิตร (3 หลุม) ดูดสารละลายซัลฟานิลาไมด์ ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ใส่ทุกหลุม บ่มในที่มืด ที่อุณหภูมิห้อง 5-10 นาที ดูด NED ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ใส่ทุกหลุม บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง 5-10 นาที ในที่มืด นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร โดยวัดภายใน 30 นาที หลังจากนั้นนำค่าดูดกลืนแสงที่วัดได้แทนแกน y และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแทนแกน x นำมาทำกราฟสารละลายมาตรฐานเพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณไนตริกออกไซด์

4.3 การทดสอบการเกิดกิจกรรมฟาโกไซติก (Zhang *et al*., 2019)

ทำการเตรียมเซลล์เพาะเลี้ยง RAW264.7 ให้มีความเข้มข้น 2x10^5 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในจานเพาะเลี้ยง 24 หลุม เมื่อครบ 24 ชั่วโมง เปลี่ยนอาหารเลี้ยงเซลล์เป็นอาหารชนิด DMEM ที่มีสารละลายของตัวอย่างทดสอบ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร (สารควบคุมเชิงบวก คือ เบต้ากลูแคน (**β**-glucan) ความเข้มข้น 50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และสารควบคุมเชิงลบ คือ อาหารเลี้ยงเซลล์) จากนั้นบ่มเซลล์ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และ 5 เปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาดูดอาหารเลี้ยงเซลล์ออกและเติมสารละลายนิวทรัลเรด (neutral red) (ความเข้มข้น 0.075 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตรโดยปริมาตร ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์) 100 ไมโครลิตรต่อหลุม บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาดูดสารละลายนิวทรัลเรดออกแล้วล้างด้วยน้ำเกลือฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (phosphate buffer saline: PBS) ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.4

เติมสารละลาย destain แล้ววางบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร คำนวณเปอร์เซ็นต์ของกิจกรรมฟาโกไซติกจากสมการ (1)

$$\text{เปอร์เซ็นต์กิจกรรมฟาโกไซติก} = \frac{\text{ค่าดูดกลืนแสงของตัวอย่าง}}{\text{ค่าดูดกลืนแสงของสารควบคุมเชิงลบ}} \times 100 \qquad (1)$$

4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มด้วยโปรแกรม SPSS version 15.0 (SPSS Inc., 2008) วิเคราะห์ความแปรปรวน one way ANOVA เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากผลการทดลอง 4 ซ้ำ โดยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT)

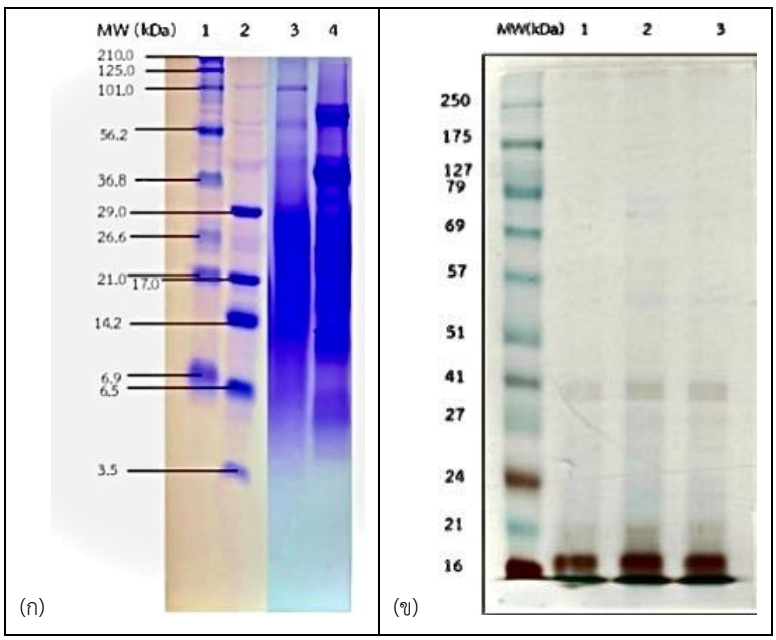
ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาองค์ประกอบของสารอาหารในกากถั่วเหลืองและการเจริญของแบคทีเรียในการเตรียมกากถั่วเหลืองหมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664

การศึกษาองค์ประกอบของสารอาหารในกากถั่วเหลืองที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบ พบว่ามีปริมาณโปรตีน 44.65 เปอร์เซ็นต์ น้ำมัน 1.28 เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 12.08 เปอร์เซ็นต์ เถ้า 6.40 เปอร์เซ็นต์ และใยอาหาร 5.54 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนำกากถั่วเหลืองที่ผ่านการหมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 ตามสภาวะที่กำหนด พบว่าเชื้อแบคทีเรียมีการเจริญเติบโตที่ปริมาณ 10.88 ลอการิทึมฐานสิบ ($\log_{10}$) ของโคโลนีต่อกรัม มีปริมาณของเปปไทด์ที่มีขนาดต่ำกว่า 3 กิโลดาลตันเพิ่มขึ้น 3.5 เท่า และในปริมาณโปรตีนที่เท่ากันจะมีสัดส่วนของโปรตีนที่มีขนาดใหญ่ลดลงเมื่อเทียบกับกากถั่วเหลืองที่ไม่ผ่านการหมัก ดังภาพที่ 1

2. ผลการศึกษาขนาดของโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างกากถั่วเหลืองหมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664

การศึกษาลักษณะโปรไฟล์โปรตีนของตัวอย่างควบคุมซึ่งเป็นกากถั่วเหลืองที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อแต่ไม่มีการเติมเชื้อแบคทีเรีย พบว่ามีความเข้มข้นของโปรตีนเท่ากับ 8.85 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เมื่อทำการย่อยกากถั่วเหลืองด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นของโปรตีนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 13.87 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร การตรวจสอบคุณภาพของโปรตีนที่ได้จากการย่อยด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 ดังภาพที่ 1 (ก) เลน 3 พบว่าขนาดของโปรตีนที่ถูกย่อยไปจะอยู่ในช่วง 30-100 กิโลดาลตัน (kDa) และส่วนใหญ่จะมีขนาดอยู่ในช่วง 5-29 กิโลดาลตัน เมื่อเทียบกับในตัวอย่างควบคุม ดังภาพที่ 1 (ก) เลน 4



ภาพที่ 1 รูปแบบของขนาดโปรตีนในกากถั่วเหลืองหมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 (ก) SDS-PAGE ในระบบ tris-tricine 16.5 เปอร์เซ็นต์เจล กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 45 มิลลิแอมแปร์ เป็นเวลา 10:30 ชั่วโมง โดยเลนที่ 1 และ 2 คือ โปรตีนมาตรฐานขนาดต่าง ๆ เลนที่ 3 คือ เปปไทด์จากกากถั่วเหลืองหมัก และเลนที่ 4 คือ กากถั่วเหลืองที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อแต่ไม่ได้เติมเชื้อแบคทีเรีย

(ข) SDS-PAGE ในระบบ tris-tricine 12.0 เปอร์เซ็นต์เจล ที่ย้อมด้วยซิลเวอร์ไนเตรทของกากถั่วเหลืองหมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR2664 เพื่อใช้ศึกษาต่อด้วย LC-Q-TOF-MS/MS โดยเลนที่ 1-3 คือ ตัวอย่างเปปไทด์จากกากถั่วเหลืองหมัก จำนวน 3 ซ้ำ

3. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเปปไทด์และโปรตีนของกากถั่วเหลืองที่หมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 ด้วย LC-Q-TOF-MS/MS และการทำนายชีวสารสนเทศ

จากการวิเคราะห์แมสสเปกโทรเมตรีของตัวอย่างกากถั่วเหลืองหมัก พบจำนวนของเปปไทด์ 8,981 ชนิด เมื่อทำการเปรียบเทียบเปปไทด์ทั้งหมดด้วยวิธีการทางชีวสารสนเทศ จากลำดับกรดอะมิโนของเปปไทด์สามารถระบุชนิดได้ดังตารางที่ 1 และเมื่อทำนายคุณสมบัติทางชีวภาพของเปปไทด์ที่ได้ พบว่ามีคุณสมบัติที่ทำนายได้จำนวน 10 คุณสมบัติ ได้แก่ ฤทธิ์ต้านมะเร็ง ต้านเชื้อรา ลดความดันโลหิต ต้านจุลชีพ ต้านปรสิต ต้านการอักเสบ ต้านไวรัส กระบวนการสื่อสารระหว่างเซลล์ การนำส่งยา และการจับจำเพาะกับเซลล์มะเร็ง ซึ่งเปปไทด์ที่มีจำนวนมากที่สุดมีคุณสมบัติลดความดันโลหิต (antihypertensive) ซึ่งผลนี้จะมีประโยชน์ต่อการพิจารณาวางแผนการนำเปปไทด์จากกากถั่วเหลืองไปทดลองทางห้องปฏิบัติการต่อเพื่อนำสู่การใช้ประโยชน์ต่อไป

ตารางที่ 1 ข้อมูลชนิดและลำดับของกรดอะมิโนในตัวอย่างกากถั่วเหลืองที่ผ่านการหมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 พร้อมการทำนายคุณสมบัติทางชีวภาพ ด้วยโปรแกรมทำนายทางชีวสารสนเทศ (Tachapuripunya *et al*., 2021)

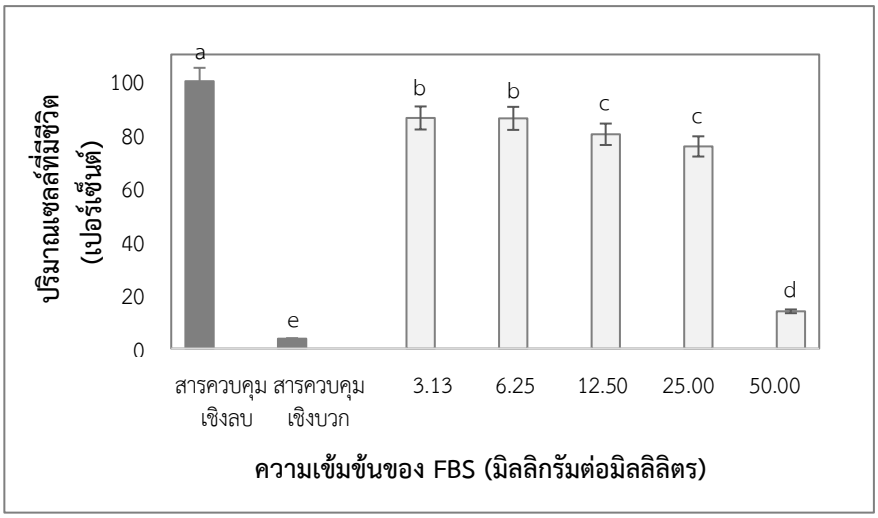
ฤทธิ์ทางชีวภาพ	ลำดับกรดอะมิโน	ชนิดของโปรตีน
anticancer	RCPLTVVQSRN (1058.79 Da)	trypsin inhibitor protein
	RVVEIPGKG (742.60 Da)	SET domain-containing protein
	RCPLTVVQSRN (1058.79 Da)	uncharacterized protein
antifungi	KALANNTANGHATGASSSAAKARA (2041.38 Da)	TLC domain-containing protein
antihypertensive	RLNGTAVNDDKV (1044.77 Da)	polyadenylate-binding protein
	KCAHLPSLPKTSTRT (1307.95 Da)	MADS-box domain-containing protein
	KTAAIPGTGDDKV (1044.80 Da)	NAD(P)-bd_dom domain-containing protein
	KLHDSGEYDKTYEKW (1585.38 Da)	transporter substrate-binding domain-containing protein
	KDIHSGPALHSEIISKT (1602.41 Da)	Fe2OG dioxygenase domain-containing protein
	KDAMDGWFRL (1012.25 Da)	trypsin inhibitor protein
	RCPLTVVQSRN (1058.79 Da)	trypsin inhibitor protein
	REQDQMQAVMGTMDGIIDTVSAVHPLVPLIGLLK PHGKL (3971.32 Da)	PKS_ER domain-containing protein
	KLDHSPAQFEPAIVRS (1578.30 Da)	alpha-mannosidase
	RGTSWASSILPSSNPPKS (1629.42 Da)	alpha-mannosidase
	RYINVEEAEAQFRNYQMLFDYINSNPSLNAEAKF (3780.77 Da)	alpha-mannosidase
	KAVAAEEARL (814.50 Da)	ribosome biogenesis protein NOP53
	KPISLAASGKQ (814.73 Da)	ribosome biogenesis protein NOP53
	KLLHGLSYLHGVRHLVHRD (2005.32 Da)	uncharacterized protein
	KHLSDGMRDSCLPLRK (1673.45 Da)	protein kinase domain-containing protein
	RYHSHYILDTGDVIPMEIVDKV (2359.56 Da)	protein kinase domain-containing protein
	KPAVAEWIQGLQNHPDCSWYIFELLETIRDRM (3655.57 Da)	protein kinase domain-containing protein
	RVVEIPGKG (742.60 Da)	SET domain-containing protein
	KSSSQSFRV (796.63 Da)	patatin
	RLAVATEPRV (855.71 Da)	patatin
	RPLLDFRAMAELRV (1447.20 Da)	patatin
	KEMCADEDGDLMIDSAVKNVPKV (2351.79 Da)	patatin
	KDAMDGWFRL (1012.23 Da)	uncharacterized protein
	RCPLTVVQSRN (1058.79 Da)	uncharacterized protein

ตารางที่ 1 (ต่อ)

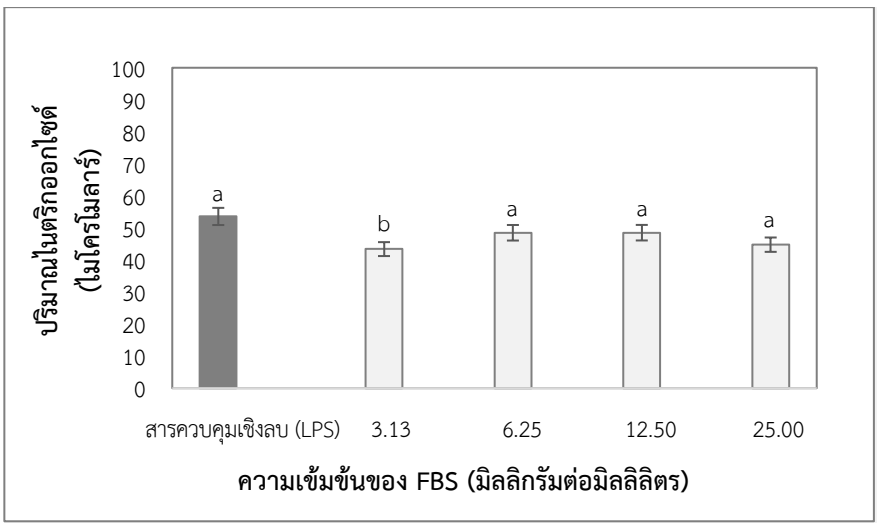
ฤทธิ์ทางชีวภาพ	ลำดับกรดอะมิโน	ชนิดของโปรตีน
	RLERVSDDEFNNYKL (1629.41 Da)	uncharacterized protein
	KTTFWATMQSFSGTWKGPDLGTDTGPTEYSRP (3341.63 Da)	glucan 1,3-beta-glucosidase
antimicrobe	KALANNTANGHATGASSSAAKARA (2041.38 Da)	TLC domain-containing protein
antiparasite	KDAMDGWFRL (1012.23 Da)	trypsin inhibitor protein
	RCPLTVVQSRN (1058.80 Da)	trypsin inhibitor protein
	RVVEIPGKG (742.60 Da)	SET domain-containing protein
	KSSSQSFRV (796.63 Da)	patatin
	RPLLDFRAMAELRV (1447.20 Da)	patatin
	KDAMDGWFRL (1012.23 Da)	uncharacterized protein
	RCPLTVVQSRN (1058.79 Da)	uncharacterized protein
antiinflammatory	KSSSQSFRV (796.63 Da)	patatin
	RLAVATEPRV (855.71 Da)	patatin
antivirus	RLNGTAVNDDKV (1044.77 Da)	polyadenylate-binding protein
	RYINVEEAEAQFRNYQMLFDYINSNPSLNAEAKF (3780.77 Da)	alpha-mannosidase
	KALANNTANGHATGASSSAAKARA (2041.38 Da)	TLC domain-containing protein
	KRMGTFHEQFIVEPTSLIGCEPTSLIGCYTIVKQ (3697.71 Da)	uncharacterized protein
cell communicating	KDAMDGWFRL (1012.23 Da)	trypsin inhibitor protein
drug delivering	RYHSHYILDTGDVIPMEIVDKV (2359.56 Da)	protein kinase domain-containing protein
tumor homing	RYHSHYILDTGDVIPMEIVDKV (2359.56 Da)	protein kinase domain-containing protein

4. การทดสอบความเป็นพิษ ฤทธิ์ในการกระตุ้นกิจกรรมฟาโกไซติก และการสร้างไนตริกออกไซด์ของตัวอย่างกากถั่วเหลืองที่หมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664

การทดสอบความเป็นพิษของกากถั่วเหลืองหมักที่มีต่อเซลล์ RAW264.7 ที่ระดับความเข้มข้นที่ 0-50 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร พบว่าที่ความเข้มข้น 3.13-25.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ไม่มีความเป็นพิษ โดยมีเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตของเซลล์อยู่ในช่วง 75.61±2.03 - 86.25±2.05 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 3 ซึ่งการที่เซลล์มีชีวิตอยู่มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป เป็นเกณฑ์ที่ยอมรับว่าสารนั้นในระดับความเข้มข้นที่ใช้ในการทดสอบมีความปลอดภัย สามารถนำไปใช้ทดสอบในขั้นต่อไปได้



ภาพที่ 3 ผลของกากถั่วเหลืองที่หมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 (FBS) ที่มีต่อการมีชีวิตของเซลล์ RAW264.7 โดยตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$)

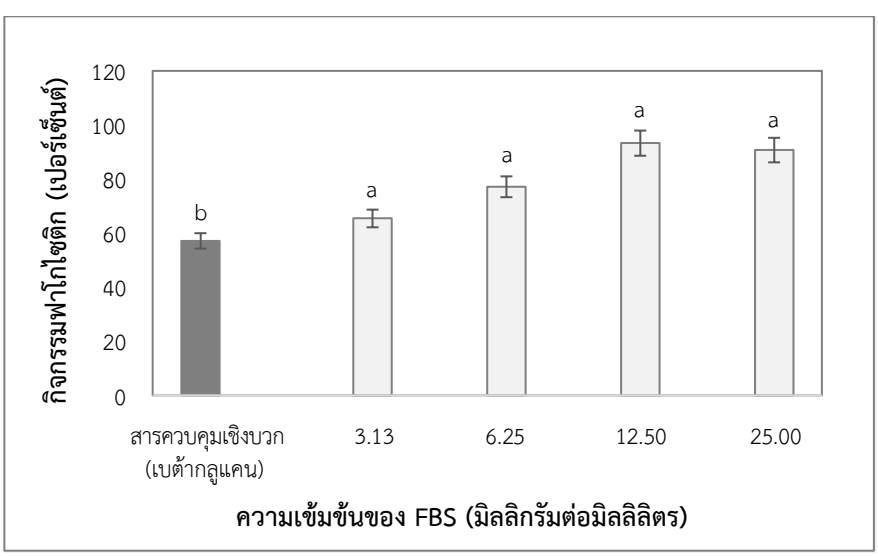


ภาพที่ 4 การสร้างไนตริกออกไซด์ของกากถั่วเหลืองที่หมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 (FSB) ทดสอบในเซลล์ RAW264.7 โดยตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับสารควบคุมเชิงบวก (LPS)

การวิเคราะห์ปริมาณการสร้างไนตริกออกไซด์ของตัวอย่างกากถั่วเหลืองที่หมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 ที่ระดับความเข้มข้น 0.00-25.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร พบว่ามีการสร้างไนตริกออกไซด์ในช่วง 43.41±0.99 - 48.53±0.35 ไมโครโมลาร์ โดยที่ความเข้มข้น 3.13 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร กระตุ้นให้เซลล์ผลิตไนตริกออกไซด์ 43.41±0.99 ไมโครโมลาร์ เป็นปริมาณ

ที่ต่ำกว่าสารควบคุมเชิงบวกไลโพพอลีแซ็กคาไรด์ (LPS) ความเข้มข้น 1 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งผลิตไนตริกออกไซด์ 53.60±3.49 ไมโครโมลาร์ ดังภาพที่ 4 และเมื่อความเข้มข้นของตัวอย่างกากถั่วเหลืองหมักสูงขึ้นเป็น 6.25-25.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มีผลให้การสร้างไนตริกออกไซด์สูงขึ้นเพียงเล็กน้อย อยู่ในช่วง 44.79±1.49 - 48.53±0.35 ไมโครโมลาร์ โดยปริมาณไนตริกออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นไม่มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับความเข้มข้นของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น มีค่าแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเทียบกับสารควบคุมเชิงบวก LPS แต่สูงกว่าสารควบคุมเชิงลบ สารละลายไดโคลฟีแนคความเข้มข้น 40 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) ซึ่งสารละลายไดโคลฟีแนคกระตุ้นให้เซลล์ผลิตไนตริกออกไซด์ที่ 32.06±2.52 ไมโครโมลาร์

การวัดเปอร์เซ็นต์การเกิดกิจกรรมฟาโกไซติก พบว่าทุกระดับความเข้มข้นของตัวอย่างกากถั่วเหลืองที่หมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 ที่ทำการทดสอบมีฤทธิ์ในการกระตุ้นให้เกิดกิจกรรมฟาโกไซติกได้ 65.43±1.24 - 93.27±0.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้น 6.25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มีกิจกรรมฟาโกไซติก 65.43±1.24 เปอร์เซ็นต์ โดยในช่วงความเข้มข้นจาก 3.13 ถึง 12.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร การเกิดกิจกรรมฟาโกไซติกสูงขึ้นอย่างมีความสัมพันธ์แปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น และทุกระดับความเข้มข้นของตัวอย่างมีผลให้เกิดกิจกรรมฟาโกไซติกสูงกว่าสารควบคุมเชิงบวกเบต้ากลูแคนที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) ดังภาพที่ 5 และที่ความเข้มข้น 12.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มีกิจกรรมฟาโกไซติกสูงสุดเท่ากับ 93.27±0.50 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นพบว่าไม่มีผลให้เกิดกิจกรรมฟาโกไซติกสูงขึ้น แสดงให้เห็นแนวโน้มว่าสารที่ช่วงความเข้มข้นต่ำจึงจะมีฤทธิ์ในการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน



ภาพที่ 5 การเกิดกิจกรรมฟาโกไซติกของตัวอย่างกากถั่วเหลืองที่หมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 (FSB) ในเซลล์ RAW264.7 โดยตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกัน หมายถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเทียบกับสารควบคุมเชิงบวก

การอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ลำดับกรดอะมิโนและชนิดของโปรตีนด้วย LC-Q-TOF-MS/MS พบว่าในกากถั่วเหลืองที่หมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 มีส่วนประกอบของเปปไทด์จำนวน 8,981±30.32 ชนิด สอดคล้องกับข้อมูลของโปรตีนจากถั่วเหลือง *Glycine max* ที่มีข้อมูลในฐานข้อมูลเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ (NCBI) และการทำนายทางชีวสารสนเทศพบเปปไทด์ที่มีผลคุณสมบัติทางชีวภาพแตกต่างกันถึง 10 คุณสมบัติที่มีผลในการช่วยส่งเสริมต่อสุขภาพ โดยเฉพาะเปปไทด์ที่มีคุณสมบัติลดความดันโลหิตในปริมาณสูงกว่าคุณสมบัติอื่น ๆ โดยเปปไทด์ดังกล่าวอาจส่งผลต่อการรักษาดุลยภาพของเหลวของเซลล์เมื่อทดสอบด้วยความเข้มข้นสูงดังภาพที่ 3 สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Karaki *et al*. (1990) ที่พบว่าเปปไทด์จากการย่อยโปรตีนเคซีนที่ความเข้มข้นต่ำ (100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) สามารถลดความดันโลหิตสูงในหนูทดลองได้ ผ่านการควมคุม RAS (ranin-angiotensin system) เปปไทด์ที่มีคุณสมบัติลดความดันโลหิตเหล่านี้ยังอาจมีส่วนในการลดการผลิตไนตริกออกไซด์ของเซลล์ด้วย สอดคล้องกับผลการทดลองดังภาพที่ 4 และรายงานการศึกษาของ Majumder and Wu (2014) อีกทั้งผลการทำนายถึงคุณสมบัติทางชีวภาพอื่น ๆ แสดงให้เห็นถึงโอกาสในการวิจัยเพื่อนำผลิตผลจากการย่อยกากถั่วเหลืองไปใช้ประโยชน์ในการส่งเสริมสุขภาพด้านต่าง ๆ ได้มากยิ่งขึ้น เช่น การต้านจุลชีพหรือการต้านมะเร็ง นอกจากนี้เปปไทด์ที่ช่วยต้านการอักเสบอาจมีส่วนเกี่ยวข้องในกลไกของกิจกรรมฟาโกไซติกที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 5 สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Möller *et al*. (2008) ที่รายงานว่าเปปไทด์บางชนิด เช่น แลคโตเฟอร์ริน (lactoferrin) และ tuftsin สามารถเพิ่มกิจกรรมฟาโกไซติกของเซลล์เม็ดเลือดขาวได้ ดังนั้นผลข้างต้นบ่งชี้ถึงความจำเป็นของการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบและยืนยันคุณสมบัติของเปปไทด์เหล่านี้และการศึกษาเชิงลึกต่อไปถึงกลไกการทำงานของเปปไทด์หรือกลุ่มเปปไทด์ที่สนใจ อีกทั้งข้อมูลคุณสมบัติของเปปไทด์ที่ทำนายได้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาสูตรผสมของเปปไทด์เหล่านี้ให้มีคุณสมบัติตามต้องการ เช่น การแยกเป็นเปปไทด์ชนิดเดียวบริสุทธิ์หรือสูตรผสมจากเปปไทด์มากกว่าหนึ่งชนิดที่ทำงานร่วมกันหรือเสริมกัน เป็นต้น

ผลจากการทดสอบฤทธิ์ในการกระตุ้นให้เกิดการจับกินสิ่งแปลกปลอมของเม็ดเลือดขาวหรือกิจกรรมฟาโกไซติกของกากถั่วเหลืองหมัก พบว่าที่ความเข้มข้น 3.13-12.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ทำให้เกิดกิจกรรมฟาโกไซติกมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกากถั่วเหลืองหมักสูงขึ้น โดยที่ความเข้มข้นที่ 12.50 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มีผลให้เกิดกิจกรรมฟาโกไซติกได้ในปริมาณสูงสุด และมีปริมาณลดลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เนื่องจากเปปไทด์ในกากถั่วเหลืองหมักจะช่วยเซลล์มาโครฟาจ RAW264.7 เกิดกระบวนการพิโนไซโทซิส ซึ่งเป็นการนำสารโมเลกุลใหญ่ในรูปสารละลายเข้าสู่เซลล์ได้ดีขึ้นและกระตุ้นให้มีการผลิตไนตริกออกไซด์ได้มากขึ้น (Wen *et al*., 2022) ด้วยกลไกการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันที่ตอบสนองต่อสิ่งแปลกปลอมผ่านกระบวนการฟาโกไซโทซิส ซึ่งจะมีการปลดปล่อยไนตริกออกไซด์ออกมาด้วย แต่งานวิจัยนี้พบว่าปริมาณการสร้างไนตริกออกไซด์ไม่มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับความเข้มข้นของกากถั่วเหลืองหมักที่สูงขึ้น ผลที่แตกต่างกันนี้อาจบ่งชี้ถึงกลไกการทำงานที่แตกต่างกันของเปปไทด์แต่ละชนิดที่ได้จากการย่อย แต่อย่างไรก็ตามผลนี้แสดงให้เห็นว่าเปปไทด์ในกากถั่วเหลืองหมักที่ความเข้มข้นในช่วงต่ำกว่า 12.5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มีฤทธิ์ในการกระตุ้นภูมิคุ้มกัน (immune stimulation) แต่เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นกิจกรรมฟาโกไซติกและการสร้างไนตริกออกไซด์ค่อนข้างคงที่ บ่งชี้ว่าสารตัวอย่างที่ความเข้มข้นที่ระดับสูงขึ้นมีแนวโน้มที่มี

สัดส่วนของเปปไทด์ที่มีฤทธิ์ต้านการอักเสบ (anti-inflammation) ร่วมด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Zhang *et al*. (2020)

สรุปผลการวิจัย

กากถั่วเหลืองจากการสกัดน้ำมันพืชเมื่อถูกนำมาหมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 ซึ่งเป็นเชื้อที่แยกได้จากถั่วเน่าและมีการสร้างเอนไซม์โปรติเอส ช่วยทำให้โปรตีนขนาดเล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้น และเมื่อศึกษาองค์ประกอบของเปปไทด์และการทำนายผลคุณสมบัติทางชีวภาพ พบว่ามีเปปไทด์ 8,981 ชนิด และมีคุณสมบัติทางชีวภาพแตกต่างกัน 10 คุณสมบัติ คือ ต้านมะเร็ง ต้านเชื้อรา ลดความดันโลหิต ต้านจุลชีพ ต้านปรสิต ต้านการอักเสบ ต้านไวรัส กระบวนการสื่อสารระหว่างเซลล์ การนำส่งยา และการจับจำเพาะกับเซลล์มะเร็ง โดยกากถั่วเหลืองหมักที่ความเข้มข้น 0-25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มีความปลอดภัย มีเปปไทด์ที่ส่งเสริมกิจกรรมฟาโกไซติกของเซลล์มาโครฟาจ RAW264.7 ได้ดี โดยที่ความเข้มข้น 12.50 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร กระตุ้นให้เกิดกิจกรรมฟาโกไซติกได้ 93.27±0.50 เปอร์เซ็นต์ และมีการสร้างไนตริกออกไซด์ 48.53±0.35 ไมโครโมลาร์ จากคุณสมบัตินี้และผลการทำนายทางชีวภาพบ่งชี้ว่ากากถั่วเหลืองที่หมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis* TISTR 2664 มีส่วนประกอบของเปปไทด์ที่มีคุณสมบัติในการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน สามารถวิจัยต่อเพื่อการพัฒนาไปใช้เป็นสารเสริมสุขภาพ และเพื่อการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจจากของเหลือในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมอาหาร

ข้อเสนอแนะ

ผลจากการศึกษานี้จะสามารถวิจัยต่อยอดเพื่อนำความรู้ทางเทคโนโลยีชีวภาพและทรัพยากรทางชีวภาพภายในประเทศมาใช้ให้เกิดการเพิ่มมูลค่าและการพัฒนาสารเสริมสุขภาพ โดยเฉพาะการทดสอบคุณสมบัติเพิ่มเติมด้านการลดความดัน ที่ได้จากผลการทำนายชีวสารสนเทศที่พบว่ามีเปปไทด์ที่มีคุณสมบัติด้านนี้ในปริมาณสูง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนทุนวิจัยจากกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธีรศักดิ์ เอโกบล ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำเป็นอย่างดียิ่ง ขอขอบคุณผู้ร่วมงานทุกท่านที่ช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

Castellano, P., Aristoy, M.C., Sentandreu, M.A., Vignolo, G. and Toldrá, F. (2013). Peptides with angiotensin I converting enzyme (ACE) inhibitory activity generated from porcine skeletal muscle proteins by the action of meat-borne Lactobacillus. *Journal of Proteomics*, 89, 183-190, doi: https://doi.org/10.1016/j.jprot.2013.06.023.

Chatterjee, C., Gleddie, S. and Xiao, C.W. (2018). Soybean bioactive peptides and their functional properties. *Nutrients*, 10(9), doi: https://doi.org/10.3390/nu10091211.

Coda, R., Rizzello, C.G., Pinto, D. and Gobbetti, M. (2012). Selected lactic acid bacteria synthesize antioxidant peptides during sourdough fermentation of cereal flours. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(4), 1087-1096, doi: https://doi.org/10.1128/AEM.06837-11.

Escudero, E., Aristoy, M.C., Nishimura, H., Arihara, K. and Toldrá, F. (2012). Antihypertensive effect and antioxidant activity of peptide fractions extracted from Spanish dry-cured ham. *Meat Science*, 91(3), 306-311, doi: https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.02.008.

International Standard (ISO 10993-5). (2009). *Biological evaluation of medical devices-part 5: Tests for in vitro cytotoxicity*. Geneva: International Organization for Standardization.

Karaki, H., Sugano, S., Uchiwa, H., Sugai, R., Murakami, U. and Takemoto, S. (1990). Antihypertensive effect of tryptic hydrolysate of milk casein in spontaneously hypertensive rats. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology*, 96(2), 367-371, doi: https://doi.org/10.1016/-8413 (90)90023-3.

Korhonen, H. and Pihlanto, A. (2006). Bioactive peptides: Production and functionality. *International Dairy Journal*, 16(9), 945-960, doi: https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2005.10.012.

Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L and Randall, R.J. (1951) Protein measurement with folin phenol reagent. *The Journal of Biological Chemistry*, 193, 265-275, doi: https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)52451-6.

Majumder, K. and Wu, J. (2014). Molecular targets of antihypertensive peptides: Understanding the mechanisms of action based on the pathophysiology of hypertension. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(1), 256-283, doi: https://doi.org/10.3390/ijms16010256.

Medic, J., Atkinson, C. and Hurburgh, C.R. (2014). Current knowledge in soybean composition. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 91(3), 363-384, doi: https://doi.org/10.1007/s11746-013-2407-9.

Möller, N.P., Scholz-Ahrens, K.E., Roos, N. and Schrezenmeir, J. (2008). Bioactive peptides and proteins from foods: Indication for health effects. *European Journal of Nutrition*, 47(4), 171-182, doi: https://doi.org/10.1007/s00394-008-0710-2.

Singh, B.P., Aluko, R.E., Hati, S. and Solanki, D. (2022). Bioactive peptides in the management of lifestyle-related diseases: Current trends and future perspectives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(17), 4593-4606, doi: https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1877109.

Tachapuripunya, V., Roytrakul, S., Chumnanpuen, P. and E-kobon, T. (2021). Unveiling putative functions of mucus proteins and their tryptic peptides in seven gastropod species using comparative proteomics and machine learning-based bioinformatics predictions. *Molecule,* 26(11), doi: https://doi.org/10.3390/molecules26113475.

Wen, L., Bi, H., Zhou, X., Zhu, H., Jiang, Y., Ramadan, N.S. and Yang, B. (2022). Structure and activity of bioactive peptides produced from soybean proteins by enzymatic hydrolysis. *Food Chemistry Advances*, 1, doi: https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100089.

Yoshikawa, M. (2015). Bioactive peptides derived from natural proteins with respect to diversity of their receptors and physiological effects. *Peptides*, 72, 208-225, doi: https://doi.org/10.1016/j.peptides.2015.07.013.

Yuan, L., Chang, J., Yin, Q., Lu, M., Di, Y., Wang, P. and Lu, F. (2017). Fermented soybean meal improves the growth performance, nutrient digestibility, and microbial flora in piglets. *Animal Nutrition*, 3(1), 19-24, doi: https://doi.org/10.1016/j.aninu.2016.11.003.

Zhang, Y., Chen, S., Zong, X., Wang, C., Shi, C., Wang, F. and Lu, Z. (2020). Peptides derived from fermented soybean meal suppresses intestinal inflammation and enhances epithelial barrier function in piglets. *Food and Agricultural Immunology*, 31(1), 120-135, doi: https://doi.org/10.1080/09540105.2019.1705766.

