



วารสารวิจัย

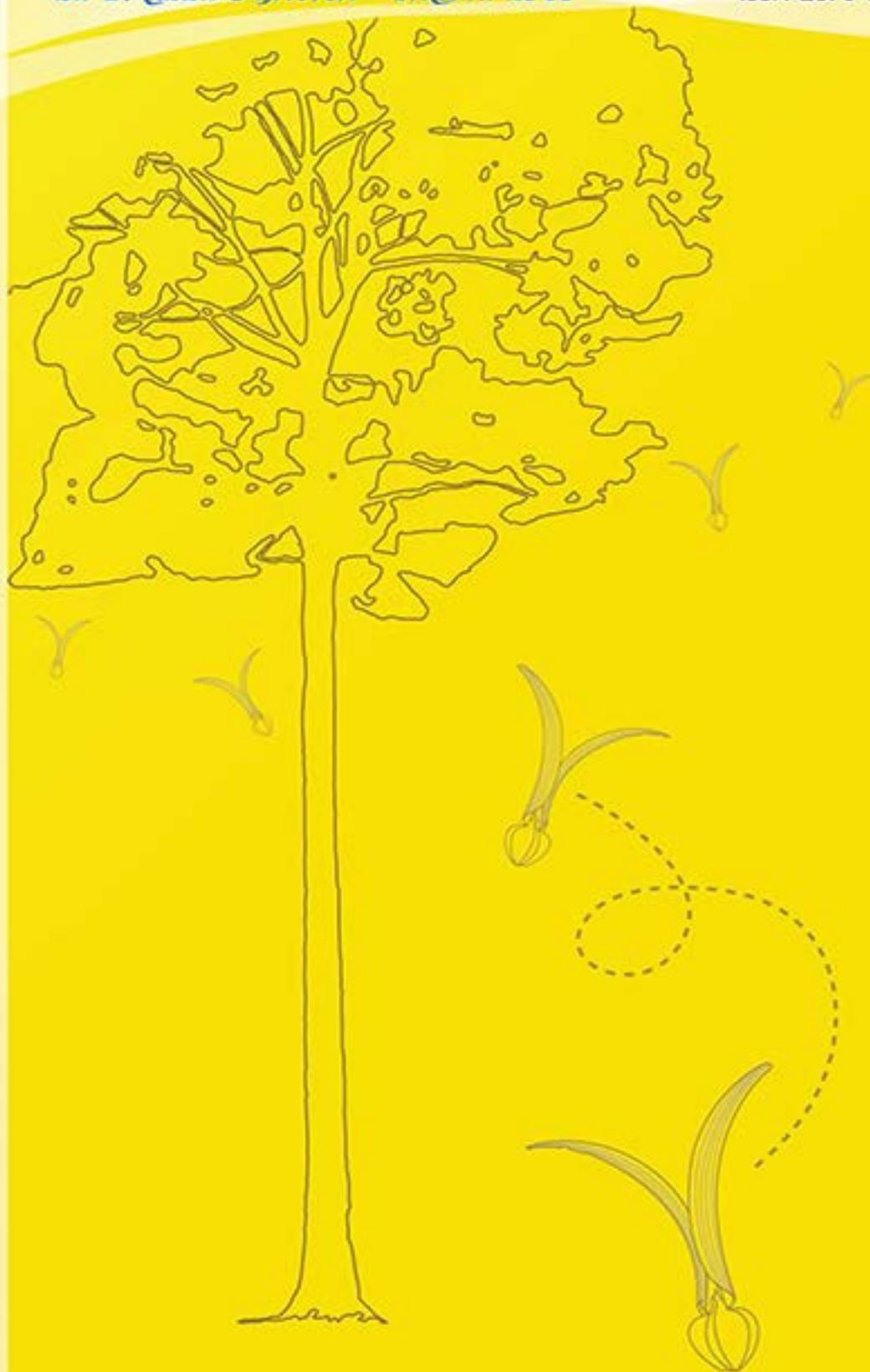
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal

ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 กันยายน - ธันวาคม 2565

ISSN 1906-6627 (Print)

ISSN 2673-0197 (Online)



วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

คณะกรรมการที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.อุทัยรัตน์ ฌ นคร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง จักรใจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.เผด็จศักดิ์ จารยะพันธุ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัย (Peer review)

รองศาสตราจารย์ ดร.ชื่นจิต ประภิตชัยวัฒนา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพยา จินตโกวิท	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร.ภัณฑิรา เหมภัทรสุวรรณ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ทิพย์ เสรษฐยานนท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.นันทวัน เทอดไทย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญขวัญ ชมปรีดา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย หฤทัยธนาสันต์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.บวรศักดิ์ ลีนานนท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สุธี ว่างเต็อย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ดร.รัทธดา เทพประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยทักษิณ
รองศาสตราจารย์ ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ สุรนนท์ชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ณพล อยู่บรรพต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ระพี กาญจนะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริยา ฉลาด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉานิกา แซ่เง่ ชุกลิ้น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐานวิทย์ นามไส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทชัย ชุศลปี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหพงศ์ สมวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ จันทร์มณีชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสาวณีชัย ชัยเพชร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.เบนจามิน ชนะคช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ชลันธร วิชาศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต กฤตาคม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ร้อยเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.นุรฉัตร นัทรวิระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ดร.เจษฎา วิชาพร	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.เบ็ญจมาศ ไพบุลย์กัจจกุล	มหาวิทยาลัยบูรพา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรยา โชติฉนอม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตตะวัน ภูโปลา
ดร.รัชชพร ไชยเจริญ
ดร.ยาสมิ เลาสกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ ภูสีฤทธิ์
ดร.ผจงจิต พิจิตบรรจง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ นพรัตน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรินันท์ แก่นทอง
รองศาสตราจารย์ ดร.คนุพล ตันนโยภาส
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรียานุช บวรเรืองโรจน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มัทการ์ แวหะยี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรวลี ตั้งคุปตานนท์
ดร.กฤษญา พวงสุวรรณ
รองศาสตราจารย์ ดร.พรฤดี เนติโสภาคกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.สนธิสุข วีระชัยชยุดิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราพร ศรีภิญโญวิชย์ จงยิ่งเจริญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ผ่องศรี รอดโพธิ์ทอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตันตวงศ์วานิช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สวามินี นวลแขกกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉรี เรืองเดช

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต
มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา
มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทความทุกเรื่องก่อนลงตีพิมพ์ในวารสารฯ ได้ผ่านการพิจารณากลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ อย่างน้อย 2 ท่าน

วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.สุวัจน์ ชาญรส

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ทองหนู่น้อย

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ มะเห

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สงรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพร ธารางกูร

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุคคณิง ณ ระนอง

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

วารสารวิจัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.อลงกลด แทนอมทอง

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง จุฑาทเกตุ

คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Professor Ir. Dr.Anuar Mat Safar

University Malaysia Perlis, Malaysia

Professor Mitsuhiko Sano

Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, Japan

Professor Qinghua Zhang

Chongqing University of Posts and Telecommunications, China

Professor Zhangyong Li

Chongqing University of Posts and Telecommunications, China

Professor Clarissa Yvonne Domingo

Central Luzon State University, Philippines

Professor Virginia Venturina

Central Luzon State University, Philippines

Professor Noraine Medina

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ravelina Velasco

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ronaldo Alberto

Central Luzon State University, Philippines

Professor Edilyn Lansangan

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ariel Mactal

Central Luzon State University, Philippines

Associate Professor Dr.David Crookall

University of Nice Sophia Antipolis, France

Associate Professor Dr.Ir. Wan Arfiani Barus, M.P

Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Indonesia

รองศาสตราจารย์ฉัตรรัตน์ ปภาวสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิ่น จันจุฬา

คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติรี หอมเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริโรตม์ เกตุแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

รองศาสตราจารย์ ดร.พูนสุข อุคม

คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ เกชา คูหา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ ประพฤติ พรหมสมบูรณ์

คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิยม กำลั้งดี

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ร้อยโท (หญิง) ดร.เกิดศิริ เจริญวิศาล

คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตสารสนเทศเพชรบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิธิดา จรุงเกียรติกุล

คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ แก้วบุญมา

คณะเทคโนโลยีการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลักษมี วิทยา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหพงศ์ สมวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วัชรินทร์ นันทรางกูร

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ดร.ทรงสิน ชีระกุลพิศุทธิ์

คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ดร.ทักษิณ ขาวเนียม

คณะคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
ดร.กิตติมา ตันติหาชัย

คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

นางสาวศุภิกา ชนะเสวตร

วิทยาลัยการโรงแรมและการท่องเที่ยว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

สารบัญ

ฤทธิ์ยับยั้งเชื้อรา <i>Penicillium digitatum</i> ของแบคทีเรียกรดแลคติก.....	584-593
จินตนา ต๊ะย่วน ทิพวัลย์ อรรถราช นาฏนภา กลั่นกล้า และ เสาวคนธ์ ต่วนเทศ	
การศึกษาการเสริมเชื้อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงในการผลิตน้ำเห็ดสมุนไพร.....	594-607
ผสมเกสรช่วยพร้อมดื่ม วัฒนา วิวิวุฒิก	
ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากทะเลสาบปลาและ การใช้ประโยชน์.....	608-621
พิพัฒน์ จันทร์ประดิษฐ์ อธิราชย์ เรืองรงค์ และ ปิยะรัตน์ บุญแสวง	
การห่อหุ้มน้ำมันงาขึ้นม้วนโดยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย.....	622-632
และการฉีดพ่นฝอยร่วมกับตู้อบลมร้อน อุทัยวรรณ วงศ์ตลาด และ ศิริธร ศิริอมรพรรณ	
การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพสำหรับการออกแบบ.....	633-649
และพัฒนาผลิตภัณฑ์กระจุบประเภทกระเป๋า สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ ชาตรี หอมเขียว วรธนพร ชีววุฒิพงษ์ ธยา ภิรมย์ และ อภิชาล ทองมั่ง กำเนิดว่า	
ผลของสีสกัดจากหมากผสมพลู และปูนแดงกับการย้อมผ้าเรยอน.....	650-659
ธัญวลัย จิรันดร และ อติศักดิ์ จิตภูษา	
ผลของสารสกัดเห็ดเข็มทองและเจลาตินต่อคุณภาพของปลานิล.....	660-675
(<i>Oreochromis niloticus</i>) แล่แช่เย็น มุกดาภรณ์ เกียรติโอฬาร และ เปรมวดี เทพวงศ์	
พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขอบตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ.....	676-691
ในกระบวนการเจาะรูด้วยแม่พิมพ์ วิชัย พุ่มจันทร์ และ คมกริช ละววรรณวงษ์	
อุปกรณ์พกพาสำหรับประเมินความหวานผลแอปเปิ้ลแบบไม่ทำลาย.....	692-704
ศุภชัย กุลมุตวิวัฒน์ และ อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล	

อิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีผลต่อความแข็งแรง.....	705-721
ของรอยต่อแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L	
ภูเมศวร์ แสงระยับ และ นิวัฒน์ มูเก็ม	
วิธีการสกัดที่มีผลต่อคุณภาพน้ำยาง.....	722-730
ศุภชัย ภูดาษดอก ภัชรินทร์ ซาตัน หนูเดือน สาระบุตร	
พรประภา ชุนถนอม และ อรุณช สีหามาลา	
การประยุกต์ใช้ไมโครซอฟต์แวร์เอกเซล โซลเวอร์สำหรับการออกแบบหน้าตัดที่เหมาะสม.....	731-742
ของเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนัก	
นุอนันท์ คุระแก้ว วัชรระ ศรีสะเกษ และ ขวัญชีวา หงษ์สตาร์	
The Development of Sound Absorber from Banana Fiber	743-754
Pruktivud Chattaviriya Dusanee Supawantanakul	
Ratsamee Sangsirimongkolying and Gritsada Sua-iam	
การวิเคราะห์ความรู้สึทางอารมณ์ในบทความแนะนำสินค้าออนไลน์.....	755-769
พิศิษฐ์ บวรเลิศสุธี และ วรภัทร ไพรีเกรง	
คุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลาช่อนในช่วงเก็บเกี่ยวและเทคนิคการบำบัดน้ำเสีย.....	770-784
โดยวิธีการถ่ายน้ำและการตกตะกอนในบ่อเลี้ยง	
สุภาวดี โภยคุลย์ เจษฎา อีสหะ วราห์ เทพาหุดี	
และ ประไพพรรณ สิทธิกุล	
การพัฒนาโยกิร์ตซินไบโอติกโดยเยลลี่แก่นตะวัน.....	785-798
พงศ์สุระ ชาญญเจริญอนุกุล และ อรวัดท์ อุปลัมภานนท์	
จลนพลศาสตร์ของการทอริแฟคชั่นชีวมวลเปลือกแข็ง.....	799-814
สุภาภรณ์ กลิ่นเกษร และ คณิต มานะบุระ	
การศึกษาการเสริมเนื้อตาลสูงและการทดแทนไขมันด้วยแกนสับประรด.....	815-826
ในผลิตภัณฑ์คุกกี้	
สุรีย์พร กังสนันท์ กวิสรา สาลีโรจน์ สุจิรา ชัยทิพย์ และ อ้อมใจ โภภิบาล	

ผลของสารร้ายใส่ไก่ที่มีต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพ และประสาทสัมผัส..... 827-842

ของปลานิลรอบกรอบผสมสารร้าย

ปฎิภาณ พึ่งธรรมคุณ เอกปวีร์ ชวนประสิทธิ์กุล จันทนา ไพรบูรณ์
และ จีรวรรณ มณีโรจน์

การพัฒนาแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้เรื่องเตาอินทขิล..... 843-857

และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา

พรwana รัตนชูโชค และ จุฬาวดี มณีเลิศ

ฤทธิ์ยับยั้งเชื้อรา *Penicillium digitatum* ของแบคทีเรียกรดแลคติก

Antifungal Activity of Lactic Acid Bacteria Against *Penicillium digitatum*

จินตนา ต๊ะย่วน* ทิพวัลย์ อรรคราช นาฏนภา กลั่นกล้า และ เสาวคนธ์ ต่วนเทศ
Chintana Tayuan*, Tippawan Akkarach, Natnapha Klanklam and Sowvakon Tuanted

Received: 12 March 2021, Revised: 31 April 2021, Accepted: 22 June 2021

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกที่มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อรา *Penicillium digitatum* ที่เป็นสาเหตุของโรคราสีเขียวในส้มหลังการเก็บเกี่ยว คัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกจากผักและผลไม้ (กะเพรา ผักชี เม่าและมะละกอ) และผลิตภัณฑ์อาหารหมัก (ผักกาดดอง, ผักเสี้ยนดอง, หม่าเนื้อ และส้มเท่าั่ว) ได้จำนวน 38 และ 32 ไอโซเลท ตามลำดับ เมื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาบางประการ พบว่ามีรูปแบบการหมักน้ำตาลทั้งแบบ Homofermentative และ Heterofermentative สามารถผลิตกรดอินทรีย์ได้โดยปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ในรูปของกรดแลคติกมีค่าระหว่าง 0.10 ถึง 1.49 เปอร์เซ็นต์ และทำให้ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 4.44 ถึง 6.28 แบคทีเรียกรดแลคติก จำนวน 6 ไอโซเลทมีฤทธิ์ในการยับยั้ง *P. digitatum* สูง เมื่อศึกษาด้วยวิธี agar well diffusion โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณยับยั้งระหว่าง 11.16±1.30 ถึง 24.23±5.63 มิลลิเมตร โดยฤทธิ์ในการยับยั้ง *P. digitatum* พบทั้งจากเซลล์และส่วนใสปราศจากเซลล์ เมื่อระบุชนิดของแบคทีเรียด้วยวิธี 16S rRNA gene sequencing พบว่าทุกไอโซเลทเทียบเคียงเป็น *Lactobacillus pentosus* (99% identity) แบคทีเรียกรดแลคติกที่มีฤทธิ์เป็นปฏิปักษ์ต่อ *P. digitatum* นี้จะเป็นประโยชน์ในการนำมาใช้ควบคุมทางชีวภาพในส้มต่อไป

คำสำคัญ: แบคทีเรียกรดแลคติก, *Lactobacillus pentosus*, ฤทธิ์ยับยั้งเชื้อรา, *Penicillium digitatum*

คณะทรัพยากรธรรมชาติและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร 47000

Faculty of Natural Resources and Agro-industry, Kasetsart University, Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus, Sakon Nakhon 47000, Thailand.

*ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): fnacnt@ku.ac.th

ABSTRACT

The aim of this study was to isolate lactic acid bacteria with antifungal activity against *Penicillium digitatum*, a major source of post-harvest decay in citrus. Thirty-eight and 32 isolates were isolated from vegetables and fruits (basil, coriander, mao and papaya) and fermented foods (fermented lettuce, fermented spider weed, Thai traditional fermented beef sausage and fermented cattle feet), respectively. Some morphological and physiological characteristics were investigated. Glucose fermentation patterns are both homofermentative and heterofermentative. Titratable acidity as lactic acid was from 0.10 % to 1.49% (pH 4.44 to 6.28). Six lactic acid bacterial isolates had displayed high antifungal activity against *Penicillium digitatum* by an agar well diffusion assay. The diameter of inhibition zones was found to range between 11.16±1.30 to 24.23±5.63 mm. Both cell suspension and cell-free supernatant exhibited inhibitory effect against the target mold. Identification by 16S rRNA gene sequencing showed that all six isolates were *Lactobacillus pentosus* (99% identity). Lactic acid bacterial isolates with antagonistic activity could be good biocontrol candidate against *P. digitatum* in citrus.

Key words: lactic acid bacteria, *Lactobacillus pentosus*, antifungal activity, *Penicillium digitatum*

บทนำ

โรคราเขียว (Green Mold) เป็นสาเหตุของความเสียหายทางเศรษฐกิจที่สำคัญของส้ม ทำให้ส้มเกิดการเน่าเสียภายหลังการเก็บเกี่ยวโดยมีเชื้อราเขียว *Penicillium digitatum* เป็นเชื้อราสาเหตุ โดยทำให้เกิดความสูญเสียแก่ผลส้มในระหว่างการเก็บรักษา การเจริญของเชื้อราบนผลส้มจะพบลักษณะคล้ายผงแป้งสีเขียวมะกอก อาการเริ่มแรกจะเกิดรอยชำใสบางเป็นวง ต่อมาจะเพิ่มขยายขนาดขึ้น พบการสร้างเส้นใยสีขาวบริเวณกลางรอยชำและจะมีการสร้างสปอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 15 ถึง 28 องศาเซลเซียสในวันที่ 3-5 และจะพบสปอร์สีเขียวจำนวนมากในวันที่ 7-8 โดยจะทำให้เกิดการแพร่กระจายของโรคอย่างรวดเร็ว การควบคุมเชื้อรานี้สามารถทำได้โดยใช้สารเคมีหลายชนิด เช่น imazalil, thiabendazole และ ortho-phenylphenol เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามพบการเกิดสายพันธุ์ดื้อยาของ *P. digitatum* ที่มีสาเหตุจากการใช้สารเคมีที่ไม่ถูกวิธี (Palou, 2014) อีกทั้งผู้บริโภคใน

ปัจจุบันให้ความสำคัญต่อการบริโภคอาหารที่ปลอดภัย ดังนั้นการยืดอายุการเก็บรักษาส้มด้วยวิธีการที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้บริโภคจึงมีความน่าสนใจ แบคทีเรียกรดแลคติกเป็นแบคทีเรียแกรมบวกที่ได้รับการยอมรับแล้วว่าเป็นแบคทีเรียที่มีความปลอดภัย (Generally recognized as safe bacteria; GRAS) พบได้ทั่วไปในแหล่งธรรมชาติและมีบทบาทสำคัญในกระบวนการหมักอาหารหลายชนิด จากรายงานพบว่าแบคทีเรียกรดแลคติกมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อรา (Antifungal activity) ได้หลายชนิด เช่น *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium* เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดและสายพันธุ์ของจุลินทรีย์ (Dalié *et al.*, 2010) Temitope and Oluchi (2015) พบว่า *A. niger*, *Rhizopus stolonifer* และ *Mucor* sp. ถูกยับยั้งได้ด้วย *L. plantarum* ที่คัดแยกจากผลิตภัณฑ์นมหมัก เป็นต้น อย่างไรก็ตามข้อมูลเกี่ยวกับฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อรา *P. digitatum* โดยแบคทีเรียกรดแลคติกยังมีน้อย อีกทั้งยังขาดรายงานเกี่ยวกับฤทธิ์ในการยับยั้ง

P. digitatum ของแบคทีเรียกรดแลคติกที่คัดแยกจากพืชและอาหารหมักของไทยด้วย

งานวิจัยนี้จึงคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกจากผัก ผลไม้ และผลิตภัณฑ์อาหารหมัก ศึกษาสถานวิทยา สรีรวิทยาและคัดเลือกแบคทีเรียกรดแลคติกที่มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อรา *P. digitatum* รวมทั้งระบุชนิดของแบคทีเรียกรดแลคติกที่คัดเลือกได้ เพื่อเพิ่มโอกาสในการพบแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อรา *P. digitatum* ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียของส้มและจะนำไปสู่การใช้เพื่อควบคุมการเจริญของเชื้อราให้สามารถเก็บรักษาส้มได้ยาวนานขึ้น ทั้งยังมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคอีกด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเก็บตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างผัก ได้แก่ กระเพราและผักชี ผลไม้ ได้แก่ มะม่วงและมะละกอสุก อาหารหมักประเภทผัก ได้แก่ ผักกาดดอง ผักเสี้ยนดอง อาหารหมักประเภทเนื้อสัตว์ ได้แก่ หม่าเนื้อและส้มตำข้าวจากตลาดใน อ.เมือง จ.สกลนคร เก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และนำมาวิเคราะห์ภายใน 24 ชั่วโมง

2. การคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติก

คัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกจากผัก ผลไม้ และผลิตภัณฑ์อาหารหมัก โดยชั่งตัวอย่าง 25 กรัม เจือจางด้วย 0.1% peptone water ปริมาตร 225 มิลลิลิตร ตีปั่นด้วยเครื่อง Stomacher นาน 90 วินาที เจือจางตัวอย่างให้มีระดับความเจือจางที่เหมาะสม คัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกโดยวิธี spread plate ที่ระดับความเจือจางละ 2 ซ้ำโดยใช้อาหาร MRS agar ที่เติม 1% CaCO_3 บ่มในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 35-37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง นับจำนวนโคโลนีที่มีบริเวณใสรอบโคโลนี และรายงานจำนวนของแบคทีเรียกรดแลคติกในแต่ละ

ตัวอย่าง (CFU/g) เลือกโคโลนีเดี่ยวแล้วทำให้เชื้อบริสุทธิ์ โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ MRS agar แล้วเก็บรักษาเชื้อใน 10% Skimmed milk ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส

3. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาบางประการของแบคทีเรียกรดแลคติก

3.1 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์

ย้อมสีแบบแกรมและศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000 เท่า

3.2 ศึกษาารูปแบบการหมักน้ำตาลกลูโคส

เจียเชื้อบริสุทธิ์ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS broth ที่บรรจุหลอดดักแก๊ส บ่มในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตรวจสอบผลจากการเกิดแก๊สในหลอดดักแก๊ส โดยกลุ่ม heterofermentative lactic acid bacteria จะพบสร้างแก๊สในหลอดดักแก๊ส ส่วน homofermentative lactic acid bacteria จะไม่พบการสร้างแก๊ส

3.3 ศึกษาการสร้างเอนไซม์คาตาเลส

เจียเชื้อบริสุทธิ์ลงบนแผ่นสไลด์ทดสอบโดยหยดสารละลาย 3% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ตรวจสอบผลโดยแบคทีเรียที่สร้างเอนไซม์คาตาเลสจะพบฟองแก๊ส

3.4 ทดสอบความสามารถในการสร้างกรดแลคติก

เลี้ยงเชื้อแบคทีเรียกรดแลคติกในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS broth ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 10,000 rpm ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที นำสารละลายส่วนใสปราศจากเซลล์ มาไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาตรฐาน (0.1 N NaOH) คำนวณปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ในรูปของกรดแลคติก ตามวิธีของ AOAC (2000)

4. การทดสอบฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อ *P. digitatum*

(Temitope and Oluchi, 2015)

4.1 การเตรียมแบคทีเรียกรดแลคติก

เลี้ยงเชื้อแบคทีเรียกรดแลคติกในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS broth ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง เติบโตที่มีจำนวน 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ลงไปในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS broth ปริมาตร 15 มิลลิลิตร โดยใช้ปริมาณเท่ากับ 2% inoculum บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 rpm ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แยกส่วนใสและนำส่วนที่เป็นเซลล์แบคทีเรียไปล้างด้วย 0.5 % NaCl ปลอดเชื้อ 3 ครั้ง นำสารละลายส่วนใสปราศจากเซลล์และเซลล์ซัสเพนชันที่ได้มาทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อรา *P. digitatum*

4.2 การเตรียมเชื้อทดสอบ

เลี้ยงเชื้อ *P. digitatum* ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน เติมน้ำกลั่นปลอดเชื้อ ปริมาตร 2-3 มิลลิลิตร ลงบนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อที่ราเจริญแล้ว ใช้ลูปปลอดเชื้อเขี่ยสปอร์เบาๆ ให้หลุดออก แล้วใช้ปิเปตปลอดเชื้อดูดสปอร์ นำสปอร์ซัสเพนชันไปนับจำนวนภายใต้กล้องจุลทรรศน์โดยใช้ hemacytometer แล้วเจือจางสปอร์ซัสเพนชันให้มีจำนวนสปอร์ประมาณ 10^5 สปอร์ต่อมิลลิลิตร

4.3 การทดสอบฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อราโดยวิธี agar well diffusion

ปิเปตสปอร์ซัสเพนชันที่เตรียมได้ จากข้อ 4.2 เติมลงในจานอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ด้วยเทคนิค pour plate จะได้อาหารเลี้ยงเชื้อที่มีสปอร์ของ *P. digitatum* เท่ากับ 10^4 สปอร์ต่อมิลลิลิตร เจาะวงให้เป็นหลุมขนาด 6 มิลลิเมตร โดยใช้ cork borer

ปลอดเชื้อ จากนั้นนำสารละลายส่วนใสปราศจากเซลล์และเซลล์ซัสเพนชันที่เตรียมไว้ปริมาตร 100 ไมโครลิตร เติมลงในหลุมที่เจาะไว้แล้ว นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน วัดขนาดบริเวณยับยั้งโดยใช้ Vernier caliper ในหน่วยมิลลิเมตร เปรียบเทียบผลการทดลองกับอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS broth ที่เป็นชุดควบคุมเชิงลบ

5. การระบุชนิดของแบคทีเรียกรดแลคติก

ระบุชนิดของแบคทีเรียกรดแลคติกด้วย 16S rRNA gene sequencing การแอมพลิฟิเคชัน 16S rRNA ใช้ universal primers 27F 5' (AGA GTT TGA TCM TGG CTC AG) 3' และ 1492R 5' (TAC GGY TAC CTT GTT ACG ACT T) 3' ปฏิกริยา PCR ประกอบด้วย การ activation เอนไซม์ Taq polymerase ที่อุณหภูมิ 95°C, 2 นาที ในแต่ละรอบของ PCR กำหนดให้ Denaturation ที่อุณหภูมิ 95°C, 1 นาที, Annealing ที่อุณหภูมิ 55°C, 1 นาที และ Extension ที่อุณหภูมิ 72°C, 1 นาที ทำซ้ำจำนวน 35 รอบ ส่วนในรอบสุดท้ายตามด้วยอุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วทำให้ PCR product ที่ได้บริสุทธิ์โดยใช้ multiscreen filter plate (Millipore Corp., Bedford, MA, USA) การ sequencing ใช้ PRISM BigDye Terminator v3.1 Cycle sequencing Kit ร่วมกับ sequencing primer 785F 5' (GGA TTA GAT ACC CTG GTA) 3' และ 907R 5' (CCG TCA ATT CMT TTR AGT TT) 3' หลังจากนั้นนำมาตรวจสอบลำดับเบสโดยใช้ ABI Prism 3730XL DNA analyzer (Applied Biosystems, Foster City, CA)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติก

เมื่อคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกจากตัวอย่างผักและผลไม้ 4 ชนิด ได้แก่ กะเพรา ผักชี เม่า และมะละกอ พบว่าแบคทีเรียกรดแลคติกในตัวอย่าง

ผักและผลไม้ มีจำนวนระหว่าง 4.40×10^3 ถึง 8.90×10^4 CFU/g (ตารางที่ 1) และคัตแยกแบคทีเรียกรดแลคติกได้ 38 ไอโซเลท และส่วนตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารหมัก 4 ชนิด ได้แก่ ผักกาดดอง, ผักเสี้ยนดอง, หม่าเนื้อ และ ส้มเท้าวัว มีจำนวนแบคทีเรียกรดแลคติกระหว่าง 1.06×10^8 ถึง 1.04×10^9 CFU/g และคัตแยกแบคทีเรียกรดแลคติกได้ 32 ไอโซเลท ทุกไอโซเลทมีลักษณะโคโลนีกลม นูนเล็กน้อย ผิวหน้าเรียบ ส่วนใหญ่มีสีขาวใสและสีครีม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.4 เซนติเมตร แบคทีเรียกรดแลคติกสามารถพบได้ในเนื้อ ผลิตภัณฑ์จากนม ระบบทางเดินอาหาร

ของมนุษย์และสัตว์และอาหารหมักดองต่างๆ (Axelsson, 2004; Liu *et al.*, 2014) โดยแบคทีเรียกรดแลคติกที่คัตแยกได้จากอาหารหมักมีจำนวนระหว่าง 10^5 ถึง 10^7 CFU/g (Rezac *et al.*, 2018) นอกจากนี้ยังมีรายงานการแยกเชื้อแบคทีเรียกรดแลคติกจากผักและผลไม้บางชนิด (Di Cagno *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2016; Ruiz Rodríguez *et al.*, 2019) โดยแบคทีเรียกรดแลคติกที่คัตแยกได้มีจำนวนระหว่าง $<10^2$ ถึง 10^4 CFU/g (Di Cagno *et al.*, 2013; Ruiz Rodríguez *et al.*, 2019)

ตารางที่ 1 จำนวนแบคทีเรียกรดแลคติกที่แยกได้จากผัก ผลไม้และผลิตภัณฑ์อาหารหมัก

ตัวอย่าง	จำนวนโคโลนี (CFU/g)
กระเพรา	4.60×10^3
ผักชี	4.40×10^3
เม่า	6.50×10^3
มะละกอ	8.90×10^4
ผักกาดดอง	3.50×10^8
ผักเสี้ยนดอง	1.33×10^8
หม่าเนื้อ	1.04×10^9
ส้มเท้าวัว	1.06×10^8

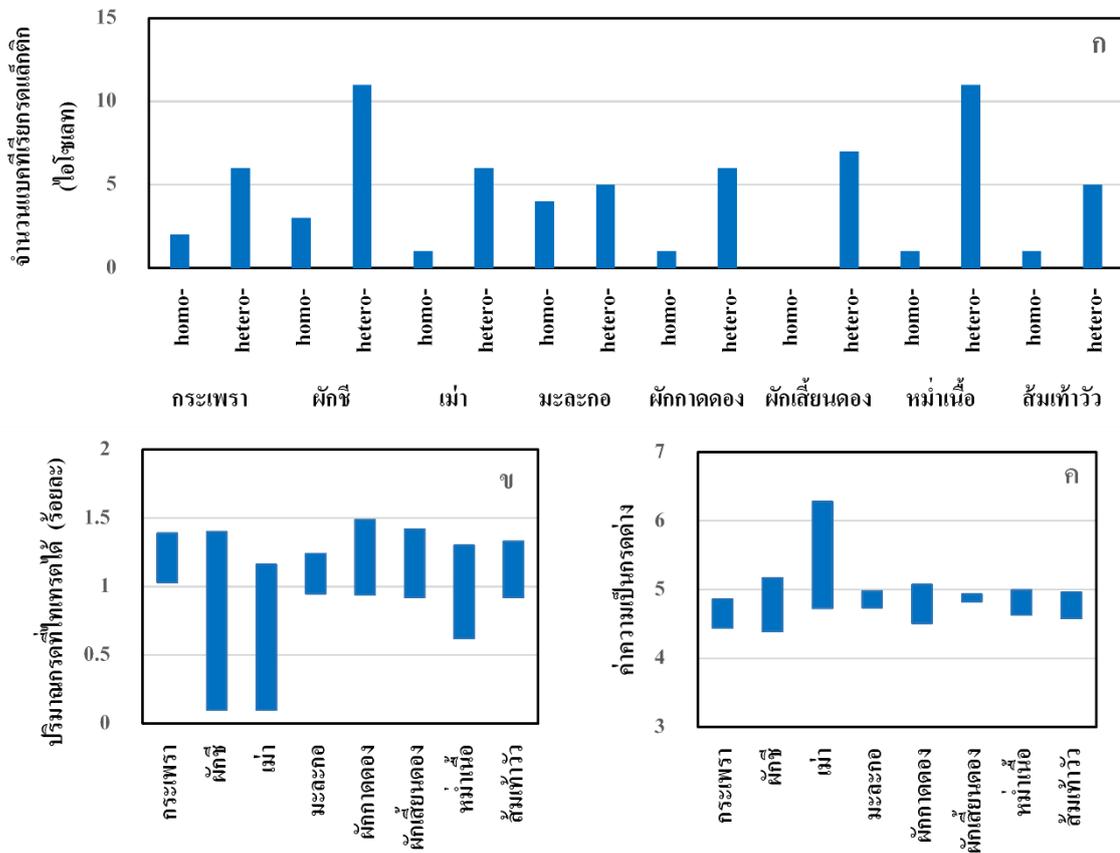
2. การศึกษาพื้นฐานวิทยาและสรีรวิทยาบางประการของแบคทีเรียกรดแลคติก

แบคทีเรียกรดแลคติกที่คัตแยกได้เป็นแบคทีเรียแกรมบวก มีรูปร่างกลม (cocci) จำนวน 35 ไอโซเลท รูปไข่ (oval) จำนวน 29 ไอโซเลท และรูปท่อน (rod) จำนวน 6 ไอโซเลท ทุกไอโซเลทไม่สร้างเอนไซม์คาตาเลส แบคทีเรียกรดแลคติกจำนวน 57 ไอโซเลท มีรูปแบบการหมักน้ำตาลกลูโคสแบบโฮโมเฟอร์เมนเททิฟ และจำนวน 13 ไอโซเลท เป็นแบบเฮเทอโรเฟอร์เมนเททิฟ (ภาพที่ 1ก) แบคทีเรียกรดแลคติกจะผลิตกรดแลคติกซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่ได้จาก

กระบวนการหมักน้ำตาลแบบ homofermentation และเมื่อมีการหมักแบบ heterofermentation จะพบการสร้างกรดแลคติกแล้วยังได้กรดอะซิติก เอทานอล และคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย กรดอินทรีย์เป็นสารเมตาบอไลต์ที่แบคทีเรียกรดแลคติกสร้างขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง เมื่อวิเคราะห์ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ในรูปกรดแลคติก พบว่าแบคทีเรียกรดแลคติกที่คัตแยกได้จากผักและผลไม้สร้างกรดโดยมีปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้มีค่าระหว่าง 0.10 ถึง 1.40 เปอร์เซ็นต์ และทำให้ค่าความเป็นกรดต่างในอาหาร

เลี้ยงเชื้อ MRS broth มีค่าลดลงมีค่าอยู่ในช่วง 4.44-6.28 ส่วนแบคทีเรียกรดแลคติกที่คัดแยกได้จากอาหารหมักมีปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้

ระหว่าง 0.62 ถึง 1.49 เปอร์เซ็นต์ และค่าความเป็นกรดต่างระหว่าง 4.51-5.10 (ภาพที่ 1ข และ 1ค)



ภาพที่ 1 จำนวนแบคทีเรียกรดแลคติกที่คัดแยกได้จากแหล่งต่างๆ ที่มีการหมักน้ำตาลกลูโคสแบบ homofermentative และ heterofermentative (ก), ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (ข) และค่าความเป็นกรดต่าง ของอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS broth หลังเลี้ยงเชื้อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ค)

3. การทดสอบฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อรา *P. digitatum* ของแบคทีเรียกรดแลคติกด้วยวิธี Agar well diffusion

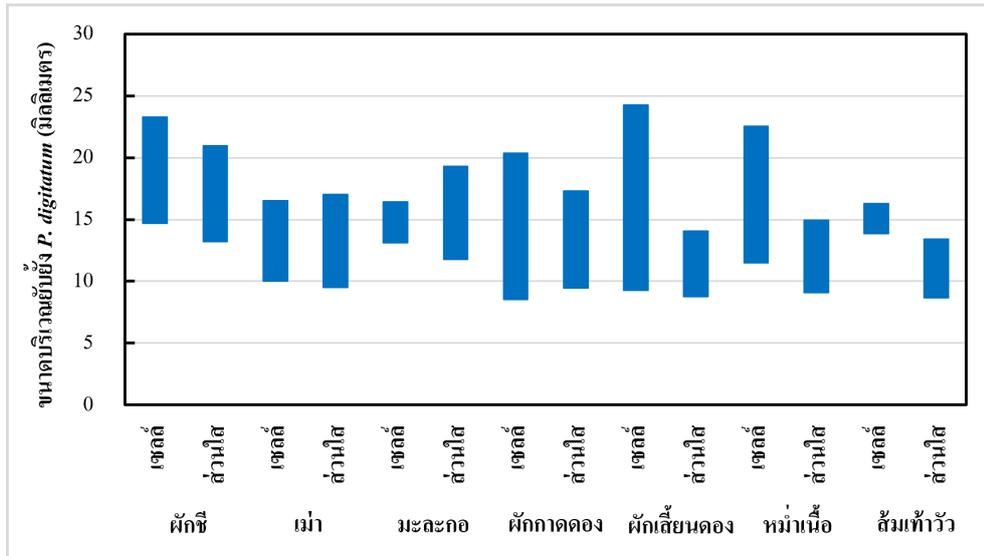
แบคทีเรียกรดแลคติกที่คัดแยกได้จำนวน 31 ไอโซเลทมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อรา *P. digitatum* โดยเป็นแบคทีเรียที่คัดแยกได้จากผักชี, เม่า, มะละกอ, ผักกาดดอง, ผักเสี้ยนดอง, หนำเนื้อ และส้มเท้าวัว จำนวน 4, 3, 5, 4, 4, 7 และ 4 ไอโซเลท ตามลำดับ เมื่อทดสอบความสามารถในการยับยั้ง *P. digitatum* ด้วยเซลล์สปอร์ พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ

บริเวณยับยั้งมีขนาดระหว่าง 8.54±1.06 ถึง 24.23±5.63 มิลลิเมตร และเมื่อทดสอบด้วยสารละลายส่วนใส ปราศจากเซลล์ พบว่ามีขนาดระหว่าง 8.66±0.75 ถึง 20.98±4.29 มิลลิเมตร (ภาพที่ 2) แบคทีเรียกรดแลคติกที่มีฤทธิ์ยับยั้ง *P. digitatum* ได้ดี ได้แก่ ไอโซเลท CR2-B และ CR3-A ที่คัดแยกได้จากผักชี, FLT6-2 จากผักกาดดอง, KJ6-1 จากผักเสี้ยนดองและ FSB5-3 และ FSB7-1 จากหนำเนื้อ โดยบริเวณยับยั้งของเซลล์สปอร์มีขนาดระหว่าง 18.06±4.04 ถึง 24.23±5.63

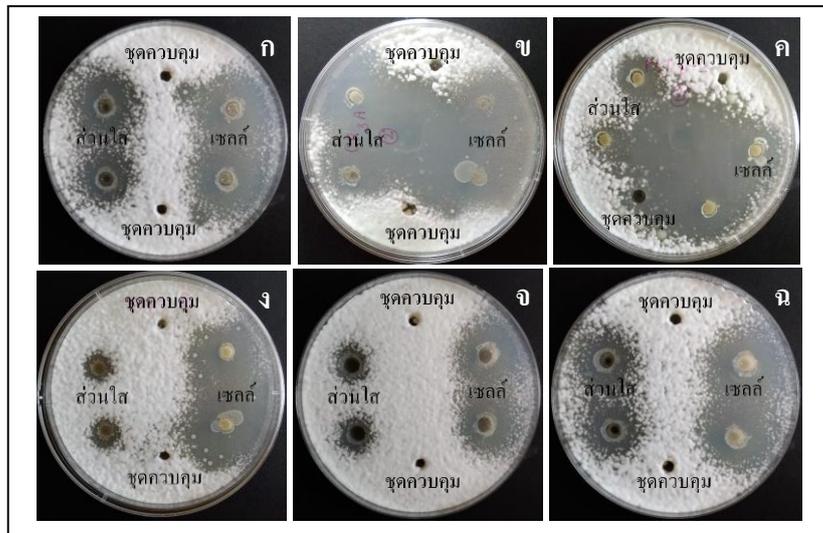
มิลลิเมตร ส่วนสารละลายส่วนใสปราศจากเซลล์มีขนาดระหว่าง 11.16 ± 1.30 ถึง 20.98 ± 4.29 มิลลิเมตร ทั้งนี้สารละลายส่วนใสปราศจากเซลล์ของทั้ง 6 ไอโซเลทมีปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ระหว่าง 0.94 ถึง 1.38 เปอร์เซ็นต์ ก่อนหน้านี้เคยมีรายงานถึงฤทธิ์ยับยั้ง *P. digitatum* ของแบคทีเรียกรดแลคติก ได้แก่ Ma *et al.* (2019) คัดแยกเชื้อแบคทีเรียกรดแลคติกจากผิวและใบส้ม ดินที่เก็บจากสวนส้ม รวมทั้งใบของถั่วลิสงได้แบคทีเรียกรดแลคติกทั้งหมดจำนวน 68 ไอโซเลท พบว่ามีเพียง 10 ไอโซเลทที่มีฤทธิ์ยับยั้ง *P. digitatum* ได้ดี เช่นเดียวกับ Gerez *et al.* (2010) รายงานการคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกจำนวน 8 ไอโซเลทที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อรา *P. digitatum* จากแบคทีเรียทั้งหมด 33 ไอโซเลทที่คัดแยกจากผลิตภัณฑ์นม, มะเขือเทศ, ถั่ว, กระหล่ำปลี และ sourdough การยับยั้งจุลินทรีย์ของแบคทีเรียกรดแลคติกเกี่ยวข้องกับกรดอินทรีย์ ได้แก่ กรดอะซิติกและกรดแลคติกซึ่งเป็นสารเมตาบอไลต์ที่ทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของซัสเตรตต่ำลง กรดอินทรีย์ที่แบคทีเรียกรดแลคติกสร้างขึ้นสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้หลายชนิด ทั้งยีสต์ ราและแบคทีเรีย นอกจากนี้ฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ยังเกี่ยวข้องกับกรดอ่อนที่อยู่ในรูปที่ไม่แตกตัวที่แพร่เข้าสู่เยื่อหุ้มเซลล์เกิดการแตกตัวในไซโทพลาสซึม ทำให้เกิดสภาวะที่ยับยั้งกระบวนการเมแทบอลิซึมที่จำเป็นต่อเซลล์จึงมีผลยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้ นอกจากนี้ฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ของแบคทีเรียกรดแลคติกอาจเป็นผลมาจากการผลิตสารอื่นอีก เช่น

คาร์บอนไดออกไซด์, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ diacetyl สารขนาดเล็กอื่นๆ เช่น reuterin และแบคทีเรียโอซิน (Lindgren and Dobrogosz, 1990; Axelsson, 2004; Ouwehand and Vesterlund, 2004) จากการศึกษาของ Gerez *et al.* (2010) รายงานว่าฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อรา *P. digitatum* เกี่ยวข้องกับกรดแลคติก กรดอะซิติก และกรดฟีนอลแลคติกที่แบคทีเรียสร้างขึ้น อย่างไรก็ตามนอกจากกรดอินทรีย์ที่มีฤทธิ์ในการยับยั้ง *P. digitatum* แล้ว Ma *et al.* (2019) ยังพบว่าสารประกอบประเภทโปรตีนที่แบคทีเรียกรดแลคติกสร้างขึ้นก็มีบทบาทต่อการยับยั้ง *P. digitatum* ด้วย

ฤทธิ์ในการยับยั้ง *P. digitatum* พบทั้งจากกิจกรรมของเซลล์ชีวภาพชั้นและสารละลายส่วนใสปราศจากเซลล์ (ภาพที่ 3) สอดคล้องกับรายงานของ Denkova *et al.* (2013) ที่พบว่าทั้งเซลล์ *Lactobacillus* ในอาหารเหลว (Liquid culture) และสารละลายส่วนใสมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อรา เช่นเดียวกับ Abbaszadeh *et al.* (2015) พบว่าเซลล์ของ *L. acidophilus*, *L. rhamnosus*, *L. casei*, *L. paracasei* และ *Bifidobacterium bifidum* ในอาหารเหลวมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อรา *A. flavus*, *P. chrysogenum*, *A. niger* และ *A. parasiticus* ได้ดีกว่าสารละลายส่วนใส เนื่องจากฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อรานอกจากจะเกี่ยวข้องกับกรดอินทรีย์ที่แบคทีเรียสร้างขึ้นแล้ว ยังอาจเกิดจากการแข่งขันและแย่งอาหารของแบคทีเรียกรดแลคติกและเชื้อรา รวมทั้งมีการสร้างสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิโดยแบคทีเรียกรดแลคติกด้วย



ภาพที่ 2 ค่าต่ำสุดและสูงสุดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณที่ยังเชื้อรา *P. digitatum* โดยเซลล์ชั้นบนและสารละลายส่วนใสปราศจากเซลล์ของแบคทีเรียกรดแลคติกที่คัดแยกได้จากแหล่งต่างๆ เมื่อทดสอบด้วยวิธี Agar well diffusion



ภาพที่ 3 ขนาดบริเวณที่ยัง *P. digitatum* เมื่อทดสอบด้วยเซลล์ชั้นบนและสารละลายส่วนใสปราศจากเซลล์ของแบคทีเรียกรดแลคติกไอโซเลท CR2-B (ก), CR3-A (ข), FLT6-2 (ค), KJ6-1 (ง), FSB5-3 (จ) และ FSB7-1 (ฉ) เมื่อทดสอบด้วยวิธี Agar well diffusion เปรียบเทียบกับ MRS broth ที่เป็นชุดควบคุมเชิงลบ

4. การระบุชนิดของแบคทีเรียกรดแลคติก

เมื่อระบุชนิดของแบคทีเรียกรดแลคติกทั้ง 6 ไอโซเลทที่ยัง *P. digitatum* ได้ดี ได้แก่ CR2-B, CR3-A, FLT6-2, KJ6-1, FSB5-2 และ FSB7-1 โดย

ใช้เทคนิค 16S rRNA gene sequencing พบว่าแบคทีเรียกรดแลคติกทั้ง 6 ไอโซเลท เทียบเคียงเป็น *Lactobacillus pentosus* (99% identity) ดังแสดงในตารางที่ 2 Ma et al. (2019) ได้ระบุชนิดแบคทีเรีย

กรดแลคติกที่มีฤทธิ์ในการยับยั้ง *P. digitatum* จำนวน 10 ไอโซเลท พบว่าเป็น *L. suvicola*, *Weissella paramesenteroides* และ *Pediococcus acidilactci* นอกจากนี้ Gerez *et al.* (2010) พบว่าแบคทีเรียกรดแลคติกจำนวน 8 สายพันธุ์ ได้แก่ *L. plantarum* (CRL

1081, CRL 778, และ CRL 1073), *L. casei* (CRL 76 และ CRL 208), *L. acidophilus* CRL 1063, *L. paracasei* CRL 1501 และ *P. pentosaceus* CRL 908 มีฤทธิ์ในการยับยั้ง *P. digitatum* ได้

ตารางที่ 2 ผลการระบุชนิดของแบคทีเรียกรดแลคติกที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อรา *P. digitatum* ได้ดี โดยใช้เทคนิค 16S rRNA gene sequencing

ไอโซเลท	แหล่งที่มา	Accession	Description	Identities	
				Match/Total	percent
CR2-B	ผักชี	NR_029133.1	<i>Lactobacillus pentosus</i>	1497/1499	99
CR3-A	ผักชี	NR_029133.1	<i>Lactobacillus pentosus</i>	1499/1504	99
FLT6-2	ผักกาดดอง	NR_029133.1	<i>Lactobacillus pentosus</i>	1501/1503	99
KJ6-1	ผักเสี้ยนดอง	NR_029133.1	<i>Lactobacillus pentosus</i>	1503/1506	99
FSB5-3	หม่าเนื้อ	NR_029133.1	<i>Lactobacillus pentosus</i>	1501/1503	99
FSB7-1	หม่าเนื้อ	NR_029133.1	<i>Lactobacillus pentosus</i>	1505/1506	99

สรุป

แบคทีเรียกรดแลคติกที่คัดแยกจากผัก ผลไม้ และผลิตภัณฑ์อาหารหมัก จำนวน 6 ไอโซเลท มีฤทธิ์ในการยับยั้ง *P. digitatum* ได้ดี เมื่อระบุชนิดของแบคทีเรียกรดแลคติกด้วยเทคนิค 16S rRNA gene sequencing พบว่าเป็น *Lactobacillus pentosus* โดยฤทธิ์ในการยับยั้ง *P. digitatum* พบทั้งในส่วนเซลล์ที่สเฟนชันและส่วนใสปราศจากเซลล์ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้เป็นสารควบคุมทางชีวภาพในสัปดาห์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบคุณ คณะทรัพยากรธรรมชาติและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนครที่สนับสนุนสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Abbaszadeh, S., Tavakoli, R., Sharifzadeh, A., Shokri, H. 2015. Lactic acid bacteria as functional probiotic isolates for inhibiting the growth of *Aspergillus flavus*, *A. parasiticus*, *A. niger* and *Penicillium chrysogenum*. **Journal of Medical Mycology** 25(4): 263-267.
- AOAC. 2000. **Official Method of Analysis**. 17th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C.
- Axelsson, L. 2004. Lactic acid bacteria: Classification and physiology, pp. 1-66. *In* Salminen, S. and Wright, A.V., eds. **Lactic Acid Bacteria:**

- Microbiological and Functional Aspects.** Marcel Dekker Inc., New York.
- Dalie, D.K.D., Deschamps, A.M. and Richard-Forget, F. 2010. Lactic acid bacteria-potential for control of mould growth and mycotoxins: a review. **Food Control** 21(4): 370-380.
- Denkova, R., Denkova, Z., Yanakieva, V. and Blazheva, D. 2013. Antimicrobial activity of probiotic lactobacilli, bifidobacteria and propionic acid bacteria, isolated from different sources. **Microbial Pathogens and Strategies for Combating Them: Science Technology and Education** 2: 857-864.
- Di Cagno, R., Coda, R., De Angelis, M. and Gobbetti, M. 2013. Exploitation of vegetables and fruits through lactic acid fermentation. **Food Microbiology** 33: 1-10.
- Gerez, C.L., Carbajo, M.S., Rollán, G., Torres, L.G. and Font de Valdez, G. 2010. Inhibition of citrus fungal pathogens by using lactic acid bacteria. **Journal of Food science** 75(6): M354-359.
- Lindgren, S.E. and Dobrogosz, W.J. 1990. Antagonistic activities of lactic acid bacteria in food and feed fermentations. **FEMS Microbiology Reviews** 7: 149-163.
- Liu, W., Pang, H., Zhang, H. and Cai, Y. 2014. Biodiversity of lactic acid bacteria, pp 103-203. *In* Zhang, H. and Cai, Y., eds. **Lactic Acid Bacteria**. Springer, Dordrecht.
- Ma, J., Hong, Y., Deng, L., Yi, L. and Zeng, K. 2019. Screening and characterization of lactic acid bacteria with antifungal activity against *Penicillium digitatum* on citrus. **Biological Control** 138: 1-8.
- Ouwehand, A.C. and Vesterlund, S. 2004. Antimicrobial components from lactic acid bacteria, pp. 375-395. *In* Salminen, S., Von Wright, A. and Ouwehand, A., eds. **Lactic Acid Bacteria: Microbiological and Functional Aspects**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Palou, L. 2014. *Penicillium digitatum*, *Penicillium italicum* (Green Mold, Blue Mold), pp.45-102. *In* Bautista-Baños, S., eds. **Postharvest Decay**. Academic Press, Elsevier Inc., London, UK.
- Rezac, S., Kok, C.R., Heermann, M. and Hutkins, R. 2018. Fermented foods as a dietary source of live organisms. **Frontiers in Microbiology** 9: 1785. doi: 10.3389/fmicb.2018.01785.
- Ruiz Rodriguez, L.G., Florencia, M., Juliana, B., Roxana, M., Luc, D.V., Hebert, E.M. and Fernanda, M. 2019. Diversity and functional properties of lactic acid bacteria isolated from wild fruits and flowers present in Northern Argentina. **Frontiers in Microbiology** 10: 1091. doi: 10.3389/fmicb.2019.01091.
- Temitope, F.P. and Oluchi, U.E. 2015. Studies on the antifungal activity of *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus fermentum* on spoilage fungi of tomato fruit. **Journal of Microbiology Research** 5(3): 95-100.
- Yang, J., Tan, H. and Cai, Y. 2016. Characteristics of lactic acid bacteria isolates and their effect on silage fermentation of fruit residues. **Journal of Dairy Science** 99(7): 5325-5334.

การศึกษาการเสริมเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวผงในการผลิตน้ำเห็ดสมุนไพรร ผสมเก็กฮวยพร้อมดื่ม

Study of Gac Fruit Aril Powder Enrichment in the Production of Ready-to-Drink from Medicinal Mushrooms Blended Chrysanthemum

วัฒนา วิรุฒิกร *

Wattana Wirivutthikorn *

Received: 16 August 2020, Revised: 7 May 2021, Accepted: 22 June 2021

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาสภาวะการทำแห้งเห็ดสมุนไพรรและเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวและศึกษาปริมาณของเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวผงต่อคุณภาพของน้ำเห็ดสมุนไพรรผสมเก็กฮวยพร้อมดื่ม การผลิตน้ำเห็ดสมุนไพรรพร้อมดื่มใช้เห็ดสมุนไพรร 2 ชนิด คือ เห็ดเข็มทอง และเห็ดหูหนูขาว ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งเห็ดเข็มทอง เห็ดหูหนูขาว และเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่า เวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งเห็ดเข็มทองและเห็ดหูหนูขาวคือ 24 ชั่วโมง ส่วนเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวคือ 22 ชั่วโมง ในการผลิตน้ำเห็ดสมุนไพรรมีสูตรส่วนผสมเห็ดเข็มทอง เห็ดหูหนูขาว 2.5 กรัม และเก็กฮวย 15 กรัม และทำการศึกษาปริมาณเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวผงร้อยละ 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 ศึกษาสมบัติด้านกายภาพ ได้แก่ ค่าความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และปริมาตรตะกอน ตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณกรดทั้งหมด ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด และไลโคปีน คุณภาพทางจุลชีววิทยา ได้แก่ ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านสี กลิ่น รสชาติ และการยอมรับโดยรวมโดยใช้วิธี 9-point hedonic scale จากผลการทดลองพบว่า ค่าความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง ปริมาตรตะกอน ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณกรดทั้งหมด และไลโคปีนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยสิ่งทดลองที่มีปริมาณเยื่อหุ้มเมล็ดผักข้าวเพิ่มขึ้นทำให้ค่าร้อยละกรดทั้งหมด และไลโคปีนเพิ่มขึ้น คุณภาพทางจุลชีววิทยาไม่พบปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดในทุกสิ่งทดลอง ส่วนคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รสชาติ และการยอมรับโดยรวมพบว่า มีความแตกต่างทางสถิติทุกด้าน การเพิ่มปริมาณ

สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12130

Division of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathum Thani 12130, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): wattana@rmutt.ac.th

เชื้อหุ้มผักข้าวปริมาณมากขึ้นส่งผลทำให้การยอมรับรวมทางประสาทสัมผัสทุกด้านลดลง ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนยอมรับในสิ่งทดลองที่ 1 ที่มีการเสริมเชื้อหุ้มเมล็ดผักข้าวร้อยละ 1.0 ด้านรสชาติและการยอมรับโดยรวมมากที่สุดเท่ากับ 6.93 และ 7.06 ตามลำดับ

คำสำคัญ: เห็ดสมุนไพรมะขาม, เชื้อหุ้มเมล็ดผักข้าว, เก๊กฮวย, เครื่องดื่ม

ABSTRACT

The objective of this research was to investigate the optimum conditions for drying medicinal mushrooms and gac fruit aril. The quantities of gac fruit aril powder toward the qualities of ready to drink medicinal mushrooms and chrysanthemum juice were performed. The study of the optimum time for drying golden needle, Tremella mushroom and gac fruit aril was dried at 70^oc. It was found that the suitable time for drying golden needle mushroom and Tremella mushroom was 24 hours while the proper one for gac fruit aril was 22 hours. The production of medicinal mushrooms consisted of 2.5 g of golden needle, Tremella mushroom and 15 g of chrysanthemum and blended gac fruit aril and chrysanthemum beverage which were gac fruit powders (1.0, 1.5, 2.0 and 2.5%) by weight. The physical qualities of medicinal mushrooms blended with gac fruit aril and chrysanthemum beverage as brightness, redness, yellowness and sedimentation volume were detected. The chemical properties including pH, total acidity, total soluble solid and lycopene were determined. The microbiological quality was analyzed as total microorganism. The sensory quality in color, odor, taste and overall acceptability was done by 9-points hedonic scale. The results showed that brightness, redness, yellowness, pH, total acidity, total soluble solid and lycopene (excepted for total soluble solid) in all treatments were significantly different. The treatment showed that an increase in the amount of gac fruit aril resulted in a rise in the percentage of acidity and lycopene. The microbiological results showed that there were no microorganisms in all treatments. As for the sensory quality in terms of color, odor, taste, and overall acceptance, it was found that all values were statistically significant ($p \leq 0.05$). However, the higher levels of gac fruit aril cause a decrease in all sensory scores. The panelists gave the highest acceptance scores in Treatment 1 which enriched 1% of gac fruit aril on taste and overall acceptance values of 6.93 and 7.06, respectively.

Key words: medicinal mushroom, gac fruit aril, chrysanthemum, beverage

บทนำ

เห็ดจัดได้ว่าเป็นยาสมุนไพรที่มีมานานกว่าสี่พันปีในประเทศจีน ญี่ปุ่น เกาหลี และได้หวนสำหรับประเทศไทยแพทย์พื้นบ้านไทยได้ใช้เห็ด

สมุนไพรมะขามหลายชนิดในการรักษาโรคมานานแล้ว ซึ่งเห็ดนอกจากจะใช้เป็นอาหารที่ให้โปรตีน วิตามิน และ เกลือแร่สูงแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นยา รักษาโรคได้อีกด้วย (Hobbs, 1995; Chenung, 1996;

Chenung, 1997) เห็ดเข็มทองเป็นเห็ดที่มีคุณค่าทางอาหารสูงไม่แพ้เห็ดชนิดอื่นๆ เป็นเห็ดที่มีการปลูกเชิงการค้า โดยเฉพาะปริมาณวิตามินบีที่มีมากอันเป็นคุณค่าทางโภชนาการพื้นฐานของพืชตระกูลเห็ด ซึ่งเห็ดเข็มทองในปริมาณเพียง 1 ถ้วยก็มีสารไนอะซินหรือวิตามินบี 3 สูงถึงร้อยละ 23 ของปริมาณที่ร่างกายควรได้รับต่อวัน จากลักษณะสัณฐานวิทยาของเห็ดเข็มทองซึ่งมีส่วนของรากหรือเส้นใยที่ต้องตัดทิ้งเป็นสัดส่วนค่อนข้างมาก (Yuenyongputtakal *et al.*, 2017) มีรายงานที่เกี่ยวกับส่วนที่ไม่นิยมบริโภคของเห็ดเข็มทองหมายถึงส่วนโคนลำต้นและส่วนเส้นใยเห็ดเข็มทองที่ผู้บริโภคมักตัดทิ้ง ส่วนนี้ยังมีคุณค่าทางอาหารเมื่อนำมาศึกษาโปรตีน สารประกอบฟีนอลิก ทั้งหมด กาบ และสมบัติต้านอนุมูลอิสระ พบว่ามีองค์ประกอบของโปรตีน (73.60 g/100g db) สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (13.33 gGAE/100g db) และสารกาบา (gamma-aminobutyric acid) (0.61 g/100g db) และมีสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ (ร้อยละ 54.98) (Wongbasg *et al.*, 2009; Yuenyongputtakal *et al.*, 2017) รายงานว่า ในส่วนยอดหรือส่วนที่งอกใหม่ของพืชมักตรวจพบปริมาณกาบาได้มากกว่าส่วนอื่น เนื่องจากในระหว่างที่กระบวนการงอกเกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีที่ช่วยส่งเสริมให้เกิดการย่อยสลายกรดกลูตามิกทำให้เกิดการสะสมของกาบาไว้ได้มากกว่าส่วนต่างๆ ของพืช เห็ดหูหนูขาวถูกยกย่องเป็นสุดยอดของเห็ด สมัยก่อนเป็นเห็ดที่พบได้น้อยตามธรรมชาติ ราคาแพงเป็นอาหารบำรุงสำหรับคนที่มีฐานะร่ำรวย แต่ในปัจจุบันมีการเพาะเลี้ยงทำให้ราคาถูกลงหาซื้อได้ง่าย เห็ดหูหนูขาวมีส่วนประกอบของโปรตีน ไขมัน น้ำตาล โยอาหาร วิตามิน และสารจำเป็นต่างๆ รวมทั้งน้ำมันยางอย่างอุดมสมบูรณ์ (Wuttithammavej, 2009) ดอกเก๊กฮวยมีสารพวกฟลาโวนอยด์ อีตินิน สเตาโคควิน โคลิน กรดอะมิโน และน้ำมันหอมระเหยที่ช่วยรักษาและป้องกันโรคเส้นเลือดหัวใจตีบ

ช่วยขยายหลอดเลือดลดการเกิดภาวะหัวใจล้มเหลว (Phonprapai *et al.*, 2019) พักข้าวเป็นพืชที่อุดมไปด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์ด้านคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะส่วนของเชื้อหุ้มเมล็ดที่มักจะถูกนำมาบริโภคและนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ คือการทำเป็นผงนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมอาหารได้ซึ่งเป็นแหล่งที่สำคัญของสารไลโคปีนเป็นสารที่พบในกลุ่มของแคโรทีนอยด์พบได้ในผักและผลไม้บางชนิดทำหน้าที่เป็นรงควัตถุรวบรวมแสงให้แก่พืชและป้องกันพืชผักจากออกซิเจนโมเลกุลเดี่ยว (อนุมูลอิสระ) นอกจากนี้ยังมีวิตามินซี เบต้าแคโรทีน แคลเซียม และเหล็ก (Phamonprawat, 2013; Punkaew *et al.*, 2016) และดอกเก๊กฮวยมีสารพวกฟลาโวนอยด์ โครแซนทีมิน อีตินิน สเตาโคควิน โคลิน กรดอะมิโน และน้ำมันหอมระเหยที่ช่วยรักษาและป้องกันโรคเส้นเลือดหัวใจตีบช่วยขยายหลอดเลือดลดการเกิดภาวะหัวใจล้มเหลว (Phonprapai *et al.*, 2019) ตัวอย่างงานวิจัยที่เคยมักศึกษาในการนำเห็ดมาแปรรูปเป็นเครื่องดื่มสมุนไพร Suwanno and Maksuwan (2010) ศึกษาอัตราส่วนของเห็ดสมุนไพรและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำเห็ดสมุนไพรสกัดพร้อมดื่มโดยใช้เห็ดสมุนไพร 6 ชนิด (เห็ดนางฟ้า เห็ดนางรมฮังการี เห็ดเป่าฮื้อ เห็ดหูหนู เห็ดหอม และเห็ดหลินจือ) จากการศึกษาพบว่าสูตรน้ำเห็ดสมุนไพรสกัดที่เหมาะสมมีสองสูตร คือ สูตรธรรมชาติประกอบด้วยเห็ดนางรมฮังการี: เห็ดเป่าฮื้อ: เห็ดหอม: เห็ดหลินจือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักสด 1:1: 0.25: 0.25 และสูตรผสมน้ำผึ้งประกอบด้วยเห็ดเป่าฮื้อ: เห็ดหอม: เห็ดหลินจือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักสด 2: 2: 1 และเติมน้ำผึ้งร้อยละ 9 โดยปริมาตร ทั้งสองสูตรใช้อัตราส่วนของเห็ดต่อน้ำในการสกัด 1: 15 โดยน้ำหนัก ใช้อุณหภูมิในการสกัด 100 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณสารโพลีแซคคาไรด์ในสูตร

ธรรมชาติและสูตรผสมน้ำผึ้งเท่ากับ 20 และ 253 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.40 และ 4.88 ซึ่งได้รับค่าการยอมรับทางประสาทสัมผัส ด้านความชอบรวมสูงสุดเท่ากับ 8.45 และ 8.15 ส่วนค่า L^* , $+a^*$ และ $+b^*$ เท่ากับ 26.43 19.23 และ -8.88 และ 45.91 24.25 และ -1.57 ตามลำดับ ศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในขวดโพลีโพรพิลีนขนาด 200 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 3-5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน พบว่าในสูตรธรรมชาติมีสาร β -1,3-glucan เท่ากับ 31 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และ 42 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ Charoenphun and Sophe (2018) ศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากเห็ดและลำไยซึ่งประกอบด้วยน้ำเห็ด (เห็ดหลินจือ เห็ดหอม และเห็ดหัวลิง) ผสมลำไยร้อยละ 50-80 เห็ดหูหนูขาวร้อยละ 0-40 และน้ำตาลทรายร้อยละ 0-15 ได้ส่วนประกอบหลักของเครื่องดื่มจำนวน 11 สูตรทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสกับผู้ทดสอบทั่วไปจำนวน 30 คน พบว่าสูตรที่เหมาะสมในการผลิตเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากเห็ดและลำไย คือ สูตรที่มีน้ำเห็ดผสมลำไย เห็ดหูหนูขาว และน้ำตาลทรายร้อยละ 64 28 และ 8 ตามลำดับ เป็นสูตรที่ได้คะแนนการยอมรับด้านความชอบรวมสูง เมื่อศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของการเติมคาราจีแนนต่อเพคตินพบว่าสูตรที่มีเติมคาราจีแนนต่อเพคตินร้อยละ 0.5 และ 1.5 เป็นสูตรมีคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัส ด้านลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และความชอบรวมสูงที่สุด Punkaew *et al.* (2016) ศึกษาผลของความเข้มข้นมอลโตเด็คซ์ตรินที่เติมลงไป (ร้อยละ 10 15 และ 20) ต่อคุณสมบัติทางกายภาพเคมีของผลิตภัณฑ์เยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผง โดยทำการแยกเอาเมล็ดออกจากเยื่อหุ้มเมล็ดโดยการกรองผ่านตะแกรงนำเยื่อหุ้มเมล็ดมาผสมกับมอลโต-เด็คซ์ตริน และใช้ทวิน 80 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยการปั่น

แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสใช้เวลา 330 นาที แล้วนำมาปั่นให้เป็นผงละเอียด จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของมอลโตเด็คซ์ตรินที่ความเข้มข้นร้อยละ 20 เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เยื่อพืชข้าวผง แต่เนื่องจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเครื่องดื่มสมุนไพร เช่น เห็ดพืชข้าวยังมีน้อยมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น สี กลิ่น รสชาติ ทำให้คนส่วนใหญ่ไม่ยอมรับในผลิตภัณฑ์ดังกล่าว โดยทั่วไปส่วนใหญ่เข้าใจเพียงว่าเห็ดและพืชข้าวบริโภคเป็นอาหารเท่านั้น ในการผลิตน้ำเห็ดสมุนไพรสกัดพร้อมดื่มโดยใช้เห็ดสมุนไพร 2 ชนิดคือ เห็ดเข็มทอง และเห็ดหูหนูขาว ปริมาณเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าว และแก้ชวยมาช่วยในเรื่องการปรับปรุงสีนั้นน่าจะสามารถทำให้ลักษณะเครื่องดื่มที่ได้มีแนวโน้มออกไปในทางที่ดีขึ้นรวมทั้งเบต้าแคโรทีนและไลโคปีนที่ผลิตจากเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวจะช่วยเพิ่มความหลากหลายของสารอาหารมากให้มากขึ้น ปัจจุบันผู้บริโภคส่วนใหญ่ได้หันมาใส่ใจและดูแลสุขภาพโดยมีการบริโภคอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย ทั้งนี้ยังเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าของสินค้าเกษตร และผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีคุณสมบัติที่สำคัญทางเภสัชศาสตร์ ซึ่งน่าจะเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ทำให้ประชาชนบริโภคเห็ดสมุนไพรมากขึ้น เพื่อประโยชน์ต่อสุขภาพในการป้องกันโรคและเสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย นอกจากนี้ยังสามารถผลิตในเชิงพาณิชย์เพื่อเป็นเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพสำหรับผู้รักสุขภาพที่ต้องการเสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกันร่างกายด้วยผลิตภัณฑ์ธรรมชาติอีกด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การผลิตเห็ดเข็มทอง เห็ดหูหนูขาว เยื่อหุ้มเมล็ด พักข้าวผง

การผลิตเห็ดเข็มทองผง นำเห็ดเข็มทอง 200 กรัม ล้างน้ำให้สะอาด จากนั้นใช้มีดหั่นโคนทิ้ง นำเห็ดเข็มทองที่ได้มาฉีกเป็นเส้นๆ แล้วใส่ถาดอลูมิเนียมโดยนำเข้าสู่อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 สิ่งทดลอง แต่ใช้เวลาในการอบแห้งต่างกัน 3 สิ่งทดลอง คือ สิ่งทดลองที่ 1 2 และ 3 ใช้เวลาอบแห้ง 20 22 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ สิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ คัดแปลงจาก (Inchan, 2002; Yuenyongputtakal *et al.*, 2017) การผลิตเห็ดหูหนูขาวผง นำเห็ดหูหนูขาว 200 กรัม ล้างน้ำให้สะอาด จากนั้นใช้มีดหั่นโคนทิ้ง นำเห็ดหูหนูขาวที่ได้มาฉีกเป็นเส้นๆ แล้วใส่ถาดอลูมิเนียม นำเข้าสู่อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับการผลิตเห็ดเข็มทองผง สิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ คัดแปลงจาก Inchan (2002) การผลิตเยื่อหุ้มเมล็ดพักข้าวผง นำผลพักข้าวสดมาหั่น นำเอาเยื่อหุ้มเมล็ดพักข้าวมากรองเอาเมล็ดออกแล้วจึงนำมาใส่ถาดอลูมิเนียมโดยมีพลาสติกกรอง นำเข้าสู่อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับการผลิตเห็ดเข็มทองผง และการผลิตเห็ดหูหนูขาวผง สิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ คัดแปลงจาก (Punkaew *et al.*, 2016; Tanongkankit *et al.*, 2016) การผลิตน้ำแก๊กฮวย นำดอกแก๊กฮวย 15 กรัม มาต้มกับน้ำปริมาตร 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ 95-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำมากรองดอกแก๊กฮวยออก คัดแปลงจาก Phonprapai *et al.* (2019)

2. การผลิตเห็ดเข็มทอง เห็ดหูหนูขาวและเยื่อหุ้มเมล็ดพักข้าวผงผสมน้ำแก๊กฮวยพร้อมดื่ม

เตรียมน้ำแก๊กฮวยโดยการเติมน้ำตาลทราย 70 กรัม (13 บริกซ์) ผสมกับเห็ดเข็มทอง 2.5 กรัม และเห็ดหูหนูขาว 2.5 กรัม ต่อจากนั้นเติมเยื่อหุ้ม

เมล็ดพักข้าวผงที่ผ่านการอบ 22 ชั่วโมง แบ่งตัวอย่างออกเป็น 4 ส่วน คือ 10 15 20 และ 25 กรัม ดำเนินการปรับความเป็นกรด-ด่างของตัวอย่างให้มีค่าในช่วง 3.5-4.0 ด้วยกรดซิตริก ทำการกรองตัวอย่างที่ปรับความเป็นกรด-ด่าง แล้วด้วยผ้าขาวบาง เทตัวอย่างร้อนใส่ขวดแก้วที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วปิดฝาให้สนิทและแช่เย็นทันที คัดแปลงจาก Boonpoo *et al.* (2003)

3. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

ปริมาตรตะกอนวัด โดยใช้กระบอกตวง ขนาด 100 มิลลิลิตร คัดแปลงจาก Nuankhaekul (2004) วิธีการโดยการนำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์นำมาเขย่าให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเทตัวอย่างลงในกระบอกตวง ขนาด 100 มิลลิลิตร นำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิตู้เย็น (4±2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการตรวจวัดค่าที่ได้รายงานผลหน่วยเป็นมิลลิลิตร

ค่าสีโดยใช้ colorimeter (AOAC, 2000) เตรียมเครื่องวัดสีเปิดเครื่อง ทำการตั้งค่า L*, a* และ b* นำตัวอย่างที่ต้องการวัดวางบนอุปกรณ์วัดใส่แผ่นฟิล์มปิดให้สนิท วางเครื่องวัดสีลงบนฟิล์มใสให้มีลักษณะแนบสนิท กดปุ่มด้านข้าง อ่านค่าสีที่แสดง L*, a* และ b* แล้วจดบันทึกผล

4. วิเคราะห์สมบัติทางเคมี

ค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยเครื่องมือวัดยี่ห้อ Sartorius รุ่น PB 10 ประเทศสหรัฐอเมริกา (AOAC, 2000) ของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (total soluble solid) โดยใช้เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (hand refractometer) (AOAC, 2000) กรดทั้งหมด (total acidity) โดยวิธีไตเตรท (AOAC, 2000) ไลโคปีน (AOAC, 2000) และความชื้น (AOAC, 2000)

5. วิเคราะห์สมบัติทางจุลชีววิทยา

วิเคราะห์หาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ทุกสิ่งทดลองที่อุณหภูมิ $4\pm 2^{\circ}\text{C}$ (FDA Bacteriological Analytical Manual (BAM), 2008)

6. วิเคราะห์สมบัติทางประสาทสัมผัส

การประเมินคุณภาพของน้ำเห็ดสมุนไพรผสมน้ำเก๊กฮวยเสริมเยื่อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนูด้วยวิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้าน สี รสชาติ กลิ่น การยอมรับ โดยรวม จำนวน 30 คน โดยการใช้อย่างทดสอบให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-point hedonic scaling) (1 หมายถึง ไม่ชอบที่สุด 9 หมายถึง ชอบที่สุด) (Wiriyaajaree, 2002)

7. วิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลการผลิตน้ำเห็ดสมุนไพรผสมน้ำเก๊กฮวยเสริมเยื่อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนูใช้แผนการทดลองแบบ Factorial CRD การวิเคราะห์สมบัติกายภาพ และทางเคมี ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) ส่วนการทดสอบทางประสาทสัมผัสใช้แผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (randomized complete block design; RCBD) โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าความแตกต่างค่าเฉลี่ยของสิ่งทดลองโดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (Wiriyaajaree, 2002)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ศึกษาสถานะการทำแห้งเห็ดสมุนไพรและเยื่อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนู

จากผลการทดลองศึกษาความชื้นภายหลังการอบแห้งในตัวอย่างเยื่อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนู เห็ดเข็มทอง และเห็ดหูหนูขาวที่ผ่านการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 1) ในการอบแห้งโดยทำการวัดค่าความชื้นในช่วงเวลาที่

แตกต่างกัน 3 ช่วง คือ 20 22 และ 24 ชั่วโมง เพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการอบตัวอย่าง จากผลการศึกษาค่าความชื้นที่วิเคราะห์ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 84-92 (Suwanno and Makswuan, 2010) จากการสังเกตลักษณะเห็ดหูหนูขาวมีขนาดใหญ่ อวบแน่นเมื่อเปรียบเทียบกับเห็ดเข็มทองมีลักษณะเป็นเส้นยาว บางๆ จากลักษณะภายนอกที่สังเกตจึงทำให้เห็ดมีสมบัติการอุ้มน้ำได้ดีกว่า (Stamets, 2000) และที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมงทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนูมีความชื้นน้อยที่สุดคือร้อยละ 84.93 รองลงมาคือระยะเวลา 22 ชั่วโมงมีค่าร้อยละ 85.12 และ 20 ชั่วโมงมีค่าร้อยละ 85.61 แต่เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ค่าไลโคปีนในเยื่อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนูหลังจากอบแห้งพบว่า เมื่ออบเป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมงจะให้ค่าไลโคปีนสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 15.29 ไมโครกรัม/กรัม (Punkaew *et al.*, 2016) จากผลการวิจัยจะเห็นได้ว่าการใช้เวลาในการอบแห้งช่วยยืดอายุการเก็บรักษาอาหารได้โดยการลดปริมาณน้ำและค่าแอกทีวิตี (water activity) ซึ่งมีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ในการทำแห้งอาหารปริมาณมากและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์การใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้นทำให้ปริมาณความชื้นลดลงปริมาณการให้อากาศร้อนหรือลมร้อนมีผลทำให้ความร้อนถูกถ่ายเทไปยังผิวหน้าอาหารและน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงการเกิดไอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศและถูกพัดพาโดยลมร้อน ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้จึงเลือกเยื่อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนูที่อบเป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมงมาทำการศึกษาต่อไป ในทำนองเดียวกันกับการเลือกผงเยื่อหุ้มเมล็ดพริกขี้หนูทดสอบโดยการอบลดความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดสอบค่าระยะเวลาในการอบแห้งที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมงทำให้เห็ดเข็มทองและเห็ดหูหนูขาวมีความชื้นน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 8.99 และ 10.88

รองลงมาคือระยะเวลา 22 ชั่วโมง และ 20 ชั่วโมง มีค่าความชื้นร้อยละ 8.88 8.75 10.47 และ 9.22 ตามลำดับ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งเห็ดไม่ควรเกิน 90 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการศึกษาค้างนี้จึงเลือกเห็ดเข็มทองผงและเห็ดหูหนูขาวผงที่อบเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง (Inchan, 2002; Boonpoo *et al.*, 2003; Rueangthurakit *et al.*, 2015; Yuenyongputtakal *et al.*, 2017; Nuangpirom *et al.*, 2018) มาทำการศึกษาต่อไป ลักษณะภายนอกเห็ดเข็มทองผง เห็ดหูหนูขาวผง และเห็ดหุ้มน้ำตาลที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการอบแห้งต่างกันทำให้ลักษณะสีที่ได้แตกต่างกันไปดังภาพที่ 1 จะเห็นได้ว่าเห็ดเข็มทองผงที่ได้มีสีน้ำตาลแดง เห็ดหูหนูขาวผงมีสีน้ำตาลอ่อน ส่วนเห็ดหุ้มน้ำตาลมีสีแดง ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ใช้เวลาในการอบแห้งนาน 20-24 ชั่วโมง สามารถเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ทั้งแบบมีเอนไซม์และไม่มีเอนไซม์และมีผลต่อสารให้กลิ่นในเห็ด (Saengow *et al.*, 2001) ในส่วนของเห็ดเข็มทอง เห็ดหูหนูขาว และพริกขี้หนูมีโปรตีนและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบสามารถเกิดปฏิกิริยามเมลลาร์ด (Maillard) ได้ ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเมื่อเซลล์ของผักผลไม้เกิดการชำรุดหรือฉีกขาดทำให้สารประกอบฟีนอลิกที่มีอยู่ในผักผลไม้สัมผัสกับอากาศโดยมีเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เป็นสารสีน้ำตาลที่เรียกว่าเมลานิน (melanin) (Tantaphanichakul, 2004; Yuenyongputtakal *et al.*, 2017) ส่วนพริกขี้หนูยังคงมีสีแดงเนื่องจากรงควัตถุที่พบมากคือ แครโทีนอยด์ประเภทไลโคปีนและเบต้าแคโรทีนสูงโดยเฉพาะเนื้อพริกขี้หนูมีเบต้าแคโรทีนเท่ากับ 22.1 และไลโคปีน 0.9 ไมโครกรัม/กรัมของน้ำหนักผล ส่วนเห็ดหุ้มน้ำตาลพริกขี้หนูมีเบต้าแคโรทีน 0.9 และไลโคปีน 380 ไมโครกรัม/กรัมของน้ำหนักผล (Tantaphanichakul, 2004; Punkaew *et al.*, 2016)

2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพผลิตภัณฑ์น้ำเห็ดผสมในไพรสมถกฮวยเสริมเห็ดหุ้มน้ำตาลพริกขี้หนูพร้อมดื่ม

จากตารางที่ 1 และภาพที่ 2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้านความสว่าง ค่าสี พบว่าค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์หลังจากผสมเห็ดหุ้มน้ำตาลพริกขี้หนูผงที่ผลิตได้ทั้ง 4 สิ่งทดลองพบว่าการเปรียบเทียบค่าการวิเคราะห์ค่า L^* , $+a^*$ และ $+b^*$ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 4 สิ่งทดลอง ($p \leq 0.05$) จากผลการวิจัยพบว่า ลักษณะผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาลอมแดงเหลืองเป็นผลเนื่องมาจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถเกิดปฏิกิริยาโดยฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase) จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ เมื่อสารประกอบฟีนอลิกและออกซิเจนสัมผัสกัน โดยมีเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารโมโนฟีนอล (monophenol) ซึ่งไม่มีสีจะถูกออกซิไดซ์ เป็นไดฟีนอล (diphenol) ซึ่งไม่มีสีและถูกออกซิไดซ์ต่อเป็น o-quinone ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อกับกรดอะมิโนหรือโปรตีนได้เป็นสารสีน้ำตาล และจะรวมตัวกันเป็นโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่และมีสีน้ำตาล เช่น เมลานิน จึงทำให้ตัวอย่างเห็ดเข็มทองผงที่ได้มีสีออกทางแดงและเหลือง สีที่ได้ในแต่ละสิ่งทดลองจะแตกต่างกัน เมื่อเติมเห็ดหุ้มน้ำตาลพริกขี้หนูผงในปริมาณที่แตกต่างกัน (Ulziijargal *et al.*, 2013) จากภาพจะเห็นได้ว่าเมื่อเติมปริมาณเห็ดหุ้มน้ำตาลพริกขี้หนูผงในปริมาณที่มากขึ้นมีผลทำให้ความสว่างและค่าสี $+b^*$ มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ มีแนวโน้มไปทางสีเหลืองเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นลักษณะสีที่ดีของเห็ดหุ้มน้ำตาลพริกขี้หนูและดอกเก๊กฮวยที่เติมลงไปซึ่งค่าที่ได้ตรงข้ามกับค่าสี $+a^*$ มีแนวโน้มเพิ่ม โดยมีแนวโน้มไปทางสีแดงซึ่งเป็นสีของรงควัตถุแคโรทีนอยด์หลักในพริกขี้หนูซึ่งรงควัตถุนี้ประกอบด้วยพันธะคู่เป็นจำนวนมากเมื่อสัมผัสความร้อนผ่านการอบแห้งและสีของเห็ดเข็มทอง เห็ด

หนูหนูขาวที่ผ่านการอบแห้งถูกออกซิไดซ์จึงทำให้สีจางลง นอกจากนี้การเปลี่ยนโครงสร้างของแคโรทีนอยด์ที่เกิดจากการเปลี่ยนไอโซเมอร์จากทรานส์ (trans) ไปเป็นซิส (cis) ซึ่งเป็นลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่มีการเติมเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงไปปริมาณมากขึ้น (Tantaphanichakul, 2004; Punkaew *et al.*, 2016) สำหรับปริมาตรตะกอนที่วัดได้ทำได้โดยการนำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทดสอบมาเขย่าให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันและเทลงในกระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร นำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4±2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการวัดปริมาตรตะกอนที่เกิดขึ้น พบว่า สิ่งทดลองที่ 1 มีปริมาตรตะกอนน้อยที่สุดคือ 12.5 มิลลิลิตร ส่วนสิ่งทดลองที่ 5 มีปริมาตรตะกอนที่มากที่สุดคือ 33.0 มิลลิลิตร จากผลการวิจัยจะเห็นได้ว่าการเติมเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้มีตะกอนเพิ่มมากขึ้น (Nuankhaekul, 2004)

3. ศึกษาสมบัติทางเคมีน้ำเห็ดสมุนไพรผสมเก็กฮวยเสริมเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวพร้อมดื่ม

จากผลการวิเคราะห์ (ตารางที่ 2) ค่าความเป็นกรด-ด่าง พบว่ามีความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยผลิตภัณฑ์ที่มีการเติมเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงร้อยละ 2.5 จะมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงที่สุดคือ 3.69 รองลงมาคือผลิตภัณฑ์ที่มีการเติมเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงร้อยละ 2 และ 1.5 ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากันคือ 3.65 และผลิตภัณฑ์ที่มีการเติมเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงร้อยละ 1 ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างคือ 3.61 ค่าที่วัดได้ไม่แตกต่างกันมาก แสดงว่าอัตราส่วนเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงที่เติมลงไปไม่มีผลต่อค่าที่วัดได้ (Nuankhaekul, 2004; Wirivutthikom, 2018) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่วัดได้ครอบคลุมปริมาณน้ำตาลทรายและสารอื่นที่ละลายน้ำได้ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดมากที่สุดคือ สิ่งทดลองที่ 1 รองลงมาคือ สิ่งทดลองที่ 4 3 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณ

ของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดเท่ากับ 14.0 13.0 12.6 และ 12.0 ริกซ์ ตามลำดับ แสดงว่าอัตราส่วนเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงที่เติมลงไปไม่มีผลต่อค่าที่วัดได้ผลที่วัดได้เป็นไปทำนองเดียวกันกับค่าความเป็นกรด-ด่าง (Nuankhaekul, 2004; Wirivutthikom, 2018) ปริมาณกรดทั้งหมดในผลิตภัณฑ์เห็ดเข็มทอง เห็ดหนูหนูขาว และเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงผสมน้ำเก็กฮวยพร้อมดื่ม พบว่า มีความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยผลิตภัณฑ์ที่มีการเติมเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวร้อยละ 2.5 มีปริมาณกรดทั้งหมดสูงที่สุดรองลงมาคือผลิตภัณฑ์ที่มีการเติมเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงร้อยละ 2.0 1.5 และ 1.0 ซึ่งมีปริมาณกรดทั้งหมดคือ ร้อยละ 0.20 0.16 และ 0.14 ตามลำดับ ปริมาณกรดที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงที่เติมลงไปแต่ค่าที่วัดได้ในแต่ละสิ่งทดลองมีค่าใกล้เคียงมาก (Nuankhaekul, 2004; Wirivutthikom, 2018) ไคโคปินในแต่ละสูตรมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มสูงขึ้น โดยสิ่งทดลองที่ 1 ถึงสิ่งทดลองที่ 4 มีการเติมเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงร้อยละ 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 ตามลำดับ พบว่า ค่าไคโคปินมากที่สุดคือสิ่งทดลองที่ 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวผงเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ค่าไคโคปินมากขึ้นตามปริมาณเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวที่เติมลงไป (Nuankhaekul, 2004; Punkaew *et al.*, 2016; Tanongkankit *et al.*, 2016)

4. ศึกษาสมบัติทางจุลชีววิทยาน้ำเห็ดสมุนไพรผสมเก็กฮวยเสริมเยื่อหุ้มเมล็ดพืชข้าวพร้อมดื่ม

ผลการวิเคราะห์จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลิตภัณฑ์พบว่า การตรวจวิเคราะห์จุลินทรีย์ทั้งหมดไม่มีการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและเป็นอาหารที่มีความเป็นกรดสูง ความเป็นกรดนี้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการให้ความร้อนสูงในกระบวนการ

ผลิตจึงไม่พบจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ (Suwanno and Maksuwan, 2010)

5. ศึกษาสมบัติทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์เห็ดเข็มทอง เห็ดหูหนูขาว และเชื้อหุ้มเมล็ดผักข้าวผัดผสมน้ำแกงฮวยพร้อมดื่ม

เนื่องจากการผลิตน้ำเห็ดสมุนไพรสดพร้อมดื่มสูตรที่ใช้เห็ดสองชนิด (เห็ดเข็มทอง เห็ดหูหนูขาว) ผสมผักข้าวมีกลิ่นของผักข้าวผสม โดยผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน (ตารางที่ 3) พบว่า ผู้ทดสอบชิมบางคนไม่ชอบ และไม่มีรสชาติหรือกลิ่นที่หอม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเติมแกงฮวยเป็นพืชสมุนไพรที่มีประโยชน์ต่อร่างกายและมีกลิ่นของแกงฮวย ซึ่งจะช่วยในเรื่องของสี กลิ่นและรสชาติของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มได้ จากการประเมินผลทางด้านประสาทสัมผัสด้านสีของผลิตภัณฑ์พบว่า ด้านสีเห็ดเข็มทอง เห็ดหูหนูขาว และเชื้อหุ้มเมล็ดผักข้าวผัดผสมน้ำแกงฮวยพร้อมดื่มในด้านสี พบว่าค่าคะแนนการยอมรับมีค่าลดลงตามปริมาณเชื้อหุ้มเมล็ดผักข้าวที่ใส่ จะเห็นได้ว่าสิ่งทดลองที่ 4 มีค่าคะแนนด้านสีต่ำสุด ทั้งนี้เหตุผลหนึ่งที่น่าจะเป็นไปได้คือ การเติมเชื้อหุ้มเมล็ดผักข้าวในปริมาณที่มากเกินไปทำให้สีแดงเข้มมากเกินไปเป็นสีของปริมาณรงควัตถุไลโคปีนและสีน้ำตาลที่เกิดจากการให้ความร้อนในเห็ดเข็มทองอบแห้ง เห็ดหูหนูอบแห้ง และเชื้อหุ้มเมล็ดผักข้าวทำให้ผู้ทดสอบชิมบางคนไม่ชอบ ด้านกลิ่นจะเห็นได้ว่าผลการวิจัย

เป็นไปทำนองเดียวกับด้านสี การเติมเชื้อหุ้มเมล็ดผักข้าวผัดในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้ผู้ทดสอบชิมไม่ยอมรับทั้งนี้เนื่องจาก ผักข้าวเป็นพืชที่มีกลิ่นเชื้อหุ้มเมล็ดผักข้าวซึ่งเป็นกลิ่นเฉพาะตัว ด้านรสชาติผลการวิจัยก็เป็นไปในทำนองเดียวกันกับด้านสี และกลิ่น การเติมเชื้อหุ้มเมล็ดผักข้าวผัดในปริมาณที่มากเกินไปก่อให้เกิดผลเสียด้านสี กลิ่น และรสชาติ จะเห็นได้ว่าสิ่งทดลองที่ 1 การเติมเชื้อหุ้มเมล็ดผักข้าวผัดร้อยละ 1 มีคะแนนความชอบมากกว่าสิ่งทดลองที่ 2 3 และ 4 เนื่องจากปริมาณเชื้อหุ้มเมล็ดผักข้าวผัดแตกต่างกัน ทำให้รสชาติมีความเข้มข้นของปริมาณเชื้อหุ้มเมล็ดผักข้าวผัดไม่เท่ากันจึงมีผลทำให้รสชาติของผลิตภัณฑ์เห็ดเข็มทอง เห็ดหูหนูขาว และเชื้อหุ้มเมล็ดผักข้าวผัดผสมน้ำแกงฮวยพร้อมดื่มแตกต่างกัน ด้านการยอมรับโดยรวมของผลิตภัณฑ์พบว่า สิ่งทดลองที่ 1 ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับโดยรวมมากที่สุดคือ 7.06 สิ่งทดลองที่ 4 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนการยอมรับโดยรวมน้อยที่สุดคือ 5.35 จากค่าที่วิเคราะห์ได้ถือว่าเป็นคะแนนที่ค่อนข้างต่ำมากสำหรับด้านการยอมรับโดยรวม สำหรับเหตุผลที่เป็นไปได้เนื่องจากในสิ่งทดลองที่ 4 มีการเติมปริมาณเชื้อหุ้มเมล็ดผักข้าวในปริมาณมากที่สุดซึ่งปริมาณที่มากเกินไปเองส่งผลให้ผู้บริโภคไม่ยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสทุกด้าน (Suwanno and Maksuwan, 2010; Punkaew *et al.*, 2016)

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพผลิตภัณฑ์เห็ดเข็มทอง เห็ดหูหนูขาว และเห็ดหุ้มเมล็ดฟักข้าวผสมน้ำแก๊สไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณเห็ดหุ้มเมล็ดฟักข้าวผงต่างกัน

สิ่งทดลองที่	ค่าที่วัดได้*			
	L*	+a*	+b*	ปริมาตรตะกอน (มล)*
1	27.90±0.09 ^a	3.14±0.07 ^b	6.23±0.32 ^a	12.5±0.14 ^d
2	24.46±1.21 ^b	3.49±0.65 ^b	6.00±0.66 ^a	17.0±0.76 ^c
3	22.42±0.56 ^{bc}	5.38±0.87 ^a	3.76±0.23 ^b	24.7±0.32 ^b
4	21.63±1.51 ^c	5.43±1.08 ^a	2.59±0.65 ^c	33.0±0.89 ^a

หมายเหตุ: L* หมายถึง ความสว่างซึ่งมีค่าจาก 0 (ดำ) ถึง 100 (สีขาว)

+a* หมายถึง ค่าความเป็นสีเขียวและสีแดง โดยค่า - a*คือสีเขียว และค่า+a*คือสีแดง

+b* หมายถึง ค่าความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน โดยค่า - b*คือสีน้ำเงิน และค่า+b*คือสีเหลือง

*a,b,c แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่ ($p \leq 0.05$)

สิ่งทดลองที่ 1 เติมเห็ดหุ้มเมล็ดฟักข้าวร้อยละ 1.0

สิ่งทดลองที่ 2 เติมเห็ดหุ้มเมล็ดฟักข้าวร้อยละ 1.5

สิ่งทดลองที่ 3 เติมเห็ดหุ้มเมล็ดฟักข้าวร้อยละ 2.0

สิ่งทดลองที่ 4 เติมเห็ดหุ้มเมล็ดฟักข้าวร้อยละ 2.5



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 1 ลักษณะเห็ดผงที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °ซ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ก) เห็ดเข็มทองผง (ข) เห็ดหูหนูขาวผง (ค) เห็ดหุ้มเมล็ดฟักข้าวผง



(1) (2) (3) (4)

ภาพที่ 2 ผลผลิตก้นที่เห็ดเข็มทอง เห็ดหูหนูขาว และเชื้อหุ้มเมล็ดฟักข้าวผสมน้ำแก๊สไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยที่ (1) (2) (3) (4) เติบโตเชื้อหุ้มเมล็ดฟักข้าวผงร้อยละ 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีผลผลิตก้นที่เห็ดเข็มทอง เห็ดหูหนูขาว และเชื้อหุ้มเมล็ดฟักข้าวผสมน้ำแก๊สไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ ปริมาณเชื้อหุ้มเมล็ดฟักข้าวผงต่างกัน

สิ่งทดลองที่	ค่าที่วัดได้*			
	ความเป็นกรด-ด่าง*	ของแข็งละลายน้ำได้ทั้งหมด (°บริกซ์) ^{ns}	กรดทั้งหมด* (ร้อยละ)	ไลโปปีน* (ไมโครกรัม/กรัม)
1	3.61±0.43 ^b	14.0±0.81	0.14±0.09 ^d	3.97±1.32 ^d
2	3.65±0.87 ^{ab}	12.0±0.07	0.16±0.14 ^c	6.43±1.43 ^c
3	3.65±1.12 ^{ab}	12.6±0.32	0.20±0.16 ^b	8.54±2.11 ^b
4	3.69±0.56 ^a	13.0±0.56	0.29±0.81 ^a	10.73±0.99 ^a

หมายเหตุ: *a,b,c แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่ ($p \leq 0.05$)

ns แสดงถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้ง ($p > 0.05$)

สิ่งทดลองที่ 1 เติบโตเชื้อหุ้มเมล็ดฟักข้าวผงร้อยละ 1.0

สิ่งทดลองที่ 2 เติบโตเชื้อหุ้มเมล็ดฟักข้าวผงร้อยละ 1.5

สิ่งทดลองที่ 3 เติบโตเชื้อหุ้มเมล็ดฟักข้าวผงร้อยละ 2.0

สิ่งทดลองที่ 4 เติบโตเชื้อหุ้มเมล็ดฟักข้าวผงร้อยละ 2.5

ตารางที่ 3 สมบัติทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์เห็ดเข็มทอง เห็ดหูหนูขาวและเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าผงผสมน้ำแก๊กฮวยพร้อมดื่ม

สิ่งทดลองที่	ค่าที่วัดได้*			
	สี*	กลิ่น*	รสชาติ*	การยอมรับโดยรวม*
1	7.66±0.32 ^a	6.83±0.89 ^a	6.93±0.76 ^a	7.06±0.54 ^a
2	7.40±1.13 ^{ab}	6.23±0.98 ^b	6.30±1.10 ^b	6.23±1.21 ^b
3	7.20±0.43 ^{bc}	6.16±0.45 ^b	5.86±0.23 ^{bc}	5.75±0.78 ^c
4	6.83±1.13 ^c	5.50±1.13 ^c	5.53±0.24 ^c	5.35±0.76 ^d

หมายเหตุ: *a,b,c,... แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่ ($p \leq 0.05$)

สิ่งทดลองที่ 1 เติมเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าร้อยละ 1.0

สิ่งทดลองที่ 2 เติมเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าร้อยละ 1.5

สิ่งทดลองที่ 3 เติมเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าร้อยละ 2.0

สิ่งทดลองที่ 4 เติมเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าร้อยละ 2.5

สรุป

1. จากการศึกษาเวลาในการอบเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าผงเวลาที่เหมาะสมต่อคุณภาพของเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าผงคือ 22 ชั่วโมง เนื่องจากมีค่าความชื้นที่ลดลงซึ่งมีร้อยละความชื้นเฉลี่ยคือ 85.12 และมีค่าไลโคปีนสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 15.29 ไมโครกรัม/กรัม และจากการศึกษาเวลาในการอบเห็ดเข็มทองและเห็ดหูหนูขาวผงที่เหมาะสมต่อคุณภาพเห็ดเข็มทองผงและเห็ดหูหนูขาวผงคือ 24 ชั่วโมงเนื่องจากมีความชื้นผงสุดท้ายซึ่งมีค่าร้อยละคือ 8.99 และ 10.88 ตามลำดับ

2. จากการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพทางเคมี จุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์เห็ดเข็มทอง เห็ดหูหนูขาว และเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าผงผสมน้ำแก๊กฮวยพร้อมดื่มที่ปริมาณเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าผงต่างกัน และเติมเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าผงร้อยละ 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 พบว่าค่าความสว่าง ค่าสีแดง และค่าสีเหลือง ปริมาตรตะกอน ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณไลโคปีน

ปริมาณกรดทั้งหมด และการประเมินทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รสชาติ ตะกอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คุณภาพทางจุลชีววิทยาไม่พบปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดในทุกสิ่งทดลอง

3. จากผลการวิเคราะห์ด้านประสาทสัมผัสพบว่าสิ่งทดลองที่ 1 มีการเติมเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าผงร้อยละ 1 ผสมดอกแก๊กฮวย 15 กรัม กับเห็ดเข็มทองและเห็ดหูหนูขาว 2.5 กรัม ตามลำดับ เป็นสิ่งทดลองที่เหมาะสมที่สุดในด้านการยอมรับทุกด้านคือ ด้านสี กลิ่น รสชาติ และการยอมรับโดยรวม ในขณะที่การเติมเห็ดหุ้มเมล็ดผักข่าผงร้อยละ 2.5 มีผลทำให้การยอมรับรวมด้านประสาทสัมผัสลดลงทุกด้าน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จจุล่งไปด้วยดี ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ นักศึกษาสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารชั้นปีที่ 4 เจ้าหน้าที่สาขาฯ คณะ

เทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยที่ช่วยให้ช่วยเหลือด้านการเตรียมตัวอย่างการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลและอำนวยความสะดวกด้านสถานที่ในการปฏิบัติการทดลองจนการสนับสนุนทุนวิจัยด้วยเงินงบประมาณคณะฯ จนแล้วเสร็จจุลวงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 2000. **Official method of analysis**. 17th ed. Association of Official Chemists, Washington D.C.
- Boonpoo, S., Sirisansaneeyakul, S., Jittanit, W., Parakulsuksatid, P., Songpim, M., Mongkolkam, D. and Khuenpet, K. 2003. Development of processing of gac fruit powder, pp. 247-254. *In Proceedings of 52nd Kasetsart University Annual Conference: Agro Industry*. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Charoenphun, N. and Sophe, G. 2018. Healthy drinks from mushrooms and longan. **Journal of Science and Technology** 28(3): 480-493. (in Thai)
- Chenung, P.C.K. 1996. Dietary fiber content and composition of some cultivated edible mushroom fruiting bodies and mycelia. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 44(2): 468-471.
- Chenung, P.C.K. 1997. Chemical evaluation of some lesser known edible mushroom mycelia produced in submerged culture from soy milk waste. **Food Chemistry** 60(1): 61-65.
- FDA Bacteriological Analytical Manual (BAM). 2008. **Chapter 3 and 18**. Available Source: <http://www.fda.gov/Food/ScienceResearch/LaboratoryMethods/BacteriologicalAnalyticalManualBAM/default.htm>, October 13, 2008.
- Hobbs, C. 1995. **Medicinal mushrooms: an exploration of tradition, healing and culture**. Botanica Press, Summertown.
- Inchan, C. 2002. Drying of *Pleurotus Sajor-Caju* by a solar modular dryer. Master Degree of Mechanical Engineering Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi. (in Thai)
- Nuangpirom, P., Techapunratanakul, N., Panta, S., Maneewan, D. and Chitanu, K. 2018. Potential development and capacity building for mushroom product processing: Case study of Sukprasert Mushroom Farm. **Journal of Socially Engaged Scholarship Rajamangala University of Technology Lanna** 2(2): 41-51. (in Thai)
- Nuankhaekul, S. 2004. Development of corn beverage supplemented with dietary fiber from residue from corn milk production process. Master Degree of Science Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi. (in Thai)
- Phamonprawat, K. 2013. **Gac, a very valuable local plant**. 1st ed. Phan villager publishing house, Bangkok. (in Thai)
- Phonprapai, C., Oontawee, S., Sukaim, J. and Thongsong, P. 2019. Influences of extraction methods on extraction yield and antioxidant activity of Thai herbal extracts. **Thai Journal of Science and Technology** 8(5): 493-508. (in Thai)
- Punkaew, T., Hnongkhunsan, K. and Baipong, S. 2016. The appropriate amount of maltodextrin for

- gac aril powder processing. **Journal of Food Science and Technology** 1: 1-10. (in Thai)
- Rueangthurakit, W., Patanathavorn, N. and Wongpakdee, C. 2015. Mushroom drying by hot air. Bachelor Degree of Mechanical Engineering Thesis, Burapa University. (in Thai)
- Saengow, K., Katipun, Y., Suttihanalert, W., Yoovidhya, T. and Rattanasomboon, N. 2001. Effect of drying condition on shiitake mushroom flavor. **Journal of Research and Development King Mongkut's University of Technology Thonburi** 44(3): 285-297. (in Thai)
- Stamets, P. 2000. **Growing gourmet and medicinal mushrooms**. Speed Press, California.
- Suwanno, S. and Maksuwan, S. 2010. Production of extracted medicinal mushrooms juice ready-to-drink. **Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok** 20(2): 278-288. (in Thai)
- Tanongkankit, Y., Narkprasom, K. and Narkprasom, N. 2016. Effect of Processing on Physical Property and Carotenoid Content in Natural Food Colorant from Gac aril. **Journal of Food Technology Siam University** 11(1): 47-57. (in Thai)
- Tantaphanichakul, R. 2004. **Food Chemistry**. 2nd ed. Ramkhamhaeng University Press, Bangkok. (in Thai)
- Ulzizjargal, E., Yang, J.H., Lin, L.Y., Chen, C.P. and Mau, J.L. 2013. Quality of bread supplemented with mushroom mycelia. **Journal of Food Chem** 138(1): 70-76.
- Wirivutthikorn, W. 2018. Effect of ratio of okra gac fruit and passion fruit on color and preferences of mixed juice. **International Journal of Food Engineering** 4(3): 212-215.
- Wiriyajaree, P. 2002. **Experimental design**. 2nd ed. Department of Product Development Technology, Faculty of Agro Industry, Chiang Mai University, Chiang Mai. (in Thai)
- Wongbasg, C., Jangchud, K., Jangchud, A., Tuntrakul, P. and Tadakittisarn, S. 2009. Germination condition affecting the physical and chemical properties of germinated glutinous brown rice flour, pp. 630-638. **In Proceedings of 47th Kasetsart University Annual Conference: Agro Industry**. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Wuttithammavej, W. 2009. **Thai herbs**. 3rd ed. Silp Siam Packaging and Printing, Bangkok. (in Thai)
- Yuenyongputtakal, W., Limroongreungrat, K., Chaipanand, P. and Srimuang, T. 2017. Effect of hot air drying temperature and time on qualities of enoki mushroom (*Flammulina velutipes*) powder produced from uncommonly consumed part. **Journal of Science and Technology** 25(6): 1001-1014. (in Thai)

ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากทะลายปาล์มเปล่าและการใช้ประโยชน์

Potential of Biogas Production from Palm Empty Fruit Bunches and Its Utilization

พิพัฒน์ จันทร์ประดิษฐ์^{1*} อธิราชย์ เรืองณรงค์² และ ปิยะรัตน์ บุญแสวง³

Pipat Junpadit^{1*}, Athirat Rerngnarong² and Piyarat Boonsawang³

Received: 1 March 2021, Revised: 25 June 2021, Accepted: 19 July 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากทะลายปาล์มเปล่าซึ่งเป็นวัสดุเศษเหลือชนิดของแข็งย่อยยาก โดยนำทะลายปาล์มเปล่าหมักแบบของแข็งร่วมกับมูลสุกรวางบนชั้นตะแกรงบนสุดของถังปฏิกรณ์สามส่วนในสภาวะไร้อากาศ และทำการพ่นฝอยน้ำเสียโรงอาหารคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จากส่วนกลางของถัง 5 ลิตรต่อวัน พบว่า ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันสูงสุดหลังวันที่ 5 เท่ากับ 10.52-10.83 ลิตร มีองค์ประกอบก๊าซมีเทนร้อยละ 66.98-68.49 น้ำเสียที่ผ่านการพ่นฝอยจะไหลล้นเข้าสู่ส่วนล่างของถัง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ และเติมน้ำเสียใหม่เข้าไปแทนที่ วัสดุหมักสามารถนำกลับมาผลิตก๊าซชีวภาพซ้ำได้ มีองค์ประกอบธาตุอาหารผ่านเกณฑ์มาตรฐานสามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน ผสมกับดินปลูกผักกวางตุ้งในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนักค่อน้ำหนัก และให้น้ำแบบน้ำหยดด้วยน้ำหมักชีวภาพเปรียบเทียบกับน้ำประปา เป็นเวลา 20 วัน พบว่า ผักกวางตุ้งในชุดการทดลองที่รดด้วยน้ำหมักชีวภาพ มีการเจริญมากกว่า โดยน้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 37.50 และ 2.04 กรัมต่อต้น ตามลำดับ น้ำเสียที่ผ่านการพ่นฝอยนำกลับมาใช้เป็นน้ำหมักชีวภาพปลูกผักกวางตุ้งโดยไม่ใช้ดินและเติมสารละลายธาตุอาหารที่ความเข้มข้นร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยปริมาตร เป็นเวลา 20 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่เติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 25 ผักกวางตุ้งมีน้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้งสูงสุด เท่ากับ 54.90 และ 3.11 กรัมต่อต้น ตามลำดับ การผลิตก๊าซชีวภาพจากทะลายปาล์มเปล่าทำให้ไร้ของเสียปล่อยทิ้ง ถือเป็นแนวทางการจัดการวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรได้อย่างคุ้มค่าและยั่งยืน

คำสำคัญ: ทะลายปาล์มเปล่า, ก๊าซชีวภาพ, วัสดุปรับปรุงดิน, น้ำหมักชีวภาพ, ไร้ของเสีย

¹ คณะวิทยาศาสตร์การกีฬาและสุขภาพ มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตกระบี่ ตำบลกระบี่ใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่ 81000

¹ Faculty of Sports and Health Science, Thailand National Sports University, Krabi Campus, Krabi Yai, Mueang, Krabi 81000, Thailand.

² อุทยานวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

² Prince of Songkla University Science Park, Prince of Songkla University, Thung Yai, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.

³ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

³ Faculty of Agro-Industry, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): p.j-kow@hotmail.com

ABSTRACT

This research aimed to study the potential of biogas production from palm empty fruit bunches which were difficult to digest. The palm empty fruit bunches with swine manure on the steel sieve at the top part of the 3-section bioreactor were fermented in the anaerobic solid state. The wastewater in the middle part of the 3-section bioreactor was sprayed on fermented material 5 liters per day. It was found that the system produced the highest biogas of 10.52-10.83 liters per day with methane content of 66.98-68.49%. The sprayed wastewater gravimetrically flew to the bottom part of the 3-section bioreactor for utilization and the new wastewater was then sprayed on the top part of the 3-section bioreactor. Fermentation materials could be reused for biogas production with high nutrient contents which met the soil improvement material standard. Fermentation materials were mixed with soil 1 : 1 (w/w) for bok choy planting. Liquid bio-fertilizer was used for watering until 20 days and compared to tap water. It was found that bok choy planted with fermentation material and watered with liquid bio-fertilizer gave the higher wet and dry weights of 37.50 and 2.04 g per plant, respectively. Liquid bio-fertilizer from recycled sprayed wastewater was used for hydroponics plantation. Liquid bio-fertilizer was mixed with nutrient solution at a concentration of 0 25 50 75 and 100 % v/v and used for plantation for 20 days. It was found that bok choy watered with the liquid bio-fertilizer and 25% nutrient solution obtained the highest wet and dry weights of 54.90 and 3.11 g per plant, respectively. Therefore, the biogas production from palm empty fruit bunches could be considered as a zero waste guideline for the cost-effective and sustainable management of agricultural waste.

Key words: palm empty fruit bunches, biogas, soil improvement material, liquid bio-fertilizer, zero waste

บทนำ

อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน โดยรวมมีแนวโน้มความต้องการสูงขึ้น ส่งผลให้มีการขยายพื้นที่เพาะปลูกทั่วประเทศอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552 มีพื้นที่เพาะปลูกมากกว่า 5.8 ล้านไร่ในปี พ.ศ. 2561 (Office of Agricultural Economics, 2018) และภาคใต้โดยเฉพาะจังหวัด กระบี่ สุราษฎร์ธานี และชุมพร มีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันและโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 86.4 ของพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันทั้งประเทศ อีกทั้งยุทธศาสตร์ชาติ แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของประเทศมีการมุ่งส่งเสริมและสนับสนุนการใช้

น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว B10 (น้ำมันทางเลือก) เป็นน้ำมันดีเซลเกรดมาตรฐานของไทย ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ก่อให้เกิดวัสดุเศษเหลือ อาทิเช่น ทะลายปาล์มเปล่า (Empty fruit bunches) ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยกลูแคนร้อยละ 42.85 ไชแลนร้อยละ 24.01 ลิกนินร้อยละ 11.70 เถ้าร้อยละ 0.52 และอื่นๆ ร้อยละ 20.92 (Rahman *et al.*, 2007) เป็นของแข็งย่อยยากเหลือทิ้งจำนวนมากกว่า 500 ตันต่อปี โดยมูลค่าการซื้อขายทะลายปาล์มเปล่าราคาตันละ 180 บาท มีการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น การใช้ทะลายปาล์มเปล่าเป็นวัสดุเพาะเห็ด เป็นต้น (Umar *et al.*, 2013) ทะลายปาล์มเปล่าเป็นวัสดุชีวมวลชนิด

ของแข็งที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงด้วยกระบวนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศทั้งในรูปแบบการหมักแบบเปียกทั่วไปและการหมักแบบแห้ง (Suksong *et al.*, 2020; Tepsour *et al.*, 2019; Chaikitkaew *et al.*, 2015; O-Thong *et al.*, 2012) ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 55.0-60.9 ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะเลสาบปลาต้มเปล่า (Suksong *et al.*, 2020; Chaikitkaew *et al.*, 2015)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประโยชน์จากทะเลสาบปลาต้มเปล่า ด้วยเทคโนโลยีการกำจัดของเสียแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจนำมาใช้การบำบัดของเสียอินทรีย์ที่ให้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ ก๊าซชีวภาพโดยทั่วไปเป็นก๊าซผสม ประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) ร้อยละ 50-75 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 25-50 และก๊าซอื่นๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซแอมโมเนีย เป็นต้น โดยมากจะมีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 1 (Kougias and Angelidaki, 2018) ซึ่งก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในก๊าซชีวภาพทำให้จุดติดไฟได้ สามารถนำไปหุงต้มประกอบอาหาร นอกจากนี้ยังมีผลพลอยได้อื่นๆ เช่น กากของแข็งที่เหลือหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินปลูกพืช และของเหลวหลังจากผลิตก๊าซชีวภาพสามารถใช้เป็นน้ำหมักชีวภาพเพื่อการเพิ่มสารอาหารให้แก่พืชและช่วยลดการใช้ปุ๋ยเคมีซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ได้อีกด้วย (Baştabak and Koçar, 2020)

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วิธีการทดลอง

1.1 การผลิตก๊าซชีวภาพ

1.1.1 อังปฏิบัติการสามส่วนสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

อังปฏิบัติการทำจากท่อพีวีซีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 เซนติเมตร จำนวน 3 ท่อน สูง 20 เซนติเมตร 1 ท่อน และสูง 15 เซนติเมตร 2 ท่อน เรียงต่อกันในแนวตั้งทรงสูง ที่มีความสูงรวมเท่ากับ 50 เซนติเมตร และปริมาตรรวมเท่ากับ 25 ลิตร วางอยู่บนขาตั้งยกสูงจากพื้น สามารถเลื่อนปรับระดับได้ อังปฏิบัติการสามส่วนประกอบด้วยส่วนที่หนึ่งท่อนบนสุดสำหรับบรรจุวัสดุหมัก วางอยู่บนชั้นตะแกรงสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ ส่วนที่สองท่อนกลางบรรจุน้ำเสียใช้ในการฟ้นฟอยและหมุนเวียนน้ำเสียด้วยจักรยานปั่นน้ำ เพื่อให้ความชื้นและสารอาหารแก่วัสดุหมัก ผ่านฝักบัวกระจายน้ำซึ่งติดอยู่ด้านในของฝาถังหมักและมีอีก 1 ช่องเป็นบอลลวลควบคุมการเปิดปิดเพื่อให้ก๊าซชีวภาพไหลออกและเก็บไว้ในถังเก็บก๊าซ ส่วนที่สามเป็นท่อท่อนล่างสุดสำหรับเก็บน้ำหมักชีวภาพ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์รดน้ำผักกวางตุ้งแบบน้ำหยด และการปลูกผักกวางตุ้งโดยไม่ใช้ดิน

1.1.2 การเตรียมวัสดุหมัก

วัสดุหมักที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ทะเลสาบปลาต้มเปล่าที่ผ่านการบดฉีกตามกรรมวิธีการผลิตจากโรงงานสกัดน้ำมันปลาต้ม บริษัท ไทยทาโลว์แอนด์ออยล์ จำกัด จังหวัดสุราษฎร์ธานี นำมาผึ่งแดดให้แห้งสนิท ให้มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 12 เป็นเวลา 2-3 วัน เก็บไว้ในที่อุณหภูมิห้อง วัสดุสุกรจากฟาร์มคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับใช้เป็นหัวเชื้อในการผลิตก๊าซชีวภาพ และน้ำเสียจากโรงอาหารของคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เพื่อใช้เป็นแหล่งสารอาหารและให้ความชื้นแก่วัสดุหมักในการผลิตก๊าซชีวภาพ เก็บไว้ในภาชนะปิดและที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

1.1.3 การผลิตก๊าซชีวภาพจากทะเลสาบปลาหมึกร่วมกับมูลสุกร และฟ่นฝอยน้ำเสียโรงอาหารบนวัสดุหมัก

การผลิตก๊าซชีวภาพจากทะเลสาบปลาหมึกเป่าในสภาวะไร้อากาศด้วยถังปฏิกรณ์สามส่วน เตรียมวัสดุหมักทะเลสาบปลาหมึกร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วนร้อยละ 70:30 โดยปริมาตรต่อปริมาตร เพื่อให้มีศักยภาพในการผลิตพลังงานชีวภาพ (Bioenergy potential) สูงสุด (Rosas-Mendoza *et al.*, 2021) วางบนชั้นตะแกรงส่วนที่หนึ่งของถังปฏิกรณ์แล้วปิดฝาให้สนิท จากนั้นป้อนน้ำเสียโรงอาหารที่เก็บไว้ในส่วนที่สองของถัง ฟ่นฝอยลงบนวัสดุหมักในส่วนที่หนึ่ง โดยฟ่นฝอยและหมุนเวียนน้ำเสียทุกวัน วันละ 3 ครั้ง ด้วยจักรยานบีมน้ำ ครั้งละเวลา 15 นาที จนครบ 7 วัน ทำการเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ จากนั้นจึงทำการถ่ายน้ำเสียหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพจากส่วนที่สองเก็บไว้ในส่วนที่สามของถังปฏิกรณ์ เพื่อนำไปทดสอบรดน้ำผักกวางตุ้งแบบน้ำหยด และการปลูกผักกวางตุ้งโดยไม่ใช้ดินต่อไป เมื่อสิ้นสุดการทดลองนำกากของแข็งที่เหลือหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพ และน้ำหมักชีวภาพ ทดสอบคุณลักษณะด้านปุ๋ยโดยวิเคราะห์ธาตุอาหารได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแตสเซียม

1.2 การปลูกผักกวางตุ้ง

1.2.1 การเตรียมแปลงปลูกผักกวางตุ้ง แบบใช้ดินผสมกากของแข็งที่เหลือหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการรดน้ำหมักชีวภาพแบบน้ำหยด

เตรียมแปลงปลูกผักกวางตุ้งโดยวัดระยะในการปลูกระหว่างต้นและระหว่างแถว 10×10 เซนติเมตร ขุดดินให้ลึก 15-20 เซนติเมตร ตากดินทิ้งไว้เป็นเวลา 3-5 วัน แล้วนำกากของแข็งที่เหลือหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพคลุกเคล้ากับดินที่ตากทิ้งไว้ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักพรวน

ย่อยหน้าดินให้ร่วนซุย เพาะเมล็ดผักกวางตุ้งในแต่ละหลุม หลุมละ 4-5 เมล็ด แล้วนำไปวางไว้ในที่ร่มเป็นเวลา 5 วัน

1.2.2 การเตรียมแปลงปลูกผักกวางตุ้งโดยไม่ใช้ดิน

เตรียมแปลงปลูกผักกวางตุ้งโดยการเพาะต้นกล้าจากเมล็ดผักกวางตุ้ง 4-5 เมล็ด หยอดลงในช่องรอยบากบนแผ่นฟองน้ำที่เปียกชุ่ม คลุมปิดด้วยผ้าสะอาดที่เปียกชื้น แล้วนำไปวางไว้ในที่ร่มเป็นเวลา 5 วัน ทำการเจือจางน้ำหมักชีวภาพกับสารละลายธาตุอาหารตามความเข้มข้นต่างๆ แล้วเทใส่กระบะไว้

1.2.3 การปลูกผักกวางตุ้งแบบใช้ดินผสมกากของแข็งที่เหลือหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการรดน้ำหมักชีวภาพแบบน้ำหยด

การทดสอบปลูกผักกวางตุ้งแบบใช้ดินผสมกากของแข็งที่เหลือหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการรดน้ำหมักชีวภาพแบบน้ำหยด โดยทำการคัดเลือกต้นกล้าผักกวางตุ้งที่สมบูรณ์ให้เหลือหลุมละ 1 ต้น แล้วทำการรดด้วยน้ำเสียหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพ (น้ำหมักชีวภาพ) ที่ต่อท่อให้ออกจากส่วนที่สามของถังปฏิกรณ์ลงบนแปลงปลูกผักกวางตุ้ง โดยปลายท่อแต่ละเส้นจะมีบอลวาล์วควบคุมการไหลให้ของเหลวไหลออกมาเป็นหยดน้ำ ลงบนผิวดินเป็นเวลา 1 ชั่วโมงต่อวัน ทำการเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (รดด้วยน้ำประปาแบบน้ำหยด) ระยะเวลาในการเพาะปลูกผักกวางตุ้ง 20 วัน แล้วนำผักกวางตุ้งวิเคราะห์น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง

1.2.4 การปลูกผักกวางตุ้งแบบไม่ใช้ดินด้วยน้ำหมักชีวภาพ

การทดสอบน้ำหมักชีวภาพจากส่วนที่สามของถังปฏิกรณ์ โดยทำการเติมลงไปกับสารละลายธาตุอาหารในกระบะพลาสติก ทำการศึกษาปริมาณสารละลายธาตุอาหารสูตร A (N:P:K เท่ากับ 15:15:15) และสูตร B (ปุ๋ยยูเรีย) ที่มีการเติมลงไปน้ำหมัก

ชีวภาพที่ความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร ร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยปริมาตรต่อปริมาตร ตามคำแนะนำของ Boonnoi *et al.* (2017) เปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่มีการเติมเฉพาะน้ำหมักชีวภาพ และชุดน้ำประปาที่มีการเติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 100 ที่ปริมาตรของเหลว 10 ลิตร คัดเลือกต้นกล้าผักกวางตุ้งที่สมบูรณ์ที่เตรียมไว้ให้เหลือช่องละ 1 ต้น ย้ายลงปลูกบนแผ่นโพนที่ใช้เป็นวัสดุปลูก จากนั้นทำการปลูกผักกวางตุ้งบนวัสดุปลูกในสารละลายธาตุอาหารเตรียมไว้ และมีการให้อากาศด้วยเครื่องเติมอากาศเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของสารละลายธาตุอาหาร ระยะเวลาในการเพาะปลูกผักกวางตุ้ง 20 วัน แล้วนำผักกวางตุ้งวิเคราะห์น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง

2. วิธีการวิเคราะห์

วิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุหมักแต่ละชนิด ได้แก่ ทะลายปาล์มเปล่า น้ำเสียโรงอาหาร และมูลสุกร พารามิเตอร์ เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ซีโอดี ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย เถ้า ความชื้น (APHA *et al.*, 2017) และเซลลูโลส (Subkaree, 2007) วิเคราะห์หาปริมาณก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการแทนที่น้ำ (Markphan *et al.*, 2020) และวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี ทดสอบคุณลักษณะด้านปุ๋ยโดยวิเคราะห์ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแตสเซียม (AOAC, 1990)

วิเคราะห์ค่าทางสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) พร้อมทั้งคำนวณหาค่าความถี่ ร้อยละ และค่าเฉลี่ย โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics Version 23.