Zhang, Z., Hu, X., Lin, L., Ding, G. and Yu, F. (2019). Immunomodulatory activity of low molecular-weight peptides from *Nibea japonica* in RAW264.7 cells *via* NF-**K**B pathway. *Marine Drugs,* 17(7), doi: https://doi.org/10.3390/md17070404.

ผลของการเสริมธาตุสังกะสีต่อการสะสมธาตุสังกะสีในต้นอ่อนทานตะวันงอก
The Effects of Zinc Supplementation on Zing Accumulation in Sunflower Sprouts

อนันต์ พิริยะภัทรกิจ[1*] พรกมล รูปเลิศ[1] ปุญญพัฒน์ พลพิมพ์[1] และพัชรี เดชเลย์[1]
Anan Piriyaphattarakit[1*] Ponkamon Ruploet[1] Punyaphat Pholphim[1] and Patcharee Dechlay[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเสริมธาตุสังกะสีต่อการสะสมธาตุสังกะสีในต้นอ่อนทานตะวันงอก โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) ประกอบด้วย 5 ทรีทเมนต์ จำนวน 3 ซ้ำ ได้แก่ อัตราการเสริมธาตุสังกะสี 0.0 กรัม (ชุดควบคุม) และอัตราการเสริมธาตุสังกะสี 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร ตามลำดับ เก็บข้อมูลอัตราการงอกของเมล็ด น้ำหนักสด ปริมาณผลผลิต และการสะสมธาตุสังกะสีในต้นอ่อนทานตะวัน เมื่ออายุ 14 วัน พบว่าการเสริมธาตุสังกะสีอัตราที่สูงขึ้น ส่งผลให้เมล็ดทานตะวันมีอัตราการงอกและปริมาณผลผลิตลดลง ในขณะที่ชุดควบคุมมีอัตราการงอกของเมล็ดทานตะวันและผลผลิตสูงที่สุด การเสริมธาตุสังกะสีในอัตรา 2.5 กรัม มีการสะสมธาตุสังกะสีสูงที่สุดเท่ากับ 465 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รองลงมา คือ การเสริมธาตุสังกะสีในอัตรา 5.0 7.5 และ 10.0 ตามลำดับ จากการศึกษาสรุปได้ว่าการสะสมธาตุสังกะสีในต้นอ่อนทานตะวันงอก และปริมาณผลผลิตมีแนวโน้มแปรผกผันตามอัตราการเสริมธาตุสังกะสี โดยอัตราที่เพิ่มขึ้นหากมากเกินไปส่งผลทำให้ปริมาณผลผลิตลดลง และการสะสมธาตุสังกะสีลดลงเกินความต้องการของพืช ดังนั้นอัตราที่เหมาะสมสำหรับการเสริมธาตุสังกะสีให้กับต้นอ่อนทานตะวันงอก คือ การเสริมธาตุสังกะสีในอัตรา 2.5 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร ซึ่งมีอัตราการงอกของเมล็ด ปริมาณผลผลิต รวมถึงการสะสมธาตุสังกะสีอยู่ในระดับดี สามารถนำต้นอ่อนทานตะวันเสริมธาตุสังกะสีไปบริโภคเพื่อป้องกันการขาดธาตุสังกะสีที่มีความจำเป็นต่อร่างกายมนุษย์ได้

คำสำคัญ: ต้นอ่อนทานตะวัน ธาตุสังกะสี การงอกของเมล็ด

[1] ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมเกษตรสร้างสรรค์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)
[*] Corresponding author e-mail: anan_p@tistr.or.th

Received: 14 June 2022, Revised: 2 November 2022, Accepted: 5 April 2023[*]

Abstract

The study of zinc supplementation aimed to investigate effects of sunflower seedlings growth and yield. The experiment was in a completely randomized design (CRD) with 3 replications and 5 treatments, The treatments consisted of non-zinc applied (Treatment 1; Control), 2.5 gram (g) (Treatment 2), 5.0 g (Treatment 3), 7.5 g (Treatment 4) and 10.0 g (Treatment 5) in 20-liter water. The data were collected on seed germination rate and yield of 14 days old sunflower seedlings and zinc accumulation. The results showed that the higher rates of zinc supplementation could increase the yield of sunflower seedlings. Non-zinc sunflower seedlings (control) had the highest germination rate and yield fresh weight. From the Zn analysis in sunflower seedlings, the zinc concentration of 2.5 g had the highest zinc accumulation of 465 milligrams per kilogram (mg/kg), followed by zinc concentrations at 5.0 g, 7.5 g and 10.0 g were 393, 387 and 272 mg/kg, respectively. The results showed a positive correlation between yield and zinc accumulation in sunflower seedlings. Then, the zinc concentration of 2.5 g was good at the optimum rate for the growth, improving yield and zinc accumulation in sunflower seedlings, which is an alternative way to increase the amount of zinc in plants for the health benefits of consumers.

Keywords: Sunflower seedlings, Zinc, Seed germination

บทนำ

การขาดธาตุสังกะสีหรือซิงค์ (zinc: Zn) ในมนุษย์ ทำให้มีผู้เสียชีวิตมากกว่า 400,000 รายต่อปี (Stanton *et al*., 2022) สังกะสีเป็นแร่ธาตุที่มีความจำเป็น พบได้ในเซลล์ทั่วไปของร่างกาย ได้แก่ เซลล์ของเม็ดเลือดแดงและเม็ดเลือดขาว โดยเฉพาะในเม็ดเลือดขาว พบธาตุสังกะสีเป็นจำนวนมาก มีบทบาทหน้าที่ต่อการทำงานของร่างกายช่วยในการทำงานของเอ็นไซม์ต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น ช่วยในการเจริญเติบโตของร่างกาย กระบวนการย่อย และเผาผลาญสารอาหาร (Tsuruoka *et al*., 2022) อีกทั้งยังช่วยเรื่องการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน การพัฒนาและการเจริญเติบโตของเซลล์ รวมไปถึงช่วยเสริมเรื่องการรับรู้รสและกลิ่น รวมทั้งมีส่วนช่วยในกระบวนการต่อต้านอนุมูลอิสระ นอกจากนี้ธาตุสังกะสียังมีบทบาทสำคัญเกี่ยวกับเซลล์ของสิ่งมีชีวิต คือ การกระตุ้นปฏิกิริยาชีวเคมี บทบาทด้านโครงสร้างและการควบคุมการทำงานระดับเซลล์ (Boardman and McGuire, 1990) จึงเห็นได้ว่าธาตุสังกะสีมีความจำเป็นต่อร่างกายหลายด้าน แต่เนื่องจากร่างกายไม่สามารถสังเคราะห์แร่ธาตุชนิดนี้ขึ้นได้เองตามธรรมชาติ จึงจำเป็นต้องได้รับจากการทานอาหารเข้าไป ซึ่งแหล่งอาหารตามธรรมชาติที่อุดมไปด้วยแร่ธาตุสังกะสี ได้แก่ หอยนางรม เนื้อแดง ปลาทะเลน้ำลึก อาหารทะเล ถั่ว และธัญพืช เป็นต้น ในกลุ่มวัยต่าง ๆ มีข้อกำหนดในการรับธาตุสังกะสีต่อวัน คือ ในเด็กวัย 1-8 ปี ควรบริโภคธาตุสังกะสี 4-6 มิลลิกรัมต่อวัน วัยรุ่นชายควรบริโภควันละ 12-13 มิลลิกรัม ขณะที่วัยรุ่น

หญิงควรได้รับ 9-10 มิลลิกรัมต่อวัน สำหรับผู้ใหญ่ชายและหญิง อายุ 19 ปีขึ้นไป มีความต้องการธาตุสังกะสีเฉลี่ยที่ 11 และ 9 มิลลิกรัมต่อวัน ตามลำดับ ส่วนหญิงตั้งครรภ์และหญิงให้นมบุตรควรบริโภคธาตุสังกะสีเพิ่มขึ้นเป็นวันละ 10.6 และ 11.9 มิลลิกรัมต่อวัน ตามลำดับ (เอมอร และคณะ, 2563) แต่พฤติกรรมการทานอาหารของคนในปัจจุบัน มีทั้งการทานอาหารที่ไม่มีประโยชน์ต่อร่างกาย ทานอาหารไม่ครบ 5 หมู่ และทานอาหารจำพวกอาหารสำเร็จรูป ทำให้หลายคนมีความเสี่ยงที่ร่างกายจะมีภาวะขาดแร่ธาตุสังกะสีได้ (อนันต์ และคณะ, 2566) การขาดธาตุสังกะสีอาจส่งผลต่อการพัฒนาของอวัยวะหลายส่วน รวมทั้งระบบหลอดเลือด (Tsuruoka *et al*., 2022) ซึ่งนำมาซึ่งปัญหาด้านสุขภาพได้ โดย Khabour and Hassanein (2021) ศึกษาการใช้อาหารที่มีการเสริมธาตุสังกะสีในพืชสมุนไพรเพื่อกระตุ้นภูมิคุ้มกันในช่วงการระบาดของการติดเชื้อโควิด-19 ซึ่งเป็นแนวทางในการเสริมธาตุสังกะสีในพืช และมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มธาตุสังกะสีในพืชหลายชนิด ได้แก่ การพ่นปุ๋ยสังกะสีทางใบข้าวเพื่อเพิ่มปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าว (พัชรินทร์ และชนากานต์, 2564) รวมทั้งการให้ปุ๋ยสังกะสีทางใบที่สามารถยกระดับการเพิ่มปริมาณผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นสูง มีการสะสมธาตุสังกะสีในต้นและเมล็ดข้าวสูงต่อการเพิ่มปริมาณธาตุสังกะสีในข้าว และเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยเพิ่มปริมาณธาตุสังกะสีในพืช เพื่อเป็นประโยชน์ต่อคุณค่าทางโภชนาการของผู้บริโภคได้ (ชาญชัย และคณะ, 2564) อย่างไรก็ตามหากพืชได้รับธาตุสังกะสีมากเกินไปซึ่งเสี่ยงต่อการเป็นพิษต่อพืช (Stanton *et al*., 2022) โดยพืชแต่ละชนิดจะแสดงอาการที่เป็นพิษต่อธาตุสังกะสีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ส่วนพืชที่ไม่ทนต่อธาตุสังกะสีจะแสดงอาการที่ราก ทำให้รากหยุดการยืดตัวและทำให้เนื้อเยื่อระหว่างเส้นใบมีสีเหลืองซีด เนื่องจากภาวะที่มีธาตุสังกะสีมากเกินไปทำให้เกิดอาการเป็นพิษได้ (Boardman and McGuire, 1990) แต่ความเป็นพิษของธาตุสังกะสีมักเกิดน้อยกว่าอาการขาดธาตุสังกะสีในพืช ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาปริมาณการเสริมธาตุสังกะสีให้ต้นอ่อนทานตะวันงอก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ปุ๋ยสังกะสีต่อปริมาณผลผลิตและการสะสมธาตุสังกะสีในต้นอ่อนทานตะวันงอก ที่ทำให้ผู้บริโภคสามารถเข้าถึงการได้รับธาตุสังกะสีจากการทานผักที่มีปริมาณธาตุสังกะสีสูงที่เพียงพอต่อความต้องการของร่างกายได้ง่ายมากยิ่งขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

ศึกษาการสะสมธาตุสังกะสีในต้นอ่อนทานตะวันงอกด้วยการเสริมธาตุสังกะสีสำหรับพืช (EDTA Zn 15% ตราเวสโก้) ณ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) จำนวน 3 ซ้ำ ซ้ำละ 1 ถาด (ขนาด กว้าง 35 x ยาว 50 x สูง 8 เซนติเมตร) จำนวน 5 ตำรับทดลอง ได้แก่ อัตราการใส่ปุ๋ยเสริมธาตุสังกะสี 0.0 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร โดยการแช่เมล็ดพันธุ์ทานตะวัน (สายพันธุ์สามเอกินยอด ตรา AAA) ในน้ำ 20 ลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเมล็ดไปเพาะใส่ถาดเพาะ ถาดละ 400 เมล็ด ด้วยวัสดุเพาะ (พีทมอส) ปริมาณ 5 กิโลกรัม (ภาพที่ 1) รดน้ำ 2 เวลา เช้าและเย็น ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เก็บข้อมูลอัตราการงอกของเมล็ดด้วยการนับจำนวนต้นที่งอก (นับทุกต้นที่งอกจากถาด) และปริมาณผลผลิตที่อายุ 14 วัน ด้วยการชั่งน้ำหนักสดผลผลิตต่อถาด บันทึกข้อมูล แล้วนำต้นอ่อนทานตะวันงอกไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นปั่นตัวอย่างแห้งด้วยเครื่องปั่น

ละเอียด ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้ง 0.2 กรัม นำไปย่อยและสกัด แล้วนำไปวิเคราะห์การสะสมธาตุสังกะสีด้วยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (atomic absorption spectrometer: AAS) และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ด้วยโปรแกรม SPSS 26 เปรียบเทียบด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ภาพที่ 1 การเตรียมเมล็ดและการเพาะเมล็ดทานตะวัน

ผลการวิจัย

ผลการเสริมธาตุสังกะสีในต้นอ่อนทานตะวันงอก พบว่าเมื่ออัตราการเสริมธาตุสังกะสีที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการงอกของเมล็ดทานตะวันลดลง ซึ่งเมล็ดทานตะวันที่ไม่มีการเสริมธาตุสังกะสีมีอัตราการงอกของเมล็ดที่ดีกว่าการเสริมธาตุสังกะสีในทุกระดับ โดยมีอัตราการงอกเท่ากับร้อยละ 85.08 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับต้นอ่อนทานตะวันงอกที่เสริมธาตุสังกะสีในอัตรา 2.5 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร รวมถึงอัตราการเสริมธาตุสังกะสีส่งผลให้ผลผลิตต้นอ่อนทานตะวันลดลงโดยแปรผันตามอัตราการเพิ่มธาตุสังกะสีที่สูงขึ้น (ภาพที่ 2) รวมถึงอัตราการเสริมธาตุสังกะสีส่งผลให้น้ำหนักสดและปริมาณผลผลิตต้นอ่อนทานตะวันลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ทั้งนี้เป็นเพราะความสามารถในการดูดซึมธาตุสังกะสีของต้นอ่อนทานตะวันงอก อยู่ในระดับความต้องการของพืช เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักแห้งต่อน้ำหนักสดของต้นอ่อนทานตะวันในอัตราการเสริมธาตุสังกะสี 7.5 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร มีน้ำหนักแห้งต่อน้ำหนักสดสูงเท่ากับร้อยละ 17.05 อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ อย่างไรก็ตามอัตราการเสริมธาตุสังกะสี 2.5 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร มีการสะสมธาตุสังกะสีสูง แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับอัตราการเสริมธาตุสังกะสีที่ 5.0 และ 7.5 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร ดังตารางที่ 1

ภาพที่ 2 ปริมาณผลผลิตต้นอ่อนทานตะวันในอัตราการใส่เสริมธาตุสังกะสี 0.0 (ก) 2.5 (ข) 5.0 (ค) 7.5 (ง) และ 10.0 (จ) กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร

ตารางที่ 1 ผลการเสริมธาตุสังกะสีในต้นอ่อนทานตะวันงอกต่ออัตราการงอกของเมล็ด ปริมาณผลผลิต และการสะสมธาตุสังกะสี

อัตราการเสริมธาตุสังกะสี (กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร)	อัตราการงอกของเมล็ด (ร้อยละ)	น้ำหนักสด (กรัม)	น้ำหนักแห้งต่อน้ำหนักสด (ร้อยละ)	การสะสมธาตุสังกะสี (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
0.0 (ชุดควบคุม)	85.08[a]	249.33[a]	5.18[c]	93[c]
2.5	77.75[ab]	128.33[b]	10.70[b]	465[a]
5.0	51.33[c]	103.00[c]	8.88[b]	393[a]
7.5	57.83[c]	67.33[d]	17.05[a]	387[a]
10.0	63.17[bc]	95.33[c]	10.99[b]	272[b]
F-test	*	**	**	**
CV (%)	13.89	8.39	12.58	28.97

หมายเหตุ: - *,** ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยอักษรต่างกันในสดมภ์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$, $p < 0.01$) ด้วยวิธี DMRT

การอภิปรายผลการวิจัย

การเสริมธาตุสังกะสีในต้นอ่อนทานตะวันงอก แสดงให้เห็นว่าอัตราการเสริมธาตุสังกะสีที่สูงขึ้นส่งผลต่ออัตราการงอกของเมล็ด ซึ่งสอดคล้องกับภณกฤต และคณะ (2561) ที่ศึกษาผลของอัตราธาตุสังกะสีต่อการเจริญเติบโต การดูดใช้ และผลผลิตของข้าวโพดหวาน โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของธาตุสังกะสี พบว่าอัตราความเข้มข้นธาตุสังกะสีทำให้การดูดใช้ธาตุสังกะสี การเจริญเติบโตในข้าวโพดหวานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นจากการศึกษาอัตราความเข้มข้นของธาตุสังกะสีที่มีผลต่อการยับยั้งการงอกของเมล็ดพืช และปริมาณผลผลิตของต้นอ่อนทานตะวันลดลง เพราะหากพืชได้รับธาตุสังกะสีมากเกินไปซึ่งเสี่ยงต่อการเป็นพิษต่อพืช (Stanton *et al*., 2022) ดังนั้นจากการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าการแช่เมล็ดทานตะวันด้วยธาตุสังกะสีในอัตรา 2.5 กรัมต่อน้ำ

20 ลิตร ด้วยการแช่เมล็ดนาน 24 ชั่วโมง เพื่อผลิตต้นอ่อนทานตะวันงอก เป็นอัตราที่เหมาะสมสำหรับนำไปบริโภคเป็นพืชผักที่มีธาตุสังกะสีสูง รวมถึงเพื่อเป็นแนวทางในการปรับใช้อัตราส่วนที่มีความเหมาะสมในการผลิตพืชเสริมธาตุสังกะสีอื่น ๆ ได้ต่อไป

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้บ่งชี้ว่าการแช่เมล็ดพันธุ์ทานตะวันด้วยธาตุสังกะสี สามารถเพิ่มการสะสมธาตุสังกะสีในต้นอ่อนทานตะวันงอกได้ โดยการใช้ธาตุสังกะสีในอัตรา 2.5 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร ให้ค่าการสะสมธาตุสังกะสีในต้นอ่อนทานตะวันสูงที่สุด แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับอัตราการเสริมธาตุสังกะสี 5.0 และ 7.5 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร แสดงให้เห็นว่าในการผลิตต้นอ่อนทานตะวันควรใช้อัตราที่เหมาะสมในการเสริมธาตุสังกะสี คือ 2.5 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร เพื่อเพิ่มปริมาณการสะสมธาตุสังกะสีในต้นอ่อนทานตะวัน การเพิ่มอัตราการใช้ธาตุสังกะสีส่งผลให้อัตราการงอกของเมล็ดและผลผลิตต้นอ่อนทานตะวันมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าในการผลิตต้นอ่อนทานตะวันแม้จะไม่มีผลในการเพิ่มปริมาณผลผลิตต้นอ่อนทานตะวัน แต่จะเป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภคที่ขาดธาตุสังกะสีได้เป็นอย่างมาก

ข้อเสนอแนะ

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการทดลองระดับปฏิบัติการ อาจมีขนาดและหน่วยการทดลองที่มีขนาดจำกัด หากคณะผู้วิจัยมีโอกาสได้ส่งเสริมและนำเทคนิครวมถึงองค์ความรู้ไปถ่ายทอดให้กับเกษตรกรหรือผู้ที่สนใจสำหรับผลิตต้นอ่อนทานตะวันเสริมธาตุสังกะสีในระดับเชิงพาณิชย์จะเป็นผลดีแก่ผู้บริโภคเพื่อลดปัญหาการขาดธาตุสังกะสีมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนงบประมาณในการวิจัยจากโครงการการพัฒนาพืชผัก สมุนไพร และผลไม้เสริมธาตุสังกะสีเพื่อสุขภาพ ภายใต้การดำเนินงานของศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมเกษตรสร้างสรรค์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

เอกสารอ้างอิง

ชาญชัย รุผักชี พรไพรินทร์ รุ่งเจริญทอง ธวัชชัย อินทร์บุญช่วย และศุภชัย อำคา. (2564). การให้ปุ๋ยสังกะสีทางใบต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวที่ปลูกในชุดดินนครปฐม. *แก่นเกษตร,* 49(1), 901-905.

พัชรินทร์ ตุ้ยวงค์ และชนากานต์ เทโบลต์ พรมอุทัย. (2564). การเพิ่มผลผลิตและการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวโดยการจัดการปุ๋ยสังกะสีในพันธุ์ข้าวนาสวนและข้าวไร่. *แก่นเกษตร*, 49(4), 799-809.

ภณกฤต อุ่นพิพัฒน์ ณัฐพล จิตมาตย์ และเสาวนุช ถาวรพฤกษ์. (2561). การเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุสังกะสีด้วยซิงค์ฮิวเมทที่เตรียมจากพีตสำหรับข้าวโพดหวานที่ปลูกในดินเนื้อปูน. *แก่นเกษตร,* 46(1), 301-307.

อนันต์ พิริยะภัทรกิจ พัชรี เดชเลย์ พรกมล รูปเลิศ และปุญญพัฒน์ พลพิมพ์. (2566). ผลของปุ๋ยสังกะสีที่ให้ทางใบต่อผลผลิตและความเข้มข้นของสังกะสีของข่า. *วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 42(1), 14-23.

เอมอร อุดมเกษมาลี พรนพ นัยเนตร และอรพร ดำรงวงศ์ศิริ. (2563). สังกะสี. ใน สุปราณี แจ้งบำรุง. *ปริมาณสารอาหารอ้างอิงที่ควรได้รับประจำวันสำหรับคนไทย dietary reference intake for thais*, หน้า 319-330. กรุงเทพฯ: เอ.วี. โปรเกรสซีฟ.

Boardman, R. and McGuire, D.O. (1990). The role of zinc in forestry. I. Zinc in forest environments, ecosystems and tree nutrition. *Forest Ecology and Management,* 37(1-3), 167-205, doi: https://doi.org/10.1016/0378-1127(90)90054-F.

Khabour, O.F. and Hassanein, S.F.M. (2021). Use of vitamin/zinc supplements, medicinal plants, and immune boosting drinks during COVID-19 pandemic: A pilot study from Benha city, Egypt. *Heliyon,* 7(3), 11-17, doi: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06538.

Stanton, C., Sanders, D., Krämer, U., and Podar, D. (2022). Zinc in plants: Integrating homeostasis and biofortification. *Molecular Plant,* 15(1), 65-85, doi: https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.12.008.

Tsuruoka, T., Kodama, A., Yamaguchi, S., Masutomi, T., Koyama, A., Murohara, T., Komori, K. and Shibata, R. (2022). Zinc deficiency impairs ischemia-induced angiogenesis. *JVS-Vascular Science*, 3, 30-40, doi: https://doi.org/10.1016/j.jvssci.2021.09.023.

ประสิทธิภาพของแบคทีเรียที่คัดเลือกในการบำบัดปรอทในดิน
Efficiency of Selected Bacteria on Bioremediation of Mercury in Soil

สุมาลี ใบพลูทอง[1] ศศิธร หาสิน[1] อนัญญา โพธิ์ประดิษฐ์[2] และอภิชญา สวัสดี[1*]
Sumalee Baipluthong[1] Sasitorn Hasin[1] Ananya Popradit[2] and Apichaya Sawasdee[1*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของแบคทีเรียคัดสายพันธุ์เพื่อลดการปนเปื้อนของสารปรอทในดิน ในการดำเนินการวิจัยมีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการลดการปนเปื้อนของสารปรอทในดิน โดยเติมแบคทีเรียคัดสายพันธุ์ในดินที่มีความเข้มข้นของสารปรอทที่แตกต่างกัน ติดตามการเปลี่ยนแปลงเป็นระยะเวลา 15 วัน จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณของสารปรอทในดินด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography: GC) และคำนวณประสิทธิภาพการลดการปนเปื้อนของสารปรอท จากผลการวิจัยพบว่าดินมีลักษณะเป็นดินร่วน และเมื่อพิจารณาค่าอินทรียวัตถุในดินตัวอย่างพบว่ามีปริมาณ 18 กรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งอยู่ในระดับปานกลางถึงต่ำ ในส่วนค่าความเป็นกรดด่างมีค่า 6.56 ซึ่งมีค่าเป็นกรดอ่อน และจากการวิเคราะห์การลดการปนเปื้อนของสารปรอท พบว่าการใช้แบคทีเรียคัดสายพันธุ์ปริมาณ 5 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารปรอท 120 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีประสิทธิภาพในการลดการกำจัดสารปรอทสูงสุด คือ ร้อยละ 43.07 และรองลงมาคือ การใช้แบคทีเรียคัดสายพันธุ์ปริมาณ 5 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารปรอท 240 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารปรอทร้อยละ 42.13 ดังนั้นจากงานวิจัยนี้จึงสามารถนำไปสู่การจัดการพื้นที่ที่มีการตกค้างของปรอท รวมถึงการลดการปนเปื้อนของโลหะหนักสู่ห่วงโซ่อาหารได้อีกด้วย

คำสำคัญ: สารปรอท แบคทีเรียคัดสายพันธุ์ ประสิทธิภาพการกำจัดสารปรอท

[1] สาขาวิชานวัตกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี
[2] สาขาวิชาสิ่งแวดล้อมศึกษา วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี
[*] Corresponding author e-mail: apichaya.s@vru.ac.th

Received: 22 February 2023, Revised: 17 March 2023, Accepted: 12 April 2023

Abstract

This research was studied the efficiency study of selective microbes to reduce mercury contaminated in soil. This research was examined the physical and chemical properties in the soil and investigated the efficiency of mercury reduction in soil. The experimental design was varied the concentration of mercury rates within 15 days. Soil samples were investigated by gas chromatography (GC) technique and calculated the efficiency of mercury reduction. The results showed that soil properties were as silty in texture and 18 grams per kilograms (g/kg) of organic matter that medium level. Soil pH was 6.56 that weak acid. Regarding mercury contamination reduction, 5 g of selective microbes and 120 milligrams per kilograms (mg/kg) of mercury concentration was found the greatest removal efficiency of mercury at 43.07%. Followed by 5 grams of selective microbes with 240 mg/kg of mercury concentration, could remove an efficiency of mercury at 42.13% of mercury, respectively. Therefore, this research can lead to the management of areas with mercury residues, including reducing heavy metal contamination in the food chain.

Keywords: Mercury, Selective bacteria, Mercury removal efficiency

บทนำ

ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของความต้องการในการอุปโภคบริโภคมีมากขึ้น ตั้งแต่การผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน อุตสาหกรรมอัลคาไลด์ อุตสาหกรรมอื่น ๆ การใช้สารปรอทในวัสดุอุดฟัน เตาเผาขยะติดเชื้อ นอกจากนี้การนำสิ่งของต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์สำหรับกิจกรรมในชีวิตประจำวัน ทำให้มีการปลดปล่อยสารมลพิษมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะหนักเป็นสารที่สามารถรวมตัวกับสารอื่น ๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) และเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (organometallic compound) ทำให้สามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (food chain) โลหะหนักเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อม โดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และพืช จากนั้นจะเข้าสู่มนุษย์ โลหะหนักหลายชนิดมีสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (ชมภู่ และคณะ, 2561) เช่น ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม สังกะสี ทองแดง นิเกิล โครเมียม เหล็ก แมงกานีส โคบอลต์ และสารหนู สามารถส่งผลกระทบต่อมนุษย์ได้อย่างรุนแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งปรอทเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูงและสามารถรวมกับสารอินทรีย์ทำให้ความเป็นพิษเพิ่มขึ้นได้ ตัวอย่างของเหตุการณ์ที่เกิดผลกระทบเป็นวงกว้างจากสารปรอท คือ โรคมินามาตะที่เกิดจากการรั่วไหลของสารปรอทจากโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารปรอทในน้ำและดิน ทำให้ประชาชนเสียชีวิตเป็นจำนวนมาก (Hachiya, 2006)

ปรอท (mercury: Hg) เป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูงแม้จะสะสมอยู่ในร่างกายเพียงเล็กน้อย ซึ่งมักพบปนเปื้อนอยู่ในอากาศ น้ำ และดิน เป็นส่วนใหญ่ สาเหตุมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง การเผาขยะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ตามบ้านเรือน และโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้สารปรอทเป็นวัตถุดิบ เช่น โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โรงงานผลิตพลาสติก รวมถึงเกษตรกรยังมีการใช้สารเคมีในการทำการเกษตร สาเหตุเหล่านี้ส่งผลให้มีการตกค้างของสารปรอทในดิน เนื่องจากสารปรอทเป็นโลหะหนักที่สามารถแพร่กระจายได้ในระยะไกล และตกค้างยาวนานในสิ่งแวดล้อม คุกคามสุขภาพและความเป็นอยู่ที่ดีของสิ่งมีชีวิต ทั้งยังสามารถสะสมในห่วงโซ่อาหาร ซึ่งการสะสมทางชีวภาพและการขยายตัวของปรอทในห่วงโซ่อาหาร (Rua-Ibarz *et al*., 2016) ทำให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพอย่างร้ายแรงต่อมนุษย์ ซึ่งรวมถึงโรคหลอดลมอักเสบเฉียบพลัน และโรคปอดอักเสบที่อาจนำไปสู่ความล้มเหลวของระบบทางเดินหายใจและถึงขั้นเสียชีวิต การได้รับสารปรอทเป็นเวลานานจะส่งผลต่อการทำงานของสมองมนุษย์ และยังทำให้เกิดความผิดปกติในระบบประสาทส่วนกลาง (Holmes *et al*., 2009) ปัญหาสุขภาพของมนุษย์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับมลพิษจากสารปรอท ได้แก่ ภาวะโปรตีนในปัสสาวะหรือความผิดปกติของไต (Rafique *et al*., 2015) ซึ่งผลกระทบต่าง ๆ ของความเป็นพิษของสารปรอทขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารปรอท อย่างไรก็ตามกิจกรรมต่าง ๆ ยังไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ จึงนำไปสู่การหาวิธีการบำบัดสารปรอทที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้พืชฟื้นฟู (phytoremediation) การบำบัดทางชีวภาพ (bioventing) การฟื้นฟูทางชีวภาพ (bioremediation) การออกซิไดซ์ด้วยสารเคมี (chemical oxidation) การสกัดสารระเหยง่ายออกจากดิน (soil vapor extraction) การล้างดิน (soil flushing) การตกผลึก (precipitation) ซึ่งแต่ละวิธีมีความเหมาะสมในแต่ละพื้นที่ต่างกัน (นันทวุฒิ, 2561) อย่างไรก็ตามการฟื้นฟูทางชีวภาพถือเป็นหนึ่งในวิธีการที่น่าสนใจและมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเป็นการใช้ประโยชน์จากสิ่งมีชีวิตที่สามารถย่อยสลายสารมลพิษได้

คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการหาแนวทางเพื่อให้ประชาชนสามารถดำรงชีวิตได้โดยได้รับผลกระทบจากสารปรอทน้อยที่สุด โดยการนำเทคโนโลยีการฟื้นฟูทางชีวภาพ (bioremediation technology) ซึ่งเป็นการเติมแบคทีเรียคัดสายพันธุ์ในดิน เพื่อใช้ในการบำบัดสารปรอทที่ปนเปื้อนในดิน และสามารถใช้เป็นแนวทางในการฟื้นฟูดินในระยะยาวต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. แบคทีเรียคัดสายพันธุ์

แบคทีเรียที่ผ่านการคัดสายพันธุ์ที่สามารถย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปของสารปรอทในดิน เป็นแบคทีเรียผสม ประกอบด้วย *Pediococcus* sp. *Bacillus subtilis* และ *B. licheniformis* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่ได้รับการพัฒนาจากอาจารย์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขานวัตกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ร่วมกับบริษัทเอกชน

2. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

2.1 สมบัติทางกายภาพ

การวิเคราะห์ประเภทของดินโดยการแจกกระจายขนาดของอนุภาคดิน (particle size distribution) ด้วยวิธีไปเปตต์ (USDA Natural Resources Conservation Service, 2004) และนำค่าที่ได้ไปคำนวณ ดังสมการ (1) ถึง (3)

$$\text{ร้อยละอนุภาคขนาดทราย} = \frac{100 \times \text{น้ำหนักอนุภาคขนาดทรายหลังจากอบแห้ง (กรัม)}}{\text{น้ำหนักดินหลังจากอบแห้ง (กรัม)}} \quad (1)$$

$$\text{ร้อยละอนุภาคขนาดดินเหนียว} = \frac{1{,}000 \times \text{น้ำหนักอนุภาคขนาดดินเหนียวหลังจากอบแห้ง (กรัม)}}{\text{น้ำหนักดินหลังจากอบแห้ง (กรัม)} \times \text{ความสูงในการดูดสารแขวนลอยในกระบอกตวง (มิลลิลิตร)}} \quad (2)$$

$$\text{ร้อยละอนุภาคขนาดทรายแป้ง} = 100 - (\text{ร้อยละอนุภาคขนาดทราย} + \text{ร้อยละอนุภาคขนาดดินเหนียว}) \quad (3)$$

2.2 สมบัติทางเคมี

1) ค่าความเป็นกรด-ด่างในดิน (pH) โดยใช้เครื่องมือทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง คือ pH meter รุ่น one-stop IoT provider with soil integrated sensor

2) อินทรียวัตถุในดิน (organic matter) ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ wet oxidation โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นภายใต้การหาความเข้มข้นที่แน่นอน ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (potassium dichromate: $K_2Cr_2O_7$) ในกรดซัลฟูริก (sulfuric acid: H_2SO_4) เข้มข้น และทำการไตเตรตสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาด้วยสารละลายมาตรฐานเฟอรัสซัลเฟต (ferrous sulfate: $FeSO_4$) โดยปริมาณของสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ไปมีค่าเท่ากับปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่ถูกออกซิไดซ์ (oxidize) ไป และสามารถคำนวณกลับมาเป็นอินทรีย์คาร์บอนได้ (พัชรี, 2554)

3. การศึกษาประสิทธิภาพการลดการปนเปื้อนของสารปรอท

โดยทำการออกแบบการทดลองเพื่อติดตามความเปลี่ยนแปลงของสารปรอทที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการเติมแบคทีเรียคัดสายพันธุ์ โดยแบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ดำเนินการทดลองในภาชนะขนาด 20 × 30 เซนติเมตร ในปริมาณที่กำหนดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณของแบคทีเรียคัดสายพันธุ์และสารปรอทที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

ชุดทดลองที่	ปริมาณของแบคทีเรียผสมคัดสายพันธุ์ (ผง: กรัม)	ปริมาณของสารปรอท (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
1 (ชุดควบคุม)	0	240
2 (ชุดควบคุม)	0	120
3	5	240
4	5	120

โดยนำสารปรอทใส่ในตัวอย่างดินที่เป็นตัวแทนของดินในที่ชุมชนที่อยู่ใกล้พื้นที่เกษตรและโรงงานอุตสาหกรรม ในปริมาณที่กำหนดในตารางที่ 1 และติดตามการเปลี่ยนแปลงเป็นระยะเวลา 15 วัน จากนั้นเก็บตัวอย่างดินเพื่อไปวิเคราะห์ปริมาณของสารปรอทด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography: GC) (Shimadsu GC-2014) จากนั้นนำมาคำนวณประสิทธิภาพการลดการปนเปื้อนของสารปรอท ดังสมการ (4)

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัดสารปรอท} = \frac{\text{ความเข้มข้นของสารปรอทที่เวลาเริ่มต้น} \times \text{ความเข้มข้นของสารปรอทที่เวลา t}}{\text{ความเข้มข้นของสารปรอทที่เวลาเริ่มต้น}} \times 100 \qquad (4)$$

ผลการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพของแบคทีเรียคัดสายพันธุ์เพื่อลดปริมาณสารปรอทในดินในงานวิจัยนี้ แสดงข้อมูลของสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน และประสิทธิภาพการลดการปนเปื้อนของสารปรอท ดังนี้

1. สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

จากการเก็บตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ โดยวิธีการแจกกระจายขนาดอนุภาคดิน พบว่าดินมีลักษณะเป็นดินร่วน และเมื่อพิจารณาสมบัติทางเคมี พบว่าดินตัวอย่างมีปริมาณอินทรียวัตถุ 18 กรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งอยู่ในระดับปานกลางถึงต่ำ ในส่วนความเป็นกรด-ด่างมีค่า 6.56 ซึ่งมีค่าเป็นกรดอ่อน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

แหล่งเก็บตัวอย่างดิน	พารามิเตอร์				ประเภทของดิน	อินทรียวัตถุ (กรัมต่อกิโลกรัม)
	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ร้อยละการแจกกระจายขนาดอนุภาคดิน				
		ทราย	แป้ง	เหนียว		
ดินในชุมชนที่มีการทำการเกษตรและมีโรงงานอยู่บริเวณใกล้เคียง	6.56	51	45	14	ดินร่วน	18

ซึ่งสมบัติของดินทั้งทางกายภาพและทางเคมีมีผลต่อการตกค้างของสารปรอท โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ดินมีปริมาณอินทรียวัตถุในปริมาณมาก ทำให้อินทรียวัตถุสามารถรวมตัวกับสารปรอทและเปลี่ยนรูปเป็นสารที่มีความรุนแรงเพิ่มขึ้นได้

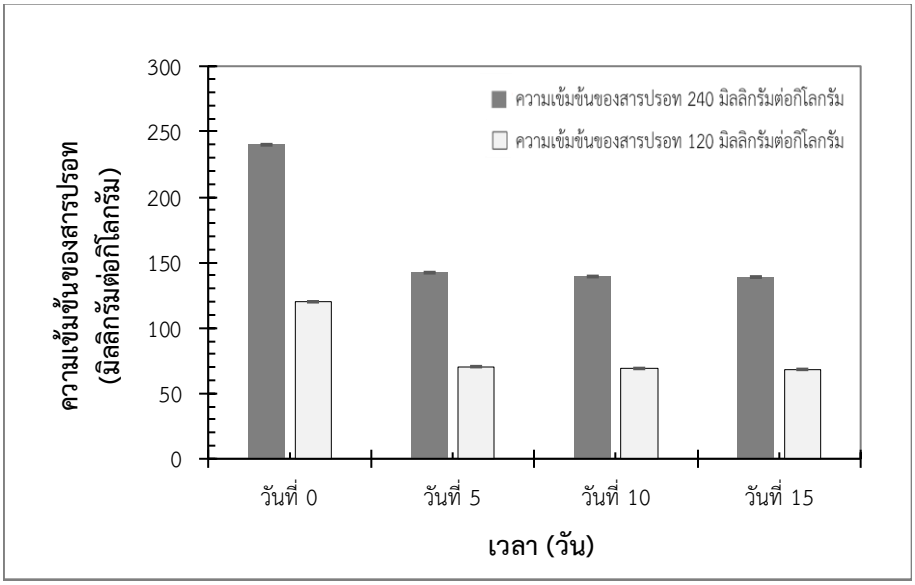
2. ประสิทธิภาพการลดการปนเปื้อนของสารปรอท

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการลดการปนเปื้อนของสารปรอท โดยอาศัยการทำงานของแบคทีเรียคัดผสมคัดสายพันธุ์ *Pediococcus* sp. *B. subtilis* และ *B. licheniformis* เปรียบเทียบกับชุดควบคุม พบว่าในชุดควบคุมนั้น ปริมาณของสารปรอทไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเติมแบคทีเรียผสมคัดสายพันธุ์จำนวน 5 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารปรอทเริ่มต้น 240 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 120 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่าแบคทีเรียผสมคัดสายพันธุ์สามารถลดปริมาณสารปรอทได้ตั้งแต่วันที่ 5 โดยเหลือเพียง 142.24±0.690 และ 70.41±0.583 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ จากนั้นเก็บตัวอย่างวิเคราะห์อีก 2 ครั้ง คือ วันที่ 10 และวันที่ 15 เพื่อติดตามการลดลงของสารปรอท พบว่าในวันที่ 10 มีปริมาณสารปรอทคงเหลือ 139.30±1.082 และ 69.03±0.798 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในวันที่ 15 มีสารปรอทคงเหลือ 138.39±0.616 และ 68.32±0.401 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าในวันที่ 10 และ 15 ปริมาณสารปรอทที่ลดลงนั้นไม่แตกต่างกันกับวันที่ 5 ดังภาพที่ 1

ตารางที่ 3 ปริมาณของสารปรอทที่ลดลงในการทดลองระยะเวลา 15 วัน

ความเข้มข้นของสารปรอทเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นของสารปรอทที่ลดลง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
240	5	142.24±0.690
120	5	70.41±0.583
240	10	139.30±1.082
120	10	69.03±0.798
240	15	138.89±0.616
120	15	68.32±0.401

หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)



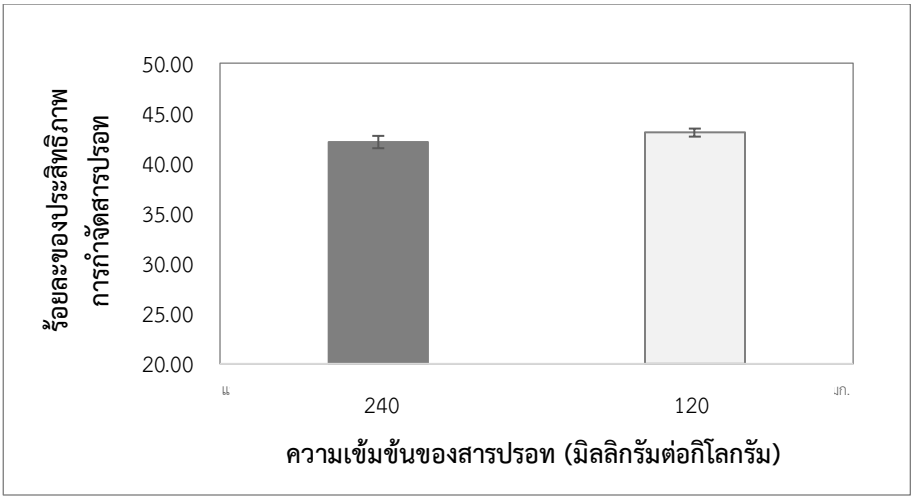
ภาพที่ 1 ปริมาณสารปรอทที่เปลี่ยนแปลงไปจากการใช้แบคทีเรียคัดสายพันธุ์จำนวน 5 กรัม ที่ความเข้มข้นของสารปรอทเริ่มต้น 240 และ 120 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัดสารปรอทที่ปริมาณแบคทีเรียคัดสายพันธุ์และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารปรอทต่างกันพบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสารปรอทที่ปริมาณแบคทีเรียคัดสายพันธุ์ 5 กรัม ความเข้มข้นสารปรอทเริ่มต้น 120 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ระยะเวลา 5 วัน มีค่า ร้อยละ 41.32±0.486 ระยะเวลา 10 วัน มีค่าร้อยละ 42.48±0.665 และระยะเวลา 15 วัน มีค่าร้อยละ 43.07±0.334 และความเข้มข้นของสารปรอทเริ่มต้น 240 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีประสิทธิภาพการบำบัด ระยะเวลา 5 วัน มีค่าร้อยละ 40.73±0.287 ระยะเวลา 10 วัน มีค่าร้อยละ 41.96±0.451 และระยะเวลา 15 วัน มีค่าร้อยละ 42.13±0.257 ดังตารางที่ 4 และภาพที่ 2

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการบำบัดสารปรอท

ความเข้มข้นสารปรอทเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ระยะเวลา (วัน)	ประสิทธิภาพการกำจัดของสารปรอท (ร้อยละ)
240	5	40.73±0.287
120	5	41.32±0.486
240	10	41.96±0.451
120	10	42.48±0.665
240	15	42.13±0.257
120	15	43.07±0.334

หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)



ภาพที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดสารปรอทโดยใช้แบคทีเรียคัดสายพันธุ์

การอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพของแบคทีเรียคัดสายพันธุ์ ประกอบด้วย *Pediococcus* sp. *B. subtilis* และ *B. licheniformis* เพื่อลดปริมาณของสารปรอทในดิน พบว่ากลุ่มแบคทีเรียคัดสายพันธุ์สามารถลดการปนเปื้อนของสารปรอทได้ในระยะเวลา 15 วัน โดยการใช้แบคทีเรียคัดสายพันธุ์ผสมปริมาณ 5 กรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปรอทที่ความเข้มข้น 120 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สูงสุดที่ร้อยละ 43.07±0.616 และปริมาณแบคทีเรียคัดสายพันธุ์ 5 กรัม และความเข้มข้นของสารปรอท 240 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารปรอทร้อยละ 42.13±0.401 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Chien *et al*. (2012) ซึ่งศึกษาการกำจัดสารปรอทโดยใช้ *B. megaterium* MB1 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดอยู่ที่ร้อยละ 80 และ Zhao *et al.* (2021) ศึกษาการกำจัดสารปรอทโดยใช้ *Pseudomonas cremoricolorate* พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดมากกว่าร้อยละ 80 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่า แต่ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการกำจัดสารปรอทด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยใช้แบคทีเรียคัดสายพันธุ์ผสมสามารถลดปริมาณสารปรอทได้และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ (Lee and Fisher, 2018) ต้นทุนต่ำและปลอดภัย อย่างไรก็ตามข้อมูลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปสู่การลดการสะสมของสารปรอทในสิ่งแวดล้อมทั้งในน้ำและในดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลดการสะสมของสารปรอทในห่วงโซ่อาหาร เนื่องจากเส้นทางการสะสมสารปรอทที่สำคัญที่สุด คือ การสะสมในห่วงโซ่อาหาร โดยผ่านสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น แพลงก์ตอนจะดูดซึมสารปรอทแบบแพสซีฟ (passive surface) ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่ดูดซึมสารปรอทเข้าไป ในทางกลับกันสิ่งมีชีวิตกลุ่มที่ดำรงชีวิตอยู่ได้โดยอาศัยสารอินทรีย์ (heterotrophic) อาจได้รับผลกระทบจากการบริโภคสิ่งมีชีวิตที่มีการดูดซึมสารปรอทเข้าไป และยังจะได้รับระดับความเป็นพิษของสารปรอทมากขึ้น ด้วยสาเหตุนี้การลดการปนเปื้อนของสารปรอทในดินจึงสามารถลดอันตรายที่จะเกิดขึ้นจากการสะสมของสารปรอทที่จะเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ทำให้เกิดความปลอดภัยในสิ่งแวดล้อมและการบริโภคของสิ่งมีชีวิต และเมื่อพิจารณาถึงความสอดคล้อง

กับการพัฒนาที่ยั่งยืน (sustainable development goals: SDGs) พบว่าสอดคล้องกับ SDG 3.9 คือ การลดจำนวนการตายและการเจ็บป่วยจากสารเคมีอันตรายจากมลพิษและการปนเปื้อนทางอากาศ น้ำ และดิน ให้ลดลงอย่างมาก ภายในปีพ.ศ. 2573 ซึ่งจากความสอดคล้องนี้แสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้สามารถตอบสนองเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนได้

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาประสิทธิภาพของแบคทีเรียคัดสายพันธุ์ ประกอบด้วย *Pediococcus* sp. *B. subtilis* และ *B. licheniformis* เพื่อลดปริมาณสารปรอทในดิน พบว่ากลุ่มแบคทีเรียคัดสายพันธุ์สามารถลดการปนเปื้อนของสารปรอทได้ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปรอทสูงสุดถึงร้อยละ 43.07 โดยการลดการปนเปื้อนรวมถึงการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้ในระยะเวลา 15 วัน อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองสามารถลดการปนเปื้อนของสารปรอทได้ตั้งแต่วันที่ 5 จากงานวิจัยนี้จึงสามารถนำไปสู่การจัดการพื้นที่ที่มีการตกค้างของโลหะหนักรวมถึงการลดการปนเปื้อนโลหะหนักสู่ห่วงโซ่อาหารได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท จีแอนด์บี เอนไซม์ส จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แบคทีเรียคัดสายพันธุ์ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ชมภู่ เหนือศรี นุกูล กุดแถลง พิทักษ์ นาสมใจ ปิยะ โมคมุล และเชิดชัย สมบัติโยธา. (2561). *การปนเปื้อนของโลหะหนักและการจัดการขยะอันตรายโดยการมีส่วนร่วมของชุมชน องค์การบริหารส่วนตำบลโคกสะอาด อำเภอฆ้องชัย จังหวัดกาฬสินธุ์. รายงานวิจัย.* มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.

นันทวุฒิ จำปางาม. (2561). การฟื้นฟูมลพิษทางดินที่ปนเปื้อนกากของเสียอันตรายจากภาคอุตสาหกรรม. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 12(2), 97-111.

พัชรี ธีรจินดาขจร. (2554). *คู่มือการวิเคราะห์ดินทางเคมี*. (พิมพ์ครั้งที่ 3). ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

Chien, M., Nakahata, R., Ono, T., Miyauchi, K. and Endo, G. (2012). Mercury removal and recovery by immobilized *Bacillus megaterium* MB1. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 6(2), 192-197, doi: https://doi.org/10.1007/s11705-012-1284-3.

Hachiya, N. (2006). The history and the present of Minamata disease - entering the second half a century. *Japan Medical Association Journal*, 49(3), 112-118.

Holmes, P., James, K.A.F. and Levy, L.S. (2009). Is low-level environmental mercury exposure of concern to human health?. *Science of the Total Environment*, 408(2), 171-182, doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.043.

Lee, C.S., and Fisher, N.S. (2018). Microbial generation of elemental mercury from dissolved methylmercury in seawater. *Limnology and Oceanography*, 64(2), 679-693, doi: https://doi.org/10.1002/lno.11068.

Rafique, A., Amin, A. and Latif, Z. (2015). Screening and characterization of mercury-resistant nitrogen fixing bacteria and their use as biofertilizers and for mercury bioremediation. *Pakistan Journal of Zoology*, 47(5), 1271-1277.

Rua-Ibarz, A., Bolea-Fernandez, E., Maage, A., Frantzen, S., Valdersnes, S., and Vanhaecke, F. (2016). Assessment of Hg pollution released from a WWII submarine wreck (U-864) by Hg isotopic analysis of sediments and *cancer pagurus* tissues. *Environmental Science and Technology*, 50(19), 10361-10369, doi: https://doi.org/10.1021/bacs.est.6b02128.

USDA Natural Resources Conservation Service. (2004). *Soil survey laboratory methods manual. no. 42 version 4.0*. Washington, D.C.: Soil Survey Investigation Report.

Zhao, M.M., Kou, J.B., Chen, Y.P., Xue, L.G., and Fan, T.T. (2021). Bioremediation of wastewater containing mercury using three newly isolation bacterial strains. *Journal of Cleaner Production*, 299, doi: https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126869.

การพัฒนาผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากเมล็ดประ
Development of Alternative Milk from Parah Seed (*Elateriospermum tapos*)

จุรีภรณ์ นวนมุสิก[1*] ปุญญาเพชร เดชเพชรธรักษ์[2] จตุพร คงทอง[2] สิริกุล เพชรหวล[3] และสุภาวิณี ยอดพิจิตร[2]

Jureeporn Nounmusig[1*] Poonyapetch Detchphetchtharak[2] Jatuporn Kongthong[2] Sirikun Pethuan[3] and Supawinee Yodpijit[2]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสูตรที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์นมทางเลือกหรือนมพืชจากเมล็ดประและเพื่อศึกษาคุณภาพและองค์ประกอบทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์นมจากเมล็ดประที่ผ่านกระบวนการพาสเจอไรซ์ โดยศึกษาอัตราส่วนของเมล็ดประต่อน้ำที่ระดับ 1:2 1:3 และ 1:4 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ศึกษาปริมาณน้ำตาลที่ได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสของนมจากเมล็ดประที่ระดับร้อยละ 0 3 5 และ 8 จากนั้นทำการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสมากที่สุดด้วยวิธี 9-point hedonic scale ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของเมล็ดประต่อน้ำ 1:3 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และเติมน้ำตาลทรายร้อยละ 3 ได้รับการยอมรับมากที่สุด โดยนมประจากเมล็ดประที่พัฒนาได้มีค่าความสว่างเท่ากับ 86.42±0.12 มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6.32±0.08 และมีค่าความหนืดเท่ากับ 10.82±0.18 เซนติพอยส์ มีปริมาณสารไซยาไนด์คงเหลือเท่ากับ 2.61±0.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้นมจากเมล็ดประที่ผ่านกระบวนการพาสเจอไรซ์ มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้ยังพบกรดไขมันที่จำเป็นในนมจากเมล็ดประ ได้แก่ กรดไขมันชนิดโอเมก้า 3 โอเมก้า 6 และโอเมก้า 9 แสดงให้เห็นว่านมพืชจากเมล็ดประซึ่งถือเป็นพืชท้องถิ่นประจำจังหวัดนครศรีธรรมราช มีศักยภาพที่สามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์นมทางเลือกเพื่อสุขภาพจากพืชได้

คำสำคัญ: นมจากพืช นมทางเลือก เมล็ดประ สารไซยาไนด์ กรดไขมันโอเมก้า

[1] สาขาวิชาสาธารณสุขศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

[2] สาขาวิชาวิทยาการการประกอบอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

[3] สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

[*] Corresponding author e-mail: Jureeporn_nua@nstru.ac.th

Received: 27 March 2023, Revised: 11 April 2023, Accepted: 19 April 2023

Abstract

The objectives of this study were to develop an appropriate formulation for an alternative milk or plant-based milk product made from Parah seeds (*Elateriospermum tapos*) and to investigate the quality and nutritional values of the pasteurized Parah seed milk product. Parah seed milk was prepared by mixing Parah seeds and water in the ratio of 1:2, 1:3 and 1:4 (weight per volume: w/v) with the sugar content of 0%, 3%, 5%, and 8%. The selected formulation of Parah seed milk was tested using a 9-point hedonic scale. The results showed that the most accepted formula was a 1:3 (w/v) ratio of Parah seed and water with a sugar content of 3%. This formulation had an L* value of 86.42±0.12, a viscosity of 10.82±0.18 centipoints, pH of 6.32±0.08 and total cyanide content of 2.61±0.03 milligram per kilogram (mg/kg). After pasteurization, the contamination of the Parah seed milk with pathogenic bacteria and the total visible count were assessed within the benchmark. In addition, essential fatty acids consisting of omega-3, omega-6 and omega-9 fatty acids were found in the Parah seed milk. These results showed that plant-based milk from Parah seed, a native plant of Nakhon Si Thammarat province, has the potential to be developed as a healthy alternative plant-based milk product.

Keywords: Plant-based milk, Alternative milk, Parah seed, Cyanide, Omega fatty acid

บทนำ

ปัจจุบันผู้บริโภคให้ความสำคัญกับการรับประทานอาหารที่ดีต่อสุขภาพควบคู่กับการบริโภคอย่างเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง กระแสการบริโภคอาหารและเครื่องดื่มจากพืช (plant-based) ได้รับความนิยมมากขึ้น โดยเฉพาะในตลาดเครื่องดื่มประเภทนมที่มีกลุ่มผู้บริโภคที่มีปัญหาการแพ้โปรตีนจากนมวัว และผู้บริโภคบางกลุ่มที่ไม่สามารถย่อยน้ำตาลแล็กโทสในนมวัวได้ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการดื่มนมวัวของผู้บริโภคจำนวนหนึ่งในประเทศไทย ทำให้ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มและนมจากพืชเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกสำหรับทั้งผู้บริโภคที่แพ้นมวัวรวมทั้งผู้บริโภคที่รับประทานมังสวิรัติ (ณฐิฒา, 2565) ส่งผลให้เครื่องดื่มจากพืชมีบทบาทในตลาดอุตสาหกรรมอาหารเพิ่มขึ้น (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2564) การผลิตนมจากพืชเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่ายและไม่ซับซ้อน ประกอบด้วย 9 ขั้นตอนหลัก คือ 1) การปอกเปลือกและลดขนาดวัตถุดิบ 2) การเติมน้ำช่วยการบีบสกัด 3) การลวก 4) การบดเปียก 5) การกรอง 6) การเติมส่วนผสมต่าง ๆ เช่น วิตามินและเกลือแร่ หรือสารให้ความคงตัว เป็นต้น 7) การทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน 8) การฆ่าเชื้อด้วยความร้อน และ 9) การปรับปรุงสีและกลิ่นรสอันพึงประสงค์ (Bocker and Silva, 2022) ปัจจุบันในท้องตลาดมีผลิตภัณฑ์นมจากพืชหลากหลายชนิด เช่น นมถั่วเหลือง นมอัลมอนด์ นมข้าว นมข้าวโอ๊ต นมมะพร้าว นมงา นมควินัว นมจากเมล็ดกัญชง และนมจากถั่วต่าง ๆ เป็นต้น (ศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, 2564; ณฐิฒา, 2565) จากข้อมูล

ดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการพัฒนาผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากพืชจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจและมีกระบวนการผลิตที่ทำได้ง่าย และสามารถผลิตได้ตั้งแต่ระดับการแปรรูปในครัวเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กได้

ต้นประ (*Elateriospermum tapos*) เป็นพืชในวงศ์ Euphorbiaceace มีถิ่นกำเนิดอยู่ในแถบคาบสมุทรมลายู ประเทศมาเลเซีย แถบหมู่เกาะสุมาตรา ประเทศอินโดนีเซีย รวมทั้งพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งพบต้นประมากที่สุดบนพื้นที่ป่าในจังหวัดนครศรีธรรมราช บริเวณอุทยานแห่งชาติเขานัน ซึ่งมีขนาดมากกว่า 5,000 ไร่ จนได้รับการขนานนามว่าเป็นผืนป่าประที่ใหญ่ที่สุดในโลก นอกจากนี้ยังสามารถพบต้นประได้เล็กน้อยในพื้นที่จังหวัดอื่น ๆ ทางภาคใต้ของไทย ได้แก่ จังหวัดตรัง จังหวัดยะลา และจังหวัดนราธิวาส (Ngamriabsakul and Kommen, 2009; Anchan, 2010; Charoensuk *et al*., 2012) ต้นประออกผลในเดือนสิงหาคมถึงกันยายนของทุกปี ชุมชนในแต่ละพื้นที่นิยมเก็บเมล็ดประสดมาจำหน่ายหรือนำไปแปรรูปเป็นอาหาร (สายฝน, 2559) เกิดเป็นรายได้ที่สำคัญของชุมชน การแปรรูปเมล็ดประเป็นอาหารมีหลายรูปแบบ เช่น แกงคั่ว แกงส้ม แกงไตปลา ต้มกะทิ น้ำพริกกะปิ น้ำพริกมะขาม คั่ว ดอง ย่างเป็นผักเคียง อบหรือฉาบน้ำตาล ซึ่งเป็นที่นิยมของกลุ่มผู้บริโภค (ปริญญา และคณะ, 2561) จากการศึกษาองค์ประกอบทางอาหารเบื้องต้น พบว่าแป้งเมล็ดประมีสารอาหารหลัก คือ ไขมัน มีองค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว และกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนในปริมาณที่สูงและมีความหลากหลายของชนิดของกรดไขมันอิสระที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย ทั้งในกลุ่มกรดไขมันโอเมก้า 3 และโอเมก้า 6 คุณสมบัติเชิงหน้าที่ที่น่าสนใจของแป้งเมล็ดประ คือ ความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมัน คุณสมบัติการทำให้เกิดอิมัลชัน ความสามารถในการเกิดโฟมและมีความคงตัวของโฟม ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ ได้ (Anchan, 2010) แต่อย่างไรก็ตามในเมล็ดประมีสาร cyanogenic glycoside ซึ่งเป็นสารพิษ (poisonous) ทำให้ปวดศีรษะ ใจสั่น หน้าแดง หมดสติ ชัก และอาจเสียชีวิตภายในเวลา 10 นาที (Ngamriabsakul and Kommen, 2009) จึงมีความจำเป็นที่ต้องตรวจสอบปริมาณไซยาไนด์ในผลิตภัณฑ์อาหารในเมล็ดประเพื่อตรวจสอบความปลอดภัยของผู้บริโภค

จากข้อมูลดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเมล็ดประซึ่งเป็นพืชประจำท้องถิ่นของจังหวัดนครศรีธรรมราช มาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์นมพืชจากเมล็ดประเพื่อเพิ่มมูลค่าและสร้างรูปแบบการใช้ประโยชน์เมล็ดประให้หลากหลายเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งพัฒนาให้เป็นนมทางเลือกที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพและอุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสูตรที่เหมาะสมต่อการผลิตนมทางเลือกจากเมล็ดประ และศึกษาคุณภาพและคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากเมล็ดประที่ผ่านกระบวนการพาสเจอไรซ์ (pasteurization process)

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นของเมล็ดประ

โดยสุ่มเก็บตัวอย่างเมล็ดประสดบริเวณพื้นที่บ้านทับน้ำเต้า จำนวน 3 พื้นที่ ในหมู่ 8 ตำบลกรุงชิง อำเภอนบพิตำ จังหวัดนครศรีธรรมราช วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้น ได้แก่ ปริมาณความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมันหยาบ ใยอาหารหยาบ ตามวิธีมาตรฐาน AOAC International and Latimer (2012) และวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดโดยวิธีผลต่างของสารอาหารทั้งหมด

2. การพัฒนาสูตรการผลิตนมทางเลือกจากเมล็ดประ

2.1 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเมล็ดประต่อน้ำ

โดยนำเมล็ดประมากะเทาะเปลือก และลวกในน้ำเดือด (อุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียส) นาน 15 นาที แช่ในน้ำเย็น (อุณหภูมิ 5-10 องศาเซลเซียส) นาน 10 นาที จากนั้นล้างและสะเด็ดน้ำบนตะแกรงนาน 30 นาที นำเมล็ดประที่ผ่านการลวก เติมน้ำในอัตราส่วนเมล็ดประต่อน้ำเท่ากับ 1:2 1:3 และ 1:4 จากนั้นบดให้ละเอียดและกรองแยกกากด้วยเครื่องโม่ รุ่น FDM 110 นำส่วนของเหลวที่ได้ไปกรองแยกกากและส่วนของนมเมล็ดประอีกครั้งด้วยผ้าขาวบาง 5 ชั้น จากนั้นนำไปโฮโมจีไนซ์ (homogenize) ด้วยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ ยี่ห้อ IKA รุ่น T25D นาน 5 นาที และนำไปต้มให้ความร้อนในระดับพาสเจอไรซ์ (อุณหภูมิ 70-75 องศาเซลเซียส) นาน 15 นาที บรรจุตัวอย่างแต่ละชุดการทดลองลงในขวดแก้วขนาด 200 มิลลิลิตร ปิดฝา และทำให้เย็นทันที เก็บที่อุณหภูมิ 4±1 องศาเซลเซียส แล้วนำไปทดสอบการยอมรับคุณภาพทางประสาทสัมผัส ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติความรู้สึกในขณะดื่ม และความชอบโดยรวมด้วยวิธี 9-point hedonic scale (Stone and Sidel, 1993)

2.2 การศึกษาปริมาณน้ำตาลที่เหมาะสมต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของนมเมล็ดประ

โดยคัดเลือกผลิตภัณฑ์นมเมล็ดประที่ได้รับคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูงที่สุด จากการศึกษาที่ 2.1 เติมน้ำตาลในอัตราส่วนน้ำตาลร้อยละ 0 1 3 และ 5 เพื่อศึกษาปริมาณน้ำตาลที่มีผลต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9-point hedonic scale ร่วมกับการวัดความพอดีของรสหวานด้วยสเกลวัดความพอดี (Just about right (JAR) scale) 5 ระดับ (Lawless and Heymann, 2010)

3. การศึกษาคุณภาพทางกายภาพและเคมี ปริมาณจุลินทรีย์ และคุณค่าทางโภชนาการในผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากเมล็ดประ

3.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของนมเมล็ดประ

โดยวัดค่าสีตามระบบ CIE (commission International de l' Eclairage) (L* a* b*) ด้วยเครื่องวัดสี ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น color flex วัดค่าความหนืดด้วยเครื่องวัดค่าความหนืดแบบต้านการหมุน (rotational brookfield viscometer) และรายงานผลในหน่วยเซนติพอยส์ (centipoise: cP)

3.2 ศึกษาลักษณะทางเคมี

โดยวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยเครื่อง pH meter และวิเคราะห์ปริมาณสารไซยาไนด์ที่เหลือในผลิตภัณฑ์นมจากเมล็ดประ โดยวิธีการ pyridine pyrazorone method (O'Brien, 1991)

3.3 ศึกษาคุณภาพทางจุลินทรีย์

ได้แก่ ปริมาณของ total viable count เชื้อ *Clostridium perfringens Staphylococcus aureus Bacillus cereus* และ *Escherichia coli* ตามวิธีมาตรฐาน Bacteriological Analytical Manual Online (BAM) (2001) เชื้อ *Salmonella* spp. และ *Listeria monocytogenes* ตามวิธีมาตรฐาน International Standard (ISO/IEC 17025) (2017)

3.4 ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของนมเมล็ดประ

ประกอบด้วย สารอาหารหลัก (โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน) คอเลสเตอรอล ใยอาหาร วิตามิน (วิตามินเอ วิตามินบี 1 และวิตามินบี 2) และแร่ธาตุ (ธาตุเหล็ก แคลเซียม และโซเดียม) ตามวิธีมาตรฐาน AOAC International and Latimer (2019)

3.5 การศึกษาปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์นมจากเมล็ดประ

ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟฟี (gas chromatography: GC) และย่อยตัวอย่างตามวิธีมาตรฐาน AOAC International and Latimer (2019)

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ผลการวิจัย

1. องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นของเมล็ดประ

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นของเมล็ดประ พบว่ามีความชื้นเท่ากับ 25.28±0.10 กรัมต่อ 100 กรัม ประกอบด้วยสารอาหารหลัก คือ ไขมัน ในปริมาณมากที่สุด (38.36±0.04 กรัมต่อ 100 กรัม) รองลงมา คือ โปรตีน (12.48±0.01 กรัมต่อ 100 กรัม) และคาร์โบไฮเดรต (11.62±0.24 กรัมต่อ 100 กรัม) ตามลำดับ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดประ

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณที่พบ (กรัมต่อ 100 กรัม)
ความชื้น	25.28±0.10
เถ้า	1.72±0.21
โปรตีน	12.48±0.01
ไขมันหยาบ	38.36±0.04
เยื่อใยหยาบ	10.54±0.16
คาร์โบไฮเดรต	11.62±0.24

หมายเหตุ: - ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD) จำนวน 3 ซ้ำ

2. การพัฒนาสูตรการผลิตนมทางเลือกจากเมล็ดประ

การทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของนมเมล็ดประที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน พบว่าผู้ทดสอบมีความชอบด้านสีและความชอบโดยรวมต่อนมเมล็ดประในอัตราส่วนเมล็ดประต่อน้ำเท่ากับ 1:3 สูงที่สุด แตกต่างจากสูตรที่ใช้อัตราส่วนเมล็ดประต่อน้ำเท่ากับ 1:2 และ 1:4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนการยอมรับด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ และความรู้สึกในขณะดื่ม พบว่าผู้ทดสอบให้การยอมรับสูตรที่ใช้อัตราส่วนเมล็ดประต่อน้ำเท่ากับ 1:3 และ

1:4 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และจากการพิจารณาคะแนนความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์ พบว่าอัตราส่วนเมล็ดประต่อน้ำเท่ากับ 1:3 มีคะแนนสูงสุดเท่ากับ 7.39±0.09 ดังตารางที่ 2 จึงคัดเลือกสูตรดังกล่าวเป็นสูตรพื้นฐานในการศึกษาปริมาณน้ำตาลที่เหมาะสมต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของนมเมล็ดประในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 2 ผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากเมล็ดประ

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์	อัตราส่วนเมล็ดประต่อน้ำในสูตรนมทางเลือกจากเมล็ดประ		
	1:2	1:3	1:4
ลักษณะปรากฏ	5.48±0.72^{b}	7.68±0.12^{a}	7.48±0.62^{a}
สี	6.04±0.14^{c}	7.64±0.91^{a}	7.24±0.32^{b}
กลิ่น	6.89±0.27^{b}	7.04±0.20^{a}	7.24±0.14^{a}
กลิ่นรส	4.98±0.42^{b}	7.06±0.48^{a}	7.12±0.38^{a}
รสชาติ	6.86±0.52^{a}	6.98±0.09^{a}	6.52±0.24^{b}
ความรู้สึกในขณะดื่ม	4.52±0.84^{b}	7.02±0.28^{a}	7.18±0.48^{a}
ความชอบโดยรวม	5.82±0.82^{c}	7.39±0.09^{a}	7.08±0.16^{b}

หมายเหตุ: - ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD) จำนวน 3 ซ้ำ
- ตัวอักษร a b c ที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการปรับปรุงรสหวานของผลิตภัณฑ์นมจากเมล็ดประ โดยการเติมน้ำตาลในปริมาณต่างกัน พบว่าการเติมน้ำตาลร้อยละ 3 และ 5 มีผลต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัส ด้านกลิ่น กลิ่นรส รสชาติความรู้สึกในขณะดื่ม และความชอบโดยรวมสูงกว่าสูตรที่มีการเติมน้ำตาลในระดับร้อยละ 1 และสูตรควบคุม (ไม่เติมน้ำตาล) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบโดยรวมต่อนมเมล็ดประสูตรน้ำตาลร้อยละ 5 มากที่สุด (7.74±0.19 คะแนน) ดังตารางที่ 3

เมื่อพิจารณาผลการยอมรับความหวานของผลิตภัณฑ์จากสเกลการวัดความพอดี พบว่ากลุ่มผู้ทดสอบชิมร้อยละ 66.67 พอใจผลิตภัณฑ์นมจากเมล็ดประสูตรน้ำตาลร้อยละ 3 (ภาพที่ 1) ดังนั้นจึงเลือกเป็นสูตรการผลิตนมเมล็ดประสำหรับการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