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. คุณลักษณะของวัสดุหมักสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

คุณลักษณะน้ำเสียของโรงอาหารที่ใช้ในการฟ้นฝอยบนวัสดุหมักเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ จากพารามิเตอร์ต่างๆ พบว่า น้ำเสียนี้อาจมีความเป็นกรด-ด่างเป็นกลาง (pH 7.10) ปริมาณซีโอดี เท่ากับ 3 กรัมต่อลิตร ซึ่งสารต่างๆ ในน้ำเสียส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ เมื่อวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่าย (VFA) พบว่า สารอินทรีย์ส่วนหนึ่งจะถูกจุลินทรีย์ตามธรรมชาติย่อยสลายและเปลี่ยนเป็น VFA เท่ากับ 0.31 กรัมต่อลิตร เช่น กรดแอสซิติค กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทิริก และกรดชนิดอื่นๆ ปริมาณของแข็งทั้งหมดของแข็งระเหยง่าย และของแข็งแขวนลอย ในน้ำเสียโดยเฉลี่ยน้อยกว่า 0.5 กรัมต่อลิตร แสดงว่าตะกอนในน้ำเสียนี้อาจมีปริมาณน้อยและไม่ค่อยมีความสกปรก เมื่อพิจารณาลักษณะของน้ำปรากฏว่ามีลักษณะขุ่นเล็กน้อย น้ำเสียจากโรงอาหารมีสารอินทรีย์ในรูปของ VFA ที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ แต่ยังมีไม่เพียงพอ จึงมีการเติมทะลายปาล์มเปล่าเป็นวัสดุหมักร่วมกับมูลสุกรเพื่อให้มีสารอินทรีย์สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นการเพิ่มศักยภาพและความเป็นไปได้ในการใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนมากขึ้น (Hagos *et al.*, 2017) โดยองค์ประกอบทางเคมีของทะลายปาล์มเปล่า พบว่า มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6.49 ความชื้นและเซลลูโลส เท่ากับร้อยละ 8.72 และ 41.31 ตามลำดับ และองค์ประกอบทางเคมีของมูลสุกร พบว่า มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.84 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของแข็งระเหยง่าย และเถ้า เท่ากับ 23.97 19.54 และ 4.63 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของวัสดุหมักสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบ	ทะลายปาล์มเปล่า	มูลสุกร	น้ำเสียโรงอาหาร
ความชื้น (ร้อยละ)	8.72	-	-
ออกซิเจนที่ละลาย (ร้อยละ)	-	-	77.19
กรด-ด่าง	6.49	6.84	7.10
เซลลูโลส (ร้อยละ)	41.31	-	-
ซีโอดี (กรัมต่อลิตร)	-	-	3.00
กรดไขมันระเหยง่าย (กรัมต่อลิตร)	-	-	0.31
ของแข็งทั้งหมด (กรัมต่อลิตร)	-	23.97	0.48
ของแข็งระเหยง่าย (กรัมต่อลิตร)	-	19.54	0.21
ของแข็งแขวนลอย (กรัมต่อลิตร)	-	17.20	0.05
ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (กรัมต่อลิตร)	-	15.72	0.01
เถ้า (กรัมต่อลิตร)	-	4.63	0.25

หมายเหตุ: - ไม่ได้ดำเนินการวิเคราะห์

2. การผลิตก๊าซชีวภาพจากทะลายปาล์มเปล่าหมักร่วมกับมูลสุกร และฟนฝอยน้ำเสียโรงอาหารบนวัสดุหมัก

จากการผลิตก๊าซชีวภาพจากทะลายปาล์มเปล่าหมักร่วมกับมูลสุกร และฟนฝอยน้ำเสียโรงอาหาร เป็นแหล่งของสารอาหารและให้ความความชื้นบนวัสดุหมัก พบว่าในช่วง 3 วันแรกหลังจากทำการเดินระบบ การผลิตก๊าซชีวภาพมีปริมาณค่อนข้างน้อย (เฉลี่ย 2.4 ลิตรต่อวัน) ยกเว้นวันที่ 1 มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ 4.8 ลิตรต่อวัน เนื่องจากจุลินทรีย์ในมูลสุกรสามารถย่อยสลายสารอาหารที่มีอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งเป็นวัสดุที่ย่อยสลายง่ายกว่าเมื่อเทียบกับทะลายปาล์มเปล่าซึ่งเป็นวัสดุหมักชนิดของแข็งย่อยยาก ที่มีองค์ประกอบ เช่น เซลลูโลส ลิกโนเซลลูโลส เป็นต้น (Khan and Ahring, 2019) องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 37.42 ก๊าซมีเทนร้อยละ 3.69 และก๊าซชนิดอื่นร้อยละ 58.89 พบว่าร้อยละของก๊าซมีเทนยังมีปริมาณน้อย เพราะในช่วงวันแรกๆ จุลินทรีย์ที่ผลิตกรดจะมีการย่อยสลาย

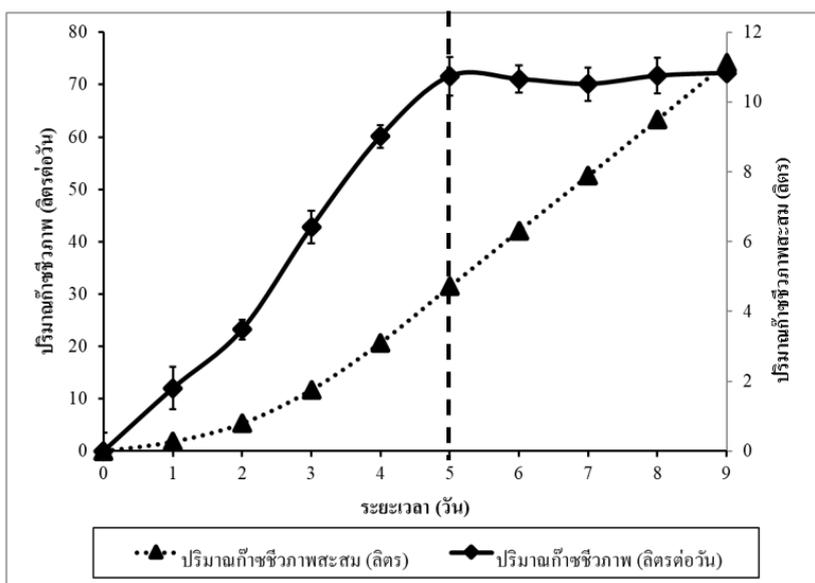
สารอินทรีย์จากวัสดุหมักในสภาวะไร้อากาศ และเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยง่าย เช่น กรดแอสติก หลังจากนั้นจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนจะย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่าย เพื่อใช้ในการเจริญและผลิตก๊าซมีเทนจึงมีปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง (Wainaina *et al.*, 2019) เนื่องจากการผลิตก๊าซมีเทน จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนสามารถใช้ทั้งกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid: VFA) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารตั้งต้นได้ (Chaiyaprat, 2018) ซึ่งเกิดขึ้นหลังจาการเดินระบบในวันที่ 3 (ตารางที่ 2) พบว่ามีค่าสูงสุดและคงที่หลังจากวันที่ 5 โดยผลิตก๊าซชีวภาพ 10.52-10.83 ลิตรต่อวัน มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ ร้อยละ 66.98-68.49 ดังตารางที่ 2 และภาพที่ 1 - 2 ดังนั้นในการเดินระบบและการเปลี่ยนถ่ายน้ำเสีย จะทำการเปลี่ยนถ่ายทุกๆ วันที่ 5 ของการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จากส่วนที่สองเพื่อนำไปเก็บพักไว้ในส่วนที่สามของถัง แล้วทำการถ่ายน้ำเสียชุดใหม่ลงไปแทนที่น้ำเสียชุดเดิมที่บรรจุไว้ในส่วนที่สองของถัง

ปฏิกรณ์ สำหรับใช้ในการฟ้นฝอยบนวัสดุหมักใน รอบถัดไป โดยพบว่าวัสดุหมักที่ใช้ในการผลิตก๊าซ ชีวภาพสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำ (Reuse) ได้จำนวน 4 ครั้ง โดยสังเกตได้จากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ลดลง จากนั้นจึงทำการรื้อระบบ เพื่อเปลี่ยนวัสดุหมักชุด ใหม่ลงไปแทนที่วัสดุหมักชุดเดิม ซึ่งวัสดุหมักที่ผ่านการ ใช้ซ้ำเป็นกากของแข็งที่เหลือหลังจากการผลิต ก๊าซชีวภาพ สามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินนำไป ปลุกผักได้ เนื่องจากผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ของกรมวิชาการเกษตร (Department of Agriculture, 2014) และปุ๋ยหมักของสินค้าเกษตรและอาหาร แห่งชาติ: ปุ๋ยหมัก (มกอช. 9503) (National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standard, 2005) โดยมีองค์ประกอบของธาตุอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแตสเซียม ร้อยละ 1.72 0.92 และ

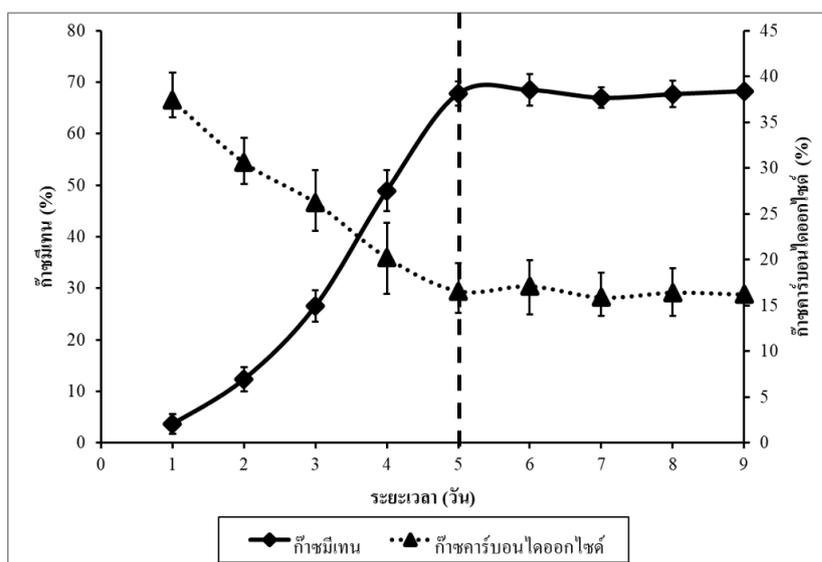
0.54 ตามลำดับ และน้ำหมักชีวภาพหลังจากการผลิต ก๊าซชีวภาพ มีองค์ประกอบของธาตุอาหาร ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแตสเซียม ร้อยละ 0.11 0.16 และ 0.15 ตามลำดับ แม้ไม่ผ่านเกณฑ์ มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์น้ำของกรมวิชาการเกษตร (Department of Agriculture, 2014) แต่มีความเป็นไปได้ในการใช้เป็นน้ำหมักชีวภาพเพื่อนำไปรดน้ำผัก แบบน้ำหยด และนำไปปลูกผักกวางตุ้งโดยไม่ใช้ดิน ดังตารางที่ 3 และเมื่อวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสีย หลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่าปริมาณซีโอดี (3.98 กรัม/ลิตร) ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.4 กรัม/ลิตร (Pollution Control Department, 2005) ดังตารางที่ 4 จึงนำน้ำหมัก ชีวภาพหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ ในการทดลองปลูกผักกวางตุ้งต่อไป

ตารางที่ 2 การผลิตก๊าซชีวภาพจากทะลายปาล์มเปล่าหมักร่วมกับมูลสุกร

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตร)	ก๊าซมีเทน (ร้อยละ)	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ)
0	-	-	-	-
1	1.80±0.52	1.80	3.69±3.03	37.42±2.98
2	3.48±0.61	5.28	12.36±1.89	30.63±3.04
3	6.41±0.28	11.69	26.57±2.37	26.23±2.69
4	9.02±0.47	20.71	48.96±3.12	20.23±3.52
5	10.74±0.33	31.44	67.81±3.94	16.58±3.77
6	10.66±0.56	42.10	68.49±2.36	17.11±3.06
7	10.52±0.39	52.61	66.98±3.05	15.87±2.80
8	10.75±0.48	63.36	67.69±1.99	16.41±2.74
9	10.83±0.51	74.19	68.26±2.58	16.20±2.63



ภาพที่ 1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ (ลิตรต่อวัน) และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตร)



ภาพที่ 2 องค์ประกอบของก๊าซมีเทน (ร้อยละ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ)

ตารางที่ 3 ผลพลอยได้หลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพ

ธาตุอาหาร	วัสดุปรับปรุงดิน (กากของแข็ง)	ค่ามาตรฐานปุ๋ย*	น้ำหมักชีวภาพ (ของเหลว)	ค่ามาตรฐาน น้ำหมักชีวภาพ**
ไนโตรเจน	ร้อยละ 1.72	> ร้อยละ 1.0	ร้อยละ 0.11	> ร้อยละ 0.5
ฟอสฟอรัสในรูป P_2O_5	ร้อยละ 0.92	> ร้อยละ 0.5	ร้อยละ 0.16	> ร้อยละ 0.5
โปแตสเซียมในรูป K_2O	ร้อยละ 0.54	> ร้อยละ 0.5	ร้อยละ 0.15	> ร้อยละ 0.5

ที่มา: *National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standard (2005), Department of Agriculture (2014)

**Department of Agriculture (2014)

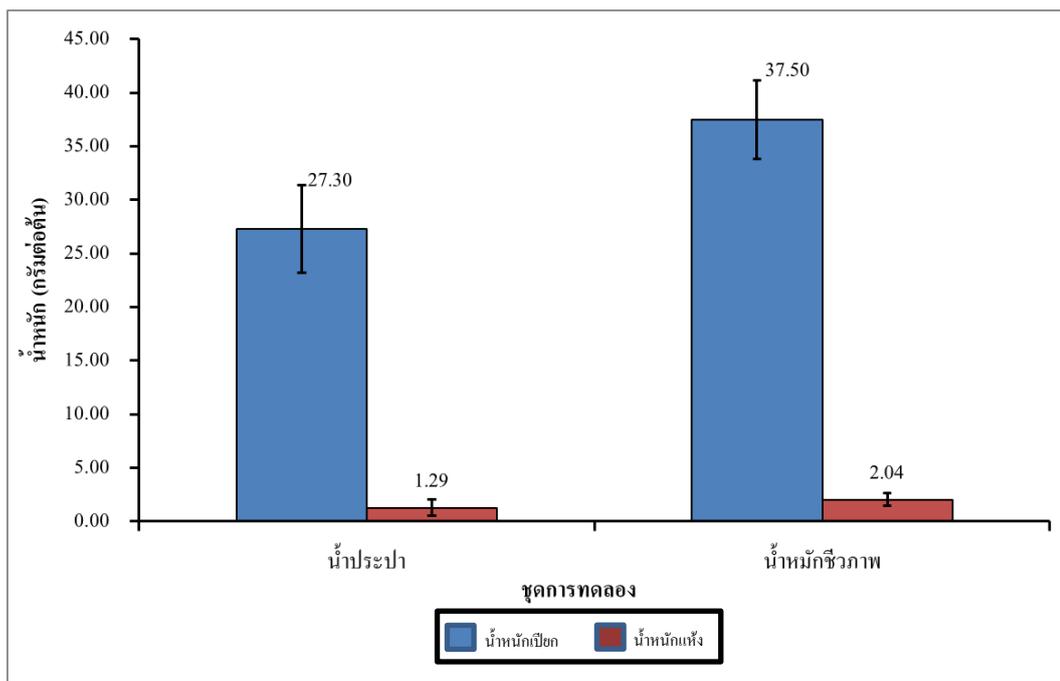
ตารางที่ 4 คุณลักษณะน้ำเสียหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์	น้ำเสียหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพ
สี	น้ำตาลอ่อน
พีเอช	6.50
ซีโอดี (กรัมต่อลิตร)	3.98

3. การปลูกผักกวางตุ้งแบบใช้ดินผสมกากของแข็งที่เหลือหลังการผลิตก๊าซชีวภาพ และรดด้วยน้ำหมักชีวภาพแบบน้ำหยด

จากการทดสอบการนำกากของแข็งที่เหลือหลังการผลิตก๊าซชีวภาพผสมกับดินเพื่อปลูกผักกวางตุ้งในแต่ละหลุม จากนั้นรดด้วยน้ำหมักชีวภาพเปรียบเทียบกับมารรดด้วยน้ำประปา (ชุดควบคุม) โดยมีการให้น้ำแบบน้ำหยดทุกวัน วันละ 1 ชั่วโมง พบว่า ชุดการทดลองที่มีการใช้วัสดุปรับปรุงดินและให้น้ำผักกวางตุ้งด้วยน้ำหมักชีวภาพแบบน้ำหยด ทำให้ต้นผักกวางตุ้งเจริญได้ดีกว่าชุดควบคุม โดยมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งเท่ากับ 37.5 ± 0.82 และ 2.04 ± 0.03 กรัมต่อต้น ตามลำดับ (ภาพที่ 3) เนื่องจากกากของแข็งที่เหลือหลังการผลิตก๊าซชีวภาพมีธาตุอาหารไนโตรเจนสูง คิดเป็นร้อยละ 60-

80 ทั้งนี้ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ส่วนใหญ่แล้วองค์ประกอบคาร์บอนจะถูกใช้ไป ขณะที่ไนโตรเจนมีการใช้ไปน้อยมาก จึงยังคงเหลืออยู่ในปริมาณมาก และเป็นรูปแบบที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้สูงสุด (Chaiyaprat, 2018) และเมื่อนำน้ำหมักชีวภาพมาประยุกต์ในการปลูกพืช สามารถทำได้ในพืชหลายชนิด เช่น ยางพาราเมื่อรดด้วยน้ำหมักชีวภาพ ทำให้น้ำยางพารามีความเข้มข้นของน้ำยาง (Dry rubber content) เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2 กิโลกรัมต่อไร่ต่อวัน และให้ผลผลิตน้ำยางเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 2.5 เท่า (Chaiyaprat, 2018) เป็นต้น เมื่อนำไปประยุกต์กับการปลูกพืชชนิดอื่นๆ จะเป็นการลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมี ถือเป็นการลดรายจ่าย และเป็นการทำเกษตรปลอดภัยอย่างยั่งยืน (Chaiyaprat, 2018)



ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบน้ำน้กผักกวางตุ้งที่รดด้วยน้ำหมักชีวภาพและน้ำประปา แบบน้ำหยด อายุ 20 วัน

4. การปลูกผักกวางตุ้งแบบไม่ใช้ดินด้วยน้ำหมักชีวภาพ

จากการทดสอบปลูกผักกวางตุ้งโดยไม่ใช้ดิน ทำการเปรียบเทียบชุดการทดลองที่มีการเติมเฉพาะน้ำหมักชีวภาพ ชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายธาตุอาหารเพิ่มเติมที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 50 และ 75 ในน้ำหมักชีวภาพ และชุดน้ำประปาที่เติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 100 พบว่า ชุดการทดลองที่เติมเฉพาะน้ำหมักชีวภาพ ต้นกล้าผักกวางตุ้งส่วนใหญ่มีอาการขาดธาตุอาหารอย่างรุนแรง ใบมีสีเหลือง และตายหลังจากเลี้ยงในน้ำหมักชีวภาพเป็นเวลา 10 วัน แต่ในชุดการทดลองอื่นๆ ไม่พบอาการใบเหลือง และยังพบว่าในชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 25 ในน้ำหมักชีวภาพ ทำให้ผักกวางตุ้งมีการเจริญสูงสุด มากกว่าชุดการทดลองอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 5 และ 6) โดยมีน้ำน้กสดและน้ำน้กแห้งของผักกวางตุ้ง เท่ากับ 54.9 ± 0.84

และ 3.11 ± 0.04 กรัมต่อต้น ตามลำดับ (ภาพที่ 4) อีกทั้งเมื่อคำนึงถึงการเติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 25 ของปริมาณธาตุอาหารที่แนะนำ สามารถลดค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีในการเตรียมสารละลายธาตุอาหาร โดยต้นทุนของการเตรียมสารละลายธาตุอาหารต่อ 1 กระบะ เท่ากับ 4.50 บาท ในน้ำประปา 10 ลิตร ทำให้ต้นทุนต่อ 1 กระบะลดลงมีค่าเท่ากับ 0.59 บาท ในน้ำหมักชีวภาพ 10 ลิตร ซึ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึง 3.91 บาท ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Chaiprapat (2018) ว่า การนำน้ำหมักชีวภาพไปใช้ประยุกต์กับการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกเป็นการลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมี เช่น แหนที่ปลูกด้วยน้ำหมักชีวภาพจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ สามารถใช้น้ำหมักชีวภาพเป็นแหล่งสารอาหารหลัก (ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส) และเจริญได้เป็นเวลากว่า 16 วัน โดยไม่ต้องมีการเติมสารเคมีเพิ่มเติม (Chaiprapat *et al.*, 2005) เป็นต้น ถือเป็นการลดรายจ่ายให้แก่เกษตรกร

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA เปรียบเทียบความแตกต่างของน้ำหนักเปียกของผักกวางตุ้งจากการปลูกแบบไม่ใช้ดินด้วยน้ำหมักชีวภาพ อายุ 20 วัน กับชุดที่มีการเติมสารละลายธาตุอาหารเพิ่มเติมความเข้มข้นร้อยละ 25 50 และ 75 และ ผักกวางตุ้งที่ปลูกในน้ำประปาเติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 100

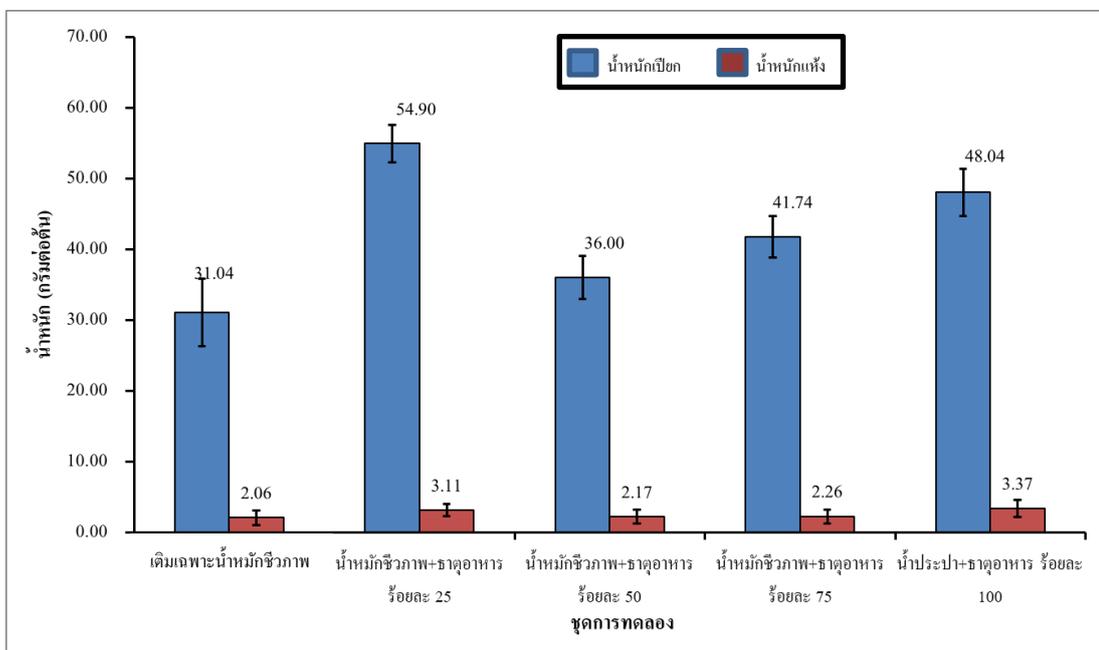
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3586.738	4	896.684	1774.006	0.000*
Within Groups	22.746	45	0.505		
Total	3609.483	49			

*มีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ ANOVA เปรียบเทียบความแตกต่างของน้ำหนักแห้งของผักกวางตุ้งจากการปลูกแบบไม่ใช้ดินด้วยน้ำหมักชีวภาพ อายุ 20 วัน กับชุดที่มีการเติมสารละลายธาตุอาหารเพิ่มเติมความเข้มข้นร้อยละ 25 50 และ 75 และ ผักกวางตุ้งที่ปลูกในน้ำประปาเติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 100

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	14.468	4	3.617	3701.819	0.000*
Within Groups	.044	45	0.001		
Total	14.512	49			

*มีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



ภาพที่ 4 เปรียบเทียบน้ำหนักผักกวางตุ้งจากการปลูกแบบไม่ใช้ดินด้วยน้ำหมักชีวภาพ (น้ำเสียที่ผ่านการผลิตก๊าซชีวภาพ) อายุ 20 วัน กับชุดที่มีการเติมสารละลายธาตุอาหารเพิ่มเติมความเข้มข้นร้อยละ 25 50 และ 75 และ ผักกวางตุ้งที่ปลูกในน้ำประปาเติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 100

สรุป

1. จากการผลิตก๊าซชีวภาพจากทะเลสาบปาล์ม เป่าหมักร่วมกับมูลสุกร และฟนฝอยน้ำเสียโรจอาหารบนวัสดุหมักด้วยปฏิกรณ์สามส่วน พบว่า หลังวันที่ 5 มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนสูงสุด ร้อยละ 66.98-68.49 และมีปริมาตรก๊าซชีวภาพมากที่สุด เท่ากับ 10.52-10.83 ลิตรต่อวัน เมื่อเดินระบบถึงวันที่ 5 จะทำการป้อนน้ำเสียชุดใหม่เข้าไปแทนที่ และเก็บน้ำเสียหลักจากผลิตก๊าซชีวภาพใช้เป็นน้ำหมักชีวภาพ วัสดุหมักสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ 4 ครั้ง นอกจากนี้กากของแข็งเหลือทิ้งใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน มีองค์ประกอบของธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจน (ร้อยละ 1.72%) ฟอสฟอรัส (ร้อยละ 0.92) และโปแตสเซียม (ร้อยละ 0.54) สามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินได้ และน้ำเสียหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพยังสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ซ้ำ จนได้น้ำหมักชีวภาพและลดการใช้น้ำประปาในการให้น้ำผักกางต้งแบบน้ำหยดได้

2. จากการปลูกผักกางต้งแบบใช้ดินผสมกากของแข็งที่เหลือหลังการผลิตก๊าซชีวภาพ และรดด้วยน้ำหมักชีวภาพแบบน้ำหยด พบว่า ชุดการทดลองที่มีการให้น้ำด้วยน้ำหมักชีวภาพ แบบน้ำหยด ผักกางต้งมีการเจริญมากกว่าชุดการทดลองที่มีการให้น้ำประปาแบบน้ำหยด (ชุดควบคุม) ซึ่งมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของผักกางต้ง เท่ากับ 37.5 และ 2.04 กรัมต่อต้น ตามลำดับ

3. จากการปลูกผักกางต้งแบบไม่ใช้ดินด้วยน้ำหมักชีวภาพ พบว่า ชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 25 ของปริมาณธาตุอาหารในน้ำหมักชีวภาพ ผักกางต้งมีการเจริญสูงสุดมากกว่าชุดการทดลองอื่นๆ โดยมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของผักกางต้ง เท่ากับ 54.9 และ 3.11 กรัมต่อต้น ตามลำดับ แต่หากใช้เฉพาะน้ำหมักชีวภาพ (ไม่มีการเติมสารละลายธาตุอาหาร) พบว่า

ต้นกล้าผักกางต้งส่วนใหญ่จะตาย และเมื่อคำนึงถึงการเติมสารละลายธาตุอาหารที่ ร้อยละ 25 ในน้ำหมักชีวภาพ ปริมาตร 10 ลิตร สามารถลดค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีเตรียมสารละลายธาตุอาหาร เท่ากับ 3.91 บาท

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัทจัดการและพัฒนาทรัพยากรน้ำภาคตะวันออก จำกัด (มหาชน) สำหรับการสนับสนุนในการทำการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 1990. **Official Method of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists.** 15th ed. The Association of Official Analytical Chemists Ins., Texas.
- APHA, AWWA and WEF. 2017. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 23rd ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington DC.
- Baştabak, B. and Koçar, G. 2020. A review of the biogas digestate in agricultural framework. **Journal of Material Cycles and Waste Management** 22: 1318-1327.
- Boonnoi, N., Nuntagij, I. and Koohakan, P. 2017. Growth and Yield of Chinese Kale Grown in Dynamic Root Floating Technique (DRFT) by Reused Nutrient Solution. **International Journal of Agricultural Technology** 13(7.1): 1469-1477.
- Chaikitkaew, S., Kongjan, P. and O-Thong, S. 2015. Biogas Production from Biomass Residues

- of Palm Oil Mill by Solid State Anaerobic Digestion. 2015 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies. **Energy Procedia** 79: 838-844.
- Chaiprapat, S. 2018. **Applied Biogas Technology for Waste Treatment, Energy Production and Bioresource Recycling**. 2nd ed. Prince of Songkla University, Songkhla. (in Thai)
- Chaiprapat, S., Cheng, J.J., Classen, J.J. and Liehr, S.K. 2005. Role of Internal Nutrient Storage in Duckweed Growth for Swine Wastewater Treatment. **American Society of Agricultural Engineers** 48(6): 2247-2258.
- Department of Agriculture. 2014. **Biological Fertilizer Act B.E. 2557 (2014)**. Department of Agriculture, Bangkok. (in Thai)
- Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C. and Lu, X. 2017. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 76: 1485-1496.
- Khan, M.U. and Ahring, B.K. 2019. Lignin degradation under anaerobic digestion: Influence of lignin modifications -A review. **Biomass and Bioenergy** 128: 105325.
- Kougias, P.G. and Angelidaki, I. 2018. Biogas and its opportunities-A review. **Frontiers of Environmental Science & Engineering** 12(3): 14.
- Markphan, W., Tipruk, U., Sansee, T., Kaewdam, S. and Suksong, W. 2020. Biogas Production from Food Waste by Anaerobic Digestion. **Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University** 22(2): 116-122.
- National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standard. 2005. **Thai Agricultural Commodity and Food Standard (ACFS) 9503-2005, Compost**. National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standard, Bangkok. (in Thai)
- Office of Agricultural Economics. 2018. **Statistic of Palm Oil**. Office of Agricultural Economics, the Ministry of Agriculture and Cooperatives. Available Source: <http://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/oilpalm%2061.pdf>, May 25, 2020. (in Thai)
- O-Thong, S., Boe, K. and Angelidaki, I. 2012. Thermophilic Anaerobic Co-digestion of Oil Palm Empty Fruit Bunches with Palm Oil Mill Effluent for Efficient Biogas Production. **Applied Energy Journal** 93: 648-654.
- Pollution Control Department. 2005. **Notification of the Ministry of Natural Resources and Environment: Setting up Standard Control of Releasing Wastewater from Swine Pollution Sources**. Pollution Control Department, Bangkok. (in Thai)
- Rahman, S.H.A., Choudhury, J.P., Ahmad, A.L. and Kamaruddin, A.H. 2007. Optimization studies on acid hydrolysis of oil palm empty fruit bunch fiber for production of xylose. **Bioresource Technology** 98: 554-559.
- Rosas-Mendoza, E.S., Alvarado-Vallejo, A., Vallejo-Cantú, N.A., Snell-Castro, R., Martínez-Hernández, S. and Alvarado-Lassman, A. 2021. Batch and Semi-Continuous Anaerobic

- Digestion of Industrial Solid Citrus Waste for the Production of Bioenergy. **Processes** 9: 648.
- Subkaree, Y. 2007. Optimal Condition for Ethanol Production from Palm Pressed Fiber Using Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF). Master of Science (Biotechnology), Prince of Songkla University. (in Thai)
- Suksong, W., Tukanghan, W., Promnuan, K., Kongjan, P., Reungsang, A., Insam, H. and O-Thong, S. 2020. Biogas production from palm oil mill effluent and empty fruit bunches by coupled liquid and solid-state anaerobic digestion. **Bioresource Technology** 296: 1-11.
- Tepsour, M., Usmanbaha, N., Rattanaya, T., Jariyaboon, R., O-Thong, S., Prasertsan, P. and Kongjan, P. 2019. Biogas Production from Oil Palm Empty Fruit Bunches and Palm Oil Decanter Cake using Solid-State Anaerobic co-Digestion. **Energies** 12: 4368.
- Umar, M.S., Jennings, P. and Urmees, T. 2013. Strengthening the palm oil biomass renewable energy industry in Malaysia. **Renewable Energy Journal** 60: 107-115.
- Wainaina, S., Lukitawesa, Awasthi, M.K. and Taherzadeh, M.J. 2019. Bioengineering of anaerobic digestion for volatile fatty acids, hydrogen or methane production: A critical review. **Bioengineered** 10(1): 437-458.

การห่อหุ้มน้ำมันงาจี๋ม้อนโดยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย และการฉีดพ่นฝอยร่วมกับตู้อบลมร้อน

Perilla Oil Encapsulation by Spray Drying and Foggy Spraying, Combined with Hot air Oven

ฤทัยวรรณ วงศ์ตลาด และ ศิริธร ศิริอมรพรรณ *

Rutaiwan Wongtalad and Sirithon Siriamornpun *

Received: 31 May 2021, Revised: 25 June 2021, Accepted: 14 July 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการห่อหุ้มน้ำมันงาจี๋ม้อน โดยใช้สารห่อหุ้มที่มีอัตราส่วนของมอลโตเดกซ์ตริน และ โปรตีนถั่วเหลือง 9:1 ในน้ำ เพื่อใช้ห่อหุ้มน้ำมันงาจี๋ม้อนทั้งหมด 3 ระดับ ที่ระดับ 10, 20 และ 30% (w/v) โดยกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยและการฉีดพ่นฝอยน้ำมันร่วมกับการใช้ตู้อบลมร้อน เพื่อประเมินคุณสมบัติในการห่อหุ้มน้ำมันในระหว่างการเก็บรักษา และความสามารถในการละลาย ผลการทดลองพบว่าสูตรที่เหมาะสม คือ ไมโครแคปซูลที่ทำแห้งแบบพ่นฝอย สูตรใช้ปริมาณน้ำมันงาจี๋ม้อน ที่ระดับ 20% (w/v) เนื่องจากมีประสิทธิภาพการห่อหุ้มสูงที่สุด (80.73%) มีค่าความสามารถในการละลายน้ำได้ดีที่สุด (84.97%) และมีค่าเพอร์ออกไซด์ไม่เกินร้อยละ 20 มิลลิกรัมสมมูลออกซิเจนต่อกิโลกรัมตัวอย่าง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าปริมาณความชื้น (4.71%) a_w (0.31) มีค่าสีความสว่าง (L^*) เท่ากับ 91.85 ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^*) เท่ากับ -0.57 และค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) เท่ากับ 9.89 จากการวิเคราะห์คุณลักษณะด้านจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ผิวของไมโครแคปซูลที่ทำแห้งแบบพ่นฝอย มีการเกาะติดกัน มีรอยบุบตรงกลาง หรือรอยยื่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำมันงาจี๋ม้อน ส่วนไมโครแคปซูลที่ทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน ไม่มีรอยบุบตรงกลาง และมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอย ดังนั้นไมโครแคปซูลน้ำมันงาจี๋ม้อนที่ได้จากศึกษาในครั้งนี้ เหมาะสมที่จะนำไปเติมในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อเสริมคุณค่าทางอาหารต่อไป

คำสำคัญ: การห่อหุ้ม, น้ำมันงาจี๋ม้อน, มอลโตเดกซ์ตริน, โปรตีนถั่วเหลือง, การละลาย

ABSTRACT

The aim of this study was to develop an encapsulation method for perilla oil, using an encapsulation substance of a mix maltodextrin and soy protein (with the ratio of 9: 1) in water to encapsulate three levels of perilla oil at 10, 20 and 30% w/v. Two encapsulation methods were studied: (1) a spray-drying method and (2) a foggy spray combined with a hot-air oven. The methods were evaluated for their respective ability to encapsulate oil during storage and for the resulting solubility. We found that the optimum formula for encapsulating perilla oil was using 20% (w/v) by spray drying. It gave the highest encapsulation efficiency (80.73%) and solubility (84.97%), plus ae peroxide value (P.V.) of not more than 20% meq oxygen / kg. The final product contained the moisture content of 4.7%, aw of 0.31 and color parameters of L* (91.85), a * (-0.57) and b * (9.89). The microstructure of the samples encapsulated with oil showed (using SEM) that the adhesion, dimples or wrinkles increased with increasing oil content. The microcapsules dried with the hot-air oven had no dent in the middle and had larger particle sizes than those produced by spray drying. Therefore, we succeeded in producing microcapsules of perilla oil suitable for adding to beverage products, thereby providing nutritional quality improvement.

Key words: encapsulation, perilla oil, maltodextrin, soy protein, solubility

บทนำ

งาช้างม้วน (*Perilla frutescens*) เป็นที่รู้จักกันมานานแล้วว่าเป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยกรด α -linolenic (18:3, n-3) มีการปลูกกันอย่างแพร่หลายทั่วประเทศไทย มีรายงานข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของไขมันและกรดไขมันในพืชจากภูมิภาคต่างๆ พบว่างาช้างม้วนมีปริมาณไขมันอยู่ระหว่าง 34-36% (w/w) ไตรอะซิลกลีเซอรอลเป็นไขมันที่โดดเด่นในเมล็ดงาช้างม้วน 97% (ของไขมันทั้งหมด) และไฟโตสเตอรอล 3% (ของไขมันทั้งหมด) อัตราส่วนของความอิ่มตัว (saturates) : ความไม่อิ่มตัวหนึ่งตำแหน่ง (monounsaturated) : ความไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (polyunsaturates) อยู่ที่ประมาณ 1: 1: 8 กรดไขมันส่วนใหญ่ คือ กรดอัลฟาไลโนเลนิก (α -linolenic acid ;18:3, n-3) ซึ่งมีปริมาณทั้งหมด 55-60% (Siriamornpun *et al.*, 2006)

กรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acids) เป็นโครงสร้างสายโซ่ที่มีพันธะคู่และส่วนประกอบของ น้ำมันของเหลวบางชนิดที่อุณหภูมิแวดล้อม (Timilsena *et al.*, 2017) กรดไขมันไม่อิ่มตัวส่วนใหญ่มีอยู่ในน้ำมันพืชและน้ำมันปลาและเราต้องบริโภคเข้าไปเพราะร่างกายไม่สามารถสังเคราะห์เองได้หรือที่เรียกว่า กรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย (essential fatty acid) ซึ่งได้แก่ กรดลิโนเลอิก และ กรดอัลฟาไลโนเลนิก (Domi *et al.*, 2018) ซึ่งจัดเป็นกรดไขมันชนิดโอเมก้า 6 (ω -6) และโอเมก้า 3 (ω -3) ตามลำดับ กรดไขมันเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมสุขภาพ การศึกษาล่าสุดพบว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัวมีส่วนช่วยในการป้องกันโรคเกี่ยวกับระบบและอาการต่างๆ ของร่างกาย รวมถึงโรคหลอดเลือดหัวใจ ความดันโลหิตสูง ไขมันในเลือดสูง มะเร็ง (ถ้าใส่ใหญ่ เต้านม และต่อมลูกหมาก) โรคไต

อีกเสบ เบาหวานและความผิดปกติของระบบประสาท (Goyal *et al.*, 2015; Encina *et al.*, 2016; Azizi *et al.*, 2017) อย่างไรก็ตาม กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีหรือเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษาอาหาร รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับส่วนประกอบอื่นๆ ในอาหาร ซึ่งกรดไขมันไม่อิ่มตัวถือว่ามีความไวต่อความร้อนแสงและออกซิเจนเนื่องจากมีพันธะคู่หลายตัว (Albert *et al.*, 2015) การเกิดออกซิเดชันของไขมัน ส่งผลให้เกิดการผลิตเพอร์ออกไซด์ที่เป็นพิษต่อมนุษย์ (Alamed *et al.*, 2009) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันการเกิดออกซิเดชันของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว เพื่อรักษาคุณภาพของน้ำมันหรือเพื่อป้องกันการก่อตัวของสารพิษจากน้ำมัน (Tan *et al.*, 2017)

การห่อหุ้ม (Encapsulation) เป็นกระบวนการห่อหุ้มสารให้อยู่ในรูปของแคปซูลขนาดเล็ก เรียกว่า ไมโครแคปซูล ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 1 จนถึง 800 ไมโครเมตร เป็นกระบวนการห่อหุ้มสารที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการถูกทำลายโดยความร้อน แสง ความชื้น และอากาศ จึงช่วยยืดระยะเวลาในการเก็บรักษา อีกทั้งช่วยเปลี่ยนสถานะสารจากของเหลวเป็นของแข็ง จึงช่วยเพิ่มความเสถียรในกระบวนการขนส่งและเก็บรักษา นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีคุณสมบัติในการควบคุมการปลดปล่อย (Kausadikar *et al.*, 2015) โดยใช้สารห่อหุ้มประเภทโพลีแซ็กคาไรด์และโปรตีน ซึ่งในกระบวนการห่อหุ้ม โดยส่วนใหญ่ นิยมใช้มอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารห่อหุ้ม เนื่องจากคุณสมบัติด้านการละลาย และระหว่างกระบวนการห่อหุ้มที่มีส่วนผสมที่เป็นอิมัลชัน (น้ำกับน้ำมัน) จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องมีการห่อหุ้มคุณสมบัติที่เป็นสารอิมัลซิฟายเออร์ได้ ที่ทำหน้าที่ประสานระหว่างน้ำกับน้ำมัน ซึ่งได้แก่สารจำพวก

โปรตีน โดยมีหลายงานวิจัยที่นิยมใช้โปรตีนถั่วเหลืองมาใช้เป็นส่วนผสมของสารห่อหุ้ม (Nesterenko *et al.*, 2013) ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา การห่อหุ้มน้ำมันงาขี้ม้อน โดยใช้การทำแห้งแบบพ่นฝอย และการทำแห้งแบบตู้อบลมร้อน เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันงาขี้ม้อน และยังมีคุณสมบัติการละลายน้ำได้ดี เพื่อที่จะสามารถนำไปเติมในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและคุณสมบัติประโยชน์ต่อสุขภาพต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุอุปกรณ์

การทดลองนี้ใช้สารห่อหุ้ม ได้แก่ มอลโตเดกซ์ตริน (DE10) และผงโปรตีนถั่วเหลือง จากบริษัทเคมีภัณฑ์ จำกัด และใช้น้ำมันงาขี้ม้อน (สกัดเย็น) ตราคอตงชัยพิช อำเภอมะนัง จังหวัด เชียงราย

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมอิมัลชันของสารห่อหุ้ม ใช้วิธีการที่ คัดแปลงวิธีจาก Chang *et al.* (2016) โดยใช้สารห่อหุ้มที่มีอัตราส่วนของ มอลโตเดกซ์ตริน และโปรตีนถั่วเหลือง 9:1 ละลายในน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตร ใช้ห่อหุ้มน้ำมันงาขี้ม้อน 3 ระดับ ที่ระดับ 10, 20 และ 30% w/v แล้วโฮโมจีไนซ์ ความเร็ว 15,000 รอบต่อนาที นาน 3 นาที ทั้งหมด 2 ครั้ง จนเกิดเป็นอิมัลชัน เพื่อเตรียมนำไปเข้าเครื่องแห้งแบบพ่นฝอยต่อไป

2.2 การห่อหุ้มโดยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย ใช้วิธีการตามวิธีจาก Chang *et al.* (2016) โดยอิมัลชันถูกพ่นฝอยให้แห้งโดยใช้ เครื่องพ่นฝอยขนาดเล็กแบบตั้งโต๊ะ Buchi-290 (Buchi Labortechnik AG, Flawil, Switzerland) โดยติดตั้งหัวฉีดละออง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 มิลลิเมตร) อิมัลชันถูกฉีดเข้าไปใน Chamber ขนาด (65 × 110 × 70 เซนติเมตร) ผ่านปั๊ม peristaltic ภายใต้ค่าคงที่ พร้อมการกวาดที่

300 รอบต่อนาที อัตราการไหลของอากาศ คือ 35,000 ลิตร / ชั่วโมง และปรับความดันอากาศอัด เป็น 5 บาร์ กำหนดอุณหภูมิเข้าไว้ที่ 180 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิขาออก กำหนดไว้ที่ 90 ± 1 องศาเซลเซียส โดยการปรับอัตราปั๊ม (5% - 20%) จากนั้นนำไมโครแคปซูลน้ำมันงาจีเอ็มเอที่ได้บรรจุในถุงออลูมิเนียมฟลอยด์ เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพต่อไป

2.3 การห่อหุ้มโดยวิธีการฉีดพ่นฝอยร่วมกับตู้อบลมร้อน โดยใช้สารห่อหุ้มที่มีอัตราส่วนของมอลโตเดกซ์ตริน และ โพรตีนถั่วเหลือง 9:1 ใช้ห่อหุ้มน้ำมันงาจีเอ็มเอ 3 ระดับ ที่ระดับ 10, 20 และ 30% w/v โดยใช้ขวดฉีดพ่นฝอย (Foggy Spray bottle) เพื่อฉีดพ่นละอองน้ำมันงาจีเอ็มเอ จากนั้นผสมด้วยเครื่องตีผสม เป็นเวลา 5 นาที แล้วอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 5 ชั่วโมง คัดแปลงจากวิธีของ Wannarot (2019) นำไมโครแคปซูลน้ำมันงาจีเอ็มเอที่ได้ บรรจุในถุงออลูมิเนียมฟลอยด์ เพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพต่อไป

2.4 คุณสมบัติของไมโครแคปซูล โดยวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของไมโครแคปซูลนั้นถูกกำหนดโดยวิธี Gravimetric โดยใช้การอบไมโครแคปซูลในตู้อบลมความร้อนด้วย ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นานข้ามคืน ขณะที่วัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ของไมโครแคปซูล โดยใช้ AquaLab Series 3 Water Activity Meter ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และค่าสีของไมโครแคปซูลจะถูกวัดโดยใช้

Chroma meter และรายงานในรูปแบบของ L* (ความสว่าง) a* (สีแดง-สีเขียว) และ b* (สีเหลือง-น้ำเงิน) และความชื้น รวมถึงค่าวอเตอร์แอกติวิตี และค่าสี ได้รายงานเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทำการทดลองสามซ้ำ ($n = 3$)

การทดสอบความสามารถในการละลายตามวิธีของ Wongsawat *et al.* (2003) โดยนำผงไมโครแคปซูลน้ำมันงาจีเอ็มเอ ~1 กรัม มาละลายในน้ำกลั่น ปริมาตร 30 มิลลิลิตร แล้วกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 นำกระดาษกรองมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักและคำนวณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนที่ละลายและไม่ละลายน้ำ

การทดสอบประสิทธิภาพการห่อหุ้มน้ำมันโดยใช้ไมโครแคปซูล ~1 กรัม ลงในหลอดเซนติฟิวซ์ ขนาด 50 มิลลิลิตร และเติมเฮกเซน 15 มิลลิลิตร แล้วเขย่าเป็นเวลา 15 วินาที เพื่อสกัดน้ำมันผิว จากนั้นตัวทำละลายจะถูกกรองสองครั้งผ่านกระดาษกรองเบอร์ 3 ด้วยตัวทำละลายจะถูกกรองลงในปิเปตอร์ ขนาด 30 มิลลิลิตร จากนั้นระเหยตัวทำละลายในตู้ดูดควันตลอดคืน จนกว่าเฮกเซนจะระเหยออกหมด จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งน้ำมันเหลือจะถูกนำมาคำนวณเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพการห่อหุ้ม (Encapsulate efficiency, EE%) จำนวนโดยสูตรต่อไปนี้ (Anwar and Kunz, 2011)

$$EE (\%) = (\text{Total oil} - \text{Surface oil}) / \text{Total oil} \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่ Total oil คือความเข้มข้นของน้ำมันในไมโครแคปซูล ข้อมูลถูกรายงานว่าเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ($n = 3$)

การวัดค่าเพอร์ออกไซด์ (PV) โดยใช้ไมโครแคปซูลน้ำมันงาจีเอ็มเอ ~1 กรัม ผสมกับสารละลายกรดแอสซิติค / คลอโรฟอร์ม (3:2, v/v) 30 มิลลิลิตร ในขวด Erlenmeyer flask ปริมาตร 125 มิลลิลิตร

ตามด้วยการเติมโพแทสเซียมไอโอไดด์อิ่มตัว (KI) 0.5 มิลลิลิตร เขย่าสารให้เข้ากัน ตั้งพักไว้เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติมไอโอดีนและเติมน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร เพื่อหยุดปฏิกิริยา แล้วเติมสารละลายแป้ง 1% (w/v) 0.5 มิลลิลิตร ที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดมา

ผสมลงในน้ำกลั่น จากนั้นไตเตรทด้วยโซเดียมไนโอโทโซลเฟต 0.001 N ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) จนกระทั่งสีน้ำเงินที่ได้จากการเติมไอโอดีนหายไป โดยที่ค่า PV ของไมโครแคปซูลน้ำมันงาขี้ม้อน คำนวณโดยใช้สูตรต่อไปนี้ (Pegg, 2005)

$$PV = (S-B) \times N \times 1000/W \quad (2)$$

โดยที่ S คือ ปริมาตร (มิลลิลิตร) ของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในการไตเตรทไมโครแคปซูลน้ำมันงาขี้ม้อน

B คือ ปริมาตร (มิลลิลิตร) ของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ในการไตเตรท

N คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

W คือ น้ำหนักน้ำมัน (กรัม) โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ($n = 3$)

ลักษณะของโครงสร้างระดับจุลภาค ซึ่งโครงสร้างและลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูลน้ำมันงาขี้ม้อน โดยกำหนดที่ (S) คือไมโครแคปซูลที่ผ่านทำแห้งแบบพ่นฝอย และ (H) คือไมโครแคปซูลที่ผ่านการฉีดพ่นฝอยน้ำมันร่วมกับการใช้ตู้อบลมร้อน แล้วทำให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อน ตามปริมาณของน้ำมันงาขี้ม้อน 10, 20 และ 30% (w/v) ตามลำดับ ซึ่งถูกถ่ายภาพโครงสร้างใช้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (HITACHI -TM 4000 PLUS, Japan) ทำงานที่ 15 กิโลโวลต์ โดยมีแรงดันห้องตัวอย่าง 4.0×10^{-6} ทอร์ ซึ่งไมโครแคปซูลถูกเคลือบด้วยทองคำประมาณ 200 Å (Edwards S-150B Plasma Sputter Coater) เพื่อให้ตัวอย่างนำไฟฟ้าและสังเกตได้ที่กำลังขยาย 500x ด้วยระยะการทำงาน 7 มิลลิเมตร

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ จากการทดลองวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแต่ละวิธีด้วยวิธีแบบ Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p value < 0.05) โดยใช้โปรแกรม SPSS for Windows version 19.0 และรายงานว่าเป็นค่าเฉลี่ย \pm หนึ่งส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

(ยกเว้นการทดสอบความสามารถในการละลายน้ำและการวัดค่าเพอร์ออกไซด์ (PV))

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากผลการวิเคราะห์ทางกายภาพของไมโครแคปซูลน้ำมันงาขี้ม้อน ดังตารางที่ 1 พบว่าค่าปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ของไมโครแคปซูลของทุกสูตรไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งมีค่าปริมาณความชื้น อยู่ในช่วง 4.70% - 4.73% และมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีอยู่ในช่วง 0.31-0.33 ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามรายงานของ Jay (2000) ระบุว่าคุณสมบัติสำคัญและลักษณะเด่นของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง คืออาหารแห้งเป็นอาหารที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำ (low water activity food) มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีน้อยกว่า 0.6 เพื่อป้องกันและควบคุมจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย ทั้งรา ยีสต์ และแบคทีเรีย ในขณะที่ค่าสี ค่าความสว่าง (L^*) ของแคปซูลน้ำมันงาขี้ม้อน ทั้งวิธีทำแห้งแบบพ่นฝอยและวิธีฉีดพ่นฝอยน้ำมันร่วมกับการทำแห้งแบบตู้อบลมร้อนไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่เมื่อเปรียบเทียบกันของทั้ง 2 วิธี พบว่ามีค่าความสว่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่

ค่าความเป็นสีเขียว-แดง (a^*) และค่าความเป็นสีน้ำเงิน-เหลือง (b^*) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้คุณภาพด้านประสิทธิภาพในการห่อหุ้ม พบว่าทั้ง 2 วิธีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดย

วิธีทำแห้งแบบพ่นฝอยมีประสิทธิภาพการห่อหุ้มสูงกว่าวิธีฉีดพ่นฝอยน้ำมันร่วมกับการทำแห้งแบบตู้อบลมร้อน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang *et al.* (2016) ที่พบว่า การห่อหุ้มน้ำมันคาโนล่าด้วยวิธีทำแห้งแบบพ่นฝอยมีประสิทธิภาพการห่อหุ้มที่สูง

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์คุณภาพด้านกายภาพของไมโครแคปซูลน้ำมันงาจีเอ็มเอ โดยวิธีทำแห้งแบบพ่นฝอย และวิธีการฉีดพ่นฝอยน้ำมันร่วมกับการใช้ตู้อบลมร้อน

Formulations	ความชื้น (%) ^{ns}	a_w ^{ns}	ค่าสี			ประสิทธิภาพการห่อหุ้ม (%)
			L*	a^*	b^*	
S 10%	4.70±0.21	0.31±0.01	95.29±0.23 ^a	-0.56±0.02 ^b	9.17±0.17 ^d	80.47±0.15 ^a
S 20%	4.71±0.02	0.31±0.00	91.85±0.58 ^a	-0.57±0.01 ^b	9.89±0.32 ^d	80.73±0.21 ^a
S 30%	4.72±0.02	0.32±0.01	92.00±1.08 ^a	-0.47±0.04 ^a	12.18±0.63 ^c	79.90±0.40 ^b
H 10 %	4.71±0.10	0.31±0.00	85.15±3.92 ^b	-0.51±0.06 ^{ab}	13.85±2.12 ^b	57.90±0.61 ^c
H 20%	4.72±0.13	0.32±0.00	86.88±0.62 ^b	-0.45±0.01 ^a	14.96±0.19 ^{ab}	57.97±0.31 ^c
H 30%	4.73±0.01	0.33±0.02	85.54±0.18 ^b	-0.58±0.07 ^b	16.50±0.13 ^a	53.57±0.40 ^d

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, (a,b,c) หมายถึง อักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$), (ns) หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$), (S) หมายถึง ไมโครแคปซูลที่ทำแห้งแบบพ่นฝอย และ (H) หมายถึง ไมโครแคปซูลที่ผ่านการฉีดพ่นฝอยน้ำมันร่วมกับการใช้ตู้อบลมร้อน ตามปริมาณของน้ำมันงาจีเอ็มเอ ที่ระดับ 10, 20 และ 30% (w/v)

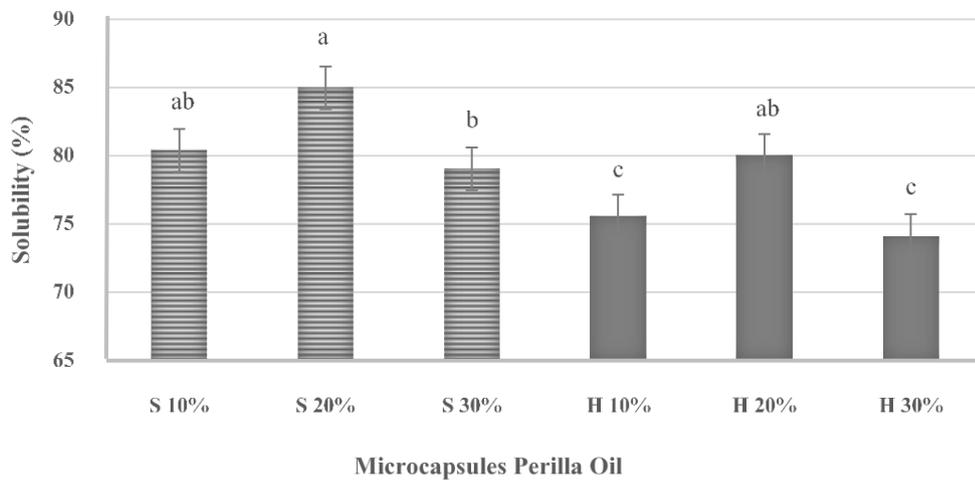
จากผลการทดสอบความสามารถในการละลายในน้ำของไมโครแคปซูลที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยและไมโครแคปซูลที่ผ่านการฉีดพ่นฝอยน้ำมันร่วมกับการใช้ตู้อบลมร้อน พบว่าทั้งค่าความสามารถในการละลายในน้ำของทั้ง 2 วิธี มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ยกเว้นไมโครแคปซูลน้ำมันงาจีเอ็มเอ สูตร (H 20 %) ที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับไมโครแคปซูลที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย (ภาพที่ 1) นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าไมโครแคปซูลที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย มีความสามารถในการละลายในน้ำได้สูงกว่า ไมโครแคปซูลที่ผ่านการฉีดพ่นฝอยน้ำมันร่วมกับการทำแห้ง

แบบตู้อบลมร้อน เนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า สูตรที่ทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน

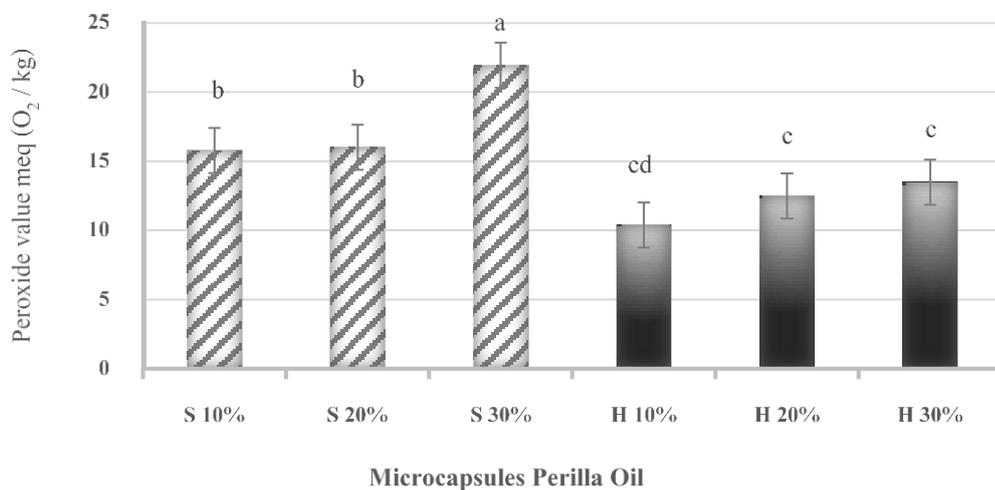
นอกจากนี้ไมโครแคปซูลของทั้ง 2 วิธีมีค่าเพอร์ออกไซด์ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และจะเห็นว่าไมโครแคปซูลที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยมีค่าเพอร์ออกไซด์สูงกว่าไมโครแคปซูลที่ผ่านการฉีดพ่นฝอยน้ำมันร่วมกับการทำแห้งแบบตู้อบลมร้อน (ภาพที่ 2) ซึ่งอาจเกิดจากใช้อุณหภูมิทำแห้งที่สูง ทำให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในไมโครแคปซูลน้ำมันงาจีเอ็มเอ และสูตรที่สามารถละลายน้ำได้ดีที่สุดคือสูตรที่มีปริมาณน้ำมันงาจีเอ็มเอ 20% (w/v) ที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งมีความสามารถน้ำได้ดีที่สุด (84.97%) และยัง

มีค่าเปอร์ออกไซด์ไม่เกินร้อยละ 20 มิลลิกรัมสมมูลย์

ออกซิเจนต่อกิโลกรัมตัวอย่าง



ภาพที่ 1 การทดสอบความสามารถในการละลายน้ำของไมโครแคปซูลของน้ำมันงาจีเอ็มอน โดยที่ (S) หมายถึง ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย และ (H) หมายถึง ไมโครแคปซูลที่ผ่านการฉีดพ่นฝอยน้ำมันร่วมกับการใช้ตู้อบลมร้อน ตามปริมาณของน้ำมันงาจีเอ็มอน ที่ระดับ 10, 20 และ 30% (w/v)



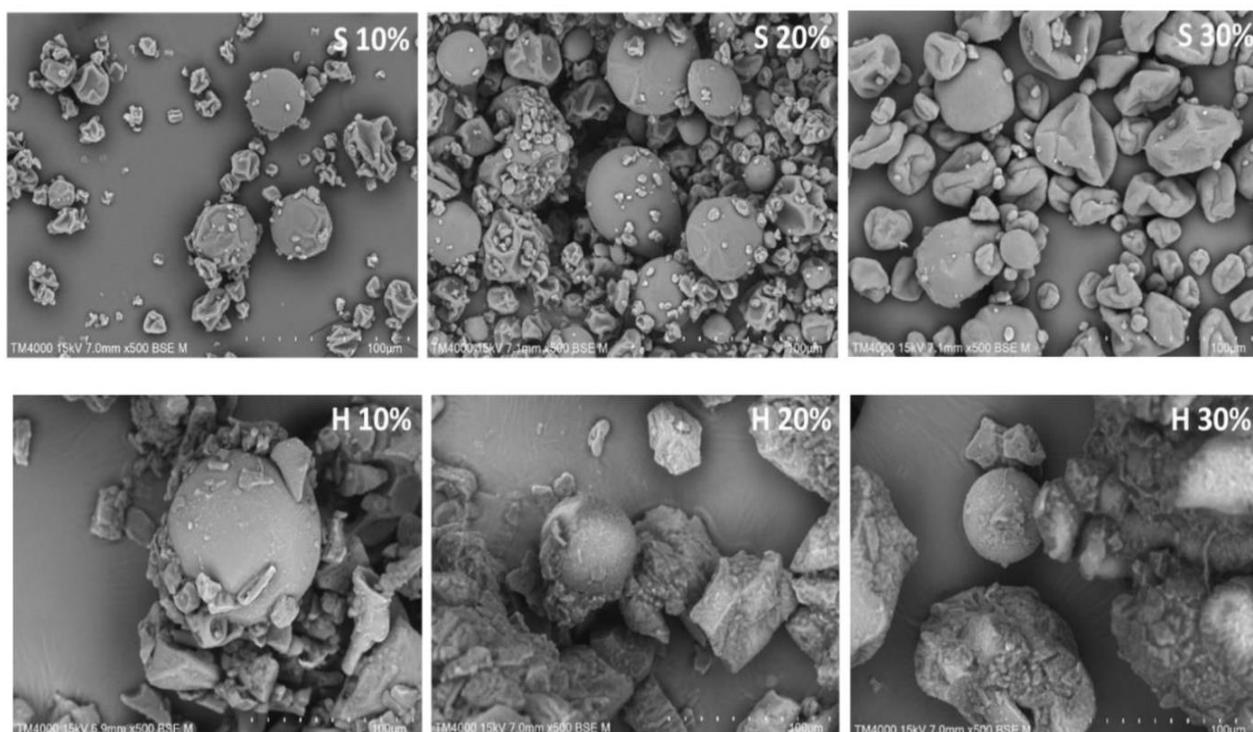
ภาพที่ 2 ค่าเปอร์ออกไซด์ของไมโครแคปซูลน้ำมันงาจีเอ็มอนระหว่างการเป็นรักษาเวลา 30 วัน โดยที่ (S) หมายถึง ไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย และ (H) หมายถึง ไมโครแคปซูลที่ผ่านการฉีดพ่นฝอยน้ำมันร่วมกับการใช้ตู้อบลมร้อน ตามปริมาณของน้ำมันงาจีเอ็มอน ที่ระดับ 10, 20 และ 30% (w/v)

ลักษณะ โครงสร้างและพื้นผิวของไมโครแคปซูลน้ำมันงาจีเอ็มอน ซึ่งถ่ายภาพโดยใช้กล้อง

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังภาพที่ 3 พบว่าไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มและทำแห้ง

แบบพ่นฝอย อนุภาคมีลักษณะเกาะติดกัน และรูปร่างแตกต่างกันออกไป โดยมีทั้งรูปทรงคล้ายทรงกลมที่เกิดจากการพองตัวขึ้น และบางส่วนมีการหดตัว ทำให้เกิดรอยบุบตรงกลาง นอกจากนี้จะเห็นว่าเมื่อปริมาณน้ำมันงาจี่ม้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ลักษณะพื้นผิวรอยบุบตรงกลาง และขนาดไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากความร้อนที่สูงทำให้เกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว และสูญเสียความชื้น (Silva *et al.*, 2013) จึงทำให้มีรอยยุบ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการขยายตัวและความเว้าถือเป็นผลมาจากการหดตัวของผนังที่ไม่สม่ำเสมอในระหว่างการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Sheu

and Rosenberg, 1998) ในขณะที่ ไมโครแคปซูลที่ผ่านการฉีดพ่นฝอยร่วมกับตู้อบลมร้อน พบว่ามีขนาดอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอ รูปร่างแตกต่างกันออกไป และมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งรูปร่างที่มีทรงกลมเป็นอนุภาคส่วนที่มีห่อหุ้มน้ำมันอยู่ และมีลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างจากไมโครแคปซูลที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งอาจเกิดการใช้อุณหภูมิการทำแห้งที่ต่ำกว่า ทำให้เม็ดโตะเดกซ์ตรินไม่เกิดการพองตัว และเกิดการหดตัวที่จะทำให้เกิดรอยบุบและเว้าลงไป



ภาพที่ 3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500x โดยที่ (S) หมายถึง ไมโครแคปซูลที่ทำห่อหุ้มด้วยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย และ (H) หมายถึง ไมโครแคปซูลที่ผ่านการฉีดพ่นฝอยน้ำมันร่วมกับการใช้ตู้อบลมร้อน ตามปริมาณของน้ำมันงาจี่ม้อน ที่ระดับ 10, 20 และ 30% (w/v)

สรุป

จากการศึกษาการห่อหุ้มน้ำมันงาจี่ม้อน โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย และ

การฉีดพ่นฝอยน้ำมัน โดยใช้ขวดฉีดพ่นฝอย (foggy spray bottle) แล้วทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน พบว่า มีค่าปริมาณความชื้น และค่าแอดอร์แอกติวิตี (a_w) ของไม

โครแคปซูลของทุกสูตรไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งมีค่าปริมาณความชื้น อยู่ในช่วง 4.70% -4.73% และมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี อยู่ในช่วง 0.31-0.33 มีค่าสี ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) ของทั้ง 2 วิธีมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่ประสิทธิภาพการห่อหุ้ม พบว่าวิธีทำแห้งแบบพ่นฝอยและวิธีทำแห้งแบบการฉีดพ่นฝอยน้ำมัน ร่วมกับการใช้ตู้อบลมร้อน มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) วิธีทำแห้งแบบพ่นฝอยมีประสิทธิภาพการห่อหุ้มสูงกว่าวิธีทำแห้งแบบการฉีดพ่นฝอย น้ำมัน ร่วมกับการ ใช้ตู้อบลมร้อน และค่าความสามารถในการละลายในน้ำ พบว่าไมโครแคปซูลของทั้ง 2 วิธีมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) และไมโครแคปซูลที่ทำแห้งแบบพ่นฝอยมีความสามารถละลายน้ำได้ดีกว่า แต่สูตรที่ใช้การทำแห้งแบบพ่นฝอยมีค่าเพอร์ออกไซด์สูงกว่าสูตรที่ใช้การทำแห้งแบบตู้อบลมร้อน ส่วนลักษณะพื้นผิวของไมโครแคปซูลน้ำมันง้ามีอ่อน พบว่าไมโครแคปซูลที่ห่อหุ้มและทำแห้งแบบพ่นฝอย อนุภาคมีลักษณะของเกาะติดกัน และรูปร่างแตกต่างกันออกไป โดยมีทั้งรูปร่างคล้ายทรงกลมที่เกิดจากการพองตัวขึ้น และบางส่วนมีการหดตัว ทำให้เกิดรอยบุบตรงกลาง ในขณะที่ไมโครแคปซูลที่ผ่านการฉีดพ่นฝอยร่วมกับตู้อบลมร้อน มีขนาดอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอ รูปร่างแตกต่างกันออกไป มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอย และมีลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างจากไมโครแคปซูลที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย ดังนั้นไมโครแคปซูลน้ำมันง้ามีอ่อนที่ได้จากศึกษาในครั้งนี้เหมาะสมที่จะนำไปเติมในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางเพื่อเสริมคุณค่าทางอาหารต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการพัฒนานักวิจัย และงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโท 2562 และ วิสาหกิจชุมชนกลุ่มส่งเสริมอาชีพบ้านเหม้า ตำบลสระคู อำเภอสุวรรณภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Alamed, J., Chaiyasit, W., McClements, D.J. and Decker, E.A. 2009. Relationships between Free Radical Scavenging Antioxidant Activity in Foods. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 57: 2969-2976.
- Albert, B.B., Derraik, J.G.B., Cameron-Smith, D., Hofman, P.L., Tumanov, S., Villas-Boas, S.G., Garg, M.L. and Cutfield, W.S. 2015. Fish oil supplements in New Zealand are highly oxidised and do not meet label content of n-3 PUFA. **Scientific Reports** 5(1): 7928.
- Anwar, S.H. and Kunz, B. 2011. The influence of drying methods on the stabilization of fish oil microcapsules: comparison of spray granulation, spray drying, and free drying. **Journal of Food Engineering** 105: 367-378.
- Azizi, N., Najafpour, G. and Younesi, H. 2017. Acid pretreatment and enzymatic saccharification of brown seaweed for polyhydroxybutyrate (PHB) production using *Cupriavidus necator*. **International Journal of Biological Macromolecules** 101: 1029-1040.

- Chang, C., Varankovich, N. and Nickerson, M.T. 2016. Microencapsulation of canola oil by lentil protein isolate- based wall Materials. **Food Chemistry** 212: 264-273.
- Dorni, C., Sharma, P., Saikia, G. and Longvah, T. 2018. Fatty acid profile of edible oils and fats consumed in India. **Food Chemistry** 238: 9-15.
- Encina, C., Vergara, C., Gimenez, B., Oyarzun-Ampuero, F. and Robert, P. 2016. Conventional spray-drying and future trends for the microencapsulation of fish oil. **Trends in Food Science and Technology** 56: 46-60.
- Goyal, A., Sharma, V., Sihag, M.K., Tomar, S.K., Arora, S. and Sabikhi L. 2015. Development and physico-chemical characterization of microencapsulated flaxseed oil powder: a functional ingredient for omega-3 fortification. **Powder Technology** 286: 527-537.
- Jay, J.M. 2000. **Modern Food Microbiology**. 6th Edition. Aspen Publishers, Inc., Gaithersburg.
- Kausadikar, S., Gadhve, A.D. and Wanghmare, J. 2015. Microencapsulation of lemon oil by spray drying and its application in flavor tea. **Advances in Applied Science Research** 6(4): 69-78.
- Nesterenko, A., Alric, I., Silvestre, F. and Durrie, V. 2013. Vegetable proteins in microencapsulation: A review of recent interventions and their effectiveness. **Industrial Crops and Products** 42: 469-479.
- Pegg, R.B. 2005. Measurement of primary lipid oxidation products, pp 515-564. In Wrolstad, R.E., Acree, T.E., Decker, E.A., Penner, M.H., Reid, D.S., Schwartz, S.J., Shoemaker, C.F., Smith, D.M. and Sporns, P., eds. **Handbook of food analytical chemistry**. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- Sheu, T.Y. and Rosenberg, M. 1998. Microstructure of microcapsules consisting of whey proteins and carbohydrates. **Journal of Food Science** 63(3): 491-494.
- Silva, P.L., Stringheta, P.C., Teófilo, R.F. and Oliveira, L.R. 2013. Parameter optimization for spray-drying microencapsulation of jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba*) peel extracts using simultaneous analysis of responses. **Journal of Food Engineering** 117(4): 538-544.
- Siriamornpun, S., Li, D., Yang, L., Suttajit, S. and Suttajit, M. 2006. Variation of lipid and fatty acid compositions in Thai Perilla seeds grown at different location. **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 28(Suppl. 1): 17-21.
- Tan, S.Y., Teh, C., Ang, C.Y., Li, M., Li, P., Korzh, V. and Zhao, Y. 2017. Responsive mesoporous silica nanoparticles for sensing of hydrogen peroxide and simultaneous treatment toward heart failure. **Nanoscale** 9(6): 2253-2261.
- Timilsena, Y. P., Vongsivut, J., Adhikari, R. and Adhikari, B. 2017. Physicochemical and thermal characteristics of Australian chia seed oil. **Food Chemistry** 228: 394-402.
- Wannarot, N. 2019. Product Development of low fat-creamer powder using Hom Mali Rice substitution. Master's Thesis, Mahasarakham University. (in Thai)

Wongsawat, P., Nopparat, M., Ruangdej, K., Phapan, W. and Lertrungpanit, A. 2003. Physical properties of spray dried and reconstituted soya milk, pp. 242-250. **41th Kasetsart University Annual Conference: Agro-**

Industry. Department of Agro Industry, Faculty of Agro Industry, Kasetsart University. (in Thai)

การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพสำหรับการออกแบบและ พัฒนาผลิตภัณฑ์กระจุประเภทกระเป่า

Application of Quality Function Deployment Technique for Designing and Developing Bag-Type Bulrush Reed Products

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2*}, ชาตรี หอมเขียว^{1,2}, วรธนพร ชีววุฒิปงศ์^{1,2}, ธยา ภิรมย์¹ และ อภิชล ทองมั่ง กำเนิดว่า¹

Surasit Rawangwong^{1,2*}, Chatree Homkhiew^{1,2}, Watthanaphon Cheewawuttipong^{1,2}, Thaya Pirom¹

and Apichon Thongmung Kamnerdwam¹

Received: 12 January 2021, Revised: 28 April 2021, Accepted: 14 May 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากกระจุประเภทกระเป่า โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ โดยสำรวจเสียงเรียกร้องของลูกค้าและความพึงพอใจของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์กระจุประเภทกระเป่า จากนั้นได้แปลงความต้องการของลูกค้าด้วยเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ โดยมีประเด็นความต้องการของลูกค้าประกอบด้วย ด้านรูปแบบ คุณภาพ วัสดุ การใช้งาน และอื่นๆ จากนั้นได้ออกแบบผลิตภัณฑ์กระจุประเภทกระเป่า จำนวน 3 แบบ ได้แก่ กระเป่าอเนกประสงค์ กระเป่าสะพายผู้ชาย และกระเป่าสะพายผู้หญิง และทำการสำรวจความพึงพอใจของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์กระจุประเภทกระเป่า พบว่าผลิตภัณฑ์กระจุประเภทกระเป่าที่ได้รับการออกแบบและพัฒนาขึ้นมาใหม่ สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าทั้ง 2 กลุ่ม คือ กลุ่มลูกค้าผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ และกลุ่มร้านค้าผลิตภัณฑ์กระจุทั่วไป โดยมีค่าความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านวัสดุมากที่สุดเป็นอันดับแรกอยู่ในระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.77 และมีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านการใช้งานเป็นอันดับสองอยู่ในระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.75

คำสำคัญ: การออกแบบผลิตภัณฑ์, การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ, บ้านคุณภาพ, กระจุ

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

² Materials Processing Technology Research Unit, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): surasit.r@rmutsv.ac.th

ABSTRACT

The objective of this research was to design and develop the bag-type bulrush reed products by applying a Quality Function Deployment (QFD) technique. Customers' voice and satisfaction related to the bag-type bulrush reed products were surveyed. Then customer requirements were converted into the product planning matrix or House of Quality (HOQ). The need of customers consists of style, quality, material, usability, and others. After that, the bulrush reed appliance products were designed into 3 types including a multi-purpose bag, a men's shoulder bag, and a women's shoulder bag. The customers' satisfaction to new bag-type bulrush reed products was also investigated. It was found that the bag-type bulrush reed products that have been newly designed and developed are able to meet the needs of both groups of customers (product users and general bulrush reed products stores). The highest satisfaction was found on the material ($X = 4.77$), followed by the functionality ($X = 4.75$), respectively.

Key words: product design, quality function development, house of quality, bulrush reed

บทนำ

ประเทศไทยได้ใช้ภูมิปัญญามาเป็นรากฐานของการพัฒนาเศรษฐกิจชุมชนโดยอาศัยการพึ่งพาภาคเกษตรกรรมมาแปรรูปให้เป็นอุตสาหกรรม แต่ยังคงขาดการเชื่อมโยงจากระดับรากหญ้า และยังไม่มีการเสริมจุดแข็งให้กับภูมิปัญญาพื้นบ้านและการใช้ทรัพยากรในชุมชน เพื่อหาทางสร้างมูลค่าเพิ่ม ถึงแม้จะมีการสนับสนุนของภาครัฐให้เกิดหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP) และการกระตุ้นให้ผลิตสินค้าซึ่งเป็นผลผลิตจากทรัพยากรในท้องถิ่นเป็นสินค้าภูมิปัญญาชาวบ้าน ผลจากการกระตุ้นและสนับสนุนให้ทุกตำบลทำการผลิตสินค้า ทำให้ชุมชนส่วนใหญ่ขาดความรู้ด้านเทคนิคการออกแบบผลิตภัณฑ์ กรรมวิธีการผลิต การบรรจุภัณฑ์ และการตลาด ซึ่งเป็นการผลิตสินค้าโดยไม่ได้อิงวิเคราะห์ความต้องการของตลาด

จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นจังหวัดที่มีพื้นที่เพาะปลูกพืชไร่ พืชสวนที่หลากหลาย การยึดอาชีพส่วนใหญ่จึงเป็นเกษตรกร และนอกจากนี้ยังเป็นแหล่งภูมิปัญญาท้องถิ่นเกี่ยวกับการประกอบ

อาชีพงานด้านหัตถกรรมที่มีลักษณะมุ่งเน้นการผลิตเพื่อพึ่งพาตนเอง การประกอบอาชีพหัตถกรรมมีหลายชุมชนด้วยกัน (Suksikarn, 2011) ซึ่งผลิตภัณฑ์กระจูดเป็นเอกลักษณ์หนึ่งของจังหวัดนครศรีธรรมราช โดยเฉพาะตำบลเค็ง อำเภอลำชะอวด เนื่องจากมีทุ่งกระจูดเป็นจำนวนมากและชาวบ้านในชุมชนได้อาศัยการเก็บต้นกระจูดมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ โดยมีรูปแบบการผลิตที่ไม่หลากหลาย และยังเป็นารออกแบบผลิตภัณฑ์แบบเดิมๆ ไม่ค่อยตรงตามความต้องการของลูกค้า แสดงดังภาพที่ 1 ในขณะที่ตลาดยังมีความต้องการในตัวผลิตภัณฑ์ที่ทำจากกระจูด เพราะต้องการความเป็นธรรมชาติและสวยงามของวัสดุ แต่ทั้งนี้ก็ต้องตอบสนองด้านประโยชน์ใช้สอยและความงามในตัวผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วย ตามที่คณะผู้วิจัยได้ลงพื้นที่ของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผู้ผลิตผลิตภัณฑ์จากกระจูด กรณีศึกษาพบว่าวิสาหกิจชุมชนและกลุ่มผู้ผลิตผลิตภัณฑ์จากกระจูดดังกล่าว ยังขาดการเชื่อมโยงกับแหล่งความรู้ทางด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์กระจูดแบบใหม่ๆ

อีกทั้งยังขาดการศึกษาข้อมูลความต้องการของตลาด

หรือผู้ใช้อย่างแท้จริง



ภาพที่ 1 ผลิตภัณฑ์จากกระจูด

ผลิตภัณฑ์กระจูดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพืช น้ำที่มีสายพันธุ์เดียวกันกับกก นำมาขึ้นรูปเป็นเส้น กระจ่า ของประดับตกแต่ง และของใช้ภายใน คราวเรือน ซึ่งมีราคาไม่สูงมากนัก และเนื่องจาก ผลิตภัณฑ์กระจูดเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทจักสานที่เป็น งานหัตถกรรมหรือขึ้นรูปด้วยมือเป็นส่วนใหญ่ จึงมี ข้อจำกัดในการผลิตด้านรูปแบบและการขึ้นรูป (Muangmeesri *et al.*, 2009) แต่สามารถปรับการผลิต เพื่อให้เป็นรูปแบบอื่นๆ ที่สามารถเพิ่มหน้าที่ใช้สอย ความสวยงาม และความยั่งยืนต่ออายุการใช้งาน ซึ่ง ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวถ้าหากได้รับการศึกษาและพัฒนา รูปแบบผลิตภัณฑ์ให้มีความหลากหลายและมีความ ทันสมัย เป็นไปตามความต้องการของตลาดทั้งใน ส่วนภูมิภาคและทั่วประเทศ จะสามารถยกระดับการ ส่งเสริมผลิตภัณฑ์ชุมชนได้มากยิ่งขึ้น

การนำองค์ความรู้ด้านการออกแบบและ พัฒนาผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิง คุณภาพ (Quality Function Deployment; QFD) (Akao, 1990; Chan and Wu, 2002) และความรู้ ทางด้านการวิจัยมาประยุกต์ใช้และบูรณาการเพื่อเป็น แนวทางการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ สามารถ พัฒนาศักยภาพและเพิ่มขีดความสามารถในการ พัฒนาวิสาหกิจชุมชน รวมถึงการจัดการที่มี ประสิทธิภาพและประสิทธิผล การปรับเปลี่ยน รูปแบบและเพิ่มระดับเทคโนโลยีการแปรรูปวัตถุดิบ และการจัดการที่เหมาะสมกับยุคสมัยและศักยภาพ

ของคนในชุมชน การแปรรูปและสร้างผลิตภัณฑ์ใน ชุมชนที่หลากหลายและทันสมัย มีการจัดการตลาดที่ สัมพันธ์กับผู้บริโภคโดยตรง ถือเป็นกระบวนการ ของการจัดการของชุมชนเพื่อการพัฒนาอย่างเข้มแข็ง การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ๆ จะต้องเกิดจากความต้องการของชุมชนเอง ผ่านการ ร่วมกันทำการวิจัยเพื่อท้องถิ่นของตนเอง

การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ เป็นเทคนิค หนึ่งที่จะช่วยในการออกแบบและพัฒนาคุณภาพของ ผลิตภัณฑ์ให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการ ของลูกค้าได้ (Cohen, 1995; Kengpol, 2004) โดยเน้น การสร้างความพึงพอใจและให้ความสำคัญกับลูกค้า โดยนำข้อมูลป้อนกลับจากลูกค้ามาระบุความต้องการ ที่แท้จริง ทำให้ความผิดพลาดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ใหม่มีคุณภาพที่ไม่ตรงกับความต้องการของลูกค้า ลดลง ช่วยลดระยะเวลาในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ และ ยังสามารถหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงการออกแบบใน ระยะเวลาเริ่มทำการผลิต (Homkhiew *et al.*, 2012; Pirom *et al.*, 2019; Taposh Kumar *et al.*, 2018)

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงเป็นที่มาของ การวิจัยนี้เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์จาก กระจูดประเภทของใช้โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการ แปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ ของวิสาหกิจชุมชนผู้ผลิต ผลิตภัณฑ์จากกระจูด กรณีศึกษา ตำบลเคอิ่ง อำเภอ ชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อจะเป็นทางเลือก หนึ่งที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์จากกระจูดได้รับความนิยม

จากลูกค้า จากข้อมูลความต้องการของลูกค้า ในการตอบสนองความต้องการของลูกค้าและตลาดเป้าหมายตามยุคสมัยได้มากขึ้น และเพื่อสร้างความได้เปรียบเทียบในการแข่งขันกับผลิตภัณฑ์จากคู่แข่ง และวัสดุอื่นๆ วิศวกรผู้ผลิตผลิตภัณฑ์จากกระจกสามารถนำเอาวัตถุดิบในท้องถิ่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง อีกทั้งสามารถนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์อื่นๆ ของวิสาหกิจชุมชนได้อย่างยั่งยืน

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ ในส่วนของบ้านคุณภาพ เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากกระจกประเภทกระเป๋าคู่ให้ตรงกับความต้องการของลูกค้ามากที่สุด โดยมีการเก็บข้อมูลแบบสอบถามการวิจัยเกี่ยวกับเสียงเรียกร้องของลูกค้า และความต้องการของลูกค้า ในช่วงเดือน ธันวาคม 2562 ถึง กุมภาพันธ์ 2563 จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลเพื่อให้ได้

ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การเตรียมการก่อนการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

การสำรวจเพื่อเตรียมข้อมูลก่อนนำเข้าบ้านคุณภาพมีขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลดังต่อไปนี้

1) ทำการสำรวจความต้องการของลูกค้า เพื่อหาเสียงของลูกค้า (Voice of Customer; VOC) เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์จากกระจก ด้วยวิธีการสัมภาษณ์และเก็บแบบสอบถามที่ 1 ซึ่งเป็นแบบสอบถามปลายเปิด โดยการกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างเพื่อใช้ในการสำรวจความต้องการของลูกค้า ได้เลือกใช้ระดับความเชื่อมั่น 90% และได้เลือกใช้สมการกรณีไม่ทราบจำนวนประชากรของ W.G.Cochran ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Sinthavalai and Ruengrong (2018) กล่าวคือในการกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่าง พบว่าได้มีการคำนวณจากสมการกรณีไม่ทราบจำนวนประชากรของ W.G.Cochran และมีการเลือกใช้ระดับความเชื่อมั่น 90% แสดงดังสมการที่ 1

$$n = \frac{P(1-P)Z^2}{d^2} \quad (1)$$

เมื่อ n คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ

P คือ สัดส่วนของประชากรที่ผู้วิจัยต้องการสุ่ม (กำหนดใช้ $P = 0.30$ เพราะเป็นที่นิยม)

Z คือ ระดับความมั่นใจที่กำหนดหรือระดับนัยสำคัญทางสถิติ (กำหนดใช้ $Z = 1.65$ เพราะได้กำหนดความเชื่อมั่น 90%)

d คือ สัดส่วนความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับให้เกิดขึ้น (กำหนดใช้ $d = 0.10$ เพราะได้กำหนดความเชื่อมั่น 90%) แทนค่าในสูตร

$$n = \frac{0.30(1-0.30)1.65^2}{0.10^2}$$

$$n = 58$$

ดังนั้นในขั้นตอนของการเก็บข้อมูลความต้องการของลูกค้า พบว่ามีจำนวนขนาดของกลุ่มตัวอย่างจากการคำนวณได้ 58 ตัวอย่าง แต่ในการเก็บข้อมูลแบบสอบถาม ผู้วิจัยได้เพิ่มจำนวนกลุ่มตัวอย่างเป็น 115 ตัวอย่าง เพื่อเพิ่มระดับความน่าเชื่อถือของข้อมูล ซึ่งกลุ่มตัวอย่างในการเก็บข้อมูลจะประกอบไปด้วย ผู้ผลิต ลูกค้ายกกลุ่มนักท่องเที่ยว และผู้ใช้ผลิตภัณฑ์จากกระจูดในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช พัทลุง และจังหวัดใกล้เคียง

2) จัดเรียงถ้อยคำความต้องการ นำผลจากการเก็บข้อมูลความต้องการของลูกค้ามาเรียบเรียงใหม่ ด้วยแผนผังกลุ่มเชื่อมโยง (Affinity Diagram) จากนั้นใช้แผนภูมิต้นไม้ (Tree Diagram) ช่วยในการจัดการข้อมูลเพื่อไม่ให้เกิดความสับสน สำหรับสรุปเป็นส่วนที่ 1 ของบ้านคุณภาพ แสดงดังภาพที่ 2

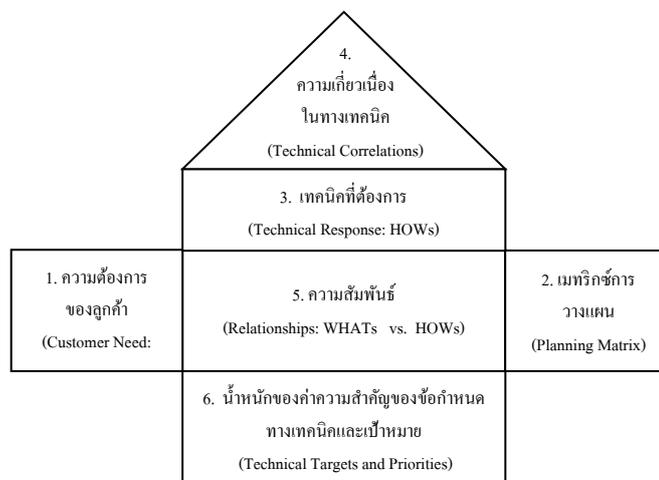
3) ทำการวิเคราะห์คะแนนความสำคัญของความต้องการของลูกค้า ด้วยการนำประเด็นความต้องการที่ผ่านการเรียบเรียงไปพัฒนาเป็นแบบสอบถามที่ 2 เพื่อเก็บข้อมูลคะแนนความสำคัญในแต่ละความต้องการของลูกค้า โดยลักษณะคำถามจะเป็นการวัดค่าเป็นตัวเลขแบบ 5 ระดับ โดยทำการทดสอบความเที่ยงตรงของเนื้อหา ด้วยวิธีดัชนีความ

สอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับจุดประสงค์ (Index of Item-Objective Congruence; IOC)

จากการทดสอบความเที่ยงตรงของเนื้อหาจากผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ ผู้เชี่ยวชาญด้านการผลิตกระจูด และผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดทำข้อมูลแบบสอบถาม จำนวน 5 ท่าน โดยผู้เชี่ยวชาญมีอายุอยู่ในช่วง 30-45 ปี และมีประสบการณ์ 10-20 ปี พบว่าความเที่ยงตรงของเนื้อหาเท่ากับ 0.92 แสดงว่าข้อคำถามวัดได้ตรงตามเนื้อหา ดังนั้นข้อคำถามนี้สามารถนำไปใช้ได้ จากนั้นนำข้อมูลจากแบบสอบถามที่ 2 มาคำนวณคะแนนความสำคัญด้วยค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric Mean) โดยผลของคะแนนความสำคัญจะเป็นส่วนหนึ่งในการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพต่อไป

2. การประยุกต์ใช้เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์

สำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในส่วนของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ (Product Planning) หรือบ้านคุณภาพ (HOQ) (Akao, 1990; Chan and Wu, 2002; Kengpol, 2004) โดยมีการวิเคราะห์หลักๆ 6 ส่วน แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของเมทริกซ์การวางแผน (Akao, 1990; Chan and Wu, 2002; Kengpol, 2004)

โดยเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ (Product Planning) ซึ่งเป็นการสร้างบ้านคุณภาพ (HOQ) มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้ (Meemongkol *et al.*, 2012; Homkhiew *et al.*, 2012; Sritong and Sritong, 2016; Sinthavalai *et al.*, 2016; Somthong and Pianthong, 2016; Fan *et al.*, 2017; Joompha and Pianthong, 2018; Sinthavalai and Ruengrong, 2018; Pirom *et al.*, 2019)

1) ส่วนความต้องการของลูกค้า หรือส่วนที่ 1 ในบ้านคุณภาพ แสดงดังภาพที่ 2 เป็นการนำความต้องการของลูกค้าที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมการมาใส่ในเมทริกซ์การวางแผนของบ้านคุณภาพ (HOQ)

2) ส่วนเมทริกซ์การวางแผน หรือส่วนที่ 2 ในบ้านคุณภาพ แสดงดังภาพที่ 2 เป็นวิธีในการกำหนดอัตราการปรับปรุงในผลิตภัณฑ์

3) ส่วนเทคนิคที่ต้องการ หรือส่วนที่ 3 ในบ้านคุณภาพ แสดงดังภาพที่ 2 เป็นการระดมสมองของคณะผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ผลิตกระจุจ เพื่อกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิค (Design Attributes) ที่ตอบสนองต่อความต้องการของกลุ่มลูกค้าเป้าหมาย รวมทั้งกำหนดเป้าหมายทางเทคนิคและค่าการเคลื่อนไหวของเป้าหมายเบื้องต้น เพื่อให้ทราบถึงทิศทางในการปรับปรุง โดยจะเป็นการให้สัญลักษณ์ ดังนี้ ↑ ยิ่งมากยิ่งดี ○ เป้าหมายเหมาะสม และ ↓ ยิ่งน้อยยิ่งดี

4) ส่วนความเกี่ยวเนื่องในทางเทคนิค หรือส่วนที่ 4 ในบ้านคุณภาพ แสดงดังภาพที่ 2 เป็นการระดมสมองร่วมกันทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง เพื่อแสดงถึงความเกี่ยวเนื่องของเทคนิคที่นำมาใช้ในตัวแทนลักษณะเฉพาะทางคุณภาพ โดยจะเป็นการระบุว่า

เทคนิคใดที่มีความเกี่ยวข้องกันบ้างและมีความเกี่ยวข้องกันมากน้อยเพียงใด (Kengpol, 2004) โดยใช้สัญลักษณ์ “O” หมายถึง มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก “X” หมายถึง มีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย และ “ช่องว่าง” หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

5) ส่วนความสัมพันธ์ หรือส่วนที่ 5 ในบ้านคุณภาพ แสดงดังภาพที่ 2 เป็นการระดมสมองร่วมกันทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ในการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดทางเทคนิคกับความต้องการของลูกค้าในแต่ละคู่ โดยในการให้ค่าคะแนนความสัมพันธ์จะนิยมใช้ตัวเลข 0, 1, 3 และ 9 แทนความสัมพันธ์ คือ ไม่มีความสัมพันธ์ มีความสัมพันธ์น้อย มีความสัมพันธ์ปานกลาง และมีความสัมพันธ์มาก ตามลำดับ

6) ส่วนลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ หรือส่วนที่ 6 ของบ้านคุณภาพ แสดงดังภาพที่ 2 เป็นการบ่งบอกถึงความสำคัญในปริมาณต่างๆ กัน เพื่อให้กลุ่มผู้พัฒนาผลิตภัณฑ์ได้ทราบว่าความต้องการใดและตัวแทนลักษณะเฉพาะทางคุณภาพใดที่ต้องได้รับการเอาใจใส่อย่างสูง โดยจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนย่อยๆ คือ ค่าน้ำหนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ (Absolute Technical Requirement Important) เป็นการบอกลำดับความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2 และค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ (Relative Technical Requirement Important) เป็นการแสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3

$$Y = \sum (A \times B) \quad (2)$$

เมื่อ $Y =$ ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ $B =$ ค่าลำดับที่ของการให้น้ำหนักเริ่มต้น

$A =$ ค่าความสัมพันธ์ของข้อกำหนดทางด้านเทคนิคต่อความต้องการของลูกค้า

ยกตัวอย่างเช่น ข้อกำหนดประเด็น “ขนาด” ของผลิตภัณฑ์จากกระจุดประเภทกระเป๋า

$$Y = (4.65 \times 3) + (4.37 \times 3) + (4.37 \times 9) + (4.36 \times 3) + (4.62 \times 3) + (4.58 \times 1) + (4.44 \times 3) + (4.61 \times 9) + (4.50 \times 3) + (4.45 \times 9) + (4.65 \times 3) + (4.46 \times 3)$$

$$\text{ดังนั้น } Y = 233.87$$

$$\text{IMP} = \frac{Y}{\text{ผลรวมทั้งหมดของ } Y} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ $\text{IMP} =$ ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคเปรียบเทียบ

ยกตัวอย่างเช่น ข้อกำหนดประเด็น “ขนาด” ของผลิตภัณฑ์จากกระจุดประเภทกระเป๋า

$$\text{ถ้าผลรวมทั้งหมดของ } Y = 3,417.29$$

$$\text{IMP} = \frac{233.87}{3,417.29} \times 100$$

$$\text{IMP} = 6.84 \%$$

3. การออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากกระจุดประเภทกระเป๋า

จากการสำรวจเก็บข้อมูลและประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) เพื่อการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากกระจุดประเภทกระเป๋า โดยผู้วิจัยและทีมออกแบบได้ออกแบบผลิตภัณฑ์จากกระจุดประเภทกระเป๋า จำนวน 3 รูปแบบ ได้แก่ กระเป๋าอเนกประสงค์ กระเป๋าสะพายผู้ชาย และกระเป๋าสะพายผู้หญิง จากนั้นจึงดำเนินการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากกระจุดประเภทกระเป๋าตามที่ได้ออกแบบไว้ต่อไป

4. การประเมินความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์จากกระจุดประเภทกระเป๋า

หลังจากทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากกระจุดประเภทกระเป๋า จากนั้นจัดทำแบบสอบถามที่

3 เพื่อเก็บข้อมูลระดับคะแนนความพึงพอใจในคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ โดยทำการลงพื้นที่เก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ 3 กับกลุ่มผู้ผลิตลูกค้านักท่องเที่ยว และผู้ใช้ผลิตภัณฑ์จากกระจุดในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช พัทลุง และจังหวัดใกล้เคียง จำนวน 127 คน โดยเก็บข้อมูลในช่วงเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม 2563

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

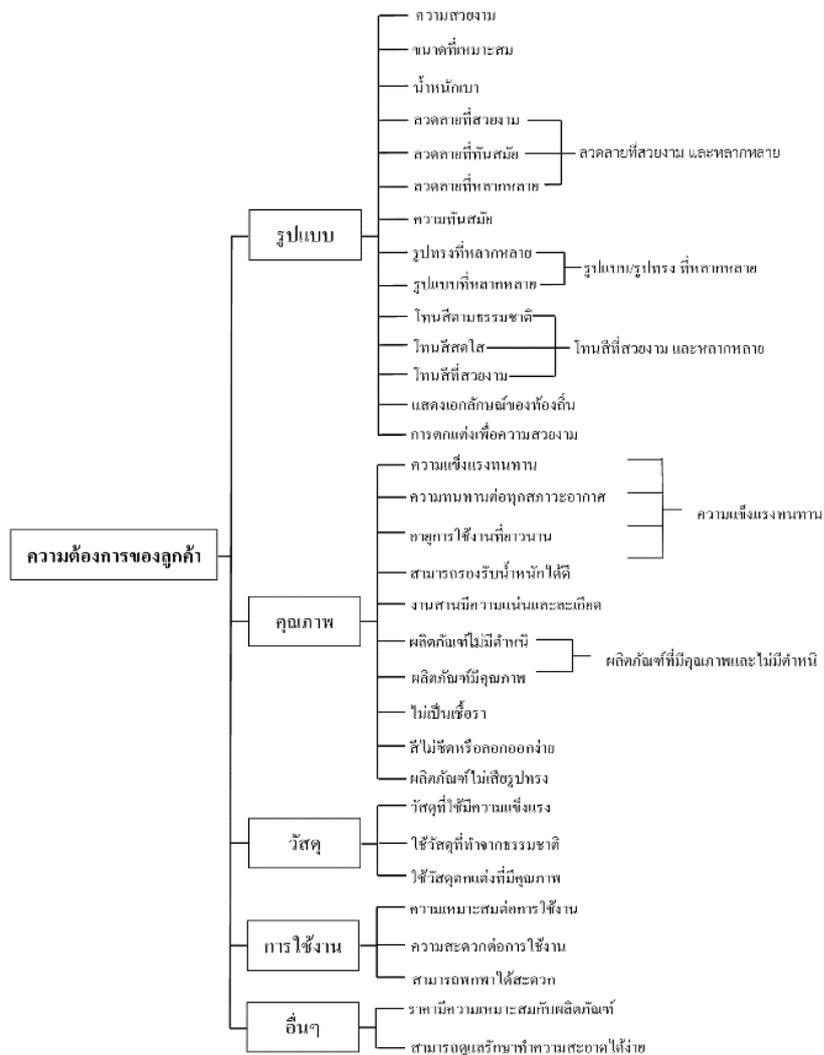
จากการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) ในส่วนของบ้านคุณภาพ (HOQ) สำหรับออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระจุดประเภทกระเป๋าตามวิธีการดังกล่าวข้างต้น มีผลการวิจัยดังต่อไปนี้

1. ผลการเตรียมการก่อนการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD)

จากการสำรวจความต้องการของลูกค้าด้วยวิธีการสัมภาษณ์และประเมินแบบสอบถามที่ 1 จำนวน 115 ตัวอย่าง พบว่ามีจำนวนความต้องการของลูกค้าทั้งหมด 23 ความต้องการ โดยสามารถแบ่งกลุ่มความต้องการได้ 5 กลุ่ม คือ รูปแบบ คุณภาพ วัสดุ การใช้ประโยชน์ และอื่นๆ แสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งผลที่ได้พบว่ามีคุณสมบัติซ้อนกันในด้านรูปแบบ คุณภาพ

วัสดุ และการใช้ประโยชน์ กับงานวิจัยของ Pirom *et al.* (2019)

จากนั้นนำความต้องการของลูกค้าทั้ง 23 ความต้องการมาจัดทำแบบสอบถามที่ 2 และทำการรวบรวมข้อมูลความต้องการของลูกค้าจากแบบสอบถามที่ 2 จำนวน 310 ตัวอย่าง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (IMP) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ซึ่งนำไปใช้ในการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในส่วนของการวิเคราะห์วางแผนผลิตภัณฑ์ต่อไป



ภาพที่ 3 คุณลักษณะความต้องการของลูกค้า

2. ผลการประยุกต์ใช้เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์

สำหรับผลการนำข้อมูลที่ได้มาเข้าสู่เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ หรือบ้านคุณภาพ (HOQ) มีรายละเอียดของผลการดำเนินงาน ดังนี้

1) ความต้องการของลูกค้า (Customer Need) เป็นการนำคุณลักษณะความต้องการของลูกค้าในภาพที่ 3 มาใส่ทางด้านซ้ายของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4

2) การสร้างเมทริกซ์การวางแผน (Planning Matrix) เป็นการนำค่า IMP ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยเรขาคณิตที่ได้จากแบบสอบถามที่ 2 มาใส่ให้ตรงกับความต้องการของลูกค้าแต่ละตัวของผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4 โดยจะเห็นได้ว่าความต้องการของลูกค้าได้ให้ความสำคัญกับผลิตภัณฑ์จากกระจุดประเภทกระเป๋า ในด้านวัสดุ เป็นอันดับที่หนึ่ง คือ ใช้วัสดุที่ทำจากธรรมชาติ โดยมีค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (IMP) 4.68 คะแนน และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) 0.52 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rawangwong *et al.* (2019) โดยทั่วไปการออกแบบผลิตภัณฑ์ประเภทของใช้ ของประดับตกแต่ง ประเด็นความสวยงาม จะมีผลต่อความต้องการของลูกค้า

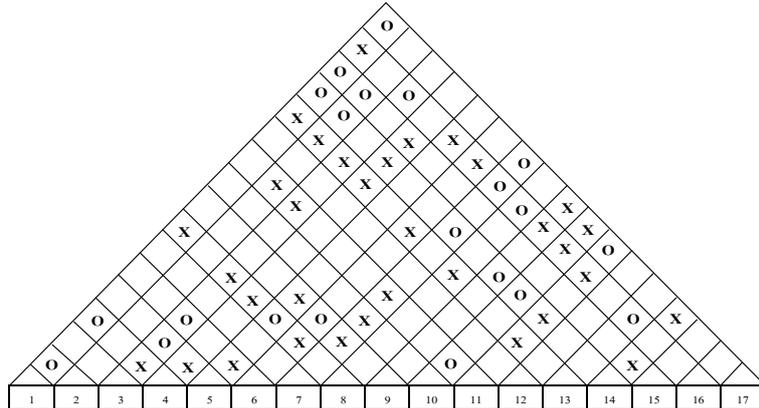
3) ข้อกำหนดทางเทคนิคที่ต้องการ (Technical Requirement) จากการระดมสมองของผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ผลิตกระจุ๊ด พบว่าสามารถกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิคได้ 17 ข้อกำหนด แสดงดังภาพที่ 4 ของบ้านคุณภาพ

4) ความเกี่ยวเนื่องในทางเทคนิค (Technical Correlations) จากการระดมสมองของฝ่ายต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อกำหนดความสัมพันธ์ทางเทคนิคต่างๆ ไปใช้เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า พบว่าผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์แต่ละข้อกำหนดมีความสัมพันธ์ที่แตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 4 ของบ้านคุณภาพ

5) เมทริกซ์ความสัมพันธ์ (Relationships) จากการให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างส่วนความต้องการของลูกค้า และส่วนข้อกำหนดทางเทคนิคของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ พบว่าจะได้ผลการให้คะแนนความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 4 ซึ่งในการให้คะแนนนี้จะทำการเปรียบเทียบแบบเป็นคู่ๆ โดยใช้การระดมสมองของผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ผลิตกระจุ๊ด

สัญลักษณ์	ความหมาย
O	มีความสัมพันธ์ต่อนี้มากที่สุด
X	มีความสัมพันธ์ต่อนี้ปานกลาง
ช่องว่าง	ไม่มีความสัมพันธ์ต่อนี้

สัญลักษณ์	ความหมาย
↑	ยิ่งมากยิ่งดี
○	เป้าหมายเหมาะสม
↓	ยิ่งน้อยยิ่งดี



ความต้องการของลูกค้า (Customer Requirement)			ข้อกำหนดทางเทคนิค (Technical Requirement)																	
No.	IMP		B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8	B-9	B-10	B-11	B-12	B-13	B-14	B-15	B-16	B-17	
รูปแบบ	ความสวยงาม	A-1	4.65	3		9	9	9	9		1		3	9				3		
	การลดเสียงความสวยงาม	A-2	4.45	3		3	3	3	3				3	9				3	1	
	แสดงเอกลักษณ์ของท้องถิ่น	A-3	4.42			9	3	9	3		3			9		1			3	
	รูปแบบ/รูปทรง ที่หลากหลาย	A-4	4.38			3	9	3	1		3				3	1	1	3	3	
	ขนาดเหมาะสม	A-5	4.37	9	3		3										9	9	3	
	น้ำหนักเบา	A-6	4.36	3	9									1			3	9		
	ลดสลายที่สับสน และหลากหลาย	A-7	4.33			9	3	9	9		3				3				3	
	โทนสีที่สวยงาม และหลากหลาย	A-8	4.30			9	3	9	9		3			1		3			3	
	ความทันสมัย	A-9	4.22			3	3	9	9						9				3	
คุณภาพ	ความแข็งแรงทนทาน	A-10	4.62	3		3			9	3		3	9	1		3	1	3		
	งานสานมีความแน่นและละเอียด	A-11	4.58	1		1	1		3	9			3					3	3	
	ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพ และไม่มีตำหนิ	A-12	4.47				1		9	9	3		3		1	3		3	1	
	ผลิตภัณฑ์ไม่เสียรูปทรง	A-13	4.44	3		9			1	9						3			3	
	สีไม่ซีดหรือลอกออกง่าย	A-14	4.09						3	3	9							3	1	
	ไม่เป็นเชื้อรา	A-15	4.04						3		3	9	1			1		3	1	
วัสดุ	ใช้วัสดุที่ง่ายกรรมาชาติ	A-16	4.68		1	3			3			3	9	9	1			3	3	
	วัสดุที่ใช้มีความแข็งแรงทนทาน	A-17	4.64						9	3			9	3		3		3	1	
	ใช้วัสดุตกแต่งที่มีคุณภาพ	A-18	4.41			1		1	1		3			9				3	1	
การใช้งาน	ความเหมาะสมต่อการใช้งาน	A-19	4.61	9	9		3		1				1	3	9	3				
	ความสะดวกต่อการใช้งาน	A-20	4.50	3	9								1		9	9				
	สามารถพกพาได้สะดวก	A-21	4.45	9	9		3								9	9				
อื่นๆ	ราคาที่มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์	A-22	4.65	3		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3			9	1	
	สามารถดูแลรักษาที่ความสะอาดได้ง่าย	A-23	4.46	3					3				1	3				1	9	
ลำดับน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์			8	13	9	3	5	10	11	1	15	16	2	17	6	7	12	4	14	รวม
ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์			233.87	179.10	230.76	259.05	251.08	223.67	207.41	270.93	93.82	82.67	268.68	60.60	239.88	237.40	181.97	258.19	138.19	3417.29
ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ			6.84	5.24	6.75	7.58	7.35	6.55	6.07	7.93	2.75	2.42	7.86	1.77	7.02	6.95	5.33	7.56	4.04	100.00
เป้าหมายทางด้านเทคนิค																				

ภาพที่ 4 เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์กระจุคประเภทกระเป๋า

6) การคำนวณหาลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ (Priority Relationships) ในส่วนนี้ได้ผลแสดงดังตารางที่ 1 และภาพที่ 5 โดยสามารถสรุปผลได้ว่าการจัดเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญ

โดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์จากกระจุคประเภทกระเป๋า พบว่าคุณลักษณะการออกแบบที่มีคะแนนสูงสุด 10 ข้อ หรือสิ่งที่ผู้ผลิตต้องให้ความสำคัญสูงสุดตามหลักการแผนภาพพาเรโต (Pareto Diagram)

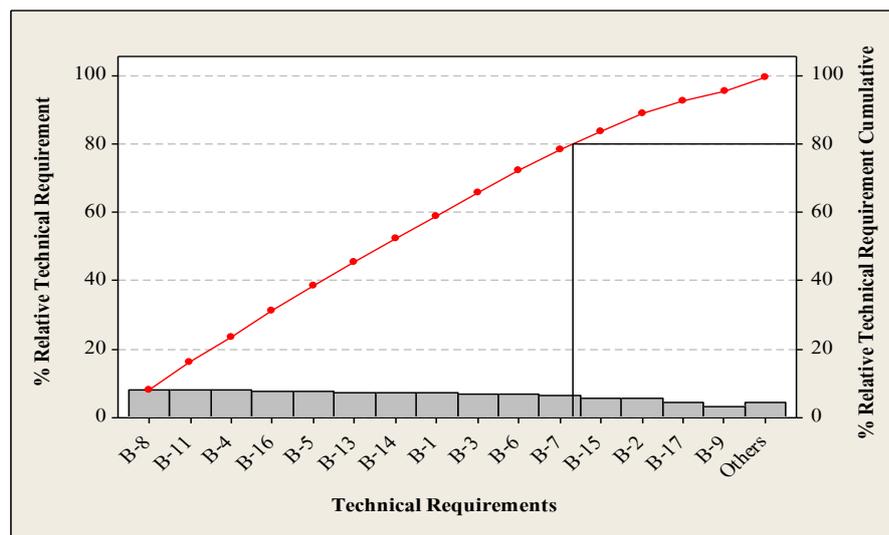
(Sinthavalai and Ruengrong, 2018) จำนวน 11 ข้อ ประกอบด้วย 1) ด้านความประณีต (7.93%) 2) วัสดุที่ใช้ในการผลิต (7.86%) 3) รูปแบบ/รูปทรง (7.58%) 4) ราคา (7.56%) 5) ลวดลาย (7.35%) 6) วัสดุตกแต่ง (7.02%) 7) การใช้งาน (6.95%) 8) ขนาด (6.84%)

9) การแสดงถึงเอกลักษณ์ (6.75%) 10) โทนสี (6.55%) และ 11) อายุการใช้งาน (6.07%) จากนั้นจะนำข้อกำหนดทางเทคนิคที่ผ่านการจัดเรียงลำดับแล้ว มาทำการออกแบบผลิตภัณฑ์จากกระจุยประเภทกระเป๋าต่อไป

ตารางที่ 1 การเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ และโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์จากกระจุยประเภทกระเป๋า

No.	Technical Requirements	Absolute	% Relative	No.	Technical Requirements	Absolute	% Relative
		Technical Requirement Important	Technical Requirement Important			Technical Requirement Important	Technical Requirement Important
B-8	ความประณีต	270.93	7.93	B-6	โทนสี	223.67	6.55
B-11	วัสดุที่ใช้ในการผลิต	268.68	7.86	B-7	อายุการใช้งาน	207.41	6.07
B-4	รูปแบบ/รูปทรง	259.05	7.58	B-15	การเคลื่อนย้าย	181.97	5.33
B-16	ราคา	258.19	7.56	B-2	น้ำหนัก	179.10	5.24
B-5	ลวดลาย	251.08	7.35	B-17	การดูแลรักษา	138.19	4.04
B-13	วัสดุตกแต่ง	239.88	7.02	B-9	ความคงทนของสี	93.82	2.75
B-14	การใช้งาน	237.40	6.95	B-10	การป้องกันเชื้อรา	82.67	2.42
B-1	ขนาด	233.87	6.84	B-12	ความปลอดภัยของวัสดุ	60.60	1.77
B-3	การแสดงถึงเอกลักษณ์	230.76	6.75				

หมายเหตุ: การเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญจากมากไปน้อย



ภาพที่ 5 การเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ

3. ผลการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากกระจูดประเภทกระเป๋าคู่

หลังจากทำการเก็บข้อมูลและประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากกระจูดประเภทกระเป๋าคู่ จำนวน 3 รูปแบบ คือ กระเป๋าคู่เนกประสงค์ กระเป๋าคู่สะพายผู้ชาย และกระเป๋าคู่สะพายผู้หญิง ซึ่งผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 รูปแบบ เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นที่นิยม และเหมาะสมสำหรับการใช้ประโยชน์ อีกทั้งสามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้ ดังนั้นจากผลการวิจัยข้างต้นสามารถสรุปประเด็นข้อกำหนดสำหรับการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ตามลำดับคะแนนค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ ได้ดังนี้

1) ความประณีต เลือกใช้ลวดลายการสานที่มีความประณีต และมีการตัดเย็บที่ละเอียดสวยงาม เพราะสามารถช่วยในการดึงดูดความสนใจของลูกค้าในด้านคุณภาพได้

2) วัสดุที่ใช้ในการผลิต เลือกใช้ต้นกระจูดที่มีอายุ 3 ปีขึ้นไปมาใช้ในการผลิต เพราะสามารถดูดความชื้นได้ อีกทั้งมีความเหนียวและทนทาน

3) รูปแบบ/รูปทรง ใช้รูปทรงสี่เหลี่ยมมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ เพราะมีพื้นที่ใส่ของได้มาก อีกทั้งมีการออกแบบรูปแบบของกระเป๋าคู่ทั้ง 3 รูปแบบที่แตกต่างกันออกไป

4) ราคา การกำหนดราคาที่เหมาะสมตามการใช้งานและความยากง่ายในการขึ้นรูป

5) ลวดลาย เลือกใช้ลวดลายที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบลวดลายการสานทำให้ผลิตภัณฑ์กระเป๋าคู่มีความสวยงามและมีความทันสมัยมากยิ่งขึ้น

6) วัสดุตกแต่ง ผลิตภัณฑ์มีการใช้เครื่องหนังมาเป็นวัสดุตกแต่ง เพราะเครื่องหนังมีความแข็งแรง

ทนทานมากกว่า ดังนั้นจึงได้นำเครื่องหนังมาเป็นวัสดุตกแต่งในการทำหุ้ม สายสะพาย เป็นต้น

7) การใช้งาน ผลิตภัณฑ์กระเป๋าคู่ทั้ง 3 รูปแบบ มีการออกแบบที่แตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน ทั้งนี้ในการออกแบบทั้ง 3 รูปแบบจะเน้นการใช้งานที่สามารถสะพายข้างได้อย่างสะดวก

8) ขนาด ผลิตภัณฑ์มีความกว้าง 30 ซม. ความหนา 15 ซม. และความสูง 30 ซม. เพราะเป็นขนาดที่เหมาะสม และสะดวกต่อการพกพา อีกทั้งยังสามารถจัดเก็บและการเคลื่อนย้ายได้ง่าย

9) การแสดงถึงเอกลักษณ์ การเลือกใช้วัสดุที่เป็นวัสดุในท้องถิ่นภาคใต้แถบกลุ่มน้ำทะเลสาบมาเป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิต เพื่อสื่อถึงเอกลักษณ์ความเป็นท้องถิ่นมากยิ่งขึ้น

10) โทนสี ตัวผลิตภัณฑ์ได้เลือกใช้โทนสีธรรมชาติ สีน้ำตาลอ่อนๆ ตามสีของกระจูดแห้ง โดยไม่มีการตกแต่งสีอื่นๆ เพราะต้องการสื่อถึงผลิตภัณฑ์ที่มาจากกระจูดมากที่สุด

11) อายุการใช้งาน ผลิตภัณฑ์กระเป๋าคู่ประเภทกระเป๋าคู่ทั้ง 3 รูปแบบ มีอายุการใช้งานมากกว่า 3 ปี

จากข้อกำหนดเชิงเทคนิคข้างต้น ทีมออกแบบได้นำข้อกำหนดไปทำการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าคู่ประเภทกระเป๋าคู่ทั้ง 3 รูปแบบ แต่ในการออกแบบครั้งนี้จะมีการออกแบบที่แตกต่างกันที่รูปแบบของผลิตภัณฑ์ ดังนี้

1) ผลิตภัณฑ์กระเป๋าคู่ประเภทกระเป๋าคู่เนกประสงค์ ได้มีการออกแบบรูปแบบของกระเป๋าคู่ที่มีอยู่ในท้องถิ่นมาดัดแปลงให้มีรูปแบบใหม่ที่เน้นการใช้งานเป็นหลัก แสดงดังภาพที่ 6 (ก) แบบงานผลิตภัณฑ์กระเป๋าคู่ประเภทกระเป๋าคู่เนกประสงค์ และ (ข) เป็นผลิตภัณฑ์กระเป๋าคู่ประเภทกระเป๋าคู่เนกประสงค์ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว



ภาพที่ 6 ผลิตรถภัณฑ์กระจุจจากการออกแบบและขึ้นรูปประเภทกระเป๋าอเนกประสงค์

2) ผลิตรถภัณฑ์กระจุจประเภทกระเป๋าสะพาย
หลังผู้ชาย ได้มีการออกแบบรูปแบบของกระเป๋าที่มี
อยู่ในท้องถิ่นมาดัดแปลงให้มีรูปแบบ Vintage Style
แสดงดังภาพที่ 7 (ก) แบบงานผลิตรถภัณฑ์กระจุจ

ประเภทกระเป๋าสะพายหลังผู้ชาย และ (ข) เป็น
ผลิตรถภัณฑ์กระจุจประเภทกระเป๋าสะพายหลังผู้ชายที่
ผ่านการขึ้นรูปแล้ว



ภาพที่ 7 ผลิตรถภัณฑ์กระจุจจากการออกแบบและขึ้นรูปประเภทกระเป๋าสะพายหลังผู้ชาย

3) ผลิตรถภัณฑ์กระจุจประเภทกระเป๋าสะพาย
หลังผู้หญิง ได้มีการออกแบบรูปแบบของกระเป๋าที่มี
อยู่ในท้องถิ่นมาดัดแปลงให้มีรูปแบบกระเป๋าสะพาย
หลังผู้หญิง แสดงดังภาพที่ 8 (ก) แบบงานผลิตรถภัณฑ์

กระจุจประเภทกระเป๋าสะพายหลังผู้หญิง และ (ข)
เป็นผลิตรถภัณฑ์กระจุจประเภทกระเป๋าสะพายหลัง
ผู้หญิงที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว

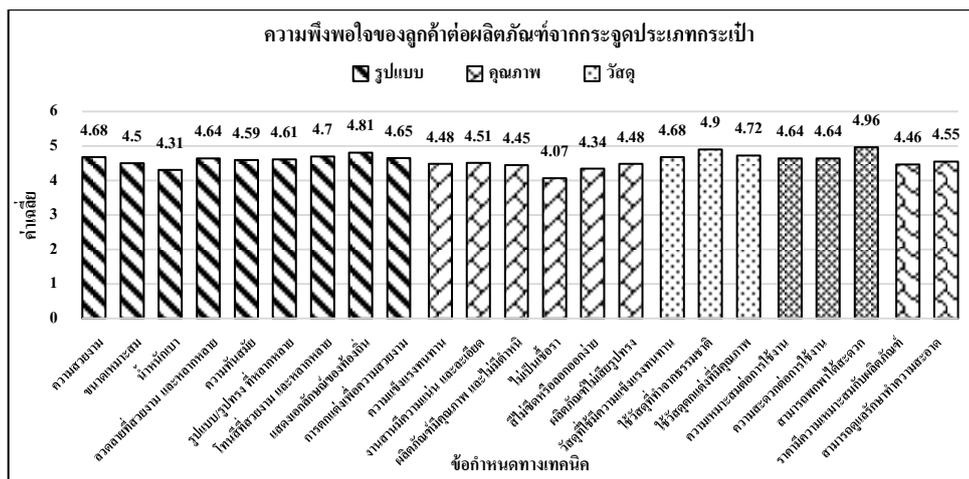


ภาพที่ 8 ผลิตภัณฑ์กระจุจจากการออกแบบและขึ้นรูปประเภทกระเป๋าสะพายหลังผู้หญิง

4. ผลการประเมินความพึงพอใจ

จากการประเมินความพึงพอใจของกลุ่มผู้ผลิต ลูกค้ากลุ่มนักท่องเที่ยว และผู้ใช้ผลิตภัณฑ์จากกระจุจในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช พัทลุง และจังหวัดใกล้เคียง พบว่าคุณลักษณะความต้องการของด้านรูปแบบ ประกอบด้วย ความสวยงาม ขนาดเหมาะสม น้ำหนักเบา ลวดลายที่สวยงามและหลากหลาย ความทันสมัย รูปแบบ/รูปทรงที่หลากหลาย โทนสีที่สวยงามและหลากหลาย แสดงเอกลักษณ์ของท้องถิ่น และการตกแต่งเพื่อความสวยงาม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.61 มีความพึงพอใจในระดับดีมาก คุณลักษณะความต้องการของด้านคุณภาพ ประกอบด้วย ความแข็งแรงทนทาน งานสานมีความแน่นและละเอียด ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและไม่มีตำหนิไม่เป็นเชื้อรา สีไม่ซีดหรือลอกง่าย และผลิตภัณฑ์ไม่เสียรูปทรง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.39 และมีความพึงพอใจในระดับดี คุณลักษณะความต้องการของด้าน

วัสดุ ประกอบด้วย วัสดุที่ใช้มีความแข็งแรงทนทาน ใช้วัสดุที่ทำจากธรรมชาติ และใช้วัสดุตกแต่งที่มีคุณภาพ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.77 และมีความพึงพอใจในระดับดีมาก คุณลักษณะความต้องการของด้านการใช้งาน ประกอบด้วย ความเหมาะสมต่อการใช้งาน ความสะดวกต่อการใช้งาน และสามารถพกพาได้สะดวก ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.75 มีความพึงพอใจในระดับดีมาก และคุณลักษณะความต้องการของด้านอื่นๆ ประกอบด้วย ราคาที่เหมาะสม และสามารถดูแลรักษาทำความสะอาด ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51 มีความพึงพอใจในระดับดีมาก แสดงดังภาพที่ 9 ซึ่งผลการประเมินความพึงพอใจมีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Sinthavalai and Ruengrong (2018) กล่าวคือ การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์พบว่าประเด็นคุณลักษณะความต้องการของด้านวัสดุจะมีผลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้เป็นอันดับแรก



ภาพที่ 9 ความพึงพอใจของลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์จากกระจุประเภทกระเป๋าแบบใหม่

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment; QFD) ในการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กระจุประเภทกระเป๋า เพื่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แบบใหม่ๆ และเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น อีกทั้งเพื่อสร้างความพึงพอใจของลูกค้าและการตอบสนองความต้องการของลูกค้ามากยิ่งขึ้น โดยจากการสำรวจความต้องการของลูกค้า กลุ่มเป้าหมายเป็นลูกค้าผลิตภัณฑ์กระจุทั่วไป และผู้จำหน่ายผลิตภัณฑ์กระจุทั่วไป ทำให้ทราบถึงความต้องการที่แท้จริงของผู้บริโภค และข้อกำหนดทางเทคนิคที่สัมพันธ์กับความต้องการ หลังจากนั้นนำความต้องการเหล่านั้นมาจัดเรียงถ้อยคำใหม่ และจัดกลุ่มคุณลักษณะของความต้องการที่มีความหมายซ้ำซ้อนเข้าด้วยกันแล้วนำความต้องการมาจัดทำเป็นแบบสอบถาม เพื่อให้ลูกค้าได้ทำการประเมินความสำคัญของความต้องการ ซึ่งเป็นคะแนนความสำคัญที่ได้จากการประเมิน จากนั้นนำความต้องการของลูกค้า เข้าสู่เมทริกซ์เฟสแรกของเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ หรือบ้านคุณภาพ เพื่อกำหนดคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ จากนั้นจึงนำคุณลักษณะเหล่านั้นมาทำการออกแบบผลิตภัณฑ์กระจุประเภทกระเป๋า

รูปแบบใหม่ จำนวน 3 แบบ ได้แก่ กระเป๋าสองช่อง กระเป๋าสายคล้อง และกระเป๋าสะพายผู้หญิง ดังนั้นผลการดำเนินงานวิจัย ผลิตภัณฑ์กระจุประเภทของใช้ที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้า มีค่าความพึงพอใจในคุณลักษณะต่างๆ ของผลิตภัณฑ์กระจุประเภทของใช้รูปแบบใหม่ในทุกคุณลักษณะ พบว่าความต้องการของลูกค้าด้านรูปแบบอยู่ในระดับดีมาก โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.61 ความต้องการของลูกค้าด้านคุณภาพอยู่ในระดับดี โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.39 ความต้องการของลูกค้าด้านวัสดุอยู่ในระดับดีมาก โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.77 ความต้องการของลูกค้าด้านการใช้งานอยู่ในระดับดีมาก โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.75 และความต้องการของลูกค้าด้านอื่นๆ อยู่ในระดับดีมาก โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51

ทั้งนี้ยังมีข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้ กล่าวคือผลการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นๆ ได้ โดยการประยุกต์เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ ควรมีการประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากยุคสมัยความต้องการของลูกค้าที่เปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้มีการนำเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพกลับมาใช้ปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่าง

สม่ำเสมอ เพื่อสร้างความมั่นใจว่าผลิตภัณฑ์สามารถตอบสนองต่อความต้องการลูกค้าได้อย่างต่อเนื่อง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณประจำปี 2562 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และขอขอบคุณกลุ่มผู้ผลิตกระจุจกณีสึกษา อำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่อำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Akao, Y. 1990. **Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design**. Productivity Press, Cambridge, MA.
- Chan, L.K. and Wu, M.L. 2002. Quality function deployment: a comprehensive review of its concepts and methods. **Journal Quality Engineering** 15(1): 23-35.
- Cohen, L. 1995. **Quality Function Deployment: How to make QFD work for you**. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Fan, S., Xiong, J., Xu, T., Chen, S. and Zhang, W. 2017. QFD design of machine - made sand based on independent/decomposition axiom. **Procedia Engineering** 174: 442-448.
- Homkhiew, C., Ratanawilai, T. and Pochana, K. 2012. Application of a quality function deployment technique to design and develop furniture products. **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 34(6): 663-668.
- Joompha, W. and Pianthong, N. 2018. Development of durian chips product by apply of quality function deployment. **Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University** 20(3): 204-218. (in Thai)
- Kengpol, A. 2004. **Concurrent Engineering**. Publishing Center of King Mongkut Institute of Technology North Bangkok, Bangkok. (in Thai)
- Meemongkol, N., Junsong, P. and Santiamorntut, W. 2012. Application of quality function deployment technique for searching of device characteristic and design of health care monitoring device. **KKU Research Journal** 17(4): 515-527. (in Thai)
- Muangmeesri, B., Vanpetch, W., Phongphit, S. and Ekpetch, C. 2009. Design procedure development in bulrush reed product development by the community management: a case study of Tumbol Thasatorn, Amphur Phun-Phin, Surat Thani Province. **NIDA Development Journal** 49(3): 21-38. (in Thai)
- Pirom, T., Rawangwong, S., Thongkamkaew, A. and Hutye, C. 2019. Design and developed product the kindergarten classroom furniture with rubber wood using quality function development. **The Journal of Industrial Technology** 15(3): 76-92. (in Thai)
- Rawangwong, S., Homkhiew, C., Boonchouytan, W., Chattong, J. and Tehyo, M. 2019. Application of Quality Function Deployment in development of products pottery: a case study of pottery community enterprise in Nakhon Si Thammarat

- Province. **Prince of Naradhiwas University Journal** 12(1): 106-119. (in Thai)
- Sinthavalai, R. and Ruengrong, S. 2018. An application of House of Quality (HOQ) for designing rice product as a souvenir. **Naresuan University Journal: Science and Technology** 26(3): 36-51. (in Thai)
- Sinthavalai, R., Boonchu, P. and Polmai, S. 2016. An application of House of Quality (HOQ) in improving a package of medical equipment. **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok** 26(3): 437-450. (in Thai)
- Somthong, K. and Pianthong, N. 2016. Development of Chinese sausage product using quality function deployment. **Thai Industrial Engineering Network Journal** 2(1): 19-26. (in Thai)
- Sritong, C. and Sritong, O. 2016. Product development using Quality Function Deployment (QFD) in furniture industry: a case study of office chair design. **Valaya Alongkorn Review (Humanities and Social Science)** 6(2): 111-124. (in Thai)
- Suksikarn, R. 2011. Krachud basketry product in Nakhon Si Thammarat. **Journal of Fine and Applied Arts Khon Kaen University** 3(2): 69-92. (in Thai)
- Taposh Kumar, K., Mustafizur, R., Muhammad AdibUz, Z. and Moin Uddin, G. 2018. Ergonomic design of table and chair based on QFD and anthropometric measurement and improved facility layout. **Ergonomics International Journal** 2(3): 1-14.

ผลของสีสกัดจากหมากผสมพลู และปูนแดงกับการย้อมผ้าเรยอน

The Effect of Extracted Color from Mixed Betel Nut, Piper Betel and Red Lime for Dyeing Rayon Fabric

ธัญวลัย จิรันดร* และ อติศักดิ์ จิตภูษา

Tanwalai Chirandom* and Adisak Jitphusa

Received: 8 September 2020, Revised: 9 June 2021, Accepted: 19 July 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย้อมผ้าเรยอนด้วยน้ำสีสกัดจากหมาก พลู และปูนแดง ทำการศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของหมาก พลู และปูนแดง ได้แก่ 4 : 3 : 1, 8 : 6 : 1 และ 10 : 8 : 1 โดยใช้ อัตราส่วนระหว่างของผสมและน้ำ 1 : 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และใช้ร่วมกับสารฟีนิกสี 3 ชนิด ความเข้มข้น ต่างกัน คือ (1) เกลือแกง (NaCl) เข้มข้นร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (2) สารส้ม (AlK(SO₄)₂) เข้มข้นร้อยละ 0.3 1.6 และ 3.3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ (3) เกลือแกงและสารส้ม (NaCl : AlK(SO₄)₂) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 11 : 1 5 : 1 และ 1 : 1 โดยจะใช้ความเข้มข้นของผสมนี้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อ ปริมาตรของน้ำสี และยังศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการต้มย้อมที่ 20 40 และ 60 นาที เพื่อนำไปทดสอบความ คงทนของสีต่อแสงแดด พบว่า น้ำสีที่สกัดมีค่า pH ที่ 9.98 - 12.12 และเมื่อทำการต้มย้อมที่อุณหภูมิ 70°C จะได้ผ้า สีน้ำตาลเหลือง ที่อัตราส่วน 10 : 8 : 1 ให้ค่าความเป็นสีแดง (a*) และสีเหลือง (b*) สูงสุด คือ 9.53 และ 18.65 ตามลำดับ และเมื่อใช้ร่วมกับเกลือแกงและสารส้ม (NaCl : AlK(SO₄)₂) ในอัตราส่วน 5 : 1 ให้ค่า L* ต่ำสุด และให้ ค่า a* และ ค่า b* สูงสุด เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่า ΔE* และ C* พบว่าให้ค่าสูงสุดเช่นกัน และระยะเวลาที่เหมาะสมใน การต้มย้อม คือ 20 นาที เมื่อนำไปศึกษาความคงทนของสีต่อแสงแดดเมื่อเวลาผ่านไป 20 วัน พบว่า ค่าความคงทน ของแสงอยู่ในระดับปานกลาง

คำสำคัญ: ความคงทนของสี, สีสกัด, ผ้าเรยอน, หมาก, พลู, ปูนแดง, สารฟีนิกสี

ABSTRACT

This research aims to investigate factors affecting rayon fabric dyeing using betel nut extract mixed with piper betel and red lime. The ratios of betel nut, piper betel and red lime were tested at 4:3:1, 8:6:1 and 10:8:1. The ratio of mixtures to water was at 1:5 wt./vol. The color water at optimum condition was applied with 3 fixing agents at different concentrations. They were (1) NaCl 10%, 20% and 30% wt./vol, (2) $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$ 0.3%, 1.6% and 3.3% wt/vol, and, (3) a mixture of NaCl and $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$ at 11:1, 5:1 and 1:1 with concentration of 10 wt./vol. The dyeing time was studied at 20, 40 and 60 minutes. The results found that color extracts were at pH 9.98 - 12.12. At 70°C for dyeing and all dyed rayon fabrics gave the same shade of color (a yellowish-brown). At ratio of 10:8:1, the highest a* (redness) and b* (yellowness) values were obtained at 9.53 and 18.65, respectively. For the color of the rayon fabric after dyeing with NaCl and $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$ of 5:1, the lowest L* with highest a* and b* values was observed. The ΔE^* and C* values were also the highest. The optimum dyeing time with color from optimum condition was 20 minutes. Additionally, the color strength in sunlight after 20 days was at moderate level.

Key words: color fastness, extracted color, rayon fabric, betel nut, piper betel, red lime, fixing agent

บทนำ

ปัจจุบันการย้อมผ้าด้วยสีย้อมจากธรรมชาติ (natural dyes) กลับมาเป็นที่นิยมกันมาก เนื่องจากสีสกัดจากธรรมชาติที่นำมาย้อมผ้ามักจะละลายน้ำ ไม่มีอันตรายทั้งกับผู้ย้อม ผู้สวมใส่ และสิ่งแวดล้อม ต่างจากสีสังเคราะห์ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซ (azo) ซึ่งเป็นอันตรายทำให้เกิดการแพ้ (allergy) และเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogens) (Watters and Cantero, 1965) นอกจากนี้จะมีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ และสัตว์แล้ว ยังมีต้นทุนในการสังเคราะห์ที่ค่อนข้างสูง เนื่องมาจากเป็นผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมี (Guesmi et al., 2013) การย้อมผ้าด้วยสีที่มาจากธรรมชาติเป็นภูมิปัญญาที่สืบทอดกันมาตั้งแต่บรรพบุรุษ ซึ่งสีสกัดที่ได้จากธรรมชาติส่วนใหญ่ได้มาจากเนื้อไม้ เปลือกไม้ ใบ ราก และผลของพืช เช่น สีเขียวทองอ่อนได้จากเปลือกต้นมะพูด เปลือกผลทับทิม แก่นแลกรวมกับต้นคราม ใบหูกวาง และผลสมอ สีแดงได้จาก

รากขอ แก่นฟาง ลูกคำแสด เปลือกสมอ สีครามได้มาจากต้นครามหรือต้นฮ่อม สีเหลืองได้จากแก่นแหหรือแก่นแกแล แก่นขนุน แก่นของสุพรรณิการ์ ยางของต้นชงทอง สีดำได้จากผลมะเดื่อ เป็นต้น นอกจากนี้สีย้อมธรรมชาติมีบ้างที่สามารถสกัดได้จากสัตว์ เช่น ครั่ง (*Tachardia lacca* Kerr.) ซึ่งเป็นสีในกลุ่มที่ให้สีแดง การย้อมผ้าแต่ละผืนด้วยสีที่สกัดมาจากส่วนเดียวกันของพืชและสัตว์จะให้เฉดสีไม่เหมือนกัน ซึ่งจะทำให้ผ้าแต่ละผืนมีเอกลักษณ์เป็นของตัวเอง และการย้อมแต่ละครั้งจะได้สีที่ไม่สม่ำเสมอ ไม่ชัดเจน สีอ่อน เย็นตา ซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งถือว่าเป็นเสน่ห์อย่างหนึ่งของผ้าที่ย้อมด้วยสีธรรมชาติ แต่สีย้อมธรรมชาติจะมีข้อจำกัดเรื่องการติดและความคงทนของสีบนผ้า ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาการใช้สารผนึกสีหรือสารช่วยติด (mordant) เพื่อให้สีถูกดูดซับและยึดเกาะกับเส้นใยเพิ่มมากขึ้น นอกจากจะช่วยเพิ่มการคงทนของสีแล้ว

ยังช่วยการเปลี่ยนเจดสีด้วย (Sukonthamane, 2017) และยังพบว่า ชนิดของสารฟีนิกสีมีผลต่อความคงทนของสีที่มีต่อแสง ต่อการซัก และการฟอกขาว (Sakulborisut *et al.*, 2016) ซึ่งสารฟีนิกสีมีทั้งสารเคมีและสารจากธรรมชาติ โดยผู้วิจัยเลือกใช้เกลือแกง (NaCl) และสารส้ม ($AlK(SO_4)_2$) ซึ่งหาได้ง่ายเข้ามาช่วย ปัจจุบันนอกจากจะใช้สีธรรมชาติในการย้อมผ้าใยธรรมชาติแล้ว ยังมีการใช้ในการย้อมผ้าใยสังเคราะห์ เช่น การใช้ขมิ้นชันผงมาย้อมผ้าพอลิเอสเตอร์ (Aonfak *et al.*, 2016) ด้วย และผ้ากึ่งสังเคราะห์อีกหนึ่งชนิดที่น่าสนใจ คือ ผ้าเรยอน (rayon) หรือผ้าไหมเทียม (artificial silk) เนื่องจากโครงสร้างทางเคมียังมีความเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์แต่นำมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นเส้นใย (regenerated cellulose) มีความสบายในการสวมใส่และยังสามารถรับสีย้อมได้ทั้งสีสังเคราะห์และสีธรรมชาติ

การกินหมากเป็นวัฒนธรรมของคนไทยมาตั้งแต่โบราณ เริ่มจากตักปูนจากเต้าปูนป้ายไปบนใบพลู ตามด้วยหมากขึ้น จากนั้นมวนใบพลูเป็นรูปกรวยเล็กๆ นำใส่ปากเคี้ยวไปเรื่อยๆ จนหมากจืด หมครสฝาดจึงคายหมากทิ้งแล้วมวนใหม่ ซึ่งเมื่อน้ำหมากเป็นเนื้อสีจะติดแน่นชักออกยาก จึงทำให้ผู้วิจัยมีแนวความคิดที่จะนำน้ำหมากมาย้อมผ้า โดยศึกษาการย้อมผ้าเรยอนตามระยะเวลาต่างๆ ด้วยน้ำสีที่สกัดมาจากหมาก พลู และปูนแดง โดยเติมเกลือแกง (NaCl) และสารส้ม ($AlK(SO_4)_2$) ความเข้มข้นต่างๆ และทดสอบความคงทนของสีต่อแสงแดด

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมผ้า

ผ้าเรยอนซื้อมาจากตลาดอำเภอเมือง จังหวัดสงขลา ทำการเตรียมผ้าก่อนการทดลอง โดยการนำผ้ามาขยี้ด้วยสบู่ออกผ้าเบาๆ และแช่ทิ้งไว้ 18 ชั่วโมง

จากนั้นนำมาล้างสบู่ออกด้วยน้ำสะอาด เพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ติดมากับผ้า ช่วยทำให้ผ้านี้มลงทำให้ติดสีได้ง่ายขึ้น และตากให้แห้งในที่ร่ม จากนั้นตัดผ้าให้มีขนาด 6×6 นิ้ว ก่อนการทดลองวัดขนาดของผ้า ชั่งน้ำหนัก และวัดค่าสีของผ้าทุกชิ้น

2. การเตรียมน้ำสีสำหรับการย้อม

ผลหมากอ่อนซื้อมาจากอำเภอลานสกา จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยจะคัดเลือกผลหมากอ่อน โดยพิจารณาจากสีเปลือกภายนอกยังคงเป็นสีเขียว สีเปลือกใต้บริเวณรอบๆ ขั้ว ยังมีสีเขียวอ่อน และเมื่อผ่าผลหมาก จะเห็นว่าเปลือกชั้นในจะมีลักษณะเป็นเส้นใยเป็นสีขาว มีความชื้น เมล็ดด้านในเนื้อนิ่ม สีน้ำตาลอ่อน และมีเส้นสีขาววาวใสแทรกอยู่ในเนื้อหมาก เมื่อใช้เล็บกดลงบนเนื้อหมาก พบว่าสามารถกดลงจนเป็นรอยได้ ปอกเปลือกออกให้เหลือเฉพาะเมล็ด ล้างและล้างลมให้แห้ง ส่วนใบพลูนำมาล้างด้วยน้ำสะอาดและล้างลมให้แห้งเช่นเดียวกัน แล้วจึงนำหมาก พลู และปูนแดง ตามอัตราส่วนที่กำหนด ($4 : 3 : 1$, $8 : 6 : 1$ และ $10 : 8 : 1$ โดยน้ำหนัก) ตำจนได้ความละเอียดระดับเดียวกับเครื่องแกงจากนั้นนำส่วนผสมที่ได้มาผสมกับน้ำสะอาดในอัตราส่วน $1 : 5$ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และแช่ทิ้งไว้ 1 คืน แล้วจึงกรองเพื่อแยกกากด้วยผ้าขาวบาง นำน้ำสีที่สกัดได้วัดค่าความเป็นกรด - เบส และนำไปใช้ย้อมผ้าต่อไป

3. การต้มย้อมและทดสอบผ้า

ขั้นตอนการต้มย้อม โดยนำน้ำสีที่สกัดได้ในแต่ละอัตราส่วน ต้มย้อมกับผ้าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำสะอาดและล้างให้แห้งในที่ร่ม ซึ่งการทดลองนี้จะทำการต้มย้อมอัตราส่วนละ 4 ผืน เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของหมาก พลู และปูนแดง

จากนั้นนำน้ำสีที่สกัดได้จากอัตราส่วนที่เหมาะสมต้มย้อมร่วมกับสารฟีนิกสีที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ซึ่งสารฟีนิกสีที่ใช้ ได้แก่ เกลือแกง (NaCl) เข้มข้นร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำสี สารส้ม (AlK(SO₄)₂) เข้มข้นร้อยละ 0.3 1.6 และ 3.3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำสี และของผสมระหว่างเกลือแกงและสารส้ม (NaCl : AlK(SO₄)₂) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็น 11 : 1 5 : 1 และ 1 : 1 โดยจะใช้ของผสมนี้เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำสี เมื่อครบกำหนดเวลาในการต้มย้อม ทิ้งไว้อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาดและผึ่งให้แห้งในที่ร่ม

ศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการต้มย้อมของน้ำสีที่สกัดได้ร่วมกับชนิดและความเข้มข้นของสารฟีนิกสี โดยจะใช้เวลาที่ใช้ในการต้มย้อมเป็น 20 40 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และนำผ้าที่ผ่านการต้มย้อมด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสม ตากแดดในช่วงเวลา 11.00 - 12.00 น. ทุกวัน เป็นระยะเวลา 3 ช่วง คือ 1 วัน 10 วัน และ 20 วัน เพื่อศึกษาความ

คงทนของสีต่อแสงแดด ประเมินจากค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE^*)

ทุกขั้นตอนการทดลองทำการบันทึกขนาดน้ำหนัก และค่าสีของผ้าก่อนและหลังการต้มย้อมโดยวัดสีด้วยเครื่อง color reader รุ่น CR-10 ยี่ห้อ Konica Minolta โดยใช้ระบบ Commission Internationale de l'Eclairage (CIE Lab scale) โดยระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือ L* a* b* เป็นระบบการบรรยายสีแบบสามมิติ โดยที่แกน L* บรรยายความสว่าง (lightness) มีค่าตั้งแต่ 0-100 โดย 0 คือ สีดำ และ 100 คือ สีขาว แกน a* บรรยายแกนสีจากสีเขียว (-a*) จนถึงสีแดง (+a*) และแกน b* บรรยายแกนสีจากสีน้ำเงิน (-b*) จนถึงสีเหลือง (+b*)

การหาความแตกต่างของสีจะพิจารณาจากระยะห่างของพิกัดสีนั้นๆ เช่น จุดที่ 1 วัดค่าสีได้ L₁* a₁* b₁* จุดที่ 2 วัดค่าสีได้ L₂* a₂* b₂* จะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมหรือค่า ΔE^* ระหว่างจุดที่ 1 และ 2 ตามสมการที่ (1) (Park, 1993; Jitphusa and Rattanankij, 2016)

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

และค่าความอิ่มตัวหรือความบริสุทธิ์ของสี (chroma, C*) จากสมการที่ (2)

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2)$$

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแตกต่าง (analysis of variance) เปรียบเทียบความแตกต่างโดยวิธี Duncan's multiple rang test (Jitphusa and Rattanankij, 2016)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลของอัตราส่วนของน้ำสีจากสารสกัดน้ำหมาก

เมื่อวัดค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ของน้ำสีที่สกัดได้จากหมาก พลู และปูนแดง ทั้ง 3 อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ได้แก่ 4 : 3 : 1 8 : 6 : 1 และ 10 : 8 : 1 พบว่า

ทุกอัตราส่วนน้ำสีที่สกัดได้ให้ค่าความเป็นเบส มีค่า pH อยู่ในช่วง 9.98 - 12.12 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-เบส ของน้ำสีที่สกัดได้ในแต่ละอัตราส่วน

อัตราส่วนหมาก : พลู : ปูนแดง	ค่า pH
4 : 3 : 1	12.12
8 : 6 : 1	11.60
10 : 8 : 1	9.98

และเมื่อพิจารณาค่าสีของผ้าหลังการต้มย้อมด้วยน้ำสีที่สกัดจากอัตราส่วนทั้ง 3 อัตราส่วน พบว่าค่าความสว่าง (L*) มีค่าอยู่ระหว่าง 62.54 - 70.81 ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 7.96 - 9.53 และ 17.41 - 18.65 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 และเนื่องจากสีของผ้าย้อมที่ได้มีเจดสีน้ำตาลเหลืองทุกอัตราส่วน ทำให้

ผู้วิจัยจึงเลือกพิจารณาอัตราส่วนที่ให้ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) สูงสุด เพื่อสอดคล้องกับสีของผ้าหลังย้อม และเมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่า C* พบว่าอัตราส่วน 10 : 8 : 1 ให้ค่าความเป็นสีแดง (a*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) และ C* สูงสุด ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้อัตราส่วนดังกล่าวนำมาศึกษาหาชนิดและความเข้มข้นสารฟีนิกสีที่เหมาะสม

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยค่าสีของผ้าเรยอนหลังการต้มย้อมด้วยของผสมระหว่างหมาก พลู และปูนแดง

ค่าเฉลี่ยต่าง ๆ ของผ้า	อัตราส่วนระหว่าง หมาก : พลู : ปูนแดง			
	ก่อนย้อม	4 : 3 : 1	8 : 6 : 1	10 : 8 : 1
น้ำหนักผ้า ^{ns} (กรัม)	2.323 ± 0.049	2.290 ± 0.042	2.253 ± 0.043	2.273 ± 0.047
ความกว้างของผ้า (ซม.)	15.437 ^a ± 0.147	14.877 ^b ± 0.131	14.870 ^b ± 0.191	14.997 ^b ± 0.113
ความยาวของผ้า (ซม.)	15.306 ^a ± 0.126	14.840 ^c ± 0.181	15.146 ^{ab} ± 0.125	14.982 ^{bc} ± 0.131
L*	91.46 ^a ± 0.35	70.81 ^b ± 0.44	62.54 ^d ± 0.41	68.43 ^c ± 0.42
a*	-3.50 ^c ± 0.31	7.96 ^b ± 0.38	9.19 ^a ± 0.35	9.53 ^a ± 0.34
b*	0.40 ^d ± 0.14	17.97 ^b ± 0.15	17.41 ^c ± 0.15	18.65 ^a ± 0.17
ΔE*	-	29.72 ^c ± 0.63	36.37 ^a ± 0.72	32.49 ^b ± 0.73
C*	-	19.66 ^b ± 0.88	19.69 ^b ± 0.84	20.95 ^a ± 0.81

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างในแถวเดียวกันแสดงถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)
ns แสดงถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

2. ผลของสารฟีนิกสีชนิดต่างๆ

การใช้น้ำสีสกัดจากหมาก พลู และปูนแดง ในอัตราส่วน 10 : 8 : 1 ร่วมกับสารฟีนิกสี ได้แก่ เกลือแกง (NaCl) สารส้ม (AlK(SO₄)₂) และของผสม

ระหว่างเกลือแกงและสารส้ม (NaCl : AlK(SO₄)₂) ที่ความเข้มข้นต่างๆ ผลที่ได้เป็น ดังนี้

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยต่างๆ ของผ้าหลังย้อมเมื่อใช้เกลือแกง (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10

20 และ 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำสี พบว่าทุกความเข้มข้นของเกลือแกง (NaCl) ไม่ทำให้น้ำหนักหลังการต้มย้อมเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม แต่ขนาดของผ้าแตกต่างกันเล็กน้อยเท่านั้น ค่าความสว่าง (L*) ลดลงอยู่ในช่วง 69.45 - 72.70 ค่าความเป็นสีแดง (a*) มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 7.68 - 8.62 และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) มีค่าอยู่ในช่วง 17.55 - 18.02 ซึ่งทุกค่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่งผลทำให้ค่า ΔE^* และ ค่า C* ของทุกความเข้มข้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ด้วยเช่นกัน

ในขณะที่การใช้สารส้ม ($AlK(SO_4)_2$) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 1.6 และ 3.3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำสี พบว่า น้ำหนักผ้าก่อนและหลังการต้มย้อมไม่มีการเปลี่ยนแปลง และขนาดของผ้าหลังการต้มย้อมไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำสี พบว่าความสว่าง (L*) ลดลงมากที่สุด ค่าความเป็นสีแดง (a*) มีค่าสูงสุด และทุกความเข้มข้นให้ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ค่า ΔE^* และ C* ที่ได้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยของผ้าเรยอนที่ใช้เกลือแกง (NaCl) เป็นสารฟอกสีชนิดที่ความเข้มข้นต่างๆ

ค่าเฉลี่ยต่างๆ ของผ้า	ความเข้มข้นของเกลือแกง (NaCl)			
	ก่อนย้อม	10% w/v	20% w/v	30% w/v
น้ำหนักผ้า ^{ns} (กรัม)	2.338 ± 0.070	2.280 ± 0.077	2.303 ± 0.070	2.275 ± 0.078
ความกว้างของผ้า (ซม.)	15.320 ^a ± 0.137	15.190 ^{ab} ± 0.107	14.859 ^{bc} ± 0.126	14.639 ^c ± 0.177
ความยาวของผ้า (ซม.)	15.453 ^a ± 0.118	14.632 ^c ± 0.193	15.016 ^b ± 0.179	15.085 ^b ± 0.145
L*	91.86 ^a ± 0.55	69.58 ^b ± 0.51	72.70 ^b ± 0.54	69.45 ^b ± 0.52
a*	-3.42 ^b ± 0.33	8.38 ^a ± 0.32	7.68 ^a ± 0.34	8.62 ^a ± 0.41
b*	0.50 ^b ± 0.13	18.02 ^a ± 0.17	17.55 ^a ± 0.18	18.02 ^a ± 0.13
ΔE^{*ns}	-	30.36 ± 0.80	28.02 ± 0.76	31.31 ± 0.82
C ^{ns}	-	19.91 ± 0.22	19.16 ± 0.27	20.00 ± 0.20

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างในแถวเดียวกันแสดงถึง ค่าที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ns แสดงถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยของผ้าเรยอนที่ใช้สารส้ม ($AlK(SO_4)_2$) เป็นสารฟอกสีที่ความเข้มข้นต่างๆ

ค่าเฉลี่ยต่างๆ ของผ้า	ความเข้มข้นของสารส้ม ($AlK(SO_4)_2$)			
	ก่อนย้อม	0.3% w/v	1.6% w/v	3.3% w/v
น้ำหนักผ้า ^{ns} (กรัม)	2.351 ± 0.049	2.245 ± 0.059	2.350 ± 0.036	2.315 ± 0.080
ความกว้างของผ้า (ซม.)	15.414 ^a ± 0.173	14.937 ^b ± 0.263	14.898 ^b ± 0.167	14.916 ^b ± 0.194
ความยาวของผ้า (ซม.) ^{ns}	15.302 ± 0.127	15.148 ± 0.121	14.999 ± 0.137	15.017 ± 0.116
L*	92.03 ^a ± 0.50	72.95 ^b ± 0.53	68.48 ^c ± 0.59	71.02 ^b ± 0.57

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ค่าเฉลี่ยต่างๆ ของผ้า	ความเข้มข้นของสารส้ม (AlK(SO ₄) ₂)			
	ก่อนย้อม	0.3% w/v	1.6% w/v	3.3% w/v
a*	-3.63 ^c ± 0.26	6.70 ^b ± 0.36	8.32 ^a ± 0.34	6.95 ^b ± 0.30
b*	0.46 ^c ± 0.19	18.10 ^{ab} ± 0.23	17.62 ^b ± 0.24	18.60 ^a ± 0.22
ΔE* ^{ns}	-	28.51 ± 0.72	31.40 ± 0.70	29.77 ± 0.74
C* ^{ns}	-	19.78 ± 0.23	19.51 ± 0.28	19.98 ± 0.21

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างในแถวเดียวกันแสดงถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)
ns แสดงถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

เมื่อใช้ของผสมระหว่างเกลือแกงและสารส้ม (NaCl : AlK(SO₄)₂) ในอัตราส่วน 11 : 1 5 : 1 และ 1 : 1 โดยจะใช้ความเข้มข้นของผสมนี้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำสี พบว่า ของผสมในอัตราส่วน 5 : 1 ให้ค่าความสว่าง (L*) ต่ำสุด ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) สูงสุด และยังทำให้ค่า ΔE* มีค่าสูงที่สุดด้วย ดังแสดงในตารางที่ 5 และเมื่อพิจารณาสารพิกเมนต์ทั้ง 3 ชนิด

พบว่า การใช้ของผสมระหว่างเกลือแกงและสารส้ม (NaCl : AlK(SO₄)₂) ในอัตราส่วน 5 : 1 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำสี จะให้ค่าความสว่าง (L*) ต่ำที่สุด ค่าความเป็นสีแดง (a*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมหรือค่า ΔE* และค่าความอึดตัวของสี (C*) สูงที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกเป็นตัวแทนของสารพิกเมนต์ที่ใช้เพื่อนำไปทดสอบค่าระยะเวลาในการต้มย้อม

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยของผ้าเรยอนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเกลือแกงและสารส้ม (NaCl : AlK(SO₄)₂) เป็นสารพิกเมนต์ชนิดที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำสี

ค่าเฉลี่ยต่างๆ ของผ้า	อัตราส่วนระหว่างเกลือแกงและสารส้ม (NaCl : AlK(SO ₄) ₂) ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำสี			
	ก่อนย้อม	11 : 1	5 : 1	1 : 1
น้ำหนักผ้า ^{ns} (กรัม)	2.344 ± 0.077	2.293 ± 0.088	2.273 ± 0.074	2.265 ± 0.033
ความกว้างของผ้า (ซม.)	15.278 ^a ± 0.135	14.899 ^c ± 0.154	14.930 ^{bc} ± 0.143	15.153 ^{ab} ± 0.131
ความยาวของผ้า (ซม.)	15.302 ^a ± 0.120	15.212 ^{ab} ± 0.123	14.756 ^c ± 0.185	14.864 ^{bc} ± 0.136
L*	92.17 ^a ± 0.61	74.42 ^b ± 0.57	67.40 ^c ± 0.54	73.38 ^b ± 0.68
a*	-3.62 ^d ± 0.43	6.70 ^b ± 0.42	9.20 ^a ± 0.43	5.58 ^c ± 0.38
b*	0.47 ^c ± 0.20	17.82 ^{ab} ± 0.16	18.72 ^a ± 0.18	16.48 ^b ± 0.18
ΔE*	-	26.67 ^b ± 0.92	33.07 ^a ± 0.92	26.88 ^b ± 0.98
C* ^{ns}	-	19.05 ± 0.29	20.31 ± 0.23	17.42 ± 0.22

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างในแถวเดียวกันแสดงถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)
ns แสดงถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3. ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการต้มย้อม

จากตารางที่ 6 แสดงค่าเฉลี่ยต่างๆ ของผ้า หลังการต้มย้อมที่เวลา 20 40 และ 60 นาที พบว่า ทุกระยะเวลาที่ใช้ในการต้มย้อม ผ้าย้อมที่ได้จะมีค่า ความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความ เป็นสีเหลือง (b*) มีค่า 70.75 - 71.63 9.08 - 9.76 และ 18.78 - 19.73 ตามลำดับ ซึ่งทุกค่าไม่มีความ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระดับ 0.05 ผลทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม (ΔE^*) และค่า

ความอิ่มตัวของสี หรือค่า C* ทุกค่าไม่มีความ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระดับ 0.05 ด้วย เนื่องจากการต้มย้อมที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความร้อนจะช่วยให้การแพร่ของสีเป็นไปได้ดีขึ้น ดังนั้น ระยะเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการต้ม ย้อมผ้าเรยอน ควรเป็นระยะเวลาที่สั้นที่สุด เพื่อลด ระยะเวลาในการทำงานและช่วยในการประหยัด พลังงานด้วย

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยค่าสีของผ้าเรยอนหลังการต้มย้อมที่ระยะเวลาต่างๆ

ค่าเฉลี่ยต่างๆ ของผ้า	ระยะเวลาในการต้มย้อม			
	ก่อนย้อม	20 นาที	40 นาที	60 นาที
น้ำหนักผ้า ^{ns} (กรัม)	2.352 ± 0.055	2.353 ± 0.066	2.340 ± 0.081	2.373 ± 0.078
ความกว้างของผ้า (ซม.)	15.378 ^a ± 0.144	15.057 ^b ± 0.222	14.847 ^b ± 0.562	14.857 ^b ± 0.325
ความยาวของผ้า (ซม.)	15.330 ^a ± 0.194	15.000 ^a ± 0.352	15.203 ^a ± 0.326	15.147 ^a ± 0.336
L*	92.41 ^a ± 0.23	71.63 ^b ± 0.31	70.75 ^b ± 0.38	71.28 ^b ± 0.35
a*	-3.69 ^c ± 0.09	9.08 ^b ± 0.09	9.51 ^{ab} ± 0.09	9.76 ^a ± 0.12
b*	0.31 ^c ± 0.12	18.78 ^b ± 0.11	19.10 ^{ab} ± 0.13	19.73 ^a ± 0.17
ΔE^* ^{ns}	-	30.60 ± 0.93	31.57 ± 0.98	31.70 ± 0.92
C* ^{ns}	-	20.86 ± 0.27	21.33 ± 0.24	22.02 ± 0.28

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างในแถวเดียวกันแสดงถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)
ns แสดงถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

4. ผลการศึกษาความคงทนของสี

เมื่อนำผ้าเรยอนที่ผ่านการต้มย้อมด้วยน้ำสี สกัดจากหมาก พลู และปูน ร่วมกับการใช้เกลือแกง (NaCl) และสารส้ม ($AlK(SO_4)_2$) เป็นสารผนึกสี ดาก

แดดในช่วงเวลา 11.00 - 12.00 น. วันละ 1 ชั่วโมง ทุก วันเป็นระยะเวลา 1 วัน 10 วัน และ 20 วัน ให้ค่าสี แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าสีของผ้าเรยอนหลังการต้มย้อมและตากแดดเป็นระยะเวลาต่างๆ

ระยะเวลาที่ตากแดด (วัน)	ค่าสีของผ้าเรยอนหลังตากแดดเป็นระยะเวลาต่าง ๆ				
	L*	a*	b*	ΔE^*	C*
0	70.81 ^c ± 0.45	9.35 ^a ± 0.30	18.89 ^a ± 0.20	-	-
1	71.08 ^{bc} ± 0.51	9.23 ^a ± 0.31	18.75 ^a ± 0.21	0.33 ^c ± 0.81	20.89 ^a ± 0.19
10	73.15 ^b ± 0.49	8.02 ^{ab} ± 0.33	16.42 ^b ± 0.19	3.44 ^b ± 0.79	16.50 ^b ± 0.18
20	75.23 ^a ± 0.48	6.35 ^b ± 0.36	14.89 ^c ± 0.20	6.67 ^a ± 0.80	16.19 ^b ± 0.19

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างในแนวตั้งแสดงถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

พบว่า ในวันที่ 1 ค่าความสว่าง (L*) ยังมีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้น และมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงวันที่ 10 และ 20 แสดงว่า สีที่ย้อมติดผ้าค่อยๆ ซีดจางลง ขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a*) และสีเหลือง (b*) มีค่าลดลงแต่ยังใกล้เคียงกับวันเริ่มต้น และเมื่อพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม หรือค่า ΔE^* ระหว่างวันที่ต้มย้อมและวันที่ตากแดดวันที่ 1 วันที่ 10 และ วันที่ 20 ซึ่งจะบอกปริมาณความต่างของสี แต่ไม่ได้บอกทิศทางของสีที่เปลี่ยนแปลงไป จะเห็นได้ว่าค่า ΔE^* ในวันที่ 20 มีค่าเท่ากับ 6.67 ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง แสดงให้เห็นว่าผ้าที่ย้อมที่ได้มีความคงทนต่อแสงอยู่ในระดับปานกลาง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากอะลูมิเนียม (Al^+) ในสารส้ม ($AlK(SO_4)_2$) เกิดพันธะโคออร์ดิเนตโควาเลนต์กับสีและเส้นใยของผ้า (Bhattacharya and Shah, 2000) ซึ่งพันธะโคออร์ดิเนตโควาเลนต์เป็นพันธะที่มีความแข็งแรงระดับปานกลาง ทำให้ผ้าย้อมที่ได้มีความคงทนต่อแสงแดดปานกลางด้วย สอดคล้องกับงานของ Pimchan (2015) ซึ่งศึกษาความคงทนต่อแสงของกักที่ย้อมด้วยขมิ้นและฝาง โดยใช้สารส้มและโคลนเป็นการย้อมสี พบว่าหลังจากนำกักที่ผ่านการย้อมตากแดดเป็นเวลา 20 วัน ค่า ΔE^* ในวันที่ 20 มีค่าอยู่ระหว่าง 2.82 - 10.14

สรุป

จากการศึกษา พบว่า ผ้าเรยอนที่ผ่านการต้มย้อมด้วยน้ำสีที่สกัดมาจากหมาก พลู และปูนแดง ทุกอัตราส่วนให้ผ้าที่มีเจดสีน้ำตาลเหลืองจากสารแทนนิน (Tannin) ในหมากเหมือนกัน ซึ่งในการเลือกใช้อัตราส่วนใดที่นำไปใช้ จะพิจารณาจากค่าแสดงความเป็นสีแดง (a*) และสีเหลือง (b*) ที่สูงสุด เพื่อให้สอดคล้องกับเจดสีที่ปรากฏบนผ้าย้อม ดังนั้นการใช้หมาก พลู และปูนแดงในอัตราส่วน 10 : 8 : 1 จึงเป็นอัตราส่วนที่ถูกเลือก โดยระหว่างการต้มย้อมที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ทำการเติมสารฟีนิกส์ คือเกลือแกงและสารส้ม ($NaCl : AlK(SO_4)_2$) ในอัตราส่วน 5 : 1 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำสี ลงไปพร้อมๆ กัน พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมทั้งในด้านคุณภาพสีที่ติดบนผ้าและด้านการประหยัดพลังงานอยู่ที่ 20 นาที โดยเกลือแกง ($NaCl$) จะช่วยทำให้น้ำสีติดผ้าได้ง่ายขึ้น และสารส้ม ($AlK(SO_4)_2$) ช่วยให้สียึดเกาะกับเส้นใยของผ้าได้ดีขึ้น ในอนาคตควรทำการศึกษาชนิดสารฟีนิกส์ที่หลากหลายและเปรียบเทียบการติดสีและความคงทนต่อการซักและแสงแดดต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่สนับสนุนทุนอุดหนุนงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Aonfak, K., Kanakiat, N., Uttarat, P., Pingaew, R. and Kaenthong, S. 2016. Dyeing Polyester Fabrics with Curcumin using Infrared Dyeing Machine. **Burapha Science Journal** 21(3): 23-37. (in Thai)
- Bhattacharya, S.D. and Shah, A.K. 2000. Metal Ion Effect on Dyeing of Wool Fabric with Catechu. **Coloration Technology** 116(1): 10-12.
- Guesmi, A., Naoufel, B.H., Neji, L. and Sakli, F. 2013. Sonicator Dyeing of Modified Acrylic Fabrics with Indicaxanthin Natural Dye. **Industrial Crops and Products** 42: 63-69.
- Jitphusa, A and Rattanankij, T. 2016. Process of Dyeing Chinese Silk Fabric Using Color of Water Betel Nuts. **Journal of Thai Interdisciplinary Research** 11(6): 20-26.
- Park, J. 1993. **Instrumental Colour Formulation: A Practical Guide Society of Dyers, and Colourists.** Society of Dyers and Colorists, West Yorkshire, England.
- Pimchan, P. 2015. The Enhancing Color Fastness and Color Strength of Natural Pigment for Cyperus Papyrus L. Fibril Dyeing. **Koch Cha Sarn Journal of Science** 37(2): 61-72. (in Thai)
- Sakulborisut, K., Kraisuwan, S. and Piromthamsiri, K. 2016. The Effect of Mordants on The Color Fastness of Natural Brown Colored Cotton Fabric. **Srinakharinwirot University (Journal of Science and Technology)** 8(15): 1-11. (in Thai)
- Sukonthamane, P. 2017. Color of Flora. **Silpakorn University Journal** 37(3): 183-202. (in Thai)
- Watters, C. and Cantero, A. 1965. Rat Liver Parenchymal Cell Function during Azo Dye Carcinogenesis. **Cancer Research** 25(1): 67-71.

ผลของสารสกัดเห็ดเข็มทองและเจลาตินต่อคุณภาพของปลานิล (*Oreochromis niloticus*) แล่แช่เย็น

Effects of Mushroom Extract and Gelatin Coating on the Storage Quality of Refrigerated Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Fillets

มุกดาภรณ์ เกียรติโอฬาร และ เปรมวดี เทพวงศ์*

Mookdaporn Kiettiolarn and Pramvadee Tepwong *

Received: 25 February 2021, Revised: 18 May 2021, Accepted: 22 June 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารสกัดเห็ดเข็มทอง (*Flammulina velutipes*) ร่วมกับเจลาตินต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของปลานิลแล่ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ โดยนำตัวอย่างปลานิลแล่มาแช่ในสารสกัดเห็ดเข็มทอง (ME) สารละลายเจลาติน (Gel) และสารสกัดเห็ดเข็มทอง (ร้อยละ 10) ร่วมกับเจลาติน (ร้อยละ 2) (ME+Gel) ซึ่งเป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการจับอนุมูล DPPH และมีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียสูงสุด จากนั้นนำตัวอย่างปลานิลแล่ไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 วัน ผลการศึกษา พบว่า ปลานิลแล่ที่แช่ใน ME+Gel มีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นช้ากว่าปลานิลแล่ที่แช่ในน้ำกลั่น (ชุดควบคุม) ขณะเดียวกันยังช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของค่า pH ค่า K-value ค่า TVB-N และค่า TBARS แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับปลานิลแล่ชุดควบคุม นอกจากนี้ปลานิลแล่ที่แช่ใน ME+Gel ยังมีปริมาณจุลินทรีย์ที่มีชีวิตทั้งหมดต่ำกว่าปลานิลแล่ที่แช่ใน ME หรือ Gel เพียงอย่างเดียวและปลานิลแล่ชุดควบคุม รวมทั้งค่าคะแนนเฉลี่ยการทดสอบทางประสาทสัมผัสยังแสดงให้เห็นว่า การใช้ ME+Gel สามารถรักษาคุณภาพของปลานิลแล่ระหว่างการเก็บรักษาได้โดยผู้ทดสอบให้การยอมรับถึงวันที่ 6-8 ของการเก็บรักษา ขณะที่ปลานิลแล่ชุดควบคุมผู้ทดสอบให้การยอมรับเพียง 4 วันของการเก็บรักษา ทั้งนี้ จากผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่า การใช้สารสกัดเห็ดเข็มทองร่วมกับเจลาตินอาจเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของปลานิลแล่ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำได้

คำสำคัญ: ปลานิลแล่, สารสกัดเห็ดเข็มทอง, เจลาติน, อายุการเก็บรักษา

ABSTRACT

This study aimed to investigate the effect of mushroom (*Flammulina velutipes*) extract combined with gelatin coating on the quality changes of tilapia fillets during refrigerated storage. Tilapia samples were applied with mushroom extract (ME), gelatin (Gel), and 10% mushroom extract incorporated with 2% gelatin (ME+Gel) solution which was selected after antioxidant and antibacterial assay. They were then stored at 4 °C for 10 days. The results indicated the ME+Gel treated samples showed a reduction in the deterioration of weight loss compared to the control group. Besides, the increases of pH, K-value, total volatile basic nitrogen (TVB-N), and thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) were significantly delayed in the ME+Gel treated samples compared to the control group ($p<0.05$). The bacterial counts were also lower in the ME+Gel treated samples compared with those in the ME or Gel alone and control samples. The sensory characteristics proved the efficacy of ME+Gel coating by maintaining the overall quality of tilapia fillets during refrigerated storage. Moreover, the ME+Gel treated samples remain acceptable up to 6-8 days, whereas shelf life of control samples was not extended beyond 4 days. The obtained results demonstrating the potential of the combined application of mushroom extract and gelatin might be a promising method for maintaining the post-harvest quality of tilapia fillets during refrigerated storage.

Key words: Tilapia fillets, mushroom extract, gelatin, shelf life

บทนำ

ปลานิล (*Oreochromis niloticus*) เป็นปลาน้ำจืดชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย เป็นปลาที่เลี้ยงง่าย เจริญเติบโตเร็ว และเป็นที่ยอมรับโลก เนื่องจากเนื้อปลามีรสชาติดี มีคุณค่าทางโภชนาการสูง และราคาไม่แพง (Plaipetch, 2016) โดยทั่วไปปลานิลมักมีการจำหน่ายในลักษณะของปลาสดทั้งตัว ขณะที่ในปัจจุบันพฤติกรรมของผู้บริโภคเปลี่ยนไปเน้นความสะดวกสบายและความรวดเร็วมากขึ้น ส่งผลให้ผู้บริโภคหันมาสนใจการซื้อปลานิลที่จำหน่ายในรูปแบบของปลาแล่หรือปลาเป็นชิ้นที่พร้อมสำหรับการปรุงและสามารถนำไปประกอบอาหารได้หลายชนิดมากขึ้น อย่างไรก็ตาม สัตว์น้ำเกิดการเน่าเสียได้ง่ายในระยะเวลา 2-4 วัน แม้จะเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากสัตว์น้ำมี

องค์ประกอบของโปรตีนและความชื้นสูงซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการย่อยสลายตัวเอง การเจริญของแบคทีเรีย และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ทำให้สัตว์น้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพอย่างรวดเร็วส่งผลให้อายุการเก็บรักษาสั้น (Racisi *et al.*, 2015) ปัจจุบันการยืดอายุการเก็บรักษาสัตว์น้ำวิธีการหนึ่งที่มีความนิยม คือ การใช้สารสกัดหรือสารอนุพันธ์ที่ได้จากธรรมชาติ (Natural derived preservatives) เช่น สารสกัดจากโรสแมรี่ สารสกัดจากเปลือกทับทิม และสารสกัดจากเมล็ดองุ่น เป็นต้น เนื่องจากมีความปลอดภัยมากกว่าการใช้สารสังเคราะห์ รวมทั้งสารสกัดจากธรรมชาติยังมีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระและชะลอการเน่าเสียในสัตว์น้ำได้ นอกจากนี้ยังมีรายงานการประยุกต์ใช้สารสกัดจากธรรมชาติร่วมกับสารเคลือบไฮโดรคอลลอยด์ในการเพิ่มประสิทธิภาพ

การยืดอายุการเก็บรักษาสัตว์น้ำที่อุณหภูมิต่ำให้นานมากขึ้น เนื่องจากสารเคลือบไฮโดรคอลลอยด์มีสมบัติในการต้านการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน ป้องกันการสูญเสียน้ำหรือความชื้น (Vargas *et al.*, 2008) เช่น การใช้สารสกัดจากใบชาพร้อมกับอัลจินเตในปลากระพงญี่ปุ่น (Nie *et al.*, 2018) และการใช้สารสกัดจากเมล็ดองุ่นร่วมกับคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (carboxymethyl cellulose, CMC) ในปลาเรนโบว์เทราต์ (Raeisi *et al.*, 2015) เป็นต้น

ส่วนเหลือจากการตัดแต่งเห็ดเข็มทอง (mushroom trimming) เป็นเศษเหลือที่ได้จากการตัดแต่งก้านดอก ส่วนโคนและส่วนที่ไม่ได้ขนาดตามที่ตลาดต้องการในขั้นตอนการเตรียมหรือการจัดจำหน่ายจากโรงงานผลิตเห็ดเข็มทอง และในขั้นตอนก่อนการปรุงอาหารจากผู้ประกอบการกิจการร้านอาหารและครัวเรือน (Santhi *et al.*, 2016) ซึ่งจากการสอบถามผู้ประกอบการพบว่า มีปริมาณส่วนเหลือจากการตัดแต่งเห็ดเข็มทองประมาณวันละ 50-100 กิโลกรัม คิดเป็น 18.0-36.5 ตัน/ปี ซึ่งเศษเหลือเหล่านี้มีมูลค่าต่ำและยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ จากการตรวจสอบเอกสารทางวิชาการพบว่า สารสกัดเห็ดเข็มทอง (mushroom extract, ME) มีสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และชะลอการเกิดจุดดำ เนื่องจากมีองค์ประกอบของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญหลายชนิด เช่น สารประกอบฟีนอลิก สารเอโกไธโอนีน (ergothioneine) และแซคคาไรด์ เป็นต้น (Dubost *et al.*, 2007; Bao *et al.*, 2008; 2010; Encarnacion *et al.*, 2011; 2012) รวมทั้งยังมีรายงานการทดสอบความเป็นพิษของสารสกัดเห็ดเข็มทองในหนูทดลองพบว่าไม่พบความเป็นพิษและไม่มีการเสียชีวิตของหนูทดลองที่ได้รับสารสกัดเห็ดเข็มทอง (Lin *et al.*, 2016) แสดงให้เห็นว่า สารสกัดเห็ดเข็มทองมีความปลอดภัยสำหรับการบริโภค นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า สารสกัดเห็ดเข็มทองทั้งจากส่วนที่บริโภคได้ ส่วนราก

และฐาน และส่วนเหลือจากการตัดแต่งสามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในเนื้อปลาแชลมน ชะลอการเปลี่ยนแปลงสีในเนื้อปลาข้างเหลืองบด และยับยั้งการเกิดจุดดำในปูและกุ้งระหว่างการเก็บรักษาได้ (Bao *et al.*, 2009; Encarnacion *et al.*, 2011; 2012; Pahila *et al.*, 2017)

เจลาตินเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดหนึ่ง ที่สกัดได้จากผิวหนัง กระดูก และเนื้อเยื่อเกี่ยวพันของสัตว์ (Wang *et al.*, 2019) มีสมบัติในการอุ้มน้ำ สามารถขึ้นรูปฟิล์มได้ดี มีความหนืดสูง และยังสามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิต่ำ (Ahmad *et al.*, 2017) อย่างไรก็ตาม เจลาตินไม่แสดงฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระและต้านจุลินทรีย์ (Wu *et al.*, 2018) มีรายงานการนำเจลาตินมาใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารเพื่อป้องกันการซึมผ่านของน้ำและออกซิเจน บริเวณผิวหนังของอาหาร ซึ่งสามารถลดการสูญเสียน้ำ และชะลอการเจริญของแบคทีเรีย (Chen *et al.*, 2016) นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้เจลาตินร่วมกับสารสกัดจากธรรมชาติหลายชนิดในการรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาของสัตว์น้ำ เช่น การใช้เจลาตินร่วมกับสารสกัดจากเมล็ดองุ่นในปลานิล (Zhao *et al.*, 2019) การใช้เจลาตินร่วมกับสารสกัดจากใบชาในปลาจาระเม็ดทอง (Feng *et al.*, 2017) การใช้เจลาตินร่วมกับสารสกัดจากชาเขียวและชาผู้เออร์รี่ในปลาแชลมน (Kulawik *et al.*, 2019) และการใช้เจลาตินร่วมกับน้ำมันอบเชยในปลาเรนโบว์เทราต์ (Andevari and Rezaei, 2011) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานการประยุกต์ใช้สารสกัดเห็ดเข็มทองร่วมกับเจลาตินในการยืดอายุการเก็บรักษาปลานิลแล้วในสถานะแช่เย็น คณะผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการใช้สารสกัดเห็ดเข็มทองซึ่งจะเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากเห็ดเข็มทองร่วมกับเจลาตินซึ่งเป็นสารเคลือบกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์ในการชะลอการเสื่อมคุณภาพของปลานิลแช่เย็น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้สารสกัดเห็ดเข็มทองร่วมกับเจลาตินต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านกายภาพ เคมี จุลินทรีย์ และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของปลานิลแล้ระหว่างการรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 วัน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมสารสกัดเห็ดเข็มทองและสารเคลือบเจลาติน

1.1 การเตรียมสารสกัดเห็ดเข็มทอง

นำส่วนเหลือเห็ดเข็มทอง (*Flammulina velutipes*) ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากผู้ประกอบการร้านอาหารมาทำการคัดเลือกเฉพาะก้านดอกเห็ด ส่วนโคนไม่รวมส่วนรากและเห็ดเข็มทองขนาดเล็ก มาล้างทำความสะอาดและหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับร้อยละ 10 (Santhi *et al.*, 2016) จากนั้นบดให้เป็นผงละเอียดแล้วนำมาสกัดด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 70 โดยคัดแปลงวิธีการจาก Tepwong *et al.* (2012) จากนั้นนำไปสกัดด้วยเครื่องหอโมจิไนซ์เป็นเวลา 5 นาที ที่ความเร็วรอบ 13,500 รอบต่อนาที และนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นำส่วนใสที่ได้มาระเหยเอาตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยระบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และนำสารสกัดเห็ดเข็มทองที่ได้ไปทำแห้งแบบเยือกแข็งและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส

1.2 การเตรียมเจลาติน

เตรียมเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 6 (น้ำหนัก/ปริมาตร) โดยนำเจลาตินผงที่มีค่าความแข็งของเจล (bloom strength) อยู่ที่ 250 bloom (Food

grade) จากบริษัทเคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด มาละลายในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องกวนสารละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของสารละลายเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 6 (น้ำหนัก/ปริมาตร) พบว่าค่า pH อยู่ในช่วง 5.62-5.77 และมีความหนืดอยู่ในช่วง 20.4-150.0 mPa.s จากนั้นนำเจลาตินแต่ละความเข้มข้นไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที สังเกตลักษณะปรากฏและการแข็งตัวของเจลาตินในการคัดเลือกเบื้องต้นเพื่อจำลองรูปแบบการเก็บรักษาปลานิลแล้วตามที่มีการจำหน่ายในซูเปอร์มาร์เก็ต พบว่า เจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 2 (น้ำหนัก/ปริมาตร) มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี และไม่มีความข้นหนืด ขณะที่เจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 4 และ 6 (น้ำหนัก/ปริมาตร) เกิดการแข็งตัวเป็นเจลใสและมีความข้นหนืด จึงคัดเลือกเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 2 (น้ำหนัก/ปริมาตร) มาใช้ในการศึกษาครั้งนี้

2. การศึกษาฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและการต้านจุลินทรีย์ของสารสกัดเห็ดเข็มทองร่วมกับเจลาติน

2.1 การเตรียมสารละลายผสมของสารสกัดเห็ดเข็มทองและเจลาติน

เตรียมสารสกัดเห็ดเข็มทองความเข้มข้นร้อยละ 2.5, 5 และ 10 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ในสารละลายน้ำกลั่นที่มีส่วนผสมของเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 2 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารละลายแล้วนำสารละลายผสมไปวิเคราะห์สมบัติการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีการขจัดอนุมูล DPPH และการต้านจุลินทรีย์ด้วยวิธี Agar well diffusion

2.2 ค่าการขจัดอนุมูล DPPH (2,2-Diphenyl-2-picrylhydrazyl radical scavenging activity)

วิเคราะห์ค่าการขจัดอนุมูล DPPH ของสารละลายผสมระหว่างสารสกัดเห็ดเข็มทองและเจลาตินตามวิธีของ Yen and Hsieh (1995) โดยนำ

สารละลายตัวอย่างผสมกับสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 0.2 มิลลิโมลาร์ ใน เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 85 (ปริมาตร/ปริมาตร) และบ่มเป็นเวลา 30 นาทีในที่มืดก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร และคำนวณค่า DPPH radical scavenging activity (%)

2.3 สมบัติการต้านจุลินทรีย์ด้วยวิธี Agar well diffusion

วิเคราะห์สมบัติการต้านจุลินทรีย์ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้เลือกทดสอบเชื้อ *Staphylococcus aureus* เนื่องจากเชื้อ *S. aureus* เป็นแบคทีเรียก่อโรค (pathogenic bacteria) ที่มีความสำคัญในอาหารแช่เย็น โดยดัดแปลงวิธีจาก Alparslan *et al.* (2016) ทำโดยนำเชื้อ *S. aureus* มาก่อก (Swab) ให้ทั่วอาหารเลี้ยงเชื้อ tryptic soy broth (TSB) ที่มีสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 จากนั้นเจาะหลุมด้วยที่เจาะจุกคอร์ก (cork borer) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร แล้วนำสารละลายผสมระหว่างสารสกัดเห็ดเข็มทองและเจลาตินมาเติมปริมาตรหลุมละ 100 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนแข็งตัว แล้วนำไปบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง และตรวจสอบผลการทดสอบโดยวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโซนยับยั้ง (inhibition zone) ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (vernier caliper) ในหน่วยมิลลิเมตร

3. การประยุกต์ใช้สารสกัดเห็ดเข็มทองร่วมกับเจลาตินต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของปลานิลแช่เย็น

3.1 การเตรียมตัวอย่างปลานิลแช่และชุดตัวอย่าง

นำตัวอย่างปลานิลขนาดประมาณ 900 กรัมต่อตัว โดยซื้อจากฟาร์มของเกษตรกร จังหวัดสมุทรสาคร ทำการบรรจุพลาสติกกับน้ำแข็งเป็นชั้นๆ ในกล่องโฟลิสไตรีน และขนส่งมายัง

ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาผลิตภัณฑ์ประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายในระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำปลานิลมาแล่ ลอกหนังออกและตัดแต่งให้มีขนาดชิ้นละประมาณ 150 กรัม ล้างด้วยน้ำเย็นและสะเด็ดน้ำเป็นเวลา 3 นาที และแบ่งตัวอย่างปลานิลแช่เป็นชุดตัวอย่างต่างๆ ดังนี้ ปลานิลแช่ในน้ำกลั่น (ชุดควบคุม) ปลานิลแช่ในสารสกัดเห็ดเข็มทองความเข้มข้นร้อยละ 10 (น้ำหนัก/ปริมาตร) (ME) ปลานิลแช่ในเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 2 (น้ำหนัก/ปริมาตร) (Gel) และปลานิลแช่ในสารสกัดเห็ดเข็มทองความเข้มข้นร้อยละ 10 ร่วมกับเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 2 (น้ำหนัก/ปริมาตร) (ME+Gel) กำหนดให้อัตราส่วนปลานิลแช่ต่อสารละลายเท่ากับ 1:3 และควบคุมอุณหภูมิระหว่างการศึกษาไม่ให้เกิน 4 ± 1 องศาเซลเซียส เมื่อครบ 10 นาที ทำการสะเด็ดน้ำเป็นเวลา 3 นาที และบรรจุปลานิลแช่แต่ละชุดตัวอย่างลงในภาชนะพลาสติกจำนวน 1 ชิ้นต่อภาชนะ และห่อด้วยฟิล์มยืดห่ออาหาร ซึ่งเป็นการจำลองการบรรจุให้มีลักษณะเช่นเดียวกับการจำหน่ายในซูเปอร์มาร์เก็ต จากนั้นนำตัวอย่างปลานิลแช่ไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และสุ่มตัวอย่างปลานิลแช่ทุก 2 วัน มาตรวจสอบคุณภาพด้านต่างๆ เป็นระยะเวลา 10 วัน ดังนี้

3.2 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและทางเคมี

3.2.1 การสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss)

นำตัวอย่างปลานิลแช่มาชั่งน้ำหนักก่อนนำไปแช่ในสารเคลือบแต่ละชุดตัวอย่างในข้อ 3.1 (W_1) และชั่งน้ำหนักปลานิลแช่ชิ้นเดิมหลังการแช่ในสารเคลือบ (W_2) และนำไปคำนวณค่าการสูญเสีย น้ำหนัก (Weight loss) ซึ่งดัดแปลงวิธีจาก Chong *et al.* (2015)

$$\text{Weight loss (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

3.2.2 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

นำตัวอย่างปลานิลแล้ว 10 กรัม ไปปั่นผสมกับน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน ปริมาตร 90 มิลลิลิตร ด้วยเครื่อง โฮโมจีไนซ์ และนำไปวัดค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยเครื่อง pH meter

3.2.3 ค่าความสด (K-value)

วิเคราะห์ค่าความสดโดยวิธี ion exchange chromatography ตามวิธีการของ Uchiyama (1978) ทำโดยนำตัวอย่างปลานิลแล้วมาผสมกับกรดเปอร์คลอริก เพื่อสกัดสารประกอบในกลุ่มนิวคลีโอไทด์ ก่อนนำไปตกตะกอนแยกเอาส่วนของโปรตีน จากนั้นปรับ pH ให้มีค่าอยู่ในช่วง 6.5-6.8 ด้วย

สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และนำส่วนใสที่สกัดได้มาปรับ pH ด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จนมี pH เป็น 9.4 แล้วชะตัวอย่างด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.001 และ 0.01 นอร์มอล ตามลำดับ และนำมาวิเคราะห์ปริมาณของ adenosine triphosphate (ATP), adenosine diphosphate (ADP), adenosine monophosphate (AMP), inosine monophosphate (IMP), inosine (HxR) และ hypoxanthine (Hx) โดยนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 250 นาโนเมตรและคำนวณค่าดัชนีความสด ดังสมการ

$$\text{K-value (\%)} = \frac{\text{HxR} + \text{Hx}}{\text{ATP} + \text{ADP} + \text{AMP} + \text{IMP} + \text{HxR} + \text{Hx}} \times 100$$

3.2.4 สารประกอบไนโตรเจนที่ระเหยได้ทั้งหมด (Total volatile base nitrogen; TVB-N)

วิเคราะห์ปริมาณของ TVB-N ด้วยวิธี Conway's micro-diffusion method (Conway and Byrne, 1936) โดยนำปลานิลแล้วมาสกัดด้วยสารละลายกรดไตรคลอโรอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 4 จากนั้นเติมตัวอย่างที่ได้จากการสกัด สารละลายกรดบอริกและสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตปริมาตร 1 มิลลิลิตรลงใน Conway dish แล้วนำไปบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นไตเตรทด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ นำไปคำนวณ TVB-N และรายงานค่าเป็นมิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง (mg/100 g)

3.2.5 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (Thiobarbituric acid reactive substances; TBARS)

วิเคราะห์ค่า TBARS ตามวิธีการของ Nirmal and Benjakul (2009) โดยนำปลานิลแล้วมาทำปฏิกิริยา

กับ TBA reagent แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง เป็นเวลา 20 นาที และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร และรายงานค่า TBARS โดยคำนวณเทียบกับค่าที่ได้จากกราฟมาตรฐานของ malonaldehyde แสดงในหน่วย มิลลิกรัมของ malonaldehyde ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง (mg malonaldehyde/kg sample)

3.3 การวิเคราะห์คุณภาพทางจุลินทรีย์

3.3.1 ปริมาณจุลินทรีย์ที่มีชีวิตทั้งหมด (Total viable count)

ตรวจปริมาณจุลินทรีย์ที่มีชีวิตทั้งหมดตามวิธี Bacteriological Analytical Manual (BAM (Bacteriological Analytical Manual), 2001) ด้วยเทคนิค pour plate ทำโดยปั่นผสมเนื้อปลานิลแล้วกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0.85 จากนั้นนำไปเจือจางครั้งละ 10 เท่าจนได้ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม และปิ

เปิดตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตรลงบนจานเพาะเชื้อ แล้วเทอาหารเลี้ยงเชื้อ plate count agar ตั้งทิ้งไว้จนแข็ง แล้วนำไปบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.4 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของ ปลานิลแล้ใช้วิธี Quality Index Method (QIM) ตามวิธีของ Yu *et al.* (2017) โดยทำการประเมิน 6 คุณลักษณะ ได้แก่ เมื่อก ลิ เนื้อสัมผัส เลือด gaping และกลิ่นด้วยผู้ทดสอบจำนวน 12 คนที่ผ่านการฝึกฝนทำการประเมินตัวอย่างปลานิลแต่ละตามระยะเวลาการเก็บรักษาโดยการสังเกต การดมกลิ่น การสัมผัสตัวปลา พร้อมทั้งบรรยายลักษณะที่พบตามส่วนต่างๆ ซึ่งมีหลักการให้คะแนน 1-3 คะแนน โดยที่ระดับคะแนน 3 คะแนน หมายถึง ปลานิลแล้มีลักษณะสดมากที่สุด ระดับคะแนน 2 คะแนน หมายถึง ปลานิลแล้มีคุณภาพอยู่ในระดับที่สามารถนำไปบริโภคได้ เกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และผู้ทดสอบยังให้การยอมรับ และระดับคะแนน 1 คะแนน หมายถึง ปลานิลแล้มีคุณภาพลดลงจนถึงในระดับที่ผู้ทดสอบไม่ให้การยอมรับ หลังจากนั้นคำนวณผลคะแนนโดยการนำผลรวมทั้งหมดของคุณลักษณะหารด้วยจำนวนคุณลักษณะทั้ง 6 คุณลักษณะและรายงานผลเป็นคะแนนความชอบ (Preference scores)

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Complete Randomized Design (CRD) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ Analysis of Variance (ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS version 23

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ค่าการขจัดอนุมูล DPPH

ผลการวิเคราะห์ค่าการขจัดอนุมูล DPPH ของสารสกัด ME ความเข้มข้นร้อยละ 2.5, 5 และ 10 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ร่วมกับเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 2 (น้ำหนัก/ปริมาตร) (Figure. 1) พบว่า ค่าการขจัดอนุมูล DPPH มีค่าเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด ME โดยมีค่าการขจัดอนุมูล DPPH อยู่ในช่วงร้อยละ 62.2-80.6 ซึ่งสารสกัด ME ความเข้มข้นร้อยละ 10 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ร่วมกับเจลาตินมีค่าการขจัดอนุมูล DPPH สูงสุด ($p < 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bao *et al.* (2010) ที่รายงานว่าค่าการขจัดอนุมูล DPPH ของสารสกัด ME จากส่วนที่บริโภคได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารสกัด ME ที่เพิ่มขึ้น สันนิษฐานว่า เนื่องจากสารสกัด ME เป็นแหล่งของสารประกอบฟีนอลิกที่สามารถให้อนุมูลไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยากับสาร DPPH และสารเอโกซิโคโนนที่สามารถกำจัดอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิล (hydroxyl radical) จึงทำให้ความสามารถในการขจัดอนุมูล DPPH เพิ่มขึ้น

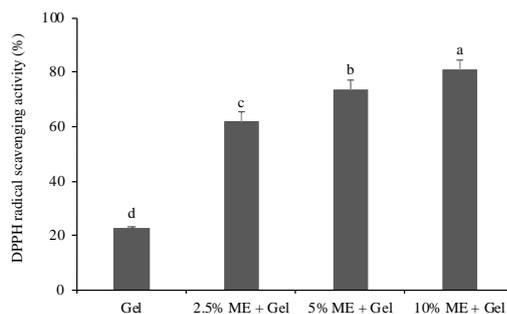


Figure 1 DPPH radical scavenging activity of mushroom extract and gelatin solutions. Letters show significant differences among the groups at $p < 0.05$. (Gel: Gelatin, ME: mushroom extract)

2. ความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus*

ผลการตรวจสอบค่าความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ด้วยวิธี Agar well diffusion method ของสารสกัด ME ความเข้มข้นร้อยละ 2.5, 5 และ 10 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ร่วมกับเจลาติน พบว่า สารสกัด ME ความเข้มข้นร้อยละ 10 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ร่วมกับเจลาตินเกิดบริเวณโซนยับยั้ง (inhibition zone) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ซึ่งมีความกว้างกว่าสารสกัด ME ความ

เข้มข้นร้อยละ 5 และ 2.5 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ตามลำดับ (Table 1) แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด ME เพิ่มขึ้นจะสร้างโซนยับยั้งที่มีขนาดใหญ่ขึ้น สันนิษฐานว่าเนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกเข้าไปทำลายผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ ส่งผลให้ส่วนประกอบภายในเซลล์เสียหาย ทำให้ขัดขวางการทำงานของโปรตีนและการสังเคราะห์ DNA และ RNA (Shan *et al.*, 2007)

Table 1 Inhibition zone of *Staphylococcus aureus*

Treatment	Inhibition zone (mm)
Gel	ND
10% ME	9 ± 0.68 ^a
2.5% ME + Gel	9 ± 1.26 ^a
5% ME + Gel	10 ± 1.09 ^b
10% ME + Gel	12 ± 0.45 ^c

ND Not detected. Data were presented as mean values ± standard deviations. Different small letters indicate significant difference among means in the same line ($p < 0.05$). (Gel: Gelatin, ME: mushroom extract)

3. การประยุกต์ใช้สารสกัดเห็ดเข็มทองร่วมกับเจลาตินต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพปลานิลแฉะเย็น

3.1 การสูญเสียน้ำหนัก

ผลการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียน้ำหนักของปลานิลแฉะ พบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น

การสูญเสียน้ำหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกชุดตัวอย่าง ($p < 0.05$) (Figure 2) โดยปลานิลแฉะชุดควบคุมมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะที่ปลานิลแฉะที่แช่ในเจลาตินหรือสารสกัด ME เพียงอย่างเดียวและปลานิลแฉะที่แช่ใน ME + Gel มีค่าการ

สูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าทุกชุดตัวอย่าง ซึ่งการสูญเสียน้ำหนักในสัตว์น้ำ เกิดจากจุลินทรีย์เข้าไปทำลายผนังเซลล์ของกล้ามเนื้อปลา โดยการย่อยสลายไมโอซิน ทำให้ไมโอซินสูญเสียความสามารถในการจับกับน้ำ ก่อให้เกิดการสูญเสียน้ำของเหลวภายในเซลล์ (drip loss) สาเหตุที่ปลานิลแช่ที่แช่ใน ME + Gel มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น ช้ากว่าทุกชุดตัวอย่าง สันนิษฐานว่า เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกในสาร

สกัด ME เข้าไปทำลายผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ทำให้การเจริญของจุลินทรีย์ลดลง ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นช้าลง (Khodanazary, 2019) ขณะที่เจลาตินมีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของน้ำ เนื่องจากมีกรดอะมิโนที่ไม่ชอบน้ำเป็นองค์ประกอบ (Wei *et al.*, 2019) ดังนั้น การใช้ ME + Gel จึงสามารถชะลอการสูญเสียน้ำหนักของปลานิลแช่แช่เย็นได้ดีกว่าการใช้สารสกัด ME เพียงอย่างเดียว

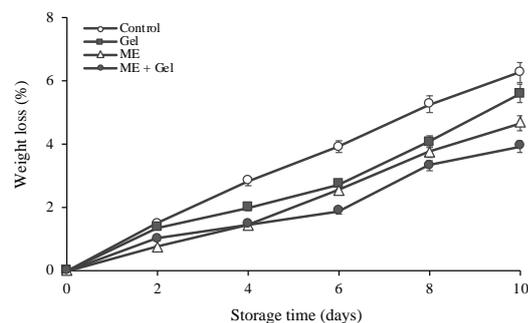


Figure 2 Weight loss (%) of tilapia fillets during refrigerated storage. (Gel: Gelatin, ME: mushroom extract)

3.2 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ผลการวิเคราะห์ค่า pH ของปลานิลแช่ พบว่าค่า pH เริ่มต้นของปลานิลแช่มีค่าอยู่ในช่วง 6.40-6.44 เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ค่า pH ของทุกตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) (Figure 3A) โดยที่ปลานิลแช่ชุดควบคุมมีค่า pH เพิ่มขึ้นสูงสุด รองลงมาคือ ปลานิลแช่ที่แช่ในเจลาติน ปลานิลแช่ที่แช่ในสารสกัด ME และปลานิลแช่ที่แช่ใน ME + Gel ตามลำดับ ซึ่งในช่วงแรกของการเก็บรักษา ค่า pH มีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการสะสมของกรดแลคติกจากกระบวนการไกลโคไลซิสของไกลโคเจน ขณะที่การเพิ่มขึ้นของค่า pH ในภายหลัง อาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของสารประกอบไนโตรเจนที่ระเหยได้ (Nie *et al.*, 2018) ซึ่งปลานิลแช่ที่แช่ใน ME + Gel มีค่า pH เพิ่มขึ้นช้าที่สุด อาจเนื่องมาจากสารสกัด ME มีความสามารถในการชะลอการเจริญของจุลินทรีย์ (Santhi and Tepwong, 2015) และการใช้เจลาตินยัง

สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและออกซิเจน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียในเนื้อปลา ดังนั้น ปลานิลแช่ที่แช่ใน ME + Gel จึงมีการเพิ่มขึ้นของค่า pH ช้ากว่าชุดตัวอย่างอื่น

3.3 ค่าความสด (K-value)

ค่าความสดหรือค่า K-value เป็นดัชนีที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบนิวคลีโอไทด์ที่เกิดขึ้นภายในตัวปลา ผลการวิเคราะห์ค่า K-value ของปลานิลแช่ระหว่างการเก็บรักษา (Figure 3B) พบว่า ในวันแรกของการศึกษาปลานิลแช่มีค่า K-value เริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 4.8 และมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น โดยปลานิลแช่ชุดควบคุมมีค่า K-value สูงสุดเท่ากับร้อยละ 68.4 ในวันที่ 10 ของการเก็บรักษา ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ระดับความสดของปลาที่กำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 60 (Ehira, 1976) ขณะที่ปลานิลแช่ที่แช่ในเจลาตินหรือสารสกัด ME เพียงอย่างเดียวมีการเพิ่มขึ้นของค่า K-

value ใกล้เคียงกัน โดยมีอายุการเก็บรักษาประมาณวันที่ 7-8 ส่วนปลานิลแช่ที่แช่ใน ME + Gel มีค่า K-value อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา โดยมีค่า K-value เท่ากับร้อยละ 51.0 ในวันที่ 10 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปลานิลแช่ทุกชุดตัวอย่างสันนิษฐานว่า สารประกอบฟีนอลิกและสารเอโอโกโซอินซึ่งเป็นองค์ประกอบในสารสกัด ME จะไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ภายในตัวปลาและเอนไซม์จากจุลินทรีย์ โดยเข้าทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอนไซม์ทำให้ไม่สามารถย่อยสลายสารประกอบนิวคลีโอไทด์จาก IMP เป็น Hx ได้ (Khunsoongsem, 2003) ขณะที่การใช้เจลาตินจะช่วยป้องกันการซึมผ่านของน้ำและออกซิเจนส่งผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ (Wei *et al.*, 2019) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhao *et al.* (2019) ที่รายงานว่า การใช้สารสกัดจากเมล็ดคองุ่นร่วมกับเจลาตินสามารถรักษาความสดของปลานิลแช่ได้ดีกว่าปลานิลแช่ที่ไม่ผ่านการเคลือบและปลานิลแช่ที่เคลือบด้วยสารสกัดจากเมล็ดคองุ่นและเจลาตินเพียงอย่างเดียว

3.4 สารประกอบไนโตรเจนที่ระเหยได้ทั้งหมด (TVB-N)

ผลการตรวจติดตามค่า TVB-N ของปลานิลแช่แช่เย็นระหว่างการเก็บรักษา (Figure 3C) พบว่าในวันแรกของการศึกษาปลานิลแช่มีค่า TVB-N เริ่มต้นเท่ากับ 5.6 mg N/100 g และมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า TVB-N เกิดจากเอนไซม์ในตัวปลาหรือเอนไซม์จากแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุทำให้อาหารเน่าเสียโดยการย่อยสลาย Trimethylamine oxide (TMAO) ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่า pH โดยปลานิลแช่ชุดควบคุมมีค่า TVB-N เท่ากับ 35.2 mg N/100 g ในวันที่ 6 ของการเก็บรักษา ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์การยอมรับที่จะต้องมียค่า TVB-N ไม่เกิน 30

mg N/ 100 g (Cobb *et al.*, 1976) ขณะที่ปลานิลแช่ที่แช่ในเจลาตินหรือสารสกัด ME เพียงอย่างเดียวมีค่า TVB-N เท่ากับ 36.5 และ 30.3 mg N/ 100 g ตามลำดับ ในวันที่ 8 ส่วนปลานิลแช่ที่แช่ใน ME + Gel มีค่า TVB-N ต่ำกว่าทุกชุดตัวอย่างอื่นๆ โดยมีอายุการเก็บรักษาประมาณ 9 วัน อาจเนื่องจากสารสกัด ME มีสมบัติในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่สร้างเอนไซม์ในการย่อยสลายโปรตีนและสารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนก่อให้เกิดสารประกอบไนโตรเจนที่ระเหยได้ เช่น Trimethylamine (TMA) และแอมโมเนียม (Zhuang *et al.*, 2019) และเมื่อใช้ร่วมกับเจลาตินจึงสามารถชะลอการเกิด TVB-N ได้ดีกว่าการใช้สารสกัด ME เพียงอย่างเดียว

3.5 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (TBARS)

ผลการวิเคราะห์ค่า TBARS ของปลานิลแช่แช่เย็นระหว่างการเก็บรักษา (Figure 3D) พบว่าค่า TBARS มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างช้าๆ ตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้นในทุกชุดตัวอย่าง ($p < 0.05$) โดยในวันที่ 10 ของการเก็บรักษาปลานิลแช่ทุกชุดตัวอย่างมีค่า TBARS อยู่ในช่วง 0.3 - 0.6 mg MDA/kg ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์การยอมรับของปลาสดที่ระบุไว้ให้มีค่า TBARS ไม่เกิน 1-2 mg MDA/kg (Khalafalla *et al.*, 2015) จากการศึกษาค่าการจับอนุมูล DPPH ของสารสกัด ME แสดงให้เห็นว่า สารสกัด ME มีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งคาดว่า สารเอโอโกโซอินจะไปยับยั้งการทำงานของ singlet oxygen ทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในสัตว์น้ำลดลง (Pahila *et al.*, 2017) ขณะที่เจลาตินช่วยควบคุมการซึมผ่านของออกซิเจน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้น ปลานิลแช่ที่แช่ใน ME + Gel จึงมีค่า TBARS ต่ำกว่าการใช้สารสกัด ME หรือเจลาตินเพียงอย่างเดียว

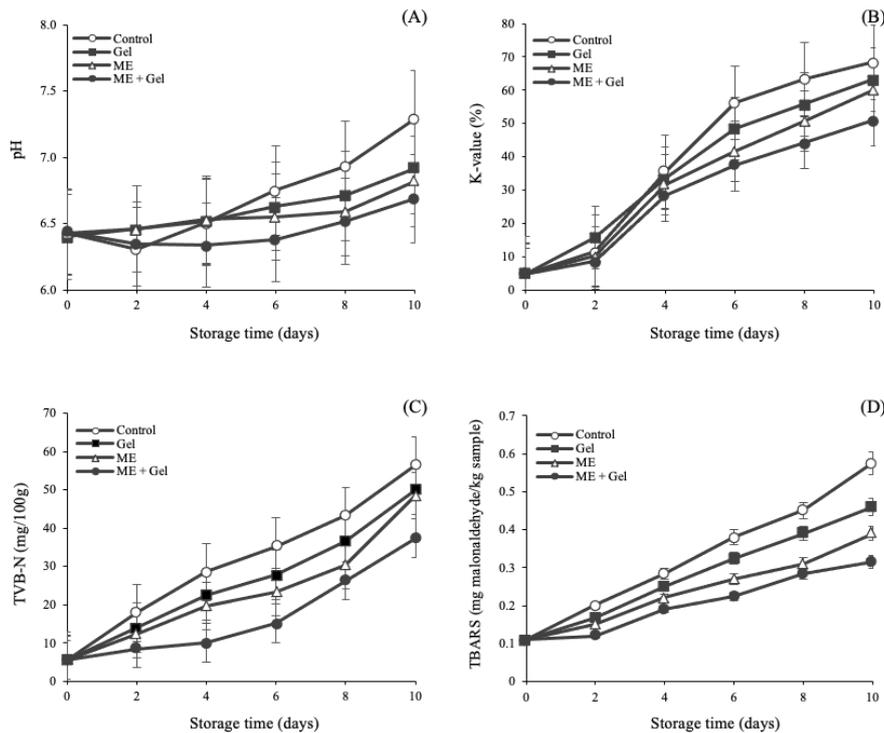


Figure 3 Changes in pH (A), K-values (B), TVB-N values (C), TBARS values (D) of tilapia fillets during refrigerated storage. (Gel: Gelatin, ME: mushroom extract)

3.6 ปริมาณจุลินทรีย์ที่มีชีวิตทั้งหมด (TVC)

ผลการวิเคราะห์ค่า TVC ของปลานิลแช่เย็นระหว่างการเก็บรักษา (Figure 4) พบว่า ปลานิลแช่เย็นมีค่า TVC เริ่มต้นเท่ากับ 4.1 log CFU/g และมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกชุดตัวอย่างเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) และเมื่อพิจารณามาตรฐานที่ประกาศโดยกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ที่กำหนดให้ปลานิลสดมีค่า TVC ไม่เกิน 5 log CFU/g (National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, 2013) พบว่า ปลานิลแช่เย็นควบคุมมีค่า TVC เกินมาตรฐานในวันที่ 6 ของการเก็บรักษาซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.1 log CFU/g ขณะที่ปลานิลแช่เย็นในเจลาตินและสารสกัด ME เพียงอย่างเดียวมีค่า TVC เท่ากับ 4.9 และ 4.8 log CFU/g ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่มาตรฐานกำหนด และมีค่าเกินมาตรฐานในวันที่ 8 ดังนั้นปลานิลแช่เย็นในเจลาตินและสารสกัด ME เพียงอย่างเดียวสามารถยอมรับได้

ประมาณวันที่ 6-7 ของการเก็บรักษา ส่วนปลานิลแช่เย็นที่แช่ใน ME + Gel มีค่า TVC เกินมาตรฐานกำหนดเท่ากับ 5.1 log CFU/g ในวันที่ 10 ของการเก็บรักษาซึ่งปลานิลแช่เย็นที่แช่ใน ME + Gel มีค่า TVC ต่ำกว่าชุดตัวอย่างอื่นๆ อาจเนื่องมาจากสารสกัด ME มีสมบัติในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (Santhi and Tepwong, 2015) และเมื่อใช้ร่วมกับเจลาตินที่มีสมบัติในการควบคุมการซึมผ่านของออกซิเจน ซึ่งจะเข้าไปขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจนของจุลินทรีย์ (Wei *et al.*, 2019) ส่งผลให้มีค่า TVC ต่ำกว่าชุดตัวอย่างที่แช่ในสารสกัด ME หรือเจลาตินเพียงอย่างเดียว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Racisi *et al.*, 2015 ที่ศึกษาการใช้สารสกัดจากเมล็ดคองุ่นร่วมกับสารเคลือบ CMC ในปลาเรนโบว์เทราต์แช่เย็น พบว่า ปลาเรนโบว์เทราต์ที่แช่ในสารสกัดจากเมล็ดคองุ่นร่วมกับสารเคลือบ CMC มีค่าน้อยกว่าการแช่ในสารสกัดจากเมล็ดคองุ่นหรือสารเคลือบ CMC เพียงอย่างเดียว

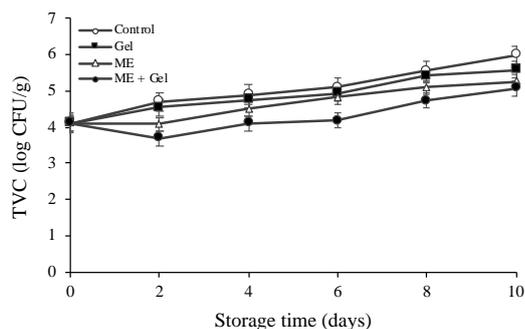


Figure 4 Changes in total viable count (TVC) of tilapia fillets during refrigerated storage.

(Gel: Gelatin, ME: mushroom extract)

3.7 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของปลานิลแช่แข็งด้วยวิธี QIM (Figure 5) พบว่าในวันแรกและวันที่ 2 ของการเก็บรักษาปลานิลแช่แข็งทุกชุดตัวอย่างมีคะแนนความชอบ (Preference scores) ไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) และเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นมีคะแนนความชอบลดลงในปลานิลแช่แข็งทุกชุดตัวอย่าง โดยปลานิลแช่แข็งชุดควบคุมผู้ทดสอบให้การยอมรับถึงวันที่ 4 ของการเก็บรักษาซึ่งปลานิลแช่แข็งมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่นุ่ม เมื่อทำการกดการคืนตัวจะเกิดขึ้นได้ช้า มีกลิ่นคาวและกลิ่นไม่พึงประสงค์อย่างชัดเจน ขณะที่ปลานิลแช่แข็งในเจลาตินและสารสกัด ME เพียงอย่างเดียวผู้ทดสอบให้การยอมรับถึงวันที่ 5-6 ของการเก็บรักษา โดยปลานิลแช่แข็งมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่นุ่ม เมื่อทำการกดการคืนตัวจะเกิดขึ้นได้ช้า เริ่มมีกลิ่นคาวและกลิ่นไม่พึง

ประสงค์ปานกลาง ส่วนปลานิลแช่แข็งใน ME + Gel ผู้ทดสอบให้การยอมรับถึงประมาณวันที่ 6-8 ของการเก็บรักษา โดยปลานิลแช่แข็งมีลักษณะเนื้อสัมผัสค่อนข้างนุ่ม เมื่อทำการกดการคืนตัวจะเกิดขึ้นได้ช้า และมีกลิ่นคาว ซึ่งผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสจากผู้ทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าคุณภาพทางเคมีและจุลินทรีย์ของปลานิลแช่แข็งใน ME + Gel และชุดตัวอย่างอื่นๆ โดยคะแนนความชอบที่ลดลง แสดงถึงการเสื่อมคุณภาพของปลานิลแช่แข็งที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ค่า K-value ค่า TVB-N ค่า TBARS และค่า TVC ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละชุดตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและจุลินทรีย์มีความสัมพันธ์กับคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของปลานิลแช่แข็ง

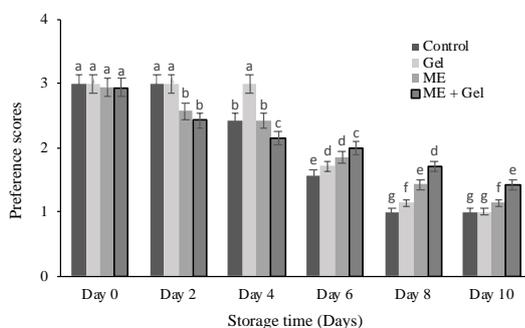


Figure 5 Changes in preference scores of tilapia fillets during refrigerated storage. Letters show significant differences among the groups at $p<0.05$. (Gel: Gelatin, ME: mushroom extract)

สรุป

การประยุกต์ใช้สารสกัดเห็ดเข็มทองความเข้มข้นร้อยละ 10 ร่วมกับเจลาตินความเข้มข้นร้อยละ 2 แสดงให้เห็นถึงการเสริมฤทธิ์ร่วมกัน (synergistic effect) โดยสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านกายภาพ เคมี จุลินทรีย์ และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของปลานิลและระหว่างการรักษาที่อุณหภูมิต่ำได้ถึงวันที่ 6-8 ของการรักษา ขณะที่ปลานิลแช่หุ้มควบคุมมีอายุการเก็บรักษาเพียง 4 วัน ดังนั้น การใช้สารสกัดเห็ดเข็มทองซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรร่วมกับสารเคลือบไฮโดรคอลลอยด์มีแนวโน้มที่จะนำมาพัฒนาต่อยอดในการเป็นสารถนอมอาหารจากธรรมชาติที่ปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปสัตว์น้ำ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Ahmad, T., Ismail, A., Ahmad, S.A., Khalil, K.A., Kumar, Y., Adeyemi, K.D. and Sazili, A.Q. 2017. Recent advances on the role of process variables affecting gelatin yield and characteristics with special reference to enzymatic extraction: A review. **Food Hydrocolloids** 63: 85-96.

Alparslan, Y., Yapici, H.H., Metin, C., Baygar, T., Gunlu, A. and Baygar, T. 2016. Quality assessment of shrimps preserved with orange leaf essential oil incorporated gelatin. **LWT-Food Science and Technology** 72: 457-466.

Andevari, G.T. and Rezaei, M. 2011. Effect of gelatin coating incorporated with cinnamon oil on the quality of fresh rainbow trout in cold storage. **International Journal of Food Science and Technology** 46: 2305-2311.

BAM (Bacteriological Analytical Manual). 2001. **Chapter3: Aerobic Plate Count**. Laboratory Methods. Available Source: <http://www.cfsan.fda.gov>, October 6, 2020.

Bao, H.N.D., Shinomiya, Y., Ikeda, H. and Ohshima, T. 2008. Antioxidative activity and antidiscoloration efficacy of ergothioneine in mushroom (*Flammulina velutipes*) extract added to beef and fish meats. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 56: 10032-10040.

Bao, H.N.D., Shinomiya, Y., Ikeda, H. and Ohshima, T. 2009. Preventing discoloration and lipid oxidation in dark muscle of yellowtail by feeding an extract prepared from mushroom (*Flammulina velutipes*) cultured medium. **Aquaculture** 295: 243-249.

Bao, H.N.D., Osako, K. and Ohshima, T. 2010. Value-added use of mushroom ergothioneine as a color stabilizer in processed fish meats. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 90: 1634-1641.

Chen, B.J., Zhou, Y.J., Wei, X.Y., Xie, H.J., Hider, R.C. and Zhou, T. 2016. Edible antimicrobial coating incorporating a polymeric iron chelator and its application in the preservation of surimi product. **Food and Bioprocess Technology** 9(6): 1031-1039.

- Chong, J.X., Lai, S. and Yang, H. 2015. Chitosan combined with calcium chloride impacts fresh-cut honeydew melon by stabilising nanostructures of sodium carbonate soluble pectin. **Food Control** 53: 195-205.
- Cobb, E.F., Vanderzant, C., Hanna, M.O. and Yeh, C.P.S. 1976. Effect of ice storage on microbiological and chemical changes in shrimp and melting ice in a model system. **Journal of Food Science** 41(1): 29-34.
- Conway, E.J. and Byrne, A. 1936. An absorption apparatus for the microdetermination of certain volatile substances I. The microdetermination of ammonia. **Journal of Biochemistry** 27: 419-429.
- Dubost, N.J., Oua, B. and Beelman, R.B. 2007. Quantification of polyphenols and ergothioneine in cultivated mushrooms and correlation to total antioxidant capacity. **Food Chemistry** 105: 727-735.
- Ehira, S. 1976. A biochemical study on the freshness of fish. **Bulletin of the Tokai Regional Fisheries Research Laboratory** 88: 130-132.
- Encarnacion, B.A., Fagutao, F., Shozen, K., Hirono, I. and Ohshima, T. 2011. Biochemical intervention of ergothioneine-rich edible mushroom (*Flammulina velutipes*) extract inhibits melanosis in crab (*Chionoecetes japonicus*). **Food Chemistry** 127: 1594-1599.
- Encarnacion, B.A., Fagutao, F., Jintasataporn, O., Worawattanamateekul, W., Hirono, I. and Ohshima, T. 2012. Application of ergothioneine-rich extract from an edible mushroom *Flammulina velutipes* for melanosis prevention in shrimp, *Penaeus monodon* and *Litopenaeus vannamei*. **Food Research International** 45: 232-237.
- Feng, X., Ng, V.K., Krajnik, M.M. and Yang, H. 2017. Effects of fish gelatin and tea polyphenol coating on the spoilage and degradation of myofibril in fish fillet during cold storage. **Food and Bioprocess Technology** 10: 89-102.
- Khalafalla, F.A., Ali, F.H.M. and Hassan, A.R.H.A. 2015. Quality improvement and shelf-life extension of refrigerated Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets using natural herbs. **Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences** 4(1): 33-40.
- Khodanazary, A. 2019. Quality characteristics of refrigerated mackerel *Scomberomorus commerson* using gelatin-polycaprolactone composite film incorporated with lysozyme and pomegranate peel extract. **International Journal of Food Properties** 22(1): 2057-2071.
- Khunsoongsern, N. 2003. Quality change of tilapia fillets stored under modified atmosphere. Master Thesis of Science in Food Technology, Suranaree University. (in Thai)
- Kulawik, P., Jamroz, E., Zajac, M., Guzik, P. and Tkaczewska, J. 2019. The effect of furcellaran-gelatin edible coatings with green and pu-erh tea extracts on the microbiological, physicochemical and sensory changes of

- salmon sushi stored at 4 °C. **Food Control** 100: 83-91.
- Lin, L., Cui, F., Zhang, J., Gao, X., Zhou, M., Xu, N., Zhao, H., Liu, M., Zhang, C. and Jia, L. 2016. Antioxidative and renoprotective effects of residue polysaccharides from *Flammulina velutipes*. **Carbohydrate Polymers** 146: 388-395.
- National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards. 2013. **Thai agricultural standard TAS 7001-2013: tilapia**. Notification of the Ministry of Agriculture and Cooperatives. Available Source: https://www.acfs.go.th/files/files/commodity-standard/20190609205206_257597.pdf, December 14, 2020. (in Thai)
- Nie, X., Wang, L., Wang, Q., Lei, J., Hong, W., Huang, B. and Zhang, C. 2018. Effect of a sodium alginate coating infused with tea polyphenols on the quality of fresh Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus*) Fillets. **Journal of Food Science** 83(6): 1695-1700.
- Nirmal, N.P. and Benjakul, S. 2009. Effect of ferulic acid on inhibition of polyphenoloxidase and quality changes of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during iced storage. **Food Chemistry** 116: 323-331.
- Pahila, J., Kaneda, H., Nagasaka, R., Koyama, T. and Ohshima, T. 2017. Effects of ergothioneine-rich mushroom extracts on lipid oxidation and discoloration in salmon muscle stored at low temperatures. **Food Chemistry** 233: 273-281.
- Plaipetch, P. 2016. Nutritional management for culturing Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Thai Science and Technology Journal** 24(1): 12-39. (in Thai)
- Raeisi, M., Tajik, H., Aliakbarlu, J., Mirhosseini, S.H. and Hosseini, S.M.H. 2015. Effect of carboxymethyl cellulose-based coatings incorporated with *Zataria multiflora* Boiss. essential oil and grape seed extract on the shelf life of rainbow trout fillets. **LWT-Food Science and Technology** 64: 898-904.
- Santhi, P. and Tepwong, P. 2015. Effect of black mushroom trimming extract on the melanosis formation and quality changes of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during iced storage, pp. 1192-1202. In **Proceedings of 53rd Kasetsart University Annual Conference**. Kasetsart University Research and Development Institute, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Santhi, P., Maneerote, J. and Tepwong, P. 2016. A study of the antioxidant activities and polyphenoloxidase inhibitory effects of several commercial mushroom trimming extracts and its application on inhibiting melanosis in white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). **Naresuan University Journal: Science and Technology** 24(2): 207-217. (in Thai)
- Shan, B., Cai, Y.Z., Brooks, J. and Corke, H. 2007. The in vitro antibacterial activity of dietary species and medicinal herb extracts. **International**

- Journal of Food Microbiology** 117: 112-119.
- Tepwong, P., Giri, A., Sasaki, F., Fukui, R. and Ohshima, T. 2012. Mycobial enhancement of ergothioneine by submerged cultivation of edible mushroom mycelia and its application as an antioxidative compound. **Food Chemistry** 131: 247-258.
- Uchiyama, K. 1978. **Analytical method for estimate freshness of fish**. Available Source: http://www.seafdec.or.th/index.php/downloads/doc_download/560-analyticalmethods-for-Estimating-freshness-of-fish, February 1, 2020.
- Vargas, M., Pastor, C., Chiralt, A., McClements, D.J. and Martinez, C.G. 2008. Recent advances in edible coatings for fresh and minimally processed fruits. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition** 48(6): 496.
- Wang, Q., Cao, J., Yu, H., Zhang, J., Yuan, Y., Shen, X. and Li, C. 2019. The effects of EGCG on the mechanical, bioactivities, cross-linking and release properties of gelatin film. **Food Chemistry** 271: 204-210.
- Wei, P., Cao, J., Shen, X. and Li, C. 2019. The preservation effect and mechanism of gelatin on golden pompano (*Trachinotus blochii*) fillets during cold storage. **Food Science and Technology** 39(2): 626-631.
- Wu, J., Sun, X., Guo, X., Ji, M., Wang, J., Cheng, C., Cheng, L., Wen, C. and Zhang, Q. 2018. Physicochemical, antioxidant, in vitro release, and heat sealing properties of fish gelatin films incorporated with β -cyclodextrin/curcumin complexes for apple juice preservation. **Food and Bioprocess Technology** 11(2): 447-461.
- Yen, G.C. and Hsieh, P.P. 1995. Antioxidative activity and scavenging effects on active oxygen of xylose-lysine maillard reaction products. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 67(3): 415-420.
- Yu, D., Jiang, Q., Xu, Y. and Xia, W. 2017. The shelf life extension of refrigerated grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets by chitosan coating combined with glycerol monolaurate. **International Journal of Biological Macromolecules** 101: 448-454.
- Zhao, X., Wu, J., Chen, L. and Yang, H. 2019. Effect of vacuum impregnated fish gelatin and grape seed extract on metabolite profiles of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets during storage. **Food Chemistry** 293: 418-428.
- Zhuang, S., Li, Y., Jia, S., Hong, H., Liu, Y. and Luo, Y. 2019. Effects of pomegranate peel extract on quality and microbiota composition of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets during chilled storage. **Food Microbiology** 82: 445-454.

พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขอบตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ ในกระบวนการเจาะรูด้วยแม่พิมพ์

The Metamorphosis Behavior of Sheared Edge on Ultra High Strength Steel in Piercing Process

วิชัย พุ่มจันทร์* และ คมกริช ละวรรณวงษ์

Wichai Pumchan* and Komgrit Lawanwong

Received: 20 December 2020, Revised: 18 August 2021, Accepted: 27 September 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขอบตัดของรูเจาะบนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษที่ระยะเคลียแรนซ์ 4 ระดับได้แก่ 3%, 10%, 20% และ 40% โดยใช้ฟันเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. ลงบนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษเกรดต่างๆ โดยใช้ความหนา 1.2 มม. วัสดุทำแม่พิมพ์เจาะรูคือเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็นเกรด JIS; SKD11 ชูบแข็งที่ระดับความแข็งสูงสุด 62±2 HRC วิเคราะห์อิทธิพลของระยะเคลียแรนซ์ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของขอบตัดรูเจาะในขณะเจาะรูด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ผลการทดลองพบว่า ขอบตัดของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเมื่อใช้ระยะเคลียแรนซ์แคบสามารถสร้างรอยตัดเนียนได้ยาวมาก แต่เมื่อระยะเคลียแรนซ์กว้างขึ้นพบว่ารอยตัดเนียนลดลง สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษพบว่าขอบตัดมีรอยตัดเนียนสั้นมาก เมื่อใช้ระยะเคลียแรนซ์แคบ (3-5%) ขอบตัดมีรอยตัดเนียนสั้น เนื่องจากความสามารถในการยึดตัวต่ำ ดังนั้นการใช้ระยะเคลียแรนซ์แคบจึงไม่สามารถสร้างรอยตัดเนียนได้ เมื่อระยะเคลียแรนซ์กว้างขึ้น (8-10%) รอยตัดเนียนยาวขึ้น อย่างไรก็ตาม รอยตัดเนียนลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะเคลียแรนซ์กว้างเกินกว่า 10% จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ค่าความแตกต่างของระยะเคลียแรนซ์ส่งผลต่อรอยตัดเนียนของรูเจาะของทั้งเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: เคลียแรนซ์, เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง, รอยตัดเนียน, กระบวนการเจาะรู

คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ถนนเพชรเกษม ด.หนองแก อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรสาคร 77110

Faculty of Industrial and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Petchkasem Road, Nong Kae, Hua Hin, Prachuap Khiri Khan 77110, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): wichai.poo@rmutr.ac.th Tel: 08 2899 3153

ABSTRACT

The objective of this research is to study the metamorphosis behavior of the sheared edge of piercing hole on high and ultra-high strength steel sheet at four levels of the clearance: 3%, 10%, 20% and 40%. The different grades of high and ultra-high strength steel sheet with 1.2 mm thickness were tested with the circular piercing punch with 20 mm diameter. The tooling was produced from cold work tool steel grade SKD11 (JIS) with high hardness level at 60 ± 2 HRC. The finite element technique combined with statistical analysis was performed to investigate the effect of the die clearance on the metamorphosis behavior of the sheared edge of piercing hole during the piercing process. The experimental results showed that the long shear surface was observed for high strength steel workpieces at the narrow clearance. While the clearance increased, the shear surface of piercing hole decreased. For ultra-high strength steels, the small shear surface was found for the piercing at the narrow clearance (3-5%) because of low elongation characteristic. Therefore, the narrow clearance was unable to produce the long-sheared surface. When applying the wider clearance at (8-10%), the sheared surface was longer. However, the sheared surface gradually reduced when the clearance was wider than 10%. Results from statistical analysis emphasized that the difference in clearance distance significantly influenced the sheared surface of piercing hole for both high and ultra-high strength steels.