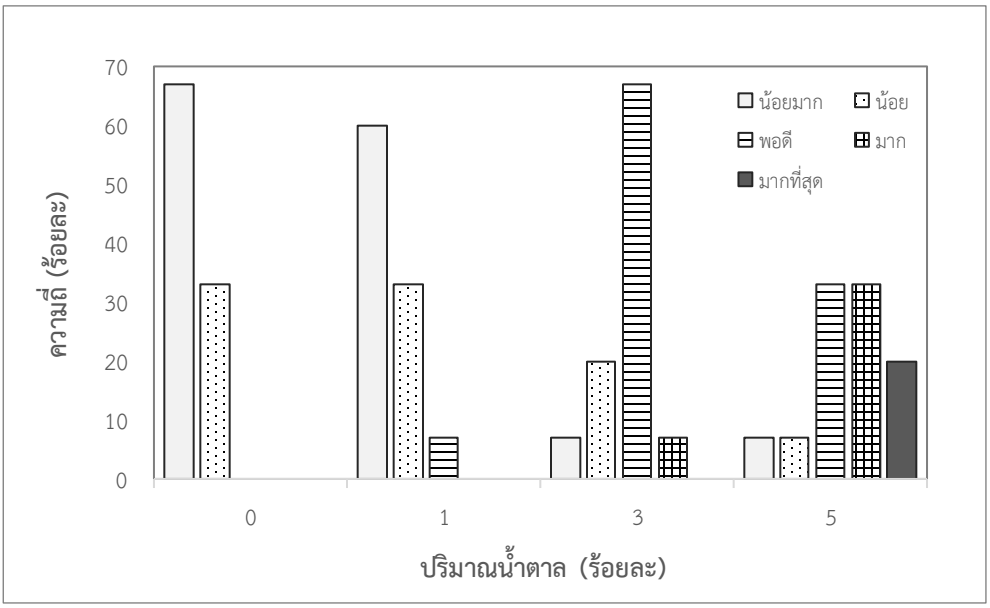
ตารางที่ 3 ผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสของนมทางเลือกจากเมล็ดประสูตรมาตรฐานที่มีปริมาณน้ำตาลต่างกัน

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์	ปริมาณน้ำตาลในสูตรนมทางเลือกจากเมล็ดประ (ร้อยละ)			
	0	1	3	5
ลักษณะปรากฏ	7.58±0.28^{a}	7.66±0.20^{a}	7.72±0.25^{a}	7.63±0.36^{a}
สี	7.54±0.16^{a}	7.57±0.29^{a}	7.54±0.28^{a}	7.52±0.16^{a}

ตารางที่ 3 (ต่อ)

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์	ปริมาณน้ำตาลในสูตรนมทางเลือกจากเมล็ดประ (ร้อยละ)			
	0	1	3	5
กลิ่น	7.06±0.14[b]	7.12±0.06[b]	7.20±0.02[a]	7.32±0.10[a]
กลิ่นรส	7.02±0.28[b]	7.08±0.08[b]	7.24±0.32[a]	7.30±0.25[a]
รสชาติ	7.54±0.19[b]	7.59±0.12[b]	7.86±0.12[a]	7.63±0.30[a]
ความรู้สึกในขณะดื่ม	7.02±0.18[b]	7.12±0.16[b]	7.32±0.08[a]	7.45±0.12[a]
ความชอบโดยรวม	7.26±0.24[b]	7.32±0.20[b]	7.68±0.20[a]	7.74±0.19[a]

หมายเหตุ: - ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD) จำนวน 3 ซ้ำ
- ตัวอักษร a b ที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 1 ผลการยอมรับความหวานของผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากเมล็ดประที่มีปริมาณน้ำตาลต่างกัน วัดได้จากสเกลการวัดความพอดี

3. คุณภาพทางกายภาพและทางเคมี และองค์ประกอบทางโภชนาการในผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากเมล็ดประ

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากเมล็ดประ ซึ่งเป็นสูตรที่ได้รับการยอมรับมากที่สุด พบว่านมจากเมล็ดประมีค่าค่าความสว่าง ความเป็นสีแดง และความเป็นสีเหลืองเท่ากับ 86.42±0.12 1.64±0.32 และ 5.26±0.08 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่านมเมล็ดประมีลักษณะสีขาวสว่างและค่อนไปทางสีเหลือง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าความหนืด พบว่านมจากเมล็ดประเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความหนืดต่ำเท่ากับ 10.82±0.18 เซนติพอยส์ และมีค่าความ

เป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.32±0.08 จัดเป็นเครื่องดื่มที่มีความเป็นกรดต่ำ ทั้งนี้พบปริมาณสารไซยาไนด์ในผลิตภัณฑ์นมประที่ผ่านกระบวนการพาสเจอไรซ์ เท่ากับ 2.61±0.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ความชื้นฐานแห้ง ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากเมล็ดประ

ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี และปริมาณสารไซยาไนด์	ค่าที่วิเคราะห์ได้
ค่าความสว่าง (L*)	86.42±0.12
ค่าความเป็นสีแดง (a*)	0.64±0.32
ค่าความเป็นสีเหลือง (b*)	5.26±0.08
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	6.32±0.08
ค่าความหนืด (เซนติพอยส์)	10.82±0.18
ปริมาณสารไซยาไนด์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ความชื้นฐานแห้ง)	2.61±0.03

หมายเหตุ: - ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD) จำนวน 3 ซ้ำ

จากการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยการให้ความร้อนระดับพาสเจอไรซ์ พบว่ามีการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด เท่ากับ 1.12×10^2 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ เชื้อ *S. aureus B. cereus Salmonella* spp. *L. monocytogenes* และ *C. perfringens* รวมทั้งเชื้อ *E. coli* ซึ่งพบน้อยกว่า 2.2 โคโลนีต่อมิลลิลิตร ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนที่พบในผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากเมล็ดประ

ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อน	ปริมาณที่พบในผลิตภัณฑ์ (โคโลนีต่อมิลลิลิตร)	มาตรฐานอาหารด้านจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค* (โคโลนีต่อมิลลิลิตร)
Total viable count	1.12×10^2	$<1.00 \times 10^4$
S. aureus	ไม่พบ	ไม่พบ
B. cereus	ไม่พบ	<100
Salmonella spp.	ไม่พบ	ไม่พบ
L. monocytogenes	ไม่พบ	ไม่พบ
C. perfringens	ไม่พบ	<100
E. coli	<2.2	<2.2

หมายเหตุ: - * อ้างอิงตามสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2558)

เมื่อศึกษาข้อมูลองค์ประกอบทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากเมล็ดประ พบว่านมเมล็ดประ 100 มิลลิลิตร ให้ค่าพลังงานทั้งหมดเท่ากับ 83.26 กิโลแคลอรี และมีองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ต่อ 100 มิลลิลิตร ได้แก่ ความชื้น เถ้า ไขมันทั้งหมด โปรตีน ทั้งหมด และคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด เท่ากับ 84.01 0.35 4.14 1.24 และ 10.26 กรัม ตามลำดับ โดยไม่พบปริมาณใยอาหารหยาบในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังพบว่านมเมล็ดประ 100 มิลลิลิตร มีปริมาณแร่ธาตุโซเดียม แคลเซียม และเหล็ก เท่ากับ 3.46 4.65 และ 0.20 มิลลิกรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามไม่พบวิตามินเอ วิตามินบี 1 และวิตามินบี 2 ในผลิตภัณฑ์นมจากเมล็ดประ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากเมล็ดประ

องค์ประกอบทางโภชนาการ	ปริมาณต่อ 100 มิลลิลิตร	ปริมาณต่อ หนึ่งหน่วยบริโภค (200 มิลลิลิตร)	เปอร์เซ็นต์ โภชนาการ (%RDI)*
พลังงานทั้งหมด (กิโลแคลอรี)	83.26	160	-
พลังงานจากไขมัน (กิโลแคลอรี)	37.26	70	-
ไขมันทั้งหมด (กรัม)	4.14	8	12
ไขมันอิ่มตัว (กรัม)	0.75	1.5	8
คอเลสเตอรอล (มิลลิกรัม)	0	0	0
โปรตีน (กรัม)	1.24	2	-
คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (กรัม)	10.26	21	7
ใยอาหาร (กรัม)	0.00	0	0
น้ำตาล (กรัม)	3.12	6	-
โซเดียม (มิลลิกรัม)	3.46	5	0
วิตามินเอ (ไมโครกรัม)	0	0.00	0
วิตามินบี (มิลลิกรัม)	0	0.00	0
วิตามินบี 2 (มิลลิกรัม)	0	0.00	0
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	4.65	9.30	0
เหล็ก (มิลลิกรัม)	0.20	0.40	2
เถ้า (กรัม)	0.35	-	-
ความชื้น (กรัม)	84.01	-	-

หมายเหตุ: - * เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน Thai recommended daily intakes (Thai RDI)

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากเมล็ดประกับปริมาณสารอาหารที่แนะนำให้บริโภคต่อวัน สำหรับคนไทยอายุตั้งแต่ 6 ปีขึ้นไป โดยคิดจากความต้องการพลังงานวันละ 2,000 กิโลแคลอรี (Thai RDI) พบว่านมเมล็ดประต่อ 1 หน่วยบริโภค (200

มิลลิลิตร) มีปริมาณไขมันทั้งหมดร้อยละ 12 ของปริมาณสารอาหารที่แนะนำให้บริโภคต่อวัน โดยคิดเป็นปริมาณจากไขมันอิ่มตัวร้อยละ 8 ของปริมาณสารอาหารที่แนะนำให้บริโภคต่อวัน และมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 7 ของปริมาณสารอาหารที่แนะนำให้บริโภคต่อวัน นอกจากนี้นมเมล็ดประ 1 หน่วยบริโภค มีปริมาณธาตุเหล็กคิดเป็นร้อยละ 2 ของปริมาณ สารอาหารที่แนะนำให้บริโภคต่อวัน อย่างไรก็ตามจากปริมาณไขมันทั้งหมดที่พบในตารางที่ 6 เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันในผลิตภัณฑ์นมจากเมล็ดประ พบว่ามีองค์ประกอบของกรดไขมันอิ่มตัว 2 ชนิด ได้แก่ กรดปาล์มิติก (palmitic acid) และกรดสเตียริก (stearic acid) โดยมีปริมาณที่พบเท่ากับ 53.33±0.20 และ 29.20±0.16 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ และพบกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว คือ กรดโอเลอิก (oleic acid) เท่ากับ 163.35±0.15 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน ได้แก่ กรดลิโนเลอิก (linoleic acid) และกรดอัลฟาไลโนเลนิก (alpha-linolenic acid) เท่ากับ 146.67±0.28 และ 62.17±0.10 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 กรดไขมันอิสระที่เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากเมล็ดประ

ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เป็นองค์ประกอบ	ปริมาณที่พบ (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)
1. กรดไขมันอิ่มตัว	
1.1 กรดปาล์มิติก (C16:0)	53.33±0.20
1.2 กรดสเตียริก (C18:0)	29.20±0.16
2. กรดไขมันไม่อิ่มตัว	
2.1 กรดไขมันอิ่มตัวเชิงเดี่ยว	
1) กรดโอเลอิก (C18:1n9c)	163.35±0.15
2.2 กรดไขมันอิ่มตัวเชิงซ้อน	
1) กรดลิโนเลอิก (C18:2n6c)	146.67±0.28
2) กรดอัลฟาไลโนเลนิก (C18:3n3)	62.17±0.10

หมายเหตุ: - ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD) จำนวน 3 ซ้ำ

การอภิปรายผลการวิจัย

องค์ประกอบหลักที่พบในเมล็ดประ คือ ไขมัน สอดคล้องกับการศึกษาของ Anchan (2010) พบว่าแป้งเมล็ดประมีองค์ประกอบของปริมาณความชื้น โปรตีน เถ้า เส้นใยหยาบ คาร์โบไฮเดรต โดยเฉพาะไขมันที่พบในปริมาณสูงมากถึงร้อยละ 36.49±0.6 ผลิตภัณฑ์นมจากเมล็ดประเป็นนมทางเลือกจากพืช มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยที่มีอนุภาคของโปรตีน เม็ดไขมัน เม็ดแป้ง และอนุภาคของของแข็งขนาดเล็กอื่น ๆ กระจายอยู่รวมกัน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความคงตัวได้ยาก (Manzoor *et al*., 2019) ซึ่งมีผลต่อการกระจายตัวอนุภาคของชั้นโปรตีนและเม็ดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์กลุ่มนมทางเลือกจากพืช โดยกระบวนการแปรรูปมีผลต่อการจัดเรียงตัว การเสียสภาพ หรือการเกิดเจลของโครงสร้างโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ และมีผลต่อขนาดอนุภาคในสารแขวนลอย ลักษณะปรากฏ สี ความคงตัวทางกายภาพ และความหนืดของผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากพืช

(Manzoor *et al*., 2019; Briviba *et al*., 2016) นมจากเมล็ดประที่ผลิตได้มีสีขาวนวลตามธรรมชาติของเมล็ดประ รวมทั้งมีกลิ่นและรสชาติเฉพาะของเมล็ดประซึ่งแตกต่างจากนมจากพืชชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตามลักษณะทางเคมี เช่น ค่าสี ค่าความหนืด และค่าความเป็นกรด-ด่าง รวมทั้งองค์ประกอบทางโภชนาการของนมจากเมล็ดประแตกต่างกัน สอดคล้องตามการศึกษาของ Dhakal *et al*. (2016) ที่พบว่าความแตกต่างขององค์ประกอบต่าง ๆ ในผลิตภัณฑ์นมอัลมอนด์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบและปัจจัยที่มีผลต่อการสกัด ได้แก่ อัตราส่วนของเมล็ดต่อปริมาณน้ำ อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด เวลาที่ใช้แช่วัตถุดิบ เวลาและกระบวนการบดตัวอย่าง รวมทั้งขนาดของแผ่นกรองแยกกาก เป็นต้น เมล็ดประสดมีองค์ประกอบสารพิษไซยาไนด์ ซึ่งเป็นสารพิษที่อันตราย จำเป็นต้องควบคุมปริมาณสารพิษดังกล่าวให้เหมาะสมกับการบริโภค (Husin *et al*., 2013; Ngamriabsakul and Kommen, 2009) กระบวนการลดปริมาณสารไซยาไนด์ที่นิยม คือ การใช้ความร้อน เช่น การคั่วและการต้ม รวมทั้งการดองในน้ำเกลือ (Ngamriabsakul and Kommen, 2009) ข้อกำหนดองค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) และองค์การอนามัยโลก (WHO) ได้กำหนดให้มนุษย์ได้รับสารไซยาไนด์ได้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัมต่อวัน จึงจะไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค (Simeonova *et al*., 2004) ดังนั้นปริมาณสารไซยาไนด์ที่พบในนมเมล็ดประที่ได้จากกระบวนการแปรรูปในการศึกษานี้เมื่อเปรียบเทียบต่อหนึ่งหน่วยบริโภค พบว่ามีปริมาณสารไซยาไนด์เหลือในผลิตภัณฑ์สุดท้ายเท่ากับ 0.42 มิลลิกรัม ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานความปลอดภัยตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ แสดงให้เห็นว่าการบริโภคนมจากเมล็ดประ 200 มิลลิลิตร ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค อย่างไรก็ตามไม่ควรบริโภคเกิน 5-6 หน่วยบริโภคหรือรับประทานคู่กับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ จากเมล็ดประ การผลิตนมจากเมล็ดประใช้กระบวนฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยการให้ความร้อนในระดับพาสเจอไรซ์ ทำให้มีผลต่อการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคและจุลินทรีย์ที่มีความทนต่อความร้อนต่ำ และจากการเปรียบเทียบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในนมจากเมล็ดประที่ผ่านกระบวนการพาสเจอไรซ์กับเกณฑ์มาตรฐานด้านจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคประเภทผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 416) พ.ศ. 2563 และเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน “นมถั่วเหลือง” (มผช.529/2558) (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558) พบว่าผลิตภัณฑ์นมจากเมล็ดประมีปริมาณการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด แต่อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องดื่มที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 4.3 ด้วยกระบวนการพาสเจอไรซ์ไม่ใช่การฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดที่พบในอาหารได้ ดังนั้นจำเป็นต้องเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 4-10 องศาเซลเซียส เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้นานขึ้นและอายุการเก็บรักษาไม่เกิน 15 วัน

องค์ประกอบทางโภชนาการสำคัญที่พบในผลิตภัณฑ์นมจากเมล็ดประสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดประสด คือ มีไขมันเป็นองค์ประกอบหลัก ชนิดของกรดไขมันประกอบด้วย กรดลิโนเลอิกและกรดอัลฟาไลโนเลนิก ซึ่งเป็นกรดไขมันจำเป็นที่พบสูงกว่านมถั่วดาวอินคา (นุชเนตร และคณะ, 2561) และนมอัลมอนด์ มีบทบาทช่วยลดไขมัน LDL (low-density lipoprotein) และเพิ่มไขมัน HDL (High-density lipoprotein) และช่วยควบคุมระดับคอเลสเตอรอลในร่างกาย จึงช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจ โรคหลอดเลือดสมอง ลดความดันโลหิต และลดการเกิดการอักเสบในกลุ่มคนที่มีภาวะอ้วน (Jurado-Fasoli *et al*., 2023; Sarajlic *et al*., 2023)

สรุปผลการวิจัย

ผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากเมล็ดประที่ใช้อัตราส่วนเมล็ดประต่อน้ำ เท่ากับ 1:3 และเติมน้ำตาลทรายปริมาณร้อยละ 3 ได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสจากผู้ทดสอบชิมสูงสุด นมจากเมล็ดประจัดเป็นเครื่องดื่มที่มีความเป็นกรดต่ำและมีความหนืดต่ำ ผลิตภัณฑ์นมจากเมล็ดประที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70-75 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที มีปริมาณสารไซยาไนด์คงเหลือในระดับที่ปลอดภัย สามารถบริโภคได้ 5-6 หน่วยบริโภคต่อวัน มีปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กระทรวงสาธารณสุขและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนได้กำหนดไว้ โดยองค์ประกอบทางโภชนาการสำคัญที่พบในนมจากเมล็ดประ คือ กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนในกลุ่มกรดไขมันโอเมก้า 3 โอเมก้า 6 และโอเมก้า 9 แสดงให้เห็นว่านมจากเมล็ดประ ซึ่งเป็นพืชท้องถิ่นประจำจังหวัดนครศรีธรรมราช สามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์นมทางเลือกเพื่อสุขภาพจากพืชต่อไปในอนาคตได้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณการวิจัยจากหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนาระดับพื้นที่ (บพท.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563

เอกสารอ้างอิง

ณฐิฒา รอดขวัญ. (2565). ผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากพืช. *วารสารวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร*, 52(4), 5-13.

นุชเนตร ตาเย๊ะ ซูวีร่า สาแรหะ และอาดีบะห์ แวกาจิ. (2561). การพัฒนาผลิตภัณฑ์นมจากถั่วดาวอินคา. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มรย*, 3(1), 57-66.

ปริญญา หม่อมพิบูลย์ วันดี แก้วสุวรรณ อนุรักษ์ ตรีเพ็ชร และธราดล วัฒนนาวิน. (2561). แนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากเมล็ดประในเชิงพาณิชย์. *วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 37(พิเศษ), 114-128.

ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. (2564). *เครื่องดื่มนมจากพืช โอกาสที่เปิดกว้าง รับความต้องการที่หลากหลาย*. สืบค้นเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2566, จาก: https://www.kasikornresearch.com/th/analysis/k-social-media/Pages/Bean-FB-18-01-21.aspx.

สายฝน จิตนุพงศ์. (2559). การเปลี่ยนแปลงสิทธิในการเข้าถึงและใช้ประโยชน์ป่าประและความขัดแย้ง: กรณีศึกษาป่าประในเขตอุทยานแห่งชาติเขานัน อำเภอนบพิตำ จังหวัดนครศรีธรรมราช. *สารอาศรมวัฒนธรรมวลัยลักษณ์*, 16(1), 115-142.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2558). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน นมถั่วเหลือง (มผช. 529/2558)*. สืบค้นเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2566, จาก: https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0529_58(%e0%b8%99%e0%b9%89%e0%b8%b3%e0%b8%99%e0%b8%a1%e0%b8%96%e0%b8%b1%e0%b9%88%e0%b8%a7%e0%b9%80%e0%b8%ab%e0%b8%a5%e0%b8%b7%e0%b8%ad%e0%b8%87).pdf.

Anchan, C. (2010). Proximate composition and functional properties of pra (*Elateriospermun tapos Blume*) seed flour. *African Journal of Biotechnology*, 9(36), 5946-5949.

AOAC International and Latimer, G.W. (2012). *Official method of analysis: Association of analytical chemists*. (19th ed). Washington DC: Association of Official Analytical Chemists.

AOAC International and Latimer, G.W. (2019). *Official method of analysis: Association of analytical chemists*. (21st ed). Washington DC: Association of Official Analytical Chemists.

Bacteriological Analytical Manual Online (BAM). (2001). *Chapter 3: Aerobic plate count*. Retrieved 19 January 2021, from: https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bacteriological-analytical-manual-bam.

Bocker, R. and Silva, E.K. (2022). Innovative technologies for manufacturing plant-based non-dairy alternative milk and their impact on nutritional, sensory and safety aspects. *Future Foods*, 5, doi: https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100098.

Briviba, K., Gräf, V., Walz, E., Guamis, B. and Butz, P. (2016). Ultra high pressure homogenization of almond milk: Physico-chemical and physiological effects. *Food Chemistry*, 192, 82-89, doi: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.06.063.

Charoensuk, A., Jaroensutasinee, M., Srisang, W. and Jaroensutasinee, K. (2012). Parah forest clusters at Khao Nan National Park, Thailand. *Walailak Journal of Science and Technology*, 9(4), 475-480.

Dhakal, S., Giusti, M.M. and Balasubramaniam, V.M. (2016). Effect of high pressure processing on dispersive and aggregative properties of almond milk. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(11), 3821-3830, doi: https://doi.org/10.1002/jsfa.7576.

Husin, N., Tan, N.A.H., Muhamad, I.I. and Nawi, N.M. (2013). Physicochemical and biochemical characteristics of the underutilized *Elateriospermum Tapos*. *Jurnal Teknologi. (Sciences and Engineering)*, 64(2), 57-61, doi: https://doi.org/10.11113/jt.v64.2045.

International Standard (ISO/IEC 17025) (2017). *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. Geneva: International Organization for Standardization.

Jurado-Fasoli, L., Osuna-Prieto, F.J., Yang, W., Kohler, I., Di, X., Rensen, P.C.N., Castillo, M.J., Martinez-Tellez, B. and Amaro-Gahete, F.j. (2023). High omega-6/omega-3 fatty acid and oxylipin ratio in plasma is linked to an adverse cardiometabolic profile in middle-aged adults. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 117, doi: https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2023.109331.

Lawless, H. and Heymann, H. (2010) Sensory evaluation of food principles and practices. (2nd ed). New York: Springer New York.

Manzoor, M.F., Ahmad, N., Aadil, R.M., Rahaman, A., Ahmed, Z., Rehman, A., Siddeeg, A., Zeng, X.N. and Manzoor, A. (2019). Impact of pulsed electric field on rheological, structural, and physicochemical properties of almond milk. *Journal of Food Process Engineering*, 42(8), doi: https://doi.org/10.1111/jfpe.13299.

Ngamriabsakul, C. and Kommen, H. (2009). The preliminary detection of cyanogenic glycosides in Pra (*Elateriospermum tapos Blume*) by HPLC. *Walailak Journal of Science and Technology*, 6(1), 141-147.

O'Brien, G.M., Taylor, A.J. and Pouler, N.H. (1991). Improved enzymatic assay for cyanogen in fresh and processed cassava. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 56(3), 277-289, doi: https://doi.org/10.1002/jsfa.2740560304.

Sarajlic, P., Vigor, C., Avignon, A., Zhou, B., Oger, C., Galano, J.M., Durand, T., Sultan, A. and Bäck, M. (2023). Omega-3 to omega-6 fatty acid oxidation ratio as a novel inflammation resolution marker for metabolic complications in obesity. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 33(6), 1206-1213, doi: https://doi.org/10.1016/j.numecd.2023.03.007.

Simeonova, F.P., Fishbein, L. and World Health Organization. (2004). *Hydrogen cyanide and cyanides: Human health aspects*. Retrieved 19 January 2021, from: https://appswho.int/iris/handle/10665/42942.

Stone, H. and Sidel, J.L. (1993). *Sensory evaluation practices* (2nd ed.). San Diego: Academic Press.

Tisadondilok, S., Senawong, T., Swatsitang, P. and Rattanasing, A. (2018). Antioxidant and antiproliferative activities of ethanolic extracts of *Elateriospermum tapos Blume* (Euphorbiaceae). *Journal of Medicinal Plants Research*, 12(27), 474-482, doi: https://doi.org/10.5897/JMPR2018.6666.

การศึกษาอัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสานที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สำเร็จรูป และคุณสมบัติทางกายภาพบางประการของกระถางจากวัสดุทดแทน

The Study of the Appropriate Ratio between Substitute Materials and Adhesives for Molding with Pre-Made Molds, and Some Physical Properties of Pots Made from Substitute Materials

สถาพร เรืองรุ่ง[1*] นพรัตน์ เชื้อคำฮด[1] ชนากานต์ คูณแก้ว[1] ขวัญหทัย นาจารย์[1] และสุมาลิน ฝางคำ[1]

Sathaphorn Ruengrung[1*] Nopparat Chuakhamhod[1] Chanakarn Koonkaew[1]
Kwanhathai Nachan[1] and Sumalin Fangkham[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสานที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สำเร็จรูป ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพบางประการของกระถางจากวัสดุทดแทน และศึกษาความพึงพอใจต่อกระถางจากวัสดุทดแทน มีขั้นตอนการศึกษา 6 ขั้นตอน ตามขั้นตอนโครงงานสะเต็มศึกษา โดยศึกษาอัตราส่วนจำนวน 5 ชุดการทดลองระหว่างวัสดุทดแทน คือ กระดูกไก่ เปลือกไข่ไก่ และวัสดุประสาน คือ กาวซีเมนต์ ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ ได้แก่ ความแข็งแรง การดูดซับน้ำ การพองตัว และการดูดซับความร้อน และใช้แบบสอบถามในการศึกษาความพึงพอใจต่อกระถางจากวัสดุทดแทน ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสานที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สำเร็จรูปสามารถขึ้นรูปได้ทั้ง 5 ชุดการทดลอง เมื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพบางประการของกระถางจากวัสดุทดแทน โดยทดสอบความแข็งแรง พบว่าชุดการทดลองที่ 1 3 4 และ 5 ปกติดี ส่วนชุดทดลองที่ 2 มีรอยร้าว 3 จุด การทดสอบการดูดซับน้ำ พบว่าชุดการทดลองที่ 2 มีค่าการดูดซับน้ำดีที่สุดเท่ากับ 27.14 เปอร์เซ็นต์ การทดสอบการพองตัว พบว่าชุดการทดลองที่ 1 2 3 และ 5 มีค่าการพองตัวดีที่สุดเท่ากับ 6.25 เปอร์เซ็นต์ และการดูดซับความร้อน พบว่าชุดการทดลองที่ 3 มีการดูดซับความร้อนน้อยที่สุดเท่ากับ 21.29 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นชุดการทดลองที่ 3 จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นกระถางต้นไม้จากวัสดุทดแทนมากที่สุด เนื่องจากมีความแข็งแรง มีการพองตัวดีที่สุด และมีการดูดซับความร้อนน้อยที่สุด เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช และเป็นสินค้าของที่ระลึกดังผลการศึกษาความพึงพอใจต่อกระถางจากวัสดุทดแทนที่มีภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด

[1] กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โรงเรียนบ้านกุ่ม สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษาประถมศึกษาอุบลราชธานี เขต 3

[*] Corresponding author e-mail: win.physics.1996@gmail.com

Received: 4 February 2023, Revised: 21 March 2023, Accepted: 21 April 2023

คำสำคัญ: กระถางจากวัสดุทดแทน กระดูกไก่ เปลือกไข่ไก่ สีธรรมชาติ สินค้าของที่ระลึก

Abstract

The purpose of this research is to study the appropriate proportion of substitute materials and adhesives for molding with pre-made molds, some physical properties of pots made from substitute materials, and user satisfaction with pots made from substitute materials. The study was conducted in 6 stages, following the steps of STEM education project approaches. The study examined 5 sets of experimental samples made from substitute materials, including chicken bones, chicken eggshells, and the adhesive which is cement glue. The physical properties studied included strength, water absorption, swelling, and heat absorption. The study also used a questionnaire to assess user satisfaction with pots made from substitute materials. The results showed that there is an appropriate ratio between substitute materials and cement glue for molding with pre-made molds, allowing the production of pots in all 5 experimental sets. The physical properties of pots made from substitute materials varied across experimental sets, with strength being normal in sets 1, 3, 4, and 5, but set 2 had 3 cracks; the best water absorption was found in set 2 at 27.14%, the best swelling was found in sets 1, 2, 3, and 5 at 6.25%, and the least heat absorption was found in set 3 at 21.29%. Therefore, experimental set 3 was found to be the most suitable for use as a plant pot due to its strength, low heat absorption, and good swelling properties. It is suitable for the growth of plants and could be marketed as a souvenir product due to the high user satisfaction rating towards pots made from substitute materials with excellent overall quality.

Keywords: Plant pot by substitute materials, Chicken bones, Chicken eggshells, Dye natural, Souvenirs supporting tourism

บทนำ

ผลกระทบของเศรษฐกิจไทยในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นการฟื้นตัวของอุปสงค์ภายในประเทศจากสถานการณ์ covid-19 ความยืดเยื้อของสถานการณ์ความขัดแย้งระหว่างรัสเซียและยูเครน ที่ส่งผลกระทบต่อราคาพลังงาน และสินค้าโภคภัณฑ์ ซึ่งส่งผ่านไปยังต้นทุนของภาคครัวเรือนและภาคธุรกิจ (สำนักนโยบายเศรษฐกิจมหภาค, 2565) ทำให้ราคาสินค้า พืชผัก มีราคาสูงขึ้น ดังนั้นปัจจุบันจึงมีการพัฒนาเศรษฐกิจแบบองค์รวม BCG model ที่จะพัฒนาเศรษฐกิจ 3 มิติ ไปพร้อมกัน ได้แก่ เศรษฐกิจชีวภาพ (bioeconomy) ที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรชีวภาพเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม โดยเน้นการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง เชื่อมโยงกับเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) คำนึงถึง

การนำวัสดุต่าง ๆ กลับมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด และทั้ง 2 เศรษฐกิจนี้อยู่ภายใต้เศรษฐกิจสีเขียว (green economy) ซึ่งเป็นการพัฒนาเศรษฐกิจที่ไม่ได้มุ่งเน้นเพียงการพัฒนาเศรษฐกิจเท่านั้น แต่ต้องพัฒนาควบคู่ไปกับการพัฒนาสังคมและการรักษาสิ่งแวดล้อมได้อย่างสมดุลให้เกิดความมั่นคงและยั่งยืนไปพร้อมกัน (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), 2564) และปัญหาขยะในโรงเรียน คือ ปัญหาสำคัญในปัจจุบันจึงมีการส่งเสริม สนับสนุนการสร้างเครือข่ายสถานศึกษาที่ดำเนินกิจกรรม ลด คัดแยก และนำขยะกลับมาใช้ประโยชน์ การรวบรวมขยะเพื่อส่งไปกำจัดอย่างถูกต้อง ปลูกฝังจิตสำนึก การลด คัดแยกขยะ และนำขยะกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ในสถานศึกษา สร้างระบบการเรียนรู้ผ่านกิจกรรมต่าง ๆ และส่งเสริมการมีส่วนร่วมของผู้เรียนในการจัดการขยะภายในสถานศึกษา เพื่อมุ่งสู่สถานศึกษาปลอดขยะอย่างแท้จริงผ่านโครงการ zero waste school (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2562)

กระดูกสัตว์ประกอบด้วยสารประกอบที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยสารอนินทรีย์จะพบร้อยละ 65 ของน้ำหนักรวมกระดูก ส่วนสารอินทรีย์พบร้อยละ 20 ของน้ำหนักรวมกระดูก และพบน้ำร้อยละ 10 ซึ่งส่วนของเนื้อพื้นกระดูกที่เป็นสารอินทรีย์ ประกอบด้วยเส้นใยคอลลาเจน ทำให้กระดูกมีความแข็งแรงทนต่อแรงดึงได้ดี ขณะที่เนื้อพื้นของกระดูกที่เป็นสารอนินทรีย์ทำให้กระดูกทนต่อแรงกดอัด (รุ่งโรจน์, 2563) กระดูกสัตว์เผาเป็นเถ้าถ่านก็สามารถเป็นแหล่งฟอสฟอรัสให้กับพืชได้ โดยมีฟอสฟอรัสทั้งหมดร้อยละ 15-23 (ทัศนีย์ และคณะ, 2556) และซากสัตว์ ผลพลอยได้จากโรงฆ่าสัตว์ ซากสัตว์เป็นปุ๋ยให้แก่พืชได้ ส่วนใหญ่จุลธาตุอาหารที่ได้จากซากสัตว์จะอยู่ในรูปที่ง่ายต่อการที่พืชนำไปใช้ ในกระดูกสัตว์มีแคลเซียมและฟอสฟอรัสอยู่สูงเป็นพิเศษจึงทำให้กระดูกป่นเป็นที่นิยมในการนำไปผสมกับเครื่องปลูกพืช (สำนักงานคณะกรรมพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (กปร.), 2564) และเปลือกไข่ไก่มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ผลึกแคลไซท์ (calcite) ของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และสารอินทรีย์ในปริมาณเล็กน้อย และมีการใช้ผงเปลือกไข่ไก่เป็นสารเติมแต่งอาหาร และใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุฉาบผนังอาคาร เปลือกไข่ไก่ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก กระดาษ สี และวัสดุก่อสร้าง เช่น กระเบื้องคอนกรีต เป็นต้น (วิมลลักษณ์ และคณะ, 2554) นอกจากเปลือกไข่ไก่จะมีส่วนประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลักแล้วยังมีสารอินทรีย์ เช่น แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส และมีสารอนินทรีย์ เปลือกไข่ไก่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เช่น ปุ๋ย อาหารสัตว์ สารเคลือบ ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวดูดซับสารต่าง ๆ และวัสดุคอมโพสิต เป็นต้น (วรัญญา, 2563) ส่วนสีธรรมชาติที่ได้จากพืชเป็นสารเคมีที่มีคุณสมบัติเป็นสีย้อมธรรมชาติ สกัดจากพืชโดยกรรมวิธีการหมัก การต้ม หรือกรรมวิธีทางเคมีในปริมาณเล็กน้อย สีย้อมเป็นสารเคมีที่มีสมบัติดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่มองเห็นได้ คือ อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400-750 นาโนเมตร สีที่ปรากฏจะเป็นสีเติมเต็มของสีที่ถูกดูดกลืน สีย้อมธรรมชาติได้จากส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น สีจากเปลือกประดู่ (*Pterocarpus macrocarpus* Kurz.) มีสีแดงส้ม มีค่าการดูดกลืนแสงที่ 465.90 นาโนเมตร คือ ดูดกลืนแสงสีน้ำเงิน น้ำย้อมจึงมีสีแดงส้มหรือสีแดงอิฐ (พรเพ็ญ และคณะ, 2551) สีจากเปลือกต้นตะคร้อ (*Schleichera oleosa* (Lour.)) สามารถนำมาใช้ในการย้อมสี โดยสีที่ได้คือสีชมพูอมม่วง (ศูนย์ข้อมูลกลางทางวัฒนธรรม, 2555) และสีจากเปลือกมะม่วง (*Mangifera Indica* Linn.) น้ำย้อมสีจากเปลือกมะม่วงดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 469 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงคลื่นสีน้ำเงิน น้ำย้อมจึงมีสีเหลือง (ระมัด, 2556) คุณสมบัติเฉพาะของ