Key words: clearance, high strength steel, sheared surface, piercing process

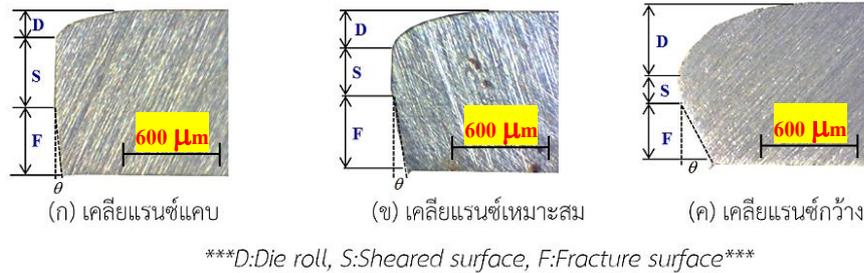
บทนำ

กระบวนการเจาะรู (Piercing process) แม้ว่า เป็นงานพื้นฐานของอุตสาหกรรมปั๊มชิ้นส่วน โลหะที่ ดูเหมือนไม่ซับซ้อนนักแต่ก็ขึ้นกับความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการเจาะรูต้องคำนึงถึงการนำไปใช้ใน กระบวนการต่อไป โดยเฉพาะอุตสาหกรรมผลิต ชิ้นส่วนรถยนต์ที่ใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเข้ามา ทดแทนเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งสามารถลดน้ำหนัก ของตัวถังรถยนต์ไปได้มาก และในอนาคตโครงสร้าง ของรถยนต์มีการใช้เหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูงเกิน กว่า 1 GPa ด้วยเหตุนี้ฐานข้อมูลของกระบวนการ เจาะรูบนวัสดุชนิดใหม่จึงสำคัญและมีความจำเป็นมาก จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า มีงานวิจัยหลาย ชิ้นที่วิจัยเกี่ยวกับกระบวนการเจาะรูบนเหล็กกล้า ความแข็งแรงสูง อาทิเช่น การอธิบายอิทธิพลของ

ระยะเคลียแรนซ์ในกระบวนการตัดชิ้นงานแม่พิมพ์ ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Hambli *et al.*, 2003) การเสนอ การวิเคราะห์ตัวแปรของการตัดแผ่นทองแดงด้วยไฟ ไนต์เอลิเมนต์ เช่น สัมประสิทธิ์ความเสียหาย ระยะ เคลียแรนซ์ รูปร่างของชิ้นงาน โดยนำเสนอสมบัติ วิสโคพลาสติกแบบใหม่เพื่อทำนายการแตกหักที่ แม่นยำ นำไปสู่การวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดรอย ตัดเฉือน (Husson *et al.*, 2008) รัศมีขนาดเล็กริเวณ คมตัดของพUNCHและคายพร้อมทั้งใช้ระยะเคลียแรนซ์ ที่แคบมาก ในการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงทำให้ รอยตัดเฉือนยาวมากขึ้น (Mori *et al.*, 2013) การศึกษา ผลกระทบของระยะเคลียแรนซ์ในกระบวนการตัด ด้วยพUNCHที่เหลี่ยมและมีรัศมีที่มุมเพื่อยืดอายุการใช้ งานให้ได้มากที่สุด (Subramonian *et al.*, 2013b) และ ในปีเดียวกัน มีการศึกษาแรงในกระบวนการตัด

ความเร็วสูงสำหรับชิ้นส่วนอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Subramonian *et al.*, 2013a) วิเคราะห์กลไกการแตกหักบริเวณขอบรูในระหว่างการเจาะรูบนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงจากนั้นนำไปเข้าสู่กระบวนการขยายรู (Wang *et al.*, 2014) วิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิในกระบวนการตัดความเร็วสูงบนวัสดุ Bronze C5191 (Hu *et al.*, 2015) สร้างวิธีการเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานด้วยวิธีการตัดละเอียด (Fine blanking) แบบใหม่โดยไม่ใช้แหวนจิก (V-Ring) ทำให้ลดความยุ่งยากในการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์แต่ยังได้ชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงสูง (Wang, 2015) อีกทั้งศึกษาขอบตัดของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเพื่อจะนำไปเข้าสู่กระบวนการขยายรู โดยมุ่งเน้นพฤติกรรมการแตกของรู (Wang *et al.*, 2015) การศึกษาการสึกหรอของพื้นที่ความแข็งต่างกัน ในกระบวนการตัดด้วยระยะเคลียแรนซ์ต่างกัน (Akyürek *et al.*, 2017) การศึกษาผลกระทบจากการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษที่มีความแข็งแรงเกินกว่า 1 GPa เช่น การโค้งตัวของพื้นที่ ประเภทของการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ผ่านทางารทดลองและการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Won *et al.*, 2018) การวิเคราะห์อิทธิพลของระยะเคลียแรนซ์ที่ส่งผลต่อคุณภาพขอบตัดรอยแตกบนชิ้นงานในการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดใหม่ซึ่งมีส่วนผสมแมงกานีส (Chang *et al.*, 2018) การเปลี่ยนแปลงของขอบตัดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการตัดจากคายที่มีมุมหลบ (Die angular) แตกต่างกันผ่านการทดลอง 1 แส่นครั้ง (Jaafar *et al.*, 2019) การศึกษากลไกการแตกที่เกิดขึ้นกับขอบของรูบนวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและเหล็กกล้า

ความแข็งแรงเกรดพิเศษ (He *et al.*, 2019) การพัฒนากระบวนการตัดขอบเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงโดยการใช้พื้นที่เอียง 0, 30 และ 45 องศา ซึ่งผลการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มระยะรอยตัดเนียนได้เนื่องจากการเอียงพื้นที่สามารถชะลอการเชื่อมต่อนกันของความเค้นดึงส่งผลให้การแตกเกิดขึ้นช้า (Komgrit and Pongsakorn, 2019) ในส่วนการศึกษาพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปของเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเกรนแตกต่างกัน ด้วยกระบวนการตัดโลหะโดยการตัดชิ้นงานด้วยเกลียวแรนซ์ในระดับที่แตกต่างกัน สังเกตคุณภาพชิ้นงานที่เปลี่ยนไปและค้นหาเคลียแรนซ์ที่เหมาะสมด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (He *et al.*, 2020) ในปี 2020 มีการนำเสนอการตัดด้วยพื้นที่ที่มีป่า โดยเรียกว่า “Humped bottom punch” (Won *et al.*, 2020) เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของขอบตัดชิ้นงาน และป้องกันการแตกร้าวบริเวณขอบรูบนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง จากงานวิจัยหลายเรื่องดังที่ได้กล่าวมาแล้วแสดงให้เห็นถึงความน่าสนใจในการพัฒนากระบวนการผลิตชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ หากแต่ว่าข้อมูลของการเลือกใช้ระยะเคลียแรนซ์แนะนำเป็นช่วงๆ เมื่อผู้วิจัยทำการทดลองเบื้องต้นโดยใช้ค่าระยะเคลียแรนซ์แนะนำได้ผลการตัดแสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งไม่เพียงพอโดยเฉพาะกับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมากที่มีอัตราการยืดตัวต่ำ ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอการทดลองศึกษาถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงขอบตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษในกระบวนการเจาะรูด้วยแม่พิมพ์ที่ระยะเคลียแรนซ์แตกต่างกันเพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับการเลือกใช้อย่างถูกต้องต่อไป



ภาพที่ 1 ลักษณะขอบตัดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ได้จากการตัดที่ระยะเคลียแรนซ์ต่างกัน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการตัดชิ้นงานเหล็กแผ่น ลักษณะทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. ความหนา 1.2 มม. กำหนดชิ้นงานเป็นสองกลุ่มคือ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y, และ 780G กลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 980Y และ 1180Y ทั้งหมดมีความหนา 1.2 มม. วัสดุทำแม่พิมพ์คือเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็นเกรด JIS; SKD11 ชุบ

แข็งที่ระดับความแข็งสูงสุด 60 ± 2 HRC ใช้ระยะเคลียแรนซ์ในการทดลองทั้งหมด 4 ระดับ คือ ได้แก่ 3%, 10%, 20% และ 40% ของความหนาชิ้นงาน เพื่อให้ได้ความเที่ยงตรงสูงสุดพันซ์และคายถูกประกอบบน คายเซทแบบสี่เสาพร้อมกับเครื่องป้อนชิ้นงานอัตโนมัติ ดังภาพที่ 2(ก) ติดตั้งเข้ากับเครื่องปั๊มโลหะแบบเพลลาข้อเหวี่ยงขนาด 60 ตัน ดังภาพที่ 2(ข) วัสดุชิ้นงานได้รับการทดสอบสมบัติทางกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงดังภาพที่ 2(ค)



(ก) พันซ์-คายนและคายนเซท



(ข) เครื่องปั๊มโลหะ



(ค) เครื่องทดสอบแรงดึง

ภาพที่ 2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

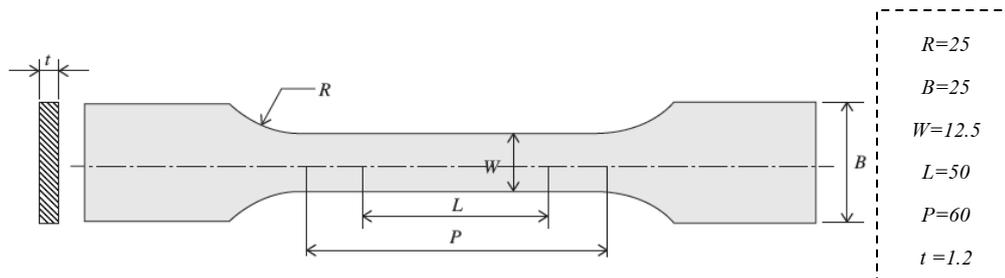
2. การจำลองการตัดด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของชิ้นงานขณะทำการเจาะรูด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ Deform 2D

Version 7.2 แบบ Perpetual license และเพื่อให้ผลการคำนวณถูกต้องการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำคัญมากดังนั้นจึงต้องทดสอบหาความเค้นจริง-ความเครียดจริง (True stress-strain)

ผู้วิจัยจึงเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึงด้วยมาตรฐานญี่ปุ่น JIS13-B ดังภาพที่ 3 พร้อมติดตั้งสเตรนเกจเพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของชิ้นทดสอบ จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ภายหลังจากทดสอบสามารถคำนวณความเค้นจริง-ความเครียดจริงได้ดังภาพที่ 4 และสามารถสรุปถึงสมบัติทางกลของแต่ละวัสดุได้ดังตารางที่ 1 สำหรับแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์กำหนดให้

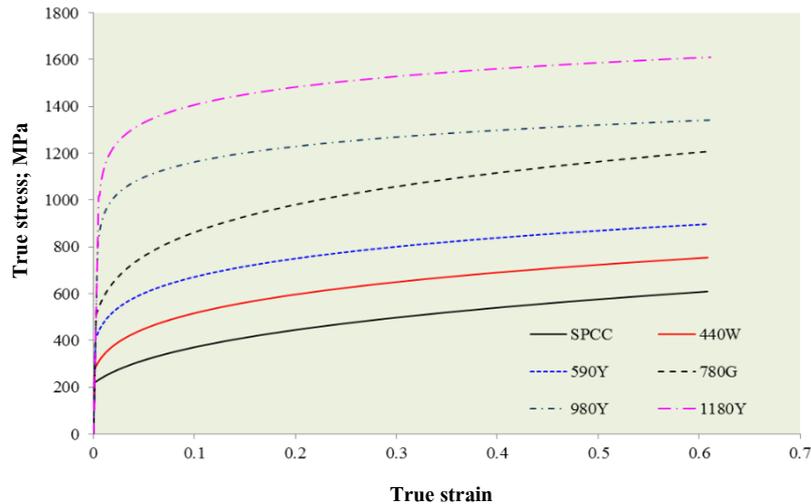
พันธ์ คายและแผ่นกคชิ้นงานมีเป็นสมบัติแข็งเกร็ง (Rigid body) ส่วนวัสดุชิ้นงานให้เปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) พิกัดแบบสองมิติ รอบแกน (Half model) ใช้เอลิเมนต์สำหรับชิ้นงาน 3000 เอลิเมนต์ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายคือ 0.1 เลือกใช้เกณฑ์การขาด (Critical damage value) ของ Cockroft&Latham



ภาพที่ 3 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน JIS13-B (หน่วยเป็น มม.)

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงาน

Mechanical Properties	Workpiece Materials					
	SPCC	440W	590Y	780G	980Y	1180Y
Yield strength (MPa)	215	339	405	512	707	823
Tensile strength (MPa)	321	460	619	807	1060	1285
Stress coefficient (K) (MPa)	415	817	1020	1320	1630	1695
Strain hardening exponent (n)	0.16	0.14	0.21	0.22	0.12	0.07
Critical damage value; (C) (Cockroft & Latham)	1.47	1.12	1.135	1.15	1.05	1.08



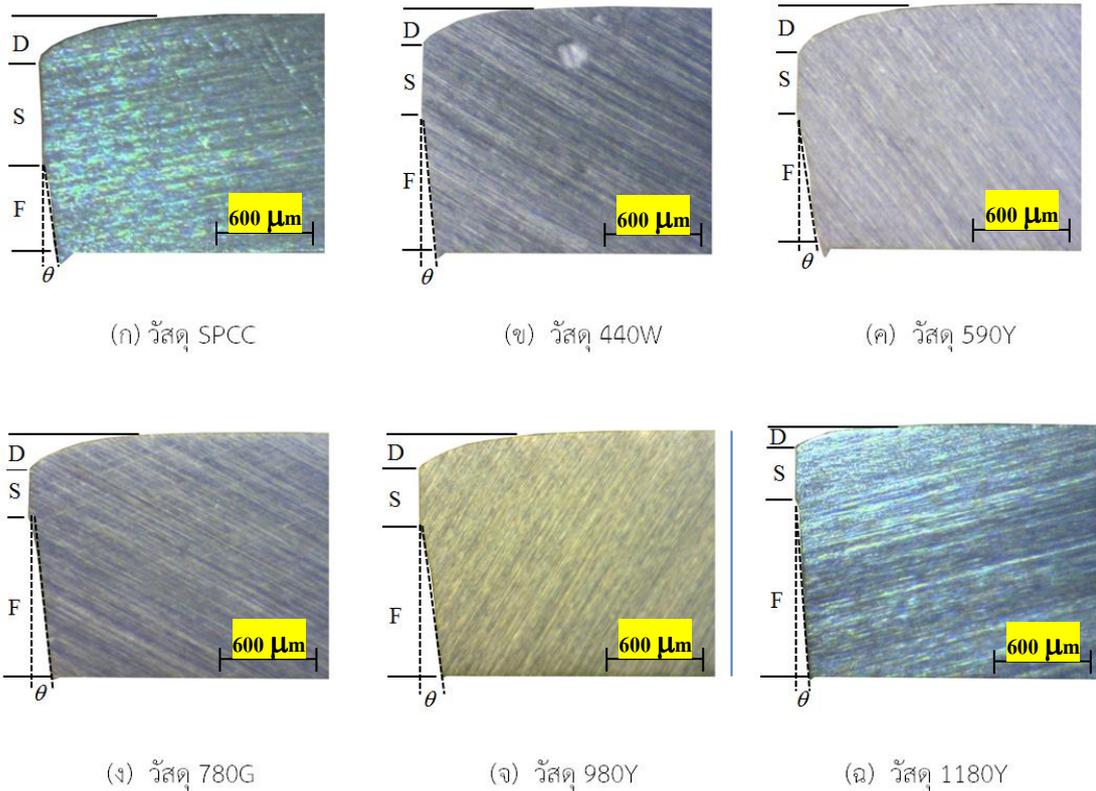
ภาพที่ 4 ความเค้น-ความเครียดจริงของวัสดุขึ้นงาน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของขอบตัดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

เพื่อแสดงให้เห็นถึงภาพรวมของขอบตัดวัสดุขึ้นงานที่มีอยู่ในทุกอุตสาหกรรมอย่างชัดเจน จึงได้นำเสนอชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC เพิ่มเข้ามาในการทดลอง เนื่องจากเป็นเหล็กที่ถูกใช้งานมาอย่างยาวนานและมีปรากฏอยู่ในทุกอุตสาหกรรมในประเทศและต่างประเทศ รูปตัดขวางของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง-เกรดพิเศษเมื่อตัดด้วยระยะเคลียแรนซ์ 10% แสดงในภาพที่ 5 รายละเอียดบนขอบตัดคือ ส่วนโค้งมน; D, รอยตัดเฉียง; S และ รอยฉีกขาด; F จากผลการทดลองสังเกตได้ว่าขอบตัดเหล็กต่างชนิดกันเมื่อตัดด้วยระยะเคลียแรนซ์เท่ากันพบว่าส่วนต่างๆ บนขอบตัดแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ภาพที่ 5(ก) คือรูปตัดขวางของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC พบส่วนโค้งมน, รอยตัดเฉียง, รอยฉีกขาดและมีมุมเอียงของ

ชิ้นงานชัดเจน ในภาพที่ 5(ข) - (ค) แสดงภาพตัดขวางของเหล็ก 440W และ 590Y พบว่ามีส่วนโค้งมน, รอยตัดเฉียง, รอยฉีกขาดและมีมุมเอียงของชิ้นงานใกล้เคียงกันแต่ส่วนโค้งมนจะมีน้อยกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC กรณีเหล็ก 780G และ 980Y ในภาพที่ 5(ง) - (จ) พบความแตกต่างกันของรอยฉีกขาดที่ยาวมากและมีรอยตัดเฉียงและส่วนโค้งมนเพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาเหล็ก 1180Y ภาพที่ 5(ฉ) พบว่ารอยฉีกขาดยาวมาก มีรอยตัดเฉียงและส่วนโค้งมนเพียงเล็กน้อย จากผลการตัดชิ้นงานสามารถสรุปได้ว่า หากใช้ระยะเคลียแรนซ์เท่ากันนั้นไม่สามารถตอบสนองการใช้งานในปัจจุบันได้ทั้งหมดซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ในส่วนของพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของขอบตัดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง-เกรดพิเศษในขณะตัดชิ้นงานถูกนำเสนอด้วยการจำลองการตัดด้วยคอมพิวเตอร์ดังต่อไปนี้

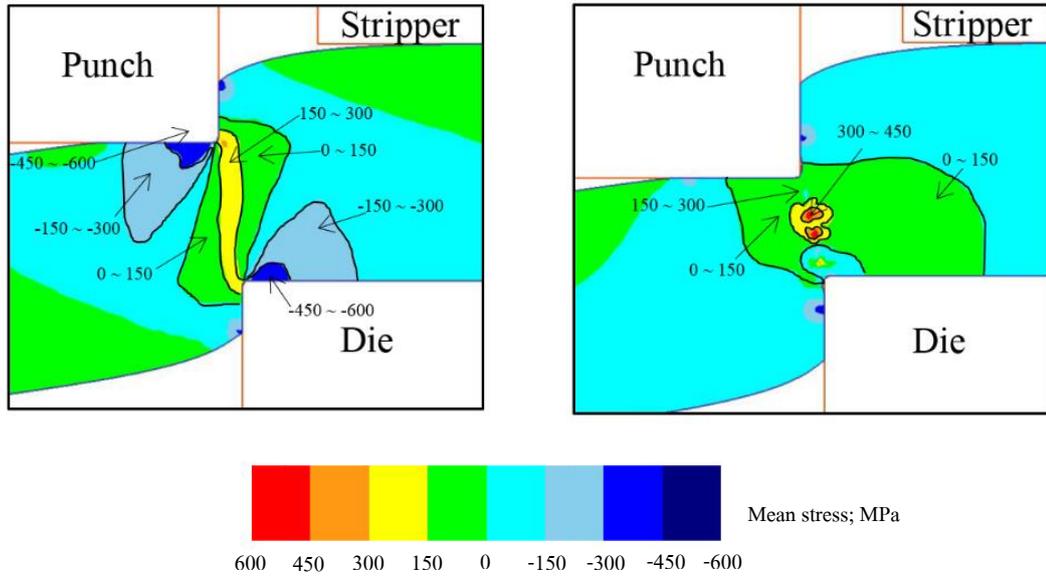


ภาพที่ 5 รอยตัดขวางของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง-เกรดพิเศษที่ระยะเคลือบเรซิน 10%

สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปในระหว่างการตัดชิ้นงานนั้นเริ่มนำเสนอการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับชิ้นงานที่เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC ที่มีระดับความแข็งแรงต่ำสุด (ยึดตัวได้ดีที่สุด) และเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 1180Y ซึ่งมีความแข็งแรงสูงมากที่สุด (การยึดตัวต่ำที่สุด) เนื่องจากทั้งสองวัสดุมีอัตราการยึดตัวต่างกันมากดังนั้นจึงไม่สามารถเปรียบเทียบระยะกั้นลึกลับที่ตำแหน่งเดียวกันได้

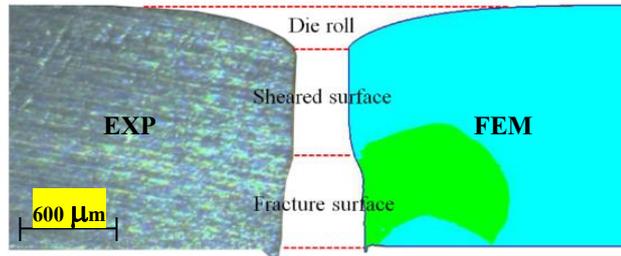
การทดลองพบว่า การกระจายตัวของความเค้นกรณีเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC ในขณะที่ตัดชิ้นงานที่ระยะกั้นลึกลับ 0.5 มม. ดังภาพที่ 6(ก) พบความเค้นดึงสูงสุดมีค่าระหว่าง 150 ~ 300 MPa บริเวณปลายคมตัดพันธะเชื่อมยาวไปถึงปลายคมตัด

ของคาน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาคัดขอบเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงด้วยพันธะเอียง (Komgrit and Pongsakorn, 2019) และเมื่อพันธะคดลึกลงไปกระทั่งระยะ 0.7 มม. ซึ่งเป็นช่วงที่ก่อนที่ชิ้นงานจะแยกออกจากกัน ดังแสดงในภาพที่ 6(ข) พบการกระจายตัวของความเค้นดึงค่าระหว่าง 300 ~ 450 MPa เกิดขึ้นที่กลางชิ้นงาน แสดงว่าชิ้นงานเริ่มแยกตัวออกจากกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีระยะกั้นลึกลับ 0.7 มม. (ระยะกั้นลึกลับคือ ส่วนโค้งมน+รอยตัดเอียง) ซึ่งขอบตัดชิ้นงานที่ได้จากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับขอบตัดจริงวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC แสดงในภาพที่ 6(ค)



(ก) ระยะกินลึก 0.5 มม.

(ข) ระยะกินลึก 0.7 มม.

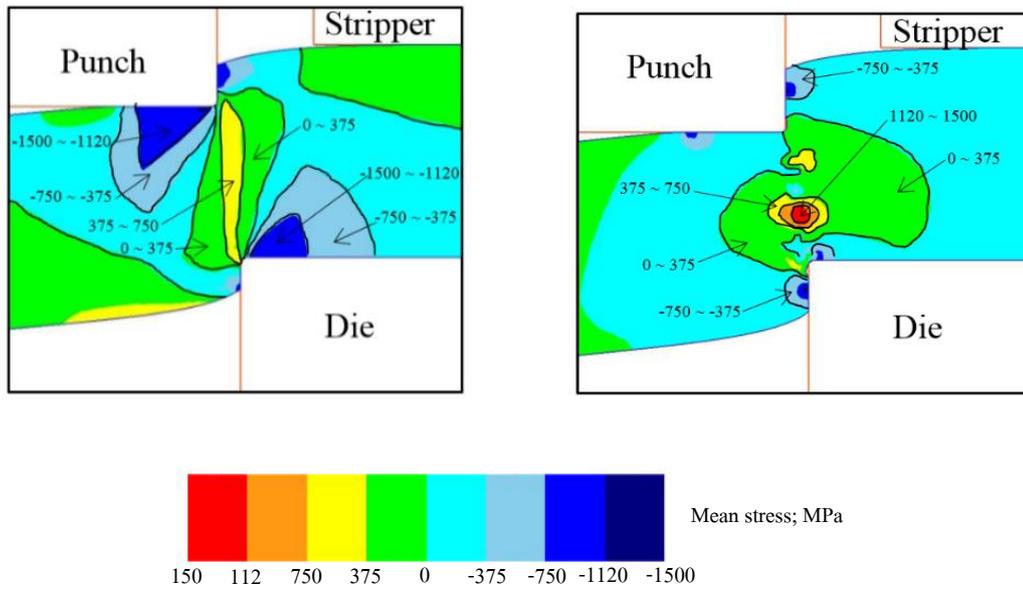


(ค) การเปรียบเทียบขอบตัดระหว่างชิ้นงานจริงและการคำนวณ

ภาพที่ 6 การกระจายตัวของความเค้นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC

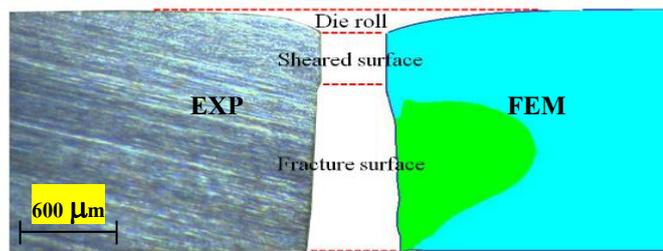
ในการจำลองการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 1180Y ที่ระยะกินลึก 0.35 มม. ดังภาพที่ 7(ก) พบว่าความเค้นดึงสูงสุดมีค่าระหว่าง 375 ~ 750 MPa เกิดขึ้นที่ปลายคมตัดพันธ์เชื่อมยาวไปถึงปลายคมตัดตาย เมื่อเพิ่มระยะกินลึกเพียงเล็กน้อย (ที่ระยะ 0.4 มม.) ดังภาพที่ 7(ข) ความเค้นดึงค่าระหว่าง 1120 ~ 1500 MPa เกิดขึ้นที่กลางชิ้นงาน จากนั้นชิ้นงานจึงขาดออกจากกัน ทำให้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 1180Y ระยะกินลึกน้อยมากเพียง 0.4 มม. เท่านั้น ขอบตัดชิ้นงานที่ได้จากการ

จำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับขอบตัดจริงวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 1180Y แสดงในภาพที่ 7(ค) จากผลการจำลองการตัดของทั้งสองวัสดุสามารถสรุปสาเหตุที่ความยาวของรอยตัดเนียนแตกต่างกันได้จากความเค้นดึงที่เชื่อมต่อกันจากคมตัดพันธ์เข้าสู่คมตัดตาย เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC ความเค้นดึงเชื่อมต่ที่ระยะกินลึก 0.5 มม. ในขณะที่เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 1180Y ความเค้นเชื่อมต่ที่ระยะกินลึก 0.35 มม. ส่งผลให้รอยตัดเนียนแตกต่างกันนั่นเอง



(ก) ระยะกั้นลึ้ก 0.35 มม.

(ข) ระยะกั้นลึ้ก 0.4 มม.



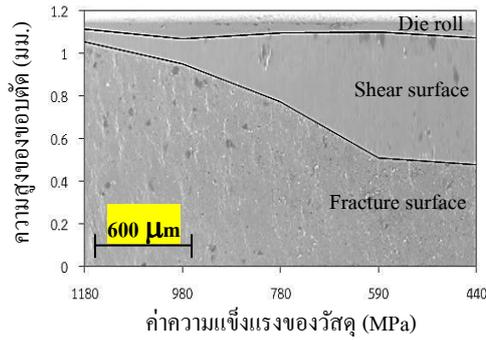
(ค) การเปรียบเทียบขอบตัดระหว่างชิ้นงานจริงและการคำนวณ

ภาพที่ 7 การกระจายตัวของความเค้นวัสดุเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 1180Y

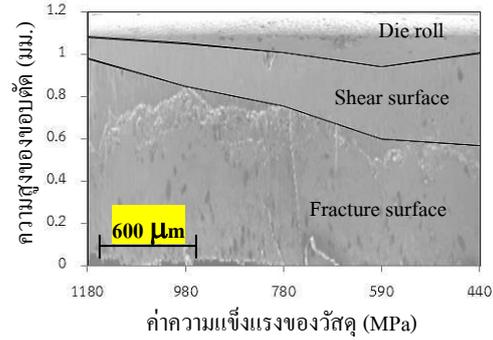
2. ระดับความแข็งแรงของวัสดุที่ส่งผลต่อลักษณะขอบตัดชิ้นงาน

ในขั้นตอนทั่วไปของการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของขอบตัดของแต่ละวัสดุเมื่อถูกตัดด้วยแม่พิมพ์สามารถสังเกตได้จากภาพที่ 5(ก) - (ง) ในหัวข้อก่อนหน้า และบทวิเคราะห์ต่อไปนี้จะนำผลที่ได้จากการตัดวัสดุที่มีความแข็งแรงและระยะเคลือบแรนซ์แตกต่างกันนำมาสร้างเป็นกราฟต่อเนื่องกัน

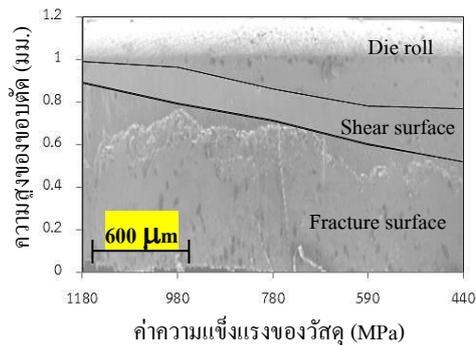
ด้วยซอฟต์แวร์ไมโครซอฟท์เอ็กเซล จากนั้นได้กราฟฟิกแสดงส่วนที่เป็นส่วนโค้งมน, รอยตัดเฉียงและรอยฉีกขาด ทำให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของขอบตัดเมื่อผ่านการตัดในแต่ละระยะเคลือบแรนซ์อย่างชัดเจน ซึ่งผู้วิจัยนำเสนอการเปลี่ยนแปลงของขอบตัดชิ้นงานเมื่อใช้ระยะเคลือบแรนซ์ในการทดลองทั้งหมด 4 ระดับ คือ 3%, 10%, 20% และ 40% ดังภาพที่ 8(ก) - (ง)



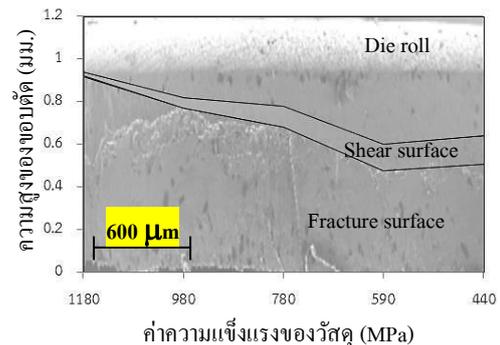
(ก) ระยะเคลียแรนซ์ 3%



(ข) ระยะเคลียแรนซ์ 10%



(ค) ระยะเคลียแรนซ์ 20%



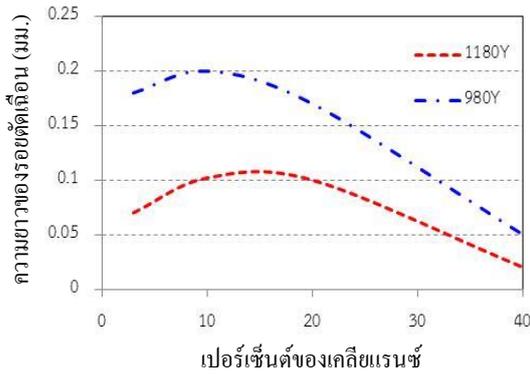
(ง) ระยะเคลียแรนซ์ 40%

ในบทวิจารณ์นี้มิได้นำเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SPCC มาร่วมวิเคราะห์เนื่องจากอยู่นอกกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

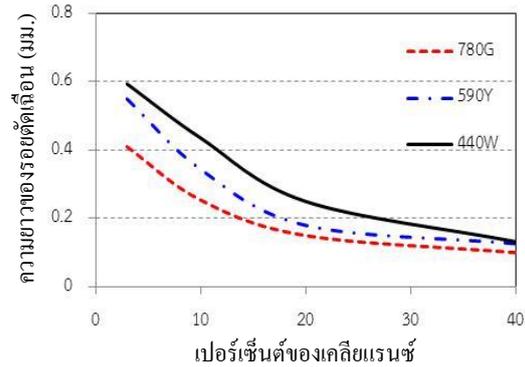
ภาพที่ 8 ความแข็งแรงของวัสดุที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขอบตัด

เมื่อพิจารณาขอบตัดของวัสดุต่างๆ ที่ระยะเคลียแรนซ์ 3% ดังภาพที่ 8(ก) พบว่าวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดคือ 1180 MPa มีรอยตัดเฉียงสั้นที่สุด และรอยตัดเฉียงมีแนวโน้มยาวขึ้นเรื่อยๆ เมื่อตัดด้วย

วัสดุที่มีความแข็งแรงต่ำ และที่ระยะเคลียแรนซ์ 10%, 20% และ 40% ดังภาพที่ 8(ข) - (ง) มีการเปลี่ยนแปลงของขอบตัดแนวโน้มเดียวกันทั้งหมดทุก ระยะเคลียแรนซ์



(ก) กลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ



(ข) กลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

ภาพที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของรอยตัดเฉือนเมื่อตัดด้วยระยะเฉื่อยเรนซ์ต่างกัน

จากภาพที่ 9(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของรอยตัดเฉือนของกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษพบว่ารอยตัดเฉือนของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษแคบมากเมื่อตัดด้วยระยะเฉื่อยเรนซ์แคบ (3%) และเมื่อเฉื่อยเรนซ์กว้างขึ้นรอยตัดเฉือนจึงเริ่มยาวขึ้นและกลับไปลดลงอีกครั้งเมื่อระยะเฉื่อยเรนซ์มากกว่า 20% ในขณะที่กลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ขนาดของรอยตัดเฉือนจะยาวเมื่อใช้ระยะเฉื่อยเรนซ์แคบในการตัดและเมื่อระยะเฉื่อยเรนซ์กว้างขึ้นเรื่อยๆ รอยตัดเฉือนจึงลดสั้นลง (Hamblin *et al.*, 2003) ตามลำดับ ดังภาพที่ 9(ข) อย่างไรก็ตามเมื่อกลับไปวิเคราะห์จากทฤษฎีการกำหนดคุณภาพชิ้นงานของงานแม่พิมพ์ตัด ที่กล่าวว่า การใช้ระยะเฉื่อยเรนซ์แคบจะได้รอยตัดเฉือนที่ยาว ชิ้นงานที่ได้จะมีความเที่ยงตรงสูง (He *et al.*, 2019) ผลการทดลองนี้สามารถสนับสนุนทฤษฎีที่ผ่านมาได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงที่ 440-590 MPa ที่จัดอยู่ในกลุ่มเริ่มต้นของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง พบรอยตัดเฉือนยาวสอดคล้องกับทฤษฎีระยะเฉื่อยเรนซ์ในงานแม่พิมพ์ตัด หากแต่ถ้าเมื่อตัดชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูงมากเกินกว่า 1 GPa ควรจะเริ่มต้นการตัดชิ้นงานด้วยระยะเฉื่อยเรนซ์ 10-20% จะทำให้พบรอยตัดเฉือนบนชิ้นงาน หากออกแบบ

ระยะเฉื่อยเรนซ์แคบๆ ตามหลักการตัดเหล็กกล้าทั่วไปที่ประมาณ 3-5% จะพบรอยตัดเฉือนน้อยมาก แต่จะได้รอยนิ่กขาดเข้ามาแทนที่ทำให้ชิ้นงานขาดความเที่ยงตรง

3. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของรอยตัดเฉือนด้วยวิธีการทางสถิติ

จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของรอยตัดเฉือนเมื่อตัดด้วยระยะเฉื่อยเรนซ์ต่างกันดังภาพที่ 10 ได้นำเสนอการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของรอยตัดเฉือนด้วยวิธีการทางสถิติเพื่อค้นหาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการนำไปเลือกใช้ค่าเฉื่อยเรนซ์ที่เหมาะสม โดยสมมติฐานในการทดสอบคือ

H_0 = ค่าความต่างของระยะเฉื่อยเรนซ์ไม่มีผลต่อรอยตัดเฉือน

H_1 = ค่าความต่างของระยะเฉื่อยเรนซ์มีผลต่อรอยตัดเฉือน

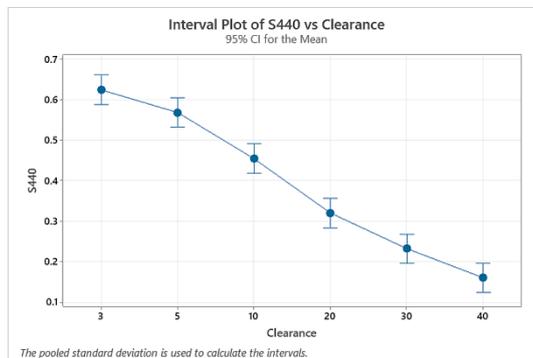
ผลการวิเคราะห์ด้วย ANOVA พบว่าค่า p -value มีค่าน้อยมากแสดงดังตารางที่ 2 ทำให้สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ และสรุปได้ว่าระยะเฉื่อยเรนซ์ที่ต่างกันส่งผลให้รอยตัดเฉือนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จาก Interval plot ในภาพที่ 10 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะเฉื่อยเรนซ์กับรอยตัด

เนียน มีลักษณะเป็นเส้นตรง จึงใช้วิธีการวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้น (Liner regression analysis) ซึ่งสามารถสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความสัมพันธ์ของรอยตัดเฉือนและระยะเคลือบแรนซ์

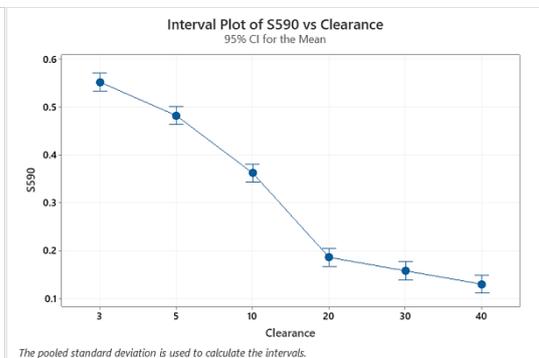
ได้ดังตารางที่ 3 และเส้นกราฟของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของเหล็กชนิดต่างๆ ได้ดังแสดงภาพที่ 11(ก) - (ค) ผลสรุปความแม่นยำของตัวแบบทางคณิตศาสตร์แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ด้วย ANOVA ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y และ 780G

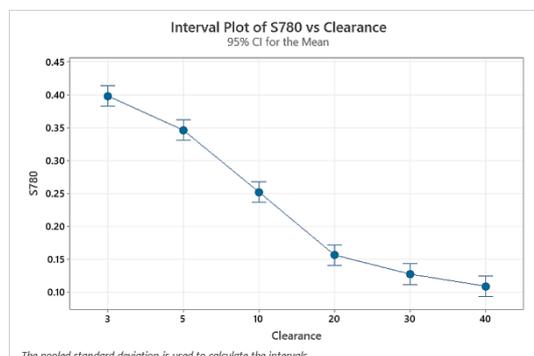
Materials	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
440W	Clearance	5	0.86623	0.173246	111.77	0.000
	Error	24	0.03720	0.001550		
	Total	29	0.90343			
590Y	Clearance	5	0.80858	0.161715	386.57	0.000
	Error	24	0.01004	0.000418		
	Total	29	0.81862			
780G	Clearance	5	0.363679	0.072736	254.08	0.000
	Error	24	0.006870	0.000286		
	Total	29	0.370549			



(ก) 440W



(ข) 590Y



(ค) 780G

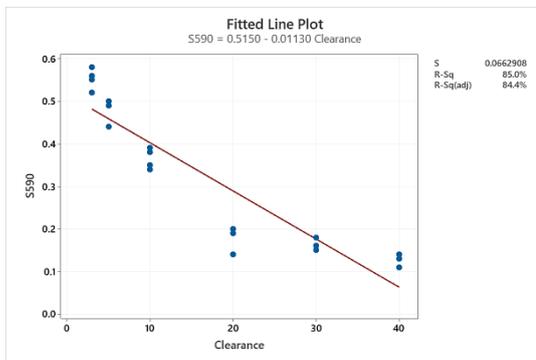
ภาพที่ 10 Interval plot ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y และ 780G

ตารางที่ 3 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y และ 780G

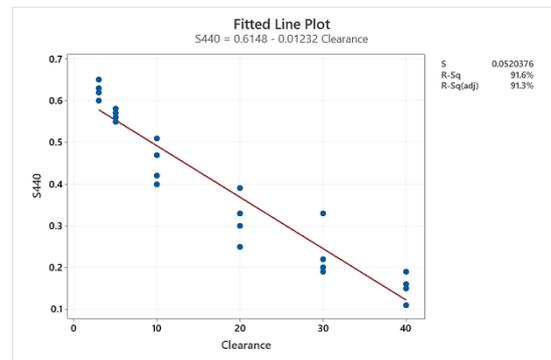
Material	Model
The regression equation for 440w	Sheared surface = 0.6148 - 0.01232(Clearance)
The regression equation for 590Y	Sheared surface = 0.5150 - 0.01130(Clearance)
The regression equation for 780G	Sheared surface = 0.3676 - 0.007564(Clearance)

ตารางที่ 4 ผลสรุปความแม่นยำของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y และ 780G

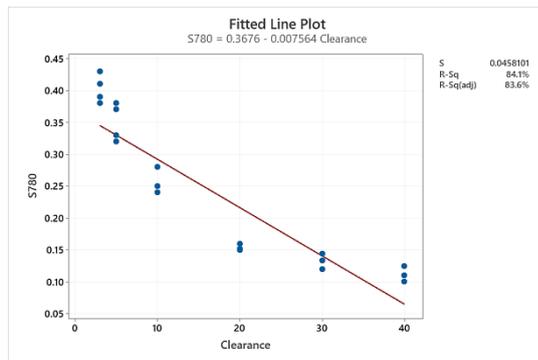
Material	S	R-sq	R-sq(adj)
440W	0.0520376	91.61%	91.31%
590Y	0.0169194	98.15%	97.76%
780G	0.0458101	84.14%	83.58%



(ก) 440W



(ข) 590Y



(ค) 780G

ภาพที่ 11 Fit curve ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y และ 780G

สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ ประกอบด้วย 980Y และ 1180Y สามารถวิเคราะห์ด้วย ANOVA โดยมีสมมติฐานในการทดสอบคือ

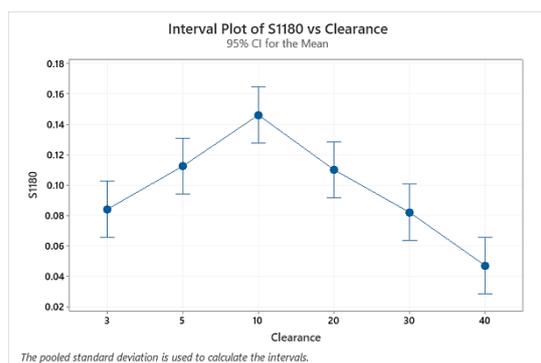
H_0 = ค่าความต่างของระยะเคลือบเรนซ์ไม่มีผลต่อรอยตัดเนียน
 H_1 = ค่าความต่างของระยะเคลือบเรนซ์มีผลต่อรอยตัดเนียน

ผลการวิเคราะห์ด้วย ANOVA พบว่าค่า p -value มีค่าน้อยมากดังตารางที่ 5 จึงสามารถทำให้ปฏิเสธสมมติฐานหลักได้และสรุปได้ว่าระยะเคลียแรนซ์ต่างกันส่งผลให้รอยตัดเดือนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จาก Interval plot ดังภาพที่ 12 พบความแตกต่างจากกลุ่มของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y และ 780G คือมีลักษณะเปลี่ยนไปตามช่วงของระยะเคลียแรนซ์กล่าวคือ ในกรณีของเหล็ก 980Y เมื่อใช้ระยะเคลียแรนซ์ 3% ตัดชิ้นงาน รอยตัดเดือนจะมีโอกาสเท่ากับระยะเคลียแรนซ์ 20% และในกรณีของเหล็ก 1180Y หากตัดด้วยเคลียแรนซ์ 3%

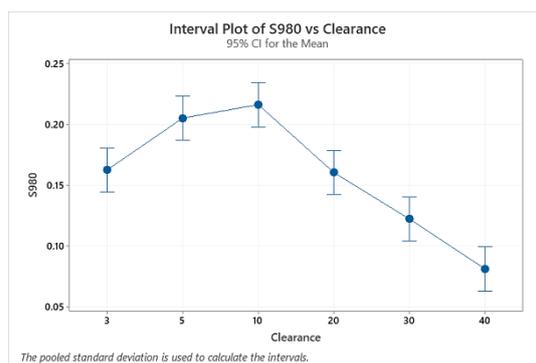
รอยตัดเดือนมีโอกาสเท่ากับ 30% จากผลการทดลองในหัวข้อระดับความแข็งแรงของวัสดุที่ส่งผลต่อลักษณะขอบตัดชิ้นงาน พบว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษพบรอยตัดเดือนยาวสุดในช่วงเคลียแรนซ์ 10% และรอยตัดเดือนเริ่มสั้นลงเรื่อยๆ เมื่อเคลียแรนซ์กว้างขึ้น ดังนั้นจึงไม่สามารถสรุปได้ตามทฤษฎีการตัดชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ ที่ให้ไว้ว่าหากเลือกตัดหรือเจาะชิ้นงานด้วยระยะเคลียแรนซ์แคบจะได้รอยตัดเดือนที่ยาว หากแต่สำหรับการทำงานบนเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษนั้นต้องหาค่าระยะเคลียแรนซ์ที่เหมาะสมในการตัด

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ด้วย ANOVA ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 980Y และ 1180Y

Materials	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
980Y	Clearance	5	0.064109	0.012822	33.17	0.000
	Error	24	0.064109	0.012822		
	Total	29	0.009276	0.000387		
1180Y	Clearance	5	0.028505	0.005701	14.26	0.000
	Error	24	0.009595	0.000400		
	Total	29	0.038101			



(ก) 980Y



(ค) 1180Y

ภาพที่ 12 Interval plot ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรดพิเศษ 980Y และ 1180Y

สรุป

ภายหลังทำการทดลองด้วยการตัดชิ้นงานและพิสูจน์ถึงกลไกการเปลี่ยนรูปของวัสดุด้วยวิธีการ

ทางไฟไนต์เอลิเมนต์รวมทั้งวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อการเลือกใช้ระยะเคลียแรนซ์สำหรับการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง-เกรดพิเศษนั้น ผู้วิจัย

แนะนำให้แบ่งระดับความแข็งแรงออกเป็นสองกลุ่ม เพื่อเป็นข้อพิจารณาสำหรับอุตสาหกรรมการผลิต ชิ้นส่วนโลหะและโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ที่ใช้ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง-เกรดพิเศษเป็นวัสดุ ชิ้นงานได้ดังนี้

1. กลุ่มของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง 440W, 590Y และ 780G สามารถเลือกตัดชิ้นงานด้วย เคลียเรนซ์ 3-10%

2. กลุ่มของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด พิเศษ 980Y และ 1180Y ควรเลือกตัดชิ้นงานด้วย เคลียเรนซ์ประมาณ 10%

3. การเลือกใช้ระยะเคลียเรนซ์นั้นควร พิจารณาหลายมิติ เช่น แรงในการตัดชิ้นงาน การสึก หรอที่จะเกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ การใช้เคลียเรนซ์ที่แคบ มากทำให้การสึกหรอเกิดขึ้นเร็วกว่าปกติ อีกทั้งมี ความเสี่ยงจากความเสียหายเนื่องจากการทดลอง พิมพ์ (Try out) โดยเฉพาะกับการตัดเหล็กกล้าความ แข็งแรงสูงที่ต้องการแรงในการตัดค่อนข้างสูง ขณะที่หากใช้ระยะเคลียเรนซ์ที่กว้างเกินไป ปัญหา จากการสึกหรอและการลองพิมพ์จะเกิดขึ้นน้อยแต่ ชิ้นงานก็จะได้คุณภาพต่ำ (ส่วนโค้งมนและรอยฉีก ขาดยาว ครีบหนา) ดังนั้นผู้ออกแบบแม่พิมพ์ตัด จะต้องพิจารณาให้รอบคอบถึงตัวแปรดังกล่าวด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณ ภาควิชา เครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าธนบุรีในการสนับสนุนโปรแกรม Finite element ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกหักของชิ้นงาน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์สุวดี นำพาเจริญ ให้คำแนะนำสถิติวิเคราะห์ ผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Akyürek, F., Yaman, K. and Tekiner, Z. 2017. An Experimental Work on Tool Wear Affected by Die Clearance and Punch Hardness. **Arabian Journal for Science and Engineering** 42(11): 4683-4692.
- Chang, Y., Han, S., Li, X., Wang, C., Zheng, G. and Dong, H. 2018. Effect of shearing clearance on formability of sheared edge of the third-generation automotive medium-Mn steel with metastable austenite. **Journal of Materials Processing Technology** 259: 216-227.
- Hambli, R., Richir, S., Crubleau, P. and Tavel, B. 2003. Prediction of optimum clearance in sheet metal blanking processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 22: 20-25.
- He, J., Li, S. and Dong, L. 2020. Experiments and FE simulation of edge cracking considering prehardening after blanking process. **International Journal of Material Forming** 13(4): 547-560.
- He, J., Wang, Z., Li, S., Dong, L., Cao, X. and Zhang, W. 2019. Optimum clearance determination in blanking coarse-grained non-oriented electrical steel sheets: experiment and simulation. **International Journal of Material Forming** 12(4): 575-586.
- Hu, D.C., Chen, M.H., Ouyang, J.D. and Yin, L.M. 2015. Finite element analysis of the thermal effect in high-speed blanking of thick sheet metal. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 80(9): 1481-1487.

- Husson, C., Correia, J.P.M., Daridon, L. and Ahzi, S. 2008. Finite elements simulations of thin copper sheets blanking: Study of blanking parameters on sheared edge quality. **Journal of Materials Processing Technology** 199: 74-83.
- Jaafar, N.A., Abdullah, A.B. and Samad, Z. 2019. Effect of punching die angular clearance on punched hole quality of S275 mild steel sheet metal. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 101(5): 1553-1563.
- Komgrit, L. and Pongsakorn, L. 2019. FE Simulations and Experimental Analysis of the Blade Angle Effect on Sheared Surface in Trimming Process of Advanced High-Strength Steel Sheet. **Arabian Journal for Science and Engineering** 44(9): 7909-7918.
- Mori, K., Abe, Y., Kidoma, Y. and Kadarno, P. 2013. Slight clearance punching of ultra-high strength steel sheets using punch having small round edge. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** 65: 41-46.
- Subramonian, S., Altan, T., Campbell, C. and Ciocirlan, B. 2013a. Determination of forces in high speed blanking using FEM and experiments. **Journal of Materials Processing Technology** 213(12): 2184-2190.
- Subramonian, S., Altan, T., Ciocirlan, B. and Campbell, C. 2013b. Optimum selection of variable punch-die clearance to improve tool life in blanking non-symmetric shapes. **International Journal of Machine Tools and Manufacture** 75: 63-71.
- Wang, J.P. 2015. A novel fine-blanking approach. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 78(5): 1015-1019.
- Wang, K., Greve, L. and Wierzbicki, T. 2015. FE simulation of edge fracture considering pre-damage from blanking process. **International Journal of Solids and Structures** 71: 206-218.
- Wang, K., Luo, M. and Wierzbicki, T. 2014. Experiments and modeling of edge fracture for an AHSS sheet. **International Journal of Fracture** 187(2): 245-268.
- Won, C., Lee, S., Seo, J., Park, S.H. and Yoon, J. 2018. Stripping failure of punching pin in GPa-grade steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 94(1): 73-83.
- Won, C., Lee, W., Lee, H.Y., Kang, Y.S. and Yoon, J. 2020. Effect of two-stage press blanking on edge stretchability with third-generation advanced high-strength steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 110(1): 13-27.

อุปกรณ์พกพาสำหรับประเมินความหวานผลแอปเปิลแบบไม่ทำลาย

A Portable Device for Non-destructively Assessing Apple Sweetness

ศุภชัย กุลมุติวัดน์ และ อนุปันท์ เทอดวงษ์วรกุล*

Supachai Kulmutiwat and Anupun Terdwongworakul*

Received: 8 April 2021, Revised: 26 May 2021, Accepted: 22 June 2021

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน แอปเปิลที่ซื้อมาจากตลาดไม่มีการรับประกันความหวาน วิธีการวัดความหวานมาตรฐานจะใช้ อุปกรณ์ที่วัดความหวานจากน้ำแอปเปิล งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้หลักการวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared, NIR) มาวัดความหวานแอปเปิลแบบไม่ทำลาย เพื่อนำมาพัฒนาอุปกรณ์วัดความหวานผลแอปเปิลแบบพกพาใช้งานร่วมกับสมาร์ทโฟน อุปกรณ์จะวัดการดูดกลืนแสงในโหมดสะท้อนกลับในช่วงความยาวคลื่น 900 ถึง 1700 นาโนเมตร อุปกรณ์ประกอบด้วย สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ติดตั้งในกล่องพลาสติก มีขนาดกว้าง 40 มิลลิเมตร ยาว 70 มิลลิเมตร สูง 60 มิลลิเมตร และแอปพลิเคชันทำงานบนสมาร์ทโฟน ในงานวิจัยได้สร้างสมการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (ความหวาน) จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง NIR กับค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้อ้างอิงที่วัดจากเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ แอปพลิเคชันสมาร์ทโฟนถูกพัฒนาเพื่อทำหน้าที่เชื่อมต่อกับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ผ่านบลูทูธ ควบคุมสั่งงานให้สแกนวัดการดูดกลืนแสง คำนวณค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และแสดงผล สมการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ถูกนำไปเขียนเป็นส่วนหนึ่งของชุดคำสั่งบนแอปพลิเคชัน

ในการทดสอบอุปกรณ์สำหรับวัดความหวานผลแอปเปิลที่ไม่เกี่ยวข้องกับการสร้างสมการจำนวน 50 ผล พบว่า อุปกรณ์สามารถทำนายความหวานด้วยความแม่นยำ ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.916 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ยในการทำนาย (Root Mean Square Error of Prediction, RMSEP) เท่ากับ 0.808 °Brix อุปกรณ์วัดความหวานแบบพกพาที่พัฒนาแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิคสเปกโทรสโกปี NIR ในการนำมาประยุกต์ใช้ทำนายค่าความหวานด้วยความรวดเร็ว ใช้เวลาประมาณ 5 วินาที โดยไม่ทำลาย

คำสำคัญ: แอปเปิล, ความหวาน, อินฟราเรดย่านใกล้, การวัดแบบไม่ทำลาย, อุปกรณ์พกพา

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): fengant@ku.ac.th

ABSTRACT

At present, an apple purchased from market is not guaranteed for sweetness. A standard method for determining the sweetness uses a device that measures the sweetness from apple juice. This research applied the principle of the near-infrared absorbance for non-destructive evaluation of apple to develop a portable device for determining the sweetness of an apple which operated with a smartphone. The device measured the absorbance in a reflectance mode at a wavelength range from 900 to 1700 nm. The device consisted of a spectrophotometer housed in a plastic box with width of 40 mm, length of 70 mm and height of 60 mm, and an application operated on the smartphone. A prediction equation for the soluble solids content (sweetness) was derived from the relationship between the near-infrared absorbance and the reference soluble solids content determined using a refractometer. The device operated by connecting the spectrophotometer via Bluetooth, controlling the spectrophotometer to scan for the near-infrared absorbance of the apple, calculating the soluble solids content, and displaying the sweetness result. The prediction equation for the soluble solids content was used to write the code for the sweetness calculation part of the application.

In testing the device for determining the sweetness of 50 apple, which were not used in the development of the prediction equation, the results showed that the device provided good accuracy for the sweetness prediction, yielding the correlation coefficient of 0.916 and the root mean square error of prediction (RMSEP) of 0.808 °Brix. The sweetness portable device developed in this research displayed the potential of the near-infrared spectroscopy technique for prediction of the sweetness with a determining speed of about 5 seconds without destroying the fruit.

Key words: apple, sweetness, near-infrared, non-destructive measurement, portable device

บทนำ

แอปเปิลเป็นผลไม้ที่มีประโยชน์ทางโภชนาการและได้รับการยอมรับ โดยมี กรดโฟลิก วิตามินและแร่ธาตุ เช่น วิตามินซี วิตามินบี 1 วิตามินเอ เป็นต้น ที่มีคุณค่าต่อสุขภาพ (Cho *et al.*, 1998) อย่างไรก็ตาม ในการเลือกซื้อแอปเปิลผู้บริโภคต้องการผลที่มีความหวานตามต้องการ แต่ในทางปฏิบัติผู้บริโภคสามารถคัดเลือกได้จากการพิจารณาลักษณะทางกายภาพภายนอก เช่น รูปร่าง รอยขีด สี หรือ ความแน่นเนื้อผล เป็นต้น ความหวานสามารถหาได้จากการวัดในห้องปฏิบัติการ ด้วยเครื่องมือที่

เรียกว่ารีแฟรกโตมิเตอร์ โดยต้องนำเนื้อแอปเปิลมาคั้นและนำน้ำแอปเปิลไปวัดค่าความหวานหรือปริมาณของแข็งที่ละลายได้มีหน่วยเป็น °Brix ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ประกอบด้วย น้ำตาล เช่น ซูโครส ฟรุกโตส ฯลฯ กรดอินทรีย์ กรดอะมิโน และสารประกอบอื่นๆ เช่น ไขมัน แร่ธาตุ วิตามินต่างๆ เป็นต้น จากส่วนประกอบทั้งหมดน้ำตาลมีสัดส่วนมากที่สุดประมาณ 80% ดังนั้นค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้จึงใช้เป็นค่าวัดปริมาณน้ำตาลหรือความหวานในผลไม้ได้ ค่าความหวานสำหรับแอปเปิลที่ยอมรับโดยผู้บริโภคมีค่าเท่ากับ 13 °Brix (Trimble,

2019) ซึ่งหมายถึงผลแอปเปิลมีน้ำตาล 13% การเลือกซื้อผลแอปเปิลที่มีความหวานตามต้องการของผู้บริโภคในซูเปอร์มาเก็ตหรือในตลาดทั่วไปอาศัยการพิจารณาจากลักษณะภายนอก ดังนั้นจึงมีโอกาสอาจทำให้ผู้บริโภคไม่ได้รับความพึงพอใจที่จะได้ผลแอปเปิลที่มีความหวานเป็นไปตามที่ต้องการ

งานวิจัยที่ผ่านมามีการประยุกต์ใช้เทคนิคต่างๆ ในการประเมินคุณภาพผลไม้แบบไม่ทำลาย เช่น คลื่นเหนือเสียง การวิเคราะห์ภาพ การวัดสี และเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (near infrared spectroscopy, NIRS) (Sharabiani *et al.*, 2020) อย่างไรก็ตาม เทคนิค NIRS เป็นเทคนิคที่ให้ความแม่นยำมากที่สุด NIRS เป็นเทคนิคที่มีหลักการพื้นฐานจากการวัดการดูดกลืนแสง NIR ของผลไม้ โดยโมเลกุล C-H, O-H หรือ N-H ในผลไม้หรือวัสดุเกษตร จะทำอันตรกิริยากับแสง NIR เกิดการสั่นของพันธะในโมเลกุลและดูดกลืนแสง ปริมาณการดูดกลืนแสงสัมพันธ์กับปริมาณของโมเลกุลหรือความเข้มข้นของค่าทางเคมี ข้อดีของเทคนิค NIRS คือ วัดได้รวดเร็ว ไม่ทำลายตัวอย่าง และ เป็นการช่วยลดสารเคมีในการวิเคราะห์ มีการประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS ในการประเมินคุณภาพของผลแอปเปิลหลายงานวิจัย Guo *et al.* (2020) ศึกษาการใช้ NIRS ในการประเมินอาการน้ำและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของผลแอปเปิลด้วยวิธีการวัดแบบส่องผ่าน โดยรายงานความแม่นยำด้วยค่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) และค่า RMSEP เท่ากับ 0.96 และ 1.34 °Brix สำหรับระดับอาการน้ำ และ 0.98 และ 0.33 °Brix สำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ Ventura *et al.* (1998) พัฒนาสมการประเมินปริมาณของแข็งที่ละลายได้สำหรับแอปเปิล 2 พันธุ์ (Golden delicious และ Jonagold) จากค่าการดูดกลืนแสง NIR โดยสมการที่พัฒนามีความแม่นยำในการประเมินด้วยค่า r และ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานการทำนาย

(standard error of prediction) เท่ากับ 0.75 และ 1.14 °Brix ตามลำดับ ในงานวิจัยที่ศึกษาแอปเปิลพันธุ์ Golden delicious, Jha and Garg (2010) สร้างสมการประเมินปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ให้ค่าความแม่นยำ r และ SEP เท่ากับ 0.89 และ 0.75 °Brix ตามลำดับ สำหรับแอปเปิลพันธุ์ Empire delicious เทคนิค NIR สามารถประเมินปริมาณของแข็งละลายได้ที่ r และ SEP เท่ากับ 0.81 และ 0.5 °Brix (Lu and Ariana, 2002) Cho *et al.* (1998) สร้างสมการประเมินความหวานของผลแอปเปิลจากค่าการดูดกลืนแสง NIR ให้ผลการประเมินค่า ฟรุกโตส ด้วยค่า r และ SEP เท่ากับ 0.75 และ 0.86% ตามลำดับ

เครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับเทคนิค NIRS มีทั้งแบบที่ใช้ในห้องปฏิบัติการและแบบที่มีขนาดเล็กพกพาได้ โดยเครื่องมือแบบพกพาสามารถนำไปพัฒนาให้สามารถใช้วัดคุณภาพผลไม้ในสวนหรือในโรงงานได้ (Dos Santos *et al.*, 2013) งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS มาพัฒนาอุปกรณ์วัดความหวานผลแอปเปิลพันธุ์ฟูจิแบบพกพา ควบคุมผ่านสมาร์ตโฟน เพื่อเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีด้าน NIRS ให้สามารถนำไปใช้งานจริงได้

วิธีดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์วัดความหวานผลแอปเปิลแบบพกพาที่พัฒนาประกอบด้วย สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (DLP NIR scan Nano, Texas Instruments, Dallas, Texas, USA) สมาร์ตโฟน และ แอปพลิเคชัน ขั้นตอนหลักในการพัฒนา คือ การสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Soluble Solids Content, SSC) เมื่อได้สมการดังกล่าวแล้วจะนำมาเป็นส่วนหนึ่งในการเขียนคำสั่งคอมพิวเตอร์ เพื่อสร้างเป็นแอปพลิเคชันใช้งานบนสมาร์ตโฟน

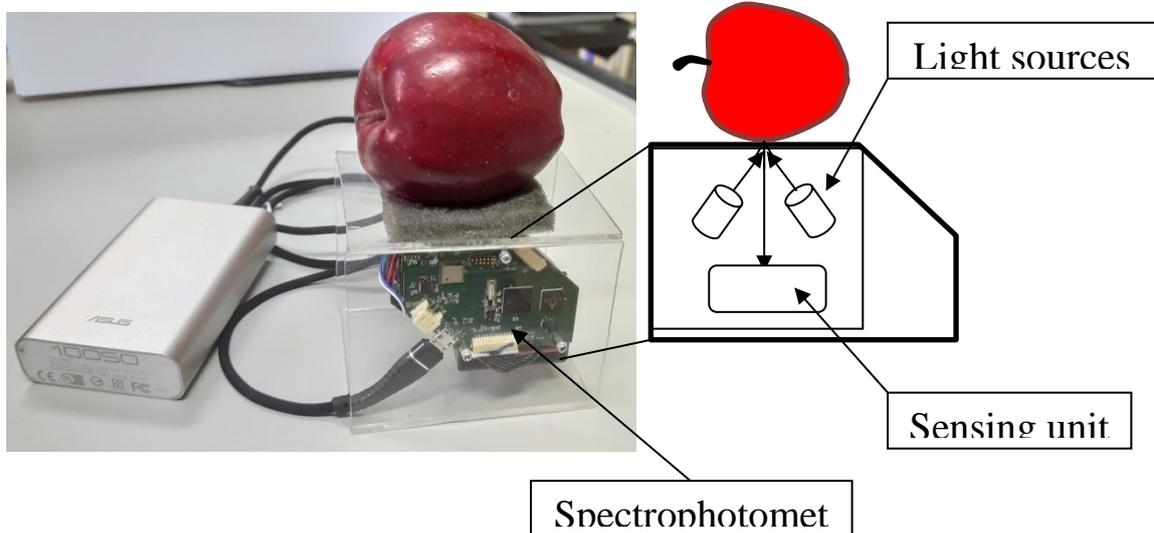
1. การจัดเตรียมตัวอย่างแอปเปิล

ตัวอย่างแอปเปิลพันธุ์ฟูจิที่ใช้ในการทดลอง ได้มาจากซูเปอร์มาเก็ต จำนวน 200 ผล โดยสุ่มเลือก สัปดาห์ละ 40 ผล จำนวน 5 สัปดาห์ ทั้งนี้เพื่อให้ ตัวอย่างมีค่า SSC ที่มีความแตกต่างกันในการทดลอง โดยไม่คำนึงถึงขนาดและสีผล เป็นตัวอย่างแอปเปิลที่ ผู้บริโภคจะเจอในการเลือกซื้อจริง

2. การวัดการดูดกลืนแสง NIR

ก่อนการวัดการดูดกลืนแสง นำแท่ง Spectralon ที่มีสมบัติสะท้อนแสง NIR ได้ 99% มา สแกนเป็นค่าอ้างอิงและบันทึกในสเปกโตรโฟโต มิเตอร์ การสแกนแท่ง Spectralon จะทำซ้ำหลังจาก วัดแอปเปิลครบทุกๆ 20 ผล ส่วนค่า dark reference ได้ถูกบันทึกไว้ในหน่วยความจำของสเปกโตรโฟโต มิเตอร์จากโรงงาน หลังจากนั้นนำแอปเปิลแต่ละผล มาวัดการดูดกลืนแสงด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ผล

ละ 2 ตำแหน่ง บริเวณแก้มผลด้านตรงข้ามกัน (ภาพที่ 1) ด้วยโปรแกรม DLP NIRscan Nano GUI (Version 2.1.0, Texas instrument, Texas, USA) สเปกโตร โฟโตมิเตอร์ที่ใช้มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดไฟ 2 หลอด ขนาด 1.4 วัตต์ ติดตั้งให้ส่องแสงทำมุม 45 องศา กับแนวการวัดแสงที่รับเข้ามาภายในสเปกโตร โฟโตมิเตอร์ เซ็นเซอร์เป็นไดโอดทำจาก InGaAs สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ติดตั้งอยู่ในกล่องพลาสติก ขนาดกว้าง 40 มิลลิเมตร ยาว 70 มิลลิเมตร สูง 60 มิลลิเมตร แอปเปิลจะถูกนำมาวางบนสเปกโตรโฟโต มิเตอร์ การวัดจะวัดในโหมดสะท้อนแสง ในช่วงความ ยาวคลื่นตั้งแต่ 900 นาโนเมตร ถึง 1700 นาโนเมตร แต่ละจุดของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงห่างกัน 3.5 นาโนเมตร หลังจากวัดผลแอปเปิลแต่ละผลนำ ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงนำไปสร้างสมการ ต่อไป



ภาพที่ 1 การวัดการดูดกลืนแสงของแอปเปิลด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3. การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้

ในงานวิจัยนี้ใช้ค่า SSC เป็นค่าอ้างอิงความหวาน ผลแอปเปิลที่ผ่านการวัดการดูดกลืนแสงจะ นำมาผ่าเอาเนื้อบริเวณที่วัดการดูดกลืนแสงมาคั้น

และกรองให้ได้น้ำแอปเปิล แล้วนำมาวัดค่า SSC ด้วย เครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ refractometer, PR-32, Palette Series, Atago Co., Ltd., Tokyo, Japan) โดยทำการวัด ซ้ำตำแหน่งละ 2 ครั้ง คำนวณค่าเฉลี่ย SSC ทั้งหมด

เป็นค่าความหวานของผลแอปเปิล เพื่อนำไปสร้างสมการต่อไป

4. การสร้างสมการ

ก่อนการสร้างสมการ นำสเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR มาปรับทางคณิตศาสตร์เพื่อลดผลกระทบจากปัจจัยความแปรปรวนด้านกายภาพของผิวแอปเปิล การปรับทางคณิตศาสตร์ใช้เทคนิค standard normal variate (SNV) ดังสมการที่ 1 โดย

$$SNVAbs(\lambda_i) = \frac{Abs(\lambda_i) - AvgAbs}{SDAbs} \quad (1)$$

โดยที่ $Abs(\lambda_i)$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น i นาโนเมตร

$AvgAbs$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยตลอดช่วงความยาวคลื่นของตัวอย่าง

$SDAbs$ คือ ค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการดูดกลืนแสงตลอดช่วงความยาวคลื่นของตัวอย่าง

ตัวอย่างทั้งหมดถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสร้างสมการ (150 ตัวอย่าง) และกลุ่มทดสอบสมการ (50 ตัวอย่าง) โดยตัวอย่างในกลุ่มสร้างสมการจะมีค่า SSC ครอบคลุมตัวอย่างกลุ่มทดสอบสมการ ข้อมูลของตัวอย่างในกลุ่มสร้างสมการจะถูกนำมาสร้างสมการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSC กับค่าการดูดกลืนแสง NIR ที่ปรับค่าด้วยเทคนิค SNV (SNVAbs) ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณแบบยกกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Squares Regression, PLSR) เทคนิค PLSR เป็นเทคนิคที่นำค่าการดูดกลืนแสงมาสร้างเป็นตัวแปรใหม่ที่ไม่มีความสัมพันธ์กันก่อนนำไปวิเคราะห์ เพื่อกำจัดปัญหา Collinearity (Osborne and Fearn, 1986) โดยให้ค่าการดูดกลืนแสง SNVAbs เป็นตัวแปรอิสระและค่า SSC เป็นตัวแปรตาม การเลือกจำนวนแฟกเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสมการ PLSR ทำโดยวิธีครอสวาเลชัน (cross validation) ซึ่งมีขั้นตอนเริ่มจากการสร้างสมการที่มีแฟกเตอร์เพียงแฟกเตอร์เดียว แยกตัวอย่างที่หนึ่งออกจากกลุ่มทดสอบสมการแล้วนำตัวอย่างที่เหลือไปสร้างสมการ แล้วนำสมการที่ได้ไปทำนายค่า

เทคนิค SNV เป็นเทคนิคที่สามารถลดผลกระทบเชิงเส้นและผลกระทบเชิงคูณ และในงานวิจัยหลายงานพบว่า เป็นเทคนิคที่ทำให้ได้สมการที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายค่า SSC ในผลไม้ด้วยความแม่นยำ (Huang et al., 2010) นอกจากนั้น SNV ยังเป็นเทคนิคที่นำไปเขียนเป็นชุดคำสั่งในการพัฒนาโปรแกรมต่อไปได้ง่ายกว่าเทคนิคอื่นๆ

SSC ของตัวอย่างที่แยกออกมา บันทึกค่าค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ยครอสวาเลชัน (Root Mean Square Error of Cross Validation, RMSECV) ทำซ้ำโดยแยกตัวอย่างที่สองออกจากกลุ่มทดสอบ จนกระทั่งทุกตัวอย่างถูกแยกออกและถูกทำนายค่า SSC ต่อจากนั้น ทำซ้ำขั้นตอนดังกล่าวทั้งหมด แต่เป็นการสร้างสมการที่มีแฟกเตอร์สองตัว และเพิ่มแฟกเตอร์ในสมการขึ้นเป็นลำดับจนถึงจำนวนแฟกเตอร์ที่กำหนด สมการ PLSR ที่มีจำนวนแฟกเตอร์ที่เหมาะสมคือ สมการที่ให้ค่า RMSECV ต่ำที่สุด (Williams and Norris, 2001)

5. การพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับสมาร์ตโฟน

พัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับสมาร์ตโฟน ด้วยซอฟต์แวร์ Android Studio Version 2.3 (Google, California, USA) เพื่อเชื่อมต่อกับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์พกพาผ่านทางระบบบลูทูธ ควบคุมการทำงานอ่านค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ปรับค่าสเปกตรัมด้วยเทคนิค SNV กำหนดค่า SSC และแสดงผลบนหน้าจอสมาร์ตโฟน โดยในส่วนการคำนวณค่า SSC จะนำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, r)

ของสมการที่ดีที่สุดมาเขียนเป็นชุดคำสั่งในแอปพลิเคชัน ในการใช้งานเพียงแต่วางผลแอปเปิลบนเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และเปิดแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน กดปุ่มติดต่อบนทางบลูทูธ เมื่อเชื่อมต่อสำเร็จแล้ว กดปุ่มสแกน ผลแอปเปิลจะถูกฉายแสง NIR แสงที่สะท้อนจะถูกบันทึกและแปลงเป็นค่าการดูดกลืนแสง ส่งมายังสมาร์ตโฟนซึ่งจะคำนวณค่าความหวานหรือ SSC แสดงผลบนหน้าจอ

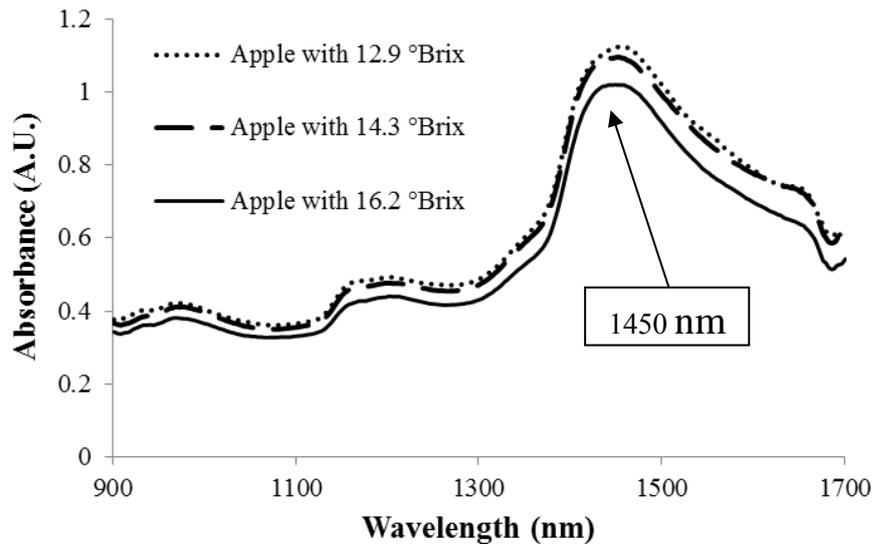
ในการทดสอบการใช้งาน นำผลแอปเปิลในกลุ่มทดสอบสมการซึ่งเป็นแอปเปิลที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้สร้างสมการ มาวัดค่า SSC ด้วยแอปพลิเคชัน บันทึกค่า SSC ที่ทำนาย จากนั้นนำผลแอปเปิลไปคั้นน้ำจากเนื้อบริเวณที่ถูกสแกน แล้วนำมาวัดค่า SSC ด้วยเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์เป็นค่าอ้างอิงมาตรฐาน คำนวณค่าที่ทำนายกับค่าที่อ้างอิงมาตรฐานแล้วนำมาคำนวณเป็นค่า RMSEP ทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วยเทคนิค Student's t-test

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

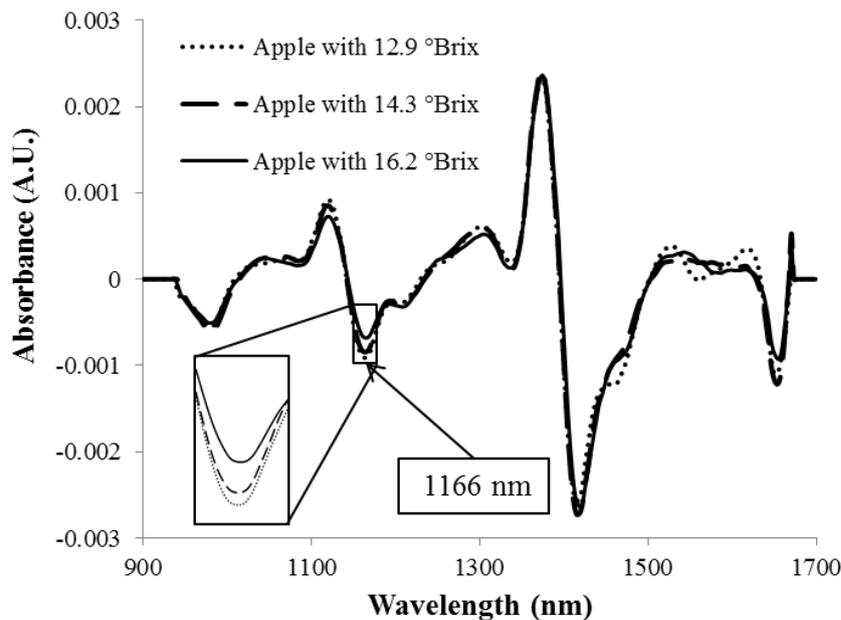
2. ลักษณะของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR ของผลแอปเปิล

ภาพที่ 2 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR ผลแอปเปิลที่มีค่า SSC ต่างกัน 3 ระดับ ผลแอปเปิลมีการดูดกลืนแสง NIR ที่เด่นชัดที่ตำแหน่ง

ความยาวคลื่น 1450 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงของน้ำ (Workman and Weyer, 2012) สอดคล้องกับการดูดกลืนแสงของแอปเปิลพันธุ์ Golden Delicious (Jha and Garg, 2010) เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ระดับค่า SSC ต่างๆ กัน พบว่า ผลแอปเปิลที่มีค่า SSC ต่ำ จะมีค่าการดูดกลืนแสงมากกว่าผลแอปเปิลที่มีค่า SSC สูง (ภาพที่ 2) อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของสเปกตรัมเกิดขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่น ซึ่งทำให้ไม่พบพิกัดการดูดกลืนแสงเฉพาะ จึงนำค่าการดูดกลืนแสงไปปรับทางคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิคอนุพันธ์อันดับสอง (Second Derivative, SD) ที่เป็นเทคนิคที่ทำให้สเปกตรัมมีพิกัดที่แหลมคมมากขึ้นและยังทำให้พิกัดแยกออกจากกันจากการเหลื่อมซ้อน (Huang *et al.*, 2010) ผลที่ได้แสดงในภาพที่ 3 สเปกตรัมที่ได้รับการปรับด้วย SD จะแสดงให้เห็นพิกัดที่สำคัญกลับลงด้านล่าง (Huang *et al.*, 2010) เมื่อพิจารณาภาพที่ 3 พิกัดด้านล่างที่มีค่าลดลงเป็นลำดับและมีความสัมพันธ์กับค่า SSC ที่เพิ่มขึ้นได้แก่ พิกัดที่ความยาวคลื่น 1166 นาโนเมตร ซึ่งเป็นพิกัดการดูดกลืนแสงที่สำคัญในการทำนายค่า SSC ในผลแอปเปิลหลายพันธุ์ (Jha and Garg, 2010) และผลแอปเปิลคอกท (Buyukcan and Kavdir, 2017)



ภาพที่ 2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR ผลแอปเปิ้ลที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ต่างกันสามระดับ

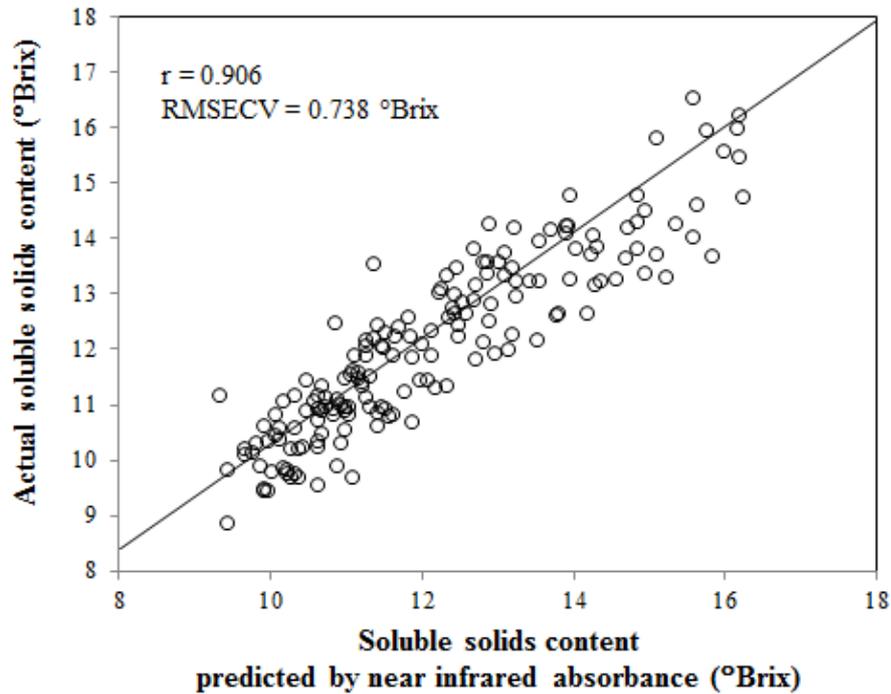


ภาพที่ 3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR ที่ผ่านการปรับด้วยเทคนิคอนุพันธ์อันดับสองแสดงให้เห็นพีคที่ชัดเจนขึ้น และแยกออกจากกัน

2. ผลการสร้างสมการทำนายค่า SSC

สมการทำนายค่า SSC ที่เหมาะสมที่สุด หลังจากการวิเคราะห์ PLSR ด้วยข้อมูลการดูดกลืนแสงที่ปรับด้วยวิธี SNV ประกอบด้วยแฟกเตอร์ 9 แฟกเตอร์ ให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่า SSC จากการทำครอสวาไลเดชัน ได้แก่ ค่า RMSECV เท่ากับ 0.738°Brix และค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า

SSC ที่ทำนายจากสมการและค่า SSC อ้างอิงที่วัดจากเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ แสดงด้วยค่า r เท่ากับ 0.906 (ภาพที่ 4) ผลที่ได้มีความแม่นยำกว่าสมการที่สร้างจากข้อมูลการดูดกลืนแสงที่ไม่มีมีการปรับค่า ที่ประกอบด้วยแฟกเตอร์ 12 แฟกเตอร์ ให้ค่า r เท่ากับ 0.851 และ RMSECV เท่ากับ 0.801°Brix



ภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้จากการวัดด้วยรีแฟรกโตมิเตอร์ (actual SSC) และค่าที่ทำนายจากค่าการดูดกลืนแสง NIR (predicted SSC) ผลแอปเปิลกลุ่มสร้างสมการ

3. แอปพลิเคชันทำนายค่า SSC

แอปพลิเคชันสำหรับใช้กับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์พกพาถูกพัฒนาด้วยโปรแกรม Android Studio ด้วยการนำชุดคำสั่งที่เป็นโอเพ่นซอร์ส จากเว็บไซต์ https://github.com/kstechnologies/NIRScanNano_Android มาปรับปรุง

แอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นทำหน้าที่ดังนี้

1. ติดต่อกับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ผ่านบลูทูธ
2. สั่งให้สเปกโทรโฟโตมิเตอร์สแกนวัด

แสงที่สะท้อนออกจากแอปเปิลและส่งมายังสมาร์ตโฟน

3. คำนวณค่า SNV ของค่าการดูดกลืนแสง
4. คำนวณค่า SSC หรือความหวานและแสดงผลบนหน้าจอสมาร์ตโฟน

ในส่วนการทำงานของแอปพลิเคชันที่เป็นการคำนวณค่า SSC นั้น เป็นการนำค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย (regression coefficients) ของสมการทำนาย SSC มาเขียนเป็นชุดคำสั่งให้คำนวณค่าสมการที่ 2

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i A_i \quad (2)$$

โดยที่

y = ความหวานหรือปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (°Brix)

A_i = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น i นาโนเมตร

b_0 = สัมประสิทธิ์ถดถอยที่ค่า A_i เท่ากับศูนย์

b_i = สัมประสิทธิ์ถดถอยที่ค่า A_i ต่างๆ

การใช้งานแอปพลิเคชันเริ่มจากเปิดสัญญาณบลูทูธของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และสมาร์ตโฟน และดำเนินการดังนี้

1. กดปุ่ม CONNECT TO NIRSCAN บนแอปพลิเคชัน (ภาพที่ 5ก)

2. เมื่อสมาร์ตโฟนติดต่อกับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์สำเร็จ วางผลแอปเปิดบนสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นกดปุ่ม SCAN (ภาพที่ 5ข) สเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะฉายแสง NIR ไปยังแอปเปิด บันทึกการสะท้อนแสง และส่งข้อมูลสเปกตรัมการสะท้อนแสงมายังสมาร์ตโฟน (ภาพที่ 5ค) จากนั้นแอปพลิเคชันจะคำนวณค่าการดูดกลืนแสง แล้วปรับค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค SNV และนำค่าการดูดกลืนแสงที่ปรับด้วย SNV มาคำนวณค่า SSC ตามสมการ (2) และแสดงผลดังภาพที่ 5ง

4. ผลการทดสอบสมรรถนะการทำนายค่า SSC ของอุปกรณ์

ในการทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์ในการทำนายค่า SSC ของผลแอปเปิลทุกผลในกลุ่มทดสอบสมการซึ่งมีช่วงค่า SSC ตั้งแต่ 9.6 °Brix ถึง 16.2 °Brix ผลการทดสอบที่ได้แสดงในภาพที่ 6 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSC ที่ทำนายจากอุปกรณ์และค่า SSC อ้างอิง โดยมีค่า $r = 0.916$ และ $RMSEP = 0.808$ °Brix อุปกรณ์มีความแม่นยำใกล้เคียงกับการทำนายค่า SSC ของแอปเปิลพันธุ์ Golden delicious ที่ให้ค่า $r = 0.887$ (Jha and Garg, 2010) เมื่อทดสอบความแตกต่างทางสถิติระหว่างค่า SSC ที่ทำนายจาก

อุปกรณ์และค่า SSC อ้างอิง ด้วยเทคนิค Student's t-test แบบ paired two samples for means พบว่า ค่า SSC ทั้งสองชุดไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (p -value (two-tail) = 0.536)

มีข้อสังเกตคือ ในการทดสอบสมรรถนะการทำนายค่า SSC นี้ ค่า RMSEP มากกว่ากรณีการวิเคราะห์สร้างสมการแต่กลับให้ค่า r มากกว่าด้วยเหตุผลก็คือ ค่า r ไม่ได้เป็นค่าที่ใช้ประเมินความแม่นยำของสมการ และมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงข้อมูล ซึ่งมีการศึกษาโดย Davies and Fearn (2006) ที่พบว่า กลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม ที่มีค่า RMSEP เท่ากัน แต่กลับมีค่า r ไม่เท่ากัน เนื่องจากช่วงกว้างของข้อมูลของแต่ละกลุ่มตัวอย่างไม่เท่ากัน นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่มีผลการวิจัยสอดคล้องกับข้อสังเกตนี้ได้แก่ งานวิจัยของ Liu *et al.* (2015) ที่ศึกษาเปรียบเทียบสมการทำนายค่า SSC ในแอปเปิลที่สร้างจากสองเทคนิคและพบว่า ทั้งสองสมการให้ค่า r เท่ากับ 0.96 แต่ให้ค่า RMSEP แตกต่างกัน คือ 0.49 °Brix และ 0.45 °Brix

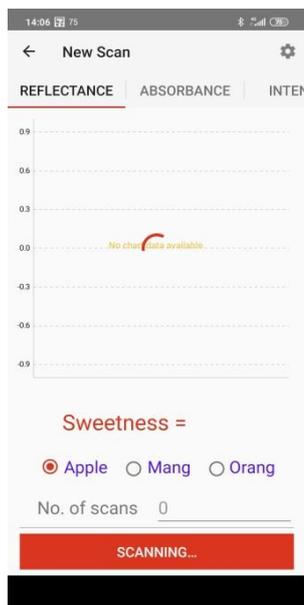
ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า อุปกรณ์วัด SSC ที่ใช้งานร่วมกับสมาร์ตโฟนที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความแม่นยำในการวัด แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำไปใช้วัดความหวานผลแอปเปิลได้จริงโดยมีข้อดี คือ สามารถวัดได้โดยไม่ต้องทำลายตัวอย่าง แสดงผลได้รวดเร็วภายใน 5 วินาที และมีขนาดเล็กพกพาได้ โดยสเปกโทรโฟโตมิเตอร์มีราคาประมาณ 50,000 บาท



ก)



ข)

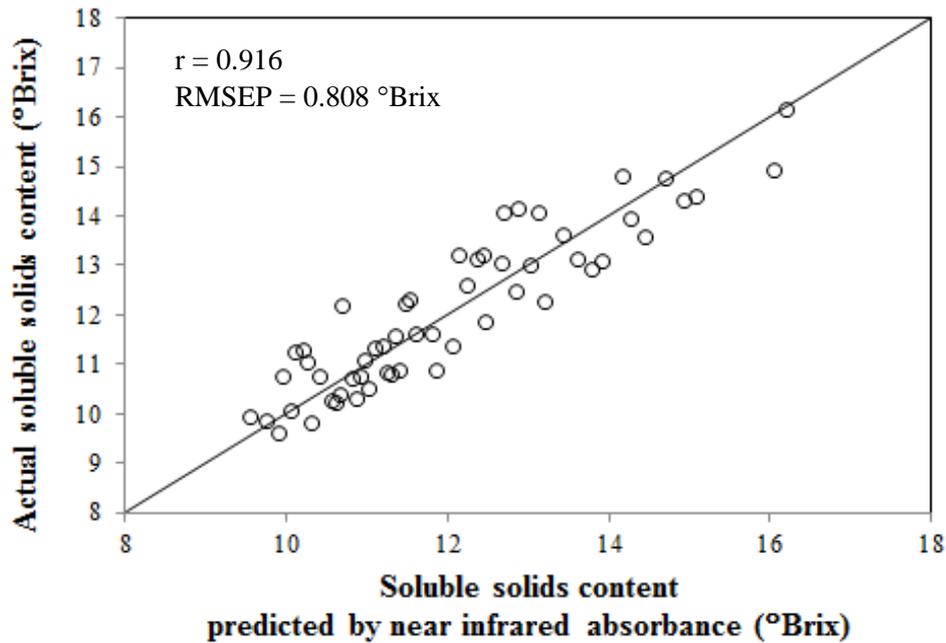


ค)



ง)

ภาพที่ 5 หน้าจอแอปพลิเคชันแสดงให้เห็น ก) หน้าจอสำหรับการติดต่อกับสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ข) หน้าจอสำหรับการสั่งทำงานสแกนผลแอปเปิล ค) หน้าจอแสดงการทำงานขณะถ่ายโอนข้อมูลสเปกตรัม และ ง) หน้าจอแสดงผลค่า SSC



ภาพที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้จากการวัดด้วยรีแฟรกโตมิเตอร์ (actual SSC) และค่าที่ทำนายจากค่าการดูดกลืนแสง NIR (predicted SSC) ผลแอปเปิลกลุ่มทดสอบสมการ

สรุป

งานวิจัยนี้พัฒนาอุปกรณ์วัดความหวาน แอปเปิลพันธุ์ฟูจิประกอบด้วยสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ทำงานร่วมกับสมาร์ตโฟนผ่านการติดต่อด้วยบลูทูธ อุปกรณ์มีขนาดเล็กพกพาได้ ส่วนสำคัญของอุปกรณ์คือ ส่วนของชุดคำสั่งสำหรับการคำนวณเพื่อแสดงค่า SSC บนแอปพลิเคชัน ความแม่นยำในการทำนายขึ้นอยู่กับสมการทำนายที่สร้างจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง NIR กับค่า SSC อ้างอิงที่วัดจากเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ อุปกรณ์สามารถแสดงผลได้ภายใน 5 วินาที และเมื่อนำมาทดสอบสมรรถนะการทำนายค่า SSC กับกลุ่มแอปเปิลที่ไม่เกี่ยวข้องกับการใช้สร้างสมการพบว่า อุปกรณ์สามารถทำนายค่า SSC ได้แม่นยำเมื่อเทียบกับค่า SSC อ้างอิง ให้ค่า r และ RMSEP เท่ากับ 0.916 และ 0.808 °Brix ตามลำดับ โดยค่าทั้งสองชุดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นศักยภาพของเทคนิค NIRS ที่สามารถใช้วัดค่า SSC แบบไม่ทำลาย และสามารถนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์วัดแบบพกพาที่สามารถใช้งานจริงได้ โดยจะต้องออกแบบสร้างตัวอุปกรณ์ให้มีลักษณะเป็นกล่องบรรจุสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ แบตเตอรี่ และมีสวิทช์สำหรับเปิดการใช้งานบลูทูธ ขนาดกะทัดรัด ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปใช้งานได้จริง อย่งไรก็ตาม ความแม่นยำของอุปกรณ์สามารถปรับปรุงให้สูงขึ้นได้ โดยต้องเก็บข้อมูลการดูดกลืนแสง NIR และค่า SSC อ้างอิงจากตัวอย่างในฤดูกาลอื่นๆ เพิ่มเติม แล้วนำไปรวมกับข้อมูลตัวอย่างเดิมที่มีอยู่ และนำข้อมูลที่รวมกันนี้มาวิเคราะห์ปรับปรุงสมการที่มีอยู่ ก็จะทำได้สมการที่มีความเสถียรมากขึ้นสามารถใช้วัดแสดงค่า SSC ผลแอปเปิลได้หลากหลายมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Buyukcan, M.B. and Kavdir, I. 2017. Prediction of some internal quality parameters of apricot using FT-NIR spectroscopy. **Journal of Food Measurement and Characterization** 11(2): 651-659.
- Cho, R.K., Sohn, M.R. and Kwon, Y.K. 1998. New observation of nondestructive evaluation for sweetness in apple fruit using near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 6(A): A75-A78.
- Davies, A.M.C. and Fearn, T. 2006. Back to basics: calibration statistics. **Spectroscopy Europe** 18(2): 31-32.
- Dos Santos, C.A.T., Lopo, M., Páscoa, R.N. and Lopes, J.A. 2013. A review on the applications of portable near-infrared spectrometers in the agro-food industry. **Applied spectroscopy** 67(11): 1215-1233.
- Guo, Z., Wang, M., Agyekum, A.A., Wu, J., Chen, Q., Zuo, M., El-Seedi, H.R., Tao, F., Shi, J., Ouyang, Q. and Zou, X. 2020. Quantitative detection of apple watercore and soluble solids content by near infrared transmittance spectroscopy. **Journal of Food Engineering** 279: 109955.
- Huang, J., Romero-Torres, S. and Moshgbar, M. 2010. Practical Considerations in Data Pre-treatment for NIR and Raman Spectroscopy. **American Pharmaceutical Review** 13: 116.
- Jha, S.N. and Garg, R. 2010. Non-destructive prediction of quality of intact apple using near infrared spectroscopy. **Journal of Food Science and Technology** 47(2): 207-213.
- Liu, R., Qi, S., Lu, J. and Han, D. 2015. Measurement of soluble solids content of three fruit species using universal near infrared spectroscopy models. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 23(5): 301-309.
- Lu, R. and Ariana, D. 2002. A near-infrared sensing technique for measuring internal quality of apple fruit. **Applied Engineering in Agriculture** 18(5): 585.
- Osborne, B.G. and Fearn T. 1986. **Near Infrared Spectroscopy in Food Analysis**. Longman Science & Technical, London.
- Sharabiani, V.R., Sabzi, S., Pourdarbani, R., Solis-Carmona, E., Hernández-Hernández, M. and Hernández-Hernández, J.L. 2020. Non-Destructive Prediction of Titratable Acidity and Taste Index Properties of Gala Apple Using Combination of Different Hybrids ANN and PLSR-Model Based Spectral Data. **Plants** 9(12): 1718.
- Trimble, S. 2019. **Brix as a metric of fruit maturity. Felix Instruments: Applied Food Science**. Available Source: <https://felixinstruments.com/blog/brix-as-a-metric-of-fruit-maturity/>, May 26, 2021.
- Ventura, M., de Jager, A., de Putter, H. and Roelofs, F.P. 1998. Non-destructive determination of soluble solids in apple fruit by near infrared spectroscopy (NIRS). **Postharvest Biology and Technology** 14(1): 21-27.
- Williams, P. and Norris, K. 2001. **Near Infrared Technology in Agricultural and Food Industries**. 2nd ed. American Association

of Cereal Chemists, Inc. St. Paul, Minnesota,
USA.

Workman Jr.J. and Weyer, L. 2012. **Practical guide
and spectral atlas for interpretive near-**

infrared spectroscopy. CRC press, Boca
Raton.

อิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L

Influence of Resistance Spot Welding Parameters on Welding Joints of 316L Stainless Steel Plates

ภูเมศวร์ แสงระยับ* และ นิวัฒน์ มูเก็ม

Phoometh Sangrayub* and Niwat Mookem

Received: 24 February 2021, Revised: 23 May 2021, Accepted: 22 June 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm ซึ่งมีตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดักชันงาน ออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) และใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability function) ในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสม ศึกษาสมบัติทางกล ได้แก่ แรงเฉือน ความแข็งแรงจุดภาค และศึกษาโครงสร้างจุลภาค ขนาดรอยเชื่อม ตลอดจนการแตกหักของรอยเชื่อม ผลการศึกษา พบว่า ปัจจัยหลัก กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดักชันงาน รวมถึงอันตรกิริยาร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้าและความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดักชันงานมีอิทธิพลต่อการรับแรงเฉือนของรอยต่อที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ผลการหาค่าที่เหมาะสม พบว่า เงื่อนไขที่รับแรงเฉือนสูงสุด คือ กระแสไฟฟ้า 4,500 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดักชันงาน 0.3 MPa รับแรงเฉือนสูงสุด เท่ากับ 2,679.59 N ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค ความแข็งแรงจุดภาค และลักษณะการแตกหัก พบว่า การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าและเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าจะทำให้ขนาดของรอยเชื่อมและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดักชันงานจะส่งผลให้ขนาดรอยเชื่อมและความแข็งแรงลดลง

คำสำคัญ: การเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด, เหล็กกล้าไร้สนิม 316L, การทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

Department of Industrial Engineering Technology, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus, Hua Hin, Prachuap Khiri Khan 77110, Thailand.

* ผู้ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): phoometh.san@rmutr.ac.th

ABSTRACT

This research aims to study the influence of resistance spot welding parameters on joints of 316L stainless steel plates (thickness 0.5 mm). The factors included welding current, welding time, and electrode pressure. The study also considered mechanical properties including shear force, micro hardness, microstructure, nugget size, and failure mode. The Box-Behnken design was employed as the experimental strategy, and the desirability function was used as the optimization tool. The results revealed that welding current, welding time, electrode pressure, and 2-way interactions between welding current and electrode pressure were the main effects that influence the shear force of joints at $\alpha = 0.05$. The optimal welding condition was 0.3 MPa of electrode pressure, 4,500 A of weld current, and 2 s of weld time, and the corresponding shear force load was 2,679.59 N. The experimental results of microstructure, microhardness, and failure modes showed that nugget size and tensile shear strength increased with the increasing of welding current and welding time. In contrast, the increasing of electrode pressure affected the decreasing of nugget size and tensile shear strength.

Key words: resistance spot welding, stainless Steel 316L, box-behnken design

บทนำ

ปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิม 316L เป็นที่นิยมนำมาใช้ประดิษฐ์เป็นชิ้นส่วนประกอบต่างๆ กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิต เช่น ยานพาหนะ เรือ หรือตึกอาคาร (Zhang *et al.*, 2020) เนื่องจากมีสมบัติทางกลที่เหมาะสม ง่ายต่อการขึ้นรูป มีราคาถูก และมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม (NAS, 1990) มีกระบวนการต่อวัสดุหลากหลายที่สามารถนำมาใช้การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม เช่น กระบวนการเชื่อมทิก (Tungsten Inert Gas: TIG) กระบวนการเชื่อมมิก (Metal Inert Gas: MIG) กระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged arc welding: SAW) และกระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด (Resistance spot welding: RSW) (Kianersi *et al.*, 2014) ในกลุ่มกระบวนการเชื่อมเหล่านี้ กระบวนการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดเป็นที่นิยมนำมาใช้งานในการต่อโลหะแผ่น (Cao *et al.*, 2021) เนื่องจากเป็นกระบวนการต่อที่มีประสิทธิภาพสูง รวดเร็ว และ

ใช้ต้นทุนต่ำในการผลิตเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมโลหะด้วยวิธีอื่น (Kim *et al.*, 2019) การต่อวัสดุด้วยวิธีนี้ใช้หลักการเกิดความร้อนจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อภายใต้แรงกดจากอิเล็กโทรด (Miller, 2012) ซึ่งอิเล็กโทรดจะทำจากวัสดุที่มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี เช่น ทองแดง หรือทองแดงผสมเป็นต้น สาเหตุที่ควรใช้ชนิดของอิเล็กโทรดที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดี เนื่องจากกระบวนการเชื่อมนี้ต้องการให้เกิดความร้อน ณ บริเวณรอยต่อของชิ้นงานเพื่อให้เกิดการหลอมเหลว ซึ่งถ้าใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงในการเชื่อมส่งผลให้แท่งอิเล็กโทรดมีอุณหภูมิสูงจนเกิดการหลอมเหลวติดกับตัวชิ้นงาน ทำให้อิเล็กโทรดเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้อีกตลอดจนเป็นผลกระทบต่อรอยเชื่อม ดังนั้นชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเชื่อมนี้ (Salem, 2011) นอกจากนี้ในกระบวนการยังมีปัจจัยสำคัญที่มี

อิทธิพลต่อความแข็งแรงของรอยเชื่อม คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และความดันกดชิ้นงานจากอิเล็กโทรด ซึ่ง 3 ตัวแปรนี้เป็นปัจจัยหลักๆ ที่มีหลายงานวิจัยได้ทำการศึกษาไว้ (Verm *et al.*, 2014; Marashi, 2008) และเป็นตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของรอยเชื่อมทั้งในเชิงสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค การใช้เงื่อนไขของตัวแปรในการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดที่ไม่เหมาะสมกับวัสดุ จะมีผลให้รอยเชื่อมไม่แข็งแรงและอื่นๆ เช่น ขนาดรอยเชื่อมเล็กหรือความลึกของรอยเชื่อมมีมากเกินไป ด้วยเหตุนี้เงื่อนไขของตัวแปรในการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดจึงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อกระบวนการ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm มีตัวแปรที่ศึกษาคือ กระแสไฟฟ้า (Welding current) เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (Welding time) และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน (Electrode pressure) ออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคบ็อกซ์-เบห์นเคน และใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ และหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm ด้วยความต้านทานแบบจุดในงานวิจัยนี้ศึกษา 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟฟ้า 3,000-5,000 A, เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 1-2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3-0.5 MPa ซึ่งค่าของปัจจัยเหล่านี้ได้ข้อมูลมาจากคู่มือการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยการเชื่อมความต้านทานแบบจุด (NiDi, 1979) ปัจจัยและระดับในการทดลองแสดงดังตารางที่ 1 ออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ MINITAB เวอร์ชัน 16 ด้วยเทคนิคบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) ทำซ้ำ 3 ครั้ง ทั้งหมด 45 การทดลอง การทดลองแบบ Box-Behnken เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากในกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับโดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการความสัมพันธ์เมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative factors) (Chailungka *et al.*, 2013) ผลการทดลองที่ตำแหน่งกึ่งกลางจะถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความเหมาะสมของรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงดังสมการ (1)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i \neq j=1}^n \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

เมื่อ $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ X_i คือ ตัวแปรอิสระ

ตารางที่ 1 แสดงปัจจัยและระดับในการทดลอง

Factors	Code	Levels		
		-1	0	1
Welding current (A)	X_1	3,000	4000	5,000
Welding time (Sec)	X_2	1	1.5	2
Electrode pressure (MPa)	X_3	0.3	0.4	0.5

การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ จะใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability function) เพื่อหาเงื่อนไขในการเชื่อมที่ให้ค่าแรงเฉือนสูงสุด ถ้าให้ $Y_i(x)$ เป็นค่าผลตอบแทน (Response value) ของเงื่อนไขการเชื่อม x และ $d_i(Y_i)$ คือ ฟังก์ชันความพึงพอใจของ Y_i ในช่วง 0-1 ของฟังก์ชันความพึงพอใจ

ค่า $d_i(Y_i) = 0$ คือ ค่าความพึงพอใจที่น้อยที่สุด และ $d_i(Y_i) = 1$ คือ ค่าความพึงพอใจที่มากที่สุด และในทางปฏิบัติจะใช้ค่าทำนาย แทน Y_i และค่าความพึงพอใจรวม D สามารถหาได้จากค่ามัธยฐานเรขาคณิต (Geometric mean) ของความพึงพอใจของแต่ละผลตอบแทน ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$D = \left(\prod_{i=1}^k d_i(\hat{Y}_i) \right)^{1/k} \quad (2)$$

เมื่อ k คือ จำนวนของผลตอบแทน โดยที่ค่าผลตอบแทน สามารถแปลงเป็นค่าความพึงพอใจได้โดยใช้วิธีของ Derringer and Suich (1980) ในกรณีที่ต้องการ

ผลตอบแทนที่น้อยที่สุด ฟังก์ชันความพึงพอใจสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } \hat{Y}_i(x) < T_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - U_i}{T_i - U_i} \right)^r & \text{if } T_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq U_i \\ 0 & \text{if } \hat{Y}_i(x) > U_i \end{cases} \quad (3)$$

เมื่อ U_i คือ ขีดจำกัดบน (Upper limit) ของผลตอบแทน r คือ ค่าน้ำหนักของฟังก์ชัน และ T_i คือ ค่าเป้าหมาย (Target) ของผลตอบแทน ในกรณีที่ต้องการผล

ตอบที่มากที่สุด ฟังก์ชันความพึงพอใจสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } \hat{Y}_i(x) < L_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - L_i}{T_i - L_i} \right)^r & \text{if } L_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq T_i \\ 1 & \text{if } \hat{Y}_i(x) > T_i \end{cases} \quad (4)$$

เมื่อ L_i คือ ขีดจำกัดล่าง (Lower limit) ของผลตอบแทน และในกรณีที่ต้องการผลตอบแทนที่ใกล้เคียงกับ

ค่าเป้าหมายมากที่สุด ฟังก์ชันความพึงพอใจสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

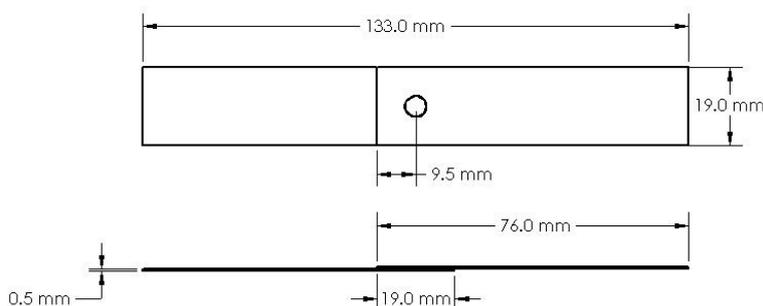
$$d_i(\hat{Y}_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } \hat{Y}_i(x) < L_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - L_i}{T_i - L_i}\right)^s & \text{if } L_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq T_i \\ \left(\frac{\hat{Y}_i(x) - U_i}{T_i - U_i}\right)^t & \text{if } T_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq U_i \\ 0 & \text{if } \hat{Y}_i(x) > U_i \end{cases} \quad (5)$$

เมื่อ s และ t คือ ค่าน้ำหนักของฟังก์ชัน

2. การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

โลหะแผ่นใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm มาต่อแบบต่อเกลย ตามมาตรฐานของการกำหนดขนาดชิ้นงานทดสอบสำหรับการเชื่อมด้วยความต้านทาน (Resistance welding) AWS C3 (Julupai, 1996) แสดงดังภาพที่ 1 และนำไปเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดภายใต้บรรยากาศสปกติด้วยเครื่อง Spot welding ยี่ห้อ Fan รุ่น ISO 25510522

โดยใช้อิเล็กโทรดรูปร่างตามมาตรฐานแบบ E ชนิดทองแดงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm (Salem, 2011) หลังการเชื่อมนำตัวอย่างมาทดสอบแรงเฉือนของรอยต่อ โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ยี่ห้อ Zwick รุ่น ZO20 ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน JIS Z 3192 ใช้ความเร็วในการดึงที่ 10 mm/min (American Welding Society, 2008)



ภาพที่ 1 รูปร่างและขนาดของชิ้นงานทดสอบ

สำหรับชิ้นงานอีกชุดหนึ่งนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX53M และเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) ยี่ห้อ

JEOL รุ่น JSM-6510LV ทดสอบความแข็งจุลภาคด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งจุลภาค Hardness Tester ยี่ห้อ Wilson Hardness รุ่น Tukon 1102/1202 ตามมาตรฐานการทดสอบแรงกด AWS D8.9 M-2012 (American Welding Society, 2012) การกดความแข็งแบบวิกเกอร์ใช้หัวกดแบบเพชรรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมุม 136 deg. แรงกด 300 g ใช้เวลาในการทดสอบ 10 s

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์และหาความแปรปรวนของแบบจำลองในเทอมต่างๆ พบว่า การตรวจสอบสมมติฐานของแบบจำลองจากส่วนตกค้างของข้อมูลไม่พบสิ่งผิดปกติใดๆ ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงเหนือนของรอยต่อ คือ กระแสไฟฟ้า (X_1) เวลา

ในการปล่อยกระแสไฟฟ้า (X_2) และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน (X_3) รวมทั้งอันตรกิริยาของกระแสไฟฟ้าและความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน ($X_1 * X_3$) มีผลต่อค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p -value < 0.05) แสดงค่าสัมประสิทธิ์หลังการปรับปรุงของแบบจำลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยในรูปแบบการเข้ารหัส

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2239.69	16.19	138.37	<0.001
X_1	218.75	22.16	9.87	<0.001
X_2	114.84	22.16	5.18	<0.001
X_3	-141.96	22.16	-6.41	<0.001
$X_1 * X_3$	-81.51	31.34	-2.60	0.013

R-Sq = 81.86% R-Sq (adj) = 79.54%

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงเหนือนสูงสุดของจุดเชื่อมไปเขียนสมการทำนายค่าความแข็งแรงในการรับแรงเหนือนสูงสุดสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Y = 2239.69 + 218.75 (X_1) + 114.84 (X_2) - 141.96 (X_3) - 81.51(X_1 * X_3) \quad (6)$$

การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงเหนือนสูงสุดของจุดเชื่อมโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม MINITAB เวอร์ชัน 16 ผู้วิจัยเลือกกำหนดค่าเป้าหมาย

ทำนายที่ (6) เมื่อ Y คือ ค่าความแข็งแรงในการรับแรงเหนือนสูงสุด และค่าปัจจัยทั้งสามในสมการแทนด้วยตัวแปรถูกเข้ารหัส คือ

ของผลตอบสนอง (Goal) เป็นค่ามากที่สุดของผลตอบสนอง (Maximum) เนื่องจากต้องการให้ได้ค่าความแข็งแรงในการรับแรงเหนือนของจุดเชื่อมสูงสุดค่าที่เหมาะสมของปัจจัยแสดงตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลตอบสนองเงื่อนไขที่เหมาะสม

Response Optimization						
Factors	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Shear force	Maximum	1638	2600	2600	1	1
Global Solution						
Welding current = 0.88	Welding time = 1		Electrode pressure = -1			
Predicted Responses						
Shear force = 2681.55, desirability = 1.00 Composite Desirability = 1.00						

ค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากการคำนวณของโปรแกรมสำหรับชุดการทดลองนี้คือ กระแสไฟฟ้าที่ระดับ 0.88 (4,400 A) เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ระดับ 1 (2 s) และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงานที่ระดับ -1 (0.3 MPa) โดยได้ค่าผลตอบสนองจากการทำนายแรงเฉือนสูงสุดของจุดเชื่อม (Predicted Response) เท่ากับ 2681.55 N และได้ค่าความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 1.00 การทดลองเพื่อ

ยืนยันผลจากค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการรับแรงเฉือนสูงสุด ผู้วิจัยได้ทำการปรับค่าปัจจัยต่างๆ บนเครื่องเชื่อมให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมจากการทำนายมากที่สุด โดยปรับค่ากระแสไฟฟ้า 4,500 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นแสดงผลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การทดลองเพื่อยืนยันผล

No.	Factors			Shear force (N)
	Welding current (A)	Welding time (s)	Electrode pressure (MPa)	
1	4,500	2	0.3	2680.10
2	4,500	2	0.3	2677.33
3	4,500	2	0.3	2679.27
4	4,500	2	0.3	2678.71
5	4,500	2	0.3	2682.54
Average				2679.59
SD				1.93
95% CI				2677.19 - 2681.99

ผลการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า ค่าแรงเฉือนในการทดลองยืนยันผลทั้งหมดอยู่ในช่วงความเชื่อมั่น และมีค่าการ

เบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองยืนยันผลที่มีค่าต่ำ โดยมีค่าเฉลี่ยของแรงเฉือนเท่ากับ 2679.59 N

2. ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค

2.1 การศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า

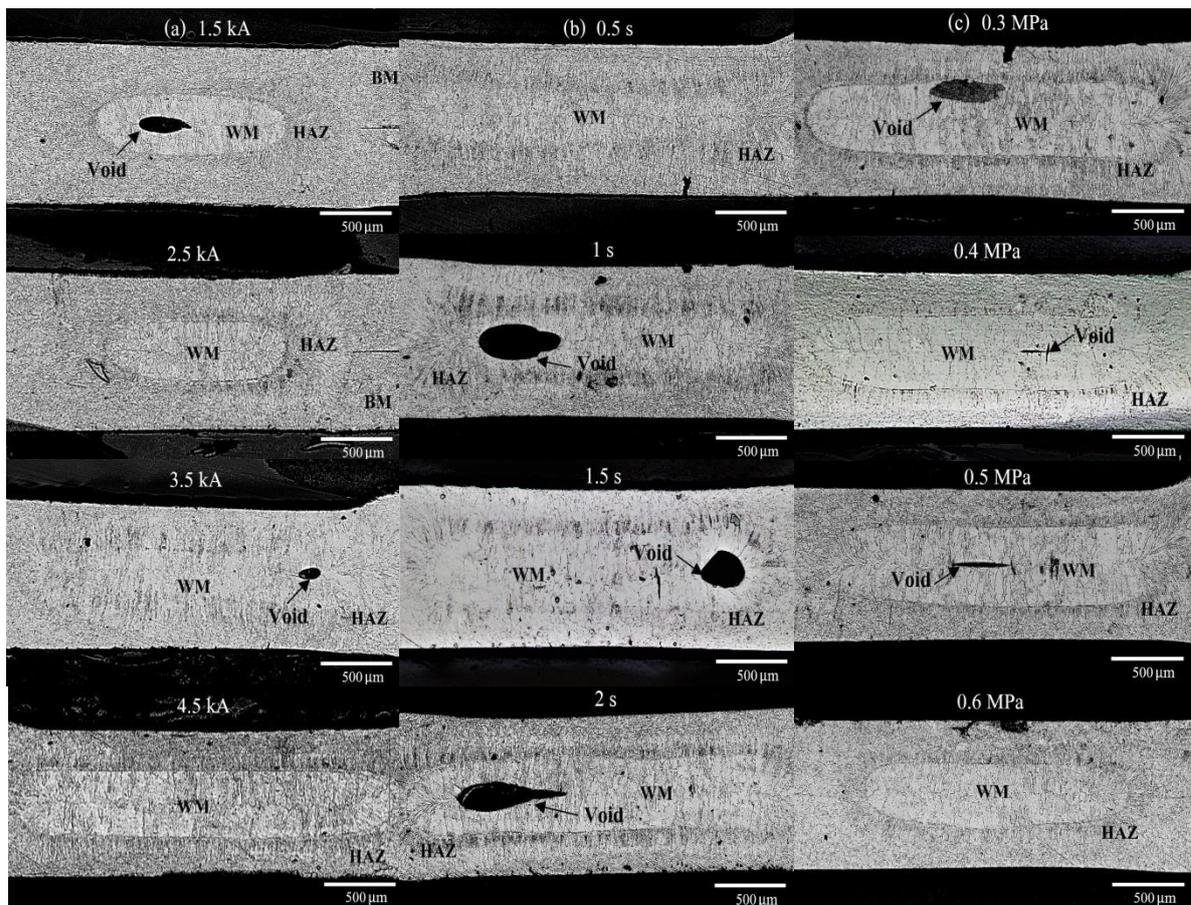
อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm ด้วยกระบวนการเชื่อมความดันแบบจุดที่กระแสไฟฟ้า 1,500, 2,500, 3,500 และ 4,500 A โดยกำหนดตัวแปรอื่นในการเชื่อมคงที่ คือ เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa ผลการทดลองจากภาพที่ 2 คอลัมน์ (a) พบว่า การเพิ่ม

กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมส่งผลให้ขนาดรอยเชื่อมมีขนาดโตขึ้น โดยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 1,500 A มีขนาดรอยเชื่อมเล็กที่สุด ซึ่งขนาดรอยเชื่อมจะโตขึ้นเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม สาเหตุนี้เกิดเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้ามีผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้น การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าทำให้ความร้อน ในการเชื่อมสูงขึ้น (Beni *et al.*, 2019) สอดคล้องกับสมการที่ (7) ตามทฤษฎี คือ

$$H = I^2Rt \quad (7)$$

เมื่อ H คือ ความร้อน I คือ กระแสไฟฟ้า R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ t คือ ระยะเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า ซึ่งความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำ

ให้โลหะเกิดการหลอมละลายและผสานกันเป็นรอยเชื่อม ขนาดของรอยเชื่อมเพิ่มขึ้นตามความร้อนที่เกิดขึ้นในการเชื่อม



ภาพที่ 2 ภาพถ่าย OM ที่กำลังขยาย 50x คอลัมน์ (a) คือ ของอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า, (b) คือ เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และ (c) คือ ความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน

2.2 อิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า

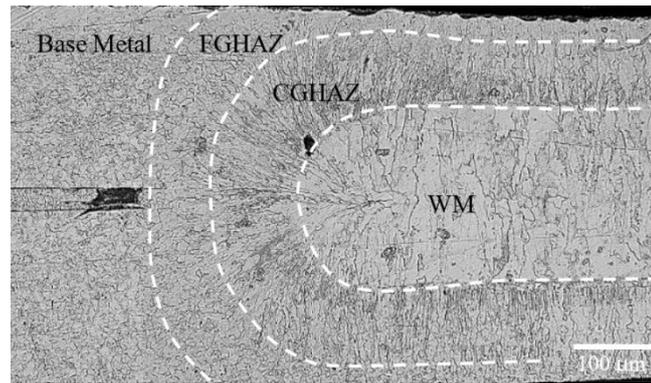
อิทธิพลของเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 s โดยกำหนดตัวแปรอื่นคงที่ คือ กระแสไฟฟ้า 4,500 A และความดันจากอิเล็กโทรดกักชิ้นงาน 0.3 MPa ผลการทดลอง พบว่า การเพิ่มเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าส่งผลให้ขนาดรอยเชื่อมมีขนาดโตขึ้นแสดงดังภาพที่ 2 คอลัมน์ (b) สาเหตุมาจากอิทธิพลทางความร้อนตามทฤษฎีและสมการที่ (7) เมื่อเพิ่มเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าทำให้ความร้อนในการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น จึงเป็นผลทำให้ขนาดรอยเชื่อมมีขนาดโตขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Akkas (2017) และ Kim *et al.* (2019) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการศึกษาคอร์สร้างจุลภาคของอิทธิพลทั้งสามปัจจัยจากภาพที่ 2 พบว่า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้ามีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดรอยเชื่อมน้อยที่สุด สาเหตุเนื่องจากขนาดความหนาขึ้นทดสอบที่มีความหนาเพียง 0.5 mm ซึ่งมีพื้นที่ในการเชื่อมค่อนข้างน้อยจึงทำให้รอยเชื่อมเกิดความร้อนและเย็นตัวอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ช่วงเวลาในการเชื่อมที่ใช้ทำการทดลองเพียง 0.5 - 2 s ทำให้เวลาในการเชื่อมจึงมีอิทธิพลน้อยที่จะทำให้ขนาดรอยเชื่อมเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อในตารางที่ 2

2.3 อิทธิพลของความดันจากอิเล็กโทรดกักชิ้นงาน

อิทธิพลของความดันจากอิเล็กโทรดกักชิ้นงานที่ 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 MPa โดยกำหนดตัวแปรอื่นคงที่ คือ กระแสไฟฟ้า 4,500 A และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s ผลการศึกษาดังภาพที่ 2 คอลัมน์ (c) พบว่า การเพิ่มความดันจากอิเล็กโทรดกักชิ้นงานทำให้ขนาดของรอยเชื่อมและความ

แข็งแรงของรอยต่อลดลง รอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกักชิ้นงาน 0.3 MPa สามารถรับแรงดึงได้มากกว่าที่รอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกักชิ้นงาน 0.6 MPa เนื่องจากการใช้ความดันกักชิ้นงานที่ 0.6 MPa ทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดการเสียดสีมากกว่าหรือมีผิวสัมผัสมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดบริเวณหน้าสัมผัสของรอยต่อลดลง ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจากความต้านทานไฟฟ้าจึงต่ำกว่าที่ใช้ความดันกักชิ้นงานที่ 0.3 MPa ด้วยเหตุนี้ รอยต่อที่ใช้ความดันจากอิเล็กโทรดกักชิ้นงาน 0.3 MPa จึงมีขนาดรอยเชื่อมและความแข็งแรงของรอยต่อมากกว่า ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pouranvari and Ranjbarnoode (2013) และ Wohner *et al.* (2021)

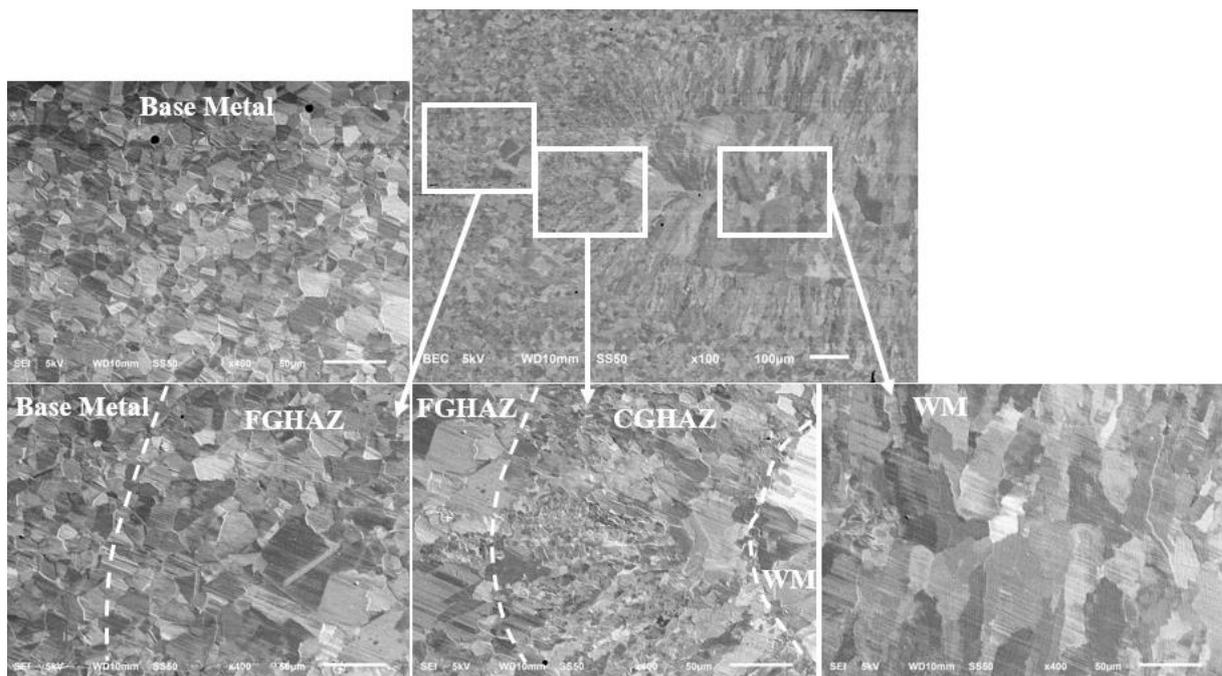
จากผลการศึกษาคอร์สร้างจุลภาคพบว่า คอร์สร้างจุลภาคของจุดเชื่อมเกิดลักษณะของคอร์สร้างและขนาดเกรนที่ต่างกัน บริเวณรอยเชื่อม (Weld metal: WM) เป็นจุดที่เกิดการหลอมละลายมีลักษณะเกรนโตและเรียวยาว บริเวณกระทบร้อนซึ่งแบ่งได้เป็น 2 โซน คือ กระทบร้อนเกรนคอลัมน์าร์ (Columnar grain heat affected zone: CGHAZ) และ กระทบร้อนเกรนละเอียด (Fine grain heat affected zone: FGHAZ) ในงานวิจัยของ Lee and Chang (2020); Banerjee *et al.* (2016) ได้กล่าวว่า อิทธิพลของความร้อนที่เกิดขึ้นในการเชื่อมความต้านทานแบบจุดมีผลให้คอร์สร้างจุลภาคเกิดต่างกัน โดยบริเวณรอยเชื่อม (WM) เกิดความร้อนสูงสุด รองลงมาคือ บริเวณกระทบร้อนเกรนคอลัมน์าร์ (CGHAZ) และบริเวณกระทบร้อนเกรนละเอียด (FGHAZ) ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้รูปร่างและขนาดเกรนของรอยเชื่อมดังภาพที่ 3 มีคอร์สร้างจุลภาคและสมบัติทางกลที่ต่างกัน



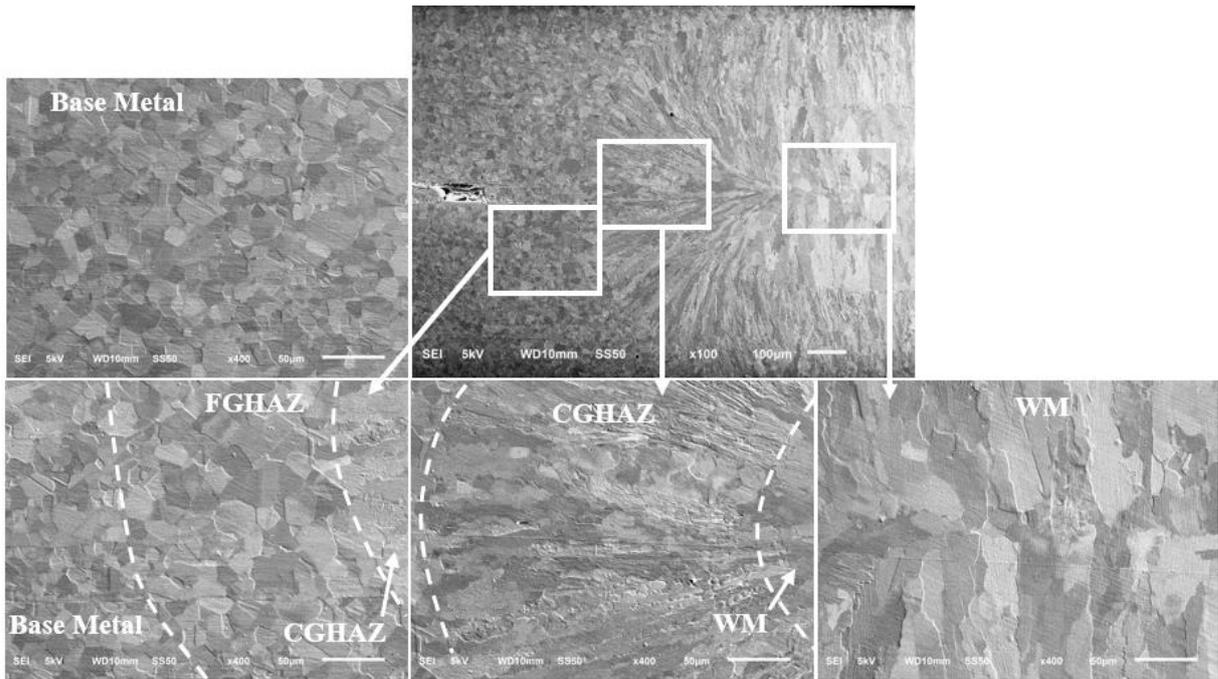
ภาพที่ 3 ภาพถ่าย OM ขนาดเกรนและพื้นที่ WM, CGHAZ, FGHAZ และ Base Metal ที่กำลังขยาย 100x

ภาพที่ 4 และ 5 คือ ภาพถ่ายลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของจุดเชื่อมจากการถ่ายด้วย SEM ที่กำลังขยาย 100x และ 400x ของชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งแรงต่ำสุด และชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งแรงสูงสุด ตามลำดับ ผลการศึกษา พบว่า ทั้งสองชิ้นงานเกิด

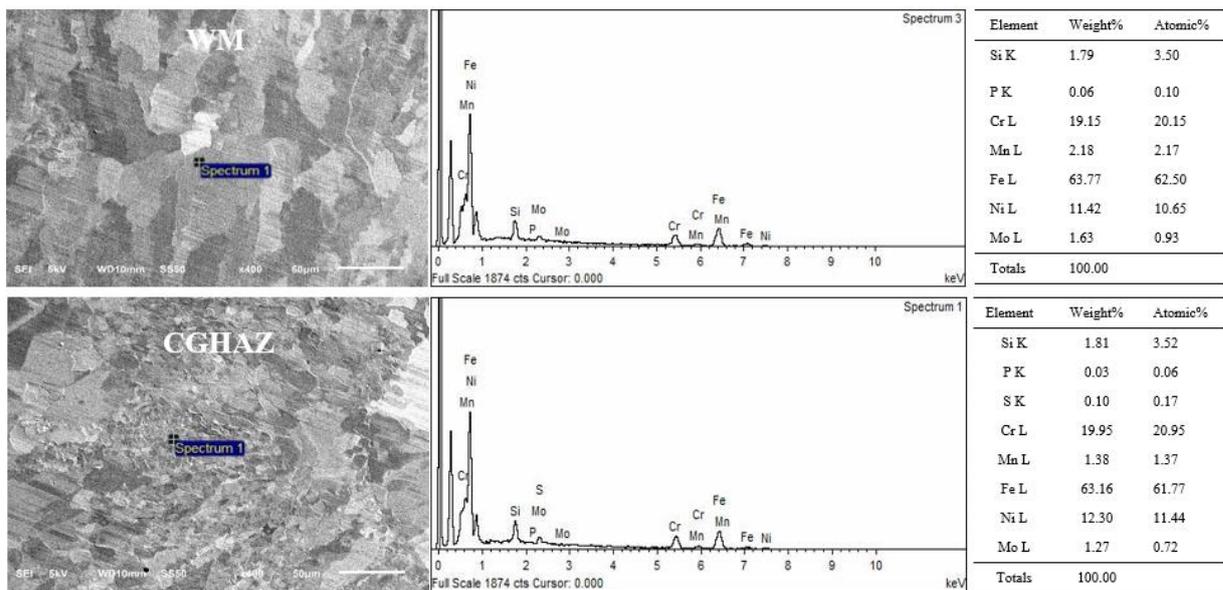
โครงสร้างจุลภาคที่มีลักษณะเหมือนกัน ทั้งด้านลักษณะเฟส ขนาดเกรน และองค์ประกอบทางเคมีของเฟสที่เกิดขึ้นดังแสดงผลการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการเคมีด้วย EDS ดังภาพที่ 6 และ 7 ตามลำดับ



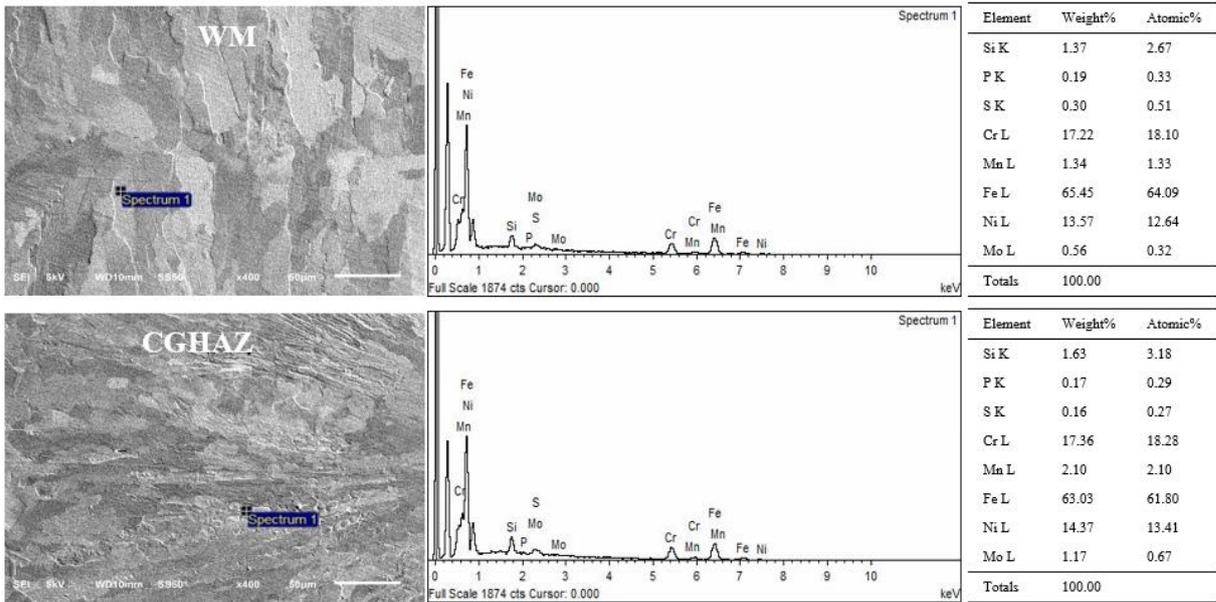
ภาพที่ 4 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 100x และ 400x ของชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งแรงต่ำสุด บริเวณ WM, CGHAZ, FGHAZ และ Base Metal



ภาพที่ 5 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 100x และ 400x ของชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งแรงสูงสุด บริเวณ WM, CGHAZ, FGHAZ และ Base Metal



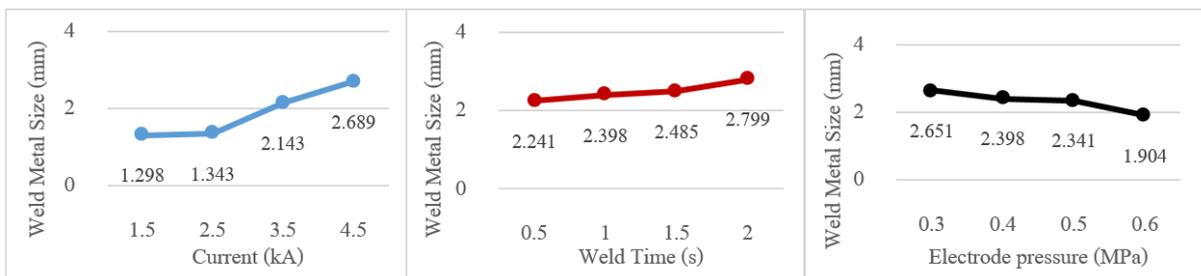
ภาพที่ 6 ผลวิเคราะห์ EDS ที่กำลังขยาย 400x ชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งแรงต่ำสุด บริเวณ WM และ CGHAZ



ภาพที่ 7 ผลวิเคราะห์ EDS ที่กำลังขยาย 400x ซึ่งงานทดสอบที่มีความแข็งแรงสูงสุด บริเวณ WM และ CGHAZ

ผลการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจุดเชื่อมด้วย OM, SEM และ EDS สรุปได้ว่าบริเวณจุดเชื่อมเกิดโครงสร้างจุลภาค ขนาดเกรน และองค์ประกอบทางเคมีของเฟสที่เกิดขึ้นเหมือนกันทุกเงื่อนไขในการทดลอง โดยอิทธิพลของตัวแปรที่ทำการศึกษารุ่นนี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด

ของจุดเชื่อมดังแสดงในภาพที่ 8 การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าและเวลาในการเชื่อมมีผลให้ขนาดจุดเชื่อมโตขึ้น ในขณะที่การที่การเพิ่มขึ้นของความดันจากอิเล็กโทรดกดขึ้นในการเชื่อมมีผลให้จุดเชื่อมมีขนาดเล็กลง

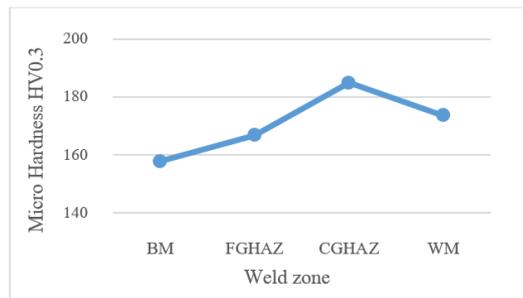


ภาพที่ 8 อิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของจุดเชื่อม

3. ผลการศึกษาความแข็งจุลภาค

จากการนำชิ้นทดสอบการศึกษอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคมาทดสอบความแข็งจุลภาค แสดงผลดังภาพที่ 9 จะเห็นได้ว่าพื้นที่ CGHAZ หรือบริเวณกระทบบร้อนเกรนคอลัมน์าร์มี

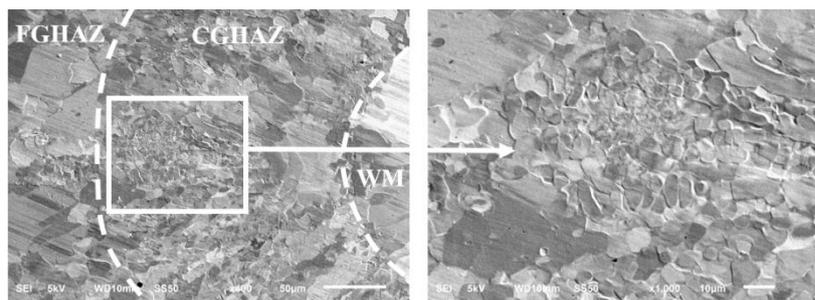
ความแข็งจุลภาคสูงสุดที่ 184.9 HV รองลงมา คือพื้นที่ WM มีค่าความแข็งเท่ากับ 173.5 HV และ FGHAZ มีความแข็งจุลภาค 166.7 HV พื้นที่ BM (Base metal) จะมีความแข็งน้อยที่สุด 157.7 HV



ภาพที่ 9 กราฟแสดงผลการศึกษาต่อความแข็งจุลภาค

สำหรับสาเหตุที่พื้นที่ CGHAZ มีค่าความแข็งมากกว่าพื้นที่ FGHAZ ผลจากการถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1000x ภาพที่ 10 พบว่า พื้นที่ CGHAZ ได้รับอิทธิพลทางความร้อนมากกว่าพื้นที่ FGHAZ ทำให้เกิดเกรนขนาดเล็กแทรกอยู่ในพื้นที่ CGHAZ

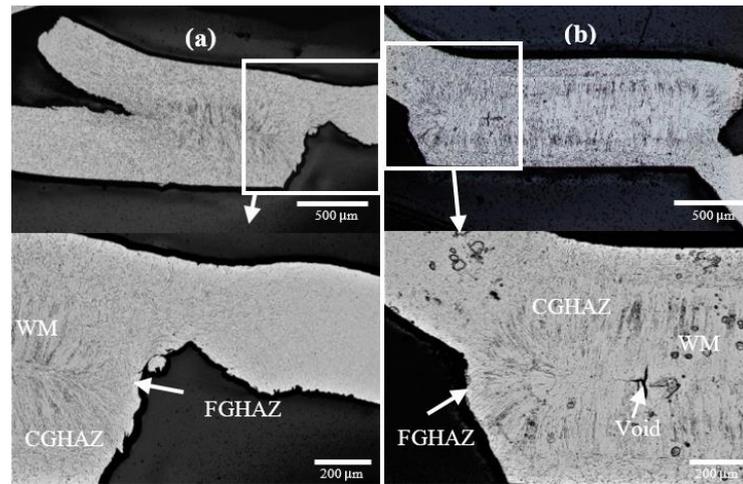
ซึ่งเมื่อเทียบกับขนาดเกรนของพื้นที่ FGHAZ เห็นได้ว่า มีขนาดเกรนที่เล็กกว่าอย่างเห็นได้ชัด ด้วยเหตุนี้จึงทำให้พื้นที่ CGHAZ มีค่าความแข็งและความแข็งมากกว่าพื้นที่ FGHAZ



ภาพที่ 10 ภาพถ่าย SEM พื้นที่ CGHAZ ที่กำลังขยาย 1000x

เมื่อพิจารณาลักษณะการแตกหักของชิ้นงานทดสอบดังภาพที่ 11 พบว่า ชิ้นงานทดสอบทั้ง 2 ชิ้นเกิดการแตกหักบริเวณพื้นที่ FGHAZ หรือพื้นที่โลหะพื้น โชนกระทบร้อนเกรนละเอียดทั้งคู่ เนื่องจากพื้นที่ FGHAZ มีค่าความแข็งต่ำที่สุดในบริเวณจุดเชื่อมจึงต้านแรงเฉือนได้น้อย สำหรับชิ้นงานทดสอบที่ใช้กระแสไฟฟ้า 1,500 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 0.5 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.6 MPa

มีความแข็งแรงต่ำสุด เพราะเงื่อนไขดังกล่าวเกิดความร้อนในการเชื่อมต่ำสุด ทำให้ขนาดรอยเชื่อมหรือขนาดรัศมีของจุดเชื่อมที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กที่สุด ส่งผลให้สามารถรับแรงเฉือนได้น้อยเมื่อเทียบกับการใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 5,000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน 0.3 MPa จุดเชื่อมมีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่าสามารถรับแรงเฉือนได้สูงกว่า

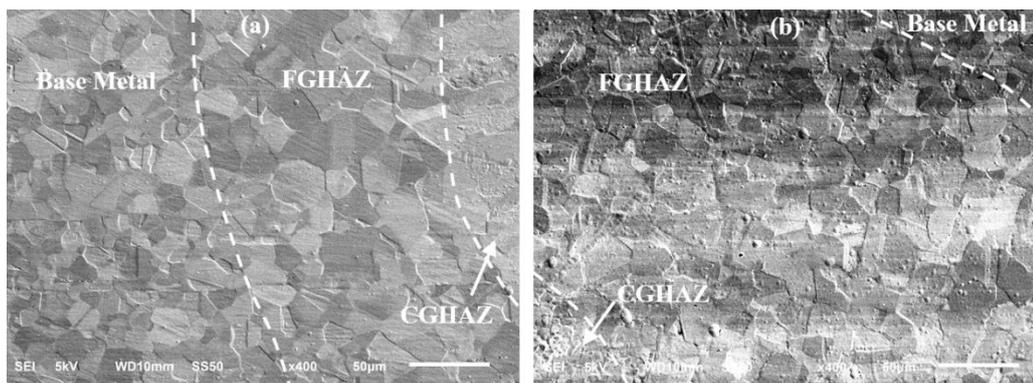


ภาพที่ 11 ลักษณะการแตกหักชิ้นงานทดสอบจากภาพถ่าย OM ที่กำลังขยาย 50x และ 100x ของชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งแรงต่ำสุด (a) และมีความแข็งแรงสูงสุด (b)

อย่างไรก็ตามการเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมถึงแม้ว่ามีผลทำให้ขนาดของจุดเชื่อมโตขึ้น แต่ความร้อนในการเชื่อมที่สูงเกินไปส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกล ดังแสดงในภาพที่ 12 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 400x ของพื้นที่ FGHAZ ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้า 5,000 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดขึ้น 0.3 MPa พบว่า ความร้อนที่สูงเกินไปทำให้เกรนโตขึ้นและขยายขอบเขตของพื้นที่โซนกระทบร้อน ยิ่งไปกว่า ยังมีผลให้ค่าความแข็งของพื้นที่ FGHAZ ลดลง โดยมีค่าความแข็งเท่ากับ 153.5 HV ซึ่งมีความแข็งน้อยกว่าพื้นที่ FGHAZ ที่เงื่อนไขกระแสไฟฟ้า 4,500 A มีค่าความแข็งเท่ากับ 166.7 HV ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 4,500 A เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดขึ้นงาน 0.3 MPa เป็นเงื่อนไขที่สามารถรับแรงเฉือนได้สูงสุดของชิ้นทดสอบที่ได้จากการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm ด้วยกระบวนการเชื่อมความดันแบบจุด

สำหรับการเกิด Void หรือโพรงในพื้นที่ WM ในการศึกษาค้างนี้ เป็นผลมาจากการเพิ่ม

กระแสไฟฟ้าและเวลาในการเชื่อมทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นตามสมการที่ (7) (Vijayan *et al.*, 2019) ความร้อนที่สูงจนโลหะเกิดการหลอมละลายทำให้เกิดการระเหิดของเหลว เกิดเป็น Void ในพื้นที่ของ WM ยิ่งความร้อนสูงโอกาสการเกิด Void ก็มีความเป็นไปได้สูงเช่นกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพบ Void เกิดในพื้นที่ WM ของการศึกษานี้ของกระแสไฟฟ้าและเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมสำหรับในแง่ของ Void ที่เกิดขึ้นในการศึกษานี้ของแรงกดนั้น การเพิ่มขึ้นของแรงกดทำให้เกิดความร้อนในการเชื่อมลดน้อยลงแต่แรงกดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิการเกิด Void ลดลง เนื่องจากแรงกดที่สูงยับยั้งการระเหิดของเหลวได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang *et al.*, (2014) และ Pouranvari and Marashi (2013) อย่างไรก็ตามโพรงที่เกิดขึ้นในการศึกษาค้างนี้ไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อเนื่องจากพื้นที่ที่เกิดโพรง พบในบริเวณ WM ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความแข็งแรงมากกว่าพื้นที่ FGHAZ และ Base Metal ดังนั้นในการศึกษาค้างนี้จึงไม่พบการแตกหักของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากเกิด Void ในพื้นที่ WM



ภาพที่ 12 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 400x เปรียบเทียบขนาดเกรนและขอบเขตของพื้นที่ FGHAZ (a) ที่กระแสไฟฟ้า 4,500 A และ (b) 5,000 A

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุดที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L หนา 0.5 mm ซึ่งมีตัวแปรที่ศึกษา คือ กระแสไฟฟ้า เวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน ผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ผลการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของรอยต่อ พบว่า ปัจจัยหลัก กระแสไฟฟ้า เวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน รวมทั้งอันตรกิริยาร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้า และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงานมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ค่าปัจจัยที่เหมาะสมในทางสถิติสำหรับชุดการทดลองนี้ คือ กระแสไฟฟ้า 4,400 A เวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2 s และความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa แต่เนื่องจากเครื่องเชื่อมความต้านทานที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีข้อจำกัดไม่สามารถทดลองที่กระแสไฟฟ้า 4,400 A ได้ ผู้วิจัยจึงทดลองเชื่อมที่ 4,500 A เวลาปล่อยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 2 s และความดันจาก

อิเล็กโทรดกดชิ้นงาน 0.3 MPa โดยได้ค่าแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ 2,679.59 N

2. ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาค พบว่า การเพิ่มกระแสไฟฟ้าและเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้า จะทำให้ขนาดของรอยเชื่อมและความแข็งแรงของรอยต่อเพิ่มขึ้น แต่การใช้กระแสไฟฟ้าและเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ทำให้ความร้อนของจุดเชื่อมสูงเกินไปส่งผลกระทบบต่อโซนกระทบร้อนเกิดการขยายขอบเขตและมีเกรนโตทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง สำหรับการเพิ่มความดันจากอิเล็กโทรดกดชิ้นงานส่งผลให้ขนาดรอยเชื่อมและความแข็งแรงของรอยต่อลดลง

3. ผลการศึกษาความแข็งจุลภาคและลักษณะการแตกหัก พบว่า ชิ้นงานทดสอบทุกชิ้นงานเกิดการแตกหักบริเวณพื้นที่ FGHAZ เนื่องจากพื้นที่ FGHAZ มีค่าความแข็งต่ำที่สุดในบริเวณจุดเชื่อมจึงต้านแรงดึงเฉือนได้น้อย โดยพื้นที่ CGHAZ มีความแข็งจุลภาคสูงสุดที่ 184.9 HV รองลงมา คือ พื้นที่ WM มีค่าความแข็งเท่ากับ 173.5 HV และ FGHAZ มีความแข็งจุลภาคต่ำสุดที่ 166.7 HV

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ตามสัญญาเลขที่ A-52/2561 และขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Akkas, N. 2017. Welding Time Effect on Tensile–Shear Loading in Resistance Spot Welding of SPA-H Weathering Steel Sheets Used in Railway Vehicles. **Acta Physica Polonica A** 131(1): 52-54.
- American Welding Society. 2008. AWS. C1.4M/C1.4. 2009 Specification for resistance welding of carbon and low-alloy steels. **American National Standards Institute**. 2nd ed. AWS publishes, USA.
- American Welding Society. 2012. AWS. D8.9M-2012 Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials. **American National Standards Institute**. 3rd ed. AWS publishes, USA.
- Banerjee, P., Sarkar, R., Pal, T.K. and Shome, M. 2016. Effect of nugget size and notch geometry on the high cycle fatigue performance of resistance spot welded DP590 steel sheets. **Journal of Materials Processing Technology** 238: 226-243.
- Beni, S.S., Atapour, M., Salmani, M.R. and Ashiri, R. 2019. Resistance Spot Welding Metallurgy of Thin Sheets of Zinc-Coated Interstitial-Free Steel. **Metallurgical and Materials Transactions A** 50(5): 2218-2234.
- Cao, X., Li, Z., Zhou, X., Luo, Z. and Duan, J. 2021. Modeling and optimization of resistance spot welded aluminum to Al-Si coated boron steel using response surface methodology and genetic algorithm. **Measurement** 171: 0263-2241.
- Chailungka, N., Narkpasom, N. and Assawarachan, R. 2013. Optimization of sliced carrot drying using response surface methodology. **RMUTSB Academic Journal** 1(2): 92-102. (in Thai)
- Julupai, Y. 1996. Brazing. **Welding and Metal Technology** 14(25): 51-61. (in Thai)
- Kianersi, D., Mostafaei, A. and Amadeh, A.A. 2014. Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, Mechanical properties and microstructure characterization. **Materials and Design** 61: 251-263.
- Kim, G.C., Hwang, I., Kang, M., Kim, D., Park, H. and Kim, Y.M. 2019. Effect of Welding Time on Resistance Spot Weldability of Aluminum 5052 Alloy. **Metals and Materials International** 25(1): 207-218.
- Lee, H.T. and Chang, Y.C. 2020. Effect of Double Pulse Resistance Spot Welding Process on 15B22 Hot Stamped Boron Steel. **Metals** 10: 1279.
- Marashi, P. 2008. Microstructure and failure behavior of dissimilar resistance spot welds between low carbon galvanized and austenitic stainless steel. **Materials Science and Engineering** 480: 175-180.

- Miller. 2012. **Handbook for Resistance Spot Welding**. Millerweld, USA.
- NAS. 1990. **Long products stainless steel grade sheet**. North American stainless. Available source: <https://www.northamericanstainless.com/flat-products/steel-grades/>, January 12, 2021.
- NiDi. 1979. **Welding of stainless steels and other joining methods**. American iron and steel institute, Washington DC.
- Pouranvari, M. and Marashi, P. 2013. Critical review of automotive steels spot welding: Process, structure and properties. **Science and Technology of Welding and Joining** 18(5): 361-403.
- Pouranvari, M. and Ranjbarnoode, E. 2013. Effect of electrode force on fracture type of DQSK steel resistance spot welds. **Acta Metallurgical Slovaca** 19: 149-153.
- Salem, M. 2011. Control and Power Supply for Resistance Spot Welding (RSW). Doctor of Philosophy (Electrical and Computer Engineering), The University of Western Ontario.
- Verm, A.B., Ghunage, S.U. and Ahuja, B.B. 2014. Resistance welding of austenitic stainless steel (AISI 304 with AISI 315), pp. 302-1-302-6. *In All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference 26th*. IIT Guwahati, Assam, India.
- Vijayan, V., Murugan, S.P., Son, SG. and Yeong, D.P. 2019. Shrinkage Void Formation in Resistance Spot Welds: its Effect on Advanced High-Strength-Steel Weld Strength and Failure Modes. **Journal of Materials Engineering and Performance** 28: 7514-7526.
- Wang, X., Wang, Y. and Fang, C. 2014. Welding Defects Occurrence and Their Effects on Weld Quality in Resistance Spot Welding of AHSS Steel. **Journal of the Iron and Steel Institute of Japan** 54(8): 1883-1889.
- Wohner, M., Mitzschke, N. and Jüttner, S. 2021. Resistance spot welding with variable electrode force development and benefit of a force profile to extend the weldability of 22MnB5+AS150. **Weld World** 65: 105-117.
- Zhang, Y., Guo, J., Li, Y., Luo, Z. and Zhang, X. 2020. A comparative study between the mechanical and microstructural properties of resistance spot welding joints among ferritic AISI 430 and austenitic AISI 304 stainless steel. **Journal of Materials Research and Technology** 9(1): 574-583.

วิธีการสกัดที่มีผลต่อคุณภาพน้ำย่านาง

Extraction Methods on Quality of Ya-Nang Juice

(*Tiliacora triandra*)

ศุภชัย ภูลายดอก^{1*} ภัชรินทร์ ชาตัน² หนูเคื่อน สารบุดร¹ พรประภา ชุนถนอม³ และ อรนุช สีหามาลา¹
Subhachai Bhulaidok¹, Patcharin Zaton², Nuduan Saraboot¹, Pornprapha Chunthanom³ and Oranut Sihamala¹

Received: 20 May 2020, Revised: 2 July 2021, Accepted: 19 July 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการสกัดที่มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมี กายภาพและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระโดยเทคนิค DPPH radical scavenging activity ของน้ำย่านาง 4 สิ่งทดลอง: (1) นำใบย่านางสดมาสกัดด้วยน้ำ อัตราส่วนของใบย่านางต่อน้ำ 1:2 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที (ควบคุม) (2) นำใบย่านางสดไปลวกที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 2 นาที แล้วนำมาปั่นสกัดโดยใช้อัตราส่วนของใบย่านางต่อน้ำ 1:2 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที (3) นำใบย่านางสดมาสกัดโดยใช้อัตราส่วนของใบย่านางต่อน้ำ 1:3 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที และต้มที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 นาที และ (4) นำใบย่านางสดลวกที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 2 นาที สกัดด้วยน้ำ อัตราส่วนของใบย่านางต่อน้ำใน 1:3 ที่ความเร็วระดับ 1 เป็นเวลา 5 นาที แล้วต้มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 นาที พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี แคโรทีนทั้งหมดและเบต้า-แคโรทีนมีค่าอยู่ระหว่าง 261.64 ถึง 478.58, 27.06 ถึง 102.36, 45,655.27 ถึง 62,610.61 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และ 29.64 ถึง 40.86 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ ค่าสี L* a* และ b* มีค่าอยู่ระหว่าง 28.27 ถึง 29.58, -0.32 ถึง -2.45 และ 3.65 ถึง 5.66 ตามลำดับ จากผลการทดลองสรุปได้ว่าวิธีการสกัดใบย่านางที่ดีที่สุดคือ สิ่งทดลองที่ 4 เนื่องจากมีค่าความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่สามารถยับยั้งอนุมูลอิสระของ DPPH ลดลงร้อยละ 50 ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน บีเอชที

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ 46000

¹ Department of Food Technology, Faculty of Agricultural Technology, Kalasin University, Kalasin 46000, Thailand.

² สาขาวิชาการจัดการธุรกิจการค้าสมัยใหม่ คณะบริหารศาสตร์ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ 46000

² Department of Modern Trade Business Management, Faculty of Administrative Science, Kalasin University, Kalasin 46000, Thailand.

³ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร จังหวัดสกลนคร 47160

³ Department of Food Science and Technology, Faculty of Natural Resources, Rajamangala University of Technology Isan, Sakon Nakhon Campus, Sakon Nakhon 47160, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): subhachai.bh@ksu.ac.th Tel: 08 1684 5942

และ โทรลอคซ์ และมีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดสูงที่สุด เท่ากับ 1.27 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และ 3,668.05 มิลลิกรัมแกลติก ต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ

คำสำคัญ: ย่านาง, การสกัด, สารต้านอนุมูลอิสระ, การลวก

ABSTRACT

The objective of this research is to study the extraction methods that affect physiochemical properties and antioxidant activities by DPPH radical scavenging activity of Yanang juice (*Tiliacora triandra*) for 4 treatments: (1) fresh Yanang leaves were extracted with water at 1:2 (w/w) ratio and at speed 1 for 5 min (control); (2) fresh Yanang leaves were blanched at 100°C for 2 minutes and were blended with water at 1:2 (w/w) ratio and at speed 1 for 5 min; (3) fresh Yanang leaves were blended with water at 1:3 (w/w) ratio and at speed 1 for 5 min and were boiled at 100°C for 10 minutes and (4) fresh Yanang leaves were blanched at 100°C for 2 minutes, extracted with water at 1:3 (w/w) ratio and at speed 1 for 5 min and then boiled at 100°C for 10 minutes. Chlorophyll *a*, *b*, total carotene and beta-carotene were 261.64 to 478.58 µg/100 gfw, 27.06 to 102.36 µg/100 gfw, 45,655.27 to 62,610.61 µg/100 gfw and 29.64 to 40.86 mg/100 gfw, respectively. The L* a* and b* values were 28.27 to 29.58, -0.32 to -2.45 and 3.65 to 5.66, respectively. It is concluded that the optimal method of extraction of Yanang juice is treatment 4 because the sample concentration that can inhibit 50% of DPPH radicals (IC₅₀) was the lowest in comparison with standard BHT and Trolox, and had the highest total phenolic content of 1.27 mg/ml and 3,668.05 mg GAE/100 g sample, respectively.

Key words: yanang, extraction methods, antioxidant, blanching

บทนำ

ย่านาง (*Tiliacora triandra*) เป็นพืชพื้นบ้านชนิดหนึ่งที่นิยมบริโภคเป็นอาหารเพื่อสุขภาพกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เนื่องจากมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจำนวนมาก เช่น สารฟีนอล (phenols) เบต้าแคโรทีน (β -carotene) สารฟลาโวนอยด์ (flavonoids) วิตามินซี สารอัลคาลอยด์ (alkaloids) และเกลือแร่ โดยนำใบย่านางมาคั้นผสมกับน้ำเพื่อสกัดเอาน้ำย่านางมาทำอาหาร โดยน้ำที่สกัดได้จะมีสีเขียว สำหรับความขื่นหนืดและความเข้มของสีของ

น้ำย่านางขึ้นกับความชอบของผู้บริโภค ตัวอย่างอาหารที่นิยมนำน้ำสกัดจากใบย่านางมาปรุงอาหาร ได้แก่ แกงหน่อไม้ ชุบหน่อไม้ แกงเห็ด แกงหวาย เป็นต้น จากการศึกษาของ Sriket (2014) พบว่าน้ำสกัดจากใบย่านางมีสารประกอบฟีนอลิก ได้แก่ กรดเฟอร์ูลิก (Ferulic acid) กรดพาราควมาริก (p-coumaric acid) กรดซินาปิก (sinapic acid) และ กรดไซริงจิก (syringic acid) สารเหล่านี้มีความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของอนุมูลอิสระและยังเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชันซึ่งนำไปสู่โรคเรื้อรังต่างๆ และยังมีงานวิจัยอีกหลายฉบับที่รายงานว่าสารสกัดจากใบ

ย่านางมีความสามารถด้านมะเร็ง ด้านการอักเสบ มีคุณสมบัติต้านเชื้อราและเชื้อแบคทีเรีย (Mahidol *et al.*, 1994; Sirecratawong *et al.*, 2008; Phomkaivon and Areekul, 2009; Singthong *et al.*, 2009; Naibaho *et al.*, 2012) เป็นต้น สำหรับการสกัดน้ำย่านางนั้นยังเป็นการสกัดแบบดั้งเดิม คือ การนำใบย่านางมาตัดเอาเฉพาะใบ ตัดแต่งตำหนิออก ล้าง ทำความสะอาด ทิ้งให้สะเด็ดน้ำ จากนั้นนำใบย่านางมาผสมกับน้ำในอัตราส่วนคือ 1:2 นำไปปั่นสกัดน้ำย่านางด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที แล้วนำไปกรองด้วยผ้าขาวบาง ซึ่งการสกัดแบบดั้งเดิมจะไม่มีกรลวกใบย่านางก่อนนำมาสกัดจึงทำให้ได้น้ำย่านางที่มีคุณภาพไม่พึงประสงค์หลายประการ เช่น การเปลี่ยนแปลงของรสชาติและสี การเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ การสลายตัวของวิตามินและสารประกอบที่ไม่ทนความร้อนบางชนิด (Chaikham *et al.*, 2013; 2014) อย่างไรก็ตามยังไม่มีข้อมูลการเปรียบเทียบคุณภาพทางด้านเคมีและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของน้ำย่านางที่สกัดโดยวิธีการต่างๆ กัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการสกัดที่มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ โดยเทคนิค DPPH radical scavenging activity ของน้ำย่านาง 4 วิธี

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วิธีการสกัดน้ำย่านาง

ใบย่านางสด ซื้อมาจากเกษตรกรในจังหวัดกาฬสินธุ์ เด็ดเอาเฉพาะใบ ตัดแต่งตำหนิออก ล้าง ทำความสะอาด ทิ้งให้สะเด็ดน้ำ จากนั้นนำมาทำการสกัดน้ำย่านาง 4 สิ่งทดลองดังนี้ 1) นำใบย่านางสดมาสกัดด้วยน้ำ อัตราส่วนของใบย่านางต่อน้ำ 1:2 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที (ควบคุม) 2) นำใบย่านางสดไปลวกที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 2 นาที แล้ว

นำมาปั่นสกัดโดยใช้อัตราส่วนของใบย่านางต่อน้ำ 1:2 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที 3) นำใบย่านางสดมาสกัดโดยใช้อัตราส่วนของใบย่านางต่อน้ำ 1:3 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที และต้มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 นาที และ 4) นำใบย่านางสดลวกที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 2 นาที สกัดด้วยน้ำ อัตราส่วนของใบย่านางต่อน้ำ 1:3 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที แล้วต้มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 นาที จากนั้นทุกวิธีจะนำมากรองด้วยผ้าขาวบางจะได้น้ำย่านางพร้อมนำไปทำการทดลองต่อไป

2. การวิเคราะห์คุณภาพทางด้านเคมีและกายภาพของน้ำย่านาง

น้ำย่านางที่สกัดได้ทั้ง 4 วิธีจะนำไปวิเคราะห์คุณภาพทางด้านเคมีและกายภาพ ดังนี้ วัดค่าสี $L^* a^* b^*$ value (CIE) ด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab Ultra scan pro, USA (ของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมด (total soluble solid) ด้วยเครื่อง hand refractometer (ATAGO, Japan) ของแข็งทั้งหมด (total solid) (AOAC., 1990) คลอโรฟิลล์ เอ บี และแคโรทีนอยด์ทั้งหมด (Dere *et al.*, 1998) เบต้าแคโรทีน (Murkovic *et al.*, 2002) และสารฟีนอลิกทั้งหมด (Kubola and Siriamornpun, 2008)

3. การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระโดยเทคนิค DPPH radical scavenging activity (ดัดแปลงจาก Kubola and Siriamornpun, 2008)

เตรียมตัวอย่างน้ำย่านางจากข้อที่ 1 ให้มีความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มก./มล. (w/v) ในเมทานอล จากนั้นดูดตัวอย่างที่สกัดแล้วมาจำนวน 250 ไมโครลิตร เติมนสาร 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) ความเข้มข้น 60 ไมโครโมลในเมทานอล จำนวน 3 มล. ผสมให้เข้ากัน ปล่อยให้ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร จากนั้นนำข้อมูลไปหาค่า

3.1 % Inhibition = $[(A_{\text{control517}} - A_{\text{extract517}}) \times 100] / A_{\text{control517}}$

3.2 Line equation (r^2) โดยนำค่า % Inhibition ที่คำนวณได้ทั้ง 5 จุดไปพล็อตกราฟหาสมการเส้นตรง และค่า r^2 โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel 2007

3.3 IC_{50} (mg/ml) โดยคำนวณจากสมการเส้นตรง $Y=ax+b$

4. การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านเคมีและกายภาพของน้ำย่านาง

จากการศึกษาวิธีการสกัดที่มีผลต่อคุณภาพน้ำย่านาง โดยมีวิธีการสกัดน้ำย่านาง 4 สิ่งทดลอง ได้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี แคโรทีนทั้งหมด สารฟีนอลิกทั้งหมด ทั้ง 4 สิ่งทดลองมีความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนปริมาณเบต้า-แคโรทีนพบว่าสิ่งทดลองที่ 2 กับ 4 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สิ่งทดลองที่ 1 และ 3 ส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมด (total soluble solid) และปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid) ทั้ง 4 สิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพของการศึกษาวิธีการสกัดที่มีผลต่อคุณภาพน้ำย่านาง

สิ่งทดลองที่	Chloro phyll a ($\mu\text{g}/100 \text{ gfw}$)	Chloro phyll b ($\mu\text{g}/100 \text{ gfw}$)	total carotene ($\mu\text{g}/100 \text{ gfw}$)	β -carotene (mg/100 gfw)	a* color	b* color	total phenolic compound (mg gae/100 gfw)	total soluble solid (%)	total solid (%)	L* color
1	453.85 \pm 0.20 ^b	29.33 \pm 0.34 ^c	50,133.20 \pm 0.19 ^c	29.64 \pm 0.38 ^c	-2.45 \pm 0.46 ^a	5.66 \pm 0.12 ^a	1,179.02 \pm 0.32 ^c	1.17 \pm 0.29	2.65 \pm 0.44	29.58 \pm 0.54 ^a
2	478.58 \pm 0.17 ^a	102.36 \pm 0.34 ^a	62,610.61 \pm 0.34 ^a	40.78 \pm 0.26 ^a	-1.74 \pm 0.35 ^b	3.65 \pm 0.36 ^c	2,340.87 \pm 0.50 ^b	1.33 \pm 0.58	2.60 \pm 0.36	28.27 \pm 0.29 ^b
3	261.64 \pm 0.37 ^d	58.13 \pm 0.22 ^b	45,655.27 \pm 0.47 ^d	31.55 \pm 0.19 ^b	-0.32 \pm 0.07 ^c	4.40 \pm 0.48 ^b	977.37 \pm 0.77 ^d	1.67 \pm 0.57	2.45 \pm 0.23	28.95 \pm 0.35 ^a

ตารางที่ 1 (ต่อ)

สิ่ง ทดลองที่	Chloro phyll a (µg/100 gfw)	Chloro phyll b (µg/100 gfw)	total carotene (µg/100 gfw)	β- carote ne (mg/10 0 gfw)	a* color	b* color	total phenolic compoun d (mg gae/100 gfw)	total solubl e solid (%)	total solid (%)	L* color
4	390.85± 0.31 ^c	27.06±0 .34 ^d	57,341.60 ±0.27 ^b	40.86± 0.39 ^a	- 1.40±0 .20 ^b	4.29±0 .14 ^b	3,668.05 ±0.73 ^a	1.83± 0.29	2.88± 0.09	29.05± 0.12 ^a

หมายเหตุ - สิ่งทดลองที่ 1 ใบย่านางสดปั่นสีกัดโดยใช้ใบย่านางต่อน้ำในอัตราส่วน 1:2 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที (ควบคุม)
 - สิ่งทดลองที่ 2 ใบย่านางสดลวกที่อุณหภูมิ 100°ซ เวลา 2 นาที นำมาปั่นสีกัดโดยใช้ใบย่านางต่อน้ำในอัตราส่วน 1:2 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที
 - สิ่งทดลองที่ 3 ใบย่านางสดปั่นสีกัดโดยใช้ใบย่านางต่อน้ำในอัตราส่วน 1:3 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 100°ซ เวลา 10 นาที
 - สิ่งทดลองที่ 4 ใบย่านางสดลวกที่อุณหภูมิ 100°ซ เวลา 2 นาที ปั่นสีกัดโดยใช้ใบย่านางต่อน้ำในอัตราส่วน 1:3 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 100°ซ เวลา 10 นาที
 - ค่าของข้อมูลแสดงในค่าของค่าสัดส่วนเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean±SD); n = 3
 - ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำกับค่าของข้อมูลในแนวตั้งเดียวกันที่แตกต่างกันแสดงว่าเป็นค่าที่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT

สำหรับค่าสี L* (บ่งบอกความสว่าง 100 หมายถึง สีขาว 0 หมายถึง สีดำ) ค่าสี a* (เป็นบวกลบ หมายถึง สีแดง เป็นลบ หมายถึง สีเขียว) ส่วนค่าสี b* (เป็นบวกลบ หมายถึง สีเหลือง เป็นลบ หมายถึง สีน้ำเงิน) พบว่าสิ่งทดลองที่ 1 คือ ใบย่านางสดปั่นสีกัดโดยใช้ใบย่านางต่อน้ำในอัตราส่วน 1:2 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที (ควบคุม) จะมีค่าสี L* a* b* สูงที่สุด คือ มีค่าเท่ากับ 29.58, -2.45 และ 5.66 ตามลำดับ อธิบายได้ว่าใบย่านางสดเมื่อนำมาปั่นสีกัดโดยไม่ผ่านความร้อนจะทำให้มีค่าความสว่าง ค่าสีเขียวและค่าสีเหลืองมากกว่าสิ่งทดลองที่ผ่านการให้

ความร้อน ส่วนสิ่งทดลองที่ผ่านความร้อนจะมีสีคล้ำมากกว่าใบย่านางที่ไม่ผ่านความร้อนจึงมีค่าความสว่าง ค่าสีเขียวและค่าสีเหลืองน้อยกว่าสิ่งทดลองที่ 1 พบว่าสิ่งทดลองที่ 2 คือ ใบย่านางสดลวกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 นาที นำมาปั่นสีกัดโดยใช้ใบย่านางต่อน้ำในอัตราส่วน 1:2 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที จะมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี แคโรทีนทั้งหมด สูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 478.58 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่างสด และ 62,610.61 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

สด ตามลำดับ สำหรับปริมาณเบต้า-แคโรทีนพบว่า สิ่งทดลองที่ 4 มีค่าสูงที่สุดแต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) กับสิ่งทดลองที่ 2 คือมีค่าเท่ากับ 40.86 และ 40.78 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่างสด ตามลำดับ

อธิบายได้ว่าสิ่งทดลองที่ 2 และ 4 ซึ่งมีการ ลวกใบย่านางสดก่อนนำไปสกัดทำให้สามารถ ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Sapers, 1993) การ สลายตัวของเบต้า-แคโรทีนและการสลายตัวของ คลอโรฟิลล์เป็นฟีโอฟิติน (pheophytin) ซึ่งเป็นสี เขียวอมน้ำตาล (Gross, 1991) ส่วนสิ่งทดลองที่ 3 ที่ ไม่ได้ผ่านการลวก อีกทั้งมีการปั่นสกัดใบย่านางก่อน นำไปต้มทำให้ใบย่านางมีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวในการ สัมผัสความร้อนและออกซิเจนมาก จึงทำให้เกิดการ สลายตัวของคลอโรฟิลล์และสารอื่นๆ สูง มีการ เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลของสารต่างๆ มากกว่าสิ่ง ทดลองที่ผ่านการลวก ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ แคโรทีนทั้งหมด ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและมี ค่าสีเขียวน้อยที่สุด

สำหรับปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดพบว่า สิ่งทดลองที่ 4 มีปริมาณสูงที่สุด รองลงมาคือ สิ่ง ทดลองที่ 2 โดยมีค่าเท่ากับ 3,668.05 และ 2,340.87 มิลลิกรัม GAE ต่อ 100 กรัมตัวอย่างสด ตามลำดับ ซึ่งสารฟีนอลิกทั้งหมดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ สำคัญในพืช ป้องกันโรคเรื้อรังต่างๆ เช่น โรคมะเร็ง หัวใจและอื่นๆ (Imeh and Khokhar, 2002; Li *et al.*, 2006) ดังนั้นสิ่งทดลองที่ 4 จึงควรจะเลือกเป็นวิธีการ สกัดที่ควรนำไปพัฒนาต่อไป

2. ผลการศึกษาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ โดยเทคนิค DPPH radical scavenging activity ของ น้ำย่านาง

สาร DPPH เป็นสารอนุมูลอิสระที่มีการใช้ กันอย่างแพร่หลาย เพื่อทดสอบความสามารถในการ กำจัดอนุมูลอิสระของตัวอย่างต่างๆ ซึ่ง DPPH เป็น สารอนุมูลอิสระที่มีความเสถียรและมีลักษณะพิเศษ (Sakanaka *et al.*, 2005) ผลจากการศึกษาความสามารถ ในการต้านอนุมูลอิสระโดยเทคนิค DPPH radical scavenging activity ของการศึกษาวีธีการสกัดที่มีผล ต่อคุณภาพน้ำย่านาง แสดงดังตารางที่ 2 โดยใช้ สารละลายมาตรฐาน 2 ชนิดคือ บีเอชที (BHT) และ โทรลออกซ์ (Trolox) พบว่าค่า IC_{50} (ค่าความเข้มข้น ของสารตัวอย่างที่สามารถทำให้ความเข้มข้นของ DPPH ลดลงร้อยละ 50) ของสารโทรลออกซ์ (Trolox) และ บีเอชที (BHT) มีค่าเท่ากับ 0.53 และ 0.14 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ โดยถ้าค่า IC_{50} ต่ำจะ บ่งบอกว่าสารตัวอย่างมีความสามารถต้านอนุมูล อิศระได้มากกว่าสารตัวอย่างที่มีค่า IC_{50} สูง จากผล การทดลองพบว่าสิ่งทดลองที่ 4 คือ ใบย่านางสดลวก ที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 2 นาที ปั่นสกัดโดยใช้ใบ ย่านางต่อน้ำในอัตราส่วน 1:3 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 100 องศา เซลเซียส เวลา 10 นาที มีค่า IC_{50} น้อยที่สุด รองลงมา คือ สิ่งทดลองที่ 2 สิ่งทดลองที่ 1 และสิ่งทดลองที่ 3 ตามลำดับ โดยมีค่า IC_{50} น้อยไปหามากที่สุด คือมีค่า เท่ากับ 1.27, 1.86, 7.04 และ 7.74 มิลลิกรัมต่อ มิลลิลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการศึกษาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระโดยเทคนิค DPPH radical scavenging activity ของ การศึกษาวิธีการสกัดที่มีผลต่อคุณภาพน้ำยำนาง

สิ่งทดลองที่	ความเข้มข้น (mg/ml)	% Inhibition \pm SD	Line equation (r^2)	IC ₅₀ (mg/ml)
1	0.2	16.71 \pm 0.37	Y=5.45x+11.615	7.04
	0.4	22.44 \pm 0.39	($r^2=0.9967$)	
	0.6	28.81 \pm 0.15		
	0.8	33.38 \pm 0.23		
	1.0	38.49 \pm 0.49		
2	0.2	37.25 \pm 0.38	Y=0.9473x+22.332	1.86
	0.4	53.37 \pm 0.42	($r^2=0.9952$)	
	0.6	65.41 \pm 0.51		
	0.8	77.17 \pm 0.46		
	1.0	86.20 \pm 0.12		
3	0.2	14.91 \pm 0.33	Y=5.172x+9.9203	7.75
	0.4	20.56 \pm 0.49	($r^2=0.9978$)	
	0.6	25.65 \pm 0.51		
	0.8	30.01 \pm 0.51		
	1.0	36.04 \pm 0.17		
4	0.2	44.39 \pm 0.29	Y=12.131x+34.612	1.27
	0.4	60.61 \pm 0.38	($r^2=0.9892$)	
	0.6	72.59 \pm 0.22		
	0.8	84.17 \pm 0.02		
	1.0	93.27 \pm 0.69		
BHT (Standard)	10	54.32 \pm 0.03	Y=11.103x+44.138	0.53
	20	66.11 \pm 0.04	($r^2=0.9945$)	
	40	75.25 \pm 0.02		
	80	89.33 \pm 0.03		
	100	98.23 \pm 0.02		
Trolox (Standard)	10	58.19 \pm 0.04	Y=10.564x+48.469	0.14
	20	69.28 \pm 0.06	($r^2=0.9914$)	
	40	81.37 \pm 0.09		
	80	92.62 \pm 0.10		
	100	99.34 \pm 0.08		

หมายเหตุ - ค่าของข้อมูลแสดงในค่าของค่าสัดส่วนเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean \pm SD); n = 3

จากข้อมูลในตารางที่ 2 ถ้าพิจารณาจากผลการกำจัด DPPH และผลการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH (IC_{50}) ของน้ำย่านางที่สกัดจากวิธีต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน บีเอชที (BHT) และ Trolox พบว่าวิธีการสกัดใบย่านางโดยนำมาลวกที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 2 นาที ปั่นสกัดโดยใช้ใบย่านางต่อน้ำในอัตราส่วน 1:3 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 นาที (สิ่งทดลองที่ 4) มีค่า IC_{50} น้อยที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 1.27 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร อธิบายได้ว่าสิ่งทดลองที่ 4 มีปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด และ เบต้า-แคโรทีนสูงที่สุด ซึ่งสารฟีนอลิกทั้งหมดและสารเบต้า-แคโรทีนเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญในพืช ป้องกันโรคเรื้อรังต่างๆ เช่น โรคมะเร็ง หัวใจ และอื่นๆ (Imeh and Khokhar, 2002; Li *et al.*, 2006) ดังนั้นสิ่งทดลองที่ 4 จึงเป็นวิธีที่ดีที่สุดที่จะนำไปสกัดน้ำย่านางเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการทำผลิตภัณฑ์ต่อไป

สรุป

วิธีการสกัดที่มีผลต่อคุณภาพน้ำย่านางพบว่าวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม ไม่ผ่านการลวก (สิ่งทดลองที่ 1 ควบคุม) จะได้น้ำย่านางที่สีเขียวสวย ไม่ดำคล้ำ ส่วนสารสำคัญต่างๆ จะมีค่าค่อนข้างน้อย ในขณะที่สิ่งทดลองที่ 3 ไม่ผ่านการลวก และมีการปั่นสกัดทำให้ใบย่านางมีขนาดเล็กก่อนนำไปต้ม พบว่าจะเกิดการสลายตัวของสารต่างๆ ไปเป็นสารสีน้ำตาลค่อนข้างสูง ในขณะที่สิ่งทดลองที่ผ่านการลวก (สิ่งทดลองที่ 2 และ 4) สารต่างๆ จะเกิดการสลายตัวไปเป็นสารสีน้ำตาลน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลองที่ 2 กับ 4 โดยสิ่งทดลองที่ 4 มีการนำไปต้มสกัดที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 นาที ซึ่งสิ่งทดลองที่ 2 ไม่มีการต้มสกัด พบว่าสิ่งทดลองที่ 4 มีปริมาณเบต้า-แคโรทีนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่มีความ

แตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) กับสิ่งทดลองที่ 2 ส่วนปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้น และมีค่า IC_{50} น้อยที่สุด ดังนั้นวิธีการสกัดใบย่านางที่ดีที่สุดคือ สิ่งทดลองที่ 4 นำใบย่านางสดลวกที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 2 นาที ปั่นสกัดโดยใช้ใบย่านางต่อน้ำในอัตราส่วน 1:3 ที่ความเร็วระดับ 1 เวลา 5 นาที แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 100°C เวลา 10 นาที เนื่องจากมีปริมาณ สารฟีนอลิกทั้งหมดมากที่สุด และมีค่า IC_{50} น้อยที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้ ด้วยงบประมาณประจำปี 2561

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 1990. **Official methods of analysis**. 15th Ed. Association of Official Agricultural Chemists, Washington DC.
- Chaikham, P., Chunthanom, P. and Apichartsrangkoon, A. 2013. Storage stability of pennywort juice as affected by high pressure and thermal processing. **International Food Research Journal** 20(6): 3069-3076.
- Chaikham, P., Worametachanon, S. and Apichartsrangkoon, A. 2014. Effects of high pressure and thermal processing on phytochemical, color and microbiological qualities of herbal-plant infusion. **International Food Research Journal** 21(1): 51-57.
- Dere, Ş., Güne, Ş.T. and Sivaci, R. 1998. Spectrophotometric determination of chlorophyll-a, b and total carotenoid contents of some algae species

- using different solvents. **Turkish Journal of botany** 22: 13-17.
- Gross, J. 1991. **Pigments in Vegetables**. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Imeh, U. and Khokhar, S. 2002. Distribution of conjugated and free phenols in fruits: Antioxidant activity and cultivar variations. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 50: 6301.
- Kubola, J. and Siriamornpun, S. 2008. Phenolic contents and antioxidant activities of bitter melon (*Momordica charantia* L.) leaf, stem and fruit fraction extracts in vitro. **Food Chemistry** 110: 881-890.
- Li, B.B., Smith, B. and Hossain, Md.M. 2006. Extraction of phenolics from citrus peels I. Solvent extraction method. **Separation and Purification Technology** 48: 182-188.
- Mahidol, C., Sahakitpichan, P. and Ruchirawat, S. 1994. Bioactive natural products from Thai plants. **Journal of Pure and Applied Chemistry** 66: 2353-2356.
- Murkovic, M., Mülleder, U. and Neunteufl, H. 2002. Carotenoid Content in Different Varieties of Pumpkins. **Journal of Food Composition and Analysis** 15(6): 633-638.
- Naibaho, N.M., Laohankunjit, N. and Kerdchoechuen, O. 2012. Physico-chemical properties of plant extracts from Yanang (*Tiliacora triandra*) leaves. **Agricultural Science Journal** 43(2): 533-536.
- Phomkaivon, N. and Areekul, V. 2009. Screening for antioxidant activity in selected Thai wild plants. **Asian Journal of Food and Agro-Industry** 2(4): 433-440.
- Sakanaka, S., Tachibana, Y. and Okada, Y. 2005. Preparation and antioxidant properties of extracts of Japanese persimmon leaf tea (kakinoha-cha). **Food Chemistry** 89: 569-575.
- Sapers, G.M. 1993. Browning of foods: control by sulfites antioxidants, and other means. **Food Technology** 47(1): 75-84.
- Singthong, J., Ningsanond, S. and Cui, S.W. 2009. Extraction and physicochemical characterisation of polysaccharide gum from Yanang (*Tiliacora triandra*) leaves. **Food Chemistry** 114: 1301-1307.
- Sireeratawong, S., Lertprasertsuke, N., Srisawat, U., Thuppia, A., Ngamjariyawat, A., Suwanlikhid, N. and Jaijoy, K. 2008. Acute and subchronic toxicity study of the water extract from *Tiliacora triandra* (Colebr.) Diels in rats. **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 30(5): 611-619.
- Sriket, P. 2014. Chemical components and antioxidant activities of Thai local vegetables. **KMITL Science and Technology Journal Part B** 14(1): 18-24.

การประยุกต์ใช้ไมโครซอฟท์เอ็กเซล โซลเวอร์สำหรับการออกแบบหน้าตัดที่ เหมาะสมของเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนัก

Utilization of Microsoft Excel Solver for Optimum Design of Gravity Dam

นุอนันท์ คุระแก้ว ว้ชระ ศรีสะกุล และ ขวัญชีวา หยงสตรา *

Nuanan Kurakaew, Watchara Srisakul and Khwanchiwa Yongsata *

Received: 19 September 2020, Revised: 21 April 2021, Accepted: 22 June 2021

บทคัดย่อ

เขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนักเป็นเขื่อนที่สร้างขึ้นเพื่อต้านแรงดันน้ำโดยอาศัยน้ำหนักของวัสดุที่ใช้สร้างเขื่อน การศึกษานี้จะออกแบบขนาดของเขื่อนให้เหมาะสม เพื่อรองรับน้ำที่มีความลึกสูงสุด 75 เมตร เพื่อลดต้นทุนวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างให้น้อยที่สุด และมีเสถียรภาพทั้งในขณะที่ยังไม่รองรับน้ำและขณะที่เขื่อนรับแรงดันน้ำสูงสุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณจึงเลือกใช้วิธีการแบบโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) และใช้ไมโครซอฟท์เอ็กเซล โซลเวอร์ (Microsoft Excel Solver) เป็นโปรแกรมในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณออกแบบ โดยในการออกแบบทำการหาค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับขนาดของเขื่อน เช่น ความกว้างของสันเขื่อน ความกว้างของฐานเขื่อน ความสูงของเขื่อน เป็นต้น โดยกำหนดให้อัตราส่วนความกว้างฐานเขื่อนต่อความสูงของเขื่อนเท่ากับ 0.85 และกำหนดให้อัตราส่วนความกว้างสันเขื่อนต่อความสูงของเขื่อนเท่ากับ 0.13 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์พบว่า น้ำหนักตัวเขื่อนควรมีค่าน้อยเท่ากับ 57,547,894.64 นิวตันต่อเมตร (N/m) มีความสูงและความกว้างของฐานเท่ากับ 75.9 เมตร และ 64.52 เมตร ตามลำดับ จากการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบเขื่อนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการคำนวณและความแม่นยำมากขึ้น

คำสำคัญ: เขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนัก, โปรแกรมเชิงเส้น, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ABSTRACT

The gravity dam is constructed to resist against water pressure by using the weight of the material. This study presents the designing model for calculating the optimal dimensions of the dam to store water at a depth of 75 meters, to minimize the cost of the construction of the dam, and to provide sufficient stability. Linear Programming was used to calculate the dimensions of the dam section and Microsoft Excel Solver was used to design mathematical modeling of the dam parameters. Parameters in this research were dam top width, dam base width, dam height, etc. The ratio of dam base to dam height is 0.85 and the ratio of dam top width to dam height is 0.13. The results of analysis showed that the minimum dam weight should be 57,547,894.64 Newton per meter (N/m). The optimal height and base width are 75.9 meters and 64.52 meters respectively. The mathematical modeling may provide help for parameters estimation in designing the dam and increase the efficiency and precision of the calculation.

Key words: gravity dam, Linear Programming, mathematical model

บทนำ

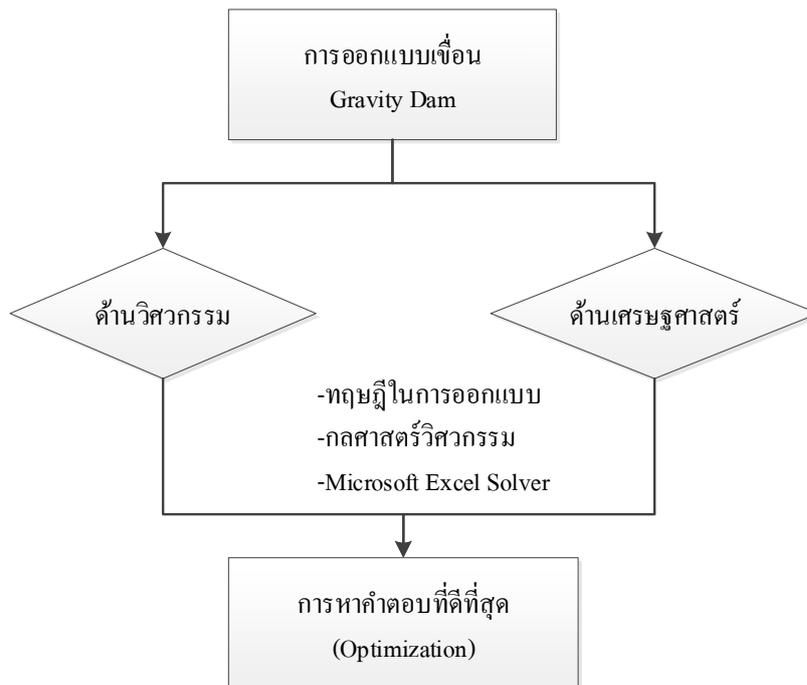
เขื่อนเป็นสิ่งก่อสร้างที่ใช้สำหรับกั้นทางน้ำเพื่อใช้ในการเก็บกักน้ำและป้องกันอุทกภัย รวมถึงผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถจำแนกชนิดของเขื่อนได้หลายชนิดตามวัสดุก่อสร้าง เช่น เขื่อนหิน เขื่อนดิน เขื่อนคอนกรีต เขื่อนคอนกรีตบดอัด และเขื่อนไม้ เป็นต้น (Corns *et al.*, 1988) โดยในการก่อสร้างจะเลือกใช้วัสดุตามความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ ความสามารถในการกั้นน้ำรวมถึงความเหมาะสมในด้านเศรษฐศาสตร์ โดยในปัจจุบันนิยมใช้วัสดุคอนกรีตในการก่อสร้างเขื่อน เนื่องจากมีความแข็งแรง ทนทานและสามารถรับแรงได้สูง ซึ่งเขื่อนคอนกรีตยังจำแนกประเภทย่อย ได้แก่ เขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนัก (Gravity Dam) บางครั้งจะเรียกว่าแบบฐานแผ่ เขื่อนประเภทนี้จะอาศัยน้ำหนักของตัวเขื่อนถ่วงน้ำหนักลงสู่ฐานราก ฐานรากของเขื่อนประเภทนี้จะต้องเป็นชั้นหินที่สามารถรับน้ำหนักได้ดี เนื่องจากตัวเขื่อนจะมีขนาดใหญ่มาก เขื่อนคอนกรีตแบบโค้ง (Arch Dam) เขื่อนประเภทนี้จะมิ

ลักษณะเป็นรูปโค้ง อาจเป็นแบบโค้งทางเดียว (โค้งในแนวราบ) หรือโค้งสองทาง (โค้งในแนวราบและแนวตั้ง) ตัวเขื่อนจะมีลักษณะบาง เนื่องจากพฤติกรรมรับแรงของโค้ง (Arch) จะสามารถรับแรงได้ดี น้ำหนักจากตัวเขื่อนและแรงกระทำจากน้ำจะถูกถ่ายไปยังจุดรองรับทั้ง 2 ข้างของเขื่อนแล้วถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นหินฐานราก และเขื่อนคอนกรีตแบบค้ำยัน หรือแบบครีบ (Buttress Dam) เขื่อนประเภทนี้จะมีลักษณะเป็นรูปแผ่นคอนกรีตและมีค้ำยันด้านหลัง

ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนัก โดยในการออกแบบเขื่อนประเภทนี้จะต้องคำนึงถึงเสถียรภาพทั้งในขณะที่ยังไม่รองรับน้ำและขณะที่เขื่อนรับแรงดันน้ำสูงสุด และกระบวนการที่ทำให้ค่าตอบที่ดีที่สุด (Zhang *et al.*, 2019) ซึ่งมีปัจจัยสำคัญสองด้าน คือ ด้านวิศวกรรมและด้านเศรษฐศาสตร์ โดยด้านวิศวกรรมจะต้องมีเกณฑ์ในการออกแบบเพื่อให้น้ำหนักของตัวเขื่อนสามารถต้านแรงดันน้ำที่กระทำกับตัวเขื่อนได้โดยที่

เขื่อนยังอยู่ในสภาพที่มั่นคงปลอดภัยและมีเสถียรภาพ ส่วนทางด้านเศรษฐศาสตร์ก็ต้องมีเกณฑ์ในการออกแบบเพื่อให้งบประมาณน้อยที่สุดแต่ยังคงรักษาเสถียรภาพของตัวเขื่อนไว้ได้ ซึ่งในกระบวนการในการออกแบบเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดนั้น ทำได้ยากและใช้เวลานานในการคำนวณออกแบบ เนื่องจากต้องทำการคำนวณซ้ำ ๆ เพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมทั้งทางด้านวิศวกรรมและด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อให้กระบวนการในการออกแบบง่ายและประหยัดเวลาในการคำนวณ จึงใช้ทฤษฎีกำหนดการเชิงเส้นเป็นกระบวนการหาคำตอบที่ดีที่สุด ภายใต้วัตถุประสงค์ (Objectives) และข้อจำกัด (Constraint) แต่อย่างไรก็ตามการใช้วิธีการหาคำตอบ

ที่ดีที่สุด ก็ต้องใช้โปรแกรมในการคำนวณเพื่อให้รวดเร็วและถูกต้อง ซึ่งมีโปรแกรมมากมายรูปแบบจำลอง (Atmapoojya *et al.*, 2014) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไมโครซอฟท์เอ็กเซล เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการทำงานที่สูง โดยเฉพาะงานด้านการคำนวณประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีฟังก์ชัน ไมโครซอฟท์เอ็กเซล โซลเวอร์ ที่ช่วยในการหาคำตอบที่ดีที่สุด และที่สำคัญยังเป็นโปรแกรมพื้นฐานที่มีอยู่ในคอมพิวเตอร์ทั่วไป ซึ่งงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์หาค่าสัดส่วนในการออกแบบหน้าตัดของเขื่อนที่ดีที่สุด ภายใต้เงื่อนไขทางวิศวกรรมและทางเศรษฐศาสตร์ โดยมีกรอบแนวคิดของงานวิจัยดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดของงานวิจัย

จากภาพที่ 1 แสดงกรอบแนวคิดในงานวิจัยซึ่งเป็นการออกแบบเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนักให้มีขนาดหน้าตัดที่ดีที่สุด โดยประกอบด้วยข้อจำกัดด้านวิศวกรรมในการออกแบบเพื่อให้เขื่อนรับแรงดันได้อย่างมั่นคงและปลอดภัย และจะต้องมีความคุ้มค่า

ในด้านเศรษฐศาสตร์คือหน้าตัดจะต้องมีขนาดที่ประหยัดที่สุด โดยแนวคิดดังกล่าวจะต้องทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล โซลเวอร์ ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

ของหน้าตัดเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความเหมาะสมและดีที่สุด

นิยามของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Modeling)

การแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งพิจารณาจากข้อจำกัดของทรัพยากรเพื่อหาคำตอบที่เป็นไปได้ ซึ่งมีจำนวนมากมายมหาศาลซึ่งวิธีหาคำตอบซึ่งอาจแบ่งเป็น 4 กลุ่มหลัก คือ วิธีฮิวริสติกส์ (Heuristic Methods), วิธีเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematical Methods), การจำลองสถานการณ์ (Simulations) และการค้นหาข้อมูลที่มีรูปแบบ (Searching Algorithms) (Feng *et al.*, 2000) ซึ่งวิธีเชิงคณิตศาสตร์ เป็นการหาคำตอบโดยเป็นการจัดรูปปัญหาเป็นสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อการแก้สมการและหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ด้วย โปรแกรมเชิงเส้น (Linear programming), โปรแกรมที่ไม่เป็นเส้นตรง (Non-Linear Programming), โปรแกรมเลขจำนวนเต็ม (Integer Programming) และ โปรแกรมพลวัต (Dynamic programming) ซึ่งวิธีเชิงคณิตศาสตร์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพกับปัญหาที่มีขนาดไม่ใหญ่มากแต่ต้องใช้ความพยายามในการคำนวณหาคำตอบมาก (Maythathirut, 2013)

โปรแกรมเชิงเส้นตรงเป็นแบบจำลองเพื่อจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด ให้ได้รับผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สร้างมีประโยชน์มากมาย เช่น Kongpoung and Lerdwiwatchaiyaporn (2018) ได้ประยุกต์ใช้เพื่อหาสัดส่วนวัสดุธรรมชาติเพื่อทดแทนการใช้ปุ๋ยเคมีในการปลูกแก้ว

Noisang and Monthatipkul (2017) ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคโปรแกรมเชิงเส้นตรงแบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อเลือกพื้นที่สร้างคลังสินค้า ซึ่งทำให้เกิดต้นทุนในการดำเนินการทั้งการขนส่งและการเก็บสินค้าของบริษัทต่ำที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้ช่วยให้บริษัท มี

ต้นทุน ด้านคลังสินค้าที่ต่ำที่สุด และส่งผลกระทบต่อความสามารถในการแข่งขันของบริษัท

กำหนดการเชิงเส้น คือ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (ค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุด) ของเป้าหมายที่กำหนดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดโดยเป้าหมายจะต้องแสดงอยู่ในรูปสมการเส้นตรง สำหรับเงื่อนไขอาจอยู่ในรูปสมการหรืออสมการก็ได้ โดยขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา (Dantzig, 1982) แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนต่อไปนี้

1. กำหนดเขตของตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variable)
2. สร้างฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function)
3. เขียนเงื่อนไขทั้งหมด (Constraints)

จากนั้นก็นำมาสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรในแบบจำลองเพื่อทำการคำนวณและวิเคราะห์ผล โดยใช้ ไมโครซอฟท์เอ็กเซล โซลเวอ์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการแก้ไขปัญหาเชิงเส้นโดย ไมโครซอฟท์เอ็กเซล โซลเวอ์ จะช่วยในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดและดีที่สุด ภายในข้อจำกัดหรือเงื่อนไขที่มีอยู่ ซึ่งทำให้การศึกษาและวิเคราะห์ทำได้อย่างง่ายดายและรวดเร็วกว่าคิดมาก การใช้ ไมโครซอฟท์เอ็กเซล โซลเวอ์ มาช่วยในการคำนวณจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ขั้นตอนในการวิจัย

การออกแบบขนาดของเขื่อนเพื่อรองรับแรงดันน้ำความสูง (h) ที่ต้องการ เพื่อให้ขนาดของเขื่อนมีหน้าตัดที่ประหยัดที่สุด ซึ่งจะต้องหาค่าตัวแปรของขนาดหน้าตัดของเขื่อนที่เหมาะสมเพื่อให้เขื่อนสามารถรองรับแรงตามหลักวิศวกรรมในการออกแบบและมีขนาดหน้าตัดที่น้อยที่สุด เพื่อให้ต้นทุนในการก่อสร้างเขื่อนน้อยสุด จากงานวิจัยที่

ผ่านมา การออกแบบความกว้างของสันเขื่อน (Atmapoojya *et al.*, 2014) ซึ่งอัตราส่วนความกว้างสันเขื่อนที่เหมาะสมประมาณ 13.6 % ของความสูงเขื่อน และระยะพื้นน้ำ (Free Board) จะต้องมากกว่า 0.9 m และจากงานวิจัยของ US Army Corps of Engineers ค่าความชันของส่วนหน้าของเขื่อนอยู่ในช่วง (Craig, 1995) ความกว้างต่อความสูง 0.7/1-0.8/1 ซึ่งเลือกใช้คอนกรีตเป็นวัสดุในการก่อสร้างเขื่อนซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.4 และกำหนดให้หน่วยน้ำหนักของน้ำในเขื่อนเท่ากับ 9810 นิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสมการความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างฐานส่วน

หลังของหน้าตัดเขื่อนและความสูงของน้ำในเขื่อนจะขึ้นอยู่กับความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้สร้างเขื่อนดังแสดงในสมการที่ (1)

หลักการออกแบบเขื่อนแบบถ่วงน้ำหนักเพื่อหาค่าตัวแปรที่ดีที่สุดของพื้นที่หน้าตัดเขื่อน ซึ่งมีตัวแปรของขนาดหน้าตัดอยู่หลายตัวแปร ดังแสดงในสมการที่ (2) และ (3) ซึ่งในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้รูปหน้าตัดเขื่อนมีความประหยัดที่สุด ทำได้โดย กำหนดตัวแปรขนาดหน้าตัด สมการวัตถุประสงค์ และสมการข้อจำกัดในการออกแบบ ซึ่งมีค่าของตัวแปรต่างๆ ดังภาพที่ 2

$$b = h / \sqrt{S-1} \quad (1)$$

โดยที่

h คือ ความสูงของน้ำในเขื่อน (เมตร)

b คือ ความกว้างฐานส่วนหลังของหน้าตัดเขื่อน ในกรณีไม่มีแรงดึง (No Tension Criteria)

S คือ ความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้สร้างเขื่อน

$$h_1 = H - h_2 - f \quad (2)$$

โดยที่

h₁ คือ ความลึกของน้ำจากผิวน้ำถึงฐานเขื่อน (เมตร)

H คือ ความสูงของเขื่อน (เมตร)

h₂ คือ ความสูงฐานเขื่อนส่วนหน้า (เมตร)

f คือ ระยะพื้นน้ำ (เมตร)

$$h/h_3 = B/(B-a) \quad (3)$$

โดยที่

h₃ คือ ความสูงฐานเขื่อนส่วนหลัง (เมตร) สามารถคำนวณจากคุณสมบัติอัตราส่วนตรีโกณมิติ สมบัติสามเหลี่ยมคล้าย

B คือ ความกว้างของฐานเขื่อน

a คือ ความกว้างของสันเขื่อน (เมตร)

2. สมการวัตถุประสงค์ สมการข้อจำกัดและตัวแปรตัดสินใจ

2.1 สมการวัตถุประสงค์

ในการศึกษาคำนี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าผลรวมของน้ำหนักของเขื่อนซึ่งมีผลต่อราคาในการ

$$\text{Minimize} = W_1 + W_2 + W_3 \quad (4)$$

โดยที่

W_1 คือ น้ำหนักของเขื่อนส่วนหน้า

W_2 คือ น้ำหนักของเขื่อนส่วนกลาง

W_3 คือ น้ำหนักของเขื่อนส่วนหลัง

2.2 สมการข้อจำกัด

สำหรับสมการข้อจำกัดในการศึกษานี้ได้กำหนดไว้เพื่อป้องกันไม่ให้ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองสามารถแสดงสมการข้อจำกัดได้ดังนี้ (Salmasi, 2011)

ข้อกำหนดของระยะพื้นน้ำจะต้องมากกว่า 0.9 m ($f \geq 0.9$) เพื่อหลีกเลี่ยงคลื่นน้ำที่สูงภายในเขื่อน กำหนดให้อัตราส่วนความกว้างฐานเขื่อนต่อความสูงของเขื่อนเท่ากับ (0.85 B/H = 0.85) และกำหนดให้อัตราส่วนความกว้างสันเขื่อนต่อความสูงของเขื่อนเท่ากับ 0.13 ($a/H = 0.13$) และค่าความชันของส่วน

ก) ตอนที่เขื่อนยังไม่รับน้ำ

$$\bar{X} = \frac{M_1 + M_2 + M_3}{w_1 + w_2 + w_3} \quad (5)$$

โดยที่

M_1 คือ โมเมนต์ของพื้นที่เขื่อนส่วนหน้า

M_2 คือ โมเมนต์ของพื้นที่เขื่อนส่วนกลาง

M_3 คือ โมเมนต์ของพื้นที่เขื่อนส่วนหลัง

โดยขอบเขตระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางมวลดังแสดงในสมการที่ (6)

$$e_d = \bar{X} - B/2, \quad e_d \leq B/6 \quad (6)$$

ก่อสร้างสร้างเขื่อน เป็นสมการวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าน้ำหนักที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการก่อสร้างเขื่อนเพื่อให้ต้นทุนในการสร้างเขื่อนน้อยที่สุด ดังแสดงในสมการที่ (4)

หน้าของเขื่อนอยู่ในช่วง ความกว้างต่อความสูง 0.7/1-0.8/1 เพื่อให้เขื่อนที่ทำการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดที่ดีที่สุด มีความเป็นไปได้ทางวิศวกรรม และการออกแบบเพื่อป้องกันไม่ให้เขื่อนเกิดการวิบัติทั้งในขณะที่เขื่อนอยู่ในช่วงก่อสร้างโดยไม่มีแรงดันน้ำมากระทำและในช่วงการใช้งานคือมีแรงดันน้ำมากระทำต่อตัวเขื่อนเต็มที่ได้ซึ่งได้สมการข้อจำกัดเพื่อหา ระยะเยื้องศูนย์กลางของตัวเขื่อนในกรณีที่เขื่อนยังไม่รับน้ำและเขื่อนรับน้ำเต็มที่ได้ดังแสดงในสมการที่ (5) และ (7) ตามลำดับ

เมื่อ \bar{X} คือระยะห่างจากจุดศูนย์กลางมวล (Centroid) ถึงท้ายเขื่อน และ e_f คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางมวลของพื้นที่หน้าตัดถึงกึ่งกลางฐาน

เขื่อน ในขณะที่เขื่อน ไม่มีแรงกระทำจากภายนอก
ข) ตอนที่เขื่อนยังรับน้ำเต็ม

$$\bar{X} = \frac{M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 - M_6 - M_7}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 - U_1} \quad (7)$$

โดยที่

- M_4 คือ โมเมนต์ของพื้นที่น้ำส่วนหน้า
- M_5 คือ โมเมนต์ของพื้นที่น้ำส่วนหน้าบริเวณฐานเขื่อน
- M_6 คือ โมเมนต์ที่กระทำเนื่องจากแรงดันน้ำหน้าเขื่อน
- M_7 คือ โมเมนต์ที่กระทำเนื่องจากแรงดันน้ำใต้ฐานเขื่อน
- W_4 คือ น้ำหนักของน้ำส่วนหน้า
- W_5 คือ น้ำหนักของน้ำส่วนหน้าบริเวณฐานเขื่อน
- U_1 คือ แรงดันน้ำใต้ฐานเขื่อน

โดยขอบเขตระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางมวลดังแสดงในสมการที่ (8)

$$e_f = B/2 - \bar{X}, \quad e_f \leq B/6 \quad (8)$$

e_f คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางมวลของพื้นที่หน้าตัดถึงกึ่งกลางฐานเขื่อน ในขณะที่เขื่อนมีแรงกระทำจากแรงดันน้ำในเขื่อนและแรงดันน้ำใต้เขื่อน

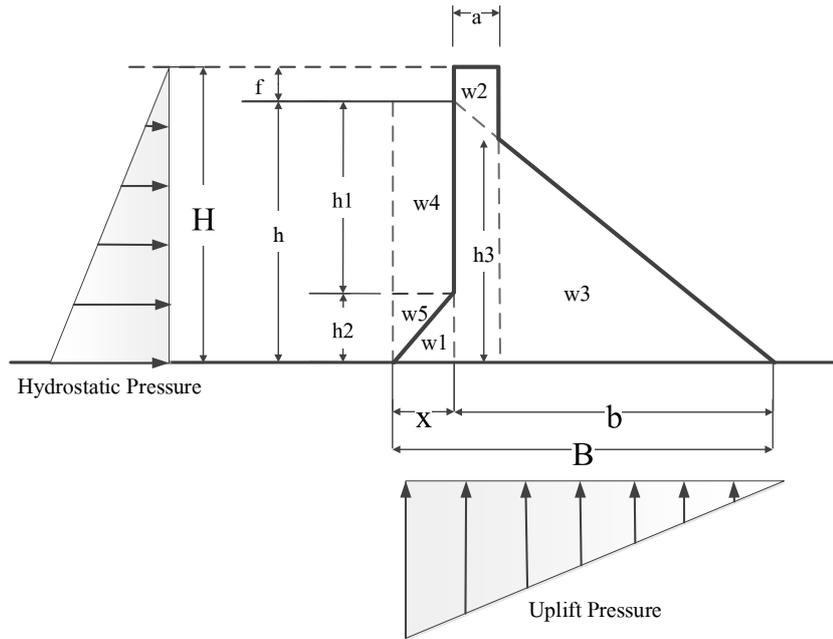
2.3 ตัวแปรตัดสินใจ

โดยในการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดที่ดีที่สุด โดยจะต้องทำการสุ่มตัวแปรตัดสินใจเพื่อหาค่าสมการวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด ซึ่งในการซึ่งศึกษานี้มีตัวแปรตัดสินใจดังต่อไปนี้

- ความสูงของเขื่อน (H)

- ความกว้างของฐานเขื่อน (B)
- ความกว้างของสันเขื่อน (a)
- ความสูงฐานเขื่อนส่วนหน้า (h2)

จากตัวแปรและความสัมพันธ์ต่างๆ สามารถนำสร้างสมการในการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดของเขื่อนที่ดีที่สุด ซึ่งจะทำการวิเคราะห์แรงที่กระทำทั้งหมดต่อเขื่อนเพื่อวิเคราะห์หาขนาดของเขื่อนที่สามารถรับแรงดังกล่าวได้ โดยจะแสดงความสัมพันธ์และวิธีการหาค่าของตัวแปร ดังตารางที่



ภาพที่ 2 ค่าตัวแปรต่างๆ ขององค์ประกอบของหน้าตัดเขื่อน

จากภาพที่ 2 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ขององค์ประกอบของหน้าตัดเขื่อน ซึ่งแต่ละตัวแปรมี

ความสัมพันธ์อยู่ในรูปของสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์และวิธีการหาค่าของตัวแปร

Forces	Value(N/m)	Nature	Lever Arm (m)	Moment (N.m)
Weight of dam (w1)	$0.5h_2Sw$	Vertical (d)	$B - 2x / 3$	M1
Weight of dam (w2)	$aHSw$	Vertical (d)	$(b - a) + 0.5a$	M2
Weight of dam (w3)	$0.5(b - a)h_3 Sw$	Vertical (d)	$2 / 3(b - a)$	M3
Weight of water supported				
by upstream face (w4)	$x h_1w$	Vertical (d)	$b + 0.5x$	M4
Weight of water supported				
by upstream face (w5)	$0.5h_2 x w$	Vertical (d)	$b + 2x / 3$	M5
Hydrostatic pressure (P1)	$0.5 h^2 w$	Horizontal	$h / 3$	M6
Uplift pressure (U1)	$0.5h Bw$	Vertical (d)	$(2 / 3)B$	M7

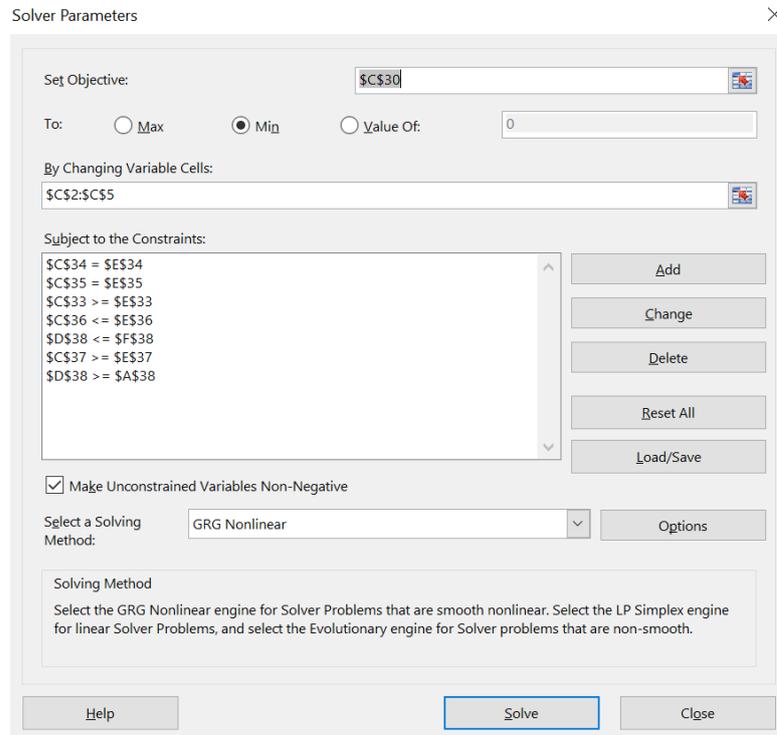
หมายเหตุ : x คือ ความกว้างของฐานเขื่อนส่วนเหนือน้ำ
 S คือ ความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ใช้สร้างเขื่อน
 w คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ

จากนั้นก็ทำสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรม ไมโครซอฟท์เอ็กเซล เพื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลอง

ซึ่งใช้ฟังก์ชันโซลเวอร์ ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาหน้าตัดเขื่อนที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยมี

เงื่อนไขทางวิศวกรรมและศาสตร์ ซึ่งมีรูปแบบใน
การสร้างแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 2 และได้ผล

การวิเคราะห์ดังตารางที่ 2



ภาพที่ 3 การแสดงตัวแปรในโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล โซลเวอ์

จากภาพที่ 3 แสดงการสร้างฟังก์ชันเงื่อนไข
และฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของไมโครซอฟท์เอ็กเซล
โซลเวอ์ เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรของ

แรงกับระยะทางที่เกิดโมเมนต์ เพื่อหาค่าของโมเมนต์
ทั้งหมดที่กระทำต่อตัวเขื่อน ซึ่งมีค่าแรงที่กระทำต่อ
เขื่อนทั้งหมด 7 ตัวแปร ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

Forces	Value (N/m)	Nature	Lever arm (m)	Moment (N.m)
Weight of Dam (w1)	18,737	Vertical (d)	63.76	1,194,750
Weight of Dam (w2)	17,632,226	Vertical (d)	58.45	1,030,657,747
Weight of Dam (w3)	39,896,931	Vertical (d)	35.68	1,423,511,031
Weight of Water Supported by Upstream Face (w4)	814,628	Vertical (d)	63.95	52,096,132
Weight of Water Supported by Upstream Face (w5)	7,807	Vertical (d)	64.14	500,749
Hydrostatic Pressure (P1)	27,590,625	Horizontal	25.00	689,765,625
Uplift Pressure (U1)	23,733,456	Vertical (d)	43.01	1,020,775,926

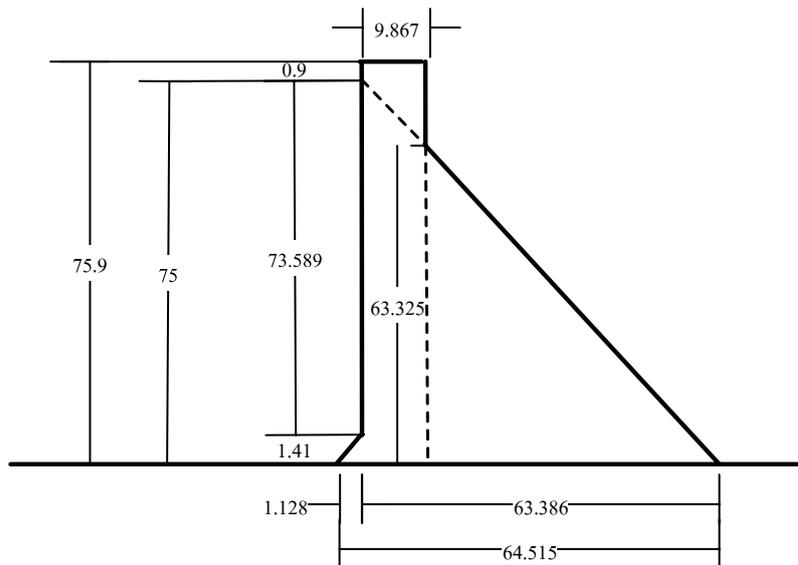
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากการทำแบบจำลองเพื่อหาค่าต้นทุนที่ดีที่สุดของเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนักโดยใช้โปรแกรม ไมโครซอฟท์เอ็กเซล โชลเวอร์ ในการ

ประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของหน้าตัดเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความเหมาะสมและดีที่สุดดังแสดงในตารางที่ 3 และภาพที่ 4

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของหน้าตัดที่มีค่าเหมาะสมที่สุด

ตัวแปร	H	h	h1	h2	h3
ขนาด (m)	75.9	75	73.589	1.410	63.325
ตัวแปร	B	b	x	a	f
ขนาด (m)	64.515	63.386	1.128	9.867	0.9
น้ำหนักเขื่อน	57,547,894.64 (N/m)				



ภาพที่ 4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง (หน่วย: เมตร)

ผลจากงานวิจัยดังกล่าวทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณขนาดของเขื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนัก โดยใช้ไมโครซอฟท์เอ็กเซล โชลเวอร์มาช่วยในการวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบเขื่อนเพื่อรองรับความสูงของน้ำ 75 เมตร วิจัยนี้จึงได้พิจารณาปัจจัยแรงที่กระทำกับตัวเขื่อนสำคัญคือแรงกระทำจากแรงดันน้ำในเขื่อน (Hydrostatic Pressure) และแรงดันน้ำใต้เขื่อน (Uplift

Pressure) (Uday and Hasan, 2016; Si *et al.*, 2019) โดยมีสมการข้อจำกัดต่างๆ ดังข้างต้น มาช่วยในการคำนวณที่มีความถูกต้องแม่นยำในการทำงานมากยิ่งขึ้น โดยใช้ต้นทุนที่น้อยที่สุดและใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่าที่สุด (Banerjee *et al.*, 2015) เพื่อช่วยในการพิจารณาตัดสินใจใช้ขนาดตัวเขื่อนที่เหมาะสม ในการทำแบบต่างๆ ต่อไป

จากผลการทดลอง พบว่าการนำไมโครซอฟต์แวร์เอ็กซ์เซล โซลเวอร์ไปใช้ในการคำนวณขนาดของตัวอย่างกรณีศึกษาในการหาขนาดหน้าตัดที่เหมาะสม เชื่อนคอนกรีตแบบถ่วงน้ำหนักเพื่อรองรับความสูงของน้ำ 75 เมตร โดยการสร้างสมุดงาน (Worksheet Model) และสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรสำหรับระบุเงื่อนไขการเชื่อมโยงทั้งหมดให้กับตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ผลการวิเคราะห์ได้ค่าความสูงเขื่อนทั้งหมด 75.9 เมตร และมีความกว้างของฐานเขื่อนทั้งหมด 64.52 เมตร รวมถึงรายละเอียดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งส่งผลให้เขื่อนมีน้ำหนักน้อยที่สุดอยู่ที่ 57,547,894.64 นิวตันต่อเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการออกแบบ (Salmasi, 2011) โดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ซึ่งได้ค่าความสูงเขื่อนทั้งหมด 76.2 เมตร และมีความกว้างของฐานเขื่อนทั้งหมด 60.7 เมตร ซึ่งมีค่าน้ำหนักเขื่อนอยู่ที่ 57,754,332 นิวตันต่อเมตร ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าน้ำหนักตัวเขื่อนในการออกแบบโดยใช้ไมโครซอฟต์แวร์เอ็กซ์เซล โซลเวอร์และวิธีเชิงพันธุกรรมมีค่าคลาดเคลื่อนแค่ 0.36 เปอร์เซ็นต์

การใช้ไมโครซอฟต์แวร์เอ็กซ์เซล โซลเวอร์ในการวิเคราะห์หาค่าหาขนาดที่ดีที่สุด แต่ผลลัพธ์ที่ได้ อาจจะไม่ดีที่สุด เสมอไป เพราะบางครั้งผลที่ได้ เป็นเพียงผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในขอบเขตหนึ่งๆ เพราะหากขอบเขตในการคำนวณเปลี่ยนไปผลลัพธ์ที่ได้ ใดๆก็ตามในการออกแบบก็ต้องอาศัยมุมมองในการตัดสินใจของผู้ออกแบบ ว่าเขื่อนมีความยาวเพียงพอที่จะวิเคราะห์แบบ 2 มิติ และผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ในการปฏิบัติงานจริง

สรุป

โปรแกรมไมโครซอฟต์แวร์เอ็กซ์เซลเป็นโปรแกรมที่ใช้งานได้ง่ายและมีประสิทธิภาพในด้าน

การคำนวณรวดเร็วและแม่นยำ ซึ่งการนำไมโครซอฟต์แวร์เอ็กซ์เซล โซลเวอร์มาใช้ในการคำนวณวิเคราะห์หาขนาดที่ดีที่สุดของการออกแบบเขื่อนภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดช่วยให้เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์น้อยกว่าวิธีการออกแบบด้วยมือ ที่ต้องทำการสุ่มหน้าตัดต่างๆ เพื่อมาคำนวณ ซึ่งวิธีนี้เป็นการวิเคราะห์หาหน้าตัดที่มีความเป็นไปได้ซึ่งมีเงื่อนไขคือต้องผ่านสมการข้อจำกัดตามหลักวิศวกรรมและมีความหนาแน่นน้อยที่สุด เพื่อช่วยให้การเลือกขนาดหน้าในการออกแบบจริงมีความสะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง ในการสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณ ผศ.ดร.ปกรณดิษฐ์กิจ จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ที่คอยให้คำปรึกษาในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Atmapoojya, S.L., Mahajan, S.K. and Dabhade, A.N. 2014. Computation of optimal top width of gravity dam, pp. 121-138. *In New Developments in Dam Engineering: Proceedings of the 4th International Conference on Dam Engineering*. Nanjing, China.
- Banerjee, A., Paul, D.K. and Acharyya, A. 2015. Optimization and safety evaluation of concrete gravity dam section. *KSCE Journal of Civil Engineering* 19(6): 1612-1619.

- Corns, C.F., Tarbox, G.S. and Schrader, E.K. 1988. Gravity dam design and analysis, pp. 466-492. *In Advanced dam engineering for design, construction and rehabilitation*. Springer, Boston, MA.
- Craig, J.D. 1995. **Gravity Dam Design**. U.S. Army Corps of Engineers. U.S, Government Printing Office, Washington, DC.
- Dantzig, G.B. 1982. Reminiscences about the origins of linear programming. **Operation Research Letters** 1(2): 43-48.
- Feng, C.W., Liu, L. and Burns, S.A. 2000. Stochastic construction time-cost trade-off analysis. **Journal of Computing in Civil Engineering** 14(2): 117-126.
- Kongpoung, P. and Lerdwiwatchaiyaporn, S. 2018. Linear Programming Approach to Quantity Optimal for Chemical Fertilizer Substitution in Water Chestnut Farm. **Journal of Science and Technology** 7(3): 27-33. (in Thai)
- Maythathirut, R. 2013. Scheduling of Construction Project Under Cash Constraints. Master of Engineering, Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Noisang, P. and Monthatipkul, C. 2017. Locality Selection of Regional Distribution Centers in Thailand Using Quantitative and Qualitative Factors Analysis with Multi-objective Optimization. **Thai Journal of Operations Research** 5(1): 60-70. (in Thai)
- Salmasi, F. 2011. Design of gravity dam by genetic algorithms. **International Journal of Civil and Environmental Engineering** 3(3): 187-192.
- Si, Z., Yang, K. and Huang, L. 2019. Study of the section optimization of gravity dam based on improved PSO, pp. 022007. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, Jilin, China.
- Uday, A.M. and Hasan, H.M. 2016. Optimal location of drainage gallery under gravity dam by using finite element method. **International Journal Multidisciplinary Research Mod Educational** 2: 611-622.
- Zhang, M., Li, M., Shen, Y. and Zhang, J. 2019. Isogeometric shape optimization of high RCC gravity dams with functionally graded partition structure considering hydraulic fracturing. **Engineering Structures** 179: 341-352.

การพัฒนาแผ่นดูดซับเสียงที่ได้จากเส้นใยกาบกล้วย

The Development of Sound Absorber from Banana Fiber

พฤทธิวุฒิ นัตตะวิริยะ^{1*}, ดุสนิ สุภาวรรณกุล¹, รัศมี แสงศิริมงคลยิ่ง² และ กฤษดา เสือเอี่ยม³
Pruktivud Chattaviriya^{1*}, Dusanee Supawantanakul¹, Ratsamee Sangsirimongkolying² and
Gritsada Sua-iam³

Received: 22 February 2021, Revised: 5 May 2021, Accepted: 14 May 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแผ่นดูดซับเสียงที่ได้จากเส้นใยธรรมชาติ (เส้นใยกาบกล้วยน้ำว้า) ใช้แทนเส้นใยสังเคราะห์ (เส้นใยหินและเส้นใยแก้ว) แผ่นดูดซับเสียงนี้ถูกนำมาทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง และค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียง โดยกำหนดปัจจัยที่นำมาศึกษาคือ (1) ความยาวเส้นใยกาบกล้วย ขนาด 0.6, 5.0 และ 10.0 มิลลิเมตร (2) อัตราส่วนของใยกาบกล้วยต่อใยปشم 1 : 9, 2 : 8 และ 3 : 7 โดยมวล ที่ความหนาแผ่นดูดซับเสียง 25.0 มิลลิเมตร การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง และค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียง จะใช้เครื่องมือ Impedance Tube ตามมาตรฐาน ISO 10534-2 ที่ช่วงความถี่ระหว่าง 250-4,000 เฮิรตซ์ นอกจากนี้ยังหาลักษณะโครงสร้างและการกระจายตัวของเส้นใยกาบกล้วยกับวัสดุประสานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียง เท่ากับ 0.52 ของตัวอย่างเส้นใยกาบกล้วยที่มีความยาวขนาด 0.6 มิลลิเมตร และอัตราส่วนของใยกาบกล้วยต่อใยปشم 3:7 โดยมวล ซึ่งพบมีความพรุนและช่องว่างที่มากขึ้น เมื่อนำผลการทดสอบมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าความแปรปรวน (F-Test) มีค่านัยสำคัญเท่ากับ 0.09 และค่าระดับนัยสำคัญ (p -value) ของอัตราส่วนของใยกาบกล้วยต่อใยปشمเท่ากับ 0.05 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียง ดังนั้นแผ่นดูดซับเสียงที่ได้จากเส้นใยกาบกล้วยจึงสามารถนำไปใช้เพื่อลดความดังของเสียงได้

¹ สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร 9 ถนนแจ้งวัฒนะ แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

¹ Technology Management Program, Faculty of Industrial Technology, Phranakhon Rajabhat University, 9 Changwattana Road, Anusawari, Bang Khen, Bangkok 10220, Thailand.

² สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร 9 ถนนแจ้งวัฒนะ แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

² Department of Chemical, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University, 9 Changwattana Road, Anusawari, Bang Khen, Bangkok 10220, Thailand.

³ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

³ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, 1381 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bang Sue, Bangkok 10800, Thailand.

* Corresponding author, e-mail: confocus@ksc.th.com Tel: 08 1699 6359

คำสำคัญ: แผ่นดูดซับเสียง, เส้นใยกล้วย, ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง, ค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียง, รูปภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ABSTRACT

The aim of this study was to develop the sound absorber from natural materials (cultivated banana fiber) to substitute for synthetic materials (asbestos and fiberglass). This sound absorber was presented particularly on Sound Absorption Coefficient (SAC) and Noise Reduction Coefficient (NRC) according to following factors: (1) fiber length of 0.6, 5.0, 10.0 mm., and (2) banana fiber-gypsum with a ratio of 1:9, 2:8, and 3:7 by weight at 25.0 mm. thickness of each specimen. This experiment was determined on SAC and NRC by impedance tube method based on ISO10534-2 standard in the frequency range 250-4,000 Hz. In addition, the structural and scattering images of banana fiber and surface adhesive by using Scanning Electron Microscope (SEM) were investigated. The result showed that NRC 0.52 of banana fiber specimen in length of 0.6 mm and banana fiber-gypsum ratio of 3:7 by weight appeared more porous and space. Likewise, mathematical model from this experiment showed the variance on the significant (F-Test) to be 0.09 and p - value of banana fiber-gypsum ratio to be 0.05 which was interacted with the value of NCR. Hence, sound absorber from banana fiber can be applied to noise reducing purpose.

Key words: sound absorber, banana fiber, sound absorption coefficient, noise reduction coefficient, image of scanning electron microscope

INTRODUCTION

Sound level of 90 dBA or above is harmful to the whole human hearing (Ratanalak *et al.*, 2017). Practically, the sound path control is a sound reducing method, by blocking of sound from one side to the other. In the present, a sound reducing medium or "Sound Absorber", which is taken from the "sound absorbing material" that has the ability to reduce the sound energy due to frictional loss (Cheremisinoff, 1977). When a sound wave impinges the surface of the absorbing material, some sound wave would be in motion within this material. The motion of sound wave causes the fibers on vibration. The fibers vibrations allow air to flow in the gap between fiber and particles. The air motions through narrow constrictions cause some energy loss (Bies and Hansen, 2009). The losses of sound energy indicate some sound energy is absorbed within material through dissipation process. In the previous study (Allard *et al.*, 1989), the porous or dissipative absorber is a great sound absorber in medium and high sound

frequency complying on the explanation of sound when passing into the porous wall as result of the sound energy reduction due to its friction loss. Various research have shown many new natural materials for noise control as alternatives to the traditional ones (for examples of asbestos and fibre glass) that natural fibers appear to be cheaper, lighter and environmentally superior to synthetic fiber (Asdrubali, 2006). The measurements carried out samples of natural fiber have shown to porous or dissipative absorber materials as result of good sound absorption coefficients (Sound Research Laboratories Ltd, 2004), especially at medium and high frequencies (Berardi and Iannace, 2017). For mechanical properties of Natural Fiber Composites (NFC) compared with Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP), NFC was better than GFRP in term of stiffness and cost, but values of tensile and impact strength were less than GFRP (Pickering *et al.*, 2016).

The value indicated that *Arenga Pinnata* panels were highly absorptive material. The best sound absorption was

performed by panel added with 10 % Latex with a maximum Sound Absorption Coefficient of 0.96 at 3,000 Hz. The average Noise Reduction Coefficient for all panels was 0.40 (Ismail, 2012). Also, the research that rice straw was chosen because of its availability in local region. The manufacturing parameters were: the specific gravity of 0.4, 0.6, and 0.8, and a rice straw content (10/90, 20/80, and 30/70 by weight percentage of rice straw/wood particle) of 10, 20, and 30 weight % (Yang *et al.*, 2002). A commercial urea-formaldehyde adhesive was used as the composite binder, Sound Absorption Coefficients of the 0.4 and 0.6 specific gravity boards were higher than the other wood-based materials. The utilization of fiber from Oil Palm Empty Fruit Bunch (OPEFB) to be alternative native acoustic material that are different densities and thicknesses (Or *et al.*, 2017). Measurement of absorption coefficient based on ISO10534-2 found on 0.9 at frequency 1 kHz. In order to properly use these materials, in addition to knowing the benefits and suitability of absorbers for use in the intended environment, the effective factors in sound absorption such as fiber size, air flow resistance, porosity, curve, thickness and density of absorbers were considered (Ghotbi *et al.*, 2015). The advantages and disadvantages of different kinds of fibrous materials in noise reduction were explained that various fibers, inorganic fibers including glass wool, carbon fiber and basalt fiber have been utilized in noise reduction with the unique advantage such as flame retardant, high temperature resistance and moisture resistance, metallic fibers were widely used in extreme environment for sound absorption (Tang and Yan, 2017). Natural fibers including kapok, hemp, coir, kenaf, sisal, banana fiber and wool are environmental-friendly and low production cost. Definitely, bananas are one of the most widely cultivated crops in Thailand, there were 547,055 Rai of banana plantations and 782 million tons of produce including total exports of 35,266 tons (Suthanukool, 2015). In previous banana fiber research, the

importance key properties of physical, and mechanical implied on this porous fiber have shown on their characteristics equivalent with others natural fiber (such as sisal and kenaf) (Koizumi *et al.*, 2002) including chemical compositions (cellulose and lignin influenced on the ductility and elongation values) and tensile strength (Santijitto, 2011). Banana fiber was also investigated by scanning electron microscope as a long line which this fibrous configuration comprised of many cavity or porosity within parallel fiber bundle and were coated with cellulose and lignin (Deelaman *et al.*, 2016). To meet living environment requirements and increasing social perception, the natural material might be greater chances. Thus, the continued development of technologies is forced to support on these needs. In previous studies, there were many ways in which the natural materials can utilize in modern construction. Normally, fiber plants are often subject to fungi and parasites and are less resistant to fire than typical mineral fibers; furthermore, they often need special fiber preparations before being used (Santijitto, 2011), which reduce the inherent sustainability of the raw materials. Also, these natural fibers are often commercialized in cement panels and blocks by using some binder. These considerations suggest to the environmental impacts of all the products used during the entire process of transformation of the natural fibers into building materials. Thereby, the role of acoustic material such as room acoustics, industrial noise control, interior lining in automotive, building, enclosure, ducts, aircraft, etc. is the interesting expected study in advance, specially the special characteristics of thermal resistance, moisture resistance, extended weather ability and increased durability. These attractive features of banana fibers are low cost, strong and durable in any typical environment condition such as wet, temperature. Therefore, banana fiber could be the potential opportunity for consumer to increase insulated compatibility with the main direct materials. In this paper, banana fiber mixed with binders as gypsum and fused silica were studied

relate to (1) fiber length, (2) banana fiber-gypsum ratio, at 25 mm. thickness of each specimen.

MATERIALS AND METHODS

1. Raw materials

1.1 The cultivated banana fiber

The type of banana for this research was the cultivated banana (Scientific name: *Musa ABB CV.Kluai "Namwa"*)

was divided as diameter of 2 - 3 mm of straight line because the cellulose molecules were arranged orderly or called "Crystalline" which affected on the strength of natural fibers (Karlinsari *et al.*, 2012). After dehydration, these banana fiber was equivalent to 20-30% of moisture, with average cut length of 0.6, 5.0, and 10.0 mm, consecutively, the physical characteristics of banana fiber are presented in Figure 1.



(a) Dried banana fiber



(b) 0.6 mm banana fiber



(c) 5.0 mm banana fiber



(d) 10.0 mm banana fiber

Figure 1 The physical characteristics of banana fiber length

Banana fiber was magnified at 350x by Scanning Electron Microscope (SEM), it can be seen as a long line which

this fibrous configuration comprised of many cavity or porosity of fibers within parallel fibers bundle as shown in Figure 2

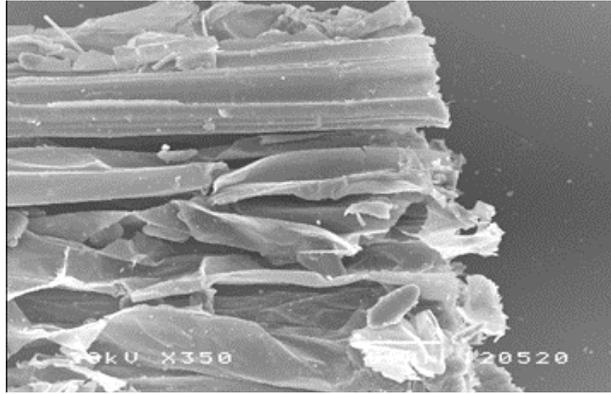
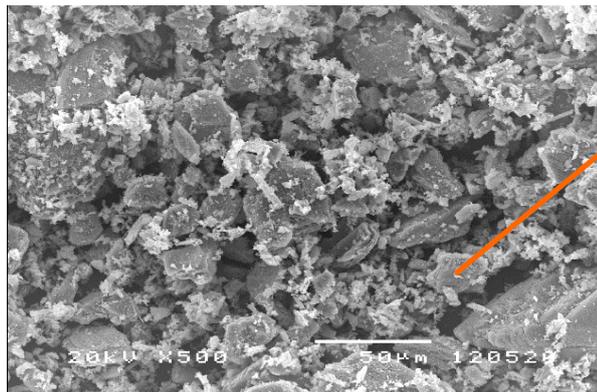


Figure 2 Longitudinal section of banana fiber by SEM image (350x)

1.2 Gypsum powder

The type of gypsum is Type 2B according to Thai Industrial Standard No.188 (TIS 188, 2004). The properties of gypsum powder or calcium sulphate dehydrate (molecular formula: $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) show that the physical properties has the setting value of expansion is less than 2.0% and surface hardness that

diameter of indentation is less than 5 mm. The chemical properties, SO_3 is the main component equivalent to 35.0%, $\text{CaO} > 23.3\%$, and $\text{MgO} < 0.3\%$, respectively. Picture of gypsum was magnified at 500x by Scanning Electron Microscope (SEM), it can be seen as stacked identical spheres as shown in Figure 3.



Stacked
identical
spheres

Figure 3 Gypsum by SEM image (500x)

1.3 Fused silica (SiO_2)

The general name is Fused silica as by- product of Quartz. The physical properties describe on its molecular weight: 60.1, specific gravity: 2.2-2.6, melting point: 1,710 °C, white color, and its size: 0.1-0.5 mm. Fused silica has the characteristics of strengthening and adhesive agent which the chemical

properties consist of SiO_2 min: 98.5%, Al_2O_3 max: 0.1-0.5 %, and Fe_2O_3 max: 0.03%, respectively (Pluanjumpee, 2004). Picture of fused silica was magnified at 500x by Scanning Electron Microscope (SEM), it can be seen as stacked identical spheres and sharper than gypsum as shown in Figure 4.

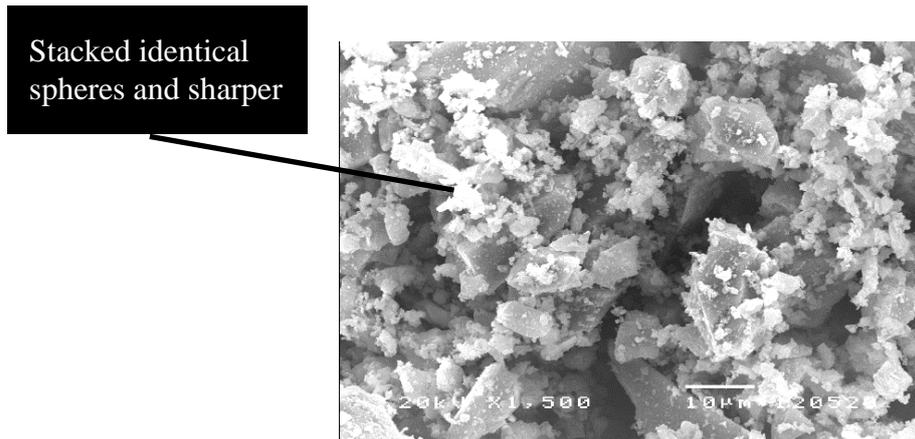


Figure 4 Fused silica by SEM image (500x)

2. Specimen preparation and analysis methods

Based on this experimental research and literature reviewing, the specimen were prepared by various factors: (1) fiber length of 0.6, 5.0, 10.0 mm., (2) banana fiber-gypsum ratio on 1:9, 2:8, and 3:7 by mass, at 25.0 mm. thickness of each specimen. The reaction between gypsum and water was able to linkage with banana fiber,

especially fused silica with Si - H bonding reinforcement.

These specimens were aimed to determine on Sound Absorption Coefficient (SAC) and Noise Reduction Coefficient (NRC) by impedance tube method based on ISO10534-2 standard (ISO 10534-2, 1998) as following on Table 1 and Figure 5.

Table 1 The mixture proportions of each specimen

Specimen No.	Fiber length (mm.)	Banana fiber-Gypsum ratio (by mass)	Water-Fused silica ratio (by mass)
K1/1	0.6	1:9	5:1
K1/2	0.6	2:8	5:1
K1/3	0.6	3:7	5:1
K2/1	5.0	1:9	5:1
K2/2	5.0	2:8	5:1
K2/3	5.0	3:7	5:1
K3/1	10.0	1:9	5:1
K3/2	10.0	2:8	5:1
K3/3	10.0	3:7	5:1



(a) Specimen # K1/2



(b) Specimen # K2/3



(c) Specimen # K3/3

Figure 5 Some experimental specimens

The process of specimen preparation was started by the banana stem cutting- off step to prepare banana fibers which had determined to slit of 2-3 mm fiber diameter by cutter and then dehydrated on these banana fiber. Therefrom, fiber length reducing on 10.0 mm and 5.0 mm were consecutively cut. Eventually, a high speed grinder was applied to mill these fiber and then 30 US Mesh filter was utilized reducing fiber length to 0.6 mm. Each mixture proportion was provided on 6 specimens, which were

molded into a pair of circular shape at the diameter of 9.8 cm and 2.8 cm, and 25 mm thickness for testing in low-sensitivity zone (0-1,600 Hz) up to high-sensitivity zone (1,600-6,400 Hz), respectively. After that each dried mixture consisted of 6 specimens (3 pairs of specimens) were testified to determine on their average of SAC (α) at frequencies 250, 500, 1,000 2,000 and 4,000 Hz. Also, total of 54 specimens were recorded on weight before and after drying to calculate on bulk density as below equations:

$$\text{Bulk density (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Weight of Each Dried Specimen}}{\text{Volume of Each Specimen}} \quad (1)$$

In comparing sound absorbing materials for the noise control, the impedance tube method using the Kundt's tube (Or *et al.*, 2017) can be demonstrated on NRC is the arithmetic mean of SAC (α) at frequencies

250, 500, 1,000 2,000 and 4,000 Hz on the ability of sound absorption on the surface of the material as the equation (Barron, 2003)

$$\text{NRC} = \frac{(\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000} + \alpha_{4000})}{5} \quad (2)$$

When

NRC Noise Reduction Coefficient
 α Sound Absorption Coefficient

In addition, each specimen was investigated on the structural of the banana fiber and banana fiber-gypsum mixtures by Scanning Electron Microscope (SEM) at 35x-150x times to analyze on the banana fiber porous, scattering and bonding. Lastly, all data from each specimen was analyzed in order to determine the correlation equation of 2 factors (Fiber length and Banana fiber-Gypsum Ratio) against NRC by multiple regression analysis.

RESULTS AND DISCUSSIONS

1. The sound absorption coefficient and noise reduction coefficient

This NRC value imposes highly absorbing material characteristics on incident

sound. Also, the value of NRC: 0.4 - 1.0 indicated at the high level of noise absorption (Cowan, 1994). Results of specimens testing in Figure 6, the percent of Sound Absorption Coefficient (SAC), average at the frequency range 250-4,000 Hz were found that specimen K1/3 equivalent to 78.46% at 1,000 Hz and maximum equivalent to 83.99 % at 4,000 Hz. Particularly, the percent of SAC related to size of the banana fiber 0.6 mm. that displayed the less length and the rational of banana fiber- gypsum on 3:7 by mass as result in the higher SAC. At 250 Hz - low frequency, all specimen found the percent of SAC was similar and very low. It is observed on specimen K3/3 that fiber size 10.0 mm and the rational of banana fiber- gypsum on 3:7 by mass as result of the percent of SAC more than 40.00% at 2,000, 4,000, 1,000 Hz and Average frequency, respectively.