สีย้อม เช่น ความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมการตกสีหรือสีซีดจาง การเกาะติดบนเส้นใยชนิดต่าง ๆ และปฏิกิริยาต่อสารเคมีอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับกลุ่มของอะตอมที่มาเกาะอยู่กับโครงสร้างหลักของโมเลกุล (วิจิตร และพิมพ์ลภา, 2556)

ชุมชนบ้านกุ่มอยู่ในบริเวณที่ราบริมแม่น้ำโขงทางตอนใต้ของอุทยานแห่งชาติผาแต้ม ตำบลห้วยไผ่ อำเภอโขงเจียม จังหวัดอุบลราชธานี และบริเวณทางทิศเหนือของหมู่บ้าน มีลักษณะเป็นหน้าผาสูงชันที่มีความสวยงามตามธรรมชาติ และมีภาพเขียนสีก่อนประวัติศาสตร์เรียงรายอยู่ประมาณ 300 ภาพ เป็นสถานที่ท่องเที่ยวที่สำคัญของจังหวัดอุบลราชธานี มีนักท่องเที่ยวจำนวนมากที่เดินทางมาเที่ยวชมตลอดทั้งปี ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงนำแนวคิดที่ได้จาก BCG model โครงการ zero waste school และบริบทที่อยู่ท่ามกลางธรรมชาติและแหล่งท่องเที่ยวมาใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ “กระถางจากวัสดุทดแทนกระดูกไก่ เปลือกไข่ไก่ ย้อมสีธรรมชาติ” โดยนำขยะที่เกิดจากการประกอบอาหารกลางวันในโรงเรียน คือ เปลือกไข่ไก่และกระดูกไก่ มาขึ้นรูปเป็นกระถางแล้วย้อมสีธรรมชาติจากเปลือกไม้ตกแต่งด้วยลวดลายที่คล้ายคลึงกับภาพเขียนสีโบราณผาแต้ม และศึกษาอัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสานที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สำเร็จรูป ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพบางประการของกระถางจากวัสดุทดแทน ตลอดจนศึกษาความพึงพอใจต่อกระถางจากวัสดุทดแทนเพื่อพัฒนาเป็นสินค้าของที่ระลึกสนับสนุนการท่องเที่ยว และเป็นแนวทางในการสร้างรายได้เสริมให้คนในท้องถิ่น

วิธีดำเนินการวิจัย

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนโครงงานสะเต็มศึกษา 6 ขั้นตอน (ศูนย์สะเต็มศึกษาแห่งชาติ, 2558; โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ (องค์การมหาชน), 2559; เครือศรี, 2562) ดังนี้

1. ระบุปัญหาประเด็นที่เด่นชัด

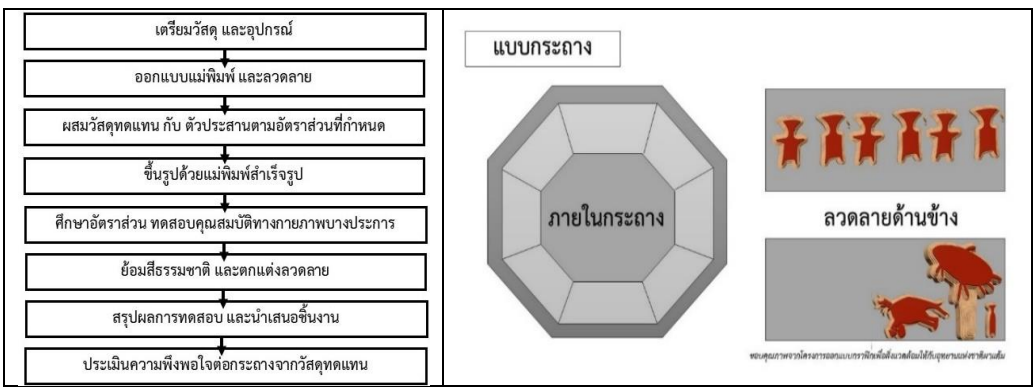
คณะผู้วิจัยได้ลงพื้นศึกษาปัญหาในโรงเรียนบ้านกุ่ม ตำบลห้วยไผ่ อำเภอโขงเจียม จังหวัดอุบลราชธานี และได้พบว่าปัญหาขยะที่เกิดขึ้นจากการประกอบอาหารกลางวันในโรงเรียนในแต่ละวันที่มีปริมาณมาก โดยเฉพาะกระดูกไก่ และเปลือกไข่ไก่ที่มีจำนวนมาก ส่วนในชุมชนก็มีความต้องการที่จะมีสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ และน่าสนใจมาวางจำหน่ายให้นักท่องเที่ยว นอกเหนือจากผลผลิตทางเกษตร คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะสร้างสิ่งประดิษฐ์ “กระถางจากวัสดุทดแทนกระดูกไก่ และเปลือกไข่ไก่ ย้อมสีธรรมชาติ”

2. ขั้นรวบรวมแนวคิดที่เกี่ยวข้อง

คณะผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์ของกระดูไก่ เปลือกไข่ไก่ กาวซีเมนต์ และสีย้อมธรรมชาติ และรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการเตรียมวัสดุทดแทน และการเตรียมสีธรรมชาติ โดยกำหนดและใช้วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ ได้แก่ 1) วัสดุที่ใช้และตัวประสาน คือ เปลือกไข่ไก่ กระดูกไก่ และปูนกาวซีเมนต์ 2) วัสดุให้สีธรรมชาติ คือ เปลือกต้นประดู่ ต้นตะคร้อ และต้นมะม่วงป่า 3) อุปกรณ์ ได้แก่ ที่ตัก ถัง หม้อ ที่บดวัสดุทดแทน กะละมัง และถาด และ 4) เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ ได้แก่ ไม้บรรทัด ตลับเมตร เวอร์เนียคาลิปเปอร์ เครื่องชั่งอย่างละเอียด และเครื่องวัดอุณหภูมิ-ความชื้นแบบดิจิตอล

3. ออกแบบวิธีแก้ไขปัญหาหรือพัฒนา

คณะผู้วิจัยได้ออกแบบขั้นตอน และได้ออกแบบแม่พิมพ์และลวดลาย ดังภาพที่ 1 และกำหนดชุดการทดลองเป็น 5 ชุดการทดลอง ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการแก้ไขหรือพัฒนา และแบบกระถางและลวดลาย

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของวัสดุทดแทนและตัวประสาน

ชุดการทดลองที่	อัตราส่วนของวัสดุทดแทนและตัวประสาน		
	กระดูกไก่	เปลือกไข่ไก่	ตัวประสาน
1	1.00	0.00	1.00
2	0.75	0.25	1.00
3	0.50	0.50	1.00
4	0.25	0.75	1.00
5	0.00	1.00	1.00
ชุดควบคุม	0.00	0.00	1.00

4. ดำเนินการแก้ไขปัญหาหรือพัฒนา

ได้ดำเนินการทำกระถางจากวัสดุทดแทน ดังนี้

4.1 ตวงวัสดุทดแทนและตัวประสานตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ในตารางที่ 1 แล้วนำมาผสมกันในถัง เติมน้ำ 1 ส่วน คนให้เข้ากัน และตักใส่แม่พิมพ์ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 1 วัน

4.2 ย้อมสีธรรมชาติและวาดภาพระบายสีตกแต่งลวดลายที่คล้ายคลึงกับภาพเขียนสีโบราณผาแต้ม

5. ทดสอบประเมินผลและปรับปรุง

5.1 ทดสอบความแข็งแรง

โดยนำกระถางจากวัสดุทดแทนไปทดสอบการกดทับด้วยอิฐบล็อก จำนวน 5 ก้อน (30 กิโลกรัม) บันทึกผลที่เกิดขึ้น (กัญจนาภรณ์ และอุบลวรรณ, 2564)

5.2 ทดสอบการดูดซับน้ำ

5.2.1 ชั่งมวลตัวอย่างกระถางจากวัสดุทดแทนก่อนแช่น้ำ บันทึกค่าที่อ่านได้จากเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

5.2.2 นำไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง นำมาชั่งมวลจนกระทั่งมวลคงที่ คำนวณมวลที่เพิ่มขึ้น แล้วคำนวณค่าการดูดซับน้ำของกระถางจากวัสดุทดแทน ดังสมการ (1) (วรรณวิภา และคณะ, 2561; จุฑามาศ, 2564)

$$\text{การดูดซับน้ำ (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{\text{มวลของตัวอย่างกระถางก่อนแช่น้ำ - หลังแช่น้ำ}}{\text{มวลของตัวอย่างกระถางก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \qquad (1)$$

5.3 ทดสอบการพองตัว

5.3.1 วัดความหนาของตัวอย่างกระถางจากวัสดุทดแทนก่อนแช่น้ำ บันทึกค่าที่อ่านได้จากเวอร์เนียคาลิปเปอร์

5.3.2 นำไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำตัวอย่างกระถางขึ้นจากน้ำ และนำไปวัดความหนาตามตำแหน่งเดิมเป็นความหนาหลังแช่น้ำ แล้วคำนวณค่าการพองตัว ดังสมการ (2) (วรรณวิภา และคณะ, 2561; จุฑามาศ, 2564)

$$\text{การพองตัว (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{\text{ความหนาของตัวอย่างกระถางก่อน - หลังแช่น้ำ}}{\text{ความหนาของตัวอย่างกระถางก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \qquad (2)$$

5.4 ทดสอบการดูดซับความร้อน

5.4.1 วัดอุณหภูมิของตัวอย่างกระถางจากวัสดุทดแทนก่อนนำไปตากแดด บันทึกค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิ-ความชื้นแบบดิจิตอล

5.4.2 นำไปตั้งไว้กลางแดดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิขณะหนึ่ง พร้อมบันทึกอุณหภูมิ แล้วจึงนำตัวอย่างกระถางเข้ามาที่อุณหภูมิห้องปกติ ตรวจวัดอุณหภูมิกระถางหลังตาก แล้วคำนวณการดูดซับความร้อนดังสมการ (3) (วรรณวิภา และคณะ, 2561)

$$\text{การดูดซับความร้อน (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{\text{อุณหภูมิของตัวอย่างกระถางก่อน - หลังตาก}}{\text{อุณหภูมิของตัวอย่างกระถางก่อนตาก}} \times 100 \qquad (3)$$

6. นำเสนอชิ้นงาน

6.1 คณะผู้วิจัยนำเสนอชิ้นงานในรูปแบบโครงงานวิทยาศาสตร์ รูปเล่มฉบับสมบูรณ์และแผ่นพับ ดังภาพที่ 2

ภาพที่ 2 การนำเสนอชิ้นงาน

6.2 หลังจากคณะผู้วิจัยนำเสนอชิ้นงานเสร็จได้แจกแบบสอบถามความพึงพอใจให้กับกลุ่มลูกค้า ได้แก่ นักท่องเที่ยว คนในชุมชน ครู และนักเรียน ประเมินความพึงพอใจต่อกระถางจากวัสดุทดแทน

6.3 ทำการวิเคราะห์หาชุดทดลองที่มีความเหมาะสมมากที่สุด โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ ได้แก่ ความแข็งแรง การดูดซับน้ำ การพองตัว และการดูดซับความร้อน และผลจากการศึกษาความพึงพอใจต่อกระถางจากวัสดุทดแทน

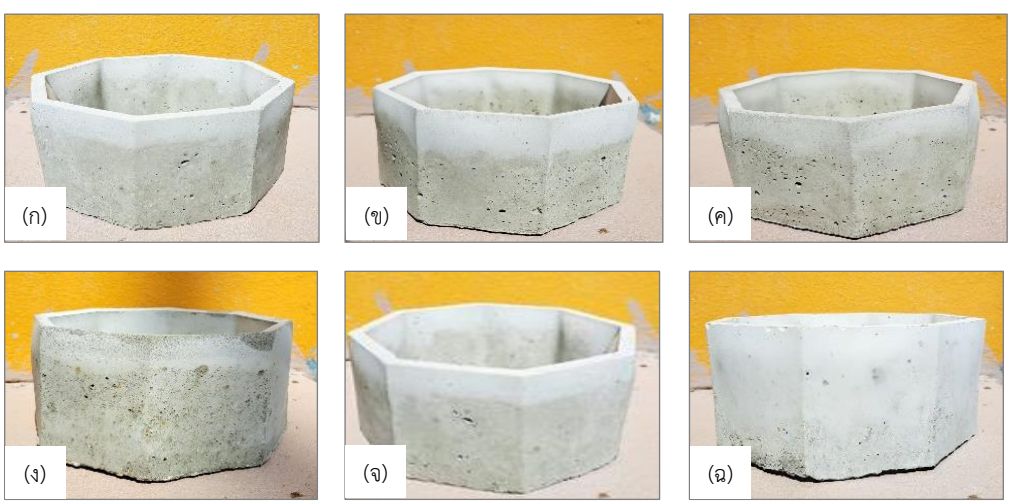
ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสานที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สำเร็จรูป

ผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสานที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สำเร็จรูปจากอัตราส่วนจำนวน 5 ชุดการทดลอง ดังตารางที่ 1 ระหว่างวัสดุทดแทน คือ กระดูกไก่ ที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมฟอสเฟตชนิดผลึก และเปลือกไข่ไก่ ที่มีองค์ประกอบของผลึกแคลไซท์ของแคลเซียมคาร์บอเนต สามารถขึ้นรูปได้ทั้ง 5 ชุดการทดลอง ดังตารางที่ 2 และได้ลักษณะกระถางที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สำเร็จรูปตามอัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสานที่แตกต่างกัน (ภาพที่ 3 ก-จ) แปรผลตามวัสดุทดแทนที่ผสมลงไปซึ่งแตกต่างจากชุดควบคุม (ภาพที่ 3 ฉ) ที่มีลักษณะเป็นสีขาว ๆ

ตารางที่ 2 ผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสานที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สำเร็จรูป

ชุดการทดลองที่	อัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสาน			ผลการขึ้นรูป	
	กระดูกไก่	เปลือกไข่ไก่	ตัวประสาน	มวลของกระถาง (กรัม)	ลักษณะที่เกิดขึ้น
1	1.00	0.00	1.00	750.00	ขึ้นรูปได้
2	0.75	0.25	1.00	700.00	ขึ้นรูปได้
3	0.50	0.50	1.00	750.50	ขึ้นรูปได้
4	0.25	0.75	1.00	900.00	ขึ้นรูปได้
5	0.00	1.00	1.00	855.00	ขึ้นรูปได้
ชุดควบคุม	0.00	0.00	1.00	800.00	ขึ้นรูปได้

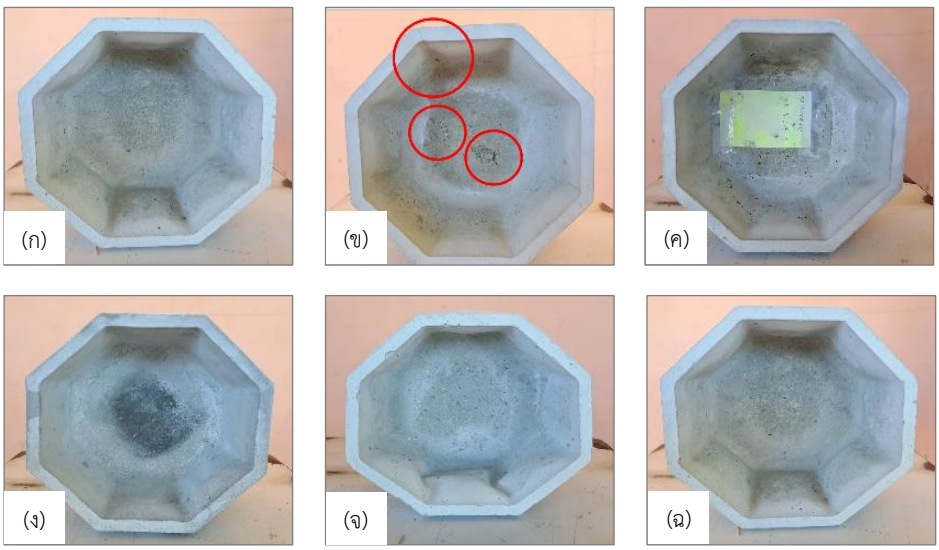


ภาพที่ 3 กระถางที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สำเร็จรูปตามอัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสาน ประกอบด้วย ชุดการทดลองที่ 1 (ก) ชุดการทดลองที่ 2 (ข) ชุดการทดลองที่ 3 (ค) ชุดการทดลองที่ 4 (ง) ชุดการทดลองที่ 5 (จ) และชุดควบคุม (ฉ)

2. ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพบางประการของกระถางจากวัสดุทดแทน

2.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงของกระถางจากวัสดุทดแทน

การทดสอบความแข็งแรงของกระถางจากวัสดุทดแทน โดยนำอิฐบล็อก จำนวน 5 ก้อน ก้อนละ 6 กิโลกรัม (มวลรวมทั้งหมด 30 กิโลกรัม) มาวางบนกระถางทีละก้อน พบว่าชุดการทดลองที่ 2 มีรอยร้าว 3 จุด (ภาพที่ 4 ข) ส่วนชุดทดลองอื่น ๆ ปกติดี (ภาพที่ 4 ก ค ง จ ฉ) ทั้งนี้เนื่องจากชุดการทดลองที่ 2 มีปริมาณของกระดูกไก่เยอะที่สุด ดังอัตราส่วนของกระดูกไก่ เปลือกไข่ไก่และตัวประสาน เท่ากับ 0.75 : 0.25 : 1.00 (ตารางที่ 3) ทำให้มีช่องว่างของเนื้อกระถางมากกว่าชุดทดลองอื่น ๆ



ภาพที่ 4 กระถางที่ผ่านการทดสอบความแข็งแรง จากชุดการทดลองที่ 1 (ก) ชุดการทดลองที่ 2 (ข) ชุดการทดลองที่ 3 (ค) ชุดการทดลองที่ 4 (ง) ชุดการทดลองที่ 5 (จ) และชุดควบคุม (ฉ)

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความแข็งแรงของกระถางจากวัสดุทดแทน

ชุดการทดลองที่	อัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสาน			ผลที่เกิดขึ้น
	กระดูกไก่	เปลือกไข่ไก่	ตัวประสาน	
1	1.00	0.00	1.00	ปกติดี
2	0.75	0.25	1.00	มีรอยร้าว 3 จุด
3	0.50	0.50	1.00	ปกติดี
4	0.25	0.75	1.00	ปกติดี
5	0.00	1.00	1.00	ปกติดี
ชุดควบคุม	0.00	0.00	1.00	ปกติดี

2.2 ผลการทดสอบการดูดซับน้ำของกระถางจากวัสดุทดแทน

ผลการทดสอบการดูดซับน้ำของกระถางจากวัสดุทดแทน พบว่าค่าการดูดซับน้ำของกระถางจากวัสดุทดแทนอยู่ในช่วง 11.11-27.14 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4 โดยชุดการทดลองที่ 2 มีค่าการดูดซับน้ำดีที่สุดเท่ากับ 27.14 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ ชุดการทดลองที่ 1 3 5 และ 4 มีค่า 25.33 23.25 16.96 และ 11.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งชุดการทดลองที่ 2 มีอัตราส่วนของกระดูกไก่ : เปลือกไข่ไก่ : ตัวประสาน เท่ากับ 0.75 : 0.25 : 1.00 ซึ่งมีค่าการดูดซับน้ำของกระถางจากวัสดุทดแทนที่สูงกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ เนื่องจากมีช่องว่างของเนื้อกระถางมากกว่าชุดทดลองอื่น ๆ และสูงกว่าชุดควบคุม (ตัวประสานอย่างเดียว)

ตารางที่ 4 การดูดซับน้ำของกระถางจากวัสดุทดแทน

ชุดการทดลองที่	อัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสาน			มวลก่อนแช่น้ำ (กรัม)	มวลหลังแช่น้ำ (กรัม)	การดูดซับน้ำ (เปอร์เซ็นต์)
	กระดูกไก่	เปลือกไข่ไก่	ตัวประสาน			
1	1.00	0.00	1.00	750.00	940.00	25.33
2	0.75	0.25	1.00	700.00	890.00	27.14
3	0.50	0.50	1.00	750.50	925.00	23.25
4	0.25	0.75	1.00	900.00	1000.00	11.11
5	0.00	1.00	1.00	855.00	1000.00	16.96
ชุดควบคุม	0.00	0.00	1.00	800.00	950.00	18.75

2.3 ผลการทดสอบการพองตัวของกระถางจากวัสดุทดแทน

ผลการทดสอบการพองตัวของกระถางจากวัสดุทดแทน พบว่าค่าการพองตัวของกระถางจากวัสดุทดแทนอยู่ในช่วง 5.88-6.25 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 5 และพบว่าชุดการทดลองที่ 4 มีอัตราส่วนของกระดูกไก่ : เปลือกไข่ไก่ : ตัวประสาน เท่ากับ 0.25 : 0.75 : 1.00 มีค่าการพองตัวต่ำกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ แต่สูงกว่าชุดควบคุม (ตัวประสานอย่างเดียว) และการพองตัวของกระถางที่มีค่าอยู่ในช่วง 5.88-6.25 เปอร์เซ็นต์ อาจเกิดจากวัสดุทดแทน คือ กระดูกไก่และเปลือกไข่ไก่ที่มีองค์ประกอบที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างหรืองานคอนกรีตได้ เมื่อบดเป็นผงทำให้มีการพองตัวไม่มากนัก

ตารางที่ 5 การพองตัวของกระถางจากวัสดุทดแทน

ชุดการทดลองที่	อัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสาน			ความหนาก่อนแช่น้ำ (เซนติเมตร)	ความหนาหลังแช่น้ำ (เซนติเมตร)	การพองตัว (เปอร์เซ็นต์)
	กระดูกไก่	เปลือกไข่ไก่	ตัวประสาน			
1	1.00	0.00	1.00	0.80	0.85	6.25
2	0.75	0.25	1.00	0.80	0.85	6.25
3	0.50	0.50	1.00	0.80	0.85	6.25
4	0.25	0.75	1.00	0.85	0.90	5.88
5	0.00	1.00	1.00	0.80	0.85	6.25
ชุดควบคุม	0.00	0.00	1.00	0.75	0.79	5.33

2.4 ผลการทดสอบการดูดซับความร้อนของกระถางจากวัสดุทดแทน

ผลการทดสอบการดูดซับความร้อนของกระถางจากวัสดุทดแทน พบว่าค่าการดูดซับความร้อนของกระถางจากวัสดุทดแทนอยู่ในช่วง 21.29-25.60 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 6 โดยชุดการทดลองที่ 3 อัตราส่วนของกระดูกไก่ : เปลือกไข่ไก่ : ตัวประสาน เท่ากับ 0.50 : 0.50 : 1.00 มีค่าการดูดซับความร้อนน้อยที่สุด และชุดการทดลองที่ 5 อัตราส่วนของกระดูกไก่ : เปลือกไข่ไก่ : ตัวประสาน เท่ากับ 0.00 : 1.00 : 1.00 มีค่าการดูดซับความร้อนของกระถางจากวัสดุทดแทนที่สูงกว่า

อัตราส่วนอื่น ๆ แต่ยังต่ำกว่าชุดควบคุม (ตัวประสานอย่างเดียว) ซึ่งการดูดซับความร้อนของกระถางมากหรือน้อยอาจเกิดจากสีของผิวกระถาง

ตารางที่ 6 การดูดซับความร้อนของกระถางจากวัสดุทดแทน

ชุดการทดลองที่	อัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสาน			อุณหภูมิก่อนตากแดด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิหลังตากแดด (องศาเซลเซียส)	การดูดซับความร้อน (เปอร์เซ็นต์)
	กระดูกไก่	เปลือกไข่ไก่	ตัวประสาน			
1	1.00	0.00	1.00	25.00	30.90	23.60
2	0.75	0.25	1.00	25.50	31.20	22.35
3	0.50	0.50	1.00	26.30	31.90	21.29
4	0.25	0.75	1.00	25.50	31.70	24.31
5	0.00	1.00	1.00	25.00	31.40	25.60
ชุดควบคุม	0.00	0.00	1.00	25.70	32.60	26.85

3. ผลการศึกษาความพึงพอใจต่อกระถางจากวัสดุทดแทน

ผลการประเมินความพึงพอใจของกลุ่มลูกค้า ได้แก่ นักท่องเที่ยว คนในชุมชน ครู และนักเรียน ต่อกระถางจากวัสดุทดแทนย้อมสีธรรมชาติ พบว่าความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด (mean±SD = 4.27±0.49) โดยรายการประเมินที่ 10 สามารถเป็นสินค้าที่ระลึกได้ มีค่าเฉลี่ยสูงสุด (mean±SD = 4.80±0.41) และรายการประเมินที่ 9 สามารถทำเองได้ง่าย มีค่าเฉลี่ยต่ำสุด (mean±SD = 3.65±0.49)

ตารางที่ 7 ความพึงพอใจต่อกระถางจากวัสดุทดแทน

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับความพึงพอใจ
1. ใช้วัสดุอย่างคุ้มค่า	4.10	0.55	มาก
2. ใช้ต้นทุนน้อย	4.30	0.47	มากที่สุด
3. ใช้งานสะดวก	4.35	0.49	มากที่สุด
4. สวยงามและดูดี	4.55	0.51	มากที่สุด
5. แข็งแรงและทนทาน	4.30	0.47	มากที่สุด
6. สามารถสร้างรายได้เพิ่ม	4.40	0.50	มากที่สุด
7. ลดการใช้พลาสติก	4.20	0.41	มาก
8. มีขนาดที่เหมาะสม	4.05	0.60	มาก
9. สามารถทำเองได้ง่าย	3.65	0.49	มาก
10. สามารถเป็นสินค้าที่ระลึกได้	4.80	0.41	มากที่สุด
รวม	**4.27**	**0.49**	**มากที่สุด**

การอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสานที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สำเร็จรูป พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ทั้ง 5 ชุดการทดลอง เนื่องจากวัสดุทดแทนเปลือกไข่ไก่ที่มีองค์ประกอบของผลึกแคลไซท์ของแคลเซียมคาร์บอเนต (พิไลพร และคณะ, 2565) และกระดูกไก่ที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมฟอสเฟตชนิดผลึก (รุ่งโรจน์, 2563) สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง หรืองานคอนกรีต เมื่อบดเป็นผง สามารถใช้ทดแทนหิน ทราย และลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ได้ จึงทำให้สามารถขึ้นรูปได้ทั้งหมด ในส่วนผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ โดยการทดสอบความแข็งแรง การดูดซับน้ำ การพองตัว และการดูดซับความร้อน มีข้อสังเกตจากผลการศึกษา ดังนี้ ด้านความแข็งแรง พบว่าเมื่อนำกระถางจากวัสดุทดแทนไปทดสอบการกดทับด้วยอิฐบล็อก จำนวน 5 ก้อน (30 กิโลกรัม) พบว่าชุดการทดลองที่ 1 3 4 และ 5 ปกติดี ส่วนชุดทดลองที่ 2 มีรอยร้าว 3 จุด แสดงให้เห็นว่าชุดการทดลองที่ 1 3 4 และ 5 มีความแข็งแรงสามารถนำมาใช้งานได้ ด้านการดูดซับน้ำ พบว่าชุดการทดลองที่ 2 มีค่าการดูดซับน้ำดีที่สุดเท่ากับ 27.14 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ ชุดการทดลองที่ 1 3 5 และ 4 ตามลำดับ มีค่าการดูดซับน้ำเท่ากับ 25.33 23.25 16.96 และ 11.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลข้างต้นคณะผู้วิจัยมีข้อสังเกตว่าการดูดซับน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของกระดูกไก่เพิ่มขึ้น เห็นได้จากอัตราส่วนของวัสดุทดแทนของชุดการทดลองที่ 1 2 และ 3 สอดคล้องกับการศึกษาของจุฑามาศ (2564) ที่พบว่าหากผสมวัสดุทดแทนกากตะกอนยางพาราเพียงอย่างเดียว ทำให้ลักษณะโครงสร้างของกระถางมีผิวที่ขรุขระ เกิดรอยแตก ทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้น้อยลง ดังนั้นควรมีวัสดุทดแทนอย่างอื่นมาผสมเพื่อทำให้กระถางมีค่าการดูดซับน้ำดีขึ้น เพราะการกักเก็บน้ำของกระถางทำให้ประหยัดน้ำในการรดต้นไม้ ซึ่งคือข้อดีของการดูดซับน้ำ แต่จะส่งผลต่ออายุการใช้งานของกระถางลดลง เนื่องจากการกักเก็บน้ำในปริมาณมาก จะทำให้ความแข็งแรงของกระถางน้อยลง (ปัญญา และพิทยา, 2553) ด้านการพองตัว พบว่าชุดการทดลองที่ 1 2 3 และ 5 มีค่าการพองตัวดีที่สุดเท่ากับ 6.25 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่ 4 มีค่าการพองตัวเท่ากับ 5.88 เปอร์เซ็นต์ จากผลข้างต้นคณะผู้วิจัยมีข้อสังเกตว่าการพองตัวของกระถางจากวัสดุทดแทนไม่แตกต่างกันมากและมีเปอร์เซ็นต์การพองตัวต่ำ เนื่องจากวัสดุทดแทนที่นำมาใช้มีความละเอียด เป็นผง และแนบชิดกัน เป็นเนื้อเดียวกันเมื่อผสมกับตัวประสาน ซึ่งการพองตัวเกิดจากการที่มีช่องว่างของเนื้อกระถางทำให้น้ำสามารถเข้าไปแทรกอยู่ในตัวกระถางได้ จนเกิดการดันตัวของวัสดุทดแทนออกมาทำให้เกิดการพองตัวขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของวรรณวิภา และคณะ (2561) ที่ทดสอบการพองตัวของกระถาง แล้วทำให้ทราบว่าวัสดุทดแทนมีช่องว่างอยู่ที่สามารถทำให้น้ำแทรกเข้าไปอยู่ในชิ้นส่วนของกระถางได้จนเกิดการพองตัว ทำให้กระถางจากวัสดุทดแทนสามารถระบายอากาศได้ดี ไม่อับชื้น ส่งผลต่อสุขภาพที่ดีของพืชที่ปลูก (กันยารัตน์ และคณะ, 2564) และสอดคล้องกับการศึกษาของเลอพงศ์ และพรฤดี (2553) ที่สร้างบรรจุภัณฑ์กระถางจากกากตะกอนน้ำมันปาล์มและกากตะกอนบ่อบำบัดน้ำเสีย และแตกต่างกับการศึกษาของจุฑามาศ (2564) ที่ผลิตกระถางต้นไม้ย่อยสลายได้จากกากตะกอนโรงงานยางพาราร่วมกับวัสดุเหลือทิ้งจากก้อนเชื้อเห็ด และทะลายปาล์มที่มีเปอร์เซ็นต์การพองตัวสูงเนื่องจากใช้วัสดุที่มีช่องว่างมาก และด้านการดูดซับความร้อน พบว่าชุดการทดลองที่ 5 มีการดูดซับความร้อนมากที่สุดเท่ากับ 25.60 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาเป็นชุดการทดลองที่ 4 1 2 และ 3 มีค่าการดูดซับความร้อน

เท่ากับ 24.31 23.60 22.35 และ 21.29 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลข้างต้นคณะผู้วิจัยมีข้อสังเกตว่าการดูดซับความร้อนของกระถางจากวัสดุทดแทนไม่แตกต่างกันมาก และมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความร้อนต่ำ และอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการปลูกพืช ทั้งนี้อาจเกิดจากสีวัสดุทดแทนและตัวประสานที่มีสีออกขาว ๆ (อิสริยาภรณ์, 2563) ซึ่งความสำคัญของการดูดซับความร้อนของกระถางมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของกระถางจากวัสดุทดแทนมีอุณหภูมิสูงเกินระดับความเหมาะสมจะทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง (เกษศินี และคณะ, 2564) จากผลการศึกษาข้างต้นจะเห็นได้ว่าชุดการทดลองที่ 3 เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นกระถางต้นไม้ เนื่องจากมีความแข็งแรง มีการพองตัวดีที่สุด และมีการดูดซับความร้อนน้อยที่สุด เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชและการใช้เป็นผลิตภัณฑ์สินค้าของที่ระลึก สอดคล้องกับผลการศึกษาความพึงพอใจต่อกระถางจากวัสดุทดแทนที่มีภาพรวมอยู่ในระดับดีมาก

สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่างวัสดุทดแทนและวัสดุประสานที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์สำเร็จรูป สามารถขึ้นรูปได้ทั้ง 5 ชุดการทดลอง ผลการศึกษาคุณสมบัติบางประการของกระถางจากวัสดุทดแทน พบว่าชุดทดลองที่ 2 มีรอยร้าว 3 จุด แต่มีข้อดีคือมีการดูดซับน้ำที่สูงกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ ส่วนชุดการทดลองที่ 4 มีค่าการพองตัวที่ต่ำกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ และชุดการทดลองที่ 5 มีค่าการดูดซับความร้อนของกระถางจากวัสดุทดแทนที่สูงกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ แต่ยังต่ำกว่าชุดควบคุม (ตัวประสานอย่างเดียว) และอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการปลูกพืช ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าชุดการทดลองที่ 1 3 4 และ 5 เหมาะสมที่จะนำมาสร้างกระถางจากวัสดุทดแทนได้ แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าชุดการทดลองที่ 3 เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นกระถางต้นไม้มากที่สุด เนื่องจากมีความแข็งแรง มีการพองตัวดีที่สุด และมีการดูดซับความร้อนน้อยที่สุด เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชและการใช้เป็นผลิตภัณฑ์สินค้าของที่ระลึกสอดคล้องกับผลการศึกษาความพึงพอใจต่อกระถางจากวัสดุทดแทนที่มีภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นางพิศมัย แก้วเชื้อ ผู้อำนวยการโรงเรียนบ้านกุ่ม นางจีรัสย์ พุทธิประไพพงษ์ รองผู้อำนวยการโรงเรียนบ้านกุ่ม และคณะครูโรงเรียนบ้านกุ่มทุกท่านที่ได้อนุเคราะห์สถานที่ และให้คำแนะนำด้านปัญหาวิจัยและการดำเนินงาน รวมทั้งสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยจนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. (2562). *โรงเรียนปลอดขยะ (zero waste school)*. กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กัญจนาภรณ์ เจริญผล และอุบลวรรณ สุวรรณภูสิทธิ์. (2564). การสร้างและหาประสิทธิภาพถาดปลูกพืชจากมูลช้าง. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์,* 6(2), 52-64.

กันยารัตน์ ขาพงศ์ ธนายุธ บังเมฆ และวรัญชลี คณารัตน์. (2564). ระบบกระถางต้นไม้ที่สามารถรับรู้สุขภาพของต้นไม้ที่มีส่วนต่อประสานผู้ใช้ที่เข้าใจง่าย. *การประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรม (มหาวิทยาลัยแม่โจ้) ครั้งที่ 2*. เชียงใหม่.

เกษศินี สิทธิวงศ์ ธีระศักดิ์ พงษาอนุทิน และ Haruo, S. (2564). อิทธิพลของมุมทิศและสีกระถางต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผิวกระถางและวัสดุปลูก. *การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5.* กรุงเทพฯ.

เครือศรี วิเศษสุวรรณภูมิ. (2562). *เอกสารประกอบการจัดการเรียนรู้แบบโครงงาน SATIT PSU STEM INNOVATION*. ปัตตานี: คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

จุฑามาศ แก้วมณี. (2564). การผลิตกระถางต้นไม้ย่อยสลายได้จากกากตะกอนโรงงานยางพาราร่วมกับวัสดุเหลือทิ้งจากก้อนเชื้อเห็ดและทะลายปาล์ม. *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports*, 24(1), 84-93.