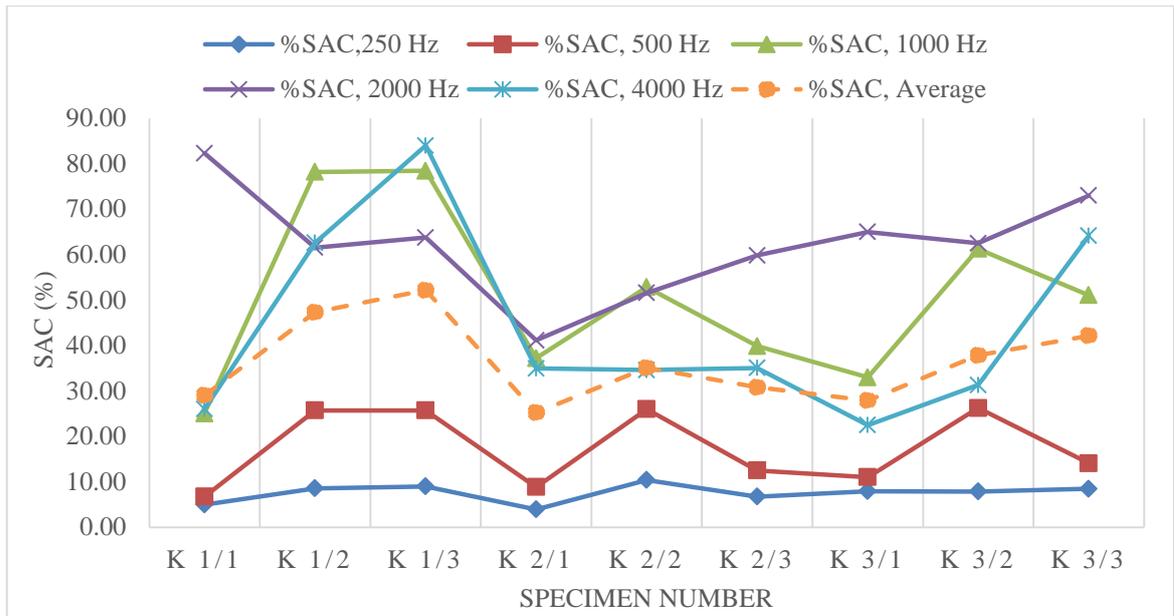


Figure 6 Sound absorption coefficient of different frequencies

The average of Noise Reduction Coefficient (NRC) showed on Figure 7 that the result of specimen K1/3 (fiber size 0.6 mm and the ratio of banana fiber-gypsum equivalent to 3: 7 by mass) was indicated the sound absorption ability to 0.52, the specimen K1/2 (fiber size 0.6 mm and the ratio of banana fiber-gypsum equivalent to 2: 8 by mass) was equivalent to 0.47, and the specimen K3/3 (fiber size 10.0 mm and the ratio of banana fiber-gypsum equivalent

to 3: 7 by mass) was equivalent to 0.42, consecutively. This experiment can explain that the more rational of banana fiber and gypsum can influence on the sound absorption ability. However, the result of specimen K2/3 (fiber size 5.0 mm and the ratio of banana fiber-gypsum equivalent to 2: 8 by mass) was indicated the sound absorption ability to 0.31 due to the specimen preparation or other factors needed to investigate in advance.

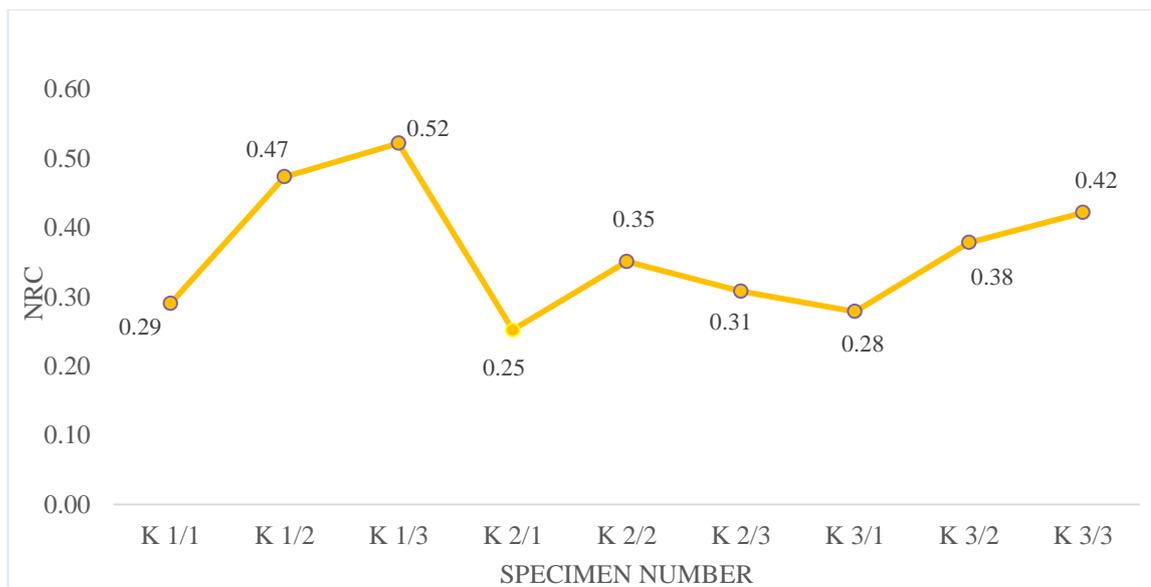


Figure 7 Noise Reduction Coefficient (NRC)

The bulk density as displayed on Figure 8 and its average was found 0.98 g/cm^3 . The ratio of banana fiber-gypsum was equivalent to 3: 7 by mass of each specimen size (K1/3, K2/3 and K3/3) that

was obviously less density than others ratio of banana fiber-gypsum was equivalent to 2:8 (K1/2, K2/2 and K3/2) and 1:9 (K1/1, K2/1 and K3/1), respectively.

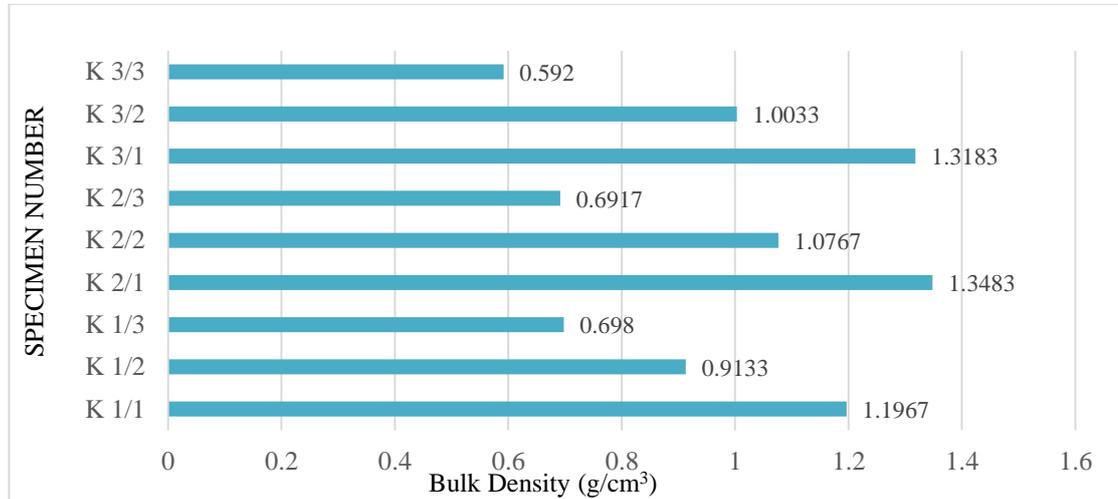
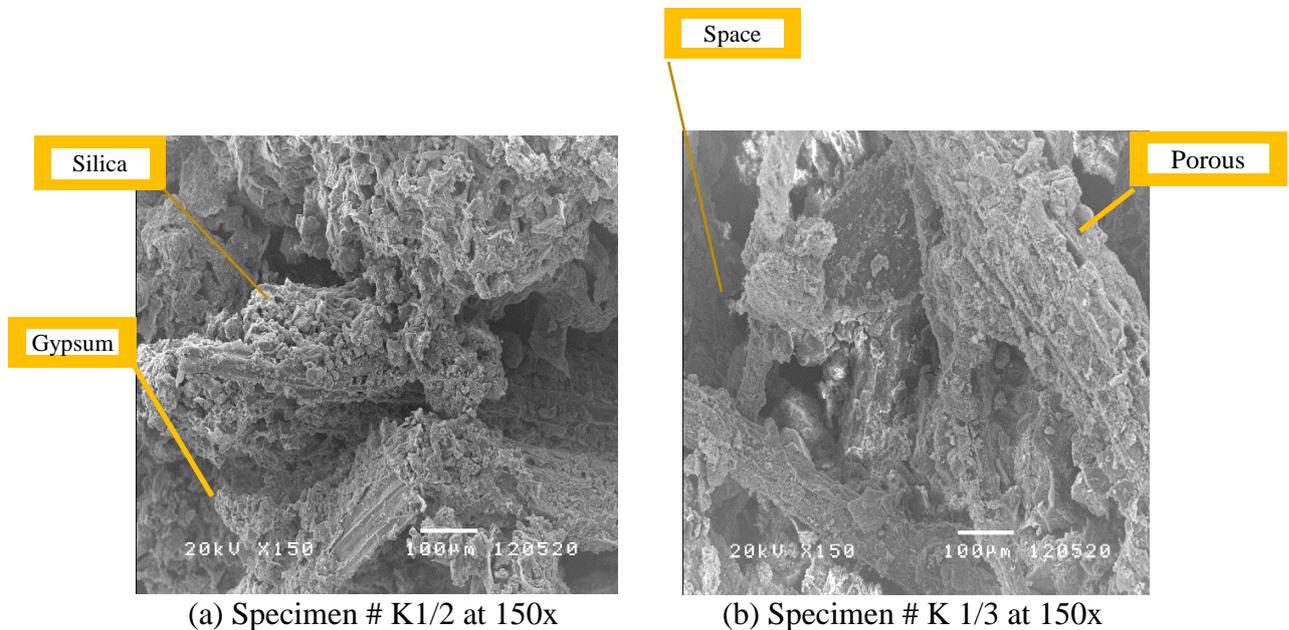


Figure 8 Bulk Density

2. The structural of the banana fiber and binders (gypsum and fused silica)

When using a Scanning Electron Microscope (SEM) magnified at 35x-150x

times, these fiber can be seen distinctly as a porous fiber with binders scattering and bonding. These configuration were presented on Figure 9.



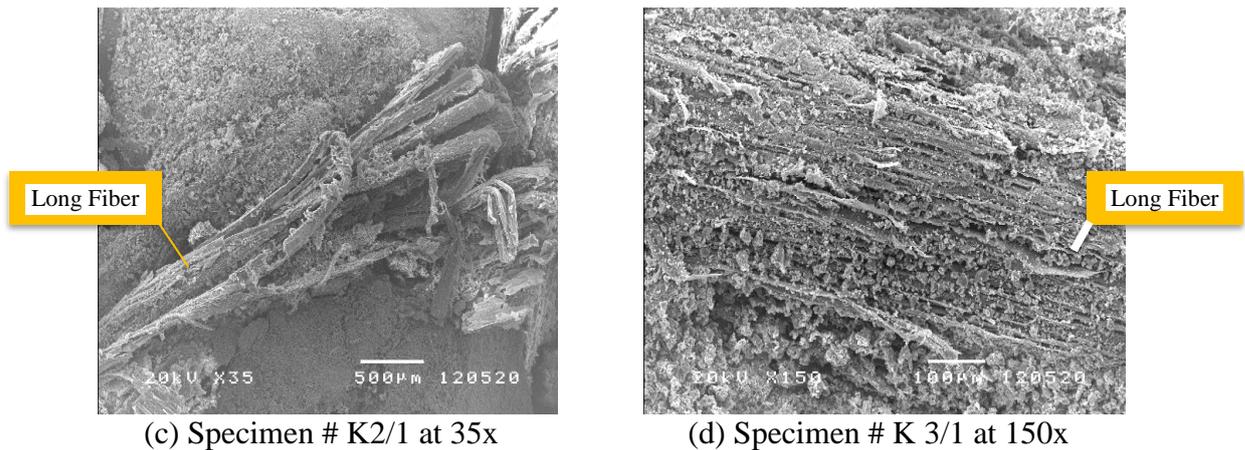


Figure 9 SEM image of some specimen types

These investigation revealed that the fine banana fiber indicated as the short fibrous, more porosity and space area. The specimen # K1/3 indicated apparently on Figure 9 (b) as the short fibrous, was interfered between binders (gypsum and fused silica which was shown on Figure 9 (a) of the specimen # K1/2) with porous, and also appeared on space area into this specimen. Thus, size of the fibers had small length and more surface area as result in the higher sound absorption coefficient and this porous material indicated as excellent in term of sound absorption that be enable to explain on natural fiber have shown to porous or

dissipative absorber materials as result of good sound absorption coefficients (Sound Research Laboratories Ltd, 2004). For SEM picture 9 (c), the specimen # K2/1 found binders were being scattered on the long fibrous. Also, the 9 (d) picture of the specimen # K3/1 found these binders were being scattered on the long fibrous and found obviously space area into this specimen.

3. Multiple regression analysis

To determine on the correlated equation of 2 variable factors (when x_1 : Fiber length and x_2 : Banana fiber-Gypsum Ratio) and Noise Reduction Coefficient (y) was showed as following on this mathematical model

$$y = 0.2564 - 0.0069x_1 + 0.7169x_2 \quad (3)$$

This correlation coefficient was equivalent to 0.54 between the experimental values and the predicted valued by this mathematical model. The analysis of variance (ANOVA) was summarized on the significant F to be 0.09 and p - value, banana fiber-gypsum ratio of 0.05 and p - value, intercept of 0.2564 as the interested keyword.

The testing to determine on the coefficient of noise reduction by using the acoustic material experimentation according to the ISO10534-2 international standard were found especially the natural fibers in a straight line such as banana fibers was good absorber. For value of Noise Reduction Coefficient from this study were distinguished on the development of banana fiber

reinforced gypsum at frequency ranges between 250 Hz and 4,000 Hz with the average value of the sound absorption ability to 0.52. In fact of the porous or dissipative absorber is a great sound absorber in medium and high sound frequency complying on the explanation of sound when passing into the porous wall as result of the sound energy reduction due to its friction loss. Furthermore, this research also revealed the importance factors effecting on sound absorbing ability that (1) size of the fibers presented the less one as result in the higher sound absorption coefficient, (2) density was also the important factor when dealing with the sound absorption behavior of the material, (3) the ration of banana fiber - gypsum according to the above

mathematical model presented the influence on Noise Reduction Coefficient. In addition, the effective factors in sound absorption such as fiber size, porosity and density of absorbers were considered (Ghotbi *et al.*, 2015) and The utilization of native acoustic material are different densities and thicknesses (Or *et al.*, 2017). However, the intercept value of 0.2564 could be implied that the other influence factors will be subjected to research later.

CONCLUSION

In this research, the experimentation to determine on the Noise Reduction Coefficient by using the acoustic material examination according to the ISO10534-2 standard at the frequency range 250-4,000 Hz, demonstrated on specimen # K1/3 (the mixture proportions of fiber size 0.6 mm and ratio of banana fiber-gypsum equivalent to 3: 7 by weight) which the Noise Reduction Coefficient was indicated the good sound absorption ability to 0.52. Accordingly, Noise Reduction Coefficient value of 0.4 - 1.0 was announced on the high level of noise absorption. In addition, the percent of Sound Absorption Coefficient was equivalent to 83.99% at high-sensitivity zone (4,000 Hz) became apparently positive outcome for the research in advance. In addition, the higher bulk density varied on the lower ratio of banana fiber-gypsum. By using Scanning Electron Microscope, the specimen # K1/3 was found as the short fibrous, was interfered between binders (gypsum and fused silica) with porous, likewise appeared on space area into this specimen. Finally, mathematical model presented the variance on the significant F to be 0.09 and p - value belonging banana fiber-gypsum ratio to be 0.05 that implied the linkage with the value of Noise Reduction Coefficient. The SEM investigation revealed that the fine banana fiber indicated as the short fibrous, more porosity and space area influence on Noise Reduction Coefficient. Likewise, the scattering and bonding of banana fiber with binders influence on the strength of sound absorber needed to be more investigation on mechanical properties.

Furthermore, the other parameters and variations effecting on Noise Reduction Coefficient might be investigated to develop in sound absorber from banana fiber in advance. Owing to its noise absorbing properties, banana fibers are flexible to be used in broadly engineering applications. Regarding to features offered, banana fiber is appropriate for an alternative engineering material, with a focus on; (i) Minimizing the use of local materials and resources, (ii) Recycling of wastes, (iii) Maximum use of local skills, and (iv) Environmental prevention and Energy conservation.

REFERENCES

- Allard, J.F., Depollier, C. and Guignouard, P. 1989. Free Field Surface Impedance Measurements of Sound-Absorbing Materials with Surface Coatings. **Applied Acoustics** 26(3): 199-207.
- Asdrubali, F. 2006. Survey on the acoustical properties of new sustainable materials for noise control, pp. 1-10. *In Euronoise 2006*. Tampere, Finland.
- Barron, R.F. 2003. **Industrial Noise Control and Acoustics**. Marcel Dekker Inc, USA.
- Berardi, U. and Iannace, G. 2017. Predicting the sound absorption of natural materials: Best -fit inverse laws for the acoustic impedance and the propagation constant. **Applied acoustics** 115: 131-138.
- Bies, D.A. and Hansen, C.H. 2009. **Engineering Noise Control Theory and Practice**. 3rd ed. Spon Press, New York.
- Cheremisinoff, N.P. 1977. **Noise control in Industry a Practical Guide**. NOYES Publications, USA.
- Cowan, J.P. 1994. **Handbook of Environmental Acoustics**. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Deelaman, W., Chaochanchaikul, K., and Tungsudjawong, K. 2016. **Research Report on Improvement and Production of Light Weight Blocks by Mixing Natural Fiber**. Faculty Research of Science and Technology,

- Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. (in Thai)
- Ghotbi, R.M.R., Mardi, H., Langari, A.A.A., Mohammadian, M. and Khanjani, N. 2015. A Review on the Acoustical Properties of Natural and Synthetic Noise Absorbents. **Open Access Library Journal** 2: e1598.
- ISO 10534-2. 1998. **Acoustics - Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes - Part 2: Transfer-Function Method**. 1st ed. International Organization for Standardization, Switzerland.
- Ismail, L. 2012. Acoustic and Durability Performances of Arenga Pinnata Panel. Master of Mechanical Engineering, Universiti of Tun Hussein Onn Malaysia.
- Karlinasari, L., Hermawan, D., Maddu, A., Martianto, B., Lucky, I.K., Nugroho, N. and Hadi, Y.S. 2012. Acoustical properties of particleboards made from Betung bamboo (*Dendrocalamus asper*) as building construction material. **BioResearch** 7(4): 5700-5709.
- Koizumi, T., Tsujiuchi, N. and Adachi, A. 2002. The development of sound absorbing Materials using natural bamboo fibers. **WIT Press** 59: 157-166.
- Or, K.H., Putraa, A. and Selamatb, M.Z. 2017. Oil palm empty fruit bunch fibres as sustainable acoustic absorber. **Applied Acoustics** 119: 9-16.
- Pickering, K.L., Efendy, M.G.A. and Le, T.M. 2016. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Science Direct, Composites: Part A** 83: 108-112.
- Pluanjumpee, B. 2004. **Silicon**. Academic documents, Bureau of Basic Industries Department of Primary Industries and Mining, Bangkok. (in Thai)
- Ratanalak, A., Intarapintuwat, M., Wangsaeng, K. and Sakulkool, P. 2017. Situations of hearing loss from exposure to loud sounds in Occupation in Thailand and abroad. **Journal of Public Health Research** 10(1): 1-10. (in Thai)
- Santijitto, A. 2011. Influence of cellulose fiber on mechanical and thermal properties of fiber cement roof sheets in hot-humid climate. Master of Architecture, Thammasart University, Pathumthani. (in Thai)
- Sound Research Laboratories Ltd. 2004. **Noise Control in Industry**. Taylor & Francis e-Library, USA.
- Suthanukool, P. 2015. **Research Report on Research and development of banana production for improvement of quality production and high value-added products**. Department of Agriculture (DOA), Ministry of Agriculture and Cooperatives. (in Thai)
- Tang, X. and Yan, X. 2017. Acoustic energy absorption properties of fibrous materials: A review. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing** 101: 360-380.
- TIS 188. 2004. **Gypsum Plaster for Building Purpose**. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry. (in Thai)
- Yang, H.S., Kim, D.J. and Kim, H.J. 2002. Rice straw-wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials. **Bioresource Technology** 86: 117-121.

การวิเคราะห์ความรู้สึกทางอารมณ์ในบทความแนะนำสินค้าออนไลน์

Sentiment Analysis Techniques of Online Product Reviews

พิศิษฐ์ บวรเลิศสุธี และ วรภัทร ไพรีเกรง *

Pisit Bowornlertsutee and Worapat Paireekreng *

Received: 16 July 2020, Revised: 19 April 2021, Accepted: 1 October 2021

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการสร้างตัวแบบสำหรับการวิเคราะห์ระดับความรู้สึกของการแสดงความคิดเห็นต่อสินค้าและบริการออนไลน์ โดยใช้เทคนิคส่วนการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ด้านการทำเหมืองข้อความ (Text Mining) ร่วมกับเทคนิคการตัดคำ (Word Segmentation) 3 รูปแบบ และการสร้างคลังคำศัพท์ (Bag of words) จากนั้นนำเข้ากระบวนการแยกประเภทผลการวิเคราะห์ 4 เทคนิค ได้แก่ K-Nearest Neighbors, Random Forest, Logistic Regression และ Support Vector Machines (SVM) ในการสร้างตัวแบบ มีกระบวนการทดลอง 5 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การเก็บรวบรวมและการเตรียมข้อมูล (Data Preparation Phase) 2) การประมวลผลข้อความ (Text File Processing Phase) 3) การฝึกอบรมข้อมูล (Training & Streaming Phase) 4) การแยกประเภท (Classification Phase) และ 5) การประเมินตัวแบบ (Model Evaluation Phase) ทำการทดลองโดยใช้ข้อมูลตัวอย่างการแสดงความคิดเห็นต่อสินค้าและบริการออนไลน์บน Social Blog จำนวน 252 บทความ การแสดงความคิดเห็นจำนวน 1,412 ความเห็น จำนวน 83,670 คำ ใช้เป็นข้อมูลในการสร้างตัวแบบ เพื่อช่วยให้ผู้บริโภคตัดสินใจในการซื้อสินค้าและบริการ และช่วยให้ผู้ประกอบการมีข้อมูลสำหรับการพัฒนาสินค้าและบริการในอนาคต ผลการทดลองสร้างตัวแบบการวิเคราะห์ระดับความรู้สึกทางอารมณ์ 3 ระดับ คือ ความรู้สึกเชิงบวก (Positive) เป็นกลาง (Neutral) และเชิงลบ (Negative) โดยแต่ละตัวแบบให้ความแม่นยำในการทำนายผล ดังนี้ K-Nearest Neighbors 52.6% Random Forest 71.6% Logistic Regression 77.2% และ Support Vector Machines (SVM) 79% สรุป การสร้างตัวแบบใช้เทคนิคการแยกประเภทแบบ Support Vector Machines (SVM) ร่วมกับเทคนิคการตัดคำแบบ Longest ให้คะแนนความแม่นยำดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ เหมาะแก่การนำไปใช้ในการสร้างตัวแบบในการวิเคราะห์ระดับความรู้สึกสำหรับข้อความที่เป็นภาษาไทย

* สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ 110/1-4 ถนนประชาชื่น หลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210

* Information Technology, College of Innovative Technology and Engineering, Dhurakij Pundit University, 110/1-4 Pracha Chuen Road, Lak Si, Bangkok 10210, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): worapat.png@dpu.ac.th Tel: 0 2954 7300 ext. 602

คำสำคัญ: การวิเคราะห์อารมณ์ความรู้สึก, การทำเหมืองข้อความ, แนวทางการเรียนรู้ของเครื่อง, การซื้อสินค้าออนไลน์, การตัดคำภาษาไทย, การทำเหมืองความคิดเห็น

ABSTRACT

This research proposes a model for Sentiment analysis of emotional levels of users' opinions towards online products and services. The techniques used in this research are Machine Learning, Text Mining integrated with 3 types of Word Segmentation and Bag of Words. Four sentiment analysis methods: K-nearest neighbors Classifier, Random Forest Classifier, Logistic Regression and Support Vector Machines (SVM) were used for analysis. The model was developed through 5 steps including 1) Data Collection and Preparation Phase, 2) Text Processing Phase, 3) Training & Streaming Phase, 4) Classification Phase, and 5) Model Evaluation Phase. Consumers' opinions were gathered from social blogs related to online products and services. 252 articles with 1,412 comments were collected making up 83,670 words in the dataset. The model can help consumers make a decision for purchasing of goods and services, and help entrepreneurs gain the information to improve products and services in the future. This proposed method classified opinions into 3 scales: positive, neutral and negative opinions. Each method offered different levels of forecast ability: the K-Nearest Neighbors revealed the accuracy index at 56.2%, Random Forest Classifier at 71.6%, Logistic Regression at 77.2% and Support Vector Machines (SVM) at 79%. However, the combination of SVM and Longest Word Segmentation performed better compared to other techniques and is more appropriate as part of sentimental analysis model for Thai reviews and comments.

Keywords: sentiment analysis, text mining, machine learning-based approach, online shopping, Thai word segmentation, opinion mining

บทนำ

ปัจจุบันการซื้อขายสินค้าและบริการผ่านช่องทางออนไลน์หรือ อีคอมเมิร์ซ (e-Commerce) ในประเทศไทย มีสถิติการใช้งานอินเทอร์เน็ตเพิ่มขึ้นจากยอด 9.3 ล้านคนในปี พ.ศ. 2551 เป็น 45 ล้านคนในปี พ.ศ. 2560 จากยอดจดทะเบียนโทรศัพท์มือถืออีกกว่า 124 ล้านเลขหมาย นอกจากนี้พบว่า เวลาการใช้อินเทอร์เน็ตโดยเฉลี่ยคิดเป็นเวลา 10.05 ชั่วโมง/วัน/คน ข้อมูลเหล่านี้สะท้อนให้เห็นถึงการเข้าถึงและพฤติกรรมการใช้อินเทอร์เน็ตของคนไทยซึ่งเปลี่ยนไปตามยุคของเทคโนโลยีดิจิทัลที่ได้เข้ามามี

บทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้มูลค่าอีคอมเมิร์ซในประเทศไทยมีการเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 10% ต่อปี และการซื้อขายสินค้าและบริการออนไลน์เป็น 1 ใน 5 กิจกรรมยอดนิยมที่มีการใช้งานบนอินเทอร์เน็ตมากที่สุด (Electronic Transactions Development Agency (ETDA), 2019) ซึ่งในประเทศไทยมีเว็บไซต์ที่เปิดให้บริการในการซื้อขายสินค้าออนไลน์อยู่เป็นจำนวนมาก ในการตัดสินใจซื้อสินค้าและบริการ ผู้บริโภคจำนวนมากจะทำการสืบค้นข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับตัวสินค้าและบริการ เช่น การสืบค้น

ข้อคิดเห็นต่อผลิตภัณฑ์ ข้อคิดเห็นต่อสินค้าและบริการ เป็นต้น ซึ่งเป็นช่องทางให้ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในแนวทางการตัดสินใจซื้อสินค้าและบริการ ซึ่งการแสดงความคิดเห็นดังกล่าวเป็นการแสดงถึงความรู้สึกทางอารมณ์ในรูปแบบข้อความที่มีต่อสินค้าและบริการ อีกทั้งข้อมูลการแสดงความคิดเห็นในปัจจุบันนั้นมีปริมาณมหาศาลและเกิดขึ้นใหม่อยู่ตลอดเวลา ซึ่งทำให้ผู้บริโภคต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ข้อมูลเหล่านี้เพื่อใช้ในการตัดสินใจซื้อสินค้าและบริการมากขึ้น เนื่องจากยังไม่มีตัวช่วยในการวิเคราะห์คำและข้อความจากการแสดงความคิดเห็นต่อสินค้าและบริการแบบอัตโนมัติที่ช่วยในการตัดสินใจการเลือกซื้อสินค้าและบริการได้อย่างรวดเร็ว

การวิเคราะห์ความรู้สึกต่อความคิดเห็น (Sentiment Analysis) คือ กระบวนการวิเคราะห์และประเมินความรู้สึกต่อการแสดงความคิดเห็นบนสื่อสังคมออนไลน์ (Social Network) เช่น twitter.com, facebook.com, Instagram.com หรือ pantip.com เป็นต้น โดยมีเป้าหมายเพื่อแสดงทัศนคติทางอารมณ์ที่มีต่อข้อมูล บทวิจารณ์ โพสต์ กระทู้ ที่เกี่ยวข้องกับการตลาด การประชาสัมพันธ์ การแสดงความคิดเห็นต่อผลิตภัณฑ์และบริการของลูกค้าบนโซเชียลมีเดีย (Sepandar and Jonathan, 2011) จากงานวิจัยที่ผ่านมา การวิเคราะห์ระดับความรู้สึก (Sentiment Analysis) ใช้กระบวนการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing : NLP) และการทำเหมืองข้อความ (Text Mining) เป็นส่วนใหญ่ (Trupthi et al., 2017; Anurag and Vijay, 2015) อีกทั้งยังมีการใช้เทคนิค Bag-of-Words (CBOW) และ Skip-gram Model ร่วมด้วยเพื่อสร้างคลังคำศัพท์ในการวิเคราะห์ความรู้สึกที่เป็นเชิงบวกและเชิงลบ (Fan et al., 2016; Chumwatana, 2015) ในกรณีชุดข้อมูลที่เป็นภาษาไทย จะมีข้อจำกัดคือ การแสดงความคิดเห็นที่เป็น

ภาษาไทยจะเป็นข้อความที่ไม่มีการแบ่งส่วน แบ่งคำ ประโยคติดกัน อักษรที่ไม่มีขอบเขตคำ (Chumwatana, 2015; Netisopakul and Thong-iad, 2018) อีกทั้งคำศัพท์ในภาษาไทยหนึ่งคำยังสามารถสื่อความรู้สึกได้มากกว่าหนึ่งคำ (Netisopakul and Thong-iad, 2018) และในปัจจุบันการวิจัยเรื่องดังกล่าวในภาษาไทยยังมีไม่มากนัก อีกทั้งการประมวลผลภาษาไทยยังมีความยุ่งยากกว่าภาษาอังกฤษ เพราะโครงสร้างประโยคและไวยากรณ์มีความซับซ้อนมากกว่า (Somjapo, 2019) และขาดแคลนแหล่งข้อมูลและเครื่องมือต่างๆ เช่น โปรแกรมแท็ก (Tag) ชนิดคำ เป็นต้น รวมไปถึงแนวโน้มของการเลือกใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งในปัจจุบันวิธีการเรียนรู้ด้วยเครื่อง (Machine Learning) เป็นที่นิยมมากกว่า โดยอาศัยการสร้างชุดข้อมูลฝึกฝน (Training Set) (Lorattanachaiyong, 2017) และนำชุดข้อมูลทดสอบ (Test Set) เข้ากระบวนการจัดกลุ่มหรือแยกประเภท (Classification) และการประเมินคะแนนความแม่นยำของตัวแบบที่ได้โดยสรุปจากค่าความแม่นยำจาก Precision และ Recall นอกจากนี้ การทำการวิเคราะห์ระดับความรู้สึกทางอารมณ์ส่วนใหญ่จะเป็นการตัดสินใจแบบ 2 ทิศทาง คือ แบบบวกและแบบลบ อย่างไรก็ตาม จะมีความคิดเห็นที่เป็นกลาง ซึ่งถ้าหากถูกตัดสินเพียง 2 ระดับ อาจจะทำให้ข้อคิดเห็นโดยรวมเกิดอคติได้ ดังนั้น ถ้าหากมีการวิเคราะห์เป็นแบบ 3 ระดับ คือ มีระดับกลางเพิ่มขึ้นมา จะทำให้น้ำหนักของการตัดสินใจแบบบวกและแบบลบ มีความถูกต้องมากขึ้น

จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะสร้างตัวแบบการวิเคราะห์ระดับความรู้สึกทางอารมณ์สำหรับบทความแนะนำสินค้าออนไลน์ (Sentiment Analysis Model) โดยใช้เทคนิคส่วนการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) ด้านการทำเหมืองข้อความ

(Text Mining) ร่วมกับเทคนิคการตัดคำ (Word Segmentation) 3 เทคนิค และการสร้างคลังคำศัพท์ (Bag of Words) เพื่อให้ตัวแบบสามารถแก้ไขปัญหาคำภาษาไทยและวิเคราะห์คำจากการแสดงความคิดเห็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้จะมีการใช้เทคนิคการแยกประเภท โดยมีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ 4 เทคนิค ได้แก่ K-Nearest Neighbors, Random Forest, Logistic Regression และ Support Vector Machines (SVM) ซึ่ง 4 เทคนิคดังกล่าวสามารถแยกประเภทได้อย่างแม่นยำ ทำนายผลได้สูง น่าเชื่อถือ และมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในงานดังกล่าว (Haseena and Ahmad, 2014) ในการวิเคราะห์ประโยคเนื้อหาที่เป็นภาษาไทยซึ่งสามารถแยกประเภทของระดับความรู้สึกทางอารมณ์ได้ 3 ระดับ ได้แก่ ความรู้สึกเชิงบวก (Positive) เป็นกลาง (Neutral) และเชิงลบ (Negative) เพื่อหาตัวแบบที่ดีที่สุดที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาตัวแบบการวิเคราะห์ระดับความรู้สึกทางอารมณ์สำหรับบทความแนะนำสินค้าออนไลน์ภาษาไทย โดยทั่วไปเทคนิคการตัดคำ (Word Segmentation) มักจะใช้อัลกอริทึมแบบที่แยกเป็นคำ ซึ่งไม่เหมาะกับการเขียนที่เป็นประโยคยาวต่อเนื่อง เช่น ภาษาไทย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้การตัดคำรูปแบบ Longest Engine ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่สามารถแยกคำภาษาไทยที่ยาวที่สุดและจับคู่กับการใช้พจนานุกรม (Dictionary-based) ร่วมกับการสร้างคลังคำศัพท์ (Bag of Words) เพื่อให้การตัดคำมีความเหมาะสม ได้ตัวแบบที่มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ตัวแบบยังสามารถระบุความคิดเห็นแบบเป็นกลาง (Neutral) ได้ และทำให้การตัดสินค่าความรู้สึกเชิงบวก (Positive) และเชิงลบ (Negative) มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบการทดลอง (Experimental Design) ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน โดยแต่ละขั้นตอนใช้เครื่องมือการพัฒนาโปรแกรมภาษาไพทอน (Python) ร่วมกับคูล (Module) ต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การเก็บรวบรวมและการเตรียมข้อมูล (Data Preparation Phase) รวบรวมข้อมูลจากสื่อสังคมออนไลน์แบบบล็อก โดยใช้ตัวอย่างข้อมูลบทความแนะนำสินค้าและบริการที่เป็นภาษาไทยบนเว็บไซต์ www.blognone.com จำนวน 252 บทความ 1,412 ความเห็น และจำนวน 83,670 คำ ช่วงเวลาที่เก็บข้อมูล เดือนมกราคม พ.ศ. 2562 ถึง เดือนเมษายน พ.ศ. 2562 เนื่องจากเว็บไซต์ดังกล่าวเป็นเว็บไซต์ที่มีผู้เข้าชมเป็นจำนวนมาก มีข้อมูลและบทความแนะนำสินค้าทางด้านเทคโนโลยีที่หลากหลาย มีข้อมูลและบทความใหม่อยู่ตลอดเวลา และสามารถแสดงความคิดเห็นภายในบทความได้ ต่อมาในขั้นตอนการดึงข้อมูลการแสดงความคิดเห็นจะใช้เทคนิค Web Scraping สามารถแสดงขั้นตอนการทำงานได้ดังภาพที่ 1 จากนั้นนำชุดข้อมูลเข้าสู่กระบวนการทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleaning) โดยใช้ Regular Expression เพื่อแก้ไข ปรับแต่ง และตัดส่วนที่ไม่ต้องการออกจากชุดข้อมูล เช่น HTML Tag, URL หรือเครื่องหมายคำพูด (Punctuation) เป็นต้น เพื่อให้ข้อมูลมีคุณภาพ มีความถูกต้องเหมาะสมที่จะนำไปใช้วิเคราะห์และสร้างตัวแบบสำหรับการเรียนรู้ด้วยเครื่องจักร (Machine Learning) ต่อไป



ภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนการดึงข้อมูลจากเว็บเพจ

จากภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนการดึงข้อมูลการ แสดงความคิดเห็นจากเว็บเพจ (Web Scraping) โดยใช้ภาษา ไพทอน (Python) และ ไลบรารี (Libraries) BeautifulSoup มี 3 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ทำการ หา Webpage ตามที่ต้องการ โดยคัดเลือกเว็บเพจที่มีการแสดงความคิดเห็น 3 รายการขึ้นไป ขั้นตอนที่ 2 กำหนด URL และ Class เพื่อดึงข้อมูลการ แสดงความคิดเห็น และในขั้นตอนที่ 3 เมื่อได้ข้อมูลแล้ว จะทำการบันทึกข้อมูลเก็บในรูปแบบ CSV File เพื่อนำข้อมูลไปทำตามสะดวกในขั้นตอนต่อไป

2) การประมวลผลข้อความ (Text File Processing Phase) ทำการประมวลผลข้อความจากชุดข้อมูลที่เตรียมไว้สำหรับฝึกฝนข้อมูล (Training Set) ให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปวิเคราะห์ประเภทของระดับความรู้สึก กระบวนการสร้าง Sentiment Analysis จะมีการนำข้อความมาแบ่งคำ แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่าง "คำ" และ "เอกสาร" ที่มีอยู่ในรูปแบบของเวกเตอร์ (Vector) ซึ่งจะต้องใช้คลังข้อมูลความรู้สึกดี (Positive) และความรู้สึกที่ไม่ดี (Negative) และเป็นกลาง (Neutral) ในภาษาไทย โดยใช้ Library จาก PyThaiNLP (Python library for Thai Natural Language Processing : PyThaiNLP) เพื่อวิเคราะห์ระดับความรู้สึก 3 ระดับได้แก่ ความรู้สึกเชิงบวก เป็นกลาง และเชิงลบ โดยนำเข้ากระบวนการตัดคำ (Word Segmentation) โดยใช้ 3 อัลกอริทึมโดยมีคุณสมบัติดังนี้

1) NewMM Engine ซึ่งเป็นอัลกอริทึมจาก PyThaiNLP พัฒนาจากเทคนิคการแบ่งส่วนคำศัพท์ภาษาไทยด้วยพจนานุกรม (Dictionary-based) โดยใช้อัลกอริทึมการจับคู่สูงสุดและการจัดกลุ่ม (Cluster) อักษรภาษาไทย (TCC) ถูกพัฒนาขึ้นโดย Korakot Chaovavanich ในปี 2018 (PyThaiNLP, 2018)

2) Longest Engine ซึ่งเป็นอัลกอริทึมพัฒนาจากเทคนิคการแยกคำภาษาไทยที่ยาวที่สุดที่จับคู่กับพจนานุกรม (Dictionary-based) ถูกพัฒนาขึ้นโดย Patorn Utenpattanun ในปี 2018 (PyThaiNLP, 2018)

3) AttaCut Engine ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่สามารถตัดคำภาษาไทยได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยใช้ อัลกอริทึมการจัดกลุ่ม (Clustering) อักษรภาษาไทย (Rules purposed) ถูกพัฒนาขึ้นโดย Pattarawat Chormai ในปี 2019 (Chormai *et al.*, 2019)

ในการเลือกใช้การตัดคำ (Word Segmentation) ทั้ง 3 แบบที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปวิเคราะห์การแยกประเภทเพื่อให้สามารถวิเคราะห์คำที่เป็นภาษาไทยได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลทดสอบที่จะนำไปใช้ในการสร้างตัวแบบให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นอีกด้วย ในขั้นตอนต่อไปจะนำเข้ากระบวนการสร้างคลังคำศัพท์ (Bag of Words) ซึ่งเป็นโมเดลที่ใช้ในงานจัดแบ่งประเภทข้อความ (Text Classification) กลุ่มของคำจะถูกอธิบายด้วยคลังคำศัพท์หรือการกลุ่มรวมของคำ โดยไม่ได้

คำนึงถึงหลักไวยากรณ์ ความถี่ที่พบ และลำดับของคำ ซึ่งหากมีคำเกิดขึ้นในข้อความที่นำมาวิเคราะห์จะแทนค่าด้วย 1 แต่ถ้าในข้อความไม่มีคำที่กำหนดไว้จะแทนค่าด้วย 0 โดยนำมาใช้เป็นคุณสมบัติ (Feature) ในการฝึกอบรม (Training) ตัวจัดแบ่งข้อความ (Classifier) จากนั้นทำการประมวลผลให้แต่ละข้อมูลติดป้ายกำกับ

(Label) ระดับของอารมณ์ 3 ระดับ และแปลงชุดข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบไฟล์ CSV เพื่อนำไปใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับฝึกอบรมแบบมีผู้สอน (Supervised Learning) ต่อไป ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถแสดงในตารางที่ 1 ได้ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงผลการติดป้ายกำกับ (Label) ระดับของอารมณ์ 3 ระดับ

ระดับความรู้สึก/อารมณ์	เปอร์เซ็นต์
เชิงบวก (Positive)	20%
เป็นกลาง (Neutral)	44%
เชิงลบ (Negative)	36%

จากตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์ระดับความรู้สึกจากการประมวลผลข้อความและการติดป้ายกำกับ (Label) ระดับของอารมณ์ 3 ระดับจากชุดข้อมูลฝึกฝน (Training Set) เมื่อพิจารณาจากจำนวนข้อมูลพบว่า กลุ่มข้อมูลความรู้สึกเป็นกลาง (Neutral)

มีจำนวนข้อมูลมากที่สุด 44% กลุ่มข้อมูลความรู้สึกเชิงลบ (Negative) 36% และกลุ่มข้อมูลความรู้สึกเชิงบวก (Positive) 20% ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างการแสดงความเห็นแยกตามระดับความรู้สึกจากชุดข้อมูล 3 ระดับ ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การแสดงความเห็นแยกตามระดับความรู้สึก

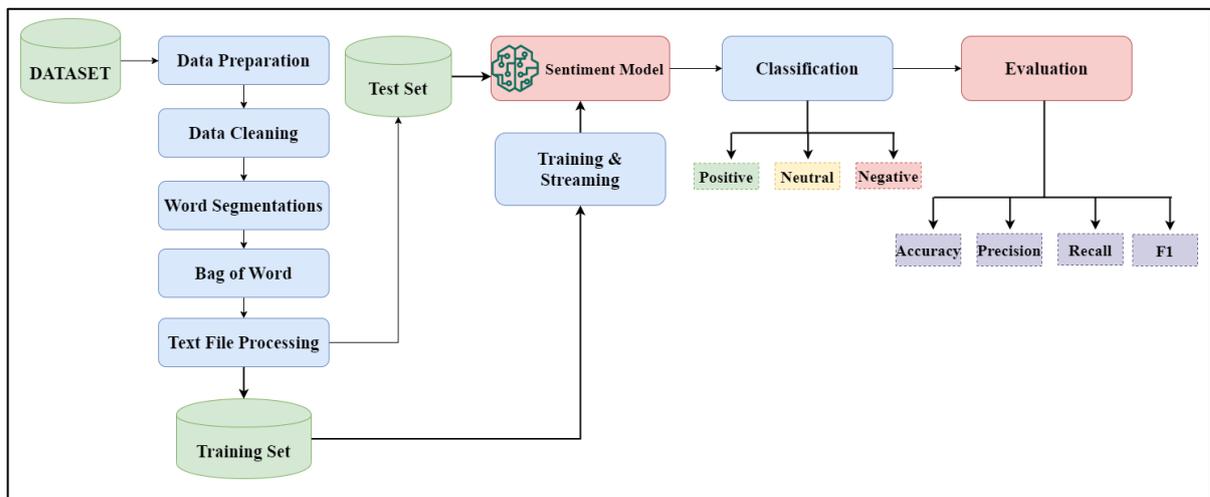
การแสดงความเห็น	ระดับความรู้สึก
มาราคานี้ คุน่าจะขึ้นมาเลย	เชิงบวก
ดีใจนั้ันมากๆ	เป็นกลาง
แบตไม่ถึงวัน กล้องไม่มีกันสน	เชิงลบ

3) ขั้นตอนการฝึกอบรมข้อมูล (Training & Streaming Phase) ในขั้นตอนการสร้างตัวแบบสำหรับการเรียนรู้ (Supervised Learning) ใช้คุณสมบัติจากชุดข้อมูล (Feature) ทั้งหมด 3 คอลัมน์ เพื่อใช้ในการฝึกฝน (Training) และทดสอบ (Testing) ได้แก่ title tokens, title length, label และแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ชุด (Split Test) คือ ชุดข้อมูลฝึกฝน (Training Set) 80% ในการสร้างตัวแบบการฝึกอบรมข้อมูล จากนั้นทำการนำชุดข้อมูลทดสอบ (Testing Set) 20% เข้า

กระบวนการเพื่อวิเคราะห์ระดับความรู้สึกที่มีต่อการแสดงความเห็นต่อสินค้าและบริการที่เป็นภาษาไทย ซึ่งกระบวนการทดสอบกับชุดข้อมูลจะใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) เป็นการเรียนรู้โดยอาศัยข้อมูลที่ป้อนเข้าไปเก็บไว้เป็นตัวอย่างเพื่อให้คอมพิวเตอร์ใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลใหม่ที่เข้ามาแล้วทำนายหรือจัดหมวดหมู่ที่มีความใกล้เคียงกันมากที่สุดให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน

4) ขั้นตอนการแยกประเภท (Classification Phase) คือกระบวนการสกัดความคิดเห็นจากการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) แบบมีผู้สอน (Supervise Learning) โดยทดสอบกับชุดข้อมูล (Testing Set) 20% นำเข้ากระบวนการทำนายผล (Prediction) และแยกผลการวิเคราะห์ระดับความรู้สึก (Sentiment Analysis) โดยใช้เทคนิคการแยกประเภทผลการวิเคราะห์ 4 เทคนิค ได้แก่ K-Nearest Neighbors,

Random Forest, Logistic Regression และ Support Vector Machines ในกระบวนการสร้างตัวแบบการวิเคราะห์ความรู้สึกทางอารมณ์สำหรับบทความแนะนำสินค้าออนไลน์ภาษาไทย โดยใช้เทคนิคส่วนการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ด้านการทำเหมืองข้อความ (Text Mining) ร่วมกับเทคนิคการตัดคำ (Word Segmentation) และการสร้างคลังคำศัพท์ (Bag of words) สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างตัวแบบ

จากภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างตัวแบบสำหรับวิเคราะห์ระดับอารมณ์ความรู้สึก โดยเริ่มจากการจัดเตรียมข้อมูลให้พร้อมใช้งาน ตั้งแต่กระบวนการทำความสะอาดข้อมูล การตัดคำ การสร้างคลังคำศัพท์ การจัดชุดข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ text file และแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดข้อมูลฝึกฝน (Training Set) 80% และข้อมูลทดสอบ (Testing Set) 20% จากนั้นนำชุดข้อมูลฝึกฝนเข้ากระบวนการฝึกอบรมข้อมูล ขั้นตอนต่อมาคือการนำชุดข้อมูลสำหรับทดสอบเข้ากระบวนการทำนายและแยกประเภท (Classification) ของความรู้สึกอารมณ์ 3

ระดับ ได้แก่ ความรู้สึกเชิงบวก (Positive) เป็นกลาง (Neutral) และเชิงลบ (Negative)

5) การประเมินตัวแบบ (Model Evaluation Phase) เมื่อผ่านขั้นตอนการแยกประเภท (Classification Phase) เรียบร้อยแล้ว จะนำผลการทำนายเข้ากระบวนการประเมินตัวแบบเพื่อวัดความแม่นยำของตัวแบบโดยพิจารณาจาก ความแม่นยำ (Accuracy) ดังสมการที่ 1 ความถูกต้อง (Precision) ดังสมการที่ 2 ค่าความระลึก (Recall) ดังสมการที่ 3 และค่าเฉลี่ย (F1 Score) ของ Precision และ Recall ดังสมการที่ 4 (Limkonchotiwat, 2018; Promla and Sanrach, 2020)

$$Accuracy = \frac{TN + TP}{TP + FP + TP + FN} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

โดยที่

TP คือ ข้อมูลที่ทำนายถูกต้องเมื่อเทียบกับเฉลย

FP คือ ข้อมูลที่อยู่ในเฉลยแต่ไม่มีการทำนาย
(ตรงข้ามกับ FN)

FN คือ ข้อมูลที่ทำนายแล้วไม่ถูกต้องเมื่อเทียบกับเฉลย

Precision คือ ค่าความแม่นยำ เกิดจากการนำค่า

TP มาเทียบกับ FP

Recall คือ ความถูกต้อง เกิดจากการนำค่า TP

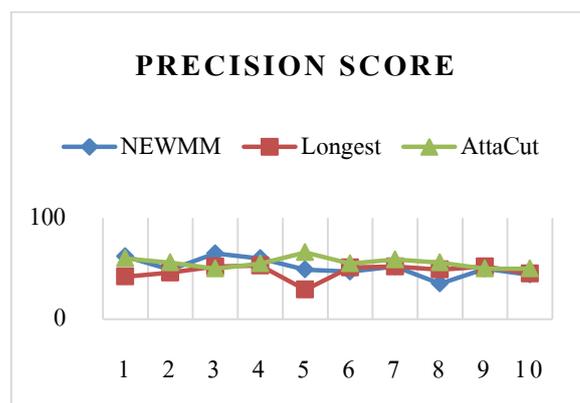
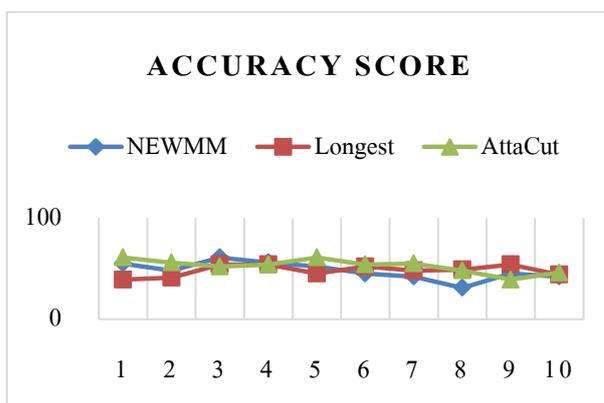
มาเทียบกับ FN

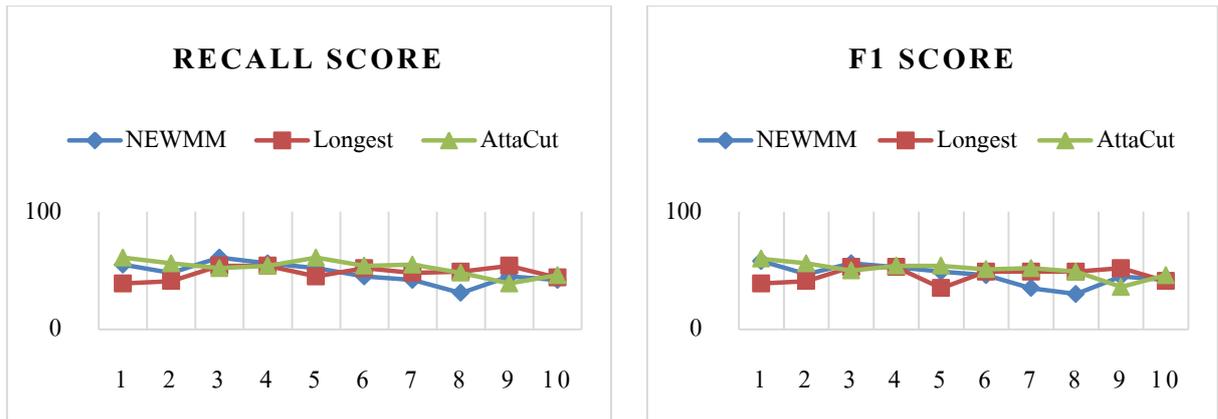
F1 Score คือ ค่าเฉลี่ยของ Precision และ Recall

$$F_1 = 2 * \left(\frac{Precision * Recall}{Precision + Recall} \right) \quad (4)$$

ในลำดับถัดมาจะแสดงผลคะแนนการประเมินตัวแบบ โดยเปรียบเทียบคะแนนความแม่นยำ (Accuracy) ความถูกต้อง (Precision) ค่าความระลึก (Recall) และค่าเฉลี่ย (F1 Score) จากการตัดคำ

ภาษาไทย (Word Segmentation) ทั้ง 3 รูปแบบที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน สามารถแสดงดังภาพที่ 3 ถึงภาพที่ 6 ดังนี้

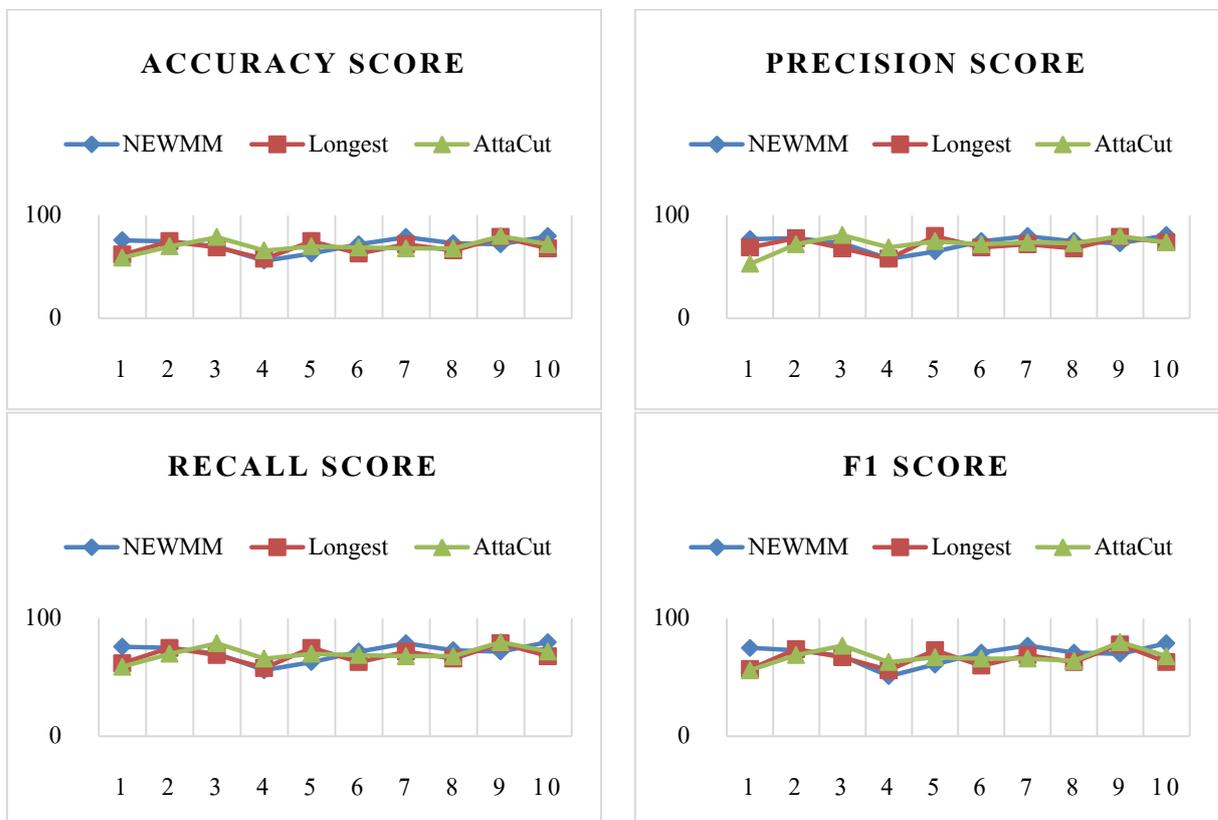




ภาพที่ 3 แสดงผลการประเมินความแม่นยำของตัวแบบ โดยใช้เทคนิคการแยกประเภทแบบ K-Nearest Neighbors

จากภาพที่ 3 แสดงผลจากการประเมินความแม่นยำของตัวแบบ โดยใช้เทคนิคการตัดคำ (Word Segmentation) 3 รูปแบบ ร่วมกับเทคนิคกระบวนการสร้างคลังคำศัพท์ (Bag of Words) และการแยกประเภทแบบ K-Nearest Neighbors Classifier ทำการประมวลผลการประเมินตัวแบบแยกตามเทคนิคการตัดคำ 3 เทคนิค เทคนิคละ 10 รอบ ทั้งนี้

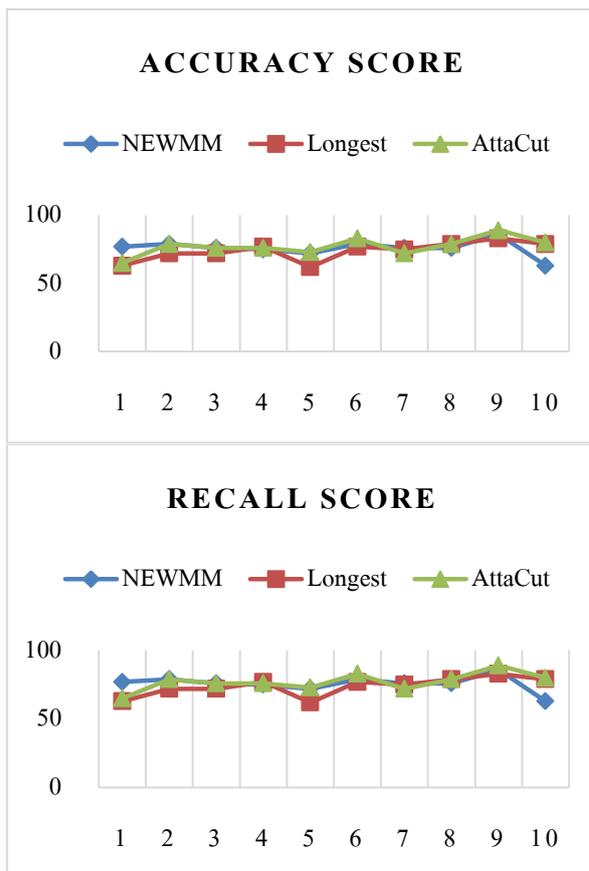
เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นและลดอคติในการประมวลผล เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยคะแนนความแม่นยำสรุปได้คือ การใช้เทคนิคการตัดคำแบบ AttaCut ให้ความแม่นยำในการทำนายผลมากที่สุด คือ คะแนนความแม่นยำ (Precision) 55.7% คะแนนความถูกต้อง (Recall) 52.6% และค่าเฉลี่ย (F1 Score) 50.๓% ตัวแบบมีความแม่นยำในการทำนายผล (Accuracy) 52.6%



ภาพที่ 4 แสดงผลการประเมินความแม่นยำของตัวแบบ โดยใช้เทคนิคการแยกประเภทแบบ Random Forest

จากภาพที่ 4 แสดงผลจากการประเมินความแม่นยำของตัวแบบ โดยใช้เทคนิคการตัดคำ (Word Segmentation) 3 รูปแบบ ร่วมกับเทคนิคกระบวนการสร้างคลังคำศัพท์ (Bag of Words) และการแยกประเภทแบบ Random Forest Classifier ทำการประมวลผลการประเมินตัวแบบแยกตามเทคนิคการตัดคำ 3 เทคนิค เทคนิคละ 10 รอบ ทั้งนี้เพื่อเพิ่ม

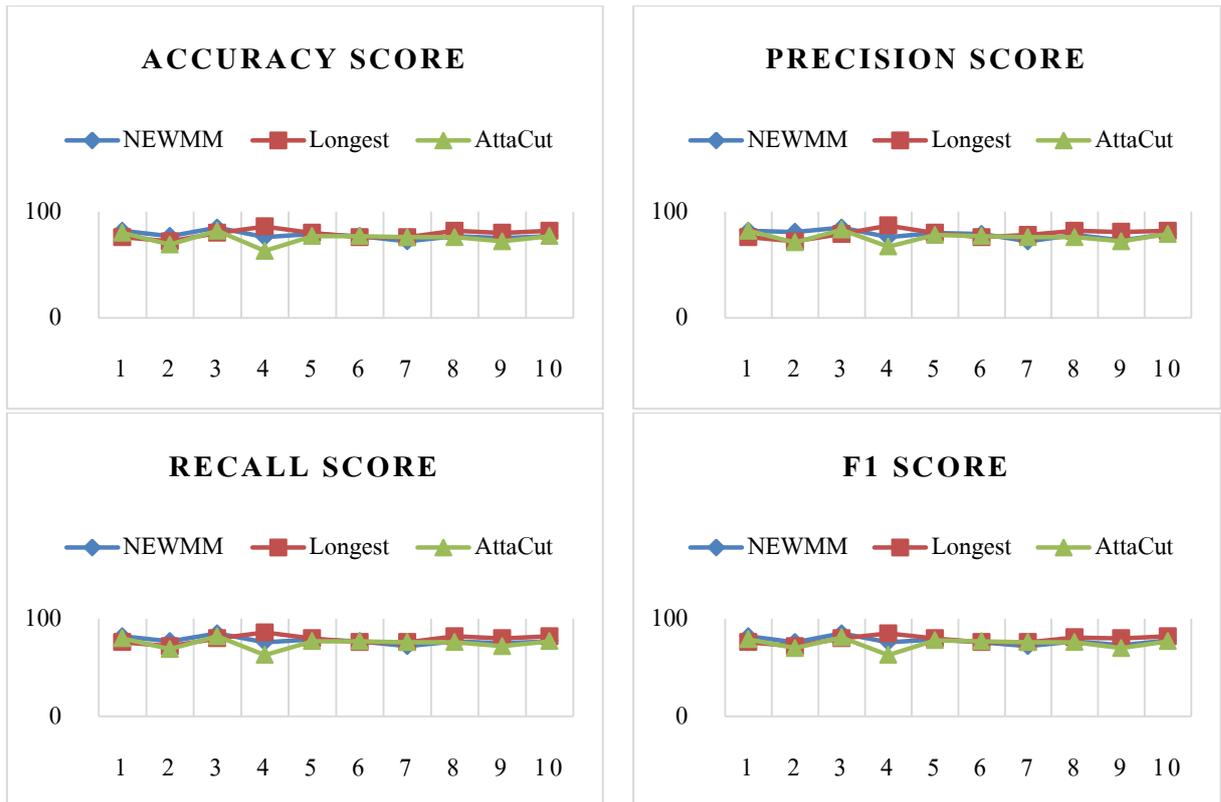
ความเชื่อมั่นและลดอคติในการประมวลผล เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยคะแนนความแม่นยำสรุปได้คือ การใช้เทคนิคการตัดคำแบบ NewMM ให้ความแม่นยำในการทำนายผลมากที่สุด คือ คะแนนความแม่นยำ (Precision) 73.5% คะแนนความถูกต้อง (Recall) 71.6% และค่าเฉลี่ย (F1 Score) 69.6% ตัวแบบมีความแม่นยำในการทำนายผล (Accuracy) 71.6%



ภาพที่ 5 แสดงผลการประเมินความแม่นยำของตัวแบบ โดยใช้เทคนิคการแยกประเภทแบบ Logistic Regression

จากภาพที่ 5 แสดงผลจากการประเมินความแม่นยำของตัวแบบ โดยใช้เทคนิคการตัดคำ (Word Segmentation) 3 รูปแบบ ร่วมกับเทคนิคกระบวนการสร้างคลังคำศัพท์ (Bag of Words) และการแยกประเภทแบบ Logistic Regression Classifier ทำการประมวลผลการประเมินตัวแบบแยกตามเทคนิคการตัดคำ 3 เทคนิค เทคนิคละ 10 รอบ ทั้งนี้

เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นและลดอคติในการประมวลผล เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยคะแนนความแม่นยำสรุปได้คือ การใช้เทคนิคการตัดคำแบบ AttaCut ให้ความแม่นยำในการทำนายผลมากที่สุด คือ คะแนนความแม่นยำ (Precision) 78.4% คะแนนความถูกต้อง (Recall) 77.2% และค่าเฉลี่ย (F1 Score) 76.2% ตัวแบบมีความแม่นยำในการทำนายผล (Accuracy) 77.2%



ภาพที่ 6 แสดงผลการประเมินความแม่นยำของตัวแบบ โดยใช้เทคนิคการแยกประเภทแบบ SVM

จากภาพที่ 6 แสดงผลจากการประเมินความแม่นยำของตัวแบบ โดยใช้เทคนิคการตัดคำ (Word Segmentation) 3 รูปแบบ ร่วมกับเทคนิคกระบวนการสร้างคลังคำศัพท์ (Bag of Words) และการแยกประเภทแบบ Support Vector Machines (SVM) Classifier ทำการประมวลผลการประเมินตัวแบบแยกตามเทคนิคการตัดคำ 3 เทคนิค เทคนิคละ 10 รอบ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นและลดอคติในการประมวลผล เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยคะแนนความแม่นยำสรุปได้คือ การใช้เทคนิคการตัดคำแบบ Longest ให้ความแม่นยำในการทำนายผลมากที่สุด คือ คะแนนความแม่นยำ (Precision) 79.3% คะแนนความถูกต้อง (Recall) 79% และค่าเฉลี่ย (F1 Score) 78.8% ตัวแบบมีความแม่นยำในการทำนายผล (Accuracy) 79%

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากการทดลองสร้างตัวแบบการวิเคราะห์ความรู้สึกทางอารมณ์สำหรับบทความแนะนำสินค้าออนไลน์ โดยใช้ตัวอย่างข้อมูลบทความแนะนำสินค้าและบริการจากเว็บไซต์ www.blognone.com จำนวน 252 บทความ การแสดงความคิดเห็นจำนวน 1,412 ความเห็น จำนวนคำ 83,670 คำ เพื่อสร้างตัวแบบสำหรับการวิเคราะห์ระดับความรู้สึกต่อการแสดงความคิดเห็นต่อสินค้าและบริการออนไลน์ที่เป็นภาษาไทย โดยใช้เทคนิคส่วนการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ด้านการทำเหมืองข้อความ (Text Mining) ร่วมกับเทคนิคการตัดคำ (Word Segmentation) 3 รูปแบบ ได้แก่ NewMM , Longest และ AttaCut และการสร้างคลังคำศัพท์ (Bag of words) จากนั้น

นำเข้ากระบวนการแยกประเภทผลการวิเคราะห์ 4 เทคนิค ได้แก่ K-Nearest Neighbors, Random Forest, Logistic Regression และ Support Vector Machines (SVM) และนำมาเข้ากระบวนการทดลอง 5 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การเก็บรวบรวมและการเตรียมข้อมูล (Data Preparation Phase) 2) การประมวลผลข้อความ (Text File Processing Phase) 3) การฝึกอบรมข้อมูล (Training & Streaming Phase) 4) การแยกประเภท (Classification Phase) และ 5) การประเมินตัวแบบ (Model Evaluation Phase) จากการสร้างตัวแบบสามารถแยกประเภทระดับความรู้สึกทางอารมณ์ออกเป็น 3 ระดับคือ ความรู้สึกเชิงบวก (Positive) เป็นกลาง (Neutral) และเชิงลบ (Negative) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (Anurag and Vijauy, 2015) ได้ศึกษาแนวทางในการวิเคราะห์ความรู้สึกของผู้ใช้โดยใช้ตัวจำแนกการ

ทำเหมืองข้อมูล และการศึกษาของ (Trupthi *et al.*, 2017) ได้ศึกษาวิธีการวิเคราะห์ความรู้สึกโดยการสกัดความคิดเห็นบนทวิตเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวจำแนกประเภท (Classification) สำหรับการวิเคราะห์ความรู้สึก เพื่อวิเคราะห์ความรู้สึกเชิงบวก ความรู้สึกเป็นกลาง และความรู้สึกเชิงลบ พบว่า ถ้ามีการวิเคราะห์ระดับความรู้สึกออกเป็นแบบ 3 ระดับทำให้น้ำหนักของการตัดสินใจระดับของอารมณ์มีความถูกต้องมากขึ้นยิ่งขึ้น ในขั้นตอนการประเมินตัวแบบทำการประเมินแยกตามเทคนิคการตัดคำ 3 เทคนิค และเทคนิคการแยกประเภทผลการวิเคราะห์ 4 เทคนิค โดยเฉลี่ยผลการทำงานเทคนิคทั้งหมดของแต่ละเทคนิค สามารถสรุปผลการประเมินความแม่นยำของตัวแบบได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลการประเมินความแม่นยำของตัวแบบ

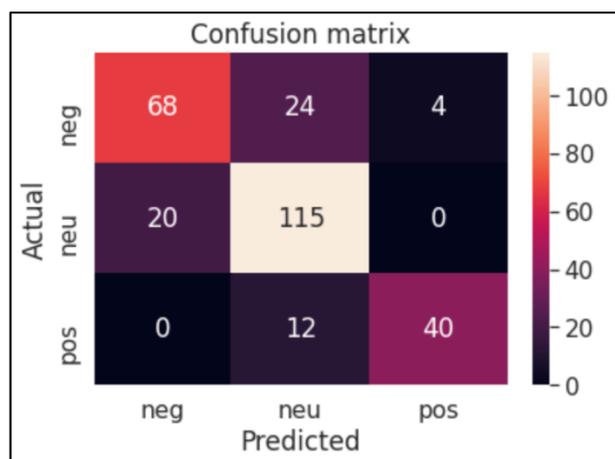
Classifier Model	Word Segmentation Engine											
	NewMM				Longest				AttaCut			
	accuracy	precision	recall	f1	accuracy	precision	recall	f1	accuracy	precision	recall	f1
k-nearest neighbors	47.7	51.3	47.7	46.1	48	47.1	48	46.1	52.6	55.7	52.6	50.8
Random Forest	71.6	73.5	71.6	69.6	68.7	71.5	68.7	66	70.1	72.3	70.1	67.6
Logistic Regression	75.9	76	75.9	74.8	73.9	75.2	73.9	72.6	77.2	78.4	77.2	76.2
SVM	77.7	78.5	77.7	77.4	79	79.3	79	78.8	74.9	76.1	74.9	74.7

จากตารางที่ 3 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- 1) การใช้เทคนิคการแยกประเภทแบบ K-Nearest Neighbors ร่วมกับเทคนิคการตัดคำแบบ AttaCut ให้คะแนนความแม่นยำมากที่สุด คือ 52.6%
- 2) การใช้เทคนิคการแยกประเภทแบบ Random Forest ร่วมกับเทคนิคการตัดคำแบบ NewMM ให้คะแนนความแม่นยำมากที่สุด คือ 71.6%

- 3) การใช้เทคนิคการแยกประเภทแบบ Logistic Regression ร่วมกับเทคนิคการตัดคำแบบ AttaCut ให้คะแนนความแม่นยำมากที่สุด คือ 77.2%

- 4) การใช้เทคนิคการแยกประเภทแบบ Support Vector Machines (SVM) ร่วมกับเทคนิคการตัดคำแบบ Longest ให้คะแนนความแม่นยำมากที่สุด คือ 79%



ภาพที่ 7 แสดงตาราง Confusion Matrix การประเมินผลลัพธ์การทำนายตัวแบบ

จากภาพที่ 7 เมื่อพิจารณาจากคะแนนทั้งหมดสรุปได้คือ การใช้เทคนิคการตัดคำ (Word Segmentation) แบบ Longest ซึ่งเหมาะกับการใช้ตัดคำที่ยาวที่สุด ร่วมกับการใช้เทคนิคการสร้างคลังคำศัพท์ (Bag of Words) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (Chumwatana, 2015) ได้ศึกษาการวิเคราะห์อารมณ์ความคิดเห็น ทศนคติของผู้คน และความรู้สึกต่อการแสดงความคิดเห็นในเชิงบวกหรือเชิงลบจากลูกค้าชาวไทย พบว่า การแสดงความคิดเห็นที่เป็นภาษาไทยเป็นข้อความที่ไม่มีการแบ่งส่วน ประโยคติดกัน อักขระที่ไม่มีขอบเขตคำ เมื่อมีการใช้เทคนิค (Bag of Words) เพื่อสร้างคลังคำศัพท์ร่วมกับการใช้เทคนิคการสกัดคำ (Word Segmentation) เพื่อสร้างตัวแบบทำให้สามารถวิเคราะห์ระดับความรู้สึกทางอารมณ์มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และเทคนิคการแยกประเภทแบบ Support Vector Machines (SVM) ให้คะแนนความแม่นยำในการทำนายผลการวิเคราะห์ระดับความรู้สึกทางอารมณ์มากที่สุด (Accuracy) คือ 79% ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ (Haseena and Ahmad, 2014) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบเทคนิคการวิเคราะห์ระดับความรู้สึก พบว่า การจำแนกความรู้สึกโดยใช้เทคนิค Support Vector Machines (SVM) ให้ความแม่นยำสูงกว่าอัลกอริทึมการแยก

ประเภทแบบอื่นเมื่อใช้งานร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) อย่างไรก็ตามในการสร้างตัวแบบการวิเคราะห์ความรู้สึกทางอารมณ์สำหรับบทความแนะนำสินค้าออนไลน์สำหรับบทความภาษาไทย โดยใช้เทคนิคการตัดคำ (Word Segmentation) แบบ Longest Engine ร่วมกับการสร้างคลังคำศัพท์ (Bag of Words) และเทคนิคการแยกประเภทแบบ Support Vector Machines (SVM) เหมาะสมที่สุด

สรุป

ข้อมูลในการเลือกซื้อสินค้าออนไลน์มีความหลากหลาย ซึ่งผู้ใช้อาจจะมีการอ้างอิงจากข้อคิดเห็นที่เกิดขึ้นในความคิดเห็นของสินค้าอื่นๆ แต่ถ้าหากผู้ใช้ต้องอ่านและตีความความคิดเห็นต่างๆ ที่มีจำนวนข้อมูลเป็นจำนวนมาก ถ้าหากมีกลไกช่วยเหลือผู้ใช้ในการสรุปความคิดเห็นที่มีอยู่ในตัวสินค้าและบริการได้ จะช่วยประหยัดเวลาและทำให้ผู้ใช้ได้ข้อมูลที่รวดเร็วขึ้นและนำไปใช้ตัดสินใจได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างตัวแบบสำหรับวิเคราะห์ระดับความรู้สึกทางอารมณ์สำหรับบทความแนะนำสินค้าออนไลน์ภาษาไทย โดยใช้เทคนิคส่วนการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine

Learning) เพื่อคัดลอกความคิดเห็นรวมต่อสินค้าและบริการ โดยนำเทคนิคเหมืองข้อความ (Text Mining) ร่วมกับเทคนิคการตัดคำ (Word Segmentation) ร่วมกับการสร้างคลังคำศัพท์ (Bag of Words) โดยมีการวิเคราะห์ถึงรูปแบบและเทคนิคที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับความเห็นที่เป็นภาษาไทย และเป็นรูปแบบประโยคยาว และมีคลังคำศัพท์ เพื่อช่วยกรองและแบ่งประเภทคำที่เป็นเชิงบวกและเชิงลบ รวมถึงคำกริยา คำนามต่างๆ ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการตัดคำที่ดีขึ้น ซึ่งผลลัพธ์โดยรวมจะเห็นได้ว่า การใช้เทคนิคที่นำเสนอจะได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเทคนิคที่ใช้โดยทั่วไป ขั้นตอนการทดลองสำหรับการทดสอบตัวแบบ มีการเปรียบเทียบเทคนิคการแยกประเภท 4 เทคนิค ได้แก่ K-Nearest Neighbors, Random Forest, Logistic Regression และ Support Vector Machines ซึ่งมีกระบวนการสร้างตัวแบบ 5 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การเก็บรวบรวมและการเตรียมข้อมูล (Data Preparation Phase) 2) การประมวลผลข้อความ (Text File Processing Phase) 3) การฝึกอบรมข้อมูล (Training & Streaming Phase) 4) การแยกประเภท (Classification Phase) และ 5) การประเมินตัวแบบ (Model Evaluation Phase) เพื่อสร้างตัวแบบในการแยกประเภทระดับความรู้สึกแบบอัตโนมัติออกเป็น 3 ระดับคือ ความรู้สึกเชิงบวก (Positive) เป็นกลาง (Neutral) และเชิงลบ (Negative) จากการทดลองสร้างตัวแบบ การใช้เทคนิคการตัดคำ (Word Segmentation) แบบ Longest ร่วมกับการสร้างคลังคำศัพท์ (Bag of Words) และเทคนิคการแยกประเภทแบบ Support Vector Machines จะให้ความแม่นยำในการทำนายผลมากที่สุด ที่ระดับความแม่นยำ 79% ซึ่งสูงกว่าเทคนิคอื่นที่เปรียบเทียบ โดยมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานร่วมกับภาษาไทยที่เป็นคำที่ยาวที่สุด ในการพัฒนาตัวแบบงานวิจัยนี้เพื่อนำตัวแบบที่ได้ไปช่วยผู้บริโภคให้สามารถตัดสินใจในการ

ซื้อสินค้าและบริการได้อย่างรวดเร็ว และช่วยให้ผู้ประกอบการมีข้อมูลที่จะช่วยในการตัดสินใจปรับปรุงพัฒนาสินค้าและบริการเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคในอนาคตได้อย่างถูกต้อง และตรงกับความต้องการของผู้บริโภคมากที่สุด

ข้อจำกัดของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ได้แก่

1) ตัวแบบยังไม่สามารถวิเคราะห์คำประชดประชัน (Sarcasm) ได้เนื่องจากชุดข้อมูลที่นำมาใช้ยังไม่มีคำประเภทดังกล่าว ซึ่งต้องอาศัยตัวแบบในการเรียนรู้แยกต่างหากและอาศัยเหมืองข้อความ (Text mining) แบบใช้กฎ (Rule-based) เข้ามาช่วย 2) ตัวแบบสามารถวิเคราะห์ได้เฉพาะการแสดงความคิดเห็นที่เกี่ยวกับการซื้อสินค้าและบริการออนไลน์เท่านั้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วรภัทร ไพริเกรง ที่ช่วยให้คำปรึกษาในงานวิจัย และขอขอบพระคุณอาจารย์ ผศ.ดร.อรรถพล ชำรงรัตนฤทธิ์ ที่ช่วยให้คำแนะนำการประเมินผลตัวแบบในการวิจัย รวมถึงผู้เชี่ยวชาญในการระบุและนิยามข้อมูลในแต่ละชุด

เอกสารอ้างอิง

- Anurag, P.J. and Vijay, D.K. 2015. Sentiments Analysis of Twitter Data Using Data Mining, pp. 807-810. *In 2015 International conference on Information Processing (ICIP) Vishwakarma Institute of Technology. Pune, India.*
- Chormai, P., Prasertsom, P. and Rutherford, A. 2019. *AttaCut: A Fast and Accurate Neural Thai Word Segmenter.* Available Source: <https://pythainlp.github.io/attacut/>, June 20, 2020.

- Chumwatana, T. 2015. Using Sentiment Analysis Technique for Analyzing Thai Customer Satisfaction from Social media, pp. 659-664. *In Proceedings of the 5th International Conference on Computing and Informatics (ICOICI) 2015*. Istanbul, Turkey.
- Electronic Transactions Development Agency (ETDA). 2019. **mSMEs Scoring Report**. Available Source: <https://www.etcha.or.th/publishing-detail/msmes-scoring-report.html>, September 26, 2019. (in Thai)
- Fan, X., Li, X., Du, F., Li, X. and Wei, M. 2016. Apply Word Vectors for Sentiment Analysis of APP Reviews, pp. 1062-1066. *In The 2016 3rd International Conference on Systems and Information (ICSAI 2016) IEEE*. Shanghai, China.
- Haseena, R.P. and Ahmad, T. 2014. Sentiment Analysis Techniques - A Comparative Study. *IJCEM International Journal of Computational Engineering & Management* 17(4): 25-29.
- Limkonchotiwat, P. 2018. **How important is the Evaluate Model?: Machine Learning 101**. Available Source: <https://medium.com/mmp-li/evaluate-model-precision-recall-f1-score-machine-learning-101-89dbbada0c96>, January 20, 2020. (in Thai)
- Lorattanachaiyong, I. 2017. Generating Thai Sentiment Lexicon from Online Reviews. A Thesis for the Degree of Master Thesis of Arts, Chulalongkorn University. (in Thai)
- Netisopakul, N. and Thong-iad, K. 2018. Thai Sentiment Resource Using Thai WordNet, pp. 329-340. *In Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems*. Springer, Cham.
- Promla, P. and Sanrach, C. 2020. The Comparison of Efficiency on The Analysis of Satisfaction on Teaching Performance using Sentiment Analysis by Ensemble Technique. *KU Research Journal (Graduate Studies)* 4(20): 104-149. (in Thai)
- PyThaiNLP. 2018. **PyThaiNLP Tutorials**. Available Source: <http://www.thainlp.org/pythainlp/tutorials/>, June 20, 2020
- Sepandar, D.K. and Jonathan, H. 2011. We feel fine and searching the emotional web, pp. 117-126. *In Proceedings of the fourth ACM international conference on Web search and data mining (WSDM '11)*. Association for Computing Machinery, New York, USA.
- Sornjapo, N. 2019. Thai Text Automatic Clustering Model Using Machine Learning by Unsupervised Learning with Natural Language Processing. *Sripatum Chonburi Journal* 14(4): 95-106. (in Thai)
- Trupthi, M., Pabboju, S. and Narasimha, G. 2017. Sentiment Analysis on Twitter Using Streaming API, pp. 915-919. *In 2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC)*. Hyderabad, India.

คุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลาช่อนในช่วงเก็บเกี่ยวและเทคนิคการบำบัดน้ำเสีย โดยวิธีการถ่ายน้ำและการตกตะกอนในบ่อเลี้ยง

Water Quality during *Channa striatus* Fish Harvesting and Wastewater Treatment by Draining and Settling in Cultured Pond Technique

ศุภาวดี โกยคุลย์¹ เจษฎา อีสหะ^{1*} วร่าห์ เทพาหุดี² และ ประไพพรรณ สิทธิกุล³
Supavadee Koydon¹, Jesada Is-haak^{1*}, Wara Taparhudee² and Prapaiphun Sittigool³

Received: 23 October 2020, Revised: 13 February 2021, Accepted: 3 August 2021

บทคัดย่อ

น้ำทิ้งที่ระบายออกจากบ่อเลี้ยงปลาช่อนแบบหนาแน่นระหว่างการเก็บเกี่ยว มักมีคุณภาพต่ำ ไม่ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด พ.ศ. 2550 และสร้างมลภาวะ จึงจำเป็นต้องศึกษาและปรับปรุง ด้วยเทคนิคการถ่ายน้ำและตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพ จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำภายในบ่อเลี้ยงปลาช่อนของเกษตรกร จังหวัดอ่างทอง ก่อนเริ่มเก็บเกี่ยว ระหว่างการเก็บเกี่ยว และระหว่างการการตกตะกอนน้ำทิ้ง 48 ชั่วโมง พบว่า คุณภาพน้ำในบ่อปลาช่อน มีความแตกต่างกันในทุกระดับความลึก ($p < 0.05$) โดยคุณภาพลึกกว่า 100 เซนติเมตร จากผิวน้ำไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและการสูบน้ำทิ้งด้วยเครื่องพญานาค โดยวางหัวกะโหลกติดกับพื้นก้นบ่อ ทำให้ตะกอนฟุ้งกระจายและคุณภาพน้ำทิ้งโดยรวมทั้งบ่อตลอดการเก็บเกี่ยวไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยปริมาณสารแขวนลอยในน้ำเป็นปัญหาสำคัญ และใช้เวลาในการตกตะกอนนานที่สุด การบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีการตกตะกอน 24 ชั่วโมงช่วยเพิ่มคุณภาพน้ำทิ้งจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ทุกค่า

โดยสรุปแนะนำว่า เกษตรกรต้องพัฒนาเทคนิคการระบายน้ำทิ้งที่ไม่รบกวนตะกอนพื้นบ่อให้ฟุ้งกระจายไม่ทำให้น้ำขุ่น โดยอาจใช้ท่อระบายน้ำเป็นช่องอ ใช้วิธีการถักน้ำ หรือให้ยกปลายหัวกะโหลกท่อบสูบน้ำสูงกว่าพื้น

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

¹ Department of Fisheries Science, Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Ayutthaya 13000, Thailand.

² ภาควิชาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 13000

² Department of Aquaculture, Faculty of Fisheries, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

³ สาขาวิชาสัตวศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

³ Department of Animal Science, Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Ayutthaya 13000, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): abee_sunnee@hotmail.co.th

ก้นบ่อระหว่างระบายน้ำบนของบ่อ และบำบัดเฉพาะน้ำส่วนใกล้พื้นบ่อซึ่งมีปริมาณเหลือน้อยแล้วต่อไป

คำสำคัญ: บำบัดน้ำทิ้ง, บ่อเลี้ยงปลาช่อน, ปลาช่อน

ABSTRACT

Drainage water from intensive *Channa striatus* fish pond especially during harvesting is often found unqualified by the sewage water quality from aquaculture control standard 2007 and thus causing pollution. This research aimed to do a deep study and dilute the problems by an efficient draining and settling in cultured pond technique. Water from fish pond in Ang Thong province before and during harvesting was sampling in different depth and time. All water samples were pooled and let them settle for 48 hours. Results showed differences in water quality at different depth levels ($p < 0.05$). The over 100 cm depth water was unqualified and the farmer draining practice significantly reduced the water quality. Setting the pump suckling head on the pond bottom caused sediment diffused and increased the total water suspended solid, consequence in whole pond water volume unqualified to the control standard. The total suspended solid was the biggest problem and cost the longest time to be settled. After sedimentation treatment 24 hours can significantly improve all water quality parameters to reach the control standard.

It is suggested that during water draining farmers must not disturb the pond bottom, not diffusing the sediment or mudding the drained water. Draining technique such as bended pipe, syphon hose or setting suck head far above the pond bottom should be used to remove the surface water. For the rest, water about 60 cm over the pond bottom must be further treated either by sedimentation or combining with other methods.

Key words: wastewater treatment, snakehead fish pond, *Channa striatus*

บทนำ

ฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไปมีการปล่อยน้ำทิ้งออกจากฟาร์ม ด้วยเหตุผลหลัก 2 ประการ คือ 1) มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำในช่วงระหว่างการเลี้ยง และ 2) ระบายน้ำทิ้งในช่วงระหว่างการเก็บเกี่ยวผลผลิต ซึ่งการระบายน้ำทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกในแต่ละครั้ง คุณภาพน้ำที่ถูกระบายออกมามักมีคุณภาพต่ำ มีปริมาณตะกอนของแข็งที่แขวนลอยสูง มีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส มีปริมาณแอมโมเนียรวมและปริมาณบี

โอดีสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดในหลายประเทศ รวมทั้งประเทศไทยได้ให้ความสำคัญกับผลกระทบจากการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาก (Teichert-Coddington, 1995)

ปัจจุบันกรมควบคุมมลพิษได้มีประกาศควบคุมมาตรฐานน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพื่อควบคุมผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อม โดยประกาศกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจัดลงวันที่ 23 พฤศจิกายน

2550 ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 125 ตอนพิเศษ 213 วันที่ 30 มกราคม 2551 กำหนดค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดดังนี้ ค่าบีโอดี ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณไนโตรเจนรวม ไม่เกิน 4.0 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ค่าปริมาณฟอสฟอรัสรวม ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ค่าปริมาณแอมโมเนียรวม ไม่เกิน 1.1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และค่าปริมาณสารแขวนลอยรวม ไม่เกิน 80.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (National of the Ministry of Natural Resources and Environment, 2007) ซึ่งเป็นปัญหาเกี่ยวกับฟาร์มปลาช่อน (*Channa striatus*) ที่เลี้ยงอย่างหนาแน่นด้วย

การลดผลกระทบของน้ำทิ้งฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำต่อสิ่งแวดล้อมมี 2 แนวทางคือ แนวทางที่ 1 ลดปริมาณการระบายน้ำทิ้งให้น้อยลง แนวทางนี้เป็นวิธีการที่ไม่ค่อยได้ผลดีนักกับระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหนาแน่นในยุคปัจจุบัน เนื่องจากในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหนาแน่นจำเป็นต้องให้อาหารในปริมาณมาก และทำให้ภายในบ่อมีของเสียอินทรีย์สารเกิดขึ้นในปริมาณมากด้วย ทั้งมาจากอาหารที่ให้สัตว์น้ำกิน อาหารที่เหลือและมูลสัตว์น้ำที่ขับถ่ายออกมา ดังที่ Cole and Boyd (1985) รายงานว่า หากภายในบ่อมีสารอาหารมากเกินไป ส่งผลให้คุณภาพน้ำเสื่อมสภาพและการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำช้าลง จึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำในปริมาณสูงมาก

แนวทางที่ 2 เป็นการแก้ไขปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ก่อนปล่อยสู่ภายนอก ซึ่งมีเทคนิควิธีการมากมายที่สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งได้ เช่น วิธีการสร้างพื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetlands) เพื่อกรองของแข็งและกำจัดสารอาหารที่ละลายน้ำ ซึ่งเทคนิคนี้มีประสิทธิภาพมาก แต่มีข้อจำกัดคือ ต้องใช้พื้นที่ในการบำบัดน้ำมาก ประมาณ 0.7 - 2.7 เท่าของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (Schwartz and Boyd, 1995)

ซึ่งอาจไม่ใช่ทางเลือกที่ดีนักสำหรับเกษตรกรที่มีพื้นที่จำกัด วิธีการหมุนเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Water recycling) ซึ่งปัจจุบันแม้เป็นที่แพร่หลายมากขึ้น แต่พบว่าต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง (Gutierrez-Wing and Malone, 2006) นอกจากนี้มีอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจคือ วิธีการตกตะกอนของแข็ง (sedimentation or settling technique)

เทคนิคการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยการตกตะกอน จำเป็นต้องมีบ่อขนาดเพียงพอสำหรับการกักน้ำทิ้งไว้ และนานพอสำหรับสารแขวนลอยตกตะกอนได้ ซึ่งหลักคิดเบื้องต้นหากนำน้ำภายในบ่อเลี้ยงในช่วงระหว่างการเลี้ยงทั้งหมดมาทำการตกตะกอน จะเป็นปริมาณน้ำที่สูงมากและไม่มีประสิทธิภาพ ความเป็นไปได้ในการนำไปปฏิบัติอย่างเป็นทางการเป็นรูปธรรมจึงเป็นไปได้ยาก เพราะเกษตรกรต้องใช้บ่อตกตะกอนเพื่อบำบัดน้ำทิ้งที่มีขนาดใหญ่ ใช้พื้นที่มาก เป็นการเบียดเบียนพื้นที่การผลิตของเกษตรกร แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งอาจเพิ่มสูงขึ้น หากสามารถปฏิบัติเพียงส่วนสุดท้ายของการระบายน้ำทิ้งแล้วนำน้ำทิ้งส่วนสุดท้ายดังกล่าวมาทำการตกตะกอนในบ่อตกตะกอนต่อไป ทั้งนี้มีงานวิจัยจำนวนมากรายงานว่า ความเข้มข้นของสารอาหารและของแข็งในน้ำทิ้ง มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 5-20% สุดท้ายของปริมาณน้ำทิ้งที่ระบายออกมาจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (Schwartz and Boyd, 1994; Teichert-Coddington *et al.*, 1996)

ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการตกตะกอน มาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงปลาช่อน และพัฒนาเทคนิคการระบายน้ำควบคู่กับการตกตะกอนในบ่อเลี้ยงปลาหลังเก็บเกี่ยว โดยไม่ต้องมีบ่อตกตะกอน ก่อนระบายน้ำสู่สาธารณะ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และคุณภาพน้ำผ่านค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด พ.ศ. 2550

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้ทำการศึกษาในช่วงระหว่างการเก็บเกี่ยวผลผลิต ซึ่งปล่อยปลาช่อนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นบ่อของเกษตรกร ตำบลห้วยคันแหลน อำเภอวิเศษชัยชาญ จังหวัดอ่างทอง ลักษณะของบ่อเป็นบ่อดินรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีพื้นที่ประมาณ 1 ไร่ จำนวน 3 บ่อ ระดับน้ำลึกประมาณ 160 เซนติเมตร โดยแต่ละบ่อปล่อยลูกปลานาขนาดประมาณ 9 กรัม ลงเลี้ยงในบ่อดิน ในอัตรา 10,000 ตัวต่อไร่ และในระหว่างการเลี้ยงลูกปลาให้อาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีระดับโปรตีนในอาหารไม่ต่ำกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ความถี่ 2 มื้อต่อวัน ในช่วงเวลา 07.00 และ 15.30 น. ในอัตรา 2.5-6.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวต่อวัน เป็นระยะเวลาประมาณ 4 เดือน หรือได้ปลานาขนาดประมาณ 300-400 กรัม การเปลี่ยนถ่ายน้ำ เริ่มมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำหลังจากเลี้ยงปลาไปแล้ว 3 สัปดาห์ สัปดาห์ละครั้งในอัตราประมาณ 10-20 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำในบ่อ

การสูบน้ำออกจากบ่อเลี้ยงปลาช่อนส่วนใหญ่ เกิดเฉพาะในช่วงการเก็บเกี่ยวผลผลิต ซึ่งมีการระบายน้ำทิ้ง 100 เปอร์เซ็นต์ สำหรับรูปแบบของการระบายน้ำทิ้งออกจากบ่อ มีรูปแบบดังนี้คือ ตั้งแต่ระดับผิวน้ำ จนถึงระดับความลึกของน้ำพื้นก้นบ่อ ใช้วิธีการสูบน้ำด้วยเครื่องสูบน้ำ โดยวางหัวกะโหลกติดกับพื้นก้นบ่อ ซึ่งเป็นการระบายน้ำทิ้งจากระดับน้ำตลิ่งล่างเป็นหลัก สำหรับตำแหน่งหรือจุดที่วางท่อพญานาคสำหรับสูบน้ำในครั้งนี้ ได้กำหนดจุดตำแหน่งที่ทำการสูบน้ำเพียงจุดเดียว ซึ่งเป็นจุดที่ต่ำที่สุดของพื้นก้นบ่อ โดยงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 3 การทดลองย่อย ดังนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาคุณภาพน้ำภายในบ่อเลี้ยงปลาช่อน ก่อนการเก็บเกี่ยว

การทดลองนี้เริ่มต้นเก็บข้อมูลในวันที่ทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตปลา โดยเริ่มต้นด้วยการเก็บ

ตัวอย่างน้ำก่อนที่ทำการสูบน้ำออกจากบ่อ โดยเก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึกของน้ำต่างกัน 6 ระดับ คือ 10, 20, 50, 100, 150 เซนติเมตรจากผิวน้ำและที่ระดับพื้นก้นบ่อ โดยใช้อุปกรณ์ท่อพีวีซีเก็บตัวอย่างน้ำตามระดับความลึกที่ต้องการ ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

การคำนวณปริมาตรน้ำและวิเคราะห์คุณภาพน้ำ เนื่องจากบ่อที่ใช้การเลี้ยงปลาช่อนเพื่อใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ เป็นบ่อรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยมีอัตราส่วนความลาดชันของก้นบ่อในแนวดิ่งต่อในแนวราบเท่ากับ 2.5 : 1.7 ดังนั้นการคำนวณหาปริมาตรน้ำในบ่อแต่ละระดับ สามารถคำนวณได้ตามวิธีการของ Taparhudee (2010) คือ (ปริมาตรน้ำในบ่อ(ม³) = ½ × ผลบวกของพื้นที่หน้าตัดด้านคู่ขนาน × ความลึกของน้ำ) ตัวอย่างการคำนวณ เช่น บ่อที่ใช้เลี้ยงปลาในครั้งนี้ มีความกว้างเฉลี่ย 20 เมตร ยาวเฉลี่ย 78.1 เมตร มีระดับความลึกเฉลี่ย 2.50 เมตร มีอัตราส่วนความลาดชันของก้นบ่อในแนวดิ่งต่อในแนวราบเท่ากับ 2.5 : 1.7 ดังนั้นการคำนวณปริมาตรน้ำในบ่อที่ระดับความลึก 160 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระดับน้ำสูงสุดที่ใช้ในการเลี้ยงปลาตลอดการเลี้ยงปลาในครั้งนี้ (ซึ่งจะเทียบเป็นระดับปริมาตรน้ำ 100% ที่บรรจุในบ่อ) สามารถคำนวณได้โดยแทนค่าในสูตรข้างต้น = 0.5 × (1443.42 + 1240.02) × 1.60 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,146.76 ม³ และการคำนวณปริมาตรน้ำในบ่อที่ระดับความลึก 100 เซนติเมตร สามารถคำนวณได้ = 0.5 × (1366.04 + 1240.02) × 1.00 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,303.03 ม³ หรือเท่ากับ 60.70% ของปริมาตรน้ำที่ระดับน้ำสูงสุดในบ่อ เป็นต้น จากนั้นนำตัวอย่างน้ำมาตรวจสอบวิเคราะห์ค่าคุณภาพน้ำ โดยนำดัชนีคุณภาพน้ำดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับ ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด พ.ศ. 2550 ตามที่กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กำหนด และวิธีการวิเคราะห์แสดงใน Table 1

Table 1 Water quality parameters and method reference analysis

Water quality parameters	Control standard	Unit	Method Reference Analysis
BOD	<20	mg/l	APHA (2005)
Total nitrogen	<4.0	mg/l	Raveh and Avnimelech (1979)
Total phosphorus	<0.5	mg/l	Raveh and Avnimelech (1979)
Total ammonia	<1.1	mg/l	APHA (2005)
Total suspended solids	<80	mg/l	APHA (2005)

การทดลองที่ 2 ศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงปลาช่อน ในระหว่างการเก็บเกี่ยว

การทดลองนี้ศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงปลาช่อนในช่วงระหว่างการเก็บเกี่ยวผลผลิตโดยใช้วิธีการระบายน้ำทิ้ง ตั้งแต่ระดับผิวน้ำจนถึงระดับพื้นก้นบ่อ ด้วยวิธีการสูบน้ำโดยใช้เครื่องสูบน้ำพญานาค ซึ่งวางหัวกะโหลกติดกับพื้นก้นบ่อ โดยในการระบายน้ำทิ้งออกจากบ่อ เกษตรกรจะมีขั้นตอนการระบายน้ำทิ้งออกจากบ่อ แบ่งเป็น 2 ครั้ง แต่แต่ละครั้งที่ทำการระบายน้ำทิ้งจะทำต่างวันกัน ซึ่งการระบายน้ำในครั้งแรกมีจุดประสงค์ระดับน้ำเพื่อจับปลา โดยระบายน้ำในบ่อให้เหลือระดับความลึกของน้ำประมาณ 100 เซนติเมตร เพื่อจับปลาออกจากบ่อให้หมดหรือมากที่สุด เพื่อนำปลาไปขาย และการระบายน้ำครั้งที่ 2 เพื่อระบายน้ำทิ้งออกจากบ่อให้หมด และวางแผนการเตรียมบ่อสำหรับเลี้ยงปลารอบต่อไป

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ถูกสูบน้ำออกจากบ่อเก็บเกี่ยวผลผลิต 5 ช่วงระดับความลึก ระดับละ 3 ตัวอย่างต่อบ่อ อย่างต่อเนื่องจนน้ำหมดบ่อ โดยกำหนดจุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึกของน้ำที่ต่างกัน 5 ช่วง ดังนี้ ช่วงที่ 1 และ 2 เป็นระบายน้ำครั้งที่ 1 ระดับความลึกของน้ำ 160 และ 159-100 เซนติเมตร จากผิวน้ำ ช่วงที่ 3 และ 4 เป็นระบายน้ำครั้งที่ 2 ระดับ

ความลึกของน้ำ 99-60 และ 59-20 เซนติเมตรจากผิวน้ำ และช่วงที่ 5 คือน้ำจากก้นบ่อ รวม 15 ตัวอย่าง

นำตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำตาม Table 1 ทันที และนำผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของ 5 ระดับช่วงความลึก มาเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ และเปรียบเทียบคุณภาพน้ำในแต่ละระดับช่วงความลึกกับค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด พ.ศ. 2550

การทดลองที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำทิ้งจากการเก็บเกี่ยวปลาช่อน ระหว่างการตกตะกอน

เมื่อพิจารณาผลของการทดลองที่ 2 ว่าระดับความลึกของน้ำในช่วงระดับใดที่อาจก่อให้เกิดวิกฤตต่อสิ่งแวดล้อมได้ นำตัวอย่างน้ำที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด มาศึกษาการตกตะกอนของปริมาณของแข็งและสารอาหาร ในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างละ 3 ซ้ำต่อบ่อ โดยปล่อยน้ำในกระบอกตวงให้ตกตะกอนด้วยตนเองโดยไม่มีการรบกวนใดๆ เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำทิ้ง ในระหว่างการตกตะกอน และหาเวลาที่เหมาะสมในการจัดการตะกอนน้ำทิ้ง เก็บตัวอย่างน้ำและนำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำ (ตาม Table 1) ตามระยะเวลาตกตะกอนที่กำหนดคือ ตั้งแต่เริ่มปล่อยให้ตกตะกอน ชั่วโมงที่ 0,

และชั่วโมงที่ 1, 3, 6, 12, 24 และ 48 หลังการตกตะกอน

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทั้ง 3 การทดลอง ใช้วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติเหมือนกัน คือ นำผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในแต่ละสิ่งทดลอง (ระดับความลึก ในการทดลองที่ 1 และ 2 หรือ เวลาตกตะกอน ในการทดลองที่ 3) มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

หาความแตกต่างทางสถิติ หากมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) จึงเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับ $p < 0.05$ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป และนำข้อมูลค่าคุณภาพน้ำที่ทำการตกตะกอน ณ ช่วงเวลาต่างๆ กัน ดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด พ.ศ. 2550

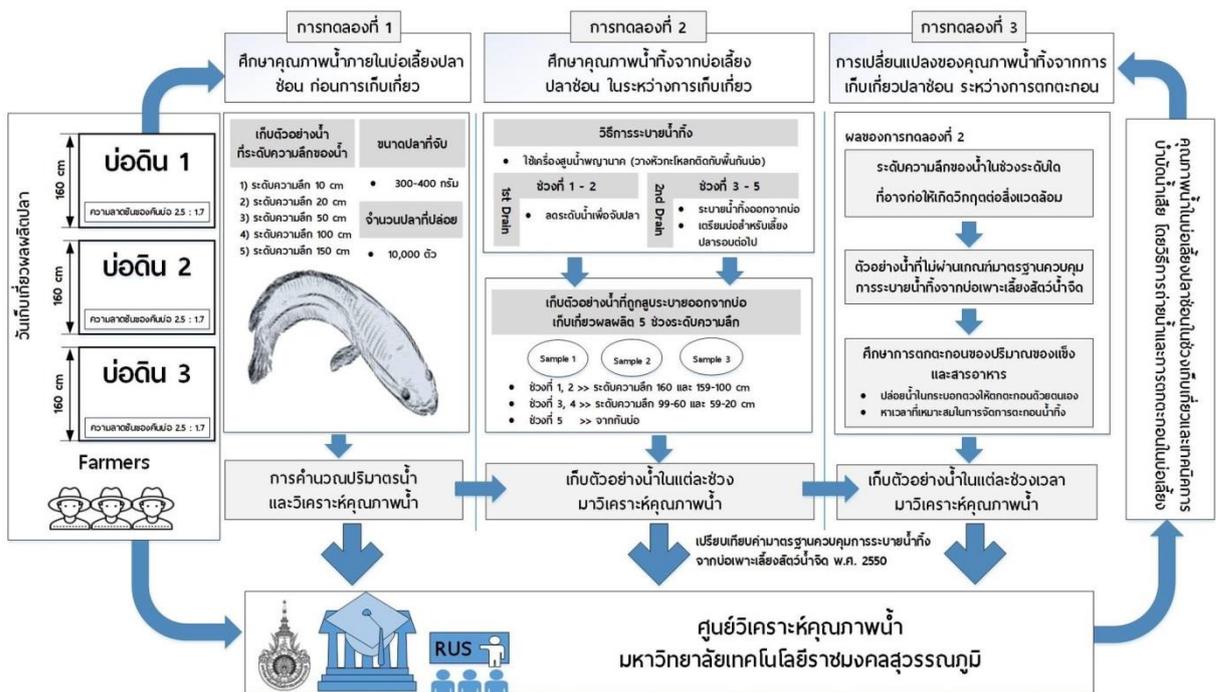


Figure 1 A summary diagram of the experimental process stages and the collection of experimental data throughout the trial period

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการทดลองที่ 1 ศึกษาคุณภาพน้ำภายในบ่อเลี้ยงปลาช่อน ก่อนการเก็บเกี่ยว (ก่อนการสูบน้ำออกจากบ่อ)

ผลการคำนวณปริมาณน้ำในแต่ละระดับความลึกแสดงใน Table 2 และผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำแสดงใน Table 3 แสดงให้เห็นว่า ค่าดัชนีคุณภาพน้ำทุกค่าที่ตรวจสอบที่ระดับความลึกของน้ำ 150, 100, 60, 20 เซนติเมตรและพื้นบ่อ มีความแตกต่าง

ทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยพบว่าค่าปริมาณไนโตรเจนรวมทุกระดับความลึกของน้ำยกเว้นพื้นบ่อ มีค่าไม่เกินกว่าค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด พ.ศ. 2550 ส่วนค่าบีโอดี และปริมาณฟอสฟอรัสรวม ที่ระดับความลึกของน้ำไม่เกิน 100 เซนติเมตรจากผิวน้ำหรือปริมาณน้ำในบ่อมากกว่า 33.4 เปอร์เซ็นต์ มีค่าไม่เกินกว่าค่ามาตรฐาน และปริมาณสารแขวนลอยรวมในน้ำที่ระดับความลึกของน้ำไม่เกิน 60 เซนติเมตรจากผิวน้ำ

หรือปริมาตรน้ำในบ่อมากกว่า 60.70 เปอร์เซ็นต์ มีค่า
ไม่เกินกว่าค่ามาตรฐาน แต่พบว่าปริมาณแอมโมเนีย
รวม ทุกระดับความลึกของน้ำที่ทำการตรวจวัด มีค่า

เกินกว่าค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำที่จากบ่อ
เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด พ.ศ. 2550 กำหนด

Table 2 Water volume of the fish pond in each depth level from water surface

Water Depth (cm)	Water volume (m ³)	Water volume(%)
160	2,146.76	100.00
150	2,002.84	93.30
100	1,303.03	60.70
60	766.56	35.71
50	635.65	29.61
20	250.50	11.67
10	124.62	5.81
5	62.16	2.90

Table 3 Water quality parameters (mg/l) in fish pond before harvesting

Water Depth from surface	BOD	Total nitrogen	Total phosphorus	Total ammonia	Total suspended solids
10 cm	11.4±0.32 ^c	0.68±0.10 ^c	0.306±0.042 ^d	3.56±0.031 ^f	71.3±1.13 ^e
20 cm	18.6±0.46 ^{cd}	1.27±0.20 ^d	0.415±0.035 ^{bc}	3.89±0.028 ^e	74.3±1.41 ^d
50 cm	19.0±0.52 ^c	1.78±0.14 ^{cd}	0.445±0.028 ^b	4.56±0.035 ^d	74.8±2.32 ^d
100 cm.	19.8±0.31 ^c	1.97±0.12 ^{bc}	0.494±0.064 ^{ab}	5.78±0.029 ^c	92.5±3.62 ^c
150 cm	22.4±1.12 ^b	2.11±0.04 ^b	0.540±0.056 ^a	8.45±0.256 ^b	142.7±6.52 ^b
Pond bottom	54.8±2.28 ^a	5.01±0.64 ^a	0.650±0.140 ^a	12.45±0.56 ^a	912.7±48.08 ^a

Mean±SD with different superscript letter in column showed significant difference at $p<0.05$.

ทั้งนี้ ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ Gooley *et al.* (2000) ได้รายงานไว้ว่า ปัจจัยเนื่องจากอาหารที่ให้สัตว์น้ำกิน ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความเข้มข้นของสารอาหารที่เพิ่มขึ้นภายในบ่อ อาจเกิดจากปริมาณสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์จากอาหารที่เหลือ และการปลดปล่อยของเสียออกมาจากตัวปลาในรูปแบบของ

มูลและปัสสาวะ เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของตะกอนสะสมบริเวณพื้นก้นบ่อเป็นหลัก ซึ่งถูกดูดซับเก็บสะสมลงไปในพื้นที่ก้นบ่อ โดยอาจจะสะสมอยู่ในรูปของฟอสฟอรัสรวม และไนโตรเจนรวม ส่งผลให้ค่าบีโอดีบริเวณพื้นก้นบ่อมีค่าสูงขึ้น

ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแน่นอนในระยะสั้นหรือระยะยาว (Islam, 2005)

การศึกษาในครั้งนี้พบว่า ค่าปริมาณไนโตรเจนรวม ปริมาณฟอสฟอรัสรวมและปริมาณแอมโมเนียรวมบริเวณพื้นที่ก้นบ่อ เท่ากับ 5.01, 0.65 และ 12.45 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีค่าใกล้เคียงสอดคล้องกับการทดลองของ Teichert-Coddington *et al.* (1999) ที่ได้ศึกษาในบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยมีค่าเท่ากับ 4.15, 1.67 และ 2.40 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้ อาจเนื่องจากการเลี้ยงปลาช่อน และการเลี้ยงกุ้งใช้อาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนสูง โปรตีนไม่น้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในอาหารที่มีโปรตีนสูง เมื่อสัตว์น้ำบริโภคเข้าไปก็ย่อมมีปริมาณสารอินทรีย์และอนินทรีย์ จากอาหารที่สูงกว่า เมื่อมีอาหารเหลือจากการกินของปลาและมีการขับถ่ายปลดปล่อยของเสียออกจากร่างกาย ส่งผลให้มีสารอาหารตกค้างภายในบ่อ โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ก้นบ่อที่สูงตามลำดับ (Halver and Hardy, 2002)

ผลการทดลองที่ 2 ศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงปลาช่อน ในระหว่างการเก็บเกี่ยวผลผลิต

จากการศึกษาคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงปลาช่อนที่หลายระดับความลึกขณะระบายน้ำออกจากบ่อพบว่าค่าดัชนีคุณภาพน้ำทุกค่ามีความแตกต่างกันระหว่างระดับความลึกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดัง Table 4 โดยพบว่า การระบายน้ำครั้งที่ 1 ในช่วงที่ 1 และ 2 ระดับความลึกของน้ำ 160 ถึง 100 เซนติเมตร จากผิวน้ำ ค่าบีโอดี ปริมาณแอมโมเนียรวม และปริมาณสารแขวนลอยรวมในน้ำ มีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด ส่วนค่าปริมาณไนโตรเจนรวม ปริมาณฟอสฟอรัสรวม ในช่วงระดับความลึกของน้ำ ในช่วงที่ 1 มีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐานฯ แต่ในช่วงระดับลึกของน้ำในช่วงที่ 2 มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานฯ

แต่เมื่อระบายน้ำครั้งที่ 2 ในช่วงที่ 3 ถึง 5 ระดับความลึกน้อยกว่า 100 เซนติเมตร ถึงพื้นที่ก้นบ่อพบว่าค่าบีโอดี ปริมาณแอมโมเนียรวม และปริมาณสารแขวนลอยรวมในน้ำมีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐาน แต่ค่าปริมาณไนโตรเจนรวม ปริมาณฟอสฟอรัสรวม ซึ่งช่วงก่อนหน้านี้นี้มีค่าไม่เกินมาตรฐานแล้ว กลับพบว่ามีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐานอีกครั้งหนึ่ง ทั้งนี้อาจเนื่องจากการระบายน้ำทิ้งไม่ได้ต่อเนื่อง น้ำทิ้งช่วงที่ 3 เป็นช่วงแรกของการสูบน้ำครั้งที่ 2 ซึ่งทิ้งระยะเวลา 2-3 วันหลังการระบายน้ำครั้งแรก เพื่อทำการจับปลาขาย

ตะกอนของเสียต่างๆ ภายในบ่อซึ่งถูกรบกวนจากการระบายน้ำในรอบแรกเกิดการตะกอนลงสู่พื้นที่ก้นบ่อ ซึ่งเมื่อทำการระบายน้ำรอบที่ 2 โดยใช้วิธีการวางหัวกะโหลกของท่อสูบน้ำติดกับพื้นที่ก้นบ่อเช่นเดิม เมื่อเริ่มสูบน้ำออก ทำให้พื้นที่ก้นบ่อถูกรบกวนอีกครั้ง ทำให้ค่าปริมาณไนโตรเจนรวม ปริมาณฟอสฟอรัสรวมกลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่ง และเกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด แต่เมื่อการระบายน้ำเข้าสู่ช่วงที่ 4 พบว่าค่าปริมาณไนโตรเจนรวม กลับมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด และย้อนกลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งเกินกว่าค่ามาตรฐาน เมื่อการระบายน้ำเข้าสู่ช่วงที่ 5 ซึ่งเป็นพื้นที่ก้นบ่อ ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ก้นบ่อเป็นดิน โคลน ซึ่งมีอินทรีย์วัตถุตกตะกอนทับถมสะสมตลอดการเลี้ยงมาก เมื่อปริมาณน้ำในบ่อลดน้อยลงมาก จึงทำให้ความเข้มข้นของสารอาหารต่างๆ ที่ละลายในน้ำส่วนก้นบ่อสูงมาก รวมถึงความหนาแน่นของปลาเพิ่มมากขึ้นมาก การเคลื่อนไหวของปลาทำให้ตะกอนถูกรบกวนขึ้นมา สำหรับปริมาณฟอสฟอรัสรวมก็เช่นเดียวกัน ให้ผลแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่จะมีปริมาณที่ตรวจพบมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานตั้งแต่เริ่มสูบน้ำทิ้งในช่วงที่ 3 ยาวจนถึงช่วงที่ 5 ดัง Table 4

จากผลการศึกษาี้ คุณภาพน้ำที่ปล่อยออกมาจากบ่อเลี้ยงปลาช่อน ในช่วงระหว่างการเก็บเกี่ยวที่ระดับน้ำตั้งแต่ผิวน้ำจนถึงพื้นก้นบ่อพบว่า เมื่อเริ่มสูบน้ำเพื่อระบายน้ำใหม่ทุกครั้ง ทำให้ค่าดัชนีคุณภาพน้ำมีค่าสูงกว่าปกติ ทั้งนี้เนื่องจากรูปแบบการใช้เครื่องสูบน้ำที่วางหัวกะโหลกสูบน้ำติดกับพื้น

ก้นบ่อ เป็นการระบายน้ำจากด้านล่างสู่ด้านบน เมื่อเริ่มเปิดเครื่องสูบน้ำ แรงดูดน้ำและการเคลื่อนที่ของน้ำด้วยความรวดเร็วทำให้ดิน โคลนที่ตกตะกอนสะสมอยู่พื้นก้นบ่อถูกรบกวน ฟุ้งกระจายมากตามแรงดูดของเครื่องสูบน้ำ

Table 4 Drainage water quality parameters (mg/l) at different depth levels during harvesting

Water Depth		water quality parameters				
from surface		BOD	Total	Total	Total	Total
(cm)			nitrogen	phosphorus	ammonia	suspended solids
1 st						
drain	Part 1: 160	67.6±2.83 ^a	3.67±0.12 ^c	0.78±0.023 ^c	5.23±0.31 ^c	1032.6±12.84 ^c
	Part 2: 159 - 100	48.7±0.57 ^c	2.82±0.14 ^d	0.48±0.032 ^d	3.87±0.22 ^e	269.5±6.78 ^e
2 nd						
drain	Part 3: 99 - 60	68.6±4.74 ^a	4.12±0.14 ^b	0.85±0.045 ^{ab}	6.92±0.42 ^b	1167.4±12.07 ^b
	Part 4: 59 - 20	57.9±3.89 ^b	3.52±0.19 ^c	0.78±0.042 ^{bc}	4.67±0.13 ^d	453.7±9.76 ^d
	Part 5: pond bottom	68.8±4.24 ^a	5.27±0.16 ^a	0.89±0.067 ^a	12.83±0.34 ^a	1307.3±14.35 ^a

Mean±SD with different superscript letter in column showed significant difference at $p<0.05$.

สำหรับดัชนีคุณภาพน้ำทุกตัวที่ได้ทำการตรวจวัดในครั้งนี้ พบว่า ค่าดัชนีคุณภาพน้ำทุกตัว มีค่าสูงในระยะช่วงเริ่มต้นของการสูบน้ำ ทั้งในช่วงที่ 1 และในช่วงที่ 2 และจะมีค่าลดลงในช่วงระดับน้ำต่อมา ทั้งนี้เนื่องจากการสูบน้ำครั้งนี้เกษตรกรได้วางหัวกะโหลกเครื่องสูบน้ำติดกับพื้นก้นบ่อ ดังนั้นเมื่อสูบน้ำใหม่ทุกครั้งจะทำให้ค่าดัชนีคุณภาพน้ำทุกตัวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เพราะในการสูบน้ำในระยะเริ่มต้นใหม่ทุกครั้งจะมีการรบกวนน้ำพื้นก้นบ่อมาก และเมื่อสูบน้ำไปแล้วระยะหนึ่งพบว่าความเข้มข้นของค่าดัชนีคุณภาพน้ำทุกตัวมีค่าลดลง แต่จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากในช่วงระดับน้ำใกล้พื้นก้นบ่อเนื่องจากมีของเสียสะสมบริเวณพื้นก้นบ่อในปริมาณมาก ดังแสดงใน Table 4 และเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณความเข้มข้นของ

ค่าดัชนีคุณภาพน้ำที่ระดับความลึกของน้ำในช่วง 59-20 เซนติเมตรจากผิวน้ำ และที่ระดับความลึกของน้ำบริเวณพื้นก้นบ่อ กับระดับความลึกของน้ำในช่วง 159-100 เซนติเมตร ซึ่งทั้ง 3 ระดับเป็นระดับที่มีการสูบน้ำมาสู่ระยะหนึ่งแล้วไม่ใช่ระยะเริ่มต้นของการสูบน้ำใหม่ พบว่า ปริมาณสารแขวนลอยรวมในบ่อ มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น 68.35 เปอร์เซ็นต์ (0.68 เท่า) และ 385.08 เปอร์เซ็นต์ (3.85 เท่า) ตามลำดับ ปริมาณแอมโมเนียรวมมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น 20.67 เปอร์เซ็นต์ (0.21 เท่า) และ 231.52 เปอร์เซ็นต์ (2.31 เท่า) ตามลำดับ ปริมาณไนโตรเจนรวมมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น 24.82 เปอร์เซ็นต์ (0.25 เท่า) และ 86.88 เปอร์เซ็นต์ (0.87 เท่า) ตามลำดับ ปริมาณฟอสฟอรัสรวมมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น 62.57 เปอร์เซ็นต์ (0.63 เท่า) และ 85.42

เปอร์เซ็นต์ (0.85 เท่า) ตามลำดับ และปริมาณบีโอดีมี ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น 18.89 เปอร์เซ็นต์ (0.19 เท่า) และ 41.27 เปอร์เซ็นต์ (0.41 เท่า) จากระดับความลึกของ น้ำในช่วง 159-100 เซนติเมตร ตามลำดับโดยปริมาณ ความเข้มข้นของค่าดัชนีคุณภาพน้ำต่าง ๆ จะมีความ เข้มข้นสูงขึ้นในระดับน้ำใกล้พื้นก้นบ่อ ซึ่งสอดคล้อง กับรายงานของ Schwartz and Boyd (1994) ที่ได้ รายงานไว้ว่าความเข้มข้นของสารอาหารที่ตรวจพบ ภายในบ่อจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับระดับ ความลึกของน้ำภายในบ่อขณะที่สูบน้ำออกจากบ่อ นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของปริมาณบีโอดี ปริมาณไนโตรเจนรวม ปริมาณฟอสฟอรัสรวม ปริมาณแอมโมเนียรวม และปริมาณสารแขวนลอย รวม มีความแตกต่างกัน ระหว่างระดับความลึกของ น้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยปริมาณ ความเข้มข้นของสารอาหารจะมีค่าสูงสุดในช่วง ระดับความลึกของน้ำ 20 เซนติเมตรสุดท้ายหรือ 11.67 เปอร์เซ็นต์สุดท้าย ซึ่งสอดคล้องกับรายงาน ของ Munsiri *et al.* (1996) และ Teichert-Coddington *et al.* (1999) ที่ได้รายงานว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ สารอาหารและของแข็งในน้ำที่มีแนวโน้มเพิ่ม สูงขึ้น และมีค่ามากที่สุด ในช่วง 5-20 เปอร์เซ็นต์ สุดท้ายของปริมาณน้ำทิ้งที่ปล่อยระบายออกจาก บ่อ

ผลการทดลองข้างต้นชี้ให้เห็นว่าการ ระบายตะกอนพื้นก้นบ่อส่งผลต่อ การเพิ่มปริมาณ สารแขวนลอยรวมในน้ำมากที่สุด รองลงมาคือ ปริมาณแอมโมเนียรวม ปริมาณไนโตรเจนรวม ปริมาณฟอสฟอรัสรวม และปริมาณบีโอดี ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณพื้นก้นบ่อจะเป็นแหล่งสะสม ตะกอนของเสียต่างๆ ภายในบ่อตลอดเวลา เมื่อมีการ ระบายพื้นก้นบ่อ โดยเฉพาะเมื่อมีการสูบน้ำระบาย น้ำทิ้งออกจากบ่อ จะส่งผลให้ตะกอนสารแขวนลอย ต่าง ๆ เกิดการฟุ้งกระจายได้ง่าย ส่งผลให้ค่าปริมาณ

สารแขวนลอยรวมในน้ำที่ตรวจวัดได้มีความเข้มข้น เพิ่มขึ้น ตามลำดับ (Ayub *et al.*, 1993) ในขณะเดียวกัน ปริมาณแอมโมเนียรวม ปริมาณไนโตรเจนรวม ปริมาณ ฟอสฟอรัสรวม และค่าบีโอดี มีค่าเพิ่มสูงขึ้นในระดับ รองลงมา ทั้งนี้เนื่องจากโดยส่วนใหญ่แล้ว ปริมาณ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจะถูกดูดซับเก็บสะสม ลงไปในดินพื้นก้นบ่อ อาจจะสะสมอยู่ในรูปของ ไนโตรเจนรวม และฟอสฟอรัสรวม ส่งผลต่อเนื่อง ให้ค่าบีโอดีบริเวณพื้นก้นบ่อมีค่าสูงขึ้น (Islam, 2005)

Schwartz and Boyd (1994); Boyd (1995); Teichert-Coddington *et al.* (1996); Teichert-Coddington *et al.* (1999) ได้รายงานว่าการที่ระบายออกมาจาก บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ มักประกอบด้วยสารอาหารที่เกิดจาก การสะสมในช่วงระหว่างการเลี้ยง ซึ่งน้ำทิ้งดังกล่าว ประกอบด้วยตะกอนสารอินทรีย์ ที่เกิดจากการตาย ของแพลงก์ตอน อาหารที่สัตว์น้ำไม่กิน และของเสีย ที่เกิดจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งในบ่อเลี้ยงปลาและบ่อ เลี้ยงกุ้ง สารอาหารเหล่านี้ส่วนหนึ่งแขวนลอยอยู่ใน น้ำ และจากการศึกษาของ Ayub *et al.* (1993) ในบ่อ เลี้ยงปลานิลในช่วงระหว่างการเก็บเกี่ยวผลผลิต พบว่าปริมาณสารแขวนลอยของตะกอนจะเพิ่มปริมาณ สูงขึ้น เมื่อมีการสูบน้ำระบายน้ำทิ้งออกจากบ่อ และ สอดคล้องกับรายงานของ Teichert-Coddington *et al.* (1996) ที่ได้รายงานผลการศึกษาค้นคว้าจากการ ระบายน้ำทิ้งออกจากบ่อเลี้ยงกุ้งของประเทศฮอนดูรัส ซึ่งปล่อยกุ้งในอัตราความหนาแน่น 7-10 ตัวต่อตาราง เมตร พบว่าค่าความเข้มข้นของปริมาณไนโตรเจน รวม ปริมาณฟอสฟอรัสรวม ปริมาณสารอินทรีย์ ไนโตรเจนที่ละลายน้ำ และตะกอนหนักมีความสัมพันธ์ แบบแปรผกผันกับระดับความลึกของน้ำภายในบ่อ ขณะที่มีการสูบน้ำออกจากบ่อ

จากการศึกษาในครั้งนี้ยังพบว่าปริมาณแอมโมเนีย รวมในน้ำก่อนระบายทิ้งออกจากบ่อ จะมีความ เข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นตามระดับความลึกของน้ำที่ต่ำลง

ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 3 และเมื่อเริ่มมีการสูบน้ำเพื่อเริ่มต้นการระบายน้ำใหม่ทั้ง 2 ครั้งจะทำให้ค่าปริมาณแอมโมเนียรวมมีค่าสูงกว่าปกติ ทั้งนี้อาจเกิดจากการรบกวนตะกอนของเสียที่พื้นก้นบ่อขณะทำการสูบน้ำออก ทำให้เกิดการรบกวนตะกอนปล่อยแอมโมเนียออกมา ซึ่งแอมโมเนียที่ผลิตในบ่อส่วนใหญ่เกิดจากตะกอนธาตุอาหารอินทรีย์วัตถุที่เกิดจากแบคทีเรียย่อยสลายออกมา แล้วปลดปล่อยสู่ น้ำ ทำให้การคายแอมโมเนีย จากตะกอนดินสู่ น้ำเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลาไม่กี่นาที (Reddy *et al.*, 2009) อีกทั้งค่าปริมาณแอมโมเนียรวมในทุกระดับความลึกของน้ำมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดมาก ทั้งนี้อาจเกิดจากความผิดพลาดของเกษตรกรเกี่ยวกับการจัดการด้านอาหาร เกษตรกรให้อาหารมากเกินไป หรือให้ผิดเวลา ปลาไม่กินอาหาร และเหลือทิ้งสะสมที่พื้นก้นบ่อ ส่งผลให้อาหารเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนีย ละลายในน้ำเพิ่มสูงมากกว่าปกติ

ซึ่งเมื่อพิจารณาคุณภาพน้ำในภาพรวมจากค่าปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและแอมโมเนียแล้วพบว่า เกือบทุกระดับความลึกของน้ำ ตั้งแต่เริ่มต้นระบายน้ำทิ้งจนถึงสิ้นสุดการเก็บเกี่ยว มีค่าดัชนีคุณภาพน้ำเกือบทุกค่า เกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด พ.ศ. 2550 ทั้งนี้ เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ จากอาหารที่เหลือจากปลาและการปลดปล่อย ของเสียออกมาจากตัวปลาในรูปของมูลและปัสสาวะ จะเกิดการตกตะกอนสะสมบริเวณพื้นก้นบ่อเป็นหลัก โดยถูกดูดซับเก็บสะสมลงไปในดินพื้นก้นบ่อ อยู่ในรูปของฟอสฟอรัสรวม หรือส่งผลให้ค่าบีโอดีบริเวณพื้นก้นมีค่าสูงขึ้น (Gooley *et al.*, 2000) ซึ่งสอดคล้องกับ Teichert-Coddington *et al.* (1999) ที่ได้ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งในบ่อเลี้ยงกุ้ง ที่เลี้ยงด้วยอาหารสำเร็จรูปที่มีโปรตีนสูงถึง 40-45 เปอร์เซ็นต์

ซึ่งพบว่าพบว่ามีระดับน้ำลดลงถึงระดับในช่วง 40 เซนติเมตรสุดท้าย (ซึ่งใช้เครื่องสูบน้ำระบายน้ำทิ้งออกจากบ่อ) จะทำให้ค่าปริมาณฟอสฟอรัสรวม สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด ส่วนค่าปริมาณไนโตรเจนรวม และปริมาณแอมโมเนียรวม ยังมีค่าต่ำกว่า สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดได้ ยกเว้นระดับบริเวณพื้นก้นบ่อ

สำหรับปริมาณสารแขวนลอยรวมในน้ำพบว่ามีความเพิ่มสูงขึ้น คิดเป็นปริมาณประมาณ 0.42 เท่าเมื่อเทียบกับค่าดัชนีคุณภาพน้ำภายในบ่อก่อนระบายน้ำทิ้งที่ระดับพื้นก้นบ่อ ปริมาณฟอสฟอรัสและไนโตรเจนมีค่าเพิ่มขึ้น 0.37 และ 0.05 เท่าค่าดัชนีคุณภาพน้ำภายในบ่อก่อนระบายน้ำทิ้งที่ระดับพื้นก้นบ่อ ดังนั้นแนวทางการจัดการที่ดีที่สุดเพื่อลดปริมาณสารแขวนลอยในบ่อ ควรมีการจัดการเกี่ยวกับเทคนิคที่จะช่วยลดการรบกวนตะกอนพื้นก้นบ่อ โดยควรวางแผนในการระบายน้ำทิ้งออกจากบ่อจากระดับน้ำตื้นบนสู่ระดับน้ำตื้นล่าง ซึ่งจะสามารถช่วยลดการรบกวนตะกอนพื้นก้นบ่อได้ ทำให้การระบายน้ำทิ้งออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติภายนอกในช่วงระหว่างการเก็บเกี่ยวสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้

ผลการทดลองที่ 3 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำทิ้งจากการเก็บเกี่ยวปลาช่อน ระหว่างกระบวนการตกตะกอน

จากการนำตัวอย่างน้ำทิ้งทั้งหมดทุกระดับความลึก จากระดับผิวน้ำจนถึงพื้นก้นบ่อเลี้ยงปลาช่อนในช่วงระหว่างการเก็บเกี่ยวผลผลิตมารวมกัน และปล่อยให้ตกตะกอนในห้องปฏิบัติการ พบว่าค่าดัชนีคุณภาพน้ำทุกค่าแตกต่างกันระหว่างระยะเวลาที่ตกตะกอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังแสดงผลใน Table 5

Table 5 Drainage water quality parameters (mg/l and % of initial settling) of the last 50 cm over pond bottom after sedimentation setting at different different settling times.

Settling time (Hour)	water quality parameters				
	BOD	Total nitrogen	Total phosphorus	Total ammonia	Total suspended solids
0	89.9±3.89 ^a	3.72±0.45 ^a	0.79±0.062 ^a	4.97±0.23 ^a	1562.6±22.84 ^a
	100%	100%	100%	100%	100%
1	27.5±0.34 ^b	1.84±0.15 ^b	0.355±0.008 ^b	1.234±0.013 ^b	246.7±5.78 ^b
	30.60%	49.50%	44.90%	24.80%	15.80%
6	15.3±0.45 ^c	1.68±0.16 ^{bc}	0.342±0.006 ^{bc}	0.341±0.008 ^c	116.5±7.56 ^c
	17.00%	45.20%	43.30%	6.90%	7.50%
12	12.8±0.15 ^d	1.64±0.18 ^{bc}	0.337±0.007 ^c	0.269±0.012 ^d	105.6±6.73 ^c
	14.20%	44.10%	42.70%	5.40%	6.80%
24	9.7±0.38 ^c	1.60±0.12 ^{bc}	0.335±0.011 ^c	0.260±0.007 ^d	77.8±8.68 ^d
	10.80%	43.00%	42.40%	5.20%	5.00%
48	9.1±0.26 ^c	1.50±0.13 ^d	0.322±0.016 ^d	0.243±0.005 ^c	62.61±8.20 ^d
	10.10%	40.30%	40.80%	4.90%	4.00%

Mean±SD with different superscript letter in column showed significant difference at $p<0.05$.

โดยดัชนีคุณภาพน้ำแต่ละค่าใช้เวลาในการตกตะกอนจนน้ำมีคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำที่จากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดที่กฎหมายกำหนดแตกต่างกัน ซึ่งมีเพียงค่าปริมาณไนโตรเจนรวม ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตั้งแต่เริ่มต้นการตกตะกอนของน้ำแล้ว นอกจากนั้นพบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสรวมใช้ระยะเวลาในการตกตะกอน 1 ชั่วโมงโดยลดลง 55.10 เปอร์เซ็นต์ ค่าบีโอดีและปริมาณแอมโมเนียรวมใช้ระยะเวลาในการตกตะกอน 6 ชั่วโมงโดยลดลง 83.00 และ 93.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนค่าปริมาณสารแขวนลอยรวมในน้ำใช้ระยะเวลามากที่สุดคือ 24 ชั่วโมง โดยลดลง 95.00 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานทดลอง

ของ Teichert-Coddington *et al.* (1999) ที่รายงานผลการตกตะกอนน้ำที่จากบ่อกึ่งให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำได้ในเวลา 24 ชั่วโมงเท่านั้น

เมื่อเปรียบเทียบความเร็วในการตกตะกอนเริ่มต้นของน้ำที่จากบ่อปลาช่อนนี้ กับการศึกษาในบ่อเลี้ยงกึ่งของ Teichert-Coddington *et al.* (1999) พบว่าค่าปริมาณไนโตรเจนรวมและฟอสฟอรัสรวมลดลงและเริ่มคงที่ในเวลาเพียง 1 ชั่วโมงซึ่งใช้น้อยกว่างานวิจัยนี้ถึง 5 ชั่วโมง อาจเกิดจากการเก็บข้อมูลที่ละเอียดกว่า โดยเพิ่มการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในชั่วโมงที่ 1 หลังตกตะกอน ทำให้สามารถเห็นภาพการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจนรวม และปริมาณฟอสฟอรัสรวมที่ตกตะกอนอย่างรวดเร็วได้

ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า สารแขวนลอยในน้ำเป็นปัญหาสำคัญของการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อปลาช่อนมากที่สุด และต้องใช้เวลาอันมากในการตกตะกอน จึงควรหลีกเลี่ยง การรบกวนน้ำหรือการกวนให้ตะกอนที่ระดับพื้นบ่อฟุ้งกระจายเป็นสารแขวนลอยในน้ำ การที่เกษตรกรสูบน้ำด้วยเครื่องพญานาคที่วางปลายท่อดูดน้ำที่ก้นบ่อเป็นการเพิ่มสารแขวนลอยในน้ำที่ควรหลีกเลี่ยง เพราะส่งผลทำให้ค่าคุณภาพน้ำเกือบทุกค่าที่ทำการตรวจวัดไม่ผ่านมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด ตั้งแต่เมื่อเริ่มต้นใช้เครื่องสูบน้ำสูบระบายน้ำทิ้งออกจากบ่อ

ดังนั้น วิธีบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงปลาช่อนระหว่างการเก็บเกี่ยวผลผลิต ที่เป็นรูปธรรม มีประสิทธิภาพ และผ่านเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด และรักษาสีแฉกคือ การตกตะกอนของแข็งและสารแขวนลอย เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนระบายน้ำทิ้งออกจากบ่อ แล้วค่อยๆ ระบายน้ำส่วนบนของบ่อออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกโดยไม่ทำให้ตะกอนฟุ้งกระจายหรือน้ำขุ่น

สรุป

จากผลการศึกษาพบว่า คุณภาพน้ำในบ่อปลาช่อนก่อนการเก็บเกี่ยวผลผลิต มีความแตกต่างกันในทุกระดับความลึก ($p < 0.05$) โดยระดับลึกกว่า 100 เซนติเมตร จากผิวน้ำไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด และวิธีการระบายน้ำออกจากบ่อด้วยเครื่องสูบน้ำโดยวางหัวกะโหลกติดกับพื้นก้นบ่อเพื่อระบายน้ำจากส่วนใกล้พื้นบ่อทำให้ตะกอนฟุ้งกระจาย คุณภาพน้ำทิ้งในภาพรวมตลอดเวลาการระบายน้ำต่ำลง ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน วิธีการบำบัดน้ำทิ้งด้วยการตกตะกอน 24 ชั่วโมงช่วยเพิ่มคุณภาพน้ำทิ้งจนผ่าน

เกณฑ์มาตรฐานได้ทุกตัวชี้วัด อย่างไรก็ตามต้องพัฒนาเทคนิคการระบายน้ำทิ้งที่ไม่รบกวนตะกอนพื้นบ่อให้ฟุ้งกระจาย ไม่ทำให้น้ำขุ่นขี้มูกนี้ แนะนำว่า เกษตรกรควรระบายน้ำตอนบนผิวน้ำออกก่อน โดยอาจใช้ท่อระบายน้ำเป็นลักษณะข้องอ ใช้วิธีการลักน้ำ หากสภาพแวดล้อมเอื้ออำนวย หรือให้ยกปลายหัวกะโหลกท่อสูบน้ำสูงกว่าพื้นก้นบ่อในการระบายน้ำส่วนแรก สำหรับน้ำส่วนใกล้พื้นบ่อซึ่งมีสารอินทรีย์สูงมาก เมื่อมีปริมาณลดน้อยลงมากแล้วจำเป็นต้องทำการบำบัดโดยวิธีการตกตะกอนหรือร่วมกับวิธีการอื่นๆ ก่อนปล่อยน้ำทิ้งสู่สาธารณะ ส่วนตะกอนอาจทำให้แจ้งจำหน่ายเป็นปุ๋ยต่อไป อย่างไรก็ตาม ควรต้องมีการศึกษาเทคนิควิธีการบำบัดน้ำทิ้งให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและต้นทุนต่ำลงต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สทศว) ที่ได้สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่สำนักงานวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิทุกท่านที่ได้บริการช่วยเหลือประสานงานให้นักวิจัยทำงานได้สะดวกด้วยดีตลอดมา และขอขอบพระคุณ ฟาร์มปลาช่อนวิเศษฟาร์ม และฟาร์มที่สุรินทร์ ตำบลห้วยคันแหลน อำเภอวิเศษชัยชาญ จังหวัดอ่างทอง ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ต่างๆสำหรับการศึกษาทดลองในครั้งนี้ และขอขอบคุณคุณพิณทม และคุณสุรพล ที่ได้ช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่างน้ำ และช่วยเหลือในความสะดวกในการเก็บข้อมูลต่างๆ ในช่วงระหว่างการทดลองด้วยดีตลอดมา คณะนักวิจัยต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

เอกสารอ้างอิง

- APHA. 2005. **Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater**. 22th edition. United Books Press, Maryland.
- Ayub, M., Boyd, C.E. and Teichert-Coddington, D. 1993. Effects of urea application, aeration, and drying on total carbon concentrations in pond bottom soils. **The Progressive Fish Culturist** 55(3): 210-213.
- Boyd, C.E. 1995. **Bottom Soils, Sediment and Pond Aquaculture**. Chapman and Hall, New York.
- Cole, B.A. and Boyd, C.E. 1985. Feeding rate, water quality, and channel catfish production in ponds. **The Progressive Fish Culturist** 48(1): 25-29.
- Gooley, G.J., DeSilva, S.S., Hone, P.W., McKinnon, L.J. and Ingram, B.A. 2000. Cage aquaculture in Australia: a developed country perspective with reference to integrated aquaculture development within inland waters, pp. 21-37. *In Proceedings of the First International Symposium on Cage Aquaculture in Asia*. Manila, Philippines.
- Gutierrez-Wing, M.T. and Malone, R.F. 2006. Biological filters in aquaculture: Trends and research directions for freshwater and marine applications. **Aquacultural Engineering** 34(3): 163-170.
- Halver, J.E. and Hardy, R.W. 2002. **Fish Nutrition**. 3rd edition. Academic Press, San Diego.
- Islam, M.S. 2005. Nitrogen and phosphorus budget in coastal and marine cage aquaculture and impacts of effluent loading on ecosystem: review and analysis towards model development. **Marine Pollution Bulletin** 50(1): 48-61.
- Munsiri, P., Boyd, C.E., Teichert-Coddington, D. and Hajek, B.F. 1996. Texture and chemical composition of soils from shrimp ponds near Choluteca, Honduras. **Aquaculture International** 4(2): 157-168.
- National of the Ministry of Natural Resources and Environment. 2007. **Effluent Standard for Inland Aquaculture, dated November 23, B.E.2550 (2007)**. Published documents, National of the Ministry of Natural Resources and Environment. (in Thai).
- Raveh, A. and Avnimelech, Y. 1979. Total nitrogen analysis in water, soil and plant material with persulphate oxidation. **Water Research** 13(9): 911-912.
- Reddy, K.R., Hettiarachchi, H., Parakalla, N.S., Gangathulasi, J. and Bogner, J.E. 2009. Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA. **Waste Management** 29(2): 952-959.
- Schwartz, M.F. and Boyd, C.E. 1994. Channel catfish pond effluents. **The Progressive Fish Culturist** 56(4): 273-281.
- Schwartz, M.F. and Boyd, C.E. 1995. Constructed wetlands for treatment of channel catfish pond effluents. **The Progressive Fish Culturist** 57(4): 255-266.
- Taparhudee, W. 2010. **Construction of aquaculture ponds**. Department of Aquaculture, Faculty of Fisheries, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)

Teichert-Coddington, D.R. 1995. **Estuarine water quality and sustainable shrimp culture in Honduras, Thirteenth Annual Report.**

Available Source: <http://pdacrsp.oregonstate.edu/pubs/Technical/13Techpdf/2.b .1.pdf>, May 9, 2020.

Teichert-Coddington, D.R., Martinez, D. and Ramirez, E. 1996. **Pond Dynamics/Aquaculture, Thirteenth Annual Administrative Report.**

Available Source: <https://aquaculture.oregonstate.edu/sites/aquaculture.oregonstate.edu/files/2022-10/crsp-13thannualadministrativereport.pdf>, May 19, 2021.

Teichert-Coddington, D.R., Rouse, D.B., Potts, A. and Boyd, C.E. 1999. Treatment of harvest discharge from intensive shrimp ponds by settling. **Aquacultural Engineering** 19(3): 147-161.

การพัฒนาโยเกิร์ตซินไบโอติกโดยเยลลี่แก่นตะวัน

Development of Synbiotic Yogurt by Jerusalem Artichoke Jelly

พงศ์สุระ ธัญญเจริญอนุกุล และ อรวัดก์ อูปถัมภานนท์*

Pongsura Thanyacharoen-anukul and Orawan Oupathumpanont *

Received: 15 October 2020, Revised: 31 March 2021, Accepted: 22 June 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาโยเกิร์ตโพรไบโอติก การพัฒนาเยลลี่ฟรีไบโอติกจากแก่นตะวันและการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ปัจจัยที่ทำการศึกษาในการพัฒนาโยเกิร์ตโพรไบโอติกโดยการแปร ปริมาณน้ำตาลซูโครส 3 ระดับ ร้อยละ 6, 8 และ 10 และแปรส่วนผสมหัวเชื้อ 2 ระดับ ร้อยละ 2 และ 4 ในการพัฒนาเยลลี่ฟรีไบโอติกจากแก่นตะวัน ทำการศึกษา ปริมาณคาร์โบไฮเดรต 3 ระดับ ร้อยละ 2.0, 2.5 และ 3.0 และการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยศึกษาสมบัติซินไบโอติก คุณค่าทางโภชนาการและการยอมรับผลิตภัณฑ์ พบว่า น้ำตาลซูโครส ร้อยละ 6 และ หัวเชื้อ ร้อยละ 2 เป็นสูตรที่เหมาะสมในการผลิตโยเกิร์ตโพรไบโอติก ส่วนปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่เหมาะสมในการผลิต เยลลี่ฟรีไบโอติกจากแก่นตะวัน คือ ร้อยละ 3.0 การศึกษาสมบัติซินไบโอติก พบว่า ปริมาณเยลลี่แก่นตะวัน ร้อยละ 35 ของปริมาณโยเกิร์ต เป็นปริมาณที่เหมาะสม สามารถออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* TISTR 117 มีคุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ พลังงานทั้งหมด 98.45 กิโลแคลอรี ไขมันทั้งหมด 2.65 กรัม คาร์โบไฮเดรต 15.93 กรัม โปรตีน 2.27 กรัม ใยอาหาร 0.71 กรัม วิตามิน A 27.90 ไมโครกรัม วิตามิน B1 0.050 มิลลิกรัม วิตามิน B2 0.094 มิลลิกรัม แคลเซียม 93.58 มิลลิกรัม และการทดสอบผู้บริโภคจำนวน 100 คน มีความชอบอยู่ในระดับ ชอบปานกลาง

คำสำคัญ: ซินไบโอติก, เยลลี่แก่นตะวัน, โยเกิร์ต, การยับยั้งเชื้อ

ABSTRACT

The objectives of this study are to develop probiotic yogurt, prebiotic Jerusalem artichoke jelly, and to study the product quality. Sucrose with 3 different level (6%, 8%, and 10%) and 2 levels of culture starter contents (2% and 4%) were studied for development of probiotic yogurt. For the development of prebiotic Jerusalem artichoke jelly, carrageenan content at 3 levels (2.0%, 2.5%, and 3%) were assessed. To study the product quality in anti-bacterial property on *Escherichia coli* TISTR 117, nutritional values, and consumer preference were determined. The results showed that the combination of 6 percent of sucrose and 2 percent of culture starter gave the optimum recipe. The optimum carrageenan was 3 percent. The result also showed that 35 percent of Jerusalem artichoke jelly in yogurt had anti-bacterial property. The product contained total energy of 98.45 calories, 2.65g fat, 15.93g carbohydrate, 2.27g protein, 0.71g dietary fiber, 27.90µg vitamin A, 0.050µg vitamin B1, 0.094µg vitamin B2 and 93.58µg calcium. Finally, preference evaluation from 100 consumers showed the product was liked moderately.

Key words: synbiotic, Jerusalem artichoke jelly, yogurt, anti-bacterial

บทนำ

ปัจจุบันเป้าหมายหลักของการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร คือ การเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการเพื่อประโยชน์ต่อผู้บริโภค (National food institute, 2019) ดังนั้น การใช้สมบัติซินไบโอติก ถือเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารให้เหมาะสมกับผู้บริโภคในปัจจุบัน เพื่อให้ผู้บริโภคมีสุขภาพที่ดีขึ้น โดยเฉพาะการเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียที่ก่อโรคในระบบทางเดินอาหาร ทำให้สามารถลดอาการอักเสบบริเวณลำไส้ รวมถึงยังช่วยลดโอกาสการเกิดภาวะท้องเสียที่มีผลมาจากแบคทีเรียชนิดก่อโทษโดยกระบวนการเกิดสมบัตินไบโอติกนั้นจะเกิดจากการรวมตัวกันของ 2 องค์ประกอบหลัก คือ โพรไบโอติกและพรีไบโอติก ทำให้เกิดสมบัตินพิเศษตัวใหม่ที่เรียกว่า ซินไบโอติก โดยสมบัตินดังกล่าวจะส่งผลให้ผู้บริโภคได้รับคุณประโยชน์ต่อร่างกายมากยิ่งขึ้น

โพรไบโอติก เป็นสมบัตินที่เกิดจากอาหารที่มีแบคทีเรียแลคติกชนิดที่ไม่เป็นโทษต่อร่างกายในจำนวนที่ไม่น้อยกว่า 10^6 CFU/g (Ministry of public health, 2011) ซึ่งการพบแบคทีเรียแลคติกในปริมาณดังกล่าวส่วนใหญ่มักจะพบได้จากอาหารที่เป็นผลิตภัณฑ์จากน้ำนมหมัก เช่น นมเปรี้ยวและโยเกิร์ต เป็นต้น ทั้งสองอย่างนี้สามารถตรวจพบแบคทีเรียแลคติกในกลุ่มของ *Lactobacillus* sp. และ *Bifidobacterium* sp. หรือพบได้จากผลิตภัณฑ์อาหารหมักดองที่ไม่ผ่านการทำให้สุกเพราะการให้ความร้อนที่สูงจะทำให้แบคทีเรียแลคติกตายลงได้ ดังนั้นการรับประทานอาหารที่เป็นโพรไบโอติกโดยมีแบคทีเรียที่มีชีวิตจะทำให้ระบบขับถ่ายของร่างกายทำงานเป็นปกติ อีกทั้งยังสามารถป้องกันมะเร็งบางชนิดในลำไส้และสามารถเพิ่มโอกาสในการยับยั้งแบคทีเรีย *Escherichia coli* ที่เป็นสาเหตุให้มนุษย์ต้องพบกับการเจ็บป่วย

พรีไบโอติก จัดอยู่ในกลุ่มอาหารที่ให้ประโยชน์ต่อสุขภาพ นอกเหนือไปจากการได้รับสารอาหารจาก

คุณค่าทางโภชนาการของอาหาร (Functional Food) เช่น สามารถลดระดับคอเลสเตอรอล ช่วยลดการดูดซึมน้ำตาลเข้าสู่เลือด ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียที่ก่อโรคและช่วยให้ระบบขับถ่ายทำงานเป็นปกติ เป็นต้น (Oupathumpanont, 2015) และสามารถพบพรีไบโอติกจากพืชที่มีสารจำพวก อินนูลิน เช่น แคนตาลิน กกล้วย ถั่วเหลือง ถั่วขาวและเมล็ดเจีย เป็นต้น โดยอินนูลินจะทำหน้าที่เป็นอาหารให้กับแบคทีเรียในลำไส้ สามารถเพิ่มจำนวนและเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ก่อโรคได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของศุภนิช (Sittibush, 2012) ได้ศึกษาผลของพรีไบโอติกต่อการเหลือรอดของเชื้อ *Lactobacillus acidophilus* และ *Lactobacillus casei* ในไอศกรีมซินไบโอติก พบว่า การเติมอินนูลินในไอศกรีมระดับสูงสุด คือ ปริมาณร้อยละ 4 สามารถเพิ่มการเหลือรอดของจุลินทรีย์ *Lactobacillus acidophilus* และ *Lactobacillus casei*

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำทั้ง 2 องค์ประกอบ คือ พรีไบโอติกจากแบคทีเรียแลคติกในโยเกิร์ตและพรีไบโอติกจากอินนูลินในแคนตาลิน ที่สามารถพบสารอินนูลินมากถึง ร้อยละ 14-19 (Tanjor, 2012) ซึ่งเป็นสารประกอบอาหารที่ให้ประโยชน์ทางโภชนาการและจัดอยู่ในกลุ่มของอาหารที่มีส่วนช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพที่ดีต่อร่างกาย (Functional Food) เช่น สามารถลดระดับการดูดซึมน้ำตาลเข้าสู่เลือด สามารถลดระดับคอเลสเตอรอล สามารถลดความเสี่ยงของการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ และสามารถควบคุมปริมาณพลังงานเข้าสู่ร่างกาย เป็นต้น (Welch *et al.*, 2008) มาพัฒนาร่วมกันให้เกิดเป็นสมบัติใหม่ คือ สมบัติซินไบโอติกเพื่อให้ผู้บริโภคได้รับประทานผลิตภัณฑ์ที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งแบคทีเรียที่ก่อโรคในลำไส้และสามารถให้ประโยชน์ที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์ในท้องตลาดทั่วไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การพัฒนาโยเกิร์ตโพรไบโอติก

การพัฒนาโยเกิร์ตโพรไบโอติก ปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ ปริมาณน้ำตาลซูโครสและปริมาณหัวเชื้อ โดยแปรปริมาณน้ำตาลซูโครสเป็น 3 ระดับ คือ ร้อยละ 6, 8 และ 10 แปรผันปริมาณหัวเชื้อเป็น 2 ระดับ คือ ร้อยละ 2 และ 4 ของปริมาณนมสดพาสเจอร์ไรส์ คัดแปลงสูตรจากงานวิจัยของเมธาวิ (Anawachkul, 2008) วางแผนการทดลองแบบ Factorial in CRD จะได้สูตรทั้งหมด 6 สูตร ตามขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอน

ผสมนมสดพาสเจอร์ไรส์ นมผง ร้อยละ 5 ของน้ำหนักนมสดและน้ำตาลซูโครสตามที่กำหนด นำไปพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ทิ้งให้อุณหภูมิลดลงถึง 43 องศาเซลเซียส เติมหิวเชื้อโยเกิร์ตตามที่กำหนด บ่มที่อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส จนกระทั่งนมที่หมักไว้มีค่า pH อยู่ระหว่าง 4.0 - 4.5 สุ่มตัวอย่างออกมาวิเคราะห์ค่า pH ทุก 2 ชั่วโมง และเก็บที่อุณหภูมิ 3 - 5 องศาเซลเซียส ไม่เกิน 24 ชั่วโมง

นำไปวิเคราะห์ค่าทางกายภาพ ได้แก่ วิเคราะห์ค่าสี L*, a* และ b* ด้วยเครื่อง Hunter Lab รุ่น CFE20126 และวิเคราะห์ค่าความหนืด ด้วยเครื่อง Rotational Viscometer รุ่น NDJ-5S / JEDTO วิเคราะห์ค่าทางเคมี ได้แก่ วิเคราะห์ค่า pH ด้วยเครื่อง pH Meter และวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ด้วยเครื่อง Hand Refractometer ตรา Yieryi รุ่น Master-3M และวิเคราะห์ค่าทางจุลินทรีย์ ได้แก่ วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียแลคติก ด้วยวิธี Plate Count

คัดเลือกสูตรที่เหมาะสมในการผลิตโยเกิร์ตโพรไบโอติก โดยพิจารณาสูตรที่มีเชื้อแบคทีเรียแลคติกมากกว่า 10^6 CFU/g ขึ้นไป

2. การพัฒนาเยลลี่ฟรีไปโอติกจากแก่นตะวัน

การพัฒนาเยลลี่ฟรีไปโอติกจากแก่นตะวัน ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ปริมาณคาราจีแนน โดยแปรผันปริมาณ คาราจีแนนเป็น 3 ระดับ คือ ร้อยละ 2.0, 2.5 และ 3.0 ของปริมาณน้ำผสมแก่นตะวัน คัดแปลงสูตรจากงานวิจัยของกุสุมา (Na Ayutthaya, 2016) วางแผนการทดลองแบบ CRD จะได้สูตรทั้งหมด 3 สูตร ตามขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอน

ทำความสะอาดแก่นตะวัน ปอกเปลือกและหั่นเป็นชิ้นขนาดเล็ก บั่นรวมในอัตราส่วน น้ำ : แก่นตะวัน (1.0 : 1.0 โดยน้ำหนัก) เดิมสารให้ความหวาน พาลาทีน ร้อยละ 12 และคาราจีแนนตามปริมาณที่กำหนด นำไปพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที บรรจุใส่พิมพ์ ทั้งให้เย็น ตัดชิ้นขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร นำมาบรรจุในกล่อง เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 3 - 5 องศาเซลเซียส

นำไปวิเคราะห์ค่าทางกายภาพ ได้แก่ วิเคราะห์ค่าสี L^* , a^* และ b^* ด้วยเครื่อง Hunter Lab รุ่น CFE20126 วิเคราะห์ความแข็งและเหนียว ด้วยเครื่อง Texture Analysis รุ่น TAXT Plus โดยใช้หัวรีซีมี 0.5 เซนติเมตร ระยะกด 10 เซนติเมตร และวิเคราะห์ค่าทางเคมี ได้แก่ วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ด้วยเครื่อง Hand Refractometer ตรา Yieryi รุ่น Master-3M

ทดสอบความชอบต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของเยลลี่ฟรีไปโอติกจากแก่นตะวัน ทั้ง 3 สูตรกับผู้ทดสอบจำนวน 50 คน อายุ 15 ปี ขึ้นไป ด้วยวิธี Central Location Test ในพื้นที่เขตรังสิต จังหวัดปทุมธานี โดยใช้แบบสอบถามร่วมกับตัวอย่าง และให้คะแนนความชอบแบบ 9 Point Hedonic Scale ต่อคุณลักษณะด้านสี กลิ่น โดยรวม ความแข็ง ความเหนียวและความชอบโดยรวม และคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมในการผลิตเยลลี่ฟรีไปโอติกจากแก่นตะวัน

โดยพิจารณาจากผลคะแนนความชอบของผู้ทดสอบ ด้านความแข็ง ความเหนียวและความชอบโดยรวม

3. การศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์

การศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยศึกษาสมบัติขึ้นไปโอติก คุณค่าทางโภชนาการและการยอมรับผลิตภัณฑ์ ดังนี้

3.1 สมบัติขึ้นไปโอติก

การศึกษาสมบัติขึ้นไปโอติก ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ปริมาณเยลลี่ฟรีไปโอติกเสริมแก่นตะวัน โดยแปรผันเป็น 3 ระดับ คือ ปริมาณเยลลี่ฟรีไปโอติกเสริมแก่นตะวัน ร้อยละ 35, 40 และ 45 ของปริมาณโยเกิร์ตโพรไปโอติก วางแผนการทดลองแบบ CRD จะได้สูตรทั้งหมด 3 สูตร แล้วนำไปวิเคราะห์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia Coli* TISTR 117 ด้วยวิธี Agar Well Diffusion ตามวิธีการของ Jahangirian *et al.* (2013)

นำทั้ง 3 สูตร ไปทดสอบความชอบต่อคุณลักษณะประสาทสัมผัสกับผู้ทดสอบจำนวน 50 คน อายุ 15 ปี ขึ้นไป ด้วยวิธี Central Location Test ในพื้นที่เขตรังสิต จังหวัดปทุมธานี โดยใช้แบบสอบถามร่วมกับตัวอย่างและให้คะแนนความชอบแบบ 9 Point Hedonic Scale ต่อคุณลักษณะด้านกลิ่นโดยรวม รสชาติโดยรวม เนื้อสัมผัสโดยรวม ความเหมาะสมของปริมาณเยลลี่ต่อโยเกิร์ตและความชอบโดยรวม

คัดเลือกสูตรที่เหมาะสม โดยพิจารณาการออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* TISTR 117 และผลคะแนนความชอบจากผู้ทดสอบ ด้านความชอบโดยรวมและความเหมาะสมของปริมาณเยลลี่ต่อโยเกิร์ต

3.2 คุณค่าทางโภชนาการ

การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ โดยนำไปวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต ตามวิธี (AOAC, 2000) วิตามินบี 1 ตามวิธีของ Junaid *et al.* (2008) วิตามินบี 2 ตามวิธี

ของ Junaid *et al.* (2008) แคลเซียม ตามวิธี (AOAC, 2016) โปรตีน ตามวิธี (AOAC, 2016) ไขมัน ตามวิธี (AOAC, 2016) เยื่อใย ตามวิธี (AOAC, 2016) ธาตุเหล็ก ตามวิธี (AOAC, 2016) โซเดียม ตามวิธี (AOAC, 2016) และถั่ว ตามวิธี (AOAC, 2016)

3.3 การยอมรับผลิตภัณฑ์

การศึกษาการยอมรับผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตเยลลี่แก่นตะวัน กับผู้บริโภคจำนวน 100 คน อายุ 15 ปี ขึ้นไป ด้วยวิธี Central Location Test ในพื้นที่เขตรังสิต จังหวัดปทุมธานี โดยใช้แบบสอบถามร่วมกับตัวอย่างและให้คะแนนความชอบแบบ 9 Point Hedonic Scale ต่อคุณลักษณะด้านกลิ่นโดยรวม รสชาติโดยรวม เนื้อ

สัมผัสโดยรวม ความชอบโดยรวมและความสนใจต่อผลิตภัณฑ์ ดัดแปลงวิธีจากงานวิจัยของ Sribureeruk (2010)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การพัฒนาโยเกิร์ตโพรไบโอติก

การพัฒนาโยเกิร์ตโพรไบโอติก โดยศึกษาปริมาณน้ำตาลและหัวเชื้อที่เหมาะสมในการผลิตโยเกิร์ตโพรไบโอติก ได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงใน Table 1 และ Figure 1 และ 2 ดังนี้

การวิเคราะห์ค่าทางกายภาพ ได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงใน Table 1 ดังนี้

Table 1 Physical properties of yogurt

Formula	Starter (%)	Sucrose (%)	L*	a*	b*	Viscosity (cP)
1	2	6	89.15 ^a ±0.37	-2.25 ^{ab} ±0.02	8.17 ^b ±0.02	2922 ^a ±70.95
2	4	6	88.55 ^b ±0.08	-2.26 ^b ±0.01	7.30 ^d ±0.09	2859 ^{ab} ±130.00
3	2	8	89.12 ^a ±0.22	-2.34 ^c ±0.02	8.26 ^a ±0.02	2899 ^{ab} ±80.00
4	4	8	88.39 ^b ±0.58	-2.34 ^c ±0.01	8.31 ^a ±0.02	2746 ^{ab} ±120.55
5	2	10	88.64 ^{ab} ±0.06	-2.35 ^c ±0.02	7.63 ^c ±0.03	2772 ^{ab} ±135.77
6	4	10	86.43 ^c ±0.07	-2.22 ^a ±0.02	5.27 ^c ±0.02	2689 ^b ±127.67

Characters that differ vertical represent statistically significant differences ($p < 0.05$)

การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ พบว่าโยเกิร์ตทั้ง 6 สูตร มีค่า L* อยู่ระหว่าง 86.43 - 89.15 โดยความสว่างของโยเกิร์ตส่วนใหญ่เกิดจากโปรตีนเคซีนในนมที่มีลักษณะเป็นสีขาว (Chaiprasop, 2003) ส่วน ค่า a* มีค่าอยู่ระหว่าง -2.35 - -2.22 เป็นค่าคิดลบทำให้มีโทนสีออกไปทางเฉดสีเขียว โดยโทนสีที่เกิดขึ้นนี้มาจากโรโบฟลาวินหรือวิตามินบี 2 ในนํ้านม (Yongsamit, 1997) และ ค่า b* มีค่าอยู่ระหว่าง 5.27 - 8.31 ได้ค่าเป็นบวกทำให้มีโทนสีออกไปทางเฉดสี

เหลือง โดยเฉดสีเหลืองที่พบมีผลมาจากวิตามินเอที่อยู่ในรูปของเบต้าแคโรทีนในนมเช่นเดียวกัน และจากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าสี L*, a* และ b* ของโยเกิร์ตทุกสูตรมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากในกระบวนการหมักโยเกิร์ตแบคทีเรียแลคติกจะใช้น้ำตาลแลคโตสเปลี่ยนเป็นกรดแลคติกและสารชนิดอื่นๆ เช่น Hydrogen Peroxide และ Diacetyl เป็นต้น สารเหล่านี้จะมีผลต่อสี รสและกลิ่นที่เป็นแบบเฉพาะของโยเกิร์ต (Pornchaloempong, 2020) เมื่อปริมาณ

หัวเชื้อโยเกิร์ตเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีแบคทีเรียแลคติกมีจำนวนมากขึ้นเช่นกัน โดยปริมาณโยเกิร์ต 1 กรัม จากตัวอย่างในการวิจัยครั้งนี้สามารถตรวจพบแบคทีเรียแลคติกถึง 10^7 CFU/g จึงทำให้ค่า L^* , a^* และ b^* มีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าความหนืดของโยเกิร์ตมีค่าอยู่ระหว่าง 2689 - 2922 cP มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากการสลายตัวของน้ำตาลซูโครสเมื่อถูกความร้อนจากอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มและกรดอินทรีย์ที่แบคทีเรียในโยเกิร์ตผลิตออกมาในระหว่างการหมัก ได้แก่ กรดแลคติก กรดแอสซิดิกและกรดโพรพิโอนิก ทำให้โมเลกุลของน้ำตาลซูโครสแตกตัวออกมาเป็นกลูโคสและฟรุก

โตส (Siriphok, 1994) เมื่อโมเลกุลของซูโครสแตกตัวออกมาจึงทำให้แบคทีเรียแลคติกสามารถใช้กลูโคสร่วมกับแลคโตสในการเจริญเติบโต (Wattanasin, 2002) และผลิตกรดได้มากขึ้นจึงทำให้โครงสร้างร่างแหของตะกอนโปรตีนสูญเสียความแข็งแรงเพราะกรดที่สูงขึ้นและส่งผลให้ความข้นหนืดของโยเกิร์ตลดลง (Rey *et al.*, 1996) ด้วยเหตุนี้โยเกิร์ตในท้องตลาด จึงมีการเพิ่มสารให้ความคงตัว (Stabilizer) เพื่อรักษาโครงสร้างของโยเกิร์ตให้แข็งแรง สามารถลดการแยกชั้นและทำให้โยเกิร์ตมีลักษณะที่เนียนยิ่งขึ้น (Vongsawasdi, 2019)

การวิเคราะห์ค่าทางเคมี ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงใน Figure 1 และ 2 ดังนี้

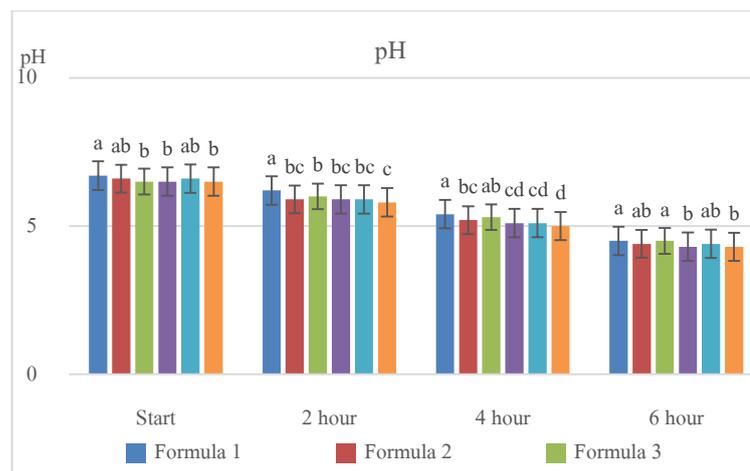


Figure 1 pH change of yogurt (start - 6 hour)

การวิเคราะห์ค่า pH พบว่า ทุกๆ 2 ชั่วโมง ค่า pH ของโยเกิร์ตทั้ง 6 สูตร มีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งในชั่วโมงที่ 6 ทุกสูตรมีค่า pH อยู่ระหว่าง 4.3 - 4.5 สอดคล้องกับผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตที่ได้มาตรฐานจะต้องมีค่า pH อยู่ระหว่าง 4.0 - 4.5 (Waeohongsa, 1997) โดยค่า pH ที่ลดลงในแต่ละชั่วโมง เป็นผลมาจาก

ในระหว่างกระบวนการหมักโยเกิร์ต ที่อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส แบคทีเรียแลคติกจะใช้น้ำตาลแลคโตสในนมผลิตกรดแลคติกและกรดอินทรีย์ชนิดอื่นๆ จึงทำให้ค่า pH ในแต่ละชั่วโมงของโยเกิร์ตมีทิศทางที่ลดลงตามลำดับ (Food network solution, 2020)

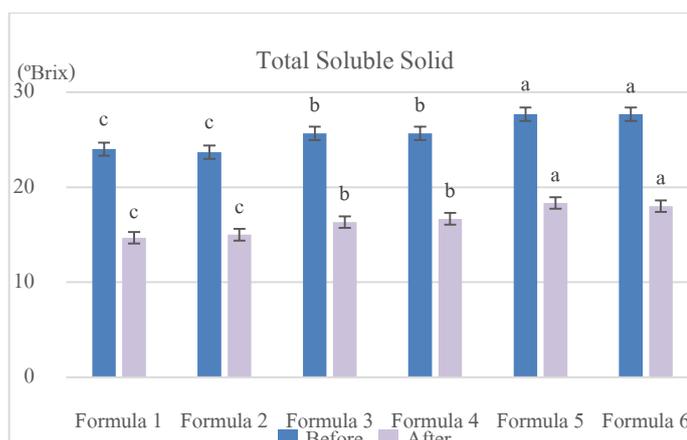


Figure 2 Total soluble solid before and after fermentation

การวิเคราะห์ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ($^{\circ}$ Brix) พบว่า หลังจากการบ่มชั่วโมงที่ 6 ค่าบrixในโยเกิร์ตมีแนวโน้มลดลงตามระดับการแปรผันน้ำตาลซูโครส โดยค่าบrixที่ลดลงนั้นมีผลมาจากการแตกตัวของน้ำตาลซูโครสเมื่อถูกความร้อนจากอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มและกรดอินทรีย์ที่แบคทีเรียในโยเกิร์ตผลิตออกมา ได้แก่ กรดแลคติก กรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิก ทำให้โมเลกุลของ

น้ำตาลซูโครสแตกตัวออกมาเป็นกลูโคสและฟรุกโตส (Sinthawalai, 1982) เมื่อโมเลกุลของซูโครสแตกตัวออกมาจึงทำให้แบคทีเรียแลคติกสามารถใช้อิทธิพลร่วมกับแลคโตสในการเจริญเติบโตต่อไปได้ (Siriphok, 1994) และ (Wattanasin, 2002) เป็นผลทำให้ค่าบrixของโยเกิร์ตหลังการบ่มในชั่วโมงที่ 6 ลดลง

การวิเคราะห์ค่าทางจุลินทรีย์ ได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงใน Table 2 ดังนี้

Table 2 The quantity of lactic acid bacteria in yogurt

Formula	Starter (%)	Sucrose (%)	Lactic acid bacteria* (CFU/g)
1	2	6	9.8×10^{7a}
2	4	6	5.1×10^{7c}
3	2	8	1.6×10^{7f}
4	4	8	5.7×10^{7b}
5	2	10	4.6×10^{7d}
6	4	10	4.1×10^{7c}

* Characters that differ vertical represent statistically significant differences ($p < 0.05$)

การวิเคราะห์ค่าจุลินทรีย์ พบว่า ปริมาณแบคทีเรียแลคติกของโยเกิร์ตทั้ง 6 สูตร ในชั่วโมงที่ 6 มีสมบัติเป็นโพรไบโอติก โดยพบปริมาณแบคทีเรียแลคติกมากกว่า 10^6 CFU/g สอดคล้องกับข้อกำหนด

ของกระทรวงสาธารณสุขเกี่ยวกับอาหารโพรไบโอติก ต้องตรวจพบปริมาณแบคทีเรียที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายไม่น้อยกว่า 10^6 CFU/g (Ministry of public health, 2011) ดังนั้นจึงเลือก สูตรที่ 1 เป็นสูตรที่

เหมาะสม เนื่องจากมีปริมาณน้ำตาลซูโครสและหัวเชื้อโยเกิร์ตน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 6 และ 2 โดยพบปริมาณแบคทีเรียแลคติก 9.8×10^7 CFU/g สอดคล้องกับการใช้น้ำตาลซูโครสและหัวเชื้อที่เหมาะสม คือ น้ำตาลซูโครสอยู่ในช่วงร้อยละ 5 - 10 และหัวเชื้ออยู่ในช่วงร้อยละ 2 - 5 สามารถทำให้แบคทีเรียแลคติกเจริญเติบโตได้ดีและได้โยเกิร์ตที่มีลักษณะตรงตามมาตรฐาน คือ มีสีขาว ได้กลิ่นหอม นุ่มหนาก มีลักษณะขุ่นหนืดและเนื้อสัมผัสเนียน (Rungsardthong, 2000)

2. การพัฒนาเยลลี่ฟรีไบโอติกจากแก่นตะวัน

การพัฒนาเยลลี่ฟรีไบโอติกจากแก่นตะวัน โดยศึกษาปริมาณคาราจีแนนที่เหมาะสมในการผลิตเยลลี่ฟรีไบโอติกจากแก่นตะวัน ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงใน Table 3 ดังนี้

การวิเคราะห์ค่าทางกายภาพและทางเคมี ได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงใน Table 3 ดังนี้

Table 3 Physical and chemical properties of jerusalem artichoke jelly

Properties	Carrageenan (2.0%)	Carrageenan (2.5%)	Carrageenan (3.0%)
L*	69.17 ^a ±0.06	64.87 ^b ±0.04	63.28 ^c ±0.06
a*	0.01 ^b ±0.01	0.68 ^a ±0.01	0.65 ^a ±0.03
b*	11.22 ^c ±0.01	12.91 ^b ±0.03	13.78 ^a ±0.05
Hardness* (N)	5.31 ^c ±0.19	7.15 ^b ±0.38	10.11 ^a ±0.60
Gumminessns (N)	0.32±0.64	0.38±0.25	0.46±0.12
Total soluble solid ^{ns} (°Brix)	19.67±0.58	19.33±0.58	19.33±0.58

Characters that differ vertical represent statistically significant differences ($p < 0.05$)

ns = represent not statistically significant ($p > 0.05$)

การวิเคราะห์ค่าทางกายภาพ พบว่า เยลลี่แก่นตะวันทั้ง 3 สูตร มีค่า L* อยู่ระหว่าง 63.28 - 69.17 มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยค่าความสว่างมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณคาราจีแนน ทั้งนี้เนื่องจากคาราจีแนน มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง (Buadec, 2010) เมื่อใส่คาราจีแนนมากขึ้นจึงทำให้ความสว่างของเยลลี่ลดลง อีกทั้งยังสอดคล้องกับผลของค่า b* มีค่าอยู่ระหว่าง 11.22 - 13.78 ได้ค่าเป็นบวกทำให้มีเจดสีไปทางสีเหลือง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีแนวโน้มสูงขึ้นตามลำดับเมื่อมีการเพิ่มปริมาณคาราจีแนน โดยเจดสีเหลืองที่เกิดขึ้นมีผลมาจากสีของคาราจีแนนที่มี

ลักษณะเป็นสีเหลืองอ่อน (Buadec, 2010) ค่า a* มีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 - 0.68 ได้ค่าเป็นบวก ทำให้มีสีออกไปทางเจดสีแดง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนค่าความแข็งและความเหนียวของเยลลี่แก่นตะวันทั้ง 3 สูตร พบว่า ค่าความแข็ง (Hardness) มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยความแข็งของเยลลี่มีทิศทางสูงขึ้นตามลำดับการเพิ่มปริมาณคาราจีแนน สอดคล้องกับงานวิจัยของกฤษณา (Na Ayutthaya, 2016) ได้ศึกษา การพัฒนาผลิตภัณฑ์เยลลี่ชัญพืชเพื่อสุขภาพ พบว่า เมื่อเพิ่มระดับคาราจีแนนลงในเยลลี่ชัญพืชจะส่งผลให้เยลลี่มีความแข็งเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เพราะขณะที่คาราจีแนนละลายในน้ำ

อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะเกิดโครงสร้างการเกาะตัวของอิมัลชันและเมื่อเย็นลงจะเกิดเป็นร่างแห 3 มิติ (Polymer Network) ทำให้เกิดการแข็งตัวของเจลที่สูงขึ้น (Nopcharoonsri, 2011) แต่ทั้งนี้ก็ไม่ควรเพิ่มการเจือในปริมาณที่สูงจนเกินไปเพราะการใส่คาราจีแนนที่สูงกว่าร้อยละ 3.5 อาจทำให้เยลลี่เกิดการแตกเพราะได้ง่าย (Sirisee, 2010) ส่วนค่าความเหนียว (Gumminess) ของเยลลี่แค้นตะวันทั้ง 3 สูตร กลับพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) โดยลักษณะของเยลลี่แค้นตะวันทุกสูตรจะมีความเหนียวเพียงเล็กน้อยซึ่งมีสาเหตุมาจากลักษณะเฉพาะของแค้นตะวันที่เป็นกากใยอาหารไม่ละลายในน้ำเข้าไป

ขบวนการเกิดโครงสร้างเกลียว (Helix) ขณะก่อตัวรวมเป็นเจลทำให้เยลลี่ที่ได้มีความเหนียวน้อยลง (Ansuree, 2012)

การวิเคราะห์ค่าทางเคมี พบว่า การวิเคราะห์ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ($^{\circ}$ Brix) ของเยลลี่แค้นตะวันทั้ง 3 สูตรไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) เนื่องจากการแปรผันระดับสารทดแทนความหวานของเยลลี่แค้นตะวันมีปริมาณเท่ากันทั้ง 3 สูตร ผลของค่าปริมาตร จึงไม่แตกต่างกัน

การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสเยลลี่แค้นตะวัน ได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงใน Table 4 ดังนี้

Table 4 The liking score (n = 50) of jerusalem artichoke jelly

Sensory Attribute	Carrageenan (2.0%)	Carrageenan (2.5%)	Carrageenan (3.0%)
Color ^{ns}	6.26±1.53	6.62±1.28	6.62±1.59
Flavor ^{ns}	6.20±1.49	6.46±1.52	6.52±1.78
Hardness	5.86 ^b ±1.37	6.40 ^{ab} ±1.51	6.74 ^a ±1.37
Gumminess	5.50 ^b ±1.49	6.04 ^{ab} ±1.48	6.28 ^a ±1.84
Overall liking	6.22 ^b ±1.18	6.50 ^b ±1.44	7.10 ^a ±1.36

Characters that differ level represent statistically significant differences ($p<0.05$)

การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสเยลลี่แค้นตะวัน พบว่า คุณลักษณะสี (Color) และกลิ่น (Flavor) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) เนื่องจากปริมาณแค้นตะวันและสารทดแทนความหวานที่ใช้ผลิตเยลลี่ มีปริมาณเท่ากัน ทำให้ผลคะแนนจากผู้ทดสอบจึงไม่แตกต่างกัน ส่วนความชอบด้านความแข็ง (Hardness) ความเหนียว (Gumminess) และความชอบโดยรวม (Overall liking) มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p<0.05$) โดยคะแนนด้านความแข็ง ความเหนียวและความชอบโดยรวม มีทิศทางที่สูงขึ้นตามลำดับการแปรปริมาณ

คาราจีแนน จึงทำให้เยลลี่แค้นตะวันที่เติมคาราจีแนนร้อยละ 3.0 มีผลคะแนนความชอบมากที่สุดสอดคล้องกับคุณลักษณะที่ดีของเยลลี่จะต้องมีเนื้อสัมผัสที่แข็งและเหนียวอย่างพอเหมาะเพื่อให้ผู้บริโภคได้เพลิดเพลินต่อการรับประทาน (Supimaros, 2000) ดังนั้นจึงเลือกสูตรเยลลี่แค้นตะวันที่เติมคาราจีแนนร้อยละ 3.0 เป็นสูตรที่เหมาะสม เนื่องจากได้รับคะแนนความชอบด้านความแข็ง ความเหนียวและความชอบโดยรวมสูงสุด ดังแสดงใน Table 4

3. การศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์

การศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยศึกษา
สมบัติขึ้นไบโอดีท คุณค่าโภชนาการและการยอมรับ

ผลิตภัณฑ์ ได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงใน Table 5
และ Figure 3 ดังนี้

3.1 สมบัติขึ้นไบโอดีท ได้ผลการวิเคราะห์
ดังแสดงใน Table 5 ดังนี้

Table 5 Clear zone of synbiotic quality in yogurt with jerusalem artichoke jelly

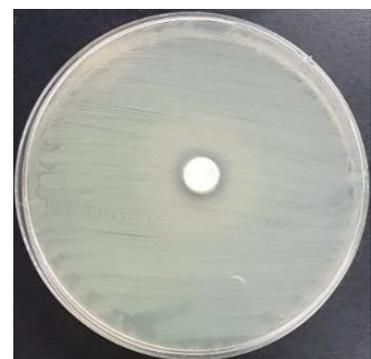
Formula	Clear zone (mm.)
35%	11.67
40%	10.33
45%	10.67



35%



40%



45%

Figure 3 Clear zone of synbiotic quality in yogurt with jerusalem artichoke jelly

การทดสอบการเกิดรัศมียับยั้งเชื้อ (Clear Zone) พบว่า โยเกิร์ตเคลือบแผ่นตะวันมีรัศมียับยั้งเชื้อ (Clear Zone) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 10.33 - 11.67 มิลลิเมตร ทุกสูตรมีสมบัติขึ้นไบโอดีท เนื่องจากทั้ง 3 สูตร มีส่วนประกอบของสมบัติโพรไบโอดีทและพรีไบโอดีทอยู่และสามารถตรวจพบรัศมียับยั้งเชื้อมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ก่อโรค *Escherichia coli* TISTR 117 ทั้งนี้เพราะเมื่อโพรไบโอดีทรวมตัวกับ

พรีไบโอดีทในปริมาณ 8-20 กรัม (Gilliland, 2001) และ (Thitapoka, 2009) จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแบคทีเรียแลคติกในการกำจัดแบคทีเรียที่ก่อโรคในลำไส้ได้มากขึ้น (Ben *et al.*, 2004) และ (Bounnik *et al.*, 2006)

การทดสอบทางประสาทสัมผัสปริมาณเยลลี่แผ่นตะวันในโยเกิร์ตขึ้นไบโอดีท ได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงใน Table 6 ดังนี้

Table 6 The liking score (n = 50) of synbiotic yogurt with jerusalem artichoke jelly

Sensory Attribute	jelly	jelly	jelly
	(35%)	(40%)	(45%)
Flavor ^{ns}	6.50±1.42	6.68±1.45	6.26±1.43
Tast ^{ns}	6.92±1.16	6.92±1.14	6.46±1.57
Texture	6.42 ^{ab} ±1.37	6.70 ^a ±1.07	6.08 ^b ±1.47
Quantity of jerusalem artichoke jelly	6.60 ^a ±1.23	6.86 ^a ±1.21	6.02 ^b ±1.56
Overall liking	6.98 ^a ±1.06	7.02 ^a ±0.98	6.28 ^b ±1.62

Characters that differ level represent statistically significant differences ($p < 0.05$)

การทดสอบทางประสาทสัมผัสปริมาณเยลลี่แก่ตะวันในโยเกิร์ตซินไบโอติก พบว่า ผู้ทดสอบจำนวน 50 คน ให้คะแนนกลิ่น (Flavor) และรสชาติ (Tast) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส (Texture) สัดส่วนที่เหมาะสมของปริมาณเยลลี่แก่ตะวันต่อโยเกิร์ต (Quantity of jerusalem artichoke jelly) และความชอบโดยรวม (Overall liking) พบว่า ผู้ทดสอบส่วนใหญ่ให้คะแนนความชอบโยเกิร์ตโพรไบโอติกที่ใส่ปริมาณเยลลี่แก่ตะวัน ร้อยละ 35 และ 40 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังแสดงใน Table 6 ดังนั้นจึงเลือกปริมาณเยลลี่แก่ตะวันร้อยละ 35 ของปริมาณโยเกิร์ตโพรไบโอติก เป็นปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบสูงสุดและมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ก่อโรค *Escherichia coli* TISTR 117 อีกทั้งยังมีปริมาณบรรจุใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตตามท้องตลาดสวนมะพร้าวและรสสตอว์เบอร์รี่ (Cp-meji, 2020; Dutchie, 2020)

3.2 คุณค่าทางโภชนาการ

การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ในปริมาณ 100 กรัม พบว่า ปริมาณเยลลี่แก่ตะวัน ร้อยละ 35 ของปริมาณโยเกิร์ตให้พลังงาน ทั้งหมด 98.45 กิโลแคลอรี ไขมันทั้งหมด

2.65 กรัม คอเลสเตอรอล 8.07 มิลลิกรัม คาร์โบไฮเดรต 15.93 กรัม โปรตีน 2.27 กรัม ใยอาหาร 0.71 กรัม น้ำตาล 12.34 กรัม โซเดียม 46.52 กรัม วิตามิน A 27.90 ไมโครกรัม วิตามิน B1 0.050 มิลลิกรัม วิตามิน B2 0.094 มิลลิกรัม แคลเซียม 93.58 มิลลิกรัม เหล็ก 0.87 มิลลิกรัม เถ้า 1.16 กรัม และความชื้น 77.54 เมื่อนำผลการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับโยเกิร์ตทั่วไป ทำให้พบว่าการรับประทานโยเกิร์ตเยลลี่แก่ตะวันในปริมาณ 100 กรัม ที่เท่ากัน สามารถให้ประโยชน์ได้มากกว่าการรับประทานโยเกิร์ตทั่วไป ได้แก่ ได้รับวิตามิน A และใยอาหารที่สูงกว่า อีกทั้งยังให้พลังงานคอเลสเตอรอล ไขมันอิ่มตัวและน้ำตาลที่น้อยกว่า และยังสามารถยับยั้งแบคทีเรียที่ก่อโรคนำไส้ ที่เป็นต้นเหตุของอาการท้องเสียและการอักเสบในบริเวณลำไส้ (U.S Department of Agriculture, 2020)

3.3 การยอมรับผลิตภัณฑ์

การศึกษากายอมรับผลิตภัณฑ์ พบว่า ผู้บริโภคจำนวน 100 คน ชอบผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตเยลลี่แก่ตะวันอยู่ที่ระดับชอบปานกลาง การตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ พบว่า ก่อนได้รับข้อมูลเกี่ยวกับประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ ผู้บริโภคตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ ร้อยละ 80 และเมื่อได้รับข้อมูลของคุณประโยชน์จากการบริโภคผลิตภัณฑ์สมบัตินไบโอติก ทำให้ผู้บริโภค

เกิดการตัดสินใจซื้อ ร้อยละ 100 โดยมีจำนวนการตัดสินใจซื้อเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนได้รับข้อมูล ร้อยละ 20 สอดคล้องกับกระบวนการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค คือ เมื่อได้รับรู้ถึงข้อแตกต่างของข้อมูลจากสิ่งที่ต้องการซื้อ ผู้บริโภคส่วนใหญ่จะตัดสินใจซื้อสิ่งที่ตนเองพึงพอใจมากที่สุดหรือมีความเหมาะสมที่สุด (Manopramote, 2015) ดังนั้น เมื่อผู้บริโภคได้ทราบถึงคุณประโยชน์จากการรับประทาน ผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพและให้ประโยชน์มากกว่าผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาดที่ยังไม่มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียก่อโรคร้าย ตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์

สรุป

ปริมาณน้ำตาลและหัวเชื้อผสมที่เหมาะสมในการผลิตโยเกิร์ตโพรไบโอติก คือ ปริมาณน้ำตาลซูโครส ร้อยละ 6 และหัวเชื้อโยเกิร์ต ร้อยละ 2 มีปริมาณแบคทีเรียแลคติก เท่ากับ 9.8×10^7 CFU/g ค่า L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 89.15, -2.25 และ 8.17 ตามลำดับ ค่าความหนืด เท่ากับ 2922 cP ค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ 14.67 °Brix และค่า pH 4.5 ปริมาณคาราจีแนนที่เหมาะสมในการผลิตเยลลี่แก่นตะวัน คือ ปริมาณคาราจีแนน ร้อยละ 3.0 มีความแข็ง เท่ากับ 10.11 N ความเหนียว เท่ากับ 0.46 N ค่า L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 63.28, 0.65 และ 13.78 ตามลำดับ และค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ เท่ากับ 19.33 °Brix การทดสอบสมบัติซินไบโอติก พบว่า ปริมาณเยลลี่แก่นตะวัน ร้อยละ 35 ของปริมาณโยเกิร์ต เป็นสูตรที่เหมาะสม สามารถออกฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย *Escherichia coli* TISTR 117 มีวงรัศมียับยั้งเชื้อ (Clear Zone) เส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 11.67 มิลลิเมตร และผู้บริโภคจำนวน 100 คน ชอบผลิตภัณฑ์อยู่ทุกระดับ ชอบปานกลาง และมีความสนใจซื้อผลิตภัณฑ์คิดเป็นร้อยละ 100

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ห้องปฏิบัติการกลางเซ็นทรัลแล็บ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมผลิตภัณฑ์สมุนไพร สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยและห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีสมุนไพรและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนตรวจวิเคราะห์คุณภาพงานวิจัยให้เกิดความสมบูรณ์และแม่นยำ

เอกสารอ้างอิง

- Anawachkul, M. 2008. The study of GABA content and development enriched yogurt from germinated red rice (*Munpoo rice*). Master Thesis of Science in Agro-Industry, Naresuan University. (in Thai)
- Ansuree, P. 2012. The study development of a jerusalem artichoke root digger. Master Thesis of Engineering in Agricultural and Food Engineering, Khon Kaen University. (in Thai)
- AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 17th ed. Maryland, United States of America.
- AOAC. 2016. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 20th ed. Maryland, United States of America.
- Ben, X.M., Zhou, X.Y., Zhao, W.H., Yu, W.L., Pan, W., Zhang, W.L., Wu, S.M., Beusekom,

- C.M. and van, A. 2004. Growth and development of term infants fed with milk with long-chain polyunsaturated fatty acid supplement. **Chinese Medical Journal** 117(8): 1268-1270.
- Bounnik, Y., Raskine, L., Simoneau, G., Paineau, D. and Bornet, F. 2006. The capacity of short-chain fructo-oligosaccharides to stimulate faecal bifidobacteria: a dose-response relationship study in healthy humans. **Nutrition Journal** 5: 8.
- Buadee, P. 2010. Effect of K-carrageenan on properties of LDPE/LLDPE/Thermoplastic starch film. Master Thesis of Science in Polymer Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. (in Thai)
- Chaiprasop, O. 2003. **Dairy Technology**. 2nd ed. Faculty of science, Ramkhamhaeng University, Bangkok. (in Thai)
- Cp-meji. 2020. **Coconut jelly yogurt**. Available Source: <https://www.cpmeiji.com/th/product/view/Meiji-Yoghurt-with-Coconut-Jelly-135g>, April 28, 2020. (in Thai)
- Dutchie. 2020. **Product of yogurt**. Available Source: <http://www.dutchmill.co.th/product.aspx?id=13>, April 28, 2020.
- Food network solution. 2020. **Lactic acid bacterial**. Available Source: <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0782/lactic-acid-bacteria>, April 14, 2020. (in Thai)
- Gilliland, S.E. 2001. Probiotics and Prebiotics, pp. 327-343. In Marth, E.H. and Steele, J.L., eds. **Applied Dairy Microbiology**. Marcel Dekker, New York.
- Jahangirian, H., Haron, M.J., Shah, M.H., Abdollahi, Y., Rezayi, M. and Vafaei, N. 2013. Well diffusion method for evaluation of antibacterial activity of copper phenyl fatty hydroxamate synthesized from canola and palm kernel oils. **Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures** 8(3): 1263-1270.
- Junaid, A., Mohammed, S.M., Saeed, A.K. and Abdul, Q.K. 2008. HPLC analysis of water soluble vitamins (B1, B2, B3, B5, B6) in invitro and ex vitro germinated chickpea. **African Journal of Biotechnology** 7(14): 2310-2314.
- Manopramote, W. 2015. Factors affecting to goods purchasing decision via social media (Instagram) of people in Bangkok. Master Thesis of Business, Bangkok University. (in Thai)
- Ministry of public health. 2011. **Use of Probiotic Microorganisms in Foods**. Ministry of public health, Thailand. (in Thai)
- Na Ayutthaya, K. 2016. The product development of healthy cereal jelly. **Journal of Food Technology Siam University** 11(1): 13-20. (in Thai)
- National food institute. 2019. **Process of development food and beverage**. Available Source: <https://www.industry.go.th/industry/index.php/th/knowledge/item>, January 6, 2019. (in Thai)
- Nopcharoonsri, H. 2011. The effects of interaction between modified starches and keppa-carrageenan on ice cream recrystallization in milk ice cream. Master Thesis of Science in Food Technology, Suranaree University of Technology. (in Thai)

- Oupathumpanont, O. 2015. **Research Report on Development of Vermicelli by Using Jerusalem Artichoke.** Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)
- Pornchaloempong, P. 2020. **Lactic acid bacteria.** Available Source: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0782/lactic-acid-bacteria>, April 14, 2020. (in Thai)
- Rey, F., Ferreira, M.A., Facal, P. and Machado, A.A.S.C. 1996. Effect of concentration pH and ionic strength on the viscosity of solutions of a soil fulvic acid. **Canadian Journal of Chemistry** 74(3): 295-299.
- Rungsardthong, W. 2000. **Food Processing Technology.** 1st ed. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok. (in Thai)
- Sinthawalai, S. 1982. **Physical quality of sugar.** Available Source: <https://sites.google.com/site/xxyphuchsersthkic/khunsmbati-kayphaph-khxng-natal-thray>, April 15, 2020. (in Thai)
- Siriphok, S. 1994. **Fermentation Technology.** 1st ed. Sersormsukkrugtep, Bangkok. (in Thai)
- Sirisee, U. 2010. **Research Report on Department of Food Science and Technology.** Rajamangala University of Technology Tawan-ok.
- Sitthibush, S. 2012. The effect of prebiotic and sugar levels on the survival of *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus casei* in symbiotic ice cream. Master Thesis of Science in Food Science and Technology, Chiang Mai University. (in Thai)
- Sribureeruk, P. 2010. Characteristics and Acceptance of Set Type Homemade Yoghurt. Master Thesis of Science Home Economics, Kasetsart University. (in Thai)
- Supimaros, S. 2000. **Technology of Confectionery and Chocolate Production.** 1st ed. Chulalongkorn University, Bangkok. (in Thai)
- Tanjor, S. 2012. inulin and Fructooligosaccharides in different varieties of jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.). **KKU Science Journal** 17(11): 25-34. (in Thai)
- Thtitapoka, S. 2009. Prebiotic. **KKU Science Journal** 37(4): 366-375. (in Thai)
- U.S Department of Agriculture. 2020. **Yogurt.** Available Source: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/fooddetails/497051/nutrients>, April 18, 2020.
- Vongsawasdi, P. 2019. **Yogurt.** Available Source: <https://digital.lib.kmutt.ac.th/magazine/issue7/articles/article3.html>, September 18, 2019. (in Thai)
- Waeohongsa, C. 1997. Effects of antibacterial substances in aloe vera gel to the growth of lactic acid Bacteria in yoghurt. Master Thesis of Science in Agro-Industrial Product Development, Kasetsart University. (in Thai)
- Wattanasin, S. 2002. **Food Microbiology.** 1st ed. Printing House, Bangkok. (in Thai)
- Welch, R.W., Kelly, M.T., Gallagher, A.M., Wallace, J.M. and Livingstone, M.B.E. 2008. The effects of inulin-type fructans on satiety and energy intake: human studies. **Agro Food Industry Hi-Tech** 5(5): 4-6.
- Yongsamit, B. 1997. **Microbiology, Fermentation, Vitamins and Pigments.** 1st ed. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)

จลนพลศาสตร์ของการทอริแฟคชันชีวมวลเปลือกแข็ง

Torrefaction Kinetics for Solid Shell Biomass

สุภาภรณ์ กลิ่นเกษร และ คณิต มานะธูระ *

Supaporn Klinkeson and Kanit Manatura *

Received: 11 February 2021, Revised: 29 April 2021, Accepted: 14 May 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการจำลองจลนพลศาสตร์สองชั้นของเปลือกแมคคาเดเมียจากการปรับสภาพทางความร้อน ด้วยกระบวนการทอริแฟคชันโดยใช้การวิเคราะห์ทางเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน โดยใช้ผงเปลือกแมคคาเดเมีย ทำการทอริแฟคชันที่ 3 อุณหภูมิ ได้แก่ 280, 290 และ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที ที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่ออนาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ผลวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเปลือกแมคคาเดเมียมีการสลายตัวทางความร้อนอยู่ 4 ช่วง ช่วงแรกเกี่ยวกับการไล่ความชื้นของชีวมวล ช่วงที่สองเกี่ยวกับการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ช่วงที่สามและช่วงที่สี่เกี่ยวกับการสลายตัวของเซลลูโลสและลิกนิน ตามลำดับ ผลผลิตเชิงมวลของเปลือกแมคคาเดเมียที่ผ่านการปรับสภาพมีค่าร้อยละ 57.23 ถึง 72.74 อัตราส่วนโดยอะตอมของ H/C และ O/C มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิทอริแฟคชันสูงขึ้นซึ่งส่งผลให้ค่าความร้อนสูงขึ้น แบบจำลองจลนพลศาสตร์สองชั้นของเปลือกแมคคาเดเมียแสดงค่าพลังงานก่อกัมมันต์ระหว่าง 31.72 ถึง 78.73 กิโลจูลต่อโมล โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.74 ถึง 0.98 แบบจำลองจลนพลศาสตร์นี้สามารถช่วยในการทำนายการสลายตัวสำหรับชีวมวลเปลือกแข็งในช่วงทอริแฟคชันได้

คำสำคัญ: จลนพลศาสตร์, เปลือกแมคคาเดเมีย, ทอริแฟคชัน, เทอร์โมกราวิเมตริก, พลังงานชีวมวล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): kanitmana@gmail.com Tel: 06 2638 8729

ABSTRACT

This research aims to study two-consecutive kinetics model for torrefaction process of macadamia shell which was conducted by thermogravimetric analysis using the thermal analyzer, at temperature of 280, 290 and 300° C for 60 minutes, the heating rate 20°C/min under nitrogen environment. Results showed four steps of thermal degradation of the torrefied macadamia shell. The first step involved moisture evaporation of the biomass, the second step related to thermal degradation of hemicellulose. The third and the final step were thermal degradation of cellulose and lignin. The mass yield of torrefied macadamia shell was 57.23% to 72.74%. The atomic H/C and O/C ratios decreased when the torrefaction temperature increased. This affected increasing of heating value. The two-consecutive kinetics model showed that the activation energy was between 31.72 and 78.73 kJ/mol with R^2 in the range of 0.74-0.98. It can be proposed that the model is fit to predict the decomposition of solid biomass shell from torrefaction.

Key words: kinetic, macadamia shell, torrefaction, thermogravimetric, biomass energy

บทนำ

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานชีวภาพที่มีปริมาณมาก (Chen *et al.*, 2015) โดยถ่านชีวภาพเป็นทางเลือกที่มีแนวโน้มทดแทนถ่านซาร์ที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงในช่วงการเผาไหม้เมื่อเทียบกับน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม เชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นของแข็งส่วนมากมักไม่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเนื่องจากลักษณะทางธรรมชาติของเชื้อเพลิงเอง เช่น มีการดูดความชื้นและมีความชื้นสูง ความหนาแน่นโดยรวมต่ำ ค่าความร้อนต่ำ ความสามารถในการบดไม่ดี มีลักษณะความเป็นเนื้อเดียวกันและความต้านทานต่อการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำ (Peduzzi *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2015; Isemin *et al.*, 2017) ชีวมวลประเภทถั่วเปลือกแข็งเป็นชีวมวลประเภทหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากในปัจจุบันผู้บริโภคนิยมรับประทานถั่วเปลือกแข็งมากขึ้นซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนและไขมันที่ดีต่อสุขภาพ การบริโภคถั่วเปลือกแข็งวันละ 28 กรัม เป็นประจำทุก

วันจะช่วยลดความเสี่ยงโรคหัวใจและลดระดับคอเลสเตอรอลได้มากกว่าร้อยละ 30 จึงส่งผลให้ปริมาณความต้องการการบริโภคถั่วเปลือกแข็งเพิ่มขึ้น (Ros, 2010) สำหรับประเทศไทยโดยเฉพาะทางภาคเหนือ ชีวมวลประเภทถั่วเปลือกแข็งถือเป็นพืชเศรษฐกิจทางเลือกใหม่และมีการปลูกจำนวนมาก เช่น ถั่วแมคคาเดเมีย ถั่วเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ถั่วพิชตาชิโอ และ ถั่ววอลนัท เป็นต้น

แมคคาเดเมีย (*Macadamia*) เป็นไม้ยืนต้นจำพวกหนึ่งที่อยู่ในวงศ์ Protaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Macadamia Integrifolia* แมคคาเดเมียเป็นถั่วเปลือกแข็ง เนื้อในแมคคาเดเมียสามารถนำมารับประทานหรือแปรรูปเป็นน้ำมันแมคคาเดเมียและโลชั่นแมคคาเดเมียได้ ปัจจุบันพื้นที่ปลูกแมคคาเดเมียในประเทศไทยมีกว่า 10,000 ไร่ และให้ผลผลิตเฉลี่ย 300-700 กิโลกรัม/ไร่ ทำให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตแมคคาเดเมียเป็นจำนวนมาก (Wanitadisak, 2005) และยากต่อการสลายตัวตามธรรมชาติเนื่องจากลักษณะของแมคคาเดเมียมีเปลือก

ที่แข็งและหนาส่งผลให้ยากต่อการจัดการของเสียดังกล่าว

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการต่อ ยอดเปลือกแมคคาเดเมียมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงแข็ง ด้วยวิธีการแปรรูปให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงอัดเม็ด และทำการปรับปรุงสภาพโดยกระบวนการทอริแฟคชัน ซึ่งกระบวนการทอริแฟคชันเป็นกระบวนการหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างมาก เนื่องจากสามารถปรับปรุงสภาพชีวมวลเพื่อผลิตเชื้อเพลิง คัลยถ่านชาร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Chen *et al.*, 2021)

การทอริแฟคชัน (Torrefaction) คือ การแปลงสภาพชีวมวลเชิงเคมี - ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนที่ความดันบรรยากาศ โดยมีจุดประสงค์หลักคือ กำจัดความชื้นและสารระเหยง่าย บางส่วนออกจากชีวมวล (Coubert *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2021) ระหว่างการทอริแฟคชันจะเกิดการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสบางส่วน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้แบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ ของแข็งของเหลว และก๊าซ โดยของแข็งจะมีมวลเหลือ หลังจากกระบวนการประมาณร้อยละ 70 ของมวลเริ่มต้น โดยมวลที่หายไปร้อยละ 30 จะอยู่ในรูปของ ก๊าซและสารระเหย (Bergman, 2005) ชีวมวลที่ผ่านการทอริแฟคชันนั้นมีความร้อนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพ ผลผลิตเชิงมวล โดยทั่วไปอยู่ระหว่างร้อยละ 60 ถึง 90 (Bach and Skreiberg, 2016)

ในการออกแบบและควบคุมการทอริแฟคชันจำเป็นต้องทราบถึงลักษณะของตัวแปรสำคัญต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลา อัตราการให้ความร้อน ชนิดของแก๊สที่ใช้และอัตราการไหลของแก๊ส (Eseyin *et al.*, 2015) ตัวแปรดังกล่าวจะมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ เพื่อประหยัดเวลาและต้นทุน ในการสร้างอุปกรณ์ในการปรับปรุงสภาพ การจำลอง

ลักษณะการสลายตัวทางความร้อนหรือจลนพลศาสตร์จึงมีความสำคัญ ในการศึกษาพฤติกรรมของการสลายตัวของเชื้อเพลิงที่ต้องการปรับสภาพ โดยทั่วไปมักใช้แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์สำหรับการสลายตัวของชีวมวลซึ่งเป็นการศึกษาบนพื้นฐานการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยานิยามจากลำดับของการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยกลไกนี้มีบทบาทสำคัญสำหรับการทำนายการสูญเสียมวลของชีวมวลตามปฏิกิริยาการสลายตัวประกอบด้วย 1) แบบจำลองหนึ่งขั้น (One-step model) แสดงดังภาพที่ 1ก) เป็นแบบจำลองอย่างง่ายที่มีการสลายตัวของชีวมวลเป็นถ่านชาร์ (Char) และสารระเหย (Volatiles) จากงานวิจัยต่างๆ (Guo and Lua, 2001; Yu *et al.*, 2008) ซึ่งให้เห็นว่าการทำนายการสลายตัวของแบบจำลองนี้จะคลาดเคลื่อนจากข้อมูลการทดลองจริง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากไม่ได้พิจารณาการเกิดสารตัวกลาง (Intermediates) ซึ่งสารตัวกลางคือชีวมวลแห้งที่หลงเหลือจากการไล่ความชื้น 2) แบบจำลองสองขั้นต่อเนื่อง (Two-step consecutive-reaction model) แสดงดังภาพที่ 1ข) กลไกสองขั้นตอนนี้จะเริ่มจากชีวมวลดิบ สลายตัวเป็นสารตัวกลาง และสารระเหยเบื้องต้น (Volatiles 1) ได้แก่ ความชื้น ส่วนสารตัวกลางก็จะสลายตัวเป็นถ่านชาร์ และสารระเหยขั้นที่สอง (Volatiles 2) ในช่วงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส (Bui *et al.*, 2015)

Saeun (2014) ศึกษาเกี่ยวกับการสลายตัวของซังข้าวโพด ใบและยอดอ้อย ทางปาล์มและฟางข้าว โดยใช้แบบจำลองหนึ่งและสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 250, 260, 270, 280 และ 290 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที พบว่าแบบจำลองสองขั้นตอนที่ให้ผลสอดคล้องกับข้อมูลจากการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) มากกว่าแบบจำลองหนึ่งขั้นตอน โดยแบบจำลองนี้

สามารถใช้ทำนายพฤติกรรมสลายตัวของกระบวนการทอริแฟลคชันได้ Nguyen *et al.* (2020) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการทอริแฟลคชันจากภาคก่อนน้ำเสียโดยวิเคราะห์ TGA สร้างแบบจำลองสองขั้นตอนและแสดงผลการทำนายการกระจายตัวของของแข็ง พบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 280 องศาเซลเซียสภาคก่อนน้ำเสียได้เปลี่ยนสถานะเป็นถ่านอย่างสมบูรณ์ Knapczyk *et al.* (2021) พัฒนาแบบจำลองการสลายตัวของสองขั้นตอนของการทอริแฟลคชันในเตาปฏิกรณ์ของซังข้าวโพดอัดเม็ดที่อุณหภูมิ 220, 260 และ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 120 นาที พบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส เกิดการไล่ความชื้นที่พื้นผิวของชีวมวล ขณะที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียสขึ้นไปเป็นการทอริแฟลคชันซึ่งเกิดการลดลงของมวลชีวมวลอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่

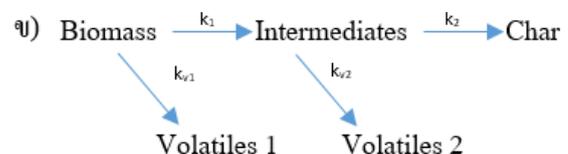
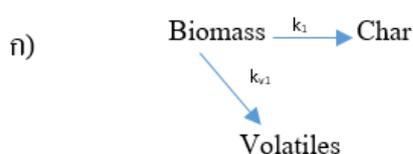
จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นพบว่า มีการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการทอริแฟลคชันเกี่ยวกับชีวมวลทั่วไปอยู่จำนวนหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการทอริแฟลคชันชีวมวลเปลือกแข็งยังมีค่อนข้างจำกัด ซึ่งพฤติกรรมสลายในช่วงทอริแฟลคชันระหว่างชีวมวลทั่วไปและชีวมวลเปลือกแข็งย่อมมีความแตกต่างกันรวมถึงวัสดุเหลือทิ้งจากชีวมวลเปลือกแข็ง ซึ่งมีปริมาณมากมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกหนึ่งสำหรับประเทศไทยในการเพิ่มความมั่นคงทางพลังงาน ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสลายตัวของเปลือกแมคคาเดเมียภายใต้กระบวนการทอริแฟลคชันโดยอาศัยแบบจำลองจลนพลศาสตร์สอง

ขั้นตอนเพื่อทำนายการสูญเสียมวลจากการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก ที่อุณหภูมิ 280, 290 และ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 60 นาที ที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งผลจากการศึกษาคาดว่าจะประโยชน์ในการออกแบบและควบคุมกระบวนการทอริแฟลคชันสำหรับชีวมวลเปลือกแข็ง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการทอริแฟลคชัน

การทอริแฟลคชันเกิดขึ้นระหว่าง 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส โดยที่เฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนที่เกิดการสลายตัวมากที่สุดในช่วงการทำปฏิกิริยา ดังนั้น การศึกษาจำนวนมากจึงใช้การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสเพื่อสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา จากงานวิจัย Varhegyi *et al.* (1997) และ Prins *et al.* (2006) อธิบายการสลายตัวของพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบอยู่ในผนังเซลล์ของพืชซึ่งเรียกว่า ไซแลน (Xylan) โดยพบว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยแบบจำลองนี้สามารถคาดการณ์สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เงื่อนไขปฏิกิริยาต่างๆ ได้ (Chiou *et al.*, 2018) ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้ A คือ ชีวมวลเริ่มต้น (Biomass), B คือ ผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาระดับกลาง (Intermediate) และ C คือ ถ่าน (Char) ในส่วนของ V1 คือ ผลิตภัณฑ์สารระเหยจากปฏิกิริยาแรก และ V2 คือ ผลิตภัณฑ์สารระเหยจากปฏิกิริยาที่สอง แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลอง ก) หนึ่งขั้น และ ข) สองขั้น

จากสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของของแข็งสามารถหาได้จากสมการ (1) ถึง (3)

$$r_A = \frac{dm_A}{dt} = -m_A \cdot (k_1 + k_{v1}) \quad (1)$$

$$r_B = \frac{dm_B}{dt} = k_1 \cdot m_A - m_B \cdot (k_2 + k_{v2}) \quad (2)$$

$$r_C = \frac{dm_C}{dt} = k_2 \cdot m_B \quad (3)$$

กำหนดให้ปฏิกิริยาที่ศึกษานี้เป็นอันดับที่ 1 ทำให้ $n_A = 1$, $n_B = 1$ โดย r_A คือ อัตราการสลายตัวของ A ที่สลายตัวไปในช่วงเวลาต่างๆ, r_B คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาและการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ B ที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาต่างๆ, r_C คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ C ที่เปลี่ยนแปลงไปใน

ช่วงเวลาต่างๆ, k_1 คือ ค่าคงที่อัตราของของแข็งในปฏิกิริยาที่ 1 และ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราของของแข็งในปฏิกิริยาที่ 2

เมื่อพิจารณาจากสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของของสารระเหยสามารถหาได้สมการที่ (4) และ (5)

$$r_{v1} = \frac{dm_{v1}}{dt} = k_{v1} \cdot m_A \quad (4)$$

$$r_{v2} = \frac{dm_{v2}}{dt} = k_{v2} \cdot m_B \quad (5)$$

โดย r_{v1} คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหยในปฏิกิริยาที่ 1, r_{v2} คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหยในปฏิกิริยาที่ 2, k_{v1} คือ ค่าคงที่อัตราของสารที่ระเหยได้ในปฏิกิริยาที่ 1 และ k_{v2} คือ ค่าคงที่อัตราของสารที่ระเหยได้ในปฏิกิริยาที่ 2

เมื่อนำมวลของ A, B และ C มารวมกันจะได้มวลทั้งหมดดังสมการที่ (7) โดยสามารถหามวลของ A, B และ C ได้จากการอินทิเกรตสมการอัตรา

การเกิดปฏิกิริยาของ A, B และ C เทียบกับเวลา จะเห็นว่าแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ขึ้นอยู่กับค่าคงที่อัตรา ซึ่งเป็นตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ที่สำคัญสามารถหาได้จากสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ซึ่งเป็นตัวแปรจากวิธีของ Di Blasi and Lanzetta (1997) โดยคิดที่อุณหภูมิคงที่ในสมการที่ (6)

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่อัตรา (rate constant) (วินาที)⁻¹, A คือ แฟกเตอร์ความถี่ (frequency factor) หรือ pre-exponential factor (วินาที)⁻¹, E_a คือ พลังงานก่อกัมมันต์

(activation energy) ของปฏิกิริยา (กิโลจูล/โมล), R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (universal gas constant), 8.314 จูล/(โมล.เคลวิน) และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

$$M = [A] + [B] + [C] \quad (7)$$

Nainggolan *et al.* (2019) ได้เสนอการประเมินค่าความคลาดเคลื่อน โดยพิจารณาจากมวลของชีวมวลที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาต่างๆ เทียบกับมวลของชีวมวลเริ่มต้นและนำไปเปรียบเทียบกับการทดลอง

โดยใช้ผลบวกกำลังสองของผลต่างที่น้อยที่สุดระหว่างการทดลองกับแบบจำลอง แสดงดังค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (sum of square error : SSE) แสดงในสมการที่ (8)

$$SSE = \sum_i^N \left(\left(\frac{M_t}{M_0} \right)_{\text{exp},i} - \left(\frac{M_t}{M_0} \right)_{\text{model},i} \right)^2 \quad (8)$$

เมื่อ M_t คือ มวลของชีวมวลที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการทอริแฟคชันที่เวลาใดๆ (กรัม), M_0 คือ มวลของชีวมวลเริ่มต้น (กรัม), exp คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง, model คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง, N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด และ i คือ ข้อมูลที่เวลาใดๆ

2. การจำลองการทอริแฟคชันด้วยวิธีทางเทอร์โมกราวิเมตริก

เปลือกแมคคาเดเมียที่ใช้ในการทดลองนำมาจากเปลือกที่เหลือทิ้งจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชน จังหวัดเชียงราย โดยเปลือกแมคคาเดเมียถูกทำให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาบดละเอียดและกรองผ่านตะแกรง (sieve) ขนาด 300 ไมโครเมตร จากนั้นนำผงเปลือกแมคคาเดเมียปริมาณ 10 มิลลิกรัม ใส่ในถ้วยอะลูมินาเพื่อวิเคราะห์ทางเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA) โดยแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อน้ำหนัก และอัตราการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ (Derivative Thermogravimetry, DTG) ด้วย

เครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน รุ่น SDT 2960 Simultaneous DSC-TGA มีค่าความคลาดเคลื่อนของมวลและอุณหภูมิอยู่ที่ร้อยละ ± 0.5 โดยมวล และ ± 1 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 100 มิลลิตรต่อนาที การวิเคราะห์การสลายตัวจะแบ่งเป็น 2 โหมดการให้ความร้อน คือ 1) โหมดอัตราความร้อนคงที่ (Constant heating rate) ใช้สำหรับวิเคราะห์การสลายตัวของเปลือกแมคคาเดเมียดิบ และ 2) โหมดทอริแฟคชันแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal torrefaction) ใช้จำลองการสลายตัวของเปลือกแมคคาเดเมียภายใต้กระบวนการทอริแฟคชัน การเลือกอุณหภูมิในการทดลองที่อุณหภูมิสูงและช่วงแคบ (280, 290, 300 องศาเซลเซียส) เนื่องจากชีวมวลเปลือกแข็งเกิดการสลายตัวอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับการใช้อุณหภูมิทอริแฟคชันที่ต่ำกว่า โดยการทดลองได้ทำ 2 ซ้ำ เพื่อให้ได้ค่าที่น่าเชื่อถือที่สุด การทำงานการของการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริกแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การทำงานของการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก

โหมด	กระบวนการให้ความร้อน
1. อัตราความร้อนคงที่	อุณหภูมิห้อง → 105 องศาเซลเซียส (อัตราให้ความร้อน = 20 องศาเซลเซียสต่อนาที) → คงที่ 105 องศาเซลเซียส 5 นาที → 800 องศาเซลเซียส (อัตราให้ความร้อน = 20 องศาเซลเซียสต่อนาที)
2. ทอริแฟคชัน	อุณหภูมิห้อง → (อัตราให้ความร้อน = 20 องศาเซลเซียสต่อนาที) → คงที่ 105 องศาเซลเซียส 5 นาที → 280, 290, 300 องศาเซลเซียส 60 นาที → 800 องศาเซลเซียส (อัตราให้ความร้อน = 20 องศาเซลเซียสต่อนาที)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกแมคคาเดเมีย

ภาพที่ 2 แสดงการสลายตัวของเปลือกแมคคาเดเมียด้วยการวิเคราะห์ทางความร้อนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของเปลือกแมคคาเดเมีย สามารถแบ่งการพิจารณาได้ทั้งหมด 4 โชน

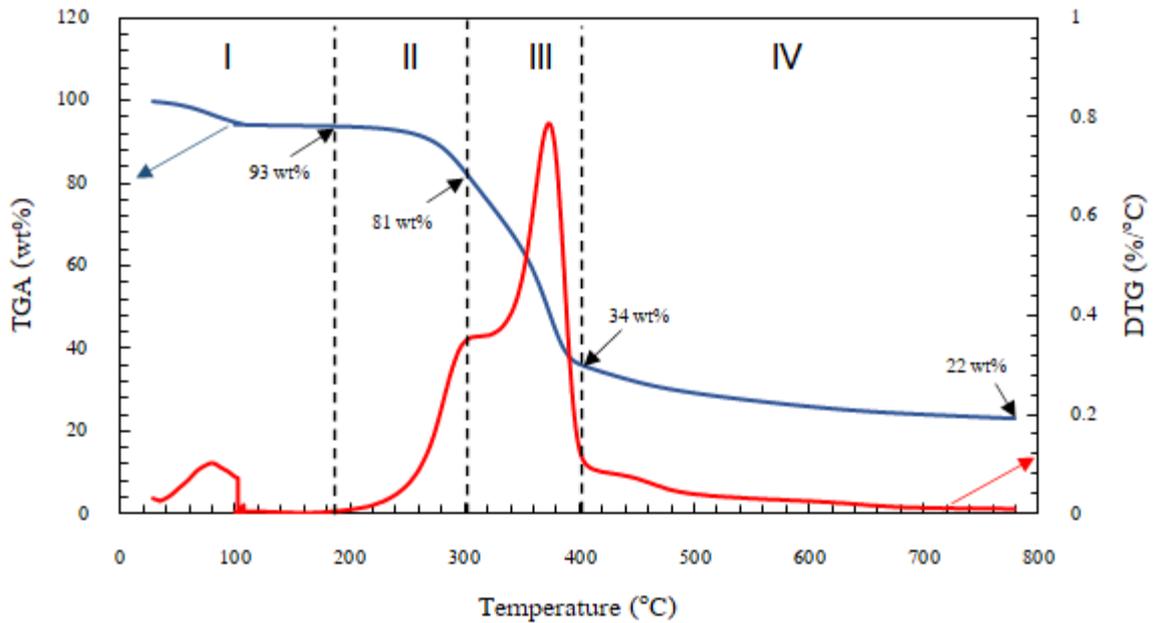
โชนที่ 1 (I) อุณหภูมิระหว่าง 25 ถึง 200 องศาเซลเซียส ชีวมวลมีมวลลดลงร้อยละ 7 เหลือมวลร้อยละ 93 แสดงถึงการสูญเสียไอน้ำจากผิวและเนื้อของชีวมวล

โชนที่ 2 (II) เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ (ทอริแฟคชัน) ชีวมวลสูญเสียมวลไปร้อยละ 22 ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส สังเกตได้จากโค้ง DTG เกิดการสลายตัวที่ 300 องศา

เซลเซียส (Mahantadsanapong and Ngernyen, 2020) และอัตราการสลายตัวเท่ากับร้อยละ 0.38 ต่อองศาเซลเซียส ซึ่งการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสเกิดในช่วงอุณหภูมิ 220 ถึง 350 องศาเซลเซียส (Pattiya, 2018)

โชนที่ 3 (III) อุณหภูมิอยู่ในระหว่าง 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส เป็นกระบวนการไพโรไลซิสอย่างรุนแรง เนื่องจากเกิดการสลายตัวของเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ (Pattiya, 2018) โดยสูญเสียมวลร้อยละ 47 และมีอัตราการสลายตัวที่สูงที่สุดในกระบวนการที่ร้อยละ 0.8 ต่อองศาเซลเซียส

โชนที่ 4 (IV) เมื่ออุณหภูมิอยู่ในระหว่าง 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส เป็นกระบวนการคาร์บอนในเซชันซึ่งมวลสูญเสียร้อยละ 13 โดยมวล จะสังเกตเห็นการสลายตัวที่ต่อเนื่องอย่างช้าๆ เนื่องจากการสลายตัวของลิกนิน (Jeguirim *et al.*, 2010) ในโชนนี้จะเหลือเพียงองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนและขี้เถ้า



ภาพที่ 2 TGA และ DTG ของเปลือกแมคคาเดเมียดิบภายใต้แก๊สไนโตรเจนที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที

2. การทอริแฟกชันของเปลือกแมคคาเดเมีย

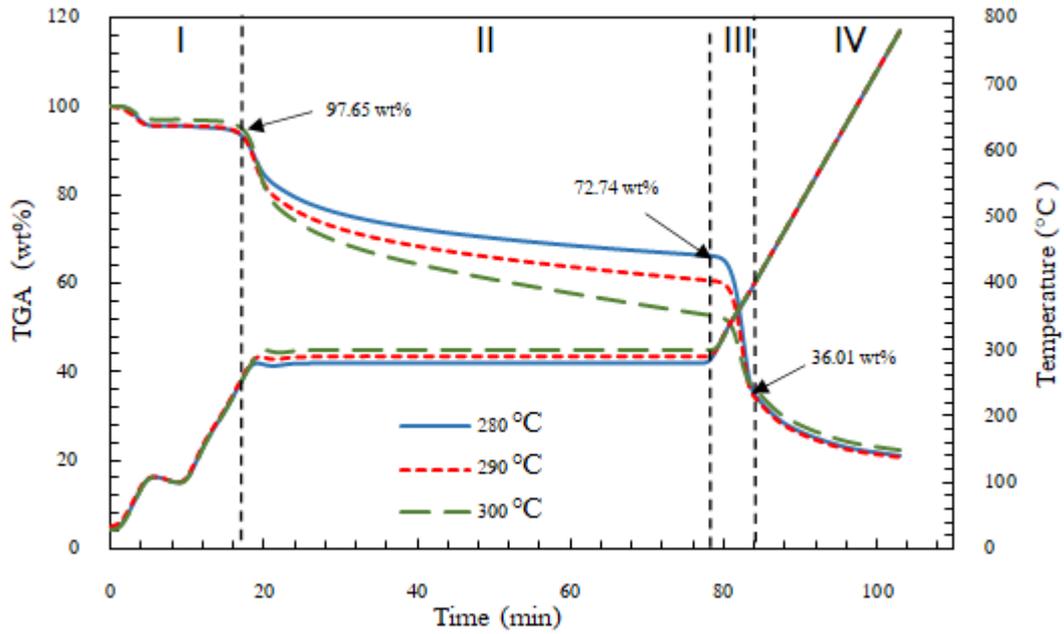
การสลายตัวทางความร้อนของเปลือกแมคคาเดเมียที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนแสดงดังเส้น TGA และ DTG ดังภาพที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแบ่งการพิจารณาการสลายตัวเป็น 4 โซน ดังนี้

โซนที่ 1 (I) แสดงการสูญเสียความชื้นจากผิวและเนื้อของชีวมวลซึ่งคล้ายกับการสลายตัวในโซนที่ 1 ดังภาพที่ 1 ซึ่งมีปริมาณประมาณร้อยละ 4

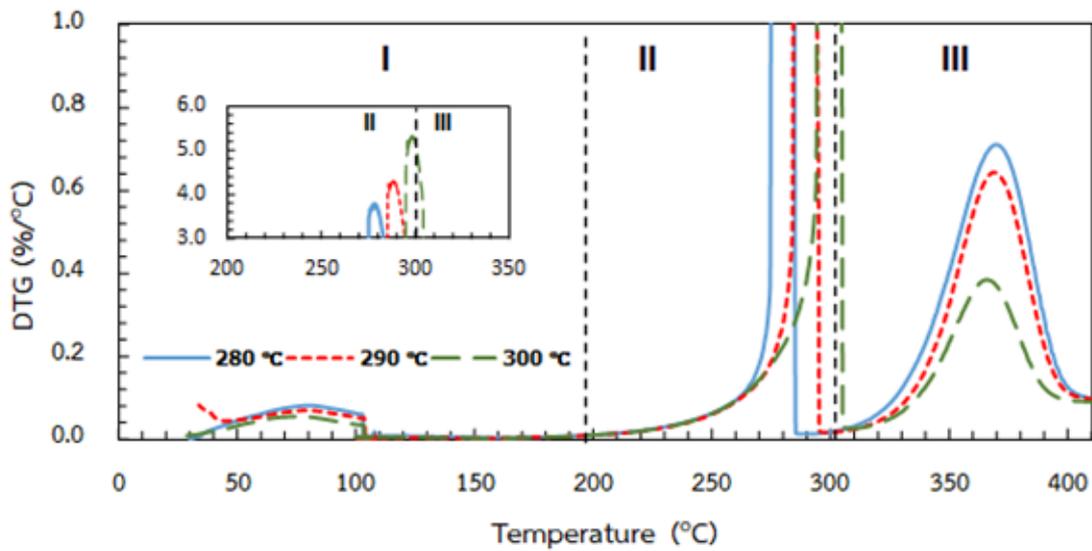
โซนที่ 2 (II) เริ่มตั้งแต่วันที่ 17 ถึง 77 นาที ระหว่างอุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ในโซนนี้แสดงถึงการสลายตัวอย่างรุนแรงจากการทอริแฟกชัน สังเกตได้จากเส้น TGA (ภาพที่ 3) ที่ร้อยละ 24.91, 30.25 และ 30.34 และอัตราการสลายตัวจากเส้น DTG (ภาพที่ 4) เท่ากับร้อยละ 3.68, 4.29 และ

5.21 ต่อองศาเซลเซียส (ตารางที่ 2) เมื่ออุณหภูมิทอริแฟกชันเท่ากับ 280 290 และ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การสลายตัวจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิทอริแฟกชันสูงขึ้น การสลายตัวสูงที่สุดเกิดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส การสลายตัวในช่วงนี้แสดงถึงการสูญเสียของไฮโดรเซลลูโลสโดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลสจำนวนมากซึ่งถูกกำจัดออกรวมถึงเซลลูโลสบางส่วน (Knapczyk *et al.*, 2021)

โซนที่ 3 (III) ตั้งแต่เวลา 77 ถึง 84 นาที อุณหภูมิ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส โดยการสลายตัวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิทอริแฟกชันสูงขึ้นซึ่งมีแนวโน้มตรงข้ามกับโซนที่ 2 เนื่องจากปริมาณเซลลูโลสที่หลงเหลือจากโซนที่ 2 มีปริมาณน้อย ซึ่งมีอัตราการสลายตัวเท่ากับร้อยละ 0.38 ถึง 0.71 ต่อองศาเซลเซียส



ภาพที่ 3 เส้น TGA และอุณหภูมิของการสลายตัวจากการทอริแฟคชั่น



ภาพที่ 4 เส้น DTG ของการสลายตัวจากการทอริแฟคชั่น

ตารางที่ 2 มวลที่สูญเสียของเปลือกแมคคาเดเมียจากการทอริแฟคชั่นระยะเวลา 60 นาที (โซนที่ 2)

อุณหภูมิทอริแฟคชั่น (°C)	มวลที่สูญเสีย (wt.%)	ผลผลิตเชิงมวล (%)	การสลายตัวสูงสุดในช่วงทอริแฟคชั่น (%/°C)
280	24.91	72.74	3.68
290	30.25	66.77	4.29
300	30.34	57.23	5.21

3. องค์ประกอบของเปลือกแมคคาเดเมีย

องค์ประกอบของเปลือกแมคคาเดเมียถูกวิเคราะห์ตามมาตรฐาน European Committee for Standardization โดยการวิเคราะห์เชิงประมาณ (Proximate analysis) ประกอบด้วย ความชื้น (EN 15414-3, 2011) สารระเหย (EN 15402, 2011) เถ้า (EN 15403, 2011) และคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ค่าความร้อนสามารถหาได้โดยเครื่อง Bomb Calorimeter (LEC รุ่น AC-500) จากการศึกษาชีวมวลหลังการทอริแฟกชันพบว่า มีปริมาณความชื้นและปริมาณสารระเหยลดลงภายในเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้ค่าความร้อนหลังการ

ทอริแฟกชันเพิ่มสูงขึ้น ในส่วนของปริมาณเถ้าของชีวมวลหลังทอริแฟกชันพบว่า มีเถ้าสูงกว่าชีวมวลดิบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Larsson *et al.* (2013) ศึกษาเกี่ยวกับการทอริแฟกชันของไม้สนชนิดหนึ่ง (Norway Spruce) ที่อุณหภูมิ 270 และ 300 องศาเซลเซียส ได้ค่าความร้อน 21,100 และ 22,500 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ โดยการอุณหภูมิทอริแฟกชันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสัดส่วนระหว่างคาร์บอนที่ต่อสารระเหยที่เพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์โดยประมาณของเปลือกแมคคาเดเมีย

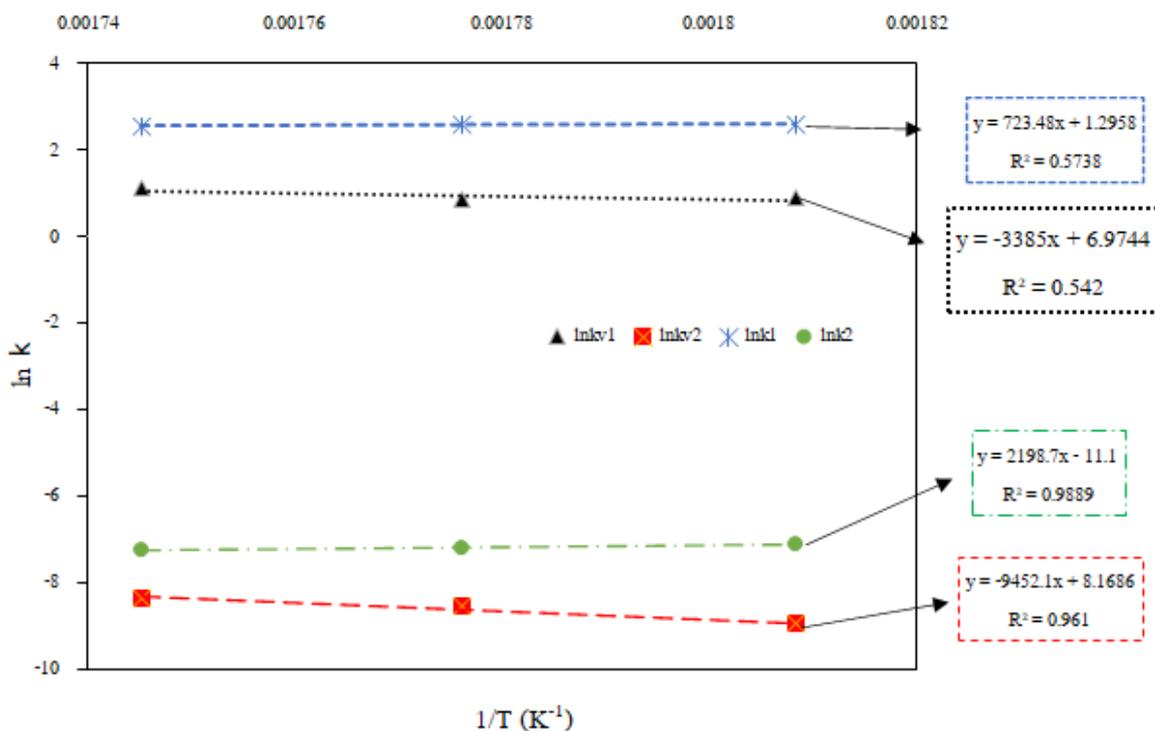
อุณหภูมิ	การวิเคราะห์แบบประมาณ (wt%)				ค่าความร้อน (kJ/kg)
	ความชื้น	สารระเหย	คาร์บอนคงที่	เถ้า	
ชีวมวลดิบ	6.50	78.45	14.83	0.21	19,372
280	0.32	46.61	52.23	0.83	24,107
290	0.30	42.34	56.47	0.89	25,153
300	0.03	41.70	57.23	1.04	27,319

4. จลนพลศาสตร์ของกระบวนการทอริแฟกชัน

แบบจำลองสองขั้นต่อเนื่อง (Two-step consecutive-reaction model) ในงานวิจัยนี้แสดงกลไกการสลายตัวของชีวมวลสองขั้น โดยเริ่มจากชีวมวลดิบ (A) สลายตัวเป็นสารตัวกลาง (B) และสารระเหยเบื้องต้น (V_1) ซึ่งสารตัวกลางจะสลายตัวเป็นถ่านชาร์ (C) และสารระเหยขั้นที่สอง (V_2) ตัวแปรเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เพื่อคำนวณหาค่าคงที่การ

เกิดปฏิกิริยาทอริแฟกชันในช่วงเวลาต่างๆ โดยค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy, E_a) และค่าปัจจัยความถี่ (Pre-exponential factor, A) คำนวณได้สมการที่ 9 ซึ่งเกิดได้จากการอินทิเกรตของสมการที่ 6 และทำวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression) โดยทำการพล็อต $\ln k$ กับ $1/T$ จากความชัน (slope) และจุดตัด (intercept)

$$\ln k = \ln A - E_a / RT \quad (9)$$



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ และ $1/T$

ผลลัพธ์ของตัวแปรทางจลนพลศาสตร์จากการทอริแฟกชันแสดงดังตารางที่ 4 โดยค่าพลังงานก่อกัมมันต์เปลือกแมคคาเดเมียที่มีค่าอยู่ระหว่าง 31.72 ถึง 78.73 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ของ Chiou *et al.* (2018) โดยมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของเปลือกอัลมอนต์อยู่ระหว่าง 18.13 ถึง 88.78 กิโลจูลต่อโมล จากตารางที่

4 พบว่า ค่าพลังงานในการก่อกัมมันต์ของแข็ง (E_1 และ E_2) ต่ำกว่าค่าการผลิตรสระเหย (E_{v1} และ E_{v2}) เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงของของแข็งในขั้นตอนแรก (การย่อยชีวมวลดิบเพื่อสร้างชีวมวลแห้ง) มากกว่าขั้นตอนที่สอง (การสลายตัวของชีวมวลแห้งเพื่อผลิตเป็นถ่าน) (Bach *et al.*, 2016)

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์จลนพลศาสตร์จากการทอริแฟกชัน

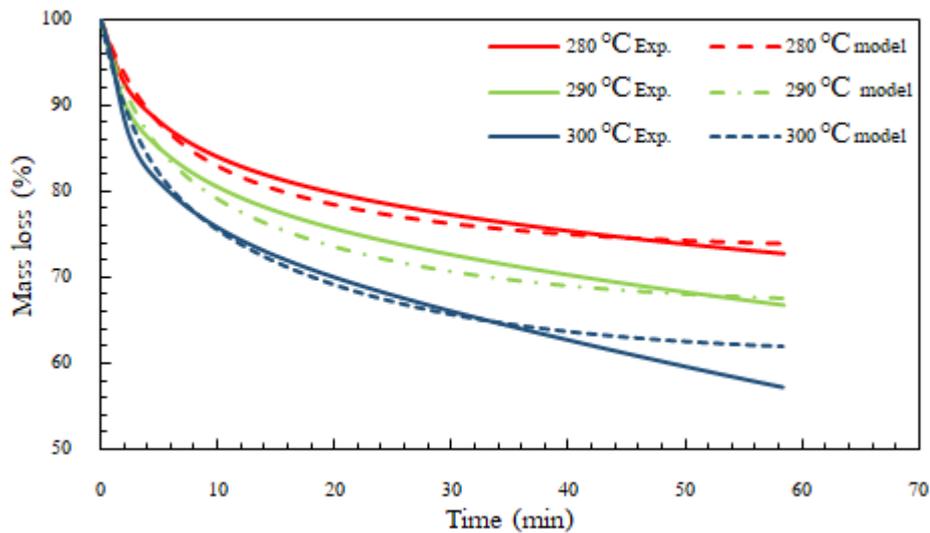
พารามิเตอร์	A (sec ⁻¹)	E _a (kJ/mol)	R ² (-)
k ₁	3.65	31.72	0.79
k _{v1}	1.07 × 10 ³	65.88	0.74
k ₂	1.51 × 10 ⁻⁵	18.13	0.99
k _{v2}	3.53 × 10 ³	78.73	0.96

มวลที่สูญเสียจากแบบจำลองและการทดสอบ TGA แสดงดังภาพที่ 6 พบว่า ข้อมูลจาก

แบบจำลองกับข้อมูล TGA โดยในช่วงอุณหภูมิ 280 ถึง 290 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อนเพียง

เล็กน้อย แต่ในช่วงอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะช่วง 40 ถึง 60 นาที มีแนวโน้มความคลาดเคลื่อนมากขึ้นอาจเป็นผลจากผลของอุณหภูมิทอริแฟกซ์ที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการสลายตัวเกิดเป็นสารระเหยเร็วขึ้นและองค์ประกอบที่ซับซ้อนภายใน

ชีวมวล โดยเฉพาะองค์ประกอบอนินทรีย์ เช่น โพแทสเซียม และโซเดียม (Chiou *et al.*, 2018) จากตารางที่ 5 พบว่าค่า SSE มีค่าน้อยและ R² มีค่าใกล้เคียง 1 ใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Bach *et al.* (2016)



ภาพที่ 6 มวลที่สูญเสียของการทดลองจาก TGA (เส้นทึบ) และจากแบบจำลอง (เส้นปะ) สำหรับการทำทอริแฟกซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 5 SSE และ R² ของเปลือกแมคคาเดเมียที่ทอริไฟด์

อุณหภูมิ (°C)	SSE	R ² (-)
280	0.18	0.98
290	0.45	0.97
300	0.69	0.96

5. ผลการกระจายตัวของของแข็งจากการทอริแฟกซ์

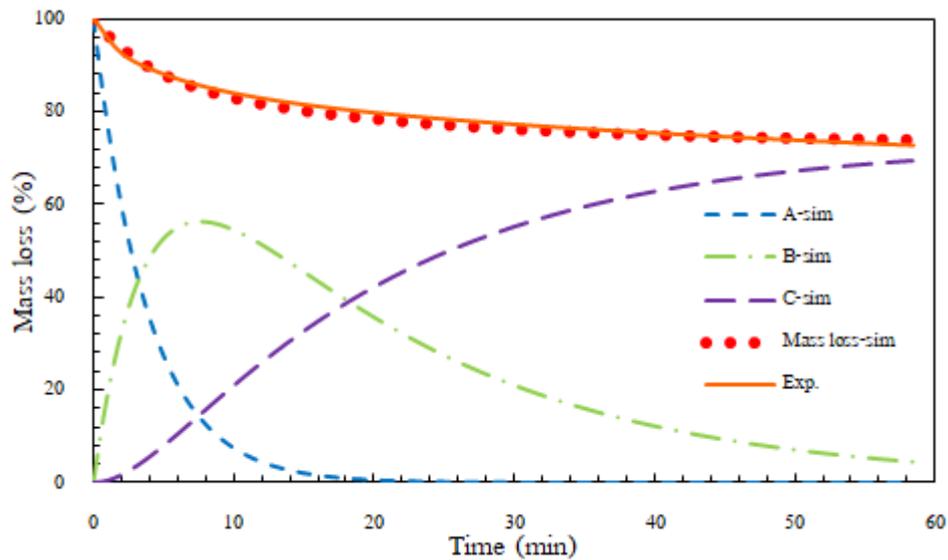
การกระจายตัวของของแข็ง ได้แก่ ชีวมวลดิบ (A), สารตัวกลาง (B) และถ่าน (C) ในการทอริแฟกซ์ที่อุณหภูมิ 280, 290 และ 300 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 7 (ก)-(ค) ตามลำดับ โดยอัตราการสลายตัวของชีวมวลเริ่มต้น (A) สูงที่อุณหภูมิของทอริแฟกซ์สูง ตัวอย่างเช่น ที่ 280 องศาเซลเซียส ใช้

เวลาประมาณ 20 นาที เพื่อย่อยสลายเปลือกแมคคาเดเมียดิบอย่างสมบูรณ์ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิทอริแฟกซ์ที่ 290 และ 300 องศาเซลเซียส เวลาในการสลายตัวจะลดลงเหลือเพียง 18 และ 14 นาที ตามลำดับ ส่วนของการสลายสารตัวกลาง (B) ยังคงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิทอริแฟกซ์เช่นกัน เมื่อตัวกลางถูกเกิดการสลายตัวมากขึ้นทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ถ่าน (C) มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงานก่อกัมมันต์ในตารางที่ 4

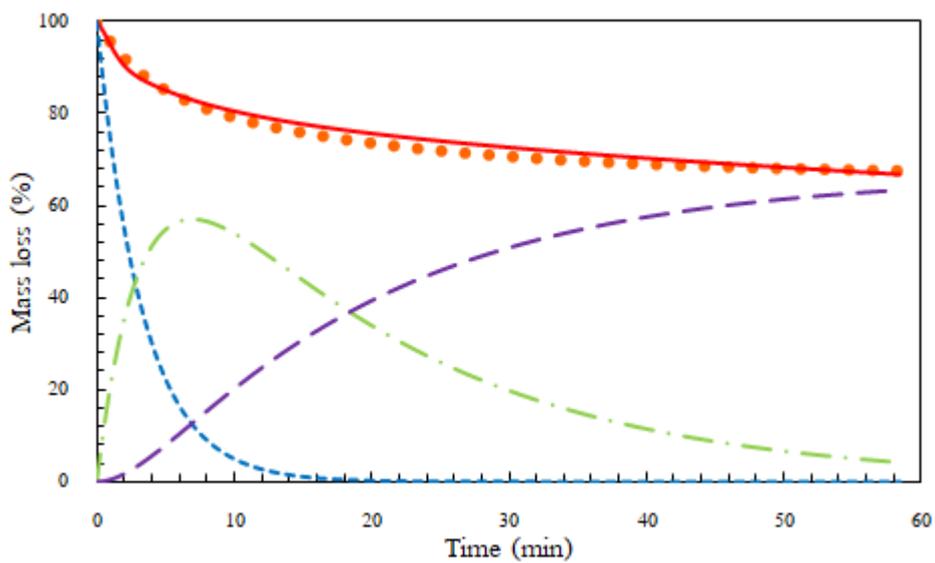
โดยขั้นตอนแรกน้อยกว่าขั้นตอนที่สอง แสดงให้เห็นถึงความลาดชันที่สารตัวกลางเพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอรีแฟลชัน จากงานวิจัย Felfli *et al.* (2005) พบว่า การสลายชีวมวลด้วยความร้อนเกิดขึ้นในระยะเวลาที่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง และมีแนวโน้มที่จะสลายตัวน้อยมากเมื่อ

ระยะเวลาเกิน 1 ชั่วโมงขึ้นไป จากกราฟการสลายตัวของ A, B และ C แสดงให้เห็นว่าการทดลองทอรีแฟลชันเปลือกแมคคาเดเมียควรใช้อุณหภูมิที่มากกว่า 300 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการทอรีแฟลชันอย่างสมบูรณ์

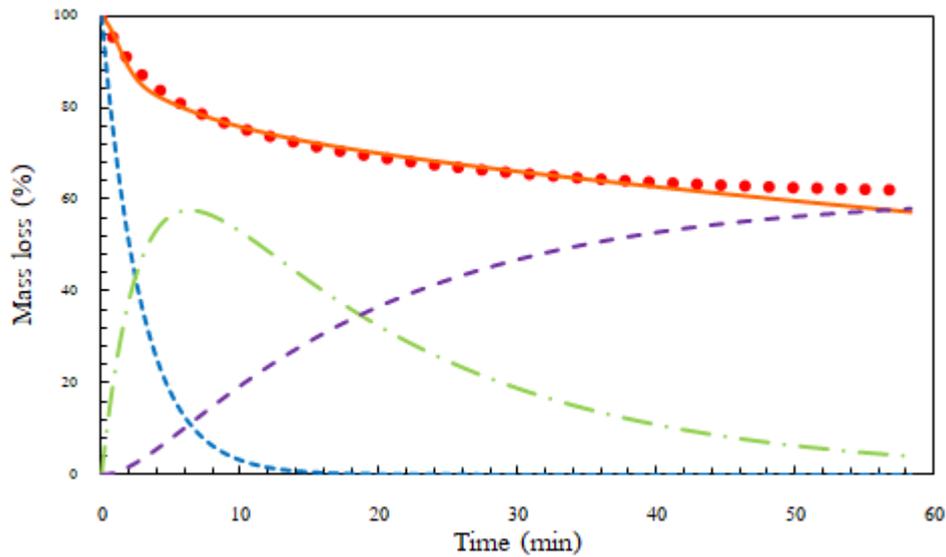
ก) 280 องศาเซลเซียส



ข) 290 องศาเซลเซียส



ค) 300 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 7 การกระจายขององค์ประกอบระหว่างการทอริแฟคชันที่ (ก) 280 (ข) 290 และ (ค) 300 องศาเซลเซียส

สรุป

ผลการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของเปลือกแมคคาเดเมียที่ผ่านกระบวนการทอริแฟคชันสามารถแบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือ การสูญเสียความชื้นที่ผิว การสลายตัวไฮโดรเซลลูโลส การสลายตัวเซลลูโลส และคาร์บอนในเซลล์ ผลผลิตเชิงมวลของเปลือกแมคคาเดเมียที่ผ่านการปรับสภาพมีค่าร้อยละ 57.23 ถึง 72.74 ขณะที่อัตราส่วนโดยอะตอมของ H/C และ O/C มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิทอริแฟคชันสูงขึ้นจาก 280 ถึง 300 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 19,372 เป็น 24,107-27,319 กิโลจูลต่อกิโลกรัม แบบจำลองจลนพลศาสตร์สองขั้นตอนแสดงการสลายตัวของชีวมวลดิบสลายตัวเป็นสารตัวกลางก่อนสลายตัวกลายเป็นถ่าน จากการวิเคราะห์แบบจำลอง พบว่า ค่าพลังงานก่อกัมมันต์อยู่ระหว่าง 31.72 ถึง 78.73 กิโลจูลต่อโมล ค่าดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบทอริแฟคชันเบื้องต้นในการปรับสภาพชีวมวลเปลือกแข็งได้ ในอนาคตควรมีการศึกษาการใช้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานจากการใช้ TGA สำหรับกระบวนการทอริแฟคชัน โดย

เปรียบเทียบค่าสัดส่วนระหว่างพลังงานที่ได้จากทอริแฟคชันต่อพลังงานที่ใส่ไปในระบบ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้ทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

- Bach, Q.V. and Skreiberg, Ø. 2016. Upgrading Biomass Fuels via Wet Torrefaction: A review and Comparison with Dry Torrefaction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 54: 665-677.
- Bach, Q.V., Chen, W.H., Chu, Y.S. and Skreiberg, Ø. 2016. Predictions of biochar yield and elemental composition during torrefaction of forest residues. **Bioresource technology** 215: 239-246.