ทัศนีย์ แก้วมรกฎ จำเป็น อ่อนทอง และอัจฉรา เพ็งหนู. (2556). องค์ประกอบและการปลดปล่อยธาตุอาหารของเศษหอมแดง มูลแพะ และกระดูกโคเผาป่น. *วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา,* 8(2), 130-145.

ปัญญา หลักงาม และพิทยา ทองย้อย. (2553). การศึกษาและพัฒนากระถางเพาะไม้ประดับจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. *รายงานวิจัย*. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

พรเพ็ญ โชชัย ระมัด โชชัย และเมทินี ทวีผล. (2551). การพัฒนาการย้อมสีเส้นด้ายฝ้ายจากสีย้อมธรรมชาติ : กรณีศึกษาการย้อมสี เส้นด้ายฝ้ายจากสีย้อมเปลือกมะพร้าวและเปลือกประดู่ของชุมชนในเขตตำบลนาบ่อคำ อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร. *สักทอง,* 14(2), 26-45.

พิไลพร หนูทองคำ ประภัสสร จุลบุตร์ และประสบพร จุลบุตร. (2565). ผลของคลื่นไมโครเวฟต่อโครงสร้างทางเคมีกายภาพของเปลือกไข่ไก่. *วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช,* 41(2), 28-40.

ระมัด โชชัย. (2556). การย้อมสีเส้นด้ายฝ้ายด้วยสีย้อมธรรมชาติจากใบและเปลือกต้นมะม่วงสำหรับอุตสาหกรรมครอบครัว. *วารสารวิจัยเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่,* 5(4), 116-127.

รุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัตน์. (2563). การศึกษาสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ. *รายงานวิจัย*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ (องค์การมหาชน). (2559). *การจัดสะเต็มศึกษาในโรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ (องค์การมหาชน).* สืบค้นเมื่อ 23 มิถุนายน 2565, จาก: https://stem.mwit.ac.th/stem-driving/.

เลอพงศ์ จารุพันธ์ และพรฤดี สงวนสุข. (2553). บรรจุภัณฑ์กระถางจากกากตะกอนน้ำมันปาล์มและกากตะกอนบ่อบำบัดน้ำเสีย. *รายงานวิจัย*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรรณวิภา ไชยชาญ วีระศักดิ์ ไชยชาญ และเอนก สาวะอินทร์. (2561). กระถางเพาะชำจากกากกาแฟปูนขาวจากเปลือกหอย และขี้เลื่อยไม้ยางพารา. *รายงานวิจัย*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.

วรัญญา ธารเลิศ. (2563). *การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์แตกสลายได้ทางชีวภาพที่มีองค์ประกอบของเปลือกไข่*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วิจิตร เชาว์วันกลาง และพิมพ์ลภา ปาสาจะ. (2556). การศึกษาสารสกัดจากธรรมชาติในการย้อมผ้าฝ้าย. *รายงานวิจัย*. มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.

วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์ และนิธินาถ ศุภกาญจน์. (2554). การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิทจากเปลือกไข่ไก่. *รายงานวิจัย*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ศูนย์ข้อมูลกลางทางวัฒนธรรม. (2555). *บักค้อ (ลูกตะค้อ).* สืบค้นเมื่อ 21 มิถุนายน 2565, จาก: http://m-culture.in.th/album/168493.

ศูนย์สะเต็มศึกษาแห่งชาติ. (2558). *คู่มือเครือข่ายสะเต็มศึกษา*. กรุงเทพฯ: สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

สำนักงานคณะกรรมพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (กปร.). (2564). *การศึกษาชนิดของเศษวัสดุที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยหมัก*. สืบค้นเมื่อ 21 มิถุนายน 2565, จาก: https://www.rdpb.go.th/MediaUploader/File/11255/%81.pdf.

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). (2564). *BCG economy model*. สืบค้นเมื่อ 21 มิถุนายน 2565, จาก: https://www.nstda.or.th/home/knowledge_post/what-is-bcg-economy-model/.

สำนักนโยบายเศรษฐกิจมหภาค. (2565). *ประมาณการเศรษฐกิจไทยปี 2565*. สืบค้นเมื่อ 21 มิถุนายน 2565, จาก: https://www.mof.go.th/th/view/attachment/file/.pdf.

การตอบสนองของการเจริญเติบโตและคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ในระยะดอกบานเต็มที่ที่ฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ภายใต้สภาวะขาดน้ำ

Growth and Seed Quality Responses of Soybean (*Glycine max* (L.) Merr. var. Chiang Mai 60) in Full Bloom Stage Sprayed with Calcium Chloride under Water Deficit

เสาวลักษณ์ บันเทิงสุข[1*] และวราลักษณ์ บุญมาชัย[2]
Saowalak Banthoengsuk[1*] and Waraluk Boonmachai[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการตอบสนองของการเจริญเติบโตและคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ในระยะดอกบานเต็มที่ที่ฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน (0 20 40 และ 60 มิลลิโมลาร์) เมื่อได้รับสภาวะขาดน้ำ เป็นเวลา 7 วัน ภายในโรงเรือนศูนย์วิจัยและพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืชเชียงใหม่ ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ จากการทดลองพบว่าการฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ให้แก่ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ในระยะดอกบานเต็มที่ก่อนได้รับสภาวะขาดน้ำไม่มีผลต่อความสูง จำนวนข้อ จำนวนกิ่ง จำนวนฝัก น้ำหนักต่อ 100 เมล็ด น้ำหนักเมล็ดทั้งหมด เปอร์เซ็นต์ความงอกของเมล็ด เปอร์เซ็นต์เมล็ดแข็ง เปอร์เซ็นต์เมล็ดตาย ความเร็วในการงอก ความชื้นภายในเมล็ด ปริมาณโปรตีน และปริมาณไขมันในเมล็ด อย่างไรก็ตามถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60ที่ฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 60 มิลลิโมลาร์ ก่อนได้รับสภาวะขาดน้ำ มีผลทำให้ความกว้างเมล็ดและความยาวเมล็ดมากที่สุด ในขณะที่ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ไม่ได้รับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (0 มิลลิโมลาร์) มีเปอร์เซ็นต์ความงอกของต้นอ่อนผิดปกติเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ถั่วเหลือง เมล็ดพันธุ์ แคลเซียมคลอไรด์ สภาวะขาดน้ำ

[1] กองวิจัยพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืช กรมวิชาการเกษตร
[2] ศูนย์วิจัยและพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืชเชียงใหม่ กองวิจัยพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืช กรมวิชาการเกษตร
[*] Corresponding author e-mail: saowalak.happyentertain@gmail.com

Received: 22 January 2023, Revised: 22 March 2023, Accepted: 2 May 2023

Abstract

The objective of this study was to study growth and seed quality responses of soybean var. Chiang Mai 60 at full bloom stage sprayed by calcium chloride ($CaCl_2$) with different concentrations (0, 20, 40 or 60 millimolar (mM)) under water deficit for 7 days in the greenhouse of Chiang Mai Seed Research and Development Center, Nong Han, San Sai, Chiang Mai province. The result showed that spraying $CaCl_2$ under water deficit had no effect on the plant height, number of nodes per plant, number of branches per plant, number of pods per plant, weight per 100 seeds, total seed weight, seed germination rate, hard seed percentage, dead seed percentage, germination index, seed moisture content, protein content, and lipid content. However, the soybean sprayed with 60 mM $CaCl_2$ showed the greatest seed width and length. In addition, the abnormal germination rate was increased when it was not supplemented with $CaCl_2$ (0 mM).

Keywords: Soybean, Seed, Calcium chloride, Water deficit

บทนำ

ถั่วเหลือง (*Glycine max* (L.) Merr.) เป็นพืชที่มีปริมาณการปลูกทั่วโลกอยู่ใน 10 อันดับแรกของโลก (He *et al*., 2017) นอกจากนี้ถั่วเหลืองยังเป็นแหล่งโปรตีนราคาถูก (Mutava *et al.*, 2015) และเป็นพืชน้ำมันที่มีพื้นที่เก็บเกี่ยวผลผลิตทั่วโลกมากที่สุด (Cerezini *et al.*, 2016) คิดเป็น 71 และ 29 เปอร์เซ็นต์ ของโปรตีนและน้ำมันที่ได้จากพืช (Wijewardana *et al.*, 2019) ถั่วเหลืองจัดอยู่ในกลุ่มพืชที่ผลิตเพื่อทดแทนการนำเข้าแม้ว่าหลายฝ่ายทั้งภาครัฐและเอกชนได้ร่วมมือกันในการส่งเสริมผลิตถั่วเหลืองมาโดยตลอด แต่ผลผลิตถั่วเหลืองยังไม่เพียงพอกับความต้องการใช้ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะความต้องการใช้ถั่วเหลืองคุณภาพดี เพื่อการบริโภคและอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ การปลูกถั่วเหลืองถือว่ามีความจำเป็นที่จะต้องให้เกษตรกรผลิตอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นพืชที่มีความมั่นคงทางด้านอาหารคุณภาพชนิดหนึ่ง และการเพิ่มการผลิตถั่วเหลืองในฤดูแล้งยังเป็นวิถีที่เกษตรกรสามารถเพิ่มผลผลิตให้กับถั่วเหลืองได้ และการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตถั่วเหลืองเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากการปลูกถั่วเหลืองในฤดูแล้งมักประสบภัยธรรมชาติฝนแล้งหรือน้ำท่วมอยู่เสมอ การเพิ่มประสิทธิภาพการเพิ่มผลผลิตถั่วเหลืองฤดูแล้ง สามารถทำได้โดยการปรับปรุงให้พืชมีความทนต่อสภาพอากาศร้อนและช่วงขาดน้ำได้นานขึ้น เพื่อให้ทนต่อระยะฝนทิ้งช่วง และยังสามารถลดการสูญเสียผลผลิตที่เกิดจากไม่ได้รับน้ำที่เพียงพอได้ (สมชาย, 2558) โดยถั่วเหลืองเป็นพืชที่ต้องอาศัยน้ำฝนในการเจริญเติบโตตลอดอายุการปลูก (Manavalan *et al.*, 2009) อย่างไรก็ตามจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศก่อให้เกิดปัญหาความเครียดจากสภาวะแวดล้อมในการปลูกพืช ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโต การพัฒนา และผลผลิตของพืช (El-Gamal *et al.*, 2021) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาการเกิดฝนและปริมาณน้ำฝนในแต่ละปี (Li *et al.*, 2013) ซึ่งส่งผลทำให้เกิดสภาวะขาดน้ำที่มีผลต่อความสามารถในการผลิตพืชอาหารเพื่อตอบสนองความต้องการ

ของประชากรโลกที่เพิ่มขึ้น (Vurukonda *et al.*, 2016) ถั่วเหลืองจัดเป็นพืชที่ตอบสนองต่อสภาวะขาดน้ำอย่างรวดเร็วที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตตลอดชีพจักร (Liu *et al.*, 2004) ซึ่งสภาวะขาดน้ำจัดเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลทำให้ผลผลิตถั่วเหลืองทั่วโลกลดลง (Dong *et al.*, 2019) โดยปริมาณผลผลิตถั่วเหลืองทั่วโลกมีปริมาณผลผลิตลดลงประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้รับสภาวะขาดน้ำ (Manavalan *et al.*, 2009; Gercek *et al.*, 2009; Bajaj *et al.*, 2008)

สภาวะขาดน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพในการผลิตของพืชเศรษฐกิจทั่วโลก โดยสภาวะขาดน้ำส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจำนวนมากตั้งแต่ระดับโมเลกุล ชีวเคมีและสรีรวิทยาของพืช (Bruce *et al.*, 2002; Ibrahim, 2014; Ibrahim *et al.*, 2015) ในสภาวะขาดน้ำชักนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของน้ำภายในพืช การสังเคราะห์ด้วยแสง กิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ และเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต กรดอะมิโน โปรตีน และปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (Ibrahim, 2014; Silva *et al.*, 2009) รวมถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยา ได้แก่ ดัชนีพื้นที่ใบที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานแสง (Dong *et al.*, 2015) ในขณะที่ Hao *et al.* (2013) รายงานว่าสภาวะขาดน้ำส่งผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ภายในใบถั่วเหลืองลดลงเมื่อได้รับสภาวะขาดน้ำ รวมทั้งมีผลทำให้ปริมาณและคุณภาพผลผลิตเมล็ดถั่วเหลืองลดลง (Wijewardana *et al.*, 2019; Wijewardana *et al.*, 2018; Vurukonda *et al.*, 2016) ในขณะที่ลักษณะทางคุณภาพของเมล็ดถั่วเหลือง เช่น การพัฒนาของเมล็ด เปอร์เซ็นต์ความงอกของเมล็ด และสรีรวิทยาของเมล็ดพันธุ์ลดลงเมื่อได้รับสภาวะขาดน้ำ (Bellaloui *et al.*, 2012; Farooq *et al.*, 2009) อย่างไรก็ตามเพื่อตอบสนองความต้องการอาหารของประชากรโลกที่เพิ่มขึ้นจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาแนวทางการเพิ่มผลผลิตถั่วเหลืองภายใต้สภาวะขาดน้ำ (Rosa *et al.*, 2021)

กลไกสำคัญในการลดผลกระทบจากสภาวะขาดน้ำที่สามารถพบได้ภายในพืช ได้แก่ การสะสมสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการควบคุมค่าศักย์ของน้ำภายในพืช (osmolyte) ซึ่งสามารถลดการสูญเสียน้ำภายในเซลล์และรักษาสมดุลของน้ำภายในพืชรวมทั้งยังช่วยป้องกันและลดความเสียหายที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นภายในเซลล์พืช ที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ส่งผลทำให้การเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชลดลง (Munne-Bosch and Alegre, 2000) นอกจากนี้การได้รับธาตุอาหารพืชบางชนิดผ่านการฉีดพ่นทางใบสามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ส่งผลต่อการเจริญและพัฒนาของพืช โดย อนันต์ และคณะ (2023) รายงานว่าการฉีดพ่นสังกะสีทางใบในอัตรา 7.5 กรัมต่อลิตร มีผลทำให้น้ำหนักผลผลิตและปริมาณสังกะสีสะสมในข่าอ่อนเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับข่าอ่อนที่ไม่ได้รับการฉีดพ่นสังกะสีทางใบ ในขณะที่แคลเซียมจัดเป็นธาตุอาหารพืชที่มีบทบาทเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืช เช่น การรักษาเสถียรภาพของเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ การควบคุมการทำงานของเอนไซม์ และการเปลี่ยนแปลงของฮอร์โมนภายในพืช รวมทั้งยังมีบทบาทในการเป็นตัวรับส่งสัญญาณภายในพืชที่ตอบสนองต่อสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม (Batistic and Kudla, 2012) ซึ่งมีรายงานวิจัยจำนวนมากที่แสดงให้เห็นว่าพืชหลายชนิดที่ได้รับแคลเซียมในระดับที่เหมาะสมภายใต้สภาวะขาดน้ำส่งผลในด้านสรีรวิทยาและชีวเคมี คือ การลดผลกระทบจากสภาวะขาดน้ำ เช่น ผักกาดก้านขาว (Xiang *et al.*, 2008) ชา (Upadhyaya *et al.*, 2011) หญ้าญี่ปุ่น (Xu *et al.*, 2013) และข้าวโพด (Khan *et al.*, 2015) เป็นต้น ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อศึกษาผลของ

สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ที่ฉีดพ่นทางใบต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพของเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ได้รับสภาวะขาดน้ำในระยะดอกบานเต็มที่

วิธีดำเนินการวิจัย

ศึกษาการตอบสนองของการเจริญเติบโตและคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองซึ่งเป็นพันธุ์ของกรมวิชาการเกษตรที่ส่งเสริมให้เกษตรกรปลูก คือ พันธุ์เชียงใหม่ 60 ในระยะออกดอกที่ฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ภายใต้สภาวะขาดน้ำ ในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2564 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 ณ โรงเรือนศูนย์วิจัยพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืชเชียงใหม่ ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ และห้องปฏิบัติการทดสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์ กองวิจัยพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืช กรมวิชาการเกษตร แขวงลาดยาว เขตจตุจักร จังหวัดกรุงเทพฯ โดยมีขั้นตอนการดำเนินการทดลองดังนี้

1. การปลูกถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายในโรงเรือน

คลุกเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ด้วยปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียม อัตรา 200 กรัมต่อเมล็ดพันธุ์ 15 กิโลกรัม ปลูกถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ในกระถางขนาด 10 นิ้ว จำนวน 2-3 เมล็ดต่อกระถาง ภายในโรงเรือน โดยรองก้นหลุมด้วยปุ๋ยตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร หลังจากเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 งอก จึงถอนแยกให้เหลือ 2 ต้นต่อกระถาง ต่อมาฉีดพ่นสารไตรอะโซฟอส (triazophos) 40 เปอร์เซ็นต์ อีซี (emulsifiable concentrate: EC) อัตรา 50 มิลลิลิตรต่อน้ำ 20 ลิตร เพื่อป้องกันกำจัดแมลงวันหนอนเจาะลำต้นเมื่อถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 มีอายุ 7 วัน และใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 12-24-12 เมื่อถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 มีอายุ 15-20 วันหลังงอก ตามกรรมวิธีคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร (2563)

2. การฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

ทำการตรวจสอบระยะการเจริญเติบโตของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 โดยเมื่อต้นถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 เข้าสู่ระยะดอกบานเต็มที่ (R2) หรือประมาณ 45-50 วัน หลังจากเพาะเมล็ด จึงฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0 20 40 และ 60 มิลลิโมลาร์ จำนวน 1 ครั้ง ด้วยถังพ่นสารเคมีขนาด 3 ลิตร โดยพ่นที่ตาดอกและต้นถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ในอัตรา 600 มิลลิลิตรต่อกระถาง และงดให้น้ำถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 หลังการฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนดจึงกลับมาให้น้ำตามปกติทุก 7 วัน จากนั้นเก็บเกี่ยวผลผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 เมื่อเมล็ดอยู่ในระยะสุกแก่ ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ หรืออายุ 90-120 วัน เก็บเกี่ยวผลผลิตทั้งหมดในคราวเดียว และลดความชื้นของเมล็ดให้มีค่าประมาณ 10-12 เปอร์เซ็นต์ ด้วยการตากแดด โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (randomized complete block design: RCBD) ประกอบด้วย 4 ทรีทเมนต์ ทรีทเมนต์ละ 4 ซ้ำ ซ้ำละ 5 กระถาง ได้แก่ การฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0 20 40 และ 60 มิลลิโมลาร์ และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีทเมนต์ด้วยวิธี Duncan’s new multiple range test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3. การบันทึกข้อมูลหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิต

3.1 การเจริญเติบโต ประกอบด้วย ความสูงต้น โดยวัดจากส่วนเหนือรากจนถึงยอด นับจำนวนข้อต่อต้น นับจำนวนกิ่งแขนงต่อต้น นับจำนวนฝักต่อต้น ความกว้างเมล็ด ความยาวเมล็ด โดยวัดด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ นำมาหาค่าเฉลี่ย หน่วยเป็นมิลลิเมตร ชั่งน้ำหนัก 100 เมล็ด หน่วยเป็นกรัม และคำนวณค่าเฉลี่ยน้ำหนัก 100 เมล็ด และชั่งน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด ตามวิธีการของ The International Seed Testing Association (ISTA) (1999)

3.2 คุณภาพเมล็ดพันธุ์ ประกอบด้วย ความงอก (เปอร์เซ็นต์) ต้นกล้าผิดปกติ (เปอร์เซ็นต์) เมล็ดแข็ง (เปอร์เซ็นต์) เมล็ดตาย (เปอร์เซ็นต์) และความเร็วในการงอก (วัน) ตามวิธีของจักรพงษ์ และคณะ (2565) โดยนำเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 มาทดสอบด้วยวิธีเพาะเมล็ดระหว่างกระดาษ (between paper: BP) ตามวิธีของ The International Seed Testing Association (ISTA) (1999) จำนวน 4 ซ้ำ ๆ ละ 50 เมล็ด และประเมินผลความงอกของเมล็ดตามวิธีของ The International Seed Testing Association (ISTA) (1999) ในขณะที่ปริมาณโปรตีน (เปอร์เซ็นต์) และปริมาณไขมัน (เปอร์เซ็นต์) วิเคราะห์ตามวิธีการของ Cunniff (1995) และความชื้นภายในเมล็ด (เปอร์เซ็นต์) โดยการนำเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 จำนวน 10 กรัม ไปอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17±1 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาปิดฝาเก็บไว้ในโถดูดความชื้นจนเย็น แล้วนำเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 มาชั่งน้ำหนัก และนำไปคำนวณหาปริมาณความชื้นภายในเมล็ดตามวิธีของ The International Seed Testing Association (ISTA) (1999)

ผลการวิจัย

จากการศึกษา พบว่าการเจริญเติบโตของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ได้แก่ ความสูงต้น จำนวนข้อต่อต้น จำนวนกิ่งต่อต้น และจำนวนฝักต่อต้นของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันในระยะดอกบานเต็มที่ก่อนได้รับสภาวะขาดน้ำไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0-60 มิลลิโมลาร์ มีความสูงต้นอยู่ในช่วงระหว่าง 59.31±1.08 - 62.38±2.69 เซนติเมตร จำนวนข้ออยู่ในช่วงระหว่าง 12.69±0.33 - 13.81±0.71 ข้อต่อต้น จำนวนกิ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 2.81±0.62 - 3.50±0.35 กิ่งต่อต้น และมีจำนวนฝักอยู่ในช่วงระหว่าง 62.63±6.86 - 81.31±3.04 ฝักต่อต้น ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความสูงต้น จำนวนข้อ จำนวนกิ่ง และจำนวนฝักของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ได้รับการฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในระยะดอกบานเต็มที่ก่อนได้รับสภาวะขาดน้ำเป็นเวลา 7 วัน

สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (มิลลิโมลาร์)	ความสูงต้น (เซนติเมตร)	จำนวนข้อ (ข้อต่อต้น)	จำนวนกิ่ง (กิ่งต่อต้น)	จำนวนฝัก (ฝักต่อต้น)
0	59.81±2.38	13.38±0.56	3.19±0.30	75.19±9.79
20	59.31±1.08	12.69±0.33	2.88±0.30	81.31±3.04
40	59.75±2.33	13.38±0.30	3.50±0.35	64.44±11.51
60	62.38±2.69	13.81±0.71	2.81±0.62	62.63±6.86
F-test	ns	ns	ns	ns
CV (%)	7.32	7.59	26.88	23.80

หมายเหตุ: - ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ส่วนของคุณภาพด้านขนาดเมล็ด ได้แก่ ความกว้างและความยาวของเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันในระยะดอกบานเต็มที่ก่อนได้รับสภาวะขาดน้ำมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติของน้ำหนักต่อ 100 เมล็ด และน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด (ตารางที่ 2) โดยถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 60 มิลลิโมลาร์ มีความกว้างและความยาวของเมล็ดมากที่สุดเท่ากับ 6.68±0.09 มิลลิเมตร และ 7.99±0.13 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความกว้างเมล็ด ความยาวเมล็ด น้ำหนักต่อ 100 เมล็ด และน้ำหนักเมล็ดทั้งหมดของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ได้รับการฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในระยะดอกบานเต็มที่ก่อนได้รับสภาวะขาดน้ำเป็นเวลา 7 วัน

สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (มิลลิโมลาร์)	ความกว้างเมล็ด (มิลลิเมตร)	ความยาวเมล็ด (มิลลิเมตร)	น้ำหนักต่อ 100 เมล็ด (กรัม)	น้ำหนักเมล็ดทั้งหมด (กรัมต่อต้น)
0	6.10±0.17[b]	7.29±0.15[c]	17.54±1.28	146.03±1.28
20	6.14±0.14[b]	7.33±0.03[bc]	17.84±1.34	159.15±1.34
40	6.48±0.16[ab]	7.79±0.23[ab]	17.85±1.48	109.08±1.48
60	6.68±0.09[a]	7.99±0.13[a]	18.23±0.48	97.93±0.48
F-test	*	*	ns	ns
CV (%)	4.72	4.16	13.57	64.24

หมายเหตุ: - ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

- * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05
- ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างทรีทเมนต์ด้วยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ส่วนคุณภาพเมล็ดพันธุ์ ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ต้นกล้าผิดปกติของเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันในระยะดอกบานเต็มที่ก่อนได้รับสภาวะขาดน้ำมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติของเปอร์เซ็นต์ความงอก เปอร์เซ็นต์เมล็ดแข็ง เปอร์เซ็นต์เมล็ดตาย โดยถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0 - 60 มิลลิโมลาร์ มีความงอกอยู่ในช่วงระหว่าง 84.69±0.87 - 89.75±2.49 เปอร์เซ็นต์ พบเมล็ดแข็งอยู่ในช่วงระหว่าง 5.50±2.48 - 11.00±1.86 เปอร์เซ็นต์ และพบเมล็ดตายอยู่ในช่วงระหว่าง 3.63±1.35 - 4.38±1.32 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (0 มิลลิโมลาร์) พบการเกิดต้นกล้าผิดปกติมากที่สุด เท่ากับ 1.13±0.22 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความงอก ต้นกล้าผิดปกติ เมล็ดแข็ง และเมล็ดตายของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ได้รับการฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในระยะดอกบานเต็มที่ก่อนได้รับสภาวะขาดน้ำเป็นเวลา 7 วัน

สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (มิลลิโมลาร์)	ความงอก (เปอร์เซ็นต์)	ต้นกล้าผิดปกติ (เปอร์เซ็นต์)	เมล็ดแข็ง (เปอร์เซ็นต์)	เมล็ดตาย (เปอร์เซ็นต์)
0	89.75±2.49	1.13±0.22[a]	5.50±2.48	3.63±1.35
20	88.19±0.28	0.31±0.24[b]	7.13±0.85	4.38±1.03
40	84.69±0.87	0.00±0.00[b]	11.00±1.86	4.31±1.05
60	88.56±2.67	0.00±0.00[b]	7.06±2.06	4.38±1.32
F-test	ns	*	ns	ns
CV (%)	4.28	87.84	49.78	57.50

หมายเหตุ: - ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ
- * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05
- ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างทรีทเมนต์ด้วยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ในขณะที่ความเร็วในการงอก ความชื้นภายในเมล็ด ปริมาณโปรตีนในเมล็ด และปริมาณไขมันในเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันในระยะดอกบานเต็มที่ก่อนได้รับสภาวะขาดน้ำไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0-60 มิลลิโมลาร์ มีความเร็วในการงอกอยู่ในช่วง 20.70±0.37 - 22.32±0.87 วัน มีความชื้นภายในเมล็ดอยู่ในช่วง 9.18±0.39 - 10.09±0.62 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 36.76±0.48 - 38.09±0.37 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณไขมันภายในเมล็ดอยู่ในช่วง 21.91±0.31 - 22.23±0.32 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความเร็วในการงอก ความชื้นในเมล็ด ปริมาณโปรตีน และปริมาณไขมัน ของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ได้รับการฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในระยะดอกบานเต็มที่ก่อนได้รับสภาวะขาดน้ำเป็นเวลา 7 วัน

สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (มิลลิโมลาร์)	ความเร็วในการงอก (วัน)	ความชื้นในเมล็ด (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณโปรตีน (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณไขมัน (เปอร์เซ็นต์)
0	21.95±0.65	10.09±0.62	36.76±0.48	22.23±0.32
20	21.86±0.18	9.93±0.15	37.58±0.19	21.91±0.31
40	20.70±0.37	9.18±0.39	38.09±0.37	22.10±0.24
60	22.32±0.87	9.89±0.57	37.66±0.26	22.23±0.21
F-test	ns	ns	ns	ns
CV (%)	5.35	9.66	1.85	2.48

หมายเหตุ: - ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

การอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ช่วยลดผลกระทบของสภาวะขาดน้ำต่อคุณภาพของเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ประกอบด้วย ความกว้างเมล็ด ความยาวเมล็ด และการเกิดต้นกล้าที่ผิดปกติ แต่ไม่สามารถลดผลกระทบทางด้านการเจริญเติบโตของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 (ตารางที่ 1 - ตารางที่ 4) เนื่องจากระยะการเจริญเติบโตที่ทำการศึกษาอยู่ในระยะดอกบานเต็มที่ ซึ่งเป็นระยะที่มีการเปลี่ยนแปลงจากระยะการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นมาสู่ระยะการสืบพันธุ์ โดยระยะการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นเป็นระยะที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อสภาวะขาดน้ำ จึงส่งผลทำให้การเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชหลายชนิดลดลง เช่น ข้าว (คงเอก, 2558) ถั่วเหลือง (อาทิตยา และจักรี, 2553) ฝ้าย (Parida *et al.*, 2007) ข้าวสาลี (Loggini *et al.*, 1999) สบู่ดำ (Sapeta *et al.*, 2013) เนื่องจากสภาวะขาดน้ำอาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาและชีวเคมีภายในพืช รวมทั้งการเกิดอนุมูลอิสระภายในพืช

เช่น ซุปเปอร์ออกไซด์ (O_2^-) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไฮดรอกซิล (OH^-) ที่มีผลทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง และส่งผลทำให้การเจริญและพัฒนาของพืชโดยรวมลดลงด้วย (Sekmen *et al.*, 2014) ดังนั้นในการทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นว่าการฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ไม่สามารถลดผลกระทบของสภาวะขาดน้ำต่อการเจริญเติบโตทางด้านลำต้น ประกอบด้วย ความสูง จำนวนข้อ จำนวนกิ่ง และจำนวนฝัก

ในทางตรงกันข้ามการฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ช่วยลดผลกระทบของสภาวะขาดน้ำต่อขนาดของเมล็ด ประกอบด้วย ความกว้างเมล็ด ความยาวเมล็ด และคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ ได้แก่ การเกิดต้นกล้าที่ผิดปกติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแคลเซียมเป็นธาตุอาหารรองที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมการเจริญเติบโตของพืชโดยเฉพาะอย่างยิ่งการควบคุมโครงสร้างและการทำหน้าที่ของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้แคลเซียมสามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันผ่านการควบคุมความสัมพันธ์ของน้ำภายในพืชและเมแทบอลิซึมของสารต่อต้านอนุมูลอิสระ (Ahmad *et al.*, 2015) รวมทั้งแคลเซียมยังมีส่วนสำคัญในการควบคุมการทำงานต่าง ๆ ภายในเซลล์ในฐานะโมเลกุลส่งสัญญาณที่สอง (secondary messenger) (Cousson, 2009) ซึ่งช่วยในการปรับเปลี่ยนการทำงานภายในกระบวนการทางสรีรวิทยา เช่น การดูดซึม ธาตุอาหาร และการเปลี่ยนแปลงสถานะของเซลล์เพื่อช่วยให้พืชสามารถต่อต้านผลกระทบด้านลบของความเครียดจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Colorado *et al.*, 1994) รวมทั้งยังช่วยให้การขนส่งโพแทสเซียมไอออนและสมดุลระหว่างโพแทสเซียมไอออนต่อโซเดียมไอออน (K^+/Na^+) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ยังช่วยเพิ่มระดับการสะสมสารออสโมไลต์ (osmolyte) เช่น ไกลซีนเบตาอีน (glycinebetaine: GB) และโพรลีน (proline) ภายในพืชที่ได้รับสภาวะความเครียด (Gobinathan *et al.*, 2011) ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้แคลเซียมช่วยลดผลกระทบจากการขาดน้ำต่อขนาดของเมล็ดและอัตราการงอกที่ผิดปกติได้ โดยมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมคลอไรด์สามารถช่วยผลกระทบของสภาวะขาดน้ำต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพผลผลิตของพืชหลายชนิด ได้แก่ ข้าวบาร์เลย์ (Shah *et al.*, 2022) ข้าวสาลี (Khushboo *et al.*, 2018) ทานตะวัน (Ibrahim *et al.*, 2016) ข้าวโพด (Mubarik *et al.*, 2018; Somtrakoon and Chouychai, 2022) หญ้าโซซีเซีย (Xu *et al.*, 2013) และถั่วลูกไก่ (Hussain *et al.*, 2022)

สรุปผลการวิจัย

การฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ก่อนได้รับสภาวะขาดน้ำไม่มีผลต่อความสูง จำนวนข้อ จำนวนกิ่ง จำนวนฝัก น้ำหนักต่อ 100 เมล็ด น้ำหนักเมล็ดทั้งหมด ความงอกของเมล็ด เปอร์เซ็นต์เมล็ดแข็ง เปอร์เซ็นต์เมล็ดตาย ความเร็วในการงอก ความชื้นภายในเมล็ด ปริมาณโปรตีน และปริมาณไขมันในเมล็ด ในขณะที่การฉีดพ่นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 60 มิลลิโมลาร์ ก่อนได้รับสภาวะขาดน้ำ มีผลทำให้ความกว้างและความยาวเมล็ดเพิ่มขึ้น และถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ไม่ได้รับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ก่อนได้รับสภาวะขาดน้ำมีการเกิดต้นกล้าที่ผิดปกติเพิ่มขึ้น

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการปลูกถั่วเหลืองภายใต้สภาวะขาดน้ำได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนประเภทงานพื้นฐาน (fundamental fund) จากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2565

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. (2563). *เทคโนโลยีการผลิตถั่วเหลือง.* กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยพืชไร่และพืชทดแทนพลังงาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

คงเอก ศิริงาม. (2558). ผลของสภาวะขาดน้ำต่อการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ ปริมาณรงควัตถุ ปริมาณโพรลีนและการเจริญเติบโตของข้าว. *Thai Journal of Science and Technology,* 4(2), 133-146.

จักรพงษ์ กางโสภา เพชรรัตน์ จี้เพชร และสุรีมาศ จันต๊ะอินทร์. (2565). ความงอก ความแข็งแรงและการเจริญเติบโตของต้นกล้าถั่วเหลือง หลังการเคลือบและพอกเมล็ดพันธุ์ร่วมกับ *Bacillus subtilis*. *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*, 14(1), 266-281.

สมชาย ผะอบเหล็ก. (2558). การวิจัยและพัฒนาถั่วเหลือง. *รายงานวิจัย*. กรมวิชาการเกษตร.

อนันต์ พิริยะภัทรกิจ พัชรี เดชเลย์ พรกมล รูปเลิศ และปุญญพัฒน์ พลพิมพ์. (2023). ผลของปุ๋ยสังกะสีที่ให้ทางใบต่อผลผลิตและความเข้มข้นของสังกะสีของข่า. *วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 42(1), 14-23.

อาทิตยา ยอดใจ และจักรี เส้นทอง. (2553). ผลของการขาดน้ำในระยะการเจริญพันธุ์ต่อการเติบโตและผลผลิตของถั่วเหลือง. *วารสารเกษตร*, 26(3), 251-260.

Ahmad, P., Sarwat, M., Bhat, N.A., Wani, M., Kazi, A.G. and Tran, L.S. (2015). Alleviation of cadmium toxicity in *Brassica juncea* L. by calcium application involves various physiological and biochemical strategies. *PLOS ONE*. 10(1), 114-571, doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114571.

Bajaj, S., Chen, P., Longer, D.E., Shi, A., Hou, A., Ishibashi, T. and Brye, K.R. (2008). Irrigation and planting date effects on seed yield and agronomic traits of early-maturing soybean. *Journal of Crop Improvement*, 22(1), 47-65, doi: https://doi.org/10.1093/jexbot/53.366.13.

Batistic, O. and Kudla, J. (2012). Analysis of calcium signaling pathways in plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, 1820(8), 1283-1293, doi: https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2011.10.012.

Bellaloui, N., Mengistu, A., Fisher, D.K. and Abel, C.A. (2012). Soybean seed composition constituents as affected by drought and *Phomopsisin phomopsis* susceptible and resistant genotypes. *Journal of Crop Improvement,* 26(2), 428-453, doi: https://doi.org/10.1080/15427528.2011.651774.

Bruce, W.B., Edmeades, G.O. and Barker, T.C. (2002). Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 53(366), 13-25, doi: https://doi.org/10.1093/jexbot/53.366.13.

Cerezini, P., Kuwano, B.H., dos Santos, M.B., Terassi, F., Hungria, M. and Nogueira, M.A. (2016). Strategies to promote early nodulation in soybean under drought. *Field Crops Res*earch, 196, 160-167, doi: https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.06.017.

Colorado, P., Rodriguez, A., Nicolas, G. and Rodriguez, D. (1994). Abscisic acid and stress regulate gene expression during germination of chickpea seeds, possible role of calcium. *Physiologia Plantarum*, 91(3), 461-467, doi: https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1994.tb02975.x.

Cousson, A. (2009). Involvement of phospholipase C-independent calcium-mediated abscisic acid signaling during *Arabidopsis* response to drought. *Biologia Plantarum,* 53, 53-62, doi: https://doi.org/10.1007/s10535-009-0008-0.

Cunniff, P. (1995). *Official methods of analysis of the association of official analytical chemists.* (16th ed). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.

Dong, J., Xiao, X., Wagle, P., Zhang, G., Zhou, Y., Jin, C., Torn, M.S., Meyers, T.P., Suyker, A.E., Wang, J., Yan, H., Biradar, Ch. and Moore, Moore, B. (2015). Comparison of four EVI-based models for estimating gross primary production of maize and soybean croplands and tallgrass prairie under severe drought. *Remote Sensing of Environment,* 162, 154-168, doi: https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.022.

Dong, S., Wang, W., Jiang, Y., Ma, Z., Yan, C., Liu, L. and Cui, G. (2019). Antioxidant and proteomic analysis of soybean response to drought during soybean flowering. *Ekoloji*, 28, 2041-2052.

El-Gamal, S.M.A., El-Din, W.M.S., Farouk, S. and Moktar, N.A.Y.O. (2021). Integrated effects of biochar and potassium silicate on borage plant under different irrigation regimes in sandy soil. *Journal of Horticultural Science & Ornamental Plants*, 13(1), 60-76.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. and Basra, S.M.A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 185-212, doi: https://doi.org/10.1051/agro:2008021.

Gercek, S., Boydak, E., Okant, M. and Dikilitas, M. (2009). Water pillow irrigation compared to furrow irrigation for soybean production in a semi-arid area. *Agricultural Water Management*, 96(1), 87-92, doi: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.06.006.

Gobinathan, P., Affaq, M., Murali, P.V., Somasundaram, R. and Panneerselvam, R. (2011). Interactive effects of sodium chloride and calcium chloride on biochemical constituents and proline metabolism of *Pennisetum glaucum* (L.) R. *British Journal of Pharmaceutical Research,* 8(4), 2842-2845.

Hao, L., Wang, Y., Zhang, J., Xie, Y., Zhang, M., Duan, L. and Li, Z. (2013). Coronatine enhances drought tolerance via improving antioxidative capacity to maintaining higher photosynthetic performance in soybean. *Plant Science*, 210, doi: https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.05.006.

He, J., Du, Y.L., Wang, T., Turner, N.C., Yang, R.P., Jin, Y., Xi, Y., Zhang, C., Cui, T., Fang, X.W. and Li, F.M. (2017). Conserved water use improves the yield performance of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under drought. *Agricultural Water Management*, 179, 236-245, doi: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.008.

Hussain, N., Yasmeen, A., Yousaf, M.M., Malik, W., Naz, S., Qadir, I., Saddiq, B., Shaheen, A. and Iqbal, R. (2022). Exogenously applied nutrients can improve the chickpea productivity under water stress conditions by modulating the antioxidant enzyme system. *Brazilian Journal of Biology*, 82, doi: https://doi.org/10.1590/1519-6984.236251.

Ibrahim, M.F.M. (2014). Induced drought resistance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by exogenous application with active yeast suspension. *Middle East journal of applied sciences*, 4(4), 806-815.

Ibrahim, M.F.M., Bondok, A.M., Al-Senosy, N.K. and Rania, A.A.Y. (2015). Stimulation some of defense mechanisms in tomato plants under water deficit and tobacco mosaic virus (TMV). *World Journal of Agricultural Research*, 11(5), 289-302.

Ibrahim, M.F.M., Faisal, A. and Shehata, S.A. (2016). Calcium chloride alleviates water stress in sunflower plants through modifying some physio-biochemical parameters. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 16(4), 677-693, doi: https://doi.org/10.5829/idosi.aejaes.2016.16.4.12907.

Khan, M.B., Hussain, M., Raza, A., Farooq, S. and Jabran, K. (2015). Seed priming with $CaCl_2$ and ridge planting for improved drought resistance in maize. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39(2), 193-203, doi: https://doi.org/10.3906/tar-1405-39.

Khushboo, Y., Bhardwaj, K., Singh, P., Raina, M., Sharma, V. and Kumar, D. (2018). Exogenous application of calcium chloride in wheat genotypes alleviates negative effect of drought stress by modulating antioxidant machinery and enhanced osmolyte accumulation. *In Vitro Cellular & Developmental Biology*, 54(3), doi: https://doi.org/10.1007/s11627-018-9912-3.

Li, D., Liu, H., Qiao, Y., Wang, Y., Cai, Z., Dong, B., Shi, Ch., Liu, Y., Li, X. and Liu, M. (2013). Effects of elevated CO_2 on the growth, seed yield, and water use efficiency of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under drought stress. *Agricultural Water Management*, 129, 105-112, doi: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.014.

The International Seed Testing Association (ISTA). (1999). International rule for seed testing. *Supplement to Seed Science and Technology*, 27, 45-51.

Liu, F., Jensen. Ch.R. and Andersen, M.N. (2004). Drought stress effect on carbohydrate concentration in soybean leaves and pods during early reproductive development: Its implication in altering pod set. *Field Crops Research*, 86(1), 1-13, doi: https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00165-5.

Loggini, B., Scartazza, A., Brugnoli, E. and Navari-Izzo, F. (1999). Antioxidative defense system, pigment composition, and photosynthetic efficiency in two wheat cultivars subjected to drought. *Plant Physiology,* 119(3), 1091-1100, doi: https://doi.org/10.1104/pp.119.3.1091.

Manavalan, L.P., Guttikonda, S.K., Tran, L.S.P. and Nguyen, H.T. (2009). Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. *Plant and Cell Physiology,* 50(7), 1260-1276, doi: https://doi.org/10.1093/pcp/pcp082.

Mubarik, N., Iqbal, A., Munir I. and Arif, M. (2018). Alleviation of adverse effects of water stress on *Zea mays* (Cv. Azam) by exogenous application of $CaCl_2$. *Sarhad Journal of Agriculture*, 34(2), 327-333, doi: https://doi.org/10.17582/journal.sja/2018/34.2.327.333.

Munne-Bosch, S. and Alegre, L. (2000). Changes in carotenoids, tocopherols and diterpenes during drought and recovery, and the biological significance of chlorophyll loss in *Rosmarinus offcinalis* plants. *Planta,* 210(6), 925-931, doi: https://doi.org/10.1007/s004250050699.

Mutava, R.N., Prince, S.J.K., Syed, N.H., Song, L., Valliyodan, B., Chen, W. and Nguyen, H.T. (2015). Understanding abiotic stress tolerance mechanisms in soybean: A comparative evaluation of soybean response to drought and flooding stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 86, 109-120, doi: https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.11.010.

Parida, A.K., Dagaonkar, V.S., Phalak, M.S., Umalkar, G.V. and Aurangabadkar, L.P. (2007). Alterations in photosynthetic pigments, protein and osmotic components in cotton genotypes subjected to short-term drought stress followed by recovery. *Plant Biotechnology Reports*, 1, 37-48, doi: https://doi.org/10.1007/s11816-006-0004-1.

Rosa, V.R., Santos, A.L.F., Silva, A.A., Sab, M.P.V., Germino, G.H., Cardoso, F.B. and Silva, M. A. (2021). Increased soybean tolerance to water deficiency through biostimulant based on fulvic acids and *Ascophyllum nodosum* (L.) seaweed extract. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158, 228-243, doi: https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.008.

Sapeta, H., Costa, J.M., Lourenço, T., Maroco, J., van der Linde, P. and Oliveira, M.M. (2013). Drought stress response in *Jatropha curcas*: Growth and Physiology. *Environmental and Experimental Botany*, 85, 76-84, doi: https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.08.012.

Sekmen, A.H., Ozgur, R., Uzilday, B. and Turkan, I. (2014). Reactive oxygen species scavenging capacities of cotton (*Gossypium hirsutum*) cultivars under combined drought and heat induced oxidative stress. *Environmental and Experimental Botany*, 99, 141-149, doi: https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.11.010.

Shah, W., Zaman, N., Ullah, S. and Nafees, M. (2022). Calcium chloride enhances growth and physio-biochemical performance of barley (*Hordeum vulgare* L.) under drought-induced stress regimes: A future perspective of climate change in the region. *Journal of Water Climate Change,* 13(9), 3357-3378, doi: https://doi.org/10.2166/wcc.2022.134.

Silva, E.C., Nogueira, R.J.M.C., Vale, F.H.A., Melo, N.F. and Araujo, F.P. (2009). Water relations and organic solutes production in four umbu tree (*Spondias tuberosa*) genotypes under intermittent drought. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 21(1), 43-53, doi: https://doi.org/10.1590/S1677-04202009000100006.

Somtrakoon, K. and Chouychai, W. (2022). Effect of salicylic acid and calcium chloride on growth of corn under water stress condition. *Journal of Agricultural Sciences-Sri Lanka*, 17(2), 350-359, doi: https://doi.org/10.4038/jas.v17i2.9747.

Upadhyaya, H., Panda, S.K. and Dutta, B.K. (2011). $CaCl_2$ improves post-drought recovery potential in *Camellia sinensis* (L) O. Kuntze. *Plant Cell Reports*, 30(4), 495-503, doi: https://doi.org/10.1007/s00299-010-0958-x.

Vurukonda, S.S.K.P., Vardharajula, S., Shrivastava, M. and SkZ, A. (2016). Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, 184, 13-24, doi: https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.12.003.

Wijewardana, C., Alsajri, F.A., Irby, J.T., Golden, B.R., Henry, W.B. and Reddy, K.R. (2019). Water deficit effects on soybean root morphology and early-season vigor. *Agronomy*, 9(12), doi: https://doi.org/10.3390/agronomy9120836.

Wijewardana, C., Reddy, K.R., Alsajri, F.A., Irby, J.T., Krutz, J. and Golden, B.R. (2018). Quantifying soil moisture deficit effects on soybean yield and yield component distribution patterns. *Irrigation Science*, 36(4-5), 241-255, doi: https://doi.org/10.1007/s00271-018-0580-1.

Xiang, J., Chen, Z., Wang, P., Yu, L. and Li, M. (2008). Effect of $CaCl_2$ treatment on the changing of drought related physiological and biochemical indexes of *Brassica napus. Frontiers of Agriculture in China*, 2(4), 423-427, doi: https://doi.org/10.1007/s11703-008-0056-9.

Xu, C., Li, X. and Zhang, L. (2013). The effect of calcium chloride on growth, photosynthesis and antioxidant responses of *Zoysia japonica* under drought conditions. *PLOS ONE,* 8(7), doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068214.

การใช้แป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์คุกกี้
Using the RD 43 Rice Flour to Replace Wheat Flour in Cookies

น้ำฝน ชูพูล[1*] รุ่งทิพย์ รัตนพล[1] และจินตนา เจริญเนตรกุล[1]
Namfon Chupool[1*] Rungtip Rattanapon[1] and Jintana Charoennatkul[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ต่อคุณลักษณะและประสาทสัมผัสของคุกกี้ โดยการทดแทนแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ในปริมาณร้อยละ 0 25 30 35 และ 40 โดยน้ำหนักของแป้งสาลี ผลการศึกษาพบว่าปริมาณแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คุกกี้มีค่าความสว่าง (L^*) เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ลดลง ขณะที่ค่าความแข็งลดลงตามระดับการทดแทนที่เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของคุกกี้ที่ทดแทนแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.42-0.43 และมีค่าความชื้นร้อยละ 2.37 แตกต่างจากสูตรควบคุม ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) กับผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน 30 คน พบว่าการทดแทนแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ในการทำคุกกี้ร้อยละ 30 มีคะแนนความชอบด้าน สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบรวมโดยรวมสูงกว่าตัวอย่างคุกกี้ที่ทดแทนแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ในอัตราส่วนอื่น อยู่ในเกณฑ์ชอบมาก

คำสำคัญ: คุกกี้ แป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ลักษณะทางกายภาพ ประสาทสัมผัส

[1] สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[*] Corresponding author e-mail: namfon.ch@rmutsv.ac.th

Received: 20 December 2022, Revised: 23 March 2023, Accepted: 9 May 2023

Abstract

This research aimed to investigate the effect of wheat flour substitution with RD 43 rice on the characteristics and sensory properties of cookies. RD 43 rice flour was substituted in the cookie formula at the quantity levels of 0, 25, 30, 35 and 40% by weight of wheat flour. The results found that the increased content of RD 43 rice flour significantly increased lightness (L*) whereas yellowness (a*) and redness (b*) decreased. Additionally, the hardness significantly decreased according to substitution levels of rice flour ($p < 0.05$). The water activity (a_w) of rice flour cookies substituted with RD 43 showed no significant differences ($p \geq 0.05$) with the values in the range of 0.42-0.43 and moisture content of 2.37% in contrast to the controlled formula. The sensory evaluation form based on 9-point hedonic scales done by 30 untrained panelists found that the substitution of wheat flour by 30% of RD 43 rice flour in making cookies had higher preferred scores for color, odor, taste, texture, and had the higher overall preferred score at a strongly preferred level than the cookies samples that substituted with RD 43 rice flour at other ratios.

Keywords: Cookies, RD 43 rice flour, Physical appearance, Sensory

บทนำ

ข้าว (*Oryza sativa*) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวจัดอยู่ในวงศ์หญ้า (Gramineae) สามารถเติบโตทั้งในสภาพที่มีและไม่มีน้ำขัง ข้าวจัดเป็นธัญพืชหลักที่สำคัญของประชากร โดยเฉพาะอย่างยิ่งประชากรในเอเชียที่ใช้บริโภคถึงร้อยละ 90 (อรอนงค์, 2547) นอกจากนั้นข้าวยังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยเป็นแหล่งอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานแก่ร่างกาย รูปแบบบริโภคข้าวมักบริโภคในรูปข้าวสวยและผลิตภัณฑ์จากข้าว เช่น การนำแป้งไปใช้ในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ขนมขบเคี้ยว และผลิตภัณฑ์ขนมไทย เป็นต้น ปัจจุบันกระแสการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ตลาดอาหารและเครื่องดื่มสุขภาพของไทยในปี พ.ศ. 2565 ที่ผ่านมามีแนวโน้มเติบโตต่อเนื่องเฉลี่ย 2.7 ต่อปี มีมูลค่าราว 213,099 ล้านบาท อย่างไรก็ตามปัจจัยสนับสนุนจากพฤติกรรมการใช้ชีวิตด้วยความเร่งรีบ ใช้เวลาในการทำงานมากขึ้น ทำให้ผู้บริโภคมีความเครียดมากขึ้น ไม่มีเวลาในการออกกำลังกาย ขณะเดียวกันก็ตระหนักถึงการมีสุขภาพที่ดีทำให้ผู้บริโภคเสาะแสวงหาสินค้าเพื่อสุขภาพและความเป็นอยู่ที่ดี นอกจากนี้ภาครัฐก็ให้การส่งเสริมให้คนไทยหันมาดูแลใส่ใจสุขภาพและปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการรับประทานอาหาร โดยการหลีกเลี่ยงหรือลดการบริโภคอาหารที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น น้ำตาลและไขมัน (ยงยุทธ, 2561) ส่งผลให้ผู้บริโภคใส่ใจในการบริโภคอาหารมากขึ้น มีการบริโภคข้าวในรูปแบบของข้าวกล้องหรือข้าวโภชนาการสูง (high nutrious rice) เนื่องจากข้าวโภชนาการสูงมีคุณค่าทางอาหารในปริมาณสูงกว่าข้าวทั่วไป มีสารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น สารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยชะลอการเสื่อมของเซลล์

ลดความเสี่ยงการเกิดมะเร็ง ธาตุเหล็ก ธาตุสังกะสี และวิตามิน (บี 1 บี 2 และ บี 3) โอเมก้า (3 6 และ 9) และสารอะซิเลตสเตอริล กลูโคไซด์ (acylated steryl glucosides) ช่วยการทำงานของอินซูลิน และควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด เป็นต้น (กรมการข้าว, 2564)

ข้าวสายพันธุ์ กข. 43 เป็นข้าวไม่ไวต่อช่วงแสง ต้านทานโรคไหม้ คุณภาพการสีดี สามารถนำมาทำเป็นข้าวขาวร้อยละ 100 ได้ เมื่อหุงต้มจะมีลักษณะนุ่ม มีกลิ่นหอม มีอายุการเก็บเกี่ยว 95 วัน ด้วยวิธีหว่านนาตมหรือ 105 วัน โดยวิธีปักดำ โดยให้ผลผลิตเฉลี่ย 560 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งถือเป็นทางเลือกให้เกษตรกรสำหรับปลูกข้าวเพื่อเลี่ยงความเสี่ยงจากน้ำท่วม ข้าวสายพันธุ์ กข. 43 มีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีค่าดัชนีน้ำตาลเท่ากับ 57.5 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเจ้าและข้าวเหนียว พบว่าข้าวเจ้ามีค่าดัชนีน้ำตาลเท่ากับ 87 และข้าวเหนียวมีดัชนีน้ำตาลเท่ากับ 98 นอกจากนี้ยังมีปริมาณอะไมโลส (amylose) (ร้อยละ 18.82) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ ทำให้ข้าวสายพันธุ์ กข. 43 มีความอ่อนนุ่ม (กรมการข้าว, 2564) และเป็นข้าวโภชนาการสูงที่มีคุณค่าสารอาหารครบถ้วน เมื่อบริโภคเข้าสู่ร่างกายสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการเจริญเติบโตและซ่อมแซมส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย อีกทั้งยังสามารถลดความเสี่ยงของโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง โดยการวิจัยของศุภมาตร (2554) พบว่าความเสี่ยงของการเกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง ประกอบด้วยโรคเบาหวานและโรคความดันโลหิตสูงมาจากการบริโภคอาหารมากที่สุด รองลงมาคืออ้วนและออกกำลังกายน้อย ซึ่งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 เป็นข้าวโภชนาการสูง จัดอยู่ในข้าวกลุ่มสีครีม มีน้ำตาลต่ำ เมื่อสุกเหนียวนุ่ม มีกลิ่นหอมอ่อน ๆ จุดเด่นของข้าวสายพันธุ์ กข. 43 คือ เป็นแป้งข้าวสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าข้าวพันธุ์อื่น ๆ และมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ ทำให้เมื่อรับประทานเข้าไปแล้วร่างกายจะย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลได้ช้าลง ส่งผลให้ระดับน้ำตาลในเลือดไม่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและช่วยไม่ให้หิวง่าย จึงเหมาะกับผู้บริโภคที่เป็นโรคเบาหวาน (ประเวศ, 2562) หรือผู้ที่ต้องการลดปริมาณน้ำตาลสอดคล้องกับปัจจุบันที่ประชาชนใส่ใจสุขภาพและตระหนักถึงปัญหาด้านสุขภาพ จึงส่งผลต่อการเลือกบริโภคอาหาร ขนมหรือของว่างต่าง ๆ อย่างพิถีพิถันมากขึ้น ซึ่งคุกกี้เป็นผลิตภัณฑ์ขนมอบที่ได้รับความนิยมในการบริโภค มีลักษณะเนื้อสัมผัสกรอบร่วน รูปร่างแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของคุกกี้ และส่วนประกอบหลัก คือ แป้งสาลี น้ำตาล เนย (จิตธนา และอรอนงค์, 2553) โดยแป้งที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ขนมอบส่วนใหญ่จะใช้แป้งสาลี ซึ่งเป็นแป้งที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูงเป็นส่วนประกอบ ซึ่งอาจก่อให้เกิดระดับน้ำตาลสูงสำหรับผู้บริโภคบางกลุ่ม ดังนั้นการนำแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 มาทดแทนแป้งสาลีในคุกกี้จึงเป็นการเพิ่มโอกาสในการใช้ประโยชน์จากข้าวของไทยที่มีประโยชน์ต่อร่างกายและช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการจากคุณสมบัติของข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงสนใจนำข้าวสายพันธุ์ กข. 43 มาทำเป็นผงแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 เพื่อใช้ทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์คุกกี้ให้เป็นที่ยอมรับทั้งในด้านสุขภาพ และศึกษาคุณภาพทางกายภาพของคุกกี้ที่ใช้แป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ทดแทนแป้งสาลี รวมถึงการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้บริโภคที่รักสุขภาพและสามารถเป็นทางเลือกให้แก่ผู้บริโภคได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43

การเตรียมแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ดัดแปลงจากวิธีการของนรินทร์ (2561) โดยนำข้าวสายพันธุ์ กข. 43 มาปั่นให้ละเอียดที่ความเร็วระดับ 3 เป็นเวลา 2 นาที ด้วยเครื่องปั่นอเนกประสงค์ ยี่ห้อ Toshiba รุ่น BL-T60 ประเทศไทย และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 120 เมช (mesh) นำมาบรรจุในถุง high density polyethylene (HDPE) แล้วปิดผนึกถุงด้วยระบบสุญญากาศ

2. การหาปริมาณแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์คุกกี้

เตรียมคุกกี้จากสูตรพื้นฐานที่ดัดแปลงจากวิภาวัน (2549) ซึ่งมีส่วนประกอบ ได้แก่ แป้งสาลีอเนกประสงค์ (ร้อยละ 43.63) เนยสดชนิดจืดแช่เย็น (ร้อยละ 20.72) เนยขาว (ร้อยละ 8.72) น้ำตาลทรายขาว (ร้อยละ 20.72) เกลือป่น (ร้อยละ 2.18) ไข่ไก่เบอร์ 2 (ร้อยละ 3.27) และกลิ่นวานิลลา (ร้อยละ 0.26) ใช้แป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ในปริมาณร้อยละ 0 25 30 35 และ 40 โดยน้ำหนักของแป้งสาลี โดยเตรียมส่วนผสมจากการตีเนยกับน้ำตาลให้ขึ้นฟูด้วยความเร็วต่ำ เป็นเวลา 3 นาที เติมเกลือป่นและผงฟู แล้วจึงตีให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมอาหาร ยี่ห้อ Kitchen aid รุ่น 5K5SSWH ประเทศอังกฤษ เติมไข่ไก่และตีให้เข้ากัน เติมกลิ่นวานิลลาและเทแป้งผสมทั้งสองชนิด โดยใช้ความเร็วปานกลางจนเป็นเนื้อเดียวกัน นำส่วนผสมคุกกี้มากดเป็นรูปร่างรูปทรงดาวแบบบิด กดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร หยอดในถาดที่ทาเนยขาว โดยแต่ละชิ้นห่างกันประมาณ 1 นิ้ว นำเข้าอบ (เตาอบไฟฟ้า ยี่ห้อ Mallory รุ่น Nang Fang ประเทศจีน) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที นำออกจากเตา พักให้เย็น แล้วบรรจุในกระปุก polyethylene terephthalate (PET) ขนาด 6.5 x 8 เซนติเมตร พร้อมปิดฝาให้สนิท จากนั้นประเมินความชอบทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) โดยใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 30 คน คัดเลือกสูตรคุกกี้ที่ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบสูงสุด

3. การวิเคราะห์คุณลักษณะของคุกกี้

วิเคราะห์คุณลักษณะของคุกกี้ ได้แก่ ค่าสี ด้วยเครื่องวัดสี (color flex EZ) รุ่น Hunter Lab ประเทศสหรัฐอเมริกา และปริมาณน้ำอิสระด้วยเครื่องวัด (aqua lab) รุ่น 4TE ประเทศสหรัฐอเมริกา ตามวิธีของ Helrich (1999) ค่าความชื้นตามวิธีของ Helrich (1999) วัดค่าความแข็งโดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (texture analyzer) รุ่น TA.XT plus ประเทศอังกฤษ ใช้หัววัดแบบ cylinder probe ขนาด 25 มิลลิเมตร แรงกด 5 กิโลกรัม ความเร็วในการกด 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะกดจากผิวคุกกี้ 5 มิลลิเมตร ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วัดค่าซ้ำละ 5 ตัวอย่าง รายงานค่าความแข็งดัดแปลงตามวิธีของดุลจิรา (2560)

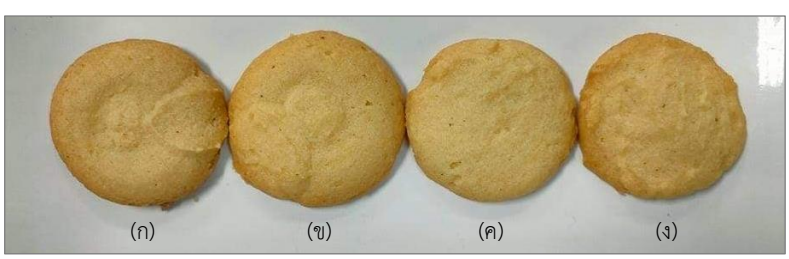
4. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์คุณลักษณะของคุกกี้ใช้แผนการทดลองแบบ complete randomized design (CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วัดค่าซ้ำละ 5 ตัวอย่าง คำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ส่วนการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสใช้แผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อคสมบูรณ์ randomized complete block design (RCBD) ประมวลผลโดยใช้โปรแกรม SPSS for windows (version 17, Chicago, IL, USA) วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) และ

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัย

จากผลการศึกษาการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ในการผลิตคุกกี้ พบว่าค่าความสว่างของคุกกี้สูตรควบคุม (โดยใช้แป้งสาลีอเนกประสงค์ ตราว่าว ร้อยละ 100) มีค่าน้อยที่สุดและมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการทดแทนแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะปรากฏในด้านสีของผลิตภัณฑ์คุกกี้ที่ใช้แป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ในปริมาณต่างกัน ดังภาพที่ 1 นอกจากนี้ปริมาณการทดแทนแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดงและค่าความเป็นสีเหลืองมีค่าลดลง ดังตารางที่ 1 เนื่องจากลักษณะของแป้งสาลีอเนกประสงค์จะมีสีขาวครีม ในขณะที่แป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 มีสีขาว จึงส่งผลให้คุกกี้จากแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 มีสีเข้มน้อยกว่าคุกกี้สูตรที่ไม่มีแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 และในขณะการอบคุกกี้จะเกิดสีน้ำตาลของคุกกี้ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาสีน้ำตาลโดยไม่ใช้เอมไซม์เป็นปฏิกิริยาของกรดอะมิโนและโปรตีนที่มีต่อน้ำตาลรีดิวซ์ที่มีต่อหมู่คาร์บอนิลอิสระ ซึ่งในคุกกี้มีองค์ประกอบของสารทั้งสองชนิดอยู่ (อริสรา และอรอุมาส, 2550) ซึ่งในแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 มีโปรตีนที่มีต่อน้ำตาลรีดิวซ์น้อยกว่าแป้งสาลีจึงทำให้คุกกี้ที่ทำจากแป้งข้าวมีค่าความสว่างมากกว่า



ภาพที่ 1 ลักษณะปรากฏของคุกกี้ที่ใช้แป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 25 (ก) 30 (2) 35 (ค) และ 40 (ง) โดยน้ำหนักของแป้งสาลี

ตารางที่ 1 ผลของค่าสีคุกกี้ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43

อัตราส่วนการทดแทนแป้งสาลี : แป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43	ค่าสี		
	ความสว่าง (L*)	ความเป็นสีแดง (a*)	ความเป็นสีเหลือง (b*)
100:00	62.41±1.00^{c}	7.56±0.63^{a}	30.65±0.87^{a}
75:25	63.33±0.15^{c}	7.52±0.13^{a}	29.47±0.22^{b}
70:30	65.97±0.18^{b}	7.04±0.28^{b}	28.72±0.70^{c}
65:35	66.92±0.21^{b}	6.68±0.12^{c}	28.37±0.63^{c}
60:40	68.51±0.25^{a}	6.42±0.19^{c}	28.33±1.21^{c}

หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)
- ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการศึกษาคุณสมบัติของคุกกี้ที่ใช้แป้งข้าวสายพันธ์ กข. 43 เมื่อนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์คุกกี้ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าค่าปริมาณน้ำอิสระของคุกกี้ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.43-0.46 เมื่อปริมาณการทดแทนแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์คุกกี้มีปริมาณความชื้นลดลงและมีความแข็งลดลง เนื่องจากแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อการลดลงของปริมาณกลูเตน (gluten) ในผลิตภัณฑ์คุกกี้ ส่งผลให้การสร้างโครงข่ายของแป้งที่สามารถกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์และสร้างพันธะไดซัลไฟต์ (disulfide bond) ลดลง (สมหวัง และคณะ, 2562) ซึ่งในแป้งสาลีประกอบด้วยโปรตีนกลูเตนิน (glutenin) และไกลอะดิน (gliadin) เมื่อผสมกับน้ำหรือของเหลวจะเกิดการสร้างพันธะไดซัลไฟต์ จะได้กลูเตนที่มีลักษณะเหนียว ยืดหยุ่นได้ดีและไม่ละลายน้ำ มีลักษณะเป็นโครงข่ายเพื่อดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความนุ่มและคงตัว ซึ่งแป้งสาลีมีค่าอะไมโลสร้อยละ 28 (กล้าณรงค์, 2550) สูงกว่าแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ที่มีค่าอะไมโลสร้อยละ 18.82 จึงทำให้โครงร่างแหของแป้งสาลียึดเกาะกันแน่น ซึ่งการใช้แป้งข้าว กข. 43 ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความแข็งของคุกกี้ลดลงเนื่องจากแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ที่ใช้ทดแทนแป้งสาลีจะมีผลทำให้เนื้อสัมผัสของคุกกี้ร่วน เปราะ และแตกหักได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อริสรา และอรอุมา (2550) พบว่าค่าแรงกดของคุกกี้ข้าวหอมนิลที่ร้อยละการทดแทนที่ 0 มีค่ามากกว่าผลิตภัณฑ์คุกกี้สูตรที่ทดแทนแป้งข้าวหอมนิลร้อยละ 50 ทั้งนี้เป็นผลมาจากแป้งสาลีมีค่าอะไมโลสสูงกว่าแป้งข้าวหอมนิล จึงมีผลทำให้โครงร่างแหของแป้งสาลียึดเกาะกันแน่น คุกกี้ที่ได้ในสูตรมาตรฐานจึงมีความแข็งสูงกว่าคุกกี้ที่ทดแทนด้วยแป้งข้าวหอมนิลร้อยละ 50 เช่นเดียวกับรายงานของจารุวรรณ และจันทร์เฉิดฉาย (2560) พบว่าเมื่อนำแป้งข้าวกล้องทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์เค้กกล้วยหอม เปรียบเทียบกับเค้กกล้วยหอมที่ไม่มีการทดแทน พบว่าค่าความยืดหยุ่น (springiness) การเกาะติด (cohesiveness) ความเคี้ยวได้ (chewiness) และความหยุ่น (resilience) มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวกล้องแสดงว่าการใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งสาลีทำให้การคืนตัว การเกาะรวมตัวกันลดลง ความยากในการเคี้ยว ความยืดหยุ่นลดลง เนื้อเค้กร่วนมากขึ้น เนื่องจากการทดแทนด้วยแป้งข้าวหอมมะลิทำให้ปริมาณกลูเตนในส่วนผสมเค้กลดลง ทำให้ความสามารถในการกักเก็บอากาศและความคงตัวของอิมัลชันลดลง เนื้อเค้กมีลักษณะร่วนและมีเนื้อสัมผัสที่ไม่สม่ำเสมอ

ตารางที่ 2 ผลคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของคุกกี้ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43

อัตราส่วนการทดแทนแป้งสาลี : แป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43	ปริมาณน้ำอิสระ (aw)^{ns}	ปริมาณความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	ความแข็ง (นิวตัน)
100:00	0.43±0.01	3.41±0.08^{a}	33.42±1.00^{a}
75:25	0.42±0.05	2.38±0.02^{b}	27.38±0.22^{b}
70:30	0.45±0.02	2.37±0.05^{b}	23.17±0.18^{c}
65:35	0.44±0.02	2.36±0.03^{b}	12.73±0.90^{d}
60:40	0.46±0.03	2.35±0.10^{b}	8.98±0.13^{e}

หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)
- ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)
- ns ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสที่ผู้ทดสอบมีต่อคุกกี้สูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ระดับแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 3 ผลการศึกษา พบว่าคะแนนความชอบในทุกคุณลักษณะของคุกกี้ที่ทดแทนแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ร้อยละ 30 มีคะแนนสูงสุด ($p < 0.05$) และเมื่อปริมาณการทดแทนแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 เพิ่มขึ้น (มากกว่าร้อยละ 30) จะส่งผลต่อคะแนนความชอบเฉลี่ยในคุณลักษณะด้านสีที่มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้คะแนนความชอบเฉลี่ยในคุณลักษณะด้านสีที่ลดลงเนื่องจากแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 มีสีขาวกว่าแป้งสาลีอเนกประสงค์ เมื่อนำมาทดแทนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจึงมีผลทำให้คุกกี้มีสีอ่อนลง ซึ่งผลการประเมินสอดคล้องกับค่าสีของคุกกี้ โดยมีค่าความสว่างลดลง เมื่อปริมาณแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าระดับการทดแทนแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ในผลิตภัณฑ์คุกกี้มีผลต่อการยอมรับของผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัส นอกจากนี้การทดแทนแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ร้อยละ 30 เป็นปริมาณที่ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสสูงสุด ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงคัดเลือกสูตร 3 ที่อัตราส่วนแป้งสาลี : แป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 เท่ากับ 70:30 ซึ่งมีส่วนผสมประกอบด้วย แป้งสาลีอเนกประสงค์ เนยสดชนิดจืดแช่เย็น เนยขาว น้ำตาลทรายขาว เกลือป่น ไข่ไก่ เบอร์ 2 และกลิ่นวานิลลา

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของคุกกี้ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43

อัตราส่วนแป้งสาลี : แป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43	คุณลักษณะ					
	ลักษณะปรากฏ^{ns}	สี	กลิ่น^{ns}	รสชาติ^{ns}	เนื้อสัมผัส^{ns}	ความชอบโดยรวม^{ns}
100:00	7.62±0.82	7.58±0.11^{b}	7.80±0.10	7.70±0.19	7.59±1.14	7.95±1.03
75:25	7.93±0.85	7.80±0.81^{ab}	7.87±1.01	7.73±0.91	7.60±1.03	7.93±0.91
70:30	7.96±1.01	8.13±0.77^{a}	7.98±1.14	7.80±0.85	7.97±1.19	8.07±0.98
65:35	7.60±1.33	7.70±1.00^{b}	7.93±0.96	7.72±1.01	7.68±1.33	7.80±1.06
60:40	7.73±0.91	7.63±1.03^{b}	7.90±1.01	7.71±1.16	7.60±1.16	7.77±0.87

หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)
- ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)
- ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

การอภิปรายผลการวิจัย

จากการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ในการทำคุกกี้โดยการใช้แป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ร้อยละ 0 25 30 35 และ 40 (โดยน้ำหนักของแป้งสาลี) พบว่าการให้ความร้อนในขณะอบคุกกี้จะทำให้คุกกี้มีสีน้ำตาล เนื่องจากปฏิกิริยาสีน้ำตาลโดยไม่ใช้เอมไซม์เป็นปฏิกิริยาของกรดอะมิโนและโปรตีนที่มีต่อรีดิวซ์ที่มีต่อหมู่คาร์บอนิลอิสระ ซึ่งในคุกกี้มีองค์ระกอบของสารทั้งสองชนิดอยู่จึงทำให้มีผลต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์ (ดุลจิรา และคณะ, 2560) โดยการทดแทนแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความสว่างเพิ่มขึ้น และโปรตีนกลูเตนินในแป้งสาลีมีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างของโด (dough) ในผลิตภัณฑ์ขนมอบ เมื่อใช้แป้งชนิดอื่นที่ไม่มีกลูเตนเป็นองค์ประกอบจะทำให้โดที่ได้มีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรง เนื่องจากแป้งสาลีที่ลดลงทำให้กลูเตนซึ่งเกิดจากการรวมตัวของไกลอะดินและกลูเตนินมีปริมาณลดลง จึงทำให้ความสามารถในการกักเก็บก๊าซต่ำลง (Dhaka and Khatkar, 2015) การใช้แป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 เพิ่มขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์คุกกี้มีความแข็งลดลง เนื้อสัมผัสร่วน เปราะและแตกหักได้ง่าย แต่ยังไม่ส่งผลต่อความชอบของผู้ทดสอบที่ให้คะแนนความชอบคุกกี้ที่ทดแทนแป้งข้าวสาลีด้วยแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ร้อยละ 30 มากกว่าปริมาณอื่น เมื่อรับประทานยังคงยอมรับได้ในส่วนของเนื้อสัมผัสและคุณลักษณะด้านอื่น ๆ

สรุปผลการวิจัย

ผลการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ต่อคุณลักษณะและประสาทสัมผัสของคุกกี้ พบว่าการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ร้อยละ 30 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นปริมาณที่ใช้ทดแทนแป้งสาลีได้มากในระดับที่ได้รับการยอมรับสูงสุด ผลจากการวิจัยข้างต้น สามารถนำแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์คุกกี้ได้และเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ขนมอบอื่น ๆ ที่ต้องการทดแทนปริมาณแป้งสาลีรวมถึงเพิ่มมูลค่าให้แป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 และยังสามารถเป็นทางเลือกให้แก่ผู้บริโภคได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์และผู้ทรงคุณวุฒิในหลักสูตรสาขาวิชาอาหารและโภชนาการ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตสงขลา สำหรับคำแนะนำและข้อเสนอแนะเพื่อให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณนักศึกษาและนักวิทยาศาสตร์ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ในการทำวิจัยครั้งนี้

ข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43 ควรมีรูปแบบการทำแป้งให้มีความละเอียดหรือใกล้เคียงแป้งเชิงพาณิชย์ การบีบคุกกี้ควรมีขนาดเท่ากันและเพิ่มเติมการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์คุกกี้และคุณสมบัติของแป้งข้าวสายพันธุ์ กข. 43

เอกสารอ้างอิง

กรมการข้าว. (2564). *ข้าว กข. 43*. สืบค้นเมื่อ 13 ธันวาคม 2564, จาก: https://www.thairicedb.com/productintro-detail.php.

กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2550). *เทคโนโลยีของแป้ง*. (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จารุวรรณ นามวัฒน์ และจันทร์เฉิดฉาย สังเกตกิจ. (2560). การทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวกล้องในเค้กกล้วยหอม. *การประชุมวิชาการระดับชาตินวัตกรรมและเทคโนโลยีวิชาการ 2017 “วิจัยจากองค์ความรู้สู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน”*. สุรินทร์.

จิตธนา แจ่มเมฆ และอรอนงค์ นัยวิกุล. (2553). *เบเกอรีเทคโนโลยีเบื้องต้น*. (พิมพ์ครั้งที่ 10). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ดุลจิรา สุขบุญญสถิตย์ บุษยา เรืองศักดิ์ วาทิตย์ ศรีทอง และโสภิดา เชื้อขุดทด. (2560). ผลของการใช้แป้งมันเทศทดแทนแป้งสาลีต่อคุณลักษณะของคุกกี้. *แก่นเกษตร*, 45(พิเศษ 1), 1060-1065.

นรินทร์ เจริญพันธ์. (2561). การผลิตเค้กลูกชุบจากแป้งปลายข้าวหอมมะลิไทย. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 27(5), 915-923.

ประเวศ แสงเพชร. (2562). *ข้าวพันธุ์ กข 43 เหตุใดจึงเหมาะกับผู้ป่วยโรคเบาหวาน*. สืบค้นเมื่อ 12 ธันวาคม 2565, จาก: https://www.technologychaoban.com/ bullet-newstoday/ article_93009.

ยงยุทธ เสาวพฤกษ์. (2561). *แนวโน้มอาหารและเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ*. สืบค้นเมื่อ 6 พฤษภาคม 2566, จาก: https://www.prachachat.net/columns/news-268743.

วิภาวัน จุลยา. (2549). *คุกกี้ & ช็อกโกแลต.* (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: เพชรประกาย.

ศุภมาตร ปาลรังสี. (2554). การรับรู้โอกาสเสี่ยงและความรุนแรงของโรคเบาหวานชนิดที่ 2 โรคความดันโลหิตสูงและโรคหัวใจขาดเลือดสำหรับบุคคลวัยผู้ใหญ่วัยผู้สูงอายุจังหวัดนครศรีธรรมราช. *วิชชา วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 30(1), 193-208.

สมหวัง เล็กจริง ปารมี หนูนิ่ม สุจินดา บุตตะจีน และปัทมา จันทวงศ์. (2562). ผลของการทดแทนแป้งข้าวสาลีด้วยแป้งข้าวกล้องสังข์หยดต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพและประสาทสัมผัสในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว. *แก่นเกษตร*, 47(พิเศษ 1), 679-684.

อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). *ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อริสรา รอดมุ้ย และอรอุมา จิตรวโรภาส. (2550). การผลิตคุกกี้โดยใช้แป้งข้าวหอมนิลทดแทนแป้งสาลีบางส่วน. *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม*, 3(1), 37-43.

Helrich, K. (1995). *Official methods of analysis of the association of official analytical chemists.* (15th ed). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.

Dhaka, V., and Khatkar, B.S. (2015). Effect of gliadin/glutenin and HMS-GS/LMW-GS ration on dough rhelogical properties and bread-making potential of wheat varieties. *Journal of Food Quality,* 38(2)*,* 71-82, doi: https://doi.org/10.1111/jfq.12122.

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับสำหรับผู้นิพนธ์ เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช จัดทำขึ้นเพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่บทความวิจัย (research article) และบทความวิชาการ (academic article) ของคณาจารย์ บุคลากร นักศึกษา ภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยฯ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะรับตีพิมพ์บทความในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประกอบด้วย ด้านวิทยาศาสตร์กายภาพ วิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งมีกลุ่มเป้าหมายคือคณาจารย์ นักศึกษา และนักวิจัยทั้งในและนอกสถาบัน ทั้งนี้วารสารมีกำหนดตีพิมพ์เผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 ในเดือนมกราคม-มิถุนายน และฉบับที่ 2 ในเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม

บทความทุกบทความที่ได้รับการพิจารณาลงตีพิมพ์ในวารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช **“ต้องไม่เคยได้รับการตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ใดมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างการเสนอเพื่อพิจารณาเผยแพร่ในวารสารฉบับอื่น”** พร้อมทั้งได้รับการพิจารณาจากผู้ประเมินอิสระ (peer review) ที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง อย่างน้อย 3 ท่าน แบบผู้ประเมินอิสระและผู้แต่งไม่ทราบชื่อกันและกัน (double-blind review) และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ **ทั้งนี้ บทความอาจถูกดัดแปลง แก้ไขคำ สำนวน รูปแบบการอ้างอิง รูปแบบการนำเสนอ และอื่น ๆ (ซึ่งไม่เกี่ยวกับเนื้อหาหรือสาระสำคัญ) ตามที่กองบรรณาธิการเห็นสมควร และผู้เขียนต้องรับผิดชอบในเนื้อหาของบทความ โดยกองบรรณาธิการวารสารวิชชา และมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ไม่จำเป็นต้องรับผิดชอบใด ๆ**

การเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับ

- พิมพ์เป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้
- การใช้ภาษาไทยให้ยึดหลักการใช้คำศัพท์และการเขียนทับศัพท์ภาษาอังกฤษตามหลักของราชบัณฑิตยสถาน ควรหลีกเลี่ยงการเขียนภาษาอังกฤษปนกับภาษาไทยในข้อความ ยกเว้นกรณีจำเป็น เช่น ศัพท์ทางวิชาการที่ไม่มีคำแปลหรือคำที่ใช้แล้วทำให้เข้าใจง่ายขึ้น คำศัพท์ภาษาอังกฤษที่เขียนปนภาษาไทยให้ใช้ตัวเล็กทั้งหมด ยกเว้นชื่อเฉพาะ
- สำหรับต้นฉบับภาษาอังกฤษควรได้รับการตรวจสอบความถูกต้องด้านการใช้ภาษาจากผู้เชี่ยวชาญด้านภาษาเป็นเบื้องต้นก่อน
- ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 16 หน้า รวมตาราง ภาพและเอกสารอ้างอิง ควรระบุเลขหน้าให้ชัดเจนและจัดให้อยู่ในรูปแบบเดียวกันทั้งฉบับ

2. รายละเอียดตัวอักษรและรูปแบบการพิมพ์

- จัดพิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word ขนาดของต้นฉบับใช้กระดาษขนาด Executive (18.41 × 26.67 เซนติเมตร)
- ตั้งค่าหน้ากระดาษสำหรับการพิมพ์
  ด้านบน 2.5 เซนติเมตร ด้านล่าง 2.5 เซนติเมตร
  ด้านซ้าย 2.3 เซนติเมตร ด้านขวา 2.5 เซนติเมตร
- พิมพ์คอลัมน์เดียวกระจายเต็มบรรทัด
- ตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาดตัวอักษร 15

3. ส่วนประกอบในบทความ

3.1 บทความวิจัย (research article) เป็นบทความที่เป็นผลงานต่อเนื่อง สกัดมาจากงานวิจัยที่เสร็จสมบูรณ์แล้วซึ่งผู้เขียนได้ดำเนินการด้วยตนเอง ประมวลสรุปกระบวนการวิจัยให้มีความกระชับและสั้น

3.1.1 ส่วนประกอบตอนต้น

➢ ชื่อเรื่อง (title) ควรสั้น กะทัดรัด ไม่ยาวจนเกินไป ให้เขียนชื่อเรื่องเป็นภาษาไทยก่อนแล้วตามด้วยภาษาอังกฤษในบรรทัดถัดไป

➢ ชื่อผู้เขียนบทความ (authors and co-authors) ให้ระบุชื่อเต็ม-นามสกุลเต็มทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ สำหรับภาษาอังกฤษใช้อักษรตัวพิมพ์ใหญ่เฉพาะอักษรตัวแรกของชื่อตัวและนามสกุล ถ้ามีผู้วิจัยหลายคนให้ใส่ลำดับเลข พร้อมระบุที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้และชื่อหน่วยงานของผู้วิจัยที่ส่วนล่างของหน้าแรก และให้ใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ที่ตำแหน่งผู้ประสานงานหลัก (corresponding author) พร้อมทั้งระบุอีเมลสำหรับติดต่อ (e-mail: address)

➢ บทคัดย่อ (abstract) ให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ความยาวไม่เกินอย่างละ 300 คำ บทคัดย่อที่เขียนควรสั้น ตรงประเด็น และให้สาระสำคัญเท่านั้น โดยเรียงลำดับบทคัดย่อภาษาไทยก่อนตามด้วยบทคัดย่อภาษาอังกฤษ

➢ คำสำคัญ (keywords) ให้ใช้คำที่ปรากฏอยู่ในเนื้อเรื่องซึ่งเป็นตัวแทนบอกวิธีการวิจัย ประเด็นที่วิจัย ผลการวิจัย การใช้ประโยชน์หรือสถานที่ที่ทำวิจัย คำสำคัญนี้ให้เขียนทั้งในภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ในตอนท้ายบทคัดย่อของแต่ละภาษาอย่างละไม่เกิน 5 คำ

3.1.2 เนื้อหาในบทความวิจัย ให้มีองค์ประกอบดังนี้

➢ บทนำ (introduction) อธิบายถึงที่มา ความสำคัญของปัญหา และเหตุผลที่นำไปสู่การศึกษาวิจัย ให้ข้อมูลทางวิชาการที่มีการตรวจเอกสาร (literature review) โดยระบุถึงแหล่งที่มาของข้อมูล (อ้างอิง) และจุดมุ่งหมายที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งวัตถุประสงค์ของการวิจัย

➢ วิธีดำเนินการวิจัย (research methods) อธิบายกระบวนการดำเนินการวิจัย โดยบอกรายละเอียดวัสดุ วิธีการศึกษา สิ่งที่นำมาศึกษา จำนวน ลักษณะเฉพาะของตัวอย่างที่ศึกษา ตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษา อธิบายแบบแผนการวิจัย การสุ่มตัวอย่าง วิธีการเก็บข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล และสถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐาน

➢ ผลการวิจัย (results) รายงานผลการวิจัยให้ได้ใจความชัดเจนและตรงประเด็นโดยยึดแนวทางตามวัตถุประสงค์เป็นหลัก ควรอธิบายผลการวิจัยด้วยคำบรรยายเป็นหลัก แต่ถ้ามีตัวเลขหรือตัวแปรมากควรนำเสนอเป็นภาพและตาราง แทรกในเนื้อหา พร้อมอธิบายผลการวิจัยให้ได้สาระครบถ้วน

➢ การอภิปรายผลการวิจัย (discussion) เป็นการชี้แจงผลการวิจัยว่าตรงกับวัตถุประสงค์หรือสมมติฐานของการวิจัย สอดคล้องหรือขัดแย้งกับผลการวิจัยของผู้อื่นที่มีอยู่ก่อนหรือไม่ อย่างไร เหตุผลใดจึงเป็นเช่นนั้น และให้จบด้วยข้อเสนอแนะที่จะนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ หรือทิ้งประเด็นคำถามการวิจัย ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไป

➢ สรุปผลการวิจัย (conclusion) สรุปผลการวิจัยให้ได้ใจความชัดเจนและตรงประเด็น

➢ ข้อเสนอแนะ (suggestion) (ถ้ามี)

➢ กิตติกรรมประกาศ (acknowledgements) ให้ระบุว่างานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนหรือความช่วยเหลือจากองค์กรใด และบุคคลใดบ้าง

➢ เอกสารอ้างอิง (references) ให้ระบุเฉพาะเอกสารที่ผู้เขียนบทความได้นำมาอ้างอิงในบทความวิจัยอย่างครบถ้วน โดยระบุรายละเอียดและใช้รูปแบบการเขียนที่ถูกต้องครบถ้วน (ตามข้อ 4) จัดเรียงลำดับตามตัวอักษร โดยเรียงเอกสารภาษาไทยก่อนและตามด้วยเอกสารภาษาอังกฤษ

3.2 บทความทางวิชาการ (academic article) เป็นบทความที่ผู้เขียนได้เรียบเรียงโดยศึกษาค้นคว้าจากเอกสาร งานแปล และผลงานจากประสบการณ์ของผู้เขียนหรือได้รับการถ่ายทอดจากผู้อื่น มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ องค์ความรู้ การเสนอความคิดเห็นที่มีคุณค่าและเป็นประโยชน์ทางวิชาการของสาขาต่าง ๆ

3.2.1 ส่วนประกอบตอนต้น

➢ ชื่อเรื่อง (title) ควรสั้นกะทัดรัด ไม่ยาวจนเกินไป ให้เขียนชื่อเรื่องเป็นภาษาไทยก่อนแล้วตามด้วยภาษาอังกฤษในบรรทัดถัดไป

➢ ชื่อผู้เขียน (authors and co-authors) ให้ระบุชื่อเต็ม-นามสกุลเต็มทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ สำหรับภาษาอังกฤษใช้อักษรตัวพิมพ์ใหญ่เฉพาะอักษรตัวแรกของชื่อตัวและนามสกุล ถ้ามีผู้วิจัยหลายคนให้ใส่ลำดับเลข พร้อมระบุที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ และชื่อหน่วยงานของผู้วิจัยที่ส่วนล่างของหน้าแรก และให้ใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ที่ตำแหน่งผู้ประสานงานหลัก (corresponding author) พร้อมทั้งระบุอีเมล์สำหรับติดต่อ (e-mail: address)

➢ สาระสังเขป (summary) เป็นการย่อเนื้อความของบทความทั้งเรื่องให้สั้นได้เนื้อหาสาระครบถ้วน

➢ คำสำคัญ (keywords) ให้ใช้คำที่ปรากฏอยู่ในเนื้อเรื่องซึ่งเป็นตัวแทนบอกวิธีการ สิ่งที่ศึกษา ผลการศึกษา สาขา การใช้ประโยชน์และสถานที่ คำสำคัญให้เขียนทั้งคำสำคัญภาษาไทย และภาษาอังกฤษแต่ละชุดไม่เกิน 5 คำ

3.2.2 เนื้อหา (main text) ในบทความทางวิชาการมีองค์ประกอบดังนี้

➢ บทนำ (introduction) กล่าวถึงความน่าสนใจของเรื่องที่นำเสนอก่อนเข้าสู่เนื้อหา

➢ เนื้อความ (content) ควรนำเสนอพัฒนาการของเรื่องได้อย่างน่าสนใจ และเนื้อเรื่องมีเนื้อหาใหม่เหมาะสมกับสภาพปัจจุบัน

➢ สรุป (conclusion) เป็นการย่อเฉพาะข้อมูลจากเนื้อความให้สั้นได้เนื้อหาสาระของเนื้อความครบถ้วน

➢ เอกสารอ้างอิง (references) ให้ระบุเฉพาะเอกสารที่ผู้เขียนบทความได้นำมาอ้างอิงในบทความวิชาการอย่างครบถ้วนรูปแบบของการเขียนเอกสารอ้างอิงให้จัดทำตามที่ระบุไว้ในข้อ 4 (เอกสารอ้างอิง)

3.3 ตารางและภาพประกอบ ให้จัดแทรกไว้ในเนื้อเรื่องโดยคัดเลือกเฉพาะที่จำเป็นเท่านั้น โดยเนื้อหาและคำอธิบายในตารางและภาพสามารถใช้ภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งเท่านั้น

- ตาราง เมื่อวางรูปตารางข้อมูลเรียบร้อยแล้วต้อง “กำกับ” ไว้ที่ด้านบนของตารางด้วยข้อความที่เป็น “ตารางที่... (เว้น 1 วรรค และตามด้วยชื่อตารางหรือคำอธิบายสั้น ๆ)” ส่วน “ที่มา” ของตาราง (ถ้ามี) ให้อยู่ด้านล่างของตาราง “ที่มา: ... (เว้น 1 วรรคและตามด้วยอ้างอิง” (ชื่อ, ปี) ดังตัวอย่าง

ตารางที่ 1 จำนวนฟัน เส้นผ่านศูนย์กลาง และความเร็วรอบของจานโซ่

จานโซ่	จำนวนฟัน	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)
ตัวที่ 1 ติดกับมอเตอร์	20	59	600
ตัวที่ 2 รับกำลังจากมอเตอร์	14	70	700
ตัวที่ 3 ต่อจากมอเตอร์	30	85	800

ที่มา: จารุณี (2559)

- ภาพประกอบ จัดกึ่งกลางหน้ากระดาษ เป็นภาพที่ใช้ประกอบเนื้อหา เมื่อจัดภาพเสร็จแล้วต้อง “กำกับ” ไว้ที่ใต้ภาพด้วยข้อความที่เป็น “ภาพที่.. (เว้น 1 วรรค และตามด้วยชื่อภาพหรือคำอธิบายภาพประกอบสั้น ๆ”) และบรรทัดที่ถัดลงมาคือ “ที่มา:...” ใช้รูปแบบเดียวกับตารางทุกประการ ดังตัวอย่าง

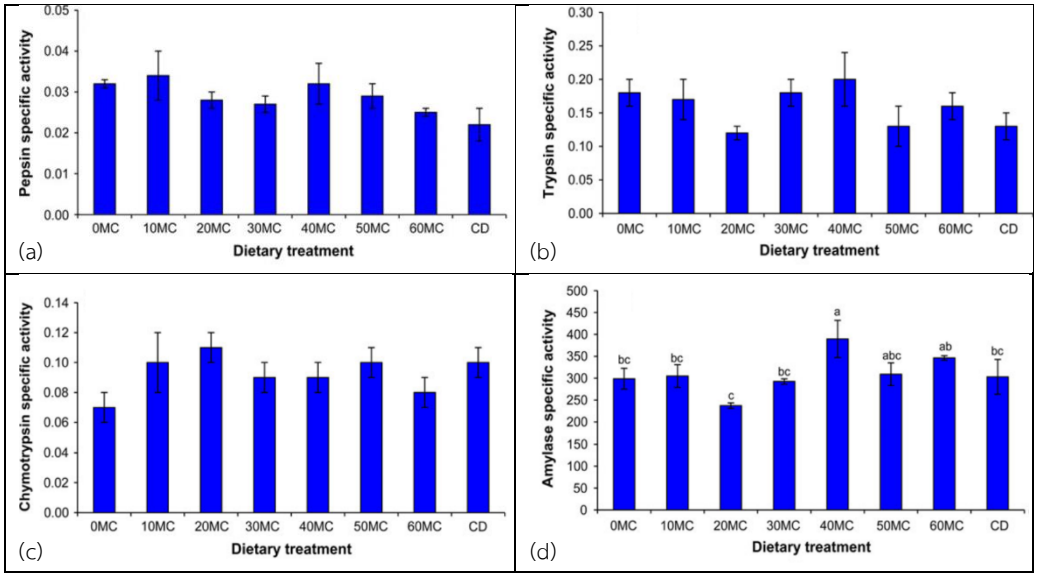


Figure 1 The specific activities (U/mg protein) of pepsin (a), trypsin (b), chymotrypsin (c) and amylase (d) in giant freshwater prawns subjected to various dietary replacements of protein from fish meal with mackerel condensate (MC). The data are expressed as mean ± SEM (n = 3). Different superscripts indicate significant differences between groups ($p < 0.05$). CD, commercial diet.

Source: Wattanakul *et al*. (2017)

ตารางสรุปรูปแบบการพิมพ์ส่วนประกอบของบทความ

ส่วนประกอบ ของบทความ	ลักษณะ ของตัวอักษร	ขนาด ของตัวอักษร	รูปแบบ การจัดหน้าบทความ
ชื่อเรื่อง			
1) ภาษาไทย	หนา	18 pt.	กึ่งกลาง
2) ภาษาอังกฤษ	หนา	18 pt.	กึ่งกลาง
ชื่อผู้เขียนบทความ	หนา	15 pt.	ชิดขวา
บทคัดย่อ			
1) ภาษาไทย	ปกติ	15 pt.	
2) ภาษาอังกฤษ	ปกติ	15 pt.	
คำสำคัญ	หัวข้อตัวหนา และคำสำคัญปกติ	15 pt.	ชิดซ้าย
เชิงอรรถ	ปกติ	13 pt.	ชิดซ้าย
หัวข้อหลัก	หนา	15 pt.	ชิดซ้าย (ไม่มีตัวเลขกำกับ)
หัวข้อย่อย	หนา	15 pt.	1. ชิดซ้าย (1.5 ซม.)
	ปกติ	15 pt.	1.1 ชิดซ้าย (2 ซม.)
	ปกติ	15 pt.	1.1.1 ชิดซ้าย (2.75 ซม.)
เนื้อหา	ปกติ	15 pt.	
ตาราง	ปกติ	15 pt.*	
หมายเหตุ	ปกติ	(*ขึ้นอยู่กับ	
ที่มา	ปกติ	ข้อมูล)	

4. การอ้างอิง (References)

วารสารวิชชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราชใช้รูปแบบการอ้างอิงที่ดัดแปลงมาจากสมาคมจิตวิทยาแห่งสหรัฐอเมริกา (American Psychological Association: APA) ดังนี้

4.1 การอิงในเนื้อหา (in-text citation) ใช้การอ้างอิงแบบ “นาม-ปี” ทั้งนี้ให้ใส่ชื่อผู้แต่ง และปีที่พิมพ์ เช่นเดียวกับการอ้างอิงท้ายบทความ

4.1.1 การเขียนอ้างอิงก่อนเนื้อหา

ต้นฉบับเป็นภาษาไทย: จิรวัฒน์/(2554) ข้อความ.....

ต้นฉบับเป็นภาษาอังกฤษ: Tomson/(2014) ข้อความ.....

4.1.2 การเขียนเนื้อหาก่อนการอ้างอิง

ต้นฉบับเป็นภาษาไทย: ข้อความ..... (จิรวัฒน์,/2554)

ต้นฉบับเป็นภาษาอังกฤษ: ข้อความ..... (Tomson,/2014)

<u>กรณีมีผู้แต่งคนเดียว</u>

1) ต้นฉบับเป็นภาษาไทย: ชื่อ/(ปี พ.ศ.)

2) ต้นฉบับเป็นภาษาอังกฤษ: ชื่อสกุล/(ปี ค.ศ.)

<u>กรณีมีผู้แต่ง 2 คน</u>

1) ต้นฉบับเป็นภาษาไทย: ชื่อคนที่ 1/และชื่อคนที่ 2/(ปี พ.ศ.)

2) ต้นฉบับเป็นภาษาอังกฤษ: ชื่อสกุลคนที่ 1/and/ชื่อสกุลคนที่ 2/(ปี ค.ศ.)

<u>กรณีมีผู้แต่งมีตั้งแต่ 3 คนขึ้นไป</u>

1) ต้นฉบับเป็นภาษาไทย: ชื่อคนที่ 1/และคณะ/(ปี พ.ศ.)

2) ต้นฉบับเป็นภาษาอังกฤษ: ชื่อสกุลคนที่ 1/*et al.*/(ปี ค.ศ.)

4.2 การอ้างอิงท้ายบทความ (reference section)

หนังสือที่ตีพิมพ์เป็นรูปเล่ม (print version)
ชื่อ/ชื่อสกุล./(ปีที่พิมพ์)./*ชื่อหนังสือ*./(ครั้งที่พิมพ์)./สถานที่พิมพ์:/สำนักพิมพ์.
<u>ตัวอย่าง</u> **กรณีที่ตีพิมพ์ครั้งแรก (ไม่ต้องใส่ครั้งที่พิมพ์)** สรเมธี วชิรปราการ. (2551). *เปิดชีวิตเทวดานางฟ้าไขปริศนาแดนสวรรค์*. นนทบุรี: สมาร์ทบุ๊ค. Almond, G.A. and Powell, B.G. (1976). *Comparative political today*. Boston: Little Brown and Company. **กรณีที่ตีพิมพ์ครั้งที่ 2 เป็นต้นไป** เจือจันทร์ จงสถิต และรุ่งเรือง สุขาทิพย์. (2550). *การสังเคราะห์งานวิจัยคุณลักษณะและกระบวนการปลูกฝังจริยธรรมของประเทศต่าง ๆ*. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย. Carpenter, J.W., Mashima, T.Y. and Rupiper, D.J. (2001). *Exotic animal formulary*. (2nd ed). Philadelphia: W.B. Saunders Company.
หนังสือที่ออนไลน์ (electronic book)
ชื่อ/ชื่อสกุล./(ปีที่ออนไลน์)./*ชื่อหนังสือ*./สืบค้นเมื่อ/วัน/เดือน/ปี,/จาก:/http:..... .
The World Society for the Protection of Animals. (2013). *The Cayman turtle farm: A continued case for change*. Retrieved 10 July 2017, from: https://d31j74p4lpxrfpcloudfront.net/sites/default/files/us_files/turtle_a_continued_case_for_change_report.pdf.

วารสาร (journal)
ชื่อ/ชื่อสกุล./(ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทความ./*ชื่อวารสาร*,/ปีที่หรือเล่มที่ (ฉบับที่),/หน้าแรก-หน้าสุดท้าย, doi:/http://doi.org/..... .
<u>ตัวอย่าง</u> สมรักษ์ รอดเจริญ และการุณ ทองประจุแก้ว. (2559). สภาวะการเลี้ยงและองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (*Nostoc commune* TISTR 8870) ที่ผ่านการดัดแปรด้วยคลื่นไมโครเวฟ. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*, 8(2), 219-229. Palzzo, A.J., Cory, T.J. and Hardy, S.E. (2003). Root growth and metal uptake in four grasses grown on Zn-contaminated soil. *Journal of Environmental Quality*, 32(3), 834-840. Whan-air, W., Thongprajukaew, K., Salaeharae, T. and Yoonram, K. (2018). Identification of wild and farmed broadhead catfish (*Clarias macrocephalus* Günther, 1864) based on morphometry, digestive indexes and flesh quality. *Journal of Oceanology and Limnolology*, doi: https://doi.org/10.1007/s00343-018-7205-7.
นิตยสารหรือหนังสือพิมพ์
ชื่อ/ชื่อสกุล./(วัน/เดือน/ปี)./ชื่อบทความ./*ชื่อนิตยสารหรือหนังสือพิมพ์*,/ปีที่,/หน้า.
<u>ตัวอย่าง</u> มาลินี ป้องกัน. (3 กรกฎาคม 2560). ลงทะเบียนคนจน. *มติชน*, 50, หน้า 12.
บทหนึ่งในหนังสือ (book chapter)
ชื่อ/ชื่อสกุลผู้เขียนบท./(ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทหรือตอน./ใน/ชื่อ/ชื่อสกุลบรรณาธิการ./*ชื่อหนังสือ*,/หน้าแรก-หน้าสุดท้ายของบท./สถานที่พิมพ์:/สำนักพิมพ์.
<u>ตัวอย่าง</u> มาลีนนท์ วุฒิจักร. (2560). สาหร่ายพวงองุ่น. ใน บัณฑิต คิดดี. *เกษตรหน้าใหม่*, หน้า 100-110. กรุงเทพฯ: อุดมศิลป์. Zambonino-Infante, J., Gisbert, E., Sarasquete, C., Navarro, I., Gutiérrez, J. and Cahu, C.I. (2009). Ontogeny and physiology of the digestive system of the marine fish larvae. In Cyrino, J.E.O., Bureau, D. and Kapoor, B.G. (Eds.). *Feeding and digestive function of fish*, pp. 277-344. Enfield: Science Publishers, Inc.

วิทยานิพนธ์
ชื่อ/ชื่อสกุล./(ปีที่พิมพ์)./*ชื่อวิทยานิพนธ์*./ระดับวิทยานิพนธ์./ชื่อมหาวิทยาลัย,/เมืองที่ตั้งมหาวิทยาลัย.
ตัวอย่าง จงลักษณ์ งิ้มนับใจ. (2550). *สมรรถนะแห่งตนต่อการเฝ้าระวังโรคความดันโลหิตสูงของอาสาสมัครสาธารณสุขอำเภอนาหมื่น จังหวัดน่าน*. วิทยานิพนธ์พยาบาลศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่. Mirera, D.O. (2013). Capture-based mud crab (*Scylla serrata*) aquaculture and artisanal fishery in East Africa-Practical and ecological perspectives. Ph.D. thesis in Environmental Science. Linnaeus University, Kalmar.
เว็บไซต์ (website)
ชื่อผู้จัดทำ./(ปีที่ออนไลน์)./*ชื่อเรื่อง*./สืบค้นเมื่อ/วัน/เดือน/ปี,/จาก:/http:..... .
ตัวอย่าง อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์. (2542). *ความอุดมสมบูรณ์ของดิน*. สืบค้นเมื่อ 2 ตุลาคม 2542, จาก: http://158.108.200.11//scil/009hom~1/009421/chap1.html. Adkins, J. (2016). *Marine scientist devotes career to reversing trend of by catch*. Retrieved 1 July 2018, from: https://phys.org/news/2016-03-marine-scientist-devotes-career-reversing.html.
รายงานการประชุม
ชื่อ/ชื่อสกุล./(ปีที่พิมพ์)./ชื่อเรื่อง./*ชื่อการประชุมหรือการสัมมนา*./เมืองที่พิมพ์.
ตัวอย่าง สุรยุทธ แจ้งเกิด. (2559). ความมั่นคงทางอาหารของชุมชนบ้านบางปริก. *การประชุมวิชาการความมั่นคงทางอาหารแห่งชาติ*. กรุงเทพฯ.
รายงานการวิจัย
ชื่อ/ชื่อสกุล./(ปีที่พิมพ์)./ชื่อเรื่อง./*รายงานวิจัย*./ชื่อมหาวิทยาลัย.
ตัวอย่าง จันทิมา ชั่งสิริพร พรศิริ แก้วประดิษฐ์ และพฤกระยา พงศ์ยี่หล้า. (2559). การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยางพาราที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลสำหรับงานเครื่องกรองน้ำ. *รายงานวิจัย*. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

บทหนึ่งในหนังสือการประชุม (proceeding) และเอกสารการสัมมนา
ชื่อ/ชื่อสกุล./(ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทความหรือบท./ใน/*ชื่อการประชุมหรือการสัมมนา*/(หน้าแรก-หน้าสุดท้าย)./เมืองที่พิมพ์:/หน่วยงานที่จัดทำ.
<u>ตัวอย่าง</u> กรวรรณ มากสุข. (2555). วาทกรรมความงามของเด็กมัธยมศึกษาแห่งหนึ่งในจังหวัดนครศรีธรรมราช. ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏวิจัย ครั้งที่ 3* (หน้า 22-35). นครศรีธรรมราช: มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช.
บทคัดย่อในการประชุมวิชาการ (abstract in conference)
ชื่อ/ชื่อสกุล./(ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทความ./ในบทคัดย่อ/*ชื่อการประชุม*/(หน้า)./เมืองที่พิมพ์:/หน่วยงานที่จัดทำ.
Kovitvadhi, A., Chandang, P., Luapan, J., Sriyaphai, P., Buahom, R., Cham-iam, T., Leelehapongsathon, K., Tirawattanawanich, C. and Thongprajukaew, K. (2018). Screening three cricket species (*Gryllus bimaculatus*, *Acheta domestica* and *Modicogryllus confirmata*) for broiler diets by *in vitro* digestibility techniques. In *Abstract of the 6th Mediterranean Poultry Summit* (pp. 62). Torino: The Mediterranean Poultry Network of the World's Poultry Science Association.

วารสารวิชชา

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ISSN (Print) : 0125-2380

ISSN (Online) : 2672-958X

Wichcha Journal

Nakhon Si Thammarat Rajabhat University