- Bergman, P.C.A. 2005. **Combined torrefaction and pelletisation, The TOP process.** Document Publish, Netherlands.
- Bui, H.H, Tran, K.Q. and Chen, W.H. 2015. Pyrolysis of microalgae residues - A Kinetic study. **Bioresource Technology** 199: 362-366.
- Chen, W.H., Lin, B.J., Lin, Y.Y., Chu, Y.S., Ubando, A.T., Show, P.L. and Pétrissans, M. 2021. Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. **Progress in Energy and Combustion Science** 82: 100887.
- Chen, W.H., Peng, J. and Bi, X. T. 2015. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. **Renewable and Sustainable Energy Review** 44: 847-866.
- Chiou, B.S., Cao, T., Valenzuela-Medina, D., Bilbao-Sainz, C., Avena-Bustillos, R.J., Milczarek, R.R. and Orts, W.J. 2018. Torrefaction kinetics of almond and walnut shells. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry** 131(3): 3065-3075.
- Couhert, C., Salvador, S. and Commandré, J.M. 2009. Impact of Torrefaction on Syngas Production from Wood. **Fuel** 88(11): 2286-2290.
- Di Blasi, C. and Lanzetta, M. 1997. Intrinsic kinetics of isothermal xylan degradation in inert Atmosphere. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 40: 287-303.
- EN 15402. 2011. Solid Recovered Fuels-Determination of the Content of Volatile Matter. European Committee for Standardization.
- EN 15403. 2011. Solid Recovered Fuels-Determination of Ash Content. European Committee for Standardization.
- EN 15414-3. 2011. Solid Recovered Fuels-Determination of Moisture Content Using the Oven Dry Method-Part 3: Moisture in General Analysis Sample. European Committee for Standardization.
- Eseyin, A.E., Steele, P.H. and Pittman Jr, C.U. 2015. Current trends in the production and applications of torrefied wood/biomass-A review. **Bioresources** 10(4): 8812-8858.
- Felfli, F.F., Luengo, C.A., Suárez, J.A. and Beatón, P.A. 2005. Wood briquette torrefaction. **Energy for Sustainable Development** 10: 20-23.
- Guo, J. and Lua, A.C. 2001. Kinetic study on pyrolytic process of oil-palm solid waste using two-step consecutive reaction model. **Biomass and Bioenergy** 20: 223-233.
- Isemin, R., Mikhalev, A., Klimov, D., Grammelis, P., Margaritis, N., Kourkoumpas, D.S. and Zaichenko, V. 2017. Torrefaction and Combustion of Pellets Made of A Mixture of Coal Sludge And Straw. **Fuel** 210: 859-865.
- Jeguirim, M., Dorge, S., Loth, A. and Trouvé, G. 2010. Devolatilization kinetics of miscanthus straw from Thermogravimetric analysis. **International Journal of Green Energy** 7(2): 164-173.
- Knopczyk, A., Francik, S., Jewiarz, M., Zawiślak, A. and Francik, R. 2021. Thermal Treatment of Biomass: A Bibliometric Analysis - The Torrefaction Case. **Energies** 14(1): 162.

- Larsson, S.H., Rudolfsson, M., Nordwaeger, M., Olofsson, I. and Samuelsson, R. 2013. Effects of moisture content, torrefaction temperature, and die temperature in pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce. **Applied Energy** 102: 827-832.
- Mahantadsanapong, N. and Ngernyen, Y. 2020. Torrefaction of Pelletizing Fuel from Solid Waste of Sugar Industry. **Khon Kaen University Research Journal** 20(1): 65-75. (in Thai)
- Nainggolan, R., Perangin-angin, R., Simarmata, E. and Tarigan, A.F. 2019. Improved the Performance of the K-Means Cluster Using the Sum of Squared Error (SSE) optimized by using the Elbow Method. **Journal of Physics: Conference Series** 1361(1): 012015.
- Nguyen, Q., Nguyen, D.D., Vothi, H., He, C., Goodarzi, M. and Bach, Q.V. 2020. Isothermal torrefaction kinetics for sewage sludge pretreatment. **Fuel** 277: 118103.
- Pattiya, A. 2018. Fast pyrolysis, pp. 3-28. *In* United States, Lasse Rosendahl. **Direct thermochemical liquefaction for energy applications**. Woodhead Publishing, Sawston.
- Peduzzi, E., Boissonnet, G., Haarlemmer, G., Dupont, C. and Marechal, F. 2014. Torrefaction modelling for lignocellulosic biomass conversion processes. **Energy** 70: 58-67.
- Prins, M.J., Ptasinski, K.J. and Janssen, F.J. 2006. Torrefaction of wood: Part 2 Analysis of Products. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 77(1): 35-40.
- Ros, E. 2010. Health benefits of nut consumption. **Nutrients** 2(7): 652-682.
- Saeun, A. 2014. Kinetics of Biomass in Torrefaction Process. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Silpakorn University. (in Thai)
- Varhegyi, G., Antal Jr, M.J., Jakab, E. and Szabó, P. 1997. Kinetic modeling of biomass pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 42(1): 73-87.
- Wanitadisak, A. 2005. Energy management in Macadamia Nut process. Master of Engineering (Energy Management Technology), King Mongkut's University of Technology Thonburi. (in Thai)
- Yu, F., Ruan, R. and Steele, P. 2008. Consecutive reaction model for the pyrolysis of corn cob. **American Society of Agricultural and Biological Engineer** 51(3): 1023-1028.

การศึกษาการเสริมเนื้อตาลูกและการทดแทนไขมัน ด้วยแกนสับประรดในผลิตภัณฑ์คุกกี้

The Study of Toddy Palm Pulp Supplementation and Pineapple Core as Fat Replacer in Cookie

สุรีย์พร กังสนันท์* กวิสรา สาลีโรจน์ สุจิรา ชัยทิพย์ และ อ้อมใจ โภภิบาล

Sureeporn Kangsanant*, Kawisara Saleerod, Sujira Chaithip and Aomjai Phopiban

Received: 21 March 2021, Revised: 7 July 2021, Accepted: 7 November 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์คุกกี้ที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพโดยการทดแทนไขมันด้วยแกนสับประรดและเสริมเนื้อตาลูกซึ่งมีปริมาณแคลอรีที่น้อยที่สุด การทดแทนไขมันด้วยแกนสับประรดในผลิตภัณฑ์คุกกี้ ใช้แกนสับประรดในปริมาณ ร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักของเนยทั้งหมดในสูตร ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณแกนสับประรดที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการแผ่ขยายของคุกกี้ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคโดยวิธี 9-point hedonic scale พบว่าผู้บริโภคให้คะแนนการยอมรับปริมาณแกนสับประรดในคุกกี้ร้อยละ 20 ทำให้สามารถลดการใช้เนยในสูตรลงได้ร้อยละ 20 การศึกษาปริมาณการเสริมเนื้อตาลูกในการผลิตคุกกี้ โดยศึกษาปริมาณเนื้อตาลูก ร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 ของน้ำหนักแป้งทั้งหมดเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ผลการศึกษาพบว่าปริมาณเนื้อตาลูกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่าง (L*) ลดลง ในขณะที่ค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการแผ่ขยาย ค่าความแข็ง และค่าความกรอบของคุกกี้ลดลงเมื่อปริมาณเนื้อตาลูกเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณแป้งที่ลดลงและความชื้นในเนื้อตาลูก ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบคุกกี้ที่ใช้เนื้อตาลูกร้อยละ 10 สูงที่สุด การใช้แกนสับประรดทดแทนไขมันในคุกกี้และใช้เนื้อตาลูกสามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้ร้อยละ 15.92 และยังเป็น การเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้แก่คุกกี้ อีกทางหนึ่งด้วย

คำสำคัญ: คุกกี้, เนื้อตาลู, สารทดแทนไขมัน, แกนสับประรด

สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ (อาหารและโภชนาการ) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา 160 ถนนกาญจนาภิเษก หมู่ 4 ตำบลเขารูปช้าง อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

Program in Home Economics (Food and Nutrition), Faculty of Science and Technology, Songkhla Rajaphat University, 160 Kanchanawanich Road, Moo 4, Khoa Roob Chang, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): kangsanant.s@gmail.com

ABSTRACT

The objective of this research was to develop a healthy cookie product by replacing fat with pineapple cores and supplementing Toddy palm pulp with high carotenoid content. The study of fat replacement with pineapple cores in cookie products used pineapple cores at 10, 20, 30, 40 and 50% by weight of butter. The results showed that increase in the amount of pineapple cores resulted in a lower spread ratio of cookies compared to control. The consumer acceptance test using the 9-point hedonic scale found that consumers accepted pineapple cores in cookies at 20 %. Additionally, the study of the appropriate amount of Toddy palm pulp supplement in cookie production at 10, 20, 30, 40 and 50% of the total starch weight was implemented. The results showed that when the amount of Toddy palm pulp content increased, the lightness (L *) of cookies decreased and redness (a *) and yellowness (b *) increased. It was also found that the spread ratio, hardness and crispness of cookies decreased as Toddy palm pulp increased. This may be due to the reduction of wheat flour content and the moisture content of Toddy palm pulp. Cookie with 10% Toddy palm pulp was received the highest acceptance score. Using pineapple cores as a fat replacer and supplementing Toddy palm pulp in cookies could reduce production costs by 15.92% and increase the nutritional value to cookies.

Key words: cookie, toddy palm pulp, fat replacer, pineapple core

บทนำ

คุกกี้เป็นขนมอบชนิดหนึ่ง มีรูปร่างแบน เนื้อสัมผัสกรอบร่วน เป็นขนมที่มีความขึ้นตำ มีแป้ง สาธือเนกประสงค์ ไขมัน และน้ำตาลเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งหากรับประทานเป็นประจำ อาจทำให้เสี่ยงต่อการเกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (non-communicable diseases; NCDs) ได้ ปัจจุบันผู้บริโภคส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับสุขภาพมากขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่รักสุขภาพ และเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับผลิตภัณฑ์ขนมอบจึงได้มีนักวิจัยศึกษาการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้แก่ผลิตภัณฑ์ขนมอบ เช่น การเสริมใยอาหารจากชงจำปาตะในผลิตภัณฑ์คุกกี้ (Wongsudalak, 2016) การเสริมใยอาหารจากแกนสับปะรดในผลิตภัณฑ์ชิฟฟอน (Khamnongphai, 2014) การใช้สารทดแทนไขมันจากกากแคโรทในผลิตภัณฑ์บราวนี่ (Khachonsetkan

et al., 2019) ผลิตภัณฑ์คุกกี้ลดไขมันเสริมผักข้าว (Chaengphonak *et al.*, 2015) เป็นต้น จากงานวิจัยจะเห็นได้ว่าผู้วิจัยให้ความสนใจในการเสริมใยอาหารและลดปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารลง ทั้งนี้เนื่องจากพบว่าในปัจจุบันคนไทยมีแนวโน้มเสี่ยงต่อการป่วยเป็นโรค NCDs มากขึ้น ซึ่งโรค NCDs เป็นโรคที่เกิดจากพฤติกรรมในการบริโภคอาหารและการใช้ชีวิตที่ไม่เป็นการส่งเสริมสุขภาพในทางที่ดี

ตาลโตนด เป็นพืชตระกูลปาล์ม ในประเทศไทยจะพบมากในจังหวัดเพชรบุรี สุพรรณบุรี นครปฐม และภาคใต้ในแถบอำเภอสติงพระ อำเภอระนอง ของจังหวัดสงขลา (Boonsong *et al.*, 2011) เนื้อตาลสุกมีคุณค่าทางโภชนาการได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เถ้า และใยอาหาร ส่วนแร่ธาตุในเนื้อตาลสุกได้แก่ แคลเซียมและฟอสฟอรัส เนื้อตาลสุกมีปริมาณแคลโรทีนอยด์สูง จากการศึกษาพบว่า

มีปริมาณแคลโรทีนอยด์ 17.65 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ของเนื้อลูกตาลสุก (Boontaraphong *et al.*, 2001) เมื่อเทียบกับพืชที่มีสีเหลืองหรือส้มชนิดอื่นๆ เช่น ฟักทอง แครอท เป็นต้น มีปริมาณเบตา-แคโรทีน 1.4 - 8.4 mg/100 g (Somboon *et al.*, 2012) ตาลโตนดเป็นพืชเศรษฐกิจของชาวบ้านที่อยู่ในพื้นที่ ตาลโตนดสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งต้น แต่ผลของตาลโตนดเมื่อสุกเต็มที่ จะหล่นลงมาจกต้นและเน่าเสีย ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ชาวบ้านจึงนำลูกตาลสุกที่เพิ่งหล่นจากต้น มารีดเอาเนื้อเพื่อนำไปเป็นส่วนผสมในการทำขนม เช่น ขนมตาล ขนมจีบ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ความหลากหลายของการใช้ประโยชน์จากเนื้อตาลสุกยังมีอยู่จำกัดผู้วิจัยจึงได้สนใจที่จะนำเนื้อตาลสุกมาใช้ในผลิตภัณฑ์คุกกี้เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ และเป็นการเพิ่มความหลากหลายให้ผลิตภัณฑ์จากเนื้อตาลสุกอีกทางหนึ่ง นอกจากนี้เพื่อเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์คุกกี้ให้เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพมากขึ้นจึงได้สนใจที่จะนำแกนสับปรดที่ไม่นิยมรับประทาน แต่มีปริมาณใยอาหารสูงมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งได้มีงานวิจัยรายงานว่าแกนสับปรดประกอบไปด้วยใยอาหาร (Khamnongphai, 2014) และการเติมใยอาหารลงในผลิตภัณฑ์อาหารยังสามารถลดการใช้ไขมันในสูตรลงได้บางส่วน (Pomchalermping and Rattanapanon, 2010) ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการนำแกนสับปรดมาใช้เพื่อลดการใช้ไขมันในคุกกี้

สับปรดเป็นผลไม้ที่เป็นแหล่งของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ ผู้คนส่วนใหญ่จะรับประทานแค่เฉพาะเนื้อ ส่วนแกนสับปรดเนื่องจากมีความแข็งจึงไม่นิยมนำมาบริโภค นอกจากนำไปทำปุ๋ยหมักจากการศึกษา การสกัดแกนสับปรดพบว่า มีใยอาหาร 99.8 % โดยพบว่าเป็นใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ ซึ่งมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ 95.2 % จึงมีงานวิจัยนำแกนสับปรดมาใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น การเสริมใยอาหารจากแกน

สับปรดผงในผลิตภัณฑ์โคนัทเค้ก สามารถช่วยเพิ่มปริมาณความชื้น และลดการอมน้ำมันระหว่างการทอดได้ (Prakongpan, 1998)

สารที่ใช้ทดแทนไขมัน (Fat substitute หรือ fat replacer) เป็นสารคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลใหญ่ อาจเป็นประเภทใยอาหาร เป็นไฮโดรคอลลอยด์ซึ่งพบได้จากพืช สัตว์ ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถทำให้เกิดความข้นหนืด ใช้เป็นสารทดแทนไขมันในอาหาร ทำให้เกิดความเนียน ความชุ่มชื้นของผลิตภัณฑ์เสมือนอาหารที่มีไขมัน สารที่ใช้ทดแทนไขมัน เช่น มอลโทเดกซ์ทริน อินนูลิน หรือ กัม เป็นต้น (Pomchalermping and Rattanapanon, 2010) เพื่อเป็นการลดปริมาณไขมันในอาหารจึงมีงานวิจัยที่สนใจที่จะนำสารทดแทนไขมันที่เป็นลักษณะของใยอาหารจากธรรมชาติมาใช้เป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น การนำกากแครอทมาใช้ทดแทนเนยขาวในผลิตภัณฑ์บราวนี่ โดยสามารถลดการใช้เนยขาวลงได้ 25% ลดปริมาณแคลอรีประมาณ 7% ลดต้นทุนลงได้ 10% (Khachonsetkan *et al.*, 2019)

จากความสำคัญและที่มาของปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเนื้อตาลสุกและแกนสับปรดซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีในท้องถิ่นและให้คุณค่าทางโภชนาการ แต่ผู้คนส่วนใหญ่ไม่นิยมนำมาบริโภค ผู้วิจัยจึงนำมาใช้ประโยชน์ โดยใช้เนื้อตาลสุกและการนำแกนสับปรดใส่ในผลิตภัณฑ์คุกกี้ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการเพิ่มคุณค่าทางอาหารและใช้ทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์คุกกี้ที่เหมาะสมต่อการยอมรับของผู้บริโภค

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วิธีการเตรียมแกนสับปรด

เตรียมแกนสับปรดด้วยวิธีการที่คัดแปลงจากวิธีการของ Khamnongphai (2014) โดยนำแกนสับปรดมาหั่นเป็นแผ่นบางๆ จากนั้นนำไปต้มกับน้ำ

ด้วยอัตราส่วนระหว่างน้ำกับแกนสับปะรด ใช้ อัตราส่วน 3:1 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก เป็นเวลา 30 นาที สะเด็ดน้ำด้วยกระชอนตาถี่นาน 10 นาที นำมา บดให้ละเอียด โดยเครื่องบดอาหาร จากนั้นนำไป กรองเพื่อสะเด็ดน้ำออกด้วยผ้าขาวบางที่รองด้วย กระชอนสแตนเลส นำลูกตุ้มเหล็ก 1000 กรัมทับไว้ เป็นเวลา 30 นาที จะได้แกนสับปะรดผงใส่ในถุงซิปล็อคและเก็บรักษาโดยใส่ในตู้แช่แข็ง เพื่อนำไปศึกษา ในขั้นตอนต่อไป

2. การศึกษาปริมาณแกนสับปะรดในการใช้เป็นสาร ทดแทนไขมันในคุกกี้ต่อลักษณะทางกายภาพและการ ยอมรับทางประสาทสัมผัส

ผลิตคุกกี้ตามสูตรพื้นฐานของ Wongsudalak (2019) โดยคุกกี้มีส่วนผสมประกอบด้วยแป้งสาลี เอนกประสงค์ 200 กรัม เบกกิ้งโซดา $\frac{1}{4}$ ช้อนชา เนย สตรสจืด 125 กรัม เนยขาว 50 กรัม เกลือ $\frac{1}{2}$ ช้อนชา น้ำตาลทรายขาว 140 กรัม ไข่ไก่ (เบอร์ 2) 1 ฟอง และกลิ่นวนิลา $\frac{1}{2}$ ช้อนชา ศึกษาในระดับการทดแทน ไขมันด้วยแกนสับปะรดที่ระดับร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 ของไขมันทั้งหมดในสูตร วิเคราะห์ลักษณะ ทางกายภาพและประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ ลักษณะ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยทดสอบการ ยอมรับทางประสาทสัมผัส ใช้วิธี 9-point hedonic scale โดยผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 50 คน คัดเลือกระดับการทดแทน ไขมันด้วยแกน สับปะรดที่ผู้บริโภครับการยอมรับสูงสุด เพื่อศึกษา ในขั้นตอนต่อไป

2.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของ ผลิตภัณฑ์คุกกี้

วัดอัตราการแผ่ขยายตัวโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ วัดความกว้าง และความหนาของคุกกี้ แล้ว นำไปคำนวณค่าอัตราการแผ่ขยายตัว (Spread ratio) ดังสมการ

อัตราการแผ่ขยายตัว (Spread ratio) = ความ กว้าง (มิลลิเมตร) / ความหนา (มิลลิเมตร)

3. ศึกษาปริมาณของเนื้อตาลสุกในคุกกี้ต่อลักษณะ ทางกายภาพและการยอมรับของผู้บริโภค

3.1 การศึกษาปริมาณของเนื้อตาลสุกในคุกกี้ ต่อลักษณะทางกายภาพและการยอมรับของผู้บริโภค

ผลิตคุกกี้ตามสูตรที่ผู้บริโภครับการยอมรับ จากขั้นตอนก่อนหน้า โดยทำการเสริมเนื้อตาลสุกที่ ระดับร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 ของน้ำหนักแป้ง วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและประเมินคุณภาพ ทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่น รส รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบ โดยรวม โดยทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส ใช้วิธี 9-point hedonic scale โดยผู้ทดสอบชิมที่ไม่ ผ่านการฝึกฝน จำนวน 50 คน คัดเลือกปริมาณการ เสริมเนื้อตาลสุกในผลิตภัณฑ์คุกกี้ที่ผู้บริโภคให้ คะแนนการยอมรับสูงสุดเพื่อศึกษาในขั้นตอนต่อไป

3.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของ ผลิตภัณฑ์คุกกี้

3.2.1 วัดค่าสีของคุกกี้ ได้แก่ ค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสี เหลือง (b*) วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดค่าสี Colorimeter

3.2.2 วัดค่าเนื้อสัมผัสของคุกกี้ โดยใช้เครื่อง Texture Analyser รุ่น TA-XTplus (Surrey, England) Load cell ขนาด 5 กิโลกรัม ใช้หัววัดทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ระยะการกด ตัวอย่าง 10 มิลลิเมตร ความเร็วเข็มวัดขณะทดสอบ 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที

3.2.3 วัดอัตราการแผ่ขยายตัวโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ วัดความกว้าง และความหนาของ คุกกี้ แล้วนำไปคำนวณค่าอัตราการแผ่ขยายตัว (Spread ratio) ดังสมการ

อัตราการแผ่ขยายตัว (Spread ratio) = ความกว้าง (มิลลิเมตร) / ความหนา (มิลลิเมตร)

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

รายงานผลการทดลองในรูปของคะแนนเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี ANOVA ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการ Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการศึกษาปริมาณแแกนสับปะรดที่ใช้เป็นสารทดแทนไขมันในคุกกี้ต่อลักษณะทางกายภาพและการยอมรับทางประสาทสัมผัส

1.1 ปริมาณแแกนสับปะรดที่ใช้เป็นสารทดแทนไขมันในคุกกี้ต่อลักษณะทางกายภาพ

การศึกษาปริมาณแแกนสับปะรดที่ระดับร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 ในผลิตภัณฑ์คุกกี้ต่อลักษณะทางกายภาพของคุกกี้ได้แก่ อัตราการแผ่ขยายของคุกกี้เมื่อใช้แแกนสับปะรดเป็นสารทดแทนไขมัน แสดงดังตารางที่ 1 ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแแกนสับปะรดแทนไขมันในสูตรของคุกกี้ร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 มีผลทำให้คุกกี้มีความกว้างโดยเฉลี่ยลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุมและทำให้คุกกี้มีความหนาเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองความกว้างและความหนาของคุกกี้ส่งผลต่อค่าการคำนวณอัตราการแผ่ขยายของคุกกี้ จากผลการคำนวณพบว่า อัตราการแผ่ขยายตัวของคุกกี้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปริมาณแแกนสับปะรดเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณแแกนสับปะรดร้อยละ 20-50 อัตราการแผ่ขยายตัวของคุกกี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ผลการศึกษายังสอดคล้องกับผลการศึกษาการเติมโยอาหารจากแหล่งต่างๆ มีผลทำให้ อัตราการแผ่ขยายของคุกกี้ลดลงเมื่อปริมาณโยอาหารเพิ่มขึ้น ได้แก่ การเติมผงดอกโสน (Khumkhom, 2018) ผงใบกะเพรา (Inchuen *et al.*, 2018) ผงอรุณอบแห้ง (Kuchtová *et al.*, 2018) ผงจากเปลือกมะม่วง (Goswami *et al.*, 2017) โดยปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการแผ่ขยายตัวของคุกกี้ที่สำคัญ ได้แก่ ขั้นตอนการตีเนยและน้ำตาลซึ่งในขั้นตอนนี้การตีจะทำให้มีอากาศแทรกตัวเข้าไปในส่วนผสม เมื่อนำคุกกี้ไปอบความร้อนจะทำให้อากาศขยายตัวส่งผลให้คุกกี้เกิดการขยายตัว ส่วนอีกขั้นตอนที่สำคัญของการเตรียมผลิตภัณฑ์คุกกี้คือการผสมแป้งสาลีและของเหลว ซึ่งนำไปสู่การเกิดโครงสร้างกลูเตนซึ่งกลูเตนมีโครงสร้างที่แข็งแรงสามารถกักเก็บอากาศไว้ภายในได้ จึงส่งผลต่ออัตราการแผ่ขยายของคุกกี้ การลดลงของอัตราการแผ่ขยายตัวของคุกกี้ที่มีการใช้แแกนสับปะรดเป็นสารทดแทนไขมันในปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการที่แแกนสับปะรดมีคุณสมบัติเป็นโยอาหาร ซึ่งโยอาหารสามารถเข้าแข่งจับกับน้ำในส่วนผสมของคุกกี้ทำให้มีปริมาณน้ำจำนวนน้อยที่เหลือไปจับกับแป้งสาลี ทำให้โครงสร้างของกลูเตนมีความแข็งแรงน้อยลง ส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บอากาศลดลง อัตราการแผ่ขยายของคุกกี้จึงลดลงเมื่อปริมาณแแกนสับปะรดเพิ่มขึ้น (Yuenyongputtakan *et al.*, 2016) นอกจากนี้ อัตราการแผ่ขยายของคุกกี้ที่ลดลงยังอาจเนื่องมาจากการลดปริมาณไขมันในสูตรการผลิตและใช้สารทดแทนไขมัน โดยมีงานวิจัยพบว่าการใช้ถั่วลิสงบดแทนเนยและมาการีนในการผลิตคุกกี้ทำให้อัตราการแผ่ขยายของคุกกี้ลดลง (Tantakasem and Ruangchai, 2011) ทั้งนี้เนื่องจากไขมันทำหน้าที่ในการช่วยในการให้ความยืดหยุ่นแก่โครงสร้างของกลูเตนทำให้สามารถยืดหยุ่นได้ดี ซึ่งมีผลต่อการกักเก็บก๊าซที่เกิดขึ้นใน

ระหว่างการศึกษา (Chaemmek and Naiwikun, 2013) การแผ่ขยายของคุกกี้
 ดังนั้นการลดปริมาณไขมันลงจึงอาจมีผลต่ออัตรา

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของคุกกี้ที่ใช้แกนสับประดเป็นสารทดแทนไขมัน

ลักษณะทางกายภาพ	ปริมาณแกนสับประด (ร้อยละ)					
	สูตรควบคุม	10	20	30	40	50
						
ความกว้าง(mm)	4.14 ± 0.43 ^a	3.58 ± 0.21 ^{ab}	3.38 ± 0.10 ^{bc}	2.88 ± 1.00 ^c	3.16 ± 0.20 ^{bc}	3.16 ± 0.20 ^{bc}
ความหนา(mm)	0.84 ± 0.05 ^d	1.08 ± 0.10 ^c	1.18 ± 0.04 ^{bc}	1.22 ± 0.04 ^{bc}	1.28 ± 0.13 ^{ab}	1.42 ± 0.22 ^a
อัตราการแผ่ขยายตัว	4.95 ± 0.74 ^a	3.35 ± 0.51 ^b	2.66 ± 0.50 ^c	2.69 ± 0.19 ^c	2.48 ± 0.21 ^c	2.26 ± 0.37 ^c

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอนมีความแตกต่างของคะแนนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

1.2 ปริมาณแกนสับประดที่ใช้เป็นสารทดแทนไขมันในคุกกี้ต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัส

การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของคุกกี้ที่มีการทดแทนไขมันด้วยแกนสับประด 5 ระดับ คือ ร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 ของปริมาณไขมันทั้งหมด โดยการให้คะแนนการยอมรับด้วยวิธี 9-point hedonic scale ผลการศึกษาพบว่า คะแนนการยอมรับด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของสูตรทดแทนไขมันด้วยแกนสับประดร้อยละ 10 และ 20 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับคุกกี้สูตรควบคุม (ตารางที่ 2) โดยได้รับคะแนนความชอบอยู่ในช่วงชอบมาก อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณแกนสับประดในคุกกี้เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ 30-50 พบว่ามีผลทำให้คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสลดลงในทุกด้านอยู่ในช่วงเฉยๆ ถึงชอบเล็กน้อย การเพิ่มขึ้นของปริมาณแกนสับประดมีผลทำให้คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสลดลงเนื่องจากคุกกี้ที่มีปริมาณแกนสับประด

เพิ่มขึ้น ทำให้รูปร่างของคุกกี้มีการแผ่ขยายตัวลดลง กลิ่นและกลิ่นรสของเนยลดลง มีความหวานลดลงจากสูตรควบคุม และเนื้อสัมผัสมีความแข็งเพิ่มขึ้น ปริมาณแกนสับประดที่เหมาะสมที่ใช้เป็นสารทดแทนไขมันในคุกกี้ที่ผู้บริโภคให้การยอมรับคือ แกนสับประดร้อยละ 20

จากผลการทดลองการใช้แกนสับประดในการทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์คุกกี้ พบว่าสามารถลดไขมันลงได้ร้อยละ 20 ของปริมาณไขมันทั้งหมด คิดเป็นพลังงาน 1,260 กิโลแคลอรี (จากการคำนวณ) ของไขมันทั้งหมดในสูตร เมื่อเทียบกับสูตรควบคุม คิดเป็นพลังงาน 1,575 กิโลแคลอรี ซึ่งจากการผลิตคุกกี้ใน 1 สูตร จะได้คุกกี้จำนวน 110 ชิ้น เมื่อนำมาคิดเป็นพลังงานต่อชิ้น สูตรควบคุมจะได้พลังงาน 14.31 กิโลแคลอรี และสูตรทดแทนไขมันจะได้พลังงาน 11.45 กิโลแคลอรี จะเห็นได้ว่าการนำแกนสับประดมาใช้ทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์คุกกี้ ทำให้มีไขมันในผลิตภัณฑ์ลดลงและเพิ่มใยอาหารให้ร่างกาย ช่วยลดการสะสมไขมันในร่างกาย

นอกจากนี้โยอาหารสามารถประยุกต์ใช้ในอาหารสำหรับผู้ที่ต้องการลดน้ำหนักหรือควบคุมน้ำหนักตัว เนื่องจากโยอาหารส่วนใหญ่ในแกนสับปะรดเป็นโยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ (Khamnongphai, 2014) มีความสามารถในการดูดซับน้ำ เกิดการพองตัวและดูดน้ำเอาไว้ เมื่อรับประทาน

เข้าไปจะทำให้รู้สึกอิ่มเร็วและอิ่มนานขึ้นทำหน้าที่เพิ่มมวลอุจจาระในระบบทางเดินอาหาร ดังนั้นการลดพลังงานและเสริมโยอาหารมีประโยชน์ต่อผู้บริโภคทั่วไป และกลุ่มคนที่มีปัญหาเรื่องน้ำหนักตัวเกิน หรือบุคคลที่ต้องการควบคุมน้ำหนักตัวได้

ตารางที่ 2 คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสของลูกกึ่งที่มีการใช้แกนสับปะรดเป็นสารทดแทนไขมัน

คุณลักษณะ	ปริมาณแกนสับปะรด (ร้อยละ)					
	สูตรควบคุม	10	20	30	40	50
ลักษณะปรากฏ	7.30 ± 1.61 ^a	7.18 ± 1.36 ^a	7.06 ± 1.44 ^a	6.40 ± 1.42 ^b	6.26 ± 1.80 ^b	6.12 ± 1.83 ^b
สี	7.62 ± 1.12 ^a	7.42 ± 1.44 ^a	7.10 ± 1.31 ^{ab}	5.98 ± 1.81 ^{bc}	6.48 ± 1.95 ^c	6.32 ± 1.68 ^c
กลิ่น	7.50 ± 1.40 ^a	7.44 ± 1.47 ^a	7.32 ± 1.47 ^a	6.62 ± 1.46 ^b	6.50 ± 1.88 ^b	6.54 ± 1.69 ^b
กลิ่นรส	7.68 ± 1.07 ^a	7.50 ± 1.24 ^a	7.30 ± 1.19 ^{ab}	6.88 ± 1.30 ^b	6.80 ± 1.69 ^{bc}	6.26 ± 1.98 ^c
รสชาติ	7.66 ± 1.28 ^a	7.50 ± 1.37 ^{ab}	7.42 ± 1.31 ^{ab}	6.98 ± 1.42 ^{bc}	6.66 ± 1.69 ^c	5.96 ± 2.10 ^d
ลักษณะเนื้อสัมผัส	7.64 ± 1.38 ^a	7.56 ± 1.38 ^a	7.20 ± 1.38 ^a	6.46 ± 1.63 ^b	6.46 ± 1.88 ^b	5.68 ± 1.98 ^c
ความชอบโดยรวม	8.00 ± 0.94 ^a	7.90 ± 0.99 ^a	7.58 ± 1.05 ^a	7.00 ± 1.10 ^b	6.86 ± 1.61 ^{bc}	6.38 ± 1.73 ^c

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอนมีความแตกต่างของคะแนนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2. ผลการศึกษาปริมาณของเนื้อตาลสุกในลูกกึ่งต่อลักษณะทางกายภาพและการยอมรับของผู้บริโภค

2.1 ปริมาณเนื้อตาลสุกในลูกกึ่งต่อลักษณะทางกายภาพ

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของลูกกึ่งได้แก่ ค่าสี ความกว้าง ความหนา และอัตราการแผ่ขยายตัว ผลการวัดค่าสีของลูกกึ่งเสริมเนื้อตาลสุกที่ร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 พบว่าเมื่อเสริมเนื้อตาลสุกเพิ่มขึ้นทำให้ลูกกึ่งมีสีเข้มขึ้น โดยมีค่าความสว่าง (L^*) ลดลง ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3) ซึ่งแตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามการเติมเนื้อตาลสุกในผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันมีผลทำให้สีของผลิตภัณฑ์มีความ

แตกต่างกัน การเติมเนื้อตาลสุกในขนมเปียกปูนที่ระดับร้อยละ 3 4 และ 5 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ทำให้ขนมเปียกปูนมี ค่าสีแดง (a^*) และสีเหลือง (b^*) ลดลงส่วนค่าความสว่าง (L^*) ไม่แตกต่างกันเมื่อระดับของเนื้อตาลเพิ่มขึ้น (Luekhajon *et al.*, 2019) นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมเนื้อตาลสุกที่ปริมาณร้อยละ 15 30 และ 45 ทำให้ค่าความสว่าง (L^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ของมัฟฟินลดลงเมื่อปริมาณเนื้อตาลสุกเพิ่มขึ้นถึงระดับร้อยละ 45 แต่การเพิ่มขึ้นของเนื้อตาลสุกไม่มีผลต่อค่าสีแดง (a^*) (Chysirichote and Siripanwattana, 2014) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสีผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับส่วนผสมของอาหาร ปริมาณการเสริมเนื้อตาลสุกในระดับต่างๆ ทำให้สีของลูกกึ่งมีสีเหลืองอ่อนจนถึงสีเหลือง

เข้ม เนื้อตาลประกอบไปด้วยสารสีเหลืองซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นแคโรทีนอยด์โดยพบว่าแคโรทีนอยด์ในเนื้อตาลมีปริมาณ $2,204.33 \pm 147.67 \mu\text{g/g}$ dried weight (Pongsusaeen, 2015) การเพิ่มขึ้นของปริมาณเนื้อตาลจึงทำให้ลูกก็มีสีเหลืองเข้มขึ้นค่าความสว่างจึงลดลง นอกจากนี้ค่าความสว่างที่ลดลงในลูกที่มีปริมาณเนื้อตาลสูงขึ้นอาจเนื่องมาจากการเกิดสีน้ำตาลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเมลลาร์ดที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดอะมิโนเมื่อได้รับความร้อน โดยมีงานวิจัยพบว่าในเนื้อตาลมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ร้อยละ 9.5 (Vengaiyah *et al.*, 2015) เมื่อปริมาณเนื้อตาลเพิ่มขึ้นจึงทำให้ผลิตภัณฑ์สีน้ำตาลเพิ่มมากขึ้นด้วยผลิตภัณฑ์จึงมีสีคล้ำขึ้น

อัตราการแผ่ขยายตัวของลูกที่มีการใช้เนื้อตาลสูง คำนวณได้จากความกว้างและความหนาของลูก เมื่อใช้เนื้อตาลสูงผสมลงในลูก (ตารางที่ 3) ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเนื้อตาลสูงร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 มีผลทำให้ลูกก็มีความกว้างโดยเฉลี่ยลดลงแต่ทำให้ความหนาของลูกก็เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองดังกล่าวการเพิ่มขึ้นของปริมาณเนื้อตาลสูงส่งผลให้อัตราการแผ่ขยายตัวของลูกก็ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร

ควบคุมทั้งนี้เนื่องมาจากเนื้อตาลสูงที่เพิ่มลงในลูกก็มีองค์ประกอบที่เป็นใยอาหาร จึงทำให้เกิดการแย่งจับกับน้ำ ทำให้เหลือน้ำปริมาณน้อยลงในการจับกับโปรตีนกลูเตนินและไกลอะดินในแป้งสาลีเกิดโครงสร้างของกลูเตนลดลงอัตราการแผ่ขยายจึงลดลง

การทดสอบเนื้อสัมผัสของลูกที่มีการใช้เนื้อตาลสูงโดยการทดสอบค่าความแข็งและค่าความกรอบ จากผลการทดสอบวัดค่าเนื้อสัมผัสที่เสริมเนื้อตาลสูงที่ร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 พบว่าเมื่อเสริมเนื้อตาลสูงเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งและค่าความกรอบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ผลการศึกษาสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ว่าเพื่อทดแทนน้ำตาลทรายในผลิตภัณฑ์ลูกก็ โดยพบว่าปริมาณกล้วยน้ำว้าที่เพิ่มขึ้นในลูกก็ ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงแต่ไม่ทำให้ค่าความกรอบลดลงโดยพบว่าเมื่อผลมาจากความชื้นที่เพิ่มขึ้น (Premprasopchok *et al.*, 2015) อย่างไรก็ตามความแข็งและความกรอบของลูกก็ลดลงเมื่อปริมาณเนื้อตาลสูงมากขึ้นอาจเนื่องมาจากเนื้อตาลที่เติมลงในลูกก็เป็นเนื้อตาลสดที่ไม่ผ่านการอบแห้ง ความชื้นที่อยู่ในเนื้อตาลทำให้เพิ่มความชื้นในลูกก็เมื่อปริมาณเนื้อตาลเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความแข็งและความกรอบของลูกก็ลดลง

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ลูกก็ทดแทนไขมันด้วยแกนสับปะรดและเสริมเนื้อตาลสูงในระดับต่างๆ

ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์	ระดับการเสริมเนื้อตาลสูงในผลิตภัณฑ์ลูกก็ (ร้อยละ)					
	0	10	20	30	40	50
						
ค่าความสว่าง (L*)	50.42 ± 0.43^a	47.78 ± 0.21^b	45.18 ± 0.47^c	45.16 ± 0.09^c	43.29 ± 0.43^d	44.03 ± 0.28^d
ค่าความเป็นสีแดง (a*)	4.23 ± 0.40^e	6.89 ± 0.70^d	8.83 ± 0.17^c	10.14 ± 0.12^b	11.58 ± 0.05^a	12.21 ± 0.32^a
ค่าความเป็นสีเหลือง (b*)	21.49 ± 0.70^d	22.90 ± 0.03^c	24.48 ± 0.47^b	27.02 ± 0.06^a	26.87 ± 0.28^a	27.11 ± 0.27^a
ความกว้าง	3.12 ± 0.08^a	2.86 ± 0.15^b	2.84 ± 0.05^{bc}	2.80 ± 0.18^{bc}	2.72 ± 0.10^{bc}	2.68 ± 0.08^c
ความหนา	1.00 ± 0.00^c	1.16 ± 0.08^b	1.10 ± 0.07^b	1.12 ± 0.04^b	1.24 ± 0.05^a	1.14 ± 0.05^b

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ลักษณะทางกายภาพ ของผลิตภัณฑ์	ระดับการเสริมเนื้อตาลสุกในผลิตภัณฑ์ลูกกี้ (ร้อยละ)					
	0	10	20	30	40	50
อัตราการแผ่ขยายตัว	3.12 ± 0.08 ^a	2.46 ± 0.12 ^{bc}	2.58 ± 0.14 ^b	2.49 ± 0.13 ^{bc}	2.19 ± 0.07 ^c	2.35 ± 0.07 ^d
ความแข็ง (g)	1662.92 ±	1091.44 ±	669.64 ±	472.62 ±	258.82 ±	244.26 ±
	227.17 ^a	148.58 ^b	111.36 ^c	77.76 ^d	46.47 ^e	53.88 ^e
ค่าความกรอบ(g/sec)	5118.19 ±	3071.27 ±	1752.37 ±	1267.54 ±	682.86 ±	654.52 ±
	1048.32 ^a	767.62 ^b	232.55 ^c	125.21 ^d	51.41 ^e	54.71 ^e

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอนมีความแตกต่างของคะแนนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.2 ปริมาณเนื้อตาลสุกในลูกกี้ต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัส

การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของลูกกี้ที่มีการเสริมเนื้อตาลสุก 5 ระดับ คือ ร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 ของปริมาณแป้งทั้งหมด โดยการให้คะแนนการยอมรับด้วยวิธี 9-point hedonic scale ผลการศึกษาพบว่า กลิ่นรส และลักษณะเนื้อสัมผัส ของสูตรการเสริมเนื้อตาลสุกในลูกกี้ ร้อยละ 10 และ 20 มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับลูกกี้สูตรควบคุม (ตารางที่ 4) โดยได้รับคะแนนความชอบอยู่ในช่วงชอบปานกลางและ

ชอบเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณการเสริมเนื้อตาลสุกลงในลูกกี้เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ 30 40 และ 50 พบว่ามีผลทำให้คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสลดลงอย่างในทุกด้านอยู่ในช่วงชอบเล็กน้อย และเฉยๆ การเพิ่มขึ้นของปริมาณเนื้อตาลสุกมีผลทำให้คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสลดลงเนื่องจากลูกกี้ที่มีปริมาณเนื้อตาลสุกเพิ่มขึ้น ทำให้รูปร่างของลูกกี้มีการแผ่ขยายตัวลดลงจะมีกลิ่นและกลิ่นรสของเนื้อตาลสุกไปกลบกลิ่นเนยและเนื้อสัมผัสมีความเหนียวมากขึ้น ทำให้ลูกกี้มีลักษณะที่เปลี่ยนไปจากลูกกี้สูตรควบคุม

ตารางที่ 4 คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสของการเสริมเนื้อตาลที่เหมาะสมในลูกกี้

คุณลักษณะ	ระดับเนื้อตาลสุก (ร้อยละ)					
	สูตรควบคุม	10	20	30	40	50
ลักษณะปรากฏ	7.88 ± 1.33 ^a	7.16 ± 1.28 ^b	7.00 ± 1.55 ^b	6.86 ± 1.30 ^{bc}	6.60 ± 1.39 ^{bc}	6.28 ± 1.53 ^c
สี	7.78 ± 1.20 ^a	7.58 ± 1.14 ^a	7.26 ± 1.27 ^{ab}	6.80 ± 1.49 ^{bc}	6.44 ± 1.61 ^c	6.68 ± 1.31 ^c
กลิ่น	7.80 ± 1.04 ^a	7.28 ± 1.32 ^a	7.24 ± 1.25 ^a	6.30 ± 1.65 ^b	6.62 ± 1.15 ^b	6.14 ± 1.87 ^b
กลิ่นรส	7.82 ± 1.27 ^a	7.46 ± 1.43 ^{ab}	6.98 ± 1.51 ^b	6.24 ± 1.81 ^c	6.30 ± 1.66 ^c	5.68 ± 1.92 ^c
รสชาติ	7.90 ± 1.34 ^a	7.60 ± 1.42 ^{ab}	6.94 ± 1.65 ^b	6.10 ± 1.97 ^c	6.12 ± 1.66 ^c	5.48 ± 2.00 ^c
ลักษณะเนื้อสัมผัส	7.76 ± 1.40 ^a	7.26 ± 1.53 ^{ab}	6.94 ± 1.50 ^b	5.86 ± 1.93 ^c	5.92 ± 1.83 ^c	5.70 ± 1.85 ^c
ความชอบโดยรวม	8.06 ± 1.09 ^a	7.62 ± 1.29 ^{ab}	7.20 ± 1.26 ^b	6.20 ± 1.76 ^c	6.40 ± 1.47 ^c	6.02 ± 1.73 ^c

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวนอนมีความแตกต่างของคะแนนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

สรุป

การศึกษาการทดแทนไขมันด้วยแกนสับปะรด และการเสริมเนื้อตาลสุกในผลิตภัณฑ์คุกกี้ พบว่าสามารถทดแทนไขมันด้วยแกนสับปะรดได้ร้อยละ 20 และเสริมเนื้อตาลสุกได้ร้อยละ 10 สามารถลดปริมาณไขมันในสูตรคุกกี้ลงได้ร้อยละ 20 โดยที่คุกกี้ยังเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค นอกจากนี้การลดปริมาณไขมันในสูตรยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้ร้อยละ 15.92 เมื่อเปรียบเทียบกับคุกกี้สูตรควบคุม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาที่สนับสนุนงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

- Boonsong, K., BuaKhiao, P., Sipawatkun, O. and Ngoenthong, C. 2011. **Research Report on The Cultural Heritage in the Palm Muang Phetch Contributing to Community Life Banlad, Banlad District, Phetchaburi Province.** Department of Cultural Promotion Ministry of Culture, Phetchaburi. (in Thai)
- Boontaraphong, M., Jangchud, K., Jangchud, A. and Haurthaitansaan, V. 2001. Studies on the qualities of ripe Palmyrah fruit pulp and Kanom-Tan produced from pasteurized Palmyra fruit pulp, pp. 425-433. *In Proceedings of the 39th Kasetsart University Annual Conference: Fisheries, Agro-Industry.* Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Chaemmek, J. and Naiwikun, A. 2013. **Basic Baking Science and Technology.** Kasetsart University Press, Bangkok. (in Thai)
- Chaengphonak, P., Khamphamee, C. and Nupatum, P. 2015. Development of Reduced Fat Cookies Supplement with Gac Fruit. **Agricultural Science Journal** 46: 870-872. (in Thai)
- Chysirichote, T. and Siripanwattana, C. 2014. Development of Toddy Palm and Palmyra Palm Muffin. **SDU Research Journal** 7(1): 57-70. (in Thai)
- Goswami, M., Sharma, B., Mendiratta, S., Pathak, V., Kumar, R. and Talukder, S. 2017. Development of mango peel powder incorporated functional carabeef cookies. **Journal Meat Science** 12(1): 33-38.
- Inchuen, S., Naratippakorn, T. and Kheawruang, S. 2018. Effect of Holy Basil leaf powder on wheat flour property and cookies quality. **Khon Kaen Agriculture Journal** 46(1): 1388-1394. (in Thai)
- Khachonsetkan, P., Ariyabaranikul, S. and Khamongkol, T. 2019. Use of Carrot powder replaces the White butter in brownies. **Chulabhorn Scholastic Journal of Science** 2019(1): 2-6. (in Thai)
- Khamnongphai, P. 2014. Effect of pineapple core fiber on the quality of chiffon cake, pp. 22-51. *In Proceeding of Rajamangala University of Technology Tawan-ok Research Conference Sri-Ayutthaya Rajabhat University Group and Rajanagarindra Academic and Research.* Rajamangala university of technology tawan-ok, Chonburi. (in Thai)

- Khumkhom, S. 2018. Effect of additional dried *Sesbania* (*Sesbania Javanica* Miq.) flowers on physical nutritional and organoleptic characteristics of butter cookies. **Phranakhon Rajabhat Research Journal (Science and Technology)** 13(1): 139-154. (in Thai)
- Kuchtová, V., Kohajdová, Z., Karovičová, J. and Lauková, M. 2018. Physical, textural and sensory properties of Cookies incorporated with grape skin and seed preparations. **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences** 68(4): 309-317.
- Luekhajon, P., Bureepakdee, W. and Nicomrat, K. 2019. Effect of Adding Palmyra Palm Pulp on the Quality of Khanom Piak Poon. **Agricultural Science Journal** 50(2): 65-68. (in Thai)
- Pongsusaen, I. 2015. Production of food colorant from carotenoids in Palmary pulp. Master Thesis of Science (Food technology), Silpakorn University. (in Thai)
- Pornchalempong, P. and Rattanapanon, N. 2010. **Fat substitute**. Food Network Solution. Available Source: <http://WWW.foodnetworksolution.com>, March 14, 2020. (in Thai)
- Prakongpan, T. 1998. The extraction and application of dietary fiber and cellulose from pineapple cores. Master Thesis of Science (Food and Nutrition for Development), Mahidol University. (in Thai)
- Premprasopchok, T., Jankao, S. and Tanoi, P. 2015. Substitution of sugar with banana (*Musa sapientum* linn.) for cookies production, pp. 923-930. *In The 53rd Kasetsart University Academic Conference: Science, Genetic Engineering, Architecture and Engineering, Agricultural Industry, Natural Resources and Environment*. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Somboon, K., Klanthokphan, S., Sirisanyaluk, T., Kaosongsaeng, K. and Awuchanon, A. 2012. Beta-carotene Evaluation of Flesh Pumpkin in Different Fruit Maturity Stage, pp. 2317-2323. *In National Symposium Kasetsart University 9th Kamphaeng Saen Campus: Plant and Biotechnology, Field of Animal and Veterinary, Education and Development Sciences*. Kasetsart University, Nakhonpathom. (in Thai)
- Tantakasem, S. and Ruangchai, S. 2011. Using Ground Peanuts as a Fat Substitute in Cookies. **University of the Thai Chamber of Commerce Journal** 31(2): 114-125. (in Thai)
- Vengaiyah, P.C., Vijaya kumara, B., Murthy, G.N. and Prasad, K.R. 2015. Physico-Chemical Properties of Palmyrah fruit Pulp (*Borassus flabellifer* L.). **Journal nutrition food science** 5(5): 1-4.
- Wongsudalak, W. 2016. **Research Report on Development of Dietary Fiber Supplemented with Stringy Pulp Champedak in Cookies**. Songkhla Rajabhat University, Songkhla. (in Thai)
- Wongsudalak, W. 2019. **Bakery Handout**. Teaching documents, Home Economics Program Faculty of Science and Technology, Songkhla Rajabhat University, Songkhla. (in Thai)
- Yuenyongputtakan, W., Wichienchot, S. and Sukatta, U. 2016. **Research Report on Value added**

**of some Thai herbs residue form wastes
extraction process as functional food
ingredients.** Burapha University. (in Thai)

ผลของสาหร่ายใ้ใ้ไก่ที่มีต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพ และประสาทสัมผัส ของปลานิลอบกรอบผสมสาหร่าย

Effect of Dried Green Seaweed (*Ulva intestinalis*) on Physical Chemical Properties and Sensory Evaluation in Crispy Tilapia Snack with Seaweed Supplement

ปฏิภาณ พึ่งธรรมคุณ¹, เอกปวีร์ ชวนประสิทธิ์กุล¹, จันทนา ไพรบูรณ์² และ จีรวรรณ มณีโรจน์^{1*}

Patipan Phuengthammakun¹, Aekpavee Chuanprasitkul¹, Jantana Paiboon² and Jirawan Maneerote^{1*}

Received: 25 February 2021, Revised: 19 May 2021, Accepted: 22 June 2021

บทคัดย่อ

สาหร่ายใ้ใ้ไก่ (*Ulva intestinalis* Linnaeus) เป็นสาหร่ายที่อุดมไปด้วยคุณค่าทางอาหาร สามารถนำไปเติมในอาหาร เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับผลิตภัณฑ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบผสมสาหร่ายใ้ใ้ไก่ โดยศึกษาสัดส่วนระหว่างซูริมิและปลานิลที่เหมาะสม แปรอัตราส่วนระหว่างซูริมิต่อปลานิล 3 ระดับ (100:0 70:30 และ 50:50 โดยน้ำหนัก) และศึกษาปริมาณของสาหร่ายใ้ใ้ไก่แห่งที่เหมาะสม โดยแปรสัดส่วนของสาหร่าย 3 ระดับ (ร้อยละ 1 3 และ 5) โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่ใส่สาหร่าย ศึกษาคุณภาพทางเคมี กายภาพ และประเมินความชอบทางประสาทสัมผัส จากการศึกษาพบว่า ตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของซูริมิ และปลานิลที่ 70:30 โดยน้ำหนัก มีค่าความกรอบมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นที่ทำการทดลอง สอดคล้องกับคะแนนเฉลี่ยความชอบในด้านกลิ่นรส รสชาติ ความกรอบ และความชอบโดยรวม ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างซูริมิ และปลานิลที่ 70:30 โดยน้ำหนัก เป็นสูตรที่เหมาะสม การศึกษาปริมาณของสาหร่ายใ้ใ้ไก่ที่เหมาะสม พบว่า ค่า a_w และค่าความกรอบในตัวอย่างที่ร้อยละ 3 ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) กับตัวอย่างควบคุม ส่วนค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) กับตัวอย่างที่มีปริมาณของสาหร่ายใ้ใ้ไก่ ร้อยละ 1 ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบเฉลี่ย ด้านกลิ่น ความกรอบ และความชอบรวม ในระดับเล็กน้อยถึงปานกลาง (6.70 คะแนน) ดังนั้นความเข้มข้นของสาหร่ายใ้ใ้ไก่ ร้อยละ 3 เป็นระดับที่เหมาะสมในการผลิตปลานิลอบกรอบผสมสาหร่ายใ้ใ้ไก่

¹ ภาควิชาผลิตภัณฑ์ประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

¹ Department of Fishery Products, Faculty of Fisheries, Kasetsart University, 50 Ngamwongwan, Ladyao, Chatujak, Bangkok 10900, Thailand.

² ภาควิชาชีววิทยาประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

² Department of Fisheries, Faculty of Fisheries, Kasetsart University, 50 Ngamwongwan, Ladyao, Chatujak, Bangkok 10900, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): ffisjwm@ku.ac.th

สาหร่ายไส้ไก่แห้งมี ศักยภาพในการนำไปเติมเพื่อเพิ่มคุณค่าทางอาหารในผลิตภัณฑ์ประเภทขนมขบเคี้ยว และให้ประโยชน์ต่อสุขภาพ

คำสำคัญ: สาหร่ายไส้ไก่, ปลานิลอบกรอบ, ขนมขบเคี้ยว, ปลานิล, สาหร่ายทะเล

ABSTRACT

Ulva intestinalis Linnaeus is a high nutritional value of green algae. It can be supplemented in food to increase nutritional value in food products. Thus, the main objective of this study was to develop crispy Tilapia snack supplemented with dried green seaweed. The optimal ratio between surimi and mince fish (Nile tilapia) was investigated in three ratios: 100:0, 70:30 and 50:50 w/w. The optimal concentration of dried green seaweed was also quantified through three concentrations: 1%, 3% and 5 % w/w, compared with control sample of 0% of dried green seaweed. Chemical physical and sensory evaluation of crispy tilapia snack were determined. The results revealed that crispness of sample at ratio 70:30 was significantly higher ($p \leq 0.05$) than those in other samples as well as high average sensory score in flavor, taste, crispness and overall acceptance. The ratio of surimi and mince fish at 70:30 w/w was optimal and used to investigate the optimal concentration of dried green seaweed. The result showed that a_w and crispness in sample at 3 % concentration of dried seaweed showed no significant different ($p > 0.05$) with control sample. Lightness (L^*) and yellowness (b^*) of sample at 3% concentration of dried seaweed were not significantly different ($p > 0.05$) from the sample at 1% concentration of dried seaweed. Sensory panelists moderately preferred the sample with 3% concentration of dried green seaweed in odor, crispness and overall acceptance (6.70). Thus, the concentration at 3% of dried gut weed was optimal for adding in crispy Tilapia snack. Dried *Ulva intestinalis* has a potential to apply in snack products with beneficial health effects.

Key words: *Ulva intestinalis*, fish snack, snack, Nile tilapia, seaweed

บทนำ

ในปัจจุบันผู้คนหันมาเลือกรับประทานผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปเพื่อสุขภาพมากขึ้น โดยอาหารสำเร็จรูปเพื่อสุขภาพในประเทศไทยมีมูลค่าอยู่ที่ประมาณ 6,300 ล้านบาท (Food Intelligence Center, 2017) ส่วนตลาดของขนมขบเคี้ยวมีมูลค่าสูงถึง 37,236 ล้านบาท และมีแนวโน้มเติบโตขึ้นทุกปี (Eukeik.ee, 2019) ซึ่งปลานิลอบกรอบ (Fish Snack) เป็นผลิตภัณฑ์

จากปลาที่นำเนื้อปลาบดละเอียดปรุงรสแล้วทำเป็นแผ่นตากหรืออบให้แห้ง ทำให้กรอบด้วยการทอดหรืออบกรอบ ใช้เป็นอาหารว่างเสริมโปรตีนราคาถูก (Preechanon, 1988) เนื้อปลาโปรตีนประมาณร้อยละ 17-23 ซึ่งเป็นโปรตีนที่ย่อยง่ายกว่าเนื้อสัตว์ชนิดอื่นๆ เหมาะสมต่อการนำมาเป็นของว่างให้เด็กวัยเรียน ผู้สูงอายุ และผู้ป่วยที่ระบบการย่อยอาหารทำงานได้ไม่เต็มที่ (Wongnok, 2012) ส่วนสาหร่ายไส้ไก่ (*Ulva*

intestinalis) เป็นสาหร่ายสีเขียว มีเซลล์ลักษณะอ่อนนุ่ม และมีวงจรรีชีวิตสั้น (Reine and Trono, 2001) พบได้ทั่วไปบริเวณแหล่งน้ำกร่อย (Guiry, 2020) สาหร่ายไส้ไก่อุดมไปด้วยคุณค่าทางอาหาร เช่น โปรตีน แร่ธาตุ กรดอะมิโน กรดไขมัน และมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนใหญ่ (Murata and Nakazoe, 2001) สาหร่ายไส้ไก่มีการผลิตโดยเลี้ยงร่วมกับการเลี้ยงกุ้งทะเล ซึ่งในช่วงที่มีการเจริญเติบโตมีผลผลิตสูงถึง 1.5 ตัน น้ำหนักเปียก หรือ 142 กิโลกรัม น้ำหนักแห้งต่อไร่ ซึ่งเป็นปริมาณผลผลิตที่สูงมาก (Ratana-arporn *et al.*, 2009) สาหร่ายไส้ไก่มักถูกใช้เป็นตัวเติมในอาหารสัตว์ มีการศึกษาโดยนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงอาหารสำหรับมนุษย์ไม่มากนัก เช่น นำมาบริโภคโดยตรง เป็นสารให้กลิ่นรสซีฟู้ด หรือ ผสมในข้าวเกรียบ (Tanuttawongcharoen *et al.*, 2012) เป็นต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของสาหร่ายไส้ไก่ และเพิ่มคุณค่าอาหารให้กับชนมชนเขียว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ปลานิลกรอบผสมสาหร่ายไส้ไก่ โดยศึกษาสัดส่วนของปลานิลและซูริมิที่เหมาะสม และปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมเพื่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และศึกษาผลของสาหร่ายไส้ไก่แห้งที่มีต่อคุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสในผลิตภัณฑ์ปลานิลกรอบผสมสาหร่ายไส้ไก่

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ สูตรต้นแบบและกระบวนการผลิตของปลานิลกรอบ

วัตถุดิบซูริมิหรือเนื้อปลาสด เป็นเนื้อปลาทรายแดงแช่เยือกแข็งเกรด AA จากบริษัทแปซิฟิกมารีนฟู้ด จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร ขนส่งมาที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาผลิตภัณฑ์ประมง ภายในเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อทำการทดลองนำมาทำการละลายที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการผลิต ส่วนปลานิล ซีอิ้วขาว ซีอิ้วดำ ลูกผักชี (เป็นเครื่องเทศเพื่อให้กลิ่นรสที่ช่วยกลบกลิ่นคาวของปลาและซูริมิ) พริกไทยป่น และเกลือ ซื้อมาจากซูเปอร์มาร์เก็ต เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร

สูตรต้นแบบจาก Raksakulthai *et al.* (2002) โดยเตรียมเนื้อปลาสด 1000 กรัม ล้างด้วยน้ำเกลือ 0.3% บดเนื้อปลาให้ละเอียดแล้วเคล้าส่วนผสมกับเนื้อปลา ได้แก่ ซีอิ้วขาว 50 กรัม ซีอิ้วดำ 5 กรัม น้ำ 100 กรัม น้ำตาลทราย 100 กรัม ลูกผักชี 2 กรัม พริกไทยป่น 2 กรัม และเกลือ 4 กรัม ดังแสดงในตารางที่ 1 ทำการรีดเป็นแผ่นบางๆ ในถุงร้อน จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตัดเป็นชิ้นเล็ก แล้วนำไปอบด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟ 600 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที (Pansawad *et al.*, 2018)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมต้นแบบของผลิตภัณฑ์ปลานิลลอบกรอบ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (กรัม)
เนื้อปลาสด	1,000
ซีอิ๊วขาว	50
ซีอิ๊วดำ	5
น้ำเย็น	100
น้ำตาลทราย	100
ลูกผักชี	2
พริกไทยป่น	2
เกลือ	4

ที่มา: Raksakulthai *et al.* (2002)

2. ศึกษาอัตราส่วนของเนื้อปลาที่เหมาะสมในการผลิตปลานิลลอบกรอบ

ศึกษาวิธีการผลิตปลานิลลอบกรอบกรอบจำนวน 3 สูตร ซึ่งคัดแปลงมาจากสูตรต้นแบบ (Raksakulthai *et al.*, 2002) โดยให้สูตรที่ 1 2 และ 3 แปรอัตราส่วนระหว่างเนื้อปลานิล และซูริมีที่ 100:0 70:30 และ 50:50 ตามลำดับ ให้อัตราส่วนแป้งมันคงที่ที่ร้อยละ 5 ดังตารางที่ 2 จากนั้นเตรียมกระบวนการผลิตตามสูตรต้นแบบ โดยเตรียมเนื้อปลานิลแล้วทำการล้างเนื้อปลานิลแล้วด้วยน้ำเกลือ ร้อยละ 0.3 สับเป็นชิ้นเล็ก นำไปสับผสมกับซูริมีให้ละเอียดเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติมเกลือแล้วสับผสมเป็นเวลา 30 วินาที ใส่น้ำเย็นแล้วสับผสมเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นทำการใส่ซอสปรุงรสภูเขาทอง น้ำตาลพริกไทยป่น แล้วสับผสมเป็นเวลา 30 วินาที ตามด้วยการใส่แป้งมันแล้วสับผสมเป็นเวลา 1 นาที โดยมี

ปริมาณของส่วนผสมดังตารางที่ 2 นำปลาสดที่ทำการผสมแล้วใส่ลงในถุงร้อน 70 กรัม จากนั้นรีดเป็นแผ่นบางในถุงพลาสติกขนาด 8 × 12 นิ้ว จนมีความหนา 1 มิลลิเมตร นำไปอบแห้งขึ้นต้น ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที จากนั้นทำการกลับด้านถุงพลาสติก ตัดถุงพลาสติกออกที่ด้านบนแล้วทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ตัดให้มีขนาด 3 × 3 เซนติเมตร ก่อนนำไปอบสุกด้วยไมโครเวฟกำลังไฟ 600 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นกลับด้านก่อนนำไปอบด้วยไมโครเวฟกำลังไฟ 600 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที ผลิตภัณฑ์ปลานิลลอบกรอบที่ได้เก็บใส่ถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ ที่อุณหภูมิ 30±2 องศาเซลเซียส แล้วนำไปวิเคราะห์คุณภาพของปลานิลลอบกรอบต่อไป

ตารางที่ 2 อัตราส่วนของส่วนผสมแต่ละสูตรที่ทำการศึกษา

ส่วนประกอบ (กรัม)	อัตราส่วนระหว่างซูริมิและปลานิล		
	100:0	70:30	50:50
ซูริมิปลาทรายแดง	78.5	55.0	39.5
เนื้อปลานิลบด	0.0	23.5	38.0
แป้งมัน	4.0	4.0	4.0
ซอสปรุงรสภูเขาทอง	4.0	4.0	4.0
น้ำเย็น	8.7	8.7	8.7
น้ำตาลทราย	4.0	4.0	4.0
พริกไทยป่น	0.5	0.5	0.5
เกลือ	0.3	0.3	0.3
รวม	100	100	100

ที่มา: คัดแปลงจาก Raksakulthai *et al.* (2002)

รายละเอียดการวิเคราะห์คุณภาพของปลานิลอบกรอบ

2.1 การวิเคราะห์ความชื้น ใช้วิธีการ AOAC (2000) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

- การวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดค่าสี ระบบ L* a* และ b* (ยี่ห้อ Konica Minolta รุ่น M-3500d Spectrophotometer, ประเทศญี่ปุ่น) โดยนำตัวอย่างปลานิลอบกรอบมาใส่ในภาชนะควอชต์รูปทรงกระบอก ที่ใช้สำหรับวัดตัวอย่าง กลับด้านตัวอย่างในการวัดแต่ละครั้ง โดยวิเคราะห์สูตรละ 5 ตัวอย่าง และตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

- การวิเคราะห์ค่าความเปราะ ความแข็ง และความกรอบด้วยเครื่องวัดค่าเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) (ยี่ห้อ Stable Micro System, รุ่น TA-XT Plus) โดยใช้หัววัดทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร (SMS P5S) กดตัวอย่างปลานิลอบกรอบที่วางอยู่บนฐานทรงกระบอก กำหนดความเร็วหัววัดก่อนสัมผัสตัวอย่าง (pretest speed) 1.0 มิลลิเมตร/วินาที ความเร็วหัววัด (test speed) 2.0 มิลลิเมตร/วินาที ความเร็วหัววัด

หลังสัมผัสตัวอย่าง (post speed) 10 มิลลิเมตร/วินาที นำข้อมูลที่ได้ผ่าน โปรแกรมสำเร็จรูปในเครื่องวัดเนื้อสัมผัส บันทึกค่าความเปราะ (Fracturability) ความแข็ง (Hardness) และค่าความกรอบ (Crispy) โดยวัดค่า 20 ซ้ำต่อตัวอย่าง (คัดแปลงจากวิธีของ Nguyen *et al.*, 2013)

- การวัดค่าปริมาณน้ำอิสระด้วยเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (Water activity Meter) (ยี่ห้อ AQUA LAB by Decagon รุ่น 4TE, ประเทศอเมริกา) โดยใส่ตัวอย่างปลานิลอบกรอบที่บดให้เป็นชิ้นเล็ก ใส่ลงในภาชนะพลาสติกสำหรับวัดค่า water activity ให้มีปริมาตร 4 ใน 5 ของภาชนะ นำตัวอย่างไปวัดค่า โดยวัดค่า 3 ซ้ำ ต่อตัวอย่าง

2.3 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสสำหรับสูตรทั้ง 3 สูตรด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ โดย 1 คะแนน คือ ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 คะแนน คือ ชอบมากที่สุด โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 40 คนทำการทดสอบในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความกรอบ ความชอบโดยรวม และการยอมรับโดยรวม (9-Point Hedonic Scale)

3. การศึกษาปริมาณผงสาหร่ายใ้ไก่ที่เหมาะสมในการผลิตปลานิลลอบกรอบผสมสาหร่ายใ้ไก่

คัดเลือกสูตรที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ปลานิลลอบกรอบจากการศึกษาในข้อ 2 จากนั้นนำมาศึกษาปริมาณผงสาหร่ายใ้ไก่ที่เหมาะสมในการผลิต

ผลิตภัณฑ์ปลานิลลอบกรอบ แปรปริมาณสาหร่ายใ้ไก่แตกต่างกันที่ 4 ระดับคือร้อยละ 0, 1, 3 และ 5 โดยแทนที่น้ำหนักของซูริมิในแต่ละสูตร ดังแสดงในตารางที่ 3 นำมาผ่านกระบวนการผลิตเช่นเดียวกับที่อธิบายไว้ในข้อ 2 ข้างต้น

ตารางที่ 3 อัตราส่วนของส่วนผสมในแต่ละสูตรที่ทำการศึกษาการเติมผงสาหร่ายใ้ไก่ในผลิตภัณฑ์ปลานิลลอบกรอบปริมาณร้อยละ 0, 1, 3 และ 5

ส่วนประกอบ (กรัม)	ร้อยละของสาหร่ายใ้ไก่			
	Control (ร้อยละ 0)	ร้อยละ 1	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5
ซูริมิ	55.0	54.0	52.0	50.0
ปลานิล	23.5	23.5	23.5	23.5
สาหร่ายใ้ไก่	0.0	1.0	3.0	5.0
แป้งมัน	4.0	4.0	4.0	4.0
ซอสปรุงรสฝาเขียว	4.0	4.0	4.0	4.0
น้ำเย็น	8.7	8.7	8.7	8.7
น้ำตาลทราย	4.0	4.0	4.0	4.0
พริกไทย	0.5	0.5	0.5	0.5
เกลือ	0.3	0.3	0.3	0.3
รวม	100	100	100	100

เมื่อได้ผลิตภัณฑ์ปลานิลลอบกรอบผสมสาหร่ายใ้ไ้ไก่นำมาวิเคราะห์ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ความชื้นใช้วิธีการ AOAC (2000) วิเคราะห์ 3 ซ้ำ

3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี เนื้อสัมผัส และ a_w ดังวิธีเช่นเดียวกับข้อ 2.2

3.3 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ดังวิธีเช่นเดียวกับข้อ 2.3

4. ศึกษาคุณลักษณะทางเคมีกายภาพของปลานิลลอบกรอบผสมสาหร่ายใ้ไก่

เมื่อได้ปลานิลลอบกรอบผสมสาหร่ายใ้ไ้ไก่นำมาศึกษาปริมาณที่เหมาะสม นำตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีกายภาพ ดังนี้

4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

4.1.1 วิเคราะห์หาปริมาณความชื้นด้วย

วิธีการของ AOAC (2000) จำนวน 3 ซ้ำ

4.1.2 วิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนด้วย

วิธีการของ AOAC (2000) จำนวน 3 ซ้ำ

4.1.3 วิเคราะห์หาปริมาณเถ้าด้วยวิธีการ

ของ AOAC (2000) จำนวน 3 ซ้ำ

4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ ได้แก่

ค่าสี เนื้อสัมผัส และ a_w ดังข้อ 2.2

5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี กายภาพ และการทดสอบทางประสาทสัมผัสวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Complete Randomized Design: CRD)

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. คุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบ ที่มีอัตราส่วนระหว่างซูริมีต่อปลานิล 100:0 70:30 และ 50:50

1.1 ปริมาณความชื้น และ a_w ของผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบ

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบ แสดงดังภาพที่ 1 ผลจากการศึกษาปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบพบว่า ปลานิลอบกรอบสูตรไม่มีเนื้อปลานิล (100:0) และอัตราส่วนระหว่างซูริมีต่อปลานิลที่ 70:30 โดยน้ำหนัก มีปริมาณความชื้นแตกต่างจากปลานิลอบกรอบที่มีอัตราส่วนซูริมีต่อปลานิล ที่ 50:50 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 3 พบว่าเมื่อปริมาณเนื้อปลานิลเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลง โดยสูตรที่มีเนื้อปลานิลร้อยละ 50 มีความชื้นเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 2.96 ส่วนปลานิลอบกรอบสูตรไม่มีเนื้อปลานิล และอัตราส่วนระหว่างซูริมีต่อปลานิลที่ 70:30 มีปริมาณความชื้นร้อยละ 3.55 และ 3.45 ตามลำดับ โดยปริมาณความชื้นที่ทำการศึกษาในแต่ละสูตรมีค่าน้อยกว่าปลานิลอบกรอบที่ผลิตด้วยวิธีการทอดด้วยน้ำมัน ที่มีปริมาณความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 6.45 ถึง 7.55 (Preechanon, 1988) ส่วนการวิเคราะห์ค่า a_w ในปลานิลอบกรอบ พบว่าปลานิลอบกรอบทั้งสามสูตรมีค่า a_w ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.44

ถึง 0.45 ซึ่งมีค่ามากกว่าปลานิลอบกรอบที่ทำจากปลาน้ำดอกไม้ และปลาอินทรี (Mesomya *et al.*, 2013) ที่มีค่า a_w อยู่ที่ 0.354 และ 0.405 ตามลำดับ โดยปริมาณเนื้อปลานิลที่มากขึ้นไม่ได้มีส่วนช่วยในการยึดจับกับปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบ เนื่องจากเนื้อปลานิล และซูริมีมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน โดยเนื้อปลานิลแต่มีปริมาณความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 79.1 (Garduño-Lugo *et al.*, 2003) ส่วนซูริมีปลาทรายแดงมีปริมาณความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 78.9 (Janta, 2000) ซึ่งปริมาณความชื้นนี้ไม่แตกต่างกันมากนัก ปริมาณความชื้นที่ลดลงเมื่อทำการเติมปลานิลลงไป ในผลิตภัณฑ์อาจเป็นผลมาจาก ซูริมีมีความสามารถในการเกิดเจลได้ดีกว่าเนื้อปลาที่ไม่ผ่านกระบวนการล้างน้ำแบบซูริมี ซึ่งความสามารถในการเกิดเจลจะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการอุ้มน้ำของผลิตภัณฑ์ (Suzuki, 1981) ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นภายนอกอยู่จำนวนมากจะมีความสามารถในการอุ้มน้ำที่ต่ำ (Chaijan *et al.*, 2006) ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำมากขึ้น จะทำให้การสูญเสียน้ำในผลิตภัณฑ์จากกระบวนการให้ความร้อนลดลง (Nuchpong and Sajjaanantakul, 2014) จึงทำให้เมื่อทำปลานิลอบกรอบที่มีอัตราส่วนระหว่างซูริมีต่อปลานิลที่ 50:50 มีปริมาณความชื้นต่ำที่สุด จากการศึกษาพบว่าเมื่อผสมเนื้อปลานิลกับซูริมีปลาทรายแดงที่อัตราส่วนระหว่างซูริมีต่อปลานิลที่ 50:50 จะทำให้ซูริมีเฟลสมีปริมาณความชื้นภายนอกมากกว่า สูตรที่ใส่ซูริมีต่อปลานิล 70:30 และสูตรที่ไม่ใส่ปลานิล เมื่อนำซูริมีเฟลสไปอบแห้งสูตรที่ใส่ซูริมีต่อปลานิล 50:50 จึงมีการระเหยความชื้นออกไปจากกระบวนการนี้มากที่สุด



(ก) 100:0



(ข) 70:30



(ค) 50:50

ภาพที่ 1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบที่มีอัตราส่วนระหว่างซูริมิ และปลานิลที่ร้อยละ (ก) 100:0 (ข) 70:30 และ (ค) 50:50

ตารางที่ 4 คุณลักษณะทางเคมี และกายภาพของผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบที่มีอัตราส่วนระหว่างซูริมิต่อปลานิล 100:0 70:30 และ 50:50

พารามิเตอร์	อัตราส่วนระหว่างซูริมิต่อปลานิล		
	100:0	70:30	50:50
ความชื้น (% wb)	3.55±0.14 ^a	3.45±0.19 ^a	2.96±0.06 ^b
a_w^{ns}	0.44±0.013	0.45±0.009	0.44±0.011
Fracturability (กรัม)	192.77±132.01 ^a	119.59±87.25 ^b	119.36±68.39 ^b
Hardness (กรัม)	311.18±145.47 ^a	264.76±131.36 ^{ab}	219.38±56.52 ^b
Crispness	5.39±3.07 ^b	8.17±5.17 ^a	6.61±4.12 ^{ab}
L^{*ns}	39.66±4.80	42.68±5.48	43.53±5.07
a^*	7.14±2.34 ^a	6.96±1.87 ^a	3.18±1.09 ^b
b^*	18.82±1.50 ^b	20.13±2.08 ^a	17.07±1.72 ^c

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัสจำนวน 20 ซ้ำ, ค่า L^* a^* b^* จำนวน 5 ซ้ำ, ปริมาณความชื้น และค่า a_w จำนวน 3 ซ้ำ, ที่มีตัวอักษร ^{a, b, c} ต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$), ^{ns} คือ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

1.2 คุณลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบ

ผลจากการศึกษาคุณลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบพบว่า ค่าความสว่าง L^* ของปลานิลอบกรอบทั้งสามสูตรไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงดังตารางที่ 4 ค่าความเป็นสีแดง a^* ของปลานิลอบกรอบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อผลิตภัณฑ์มีปริมาณเนื้อปลานิล

มากขึ้น ($p \leq 0.05$) โดยผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบที่มีอัตราส่วนระหว่างซูริมิ และปลานิลที่ 50:50 มีค่าความเป็นสีแดง (a^*) มากที่สุดคือ 3.18 ส่วนค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบที่มีอัตราส่วนระหว่างซูริมิ และปลานิลที่ 70:30 มีค่า b^* มากที่สุด คือ 20.13 ตามด้วยผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบสูตรไม่มีเนื้อปลานิล และปลานิลอบกรอบที่มี

อัตราส่วนระหว่างซูริมีต่อเนื้อปลานิลที่ 50:50 ตามลำดับ สัตว์ที่เข้มข้นของผลิตภัณฑ์อาจเป็นผลมาจาก โปรตีน ในเนื้อปลาทำปฏิกิริยากับน้ำตาลจึงเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเมื่อมีการให้ความร้อน (Niyomvit, 1983)

1.3 คุณลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบ

จากการศึกษาคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบพบว่า ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 4 โดยปลานิลอบกรอบสูตรที่ไม่มีเนื้อปลานิล มีค่าความแข็งมากที่สุดคือ 311.18 กรัม สูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างซูริมี และเนื้อปลานิลที่ 50:50 มีค่าความแข็งน้อยที่สุดคือ 219.38 กรัม แสดงให้เห็นว่าเมื่อผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบมีปริมาณเนื้อปลานิลมากขึ้น จะส่งผลให้คุณลักษณะเนื้อสัมผัสของปลานิลอบกรอบมีความนุ่มมากขึ้น และค่าความเปราะของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อาจเป็นเพราะเมื่อผ่านการให้ความร้อน ตัวอย่างจะมีการถ่ายโอนความร้อนและความชื้นระหว่างผลิตภัณฑ์กับระบบไปพร้อมกัน ในตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นน้อยอาจทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์แห้งแข็งได้เร็ว เมื่อนำไปวิเคราะห์เนื้อสัมผัส จึงพบว่าผลิตภัณฑ์นั้นแข็งแต่เปราะ ส่วนค่าความกรอบพบว่า สูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างซูริมี และเนื้อปลานิลที่ 70:30 มีค่าความกรอบมากที่สุด (8.17) อย่างไรก็ตามจากผลการประเมินทางประสาทสัมผัสพบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบเฉลี่ยด้านความกรอบในตัวอย่างที่ทำการทดลองทั้งสาม

สูตรไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 5

1.4 การประเมินทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบ

จากการประเมินทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบทั้งสามสูตรพบว่า คะแนนความชอบเฉลี่ยในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น และกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังตารางที่ 5 โดยผู้ทดสอบให้ความเห็นว่า สูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างซูริมี และเนื้อปลานิลที่ 50:50 มีกลิ่นคาวปลามากกว่าสูตรที่ไม่มีเนื้อปลานิล และสูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างซูริมี และเนื้อปลานิลที่ 70:30 ผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบมีคะแนนความชอบเฉลี่ยในด้านความกรอบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) กับตัวอย่างอื่นที่ทำการทดลอง โดยผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบทั้งสามตัวอย่าง มีคะแนนความชอบเฉลี่ยในด้านความชอบรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบทั้งสามสูตร มีร้อยละการยอมรับเท่ากันคือ ร้อยละ 92.50 จึงได้ทำการคัดเลือกสูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างซูริมี และเนื้อปลานิลที่ 70:30 เป็นสูตรที่เหมาะสมในการผลิตปลานิลอบกรอบผสมสาหร่ายไส้ไก่ เนื่องจากสูตรดังกล่าวมีค่าความกรอบที่มากกว่าตัวอย่างอื่นที่ทำการทดลอง (8.17) และมีคะแนนความชอบเฉลี่ยในด้านความชอบโดยรวมในระดับความชอบน้อยถึงปานกลาง (6.70)

ตารางที่ 5 ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ปลานิลลอบกรอบที่มีอัตราส่วนระหว่างชูริมีต่อปลานิล 100:0 70:30 และ 50:50

คุณลักษณะ	อัตราส่วนระหว่างชูริมีต่อปลานิล		
	100:0	70:30	50:50
ลักษณะปรากฏ ^{ns}	6.38±1.48	5.95±1.36	5.55±1.83
สี ^{ns}	6.48±1.28	6.13±1.54	5.93±1.93
กลิ่น ^{ns}	5.88±1.56	5.93±1.16	6.30±1.83
กลิ่นรส ^{ns}	6.13±1.28	6.28±1.15	6.23±1.54
รสชาติ ^{ns}	6.25±1.15	6.38±1.50	6.35±1.69
ความกรอบ ^{ns}	7.18±1.34	7.08±1.25	6.70±1.38
ความชอบโดยรวม ^{ns}	6.68±1.12	6.70±1.04	6.70±1.51
การยอมรับ(%)	92.50	92.50	92.50

หมายเหตุ: ค่าคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส เป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยผู้ทดสอบ 40 คน
^{ns} คือ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

2. คุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ปลานิลลอบกรอบผสมสาหร่ายไส้ไก่ที่ร้อยละ 0, 1, 3 และ 5

2.1 ปริมาณความชื้น และ a_w ของผลิตภัณฑ์ปลานิลลอบกรอบผสมสาหร่ายไส้ไก่

ตัวอย่างปลานิลลอบกรอบผสมสาหร่ายไส้ไก่ แสดงดังภาพที่ 2 ผลจากการศึกษาปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ปลานิลลอบกรอบพบว่า เมื่อมีการใส่สาหร่ายไส้ไก่ลงในผลิตภัณฑ์มากขึ้นจะทำให้ความชื้นของปลานิลลอบกรอบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 6 เป็นผลมาจากโครงสร้างของสาหร่ายไส้ไก่ที่ประกอบไปด้วยเส้นใย ทำให้มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดูดซึมน้ำแล้วกักเก็บไว้ในโครงข่ายของเส้นใย ดังนั้นเมื่อมีปริมาณผงสาหร่ายเพิ่มขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์ปลานิลลอบกรอบ มีคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำมากขึ้น (Hakimeh

et al., 2019) จึงส่งผลให้มีปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์มากขึ้น โดยตัวอย่างที่ผสมสาหร่ายไส้ไก่ปริมาณร้อยละ 5 มีปริมาณความชื้นมากที่สุด โดยมีปริมาณความชื้นร้อยละ 5.64 ส่วนตัวอย่างที่ไม่ใส่สาหร่ายไส้ไก่มีความชื้นร้อยละ 3.52 ตัวอย่างที่ผสมสาหร่ายร้อยละ 5 มีค่า a_w มากที่สุด เท่ากับ 0.462 ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับตัวอย่างปลานิลลอบกรอบที่ผสมสาหร่ายไส้ไก่ ร้อยละ 1 และ 3 ส่วนตัวอย่างปลานิลลอบกรอบที่ไม่ผสมสาหร่ายไส้ไก่มีค่า a_w ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในทุกตัวอย่างที่ทำการทดลอง อย่างไรก็ตาม ค่า a_w ของตัวอย่างปลานิลลอบกรอบผสมสาหร่ายไส้ไก่ที่ทำการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน (0.423 - 0.462) และไม่เกินค่ามาตรฐานของผลิตภัณฑ์ปลาแผ่นกรอบที่กำหนดไว้ที่ 0.6 (Community Product Standards Division, 2003) ในทุกตัวอย่างที่ทำการทดลอง



(ก) ร้อยละ 0



(ข) ร้อยละ 1



(ค) ร้อยละ 3



(ง) ร้อยละ 5

ภาพที่ 2 ผลึกภัณฑ์ปลานิลอบกรอบที่แปรปริมาณสาหร่ายใส่ไก่ (ก) ร้อยละ 0 (ข) ร้อยละ 1 (ค) ร้อยละ 3 และ (ง) ร้อยละ 5

ตารางที่ 6 คุณลักษณะทางเคมี และกายภาพของผลึกภัณฑ์ปลานิลอบกรอบผสมสาหร่ายใส่ไก่ ที่ร้อยละ 0, 1, 3 และ 5

พารามิเตอร์	ร้อยละของปริมาณสาหร่ายใส่ไก่			
	Control (ร้อยละ 0)	ร้อยละ 1	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5
ความชื้น (% wb)	3.52±0.12 ^c	3.65±0.16 ^c	4.11±0.05 ^b	5.64±0.37 ^a
a _w	0.445±0.120 ^{ab}	0.423±0.014 ^b	0.425±0.018 ^b	0.462±0.011 ^a
Hardness (กรัม)	357.08±104.68 ^d	718.35±196.79 ^c	909.52±291.01 ^b	1123.17±283.04 ^a
Fracturability(กรัม)	172.09±119.38 ^c	279.67±182.83 ^c	441.32±305.74 ^b	925±344.19 ^a
Crispness	9.71±5.66 ^a	10.29±5.83 ^a	10.11±4.77 ^a	7.43±1.93 ^b
L*	42.91±5.04 ^a	34.35±5.49 ^{bc}	34.93±1.74 ^b	31.69±2.24 ^c
a*	5.91±1.18 ^a	5.24±1.43 ^a	2.18±1.38 ^b	1.46±1.38 ^b
b*	19.79±2.40 ^a	15.26±2.59 ^b	13.37±0.91 ^b	12.39±1.46 ^c

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัสจำนวน 20 ซ้ำ ค่า L* a* b* จำนวน 5 ซ้ำ ปริมาณความชื้น และค่า a_w จำนวน 3 ซ้ำ ตัวอักษร ^{a, b, c} ต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2.2 คุณลักษณะเนื้อสัมผัสของผลึกภัณฑ์ปลานิลอบกรอบผสมสาหร่ายใส่ไก่

จากการศึกษาคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของผลึกภัณฑ์ปลานิลอบกรอบผสมสาหร่ายใส่ไก่พบว่า

เมื่อปริมาณสาหร่ายมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 6 โดยตัวอย่างที่ไม่ใส่สาหร่ายใส่ไก่มีความแข็งแรงอยู่ที่ 357.08 กรัม และตัวอย่างที่ใส่สาหร่ายร้อยละ 5 มีความแข็งแรงมากที่สุดอยู่ที่ 1123.17 กรัม เมื่อใส่ผงสาหร่ายใส่ไก่ ร้อยละ 1 ค่า Fracturability ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับตัวอย่างควบคุม ($p > 0.05$) แต่ปลานิลรอบรอบที่ใส่ผงสาหร่ายใส่ไก่ ที่ร้อยละ 3 และ 5 มีค่า Fracturability เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ เมื่อใส่ผงสาหร่ายใส่ไก่ ที่ร้อยละ 1 และ 3 ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) กับตัวอย่างควบคุม แต่เมื่อใส่ผงสาหร่ายใส่ไก่ ที่ร้อยละ 5 ค่าความกรอบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสูตรที่มีค่าความกรอบมากที่สุดคือสูตรที่ผสมสาหร่ายร้อยละ 1 โดยมีลักษณะการแตกหักของตัวอย่างจำนวน 10.29 สอดคล้องกับผลจากทางประสาทสัมผัส โดยผู้ร่วมทดสอบระบุว่าสูตรที่ใส่สาหร่ายใส่ไก่ร้อยละ 0, 1, และ 3 มีลักษณะของเนื้อสัมผัสที่ไม่แตกต่างกัน ส่วนสูตรที่ผสมสาหร่าย ร้อยละ 5 มีความกรอบลดลงอย่างเห็นได้ชัด ความแข็งที่มากขึ้น ความเปราะ และความกรอบที่ลดลงนี้อาจเป็นผลมาจาก เมื่อผสมสาหร่ายใส่ไก่ลงในซูริมิ จะทำให้เส้นใยที่ไม่ละลายน้ำของสาหร่ายเข้าไปแทรกอยู่ในโปรตีนซูริมิ เกิดเป็นโครงข่ายเส้นใย (Debusca *et al.*, 2014) ทำให้เส้นใยในซูริมิสามารถจับกับน้ำได้มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ความเปราะ และความกรอบลดลง Cofrades *et al.* (2008) พบว่า การใส่สาหร่ายในซูริมิจะทำให้ความแข็งของซูริมิเพิ่มขึ้น

2.3 คุณลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลานิลรอบรอบผสมสาหร่ายใส่ไก่

ผลจากการศึกษาคุณลักษณะสีของผลิตภัณฑ์ปลานิลรอบรอบผสมสาหร่ายใส่ไก่พบว่า เมื่อปริมาณของสาหร่ายใส่ไก่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่า

L^* a^* และ b^* ของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 6 และภาพที่ 2 เป็นผลมาจากรงควัตถุที่พบในสาหร่าย เช่น chlorophyll หรือ carotenoid ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีเข้มมากยิ่งขึ้น (Jimenez-Colmenero *et al.*, 2010) สอดคล้องกับการศึกษาของ Hakimeh *et al.* (2019) ที่ทำการใส่สาหร่ายใส่ไก่ในผลิตภัณฑ์ซูริมิพบว่าเมื่อปริมาณผงสาหร่ายใส่ไก่มากขึ้นจะทำให้ค่า L^* a^* และ b^* ลดลงเช่นเดียวกันกับการศึกษานี้

2.4 การประเมินทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ปลานิลรอบรอบผสมสาหร่ายใส่ไก่

จากผลการประเมินทางประสาทสัมผัสพบว่า คะแนนความชอบเฉลี่ยด้านลักษณะปรากฏและสีของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 7 เมื่อมีปริมาณสาหร่ายใส่ไก่มากขึ้น ผู้ทดสอบส่วนใหญ่ไม่ชอบสีของตัวอย่างที่ใส่สาหร่ายใส่ไกร้อยละ 5 เนื่องจากสีของผลิตภัณฑ์มีความเข้มมากเกินไป กลิ่น กลิ่นรส และรสชาติมีคะแนนความชอบเฉลี่ยลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากปริมาณสาหร่ายใส่ไก่ที่มากขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แสดงรสชาติของสาหร่ายมากเกินไป อาจทำให้ผู้ที่ทดสอบให้คะแนนความชอบลดลงได้ เช่นเดียวกับคะแนนความชอบเฉลี่ยด้านความชอบโดยรวม เมื่อปริมาณสาหร่ายใส่ไก่มากขึ้นจะส่งผลให้คะแนนความชอบเฉลี่ยด้านความชอบโดยรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จึงได้ทำการคัดเลือกตัวอย่างปลานิลรอบรอบที่ผสมสาหร่ายใส่ไกร้อยละ 3 เป็นสูตรที่เหมาะสม ในการผลิตผลิตภัณฑ์ปลานิลรอบรอบผสมสาหร่ายใส่ไก่ เนื่องจากมีคะแนนความชอบเฉลี่ยจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสในด้าน ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ ความกรอบ และความชอบโดยรวม ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับ

ตัวอย่างปลานิลรอบกรอบที่ผสมสาหร่ายใส้ไก่อ้อยละ 1 และมีผู้ทดสอบให้คะแนนการยอมรับ เท่ากับ ร้อยละ 75 ซึ่งมากกว่าตัวอย่างปลานิลรอบกรอบที่ผสมสาหร่ายใส้ไก่อ้อยละ 5 ที่ได้รับคะแนนการยอมรับ เท่ากับ ร้อยละ 20 ส่วนคุณลักษณะทางเคมีของตัวอย่างปลานิลรอบกรอบที่ใส่สาหร่ายใส้ไก่อ้อยละ 3 มีค่าความชื้นที่ต่างจากสูตรที่ใส่สาหร่ายร้อยละ 0

และร้อยละ 1 เล็กน้อย ค่า a_w และค่าความกรอบของตัวอย่างปลานิลรอบกรอบที่มีสาหร่ายใส้ไก่อ้อยละ 1 และ ร้อยละ 3 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ทำให้สาหร่ายใส้ไก่อ้อยละ 3 เป็นปริมาณสาหร่ายใส้ไก่อที่เหมาะสมสามารถเติมลงในผลิตภัณฑ์ปลานิลรอบกรอบ

ตารางที่ 7 คะแนนเฉลี่ยของผลประเมินทางประสาทสัมผัส ของผลิตภัณฑ์ปลานิลรอบกรอบผสมสาหร่ายใส้ไก่อที่ ร้อยละ 0, 1, 3 และ 5

คุณลักษณะ	ปลานิลรอบกรอบผสมสาหร่ายใส้ไก่อ			
	Control (ร้อยละ 0)	ร้อยละ 1	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5
ลักษณะปรากฏ	6.58±1.28 ^a	5.73±1.54 ^b	5.65±1.79 ^b	5.63±1.71 ^b
สี	6.83±1.26 ^a	5.35±1.46 ^b	5.65±1.78 ^b	5.48±1.71 ^b
กลิ่น	6.38±1.46 ^a	6.15±1.49 ^{ab}	6.28±1.34 ^a	5.53±1.43 ^b
กลิ่นรส	6.65±1.12 ^a	5.93±1.38 ^b	5.58±1.77 ^b	4.03±1.49 ^c
รสชาติ	6.93±1.07 ^a	5.90±1.34 ^b	5.63±1.73 ^b	3.68±1.75 ^c
ความกรอบ	7.65±1.31 ^a	6.33±1.76 ^b	6.30±1.73 ^b	3.08±1.85 ^c
ความชอบโดยรวม	7.13±0.79 ^a	6.15±1.23 ^b	5.98±1.69 ^b	3.88±1.54 ^c
การยอมรับ (%)	92.50	82.50	75.00	20.00

หมายเหตุ: ค่าคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส เป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยผู้ทดสอบ 40 คน

^{abc} คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานตามอักษรพิมพ์เล็กแตกต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3. คุณลักษณะทางเคมี และกายภาพของผลิตภัณฑ์ปลานิลรอบกรอบผสมสาหร่ายใส้ไก่อ ร้อยละ 3

จากการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการทางเคมีของผลิตภัณฑ์ปลานิลรอบกรอบผสมสาหร่ายใส้ไก่อ ร้อยละ 3 พบว่า มีปริมาณความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 5.32 ปริมาณโปรตีนสูงอยู่ที่ร้อยละ 24.42 พบปริมาณไขมันต่ำอยู่ที่ร้อยละ 1.44 (ตารางที่ 8) ส่วนคุณลักษณะทางกายภาพ พบว่า มีค่า a_w เท่ากับ 0.465 ซึ่งไม่เกิน

ตามปริมาณมาตรฐานผลิตภัณฑ์แผ่นปลากรอบที่กำหนดไว้ที่ 0.6 (Community Product Standards Division, 2003) ค่าเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ปลานิลรอบกรอบผสมสาหร่ายใส้ไก่อ มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 932.20 กรัม ค่าความเปราะเฉลี่ยอยู่ที่ 539.47 กรัม และค่าความกรอบอยู่ที่ 8.40 ส่วนค่าความชื้น L^* มีค่าเฉลี่ย 39.59 ค่า a^* มีค่าเฉลี่ย -0.42 และค่า b^* 18.03 (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 8 คุณลักษณะทางเคมีของผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบผสมสาหร่ายใส่ไก่ที่เหมาะสม

คุณลักษณะทางเคมี (น้ำหนักฐานเปียก)	ร้อยละ (ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)
ความชื้น	5.32 \pm 0.06
โปรตีน	24.42 \pm 0.95
ไขมัน	1.44 \pm 0.16

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมี ความชื้น โปรตีน และไขมัน จำนวน 3 ซ้ำ

ตารางที่ 9 คุณลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบผสมสาหร่ายใส่ไก่ที่เหมาะสม

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
a_w	0.465 \pm 0.010
Hardness (g)	932.20 \pm 330.27
Fracturability (g)	539.47 \pm 345.40
Crispness	8.40 \pm 4.44
L*	39.59 \pm 3.23
a*	-0.42 \pm 0.35
b*	18.03 \pm 1.24

หมายเหตุ: จากการวิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัสจำนวน 20 ซ้ำ ค่า L* a* b* จำนวน 5 ซ้ำ ค่า a_w จำนวน 3 ซ้ำ

สรุป

จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบคือ อัตราส่วนระหว่างซูริมีต่อปลานิลที่ 70:30 โดยน้ำหนักและปริมาณสาหร่ายใส่ไก่ที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 3 เนื่องจากมีความกรอบรสชาติ และกลิ่นของสาหร่ายที่เป็นที่ยอมรับของผู้ทดสอบ ปลานิลอบกรอบผสมสาหร่ายใส่ไก่ มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 24.42 ปริมาณไขมันร้อยละ 1.44 ความชื้น ร้อยละ 5.32 และค่าปริมาณน้ำอิสระ เท่ากับ 0.465 ผลิตภัณฑ์ปลานิลอบกรอบผสมสาหร่ายใส่ไก่ เป็นผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวที่มีโปรตีนจากเนื้อปลาและเสริมด้วยสาหร่ายใส่ไก่ เป็นการนำสาหร่ายใส่ไก่ไปใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่าได้อีกทางหนึ่ง สาหร่ายใส่ไก่เป็นสาหร่ายที่อุดมไปด้วยสารอาหาร วิตามิน และแร่ธาตุ ที่มีประโยชน์ จึงควร

ที่จะมีการนำไปศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาต่อยอดให้เป็นส่วนประกอบอาหารเชิงฟังก์ชันจากสาหร่ายใส่ไก่ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) ภายใต้ชุดโครงการนวัตกรรมในการผลิตสาหร่ายทะเลเพื่อพัฒนาและใช้ประโยชน์เป็นผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพ ประจำปีงบประมาณ 2562-2563 รหัสชุดโครงการ ป-2.2(ข) 16.62

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 2000. **Official methods of analysis of AOAC international**. Association of Official Analytical Chemistry, Gaithersburg.
- Chaijan, M., Benjakul, S., Visessanguan, W. and Fautsman, C. 2006. Physicochemical properties, gel-forming ability and myoglobin content of sardine (*Sardinella gibbosa*) and mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) surimi produced by conventional method and alkaline solubilization process. **European Food Research Technology** 222(2): 58-63.
- Cofrades, S., Lopez-Lopez, I., Solas, M.T., Bravo, L. and Jimenez-Colmenero, F. 2008. Influence of different types and proportions of added edible seaweeds on characteristics of low-salt gel/emulsion meat systems. **Meat Science** 79(1): 767-776.
- Community Product Standards Division. 2003. **Community Product Standards for Crispy Fish Plate**. Available sources: http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps106_53.pdf, July 9, 2020. (in Thai)
- Debusca, A., Tahergorabi, R., Beamer, S.K., Matak, K.E. and Jaczynski, J. 2014. Physicochemical properties of surimi gels fortified with dietary fiber. **Food Chemistry** 148(1): 70-76.
- Eukeik.ee. 2019. **Snack market share**. Available source: <https://marketeeronline.co/archives/125874>, April 29, 2021. (in Thai)
- Food Intelligence Center. 2017. **Marketing of Healthy Food**. Food Intelligence Center. Available source: <http://fic.nfi.or.th>, February 29, 2020. (in Thai)
- Garduño-Lugo, M., Granados-Alvarez, I., Olvera-Novoa, M.A. and Munioz-Cordova, G. 2003. Comparison of growth, fillet yield and proximate composition between Stirling Nile tilapia (wild type) (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus) and red hybrid tilapia (Florida red tilapia x Stirling red *O. niloticus*) males. **Aquaculture Research** 34(1): 1023-1028.
- Guiry, M.D. 2020. **Algae Base: *Ulva intestinalis* Linnaeus 1753, National University of Ireland**. Available Source: <http://www.algaebase.org>; searched, July 9, 2020.
- Hakimeh, J.A., Rezaei, M., Shabanpour, B. and Tabarsa, M. 2019. Edible green seaweed, *Ulva intestinalis* as an ingredient in surimi-based product: chemical composition and physicochemical properties. **Applied Phycology** 31(1): 2529-2539.
- Janta, K. 2000. Effect of tripolyphosphate on properties and gelation of myofibrillar protein from treadfin bream as subjected to different Freeze-thaw cycle. Master Thesis of Science (Fishery Products Technology), Prince of Songkla University. (in Thai)
- Jimenez-Colmenero, F., Cofrades, S., Lopez-Lopez, I., Ruiz-Capillas, C., Pintado, T. and Solas, M.T. 2010. Technological and sensory characteristics of reduced/low-fat, low-salt frankfurters as affected by the addition of konjac and seaweed. **Meat Science** 84(1): 356-363.
- Mesomya, W., Onhem, S., Lohana, S., Worawattanatheekul, W. and Sikkha, C. 2013. **Research Report on Studies of Halal Fish Sheet Production**

- of Marine Fish.** Kasetsart University Research and Development Institute, Bangkok. (in Thai)
- Murata, M. and Nakazoe, J. 2001. Production and use of marine algae in japan. **Japan Agricultural Research Quarterly** 35(4): 281-290.
- Nguyen, T.T., Le, T.Q. and Songsermpong, S. 2013. Shrimp cassava cracker puffed by microwave technique: effect of moisture and oil content on some physical characteristics. **Kasetsart Journal** 47(1): 434-446.
- Niyomvit, N. 1983. **Science of Cookery.** Teaching documents, Department of Home Economics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Nuchpong, S. and Sajaanantakul, T. 2014. Effect of malva nut gum on the qualities of meat emulsion prepared from freeze-thawed pork, pp. 340-347. *In Proceeding of 52nd Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry.* Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Pansawad, N., Wasasiri, S. and Runglerdkraingkrai, J. 2018. Effect of tapioca starch/wheat flour ratio and pre-drying time on physical and sensory properties of snake skin fish chips prepared by using microwave oven. **Rajamangala University of Technology Tawan-ok Research Journal** 11(2): 1-9. (in Thai)
- Preechanon, N. 1988. Fish chips. Master Thesis of Science (Home Economics), Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Raksakulthai, N., Sangjindawong, M., Jaiwat, M., Worawattanametheekul, W., Runglerdkraingkrai, J., Wilaipan, P., Chuapoehuk, P. and Vareevanich, D. 2002. **Fishery Product Processing from Fresh Water Fish.** 2nd ed. A Plus Three Media, Nontaburi. (in Thai)
- Ratana-arporn, P., Kaewsuralikhit, C., Raksakulthai, N., Chuchird, N. and hongrat, P. 2009. **Utilization of *Ulva intestinalis* from shrimp pond to consumption.** Published documents, Aquaculture Business Research Center, Faculty of Fisheries, Kasetsart University. (in Thai)
- Reine, P.V. and Trono, G.C. 2001. **Plant Resources of Routh-East Asia.** Backhuys Publishers, Netherland.
- Suzuki, T. 1981. **Fish and Krill Protein Processing Technology.** Applied Science Publishers, London.
- Tanuttawongcharoen, R., Laohakuljit, N. and Kerdchochuen, O. 2012. Potential use of flavoring agent *Ulva intestinalis* protein hydrolysate by acid hydrolysis. **Agricultural Science Journal** 43(2)(supp.): 457-460.
- Wongnok, M. 2012. **Cost Effectively of Fish Menu due to Can Eat Whole Body.** Fishery Career Development and Promotion Group. Ubon Ratchathai Provincial Fisheries Office. Available source: <https://www.fisheries.go.th/fpo-ubon/web2/images/download/kmhealthy.pdf>, July 9, 2020. (in Thai)

การพัฒนาแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้เรื่องเตาอินทิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา

Development of Learning Application on Intakhil Kiln and Earthenware Production

พรwana รัตนชูโชค * และ จุฬาวาลี มณีเลิศ

Ponwana Rattanachuchok * and Chulawalee Maneelert

Received: 27 April 2021, Revised: 15 July 2021, Accepted: 13 September 2021

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้เรื่องเตาอินทิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา 2) เพื่อหาประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้ 3) เพื่อเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ของผู้เรียนก่อนและหลังการเรียนรู้ด้วยแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้า ได้แก่ กลุ่มตัวอย่างตรวจสอบเนื้อหาและประเมินประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน เป็นตัวแทนจากชุมชน 2 คน และนักวิชาการจากมหาวิทยาลัยจำนวน 5 คน ได้มาโดยการคัดเลือกแบบเจาะจง และกลุ่มตัวอย่างผู้ใช้งานจำนวน 30 คน ได้มาโดยวิธีสุ่มอย่างง่าย เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ แบบสอบถามความพึงพอใจ แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การทดสอบค่า t-test และการทดสอบค่า t-score

ผลการวิจัยครั้งนี้ได้แอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้เรื่องเตาอินทิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา และแอปพลิเคชันที่พัฒนาได้ผ่านการประเมินประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้โดยใช้วิธี Black box จากผู้เชี่ยวชาญมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.67 มีความเหมาะสมอยู่ในระดับมากที่สุดก่อนนำไปใช้งาน ผลการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ของผู้เรียนก่อนและหลังเรียนรู้ด้วยแอปพลิเคชันมีค่าเฉลี่ยหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ประสิทธิภาพทางการเรียนรู้หลังเรียนเพิ่มขึ้นจากก่อนเรียนคิดเป็นร้อยละ 41.52 และความพึงพอใจโดยผู้ใช้งานอยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.44 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.66

คำสำคัญ: เตาอินทิล, แอปพลิเคชัน, ความเป็นจริงเสริม

ภาควิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300.

Department of Computer, Faculty of Science and Technology, Chiang mai Rajabhat University, Muang District, Chiang mai 50300, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail) : ponwana.r@g.cmru.ac.th Tel: 08 6921 5447

ABSTRACT

The objectives of this research were: 1) to develop a learning application for Intakhil kiln and the production of earthenware, 2) to find efficiency of the learning application, and 3) to compare learning achievement of students before and after learning via the learning application. The sample group consisted of 2 representatives from a community and 5 academics from universities who checked contents and evaluated the efficiency of the application. They were recruited by using purposive sampling. The sample group also included 30 users who were recruited by using simple random sampling. Research tools consisted of a satisfaction questionnaire and a learning achievement test. Statistics used for data analysis were percentage, mean, standard deviation, t-test, and t-score.

The result of this research was the development of the learning application for Intakhil kiln and the production of earthenware. The experts evaluated the efficiency of the learning application by using black box testing technique and the finding had a mean of 4.67, indicating the highest level of appropriateness before launching the application. A comparison between the students' learning achievement before and after learning via the application revealed that the mean score after using the application was higher than the mean score prior to using the application at a 0.05 significance level. The learning efficiency increased by 41.52% after learning via the application and the users' satisfaction achieved a mean score of 4.44, with a standard deviation of 0.66, signifying a high level of satisfaction.

Key words: Intakhil kiln, application, augmented reality

บทนำ

มรดกทางวัฒนธรรม เป็นรูปแบบของ วัฒนธรรมที่มีเอกลักษณ์และมีคุณค่าซึ่งเกิดขึ้นใน อดีตและได้รับการสืบทอดจากคนรุ่นหนึ่งไปสู่อีกรุ่น หนึ่ง แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ที่จับต้องได้ เช่น โบราณวัตถุ โบราณสถาน แหล่งโบราณคดี และที่จับ ต้องไม่ได้ เช่น ภาษา ศิลปะการแสดง (Sittirit, 2016) แหล่งเตาเผาอินทขิลจึงนับเป็นมรดกทางวัฒนธรรม ตั้งอยู่ในชุมชนหมู่บ้านอินทขิล อำเภอแม่แตง จังหวัด เชียงใหม่ เป็นแหล่งโบราณคดีที่มีความสำคัญทั้ง ทางด้านโบราณคดี ทางประวัติศาสตร์ความเป็นมา ของอาณาจักรล้านนา เตเผาอินทขิลถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2537 ต่อมา พ.ศ. 2539 กรมศิลปากรได้

ทำการขุดค้นแหล่งโบราณคดี แล้วตั้งชื่อเตาว่า “อิน ทขิล” ตามชื่อดาบล เตเผาแห่งนี้เป็นแหล่งผลิต เครื่องถ้วยชามในอดีตแหล่งใหม่ที่มีความสมบูรณ์ทั้ง เตเผา และตัวอย่างเศษถ้วยชามที่มีมากถึง 4 แห่ง ซึ่ง ถือเป็นการขุดพบเตาเผาที่มีความสมบูรณ์มากที่สุดในภาคเหนือ ภาชนะที่พบมีหลายประเภท ได้แก่ ไห ชาม จาน ถ้วย (Chiangmai Cultural Office, 2021)

มรดกทางวัฒนธรรมสามารถนำเอา วิทยาการและเทคโนโลยีมาใช้อนุรักษ์และสร้างความ ตระหนักรู้เกี่ยวกับมรดกทางวัฒนธรรมได้ เช่น มรดกทางวัฒนธรรมกับเทคโนโลยีเป็นการนำ เทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทเป็นสื่อกลางเพื่อนำเสนอ เนื้อหาเพื่อให้บริการแก่ผู้ใช้งานตลอดจนการ

ประชาสัมพันธ์ข้อมูล การเข้าถึงผู้ใช้กลุ่มใหม่ มรดกทางวัฒนธรรมที่อยู่ในรูปดิจิทัลมุ่งเน้นการแปลงมรดกวัฒนธรรมให้อยู่ในรูปดิจิทัลหรือการนำเอาเทคโนโลยีสามมิติหรือเทคโนโลยีเสมือนเข้ามาช่วยนำเสนอและการเผยแพร่มรดกวัฒนธรรมที่เป็นงานศิลปวัตถุและโบราณวัตถุ (Chaichuay, 2017) ดังการศึกษาวิจัยที่มีการนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเว็บไซต์นำเสนอหอจดหมายเหตุ สถาบันวัฒนธรรมและศิลปะ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (Srirochana, 2015) และการศึกษาวิจัยการใช้แหล่งเรียนรู้ภูมิปัญญาท้องถิ่นเป็นฐานที่ส่งผลกระทบต่อจัดการความรู้ภูมิปัญญาท้องถิ่นด้วยไอซีทีของนักศึกษาหลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยสวนดุสิต (Netwong, 2020)

เทคโนโลยีมีบทบาทในการจัดการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21 ทั้งเป็นเว็บไซต์ แอปพลิเคชัน แอนิเมชัน วิดีทัศน์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกระตุ้นความสนใจ สร้างความสนุกในการเรียนรู้ ส่งเสริมการเรียนรู้ ผู้เรียนมีความอยากรู้อยากเห็น มีความสนใจในการเรียนรู้มากยิ่งขึ้น (Srinarang, 2019) เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality) เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นมาในรูปแบบ Human-machine interface ซึ่งเป็นการผสมผสานโลกของความจริง (real world) เข้ากับโลกเสมือน (virtual world) โดยใช้วิธีซ้อนภาพสามมิติที่อยู่ในโลกเสมือนไปอยู่บนภาพที่เห็นจริงผ่านกล้องดิจิทัลของแท็บเล็ต สมาร์ทโฟน หรือกล้องเว็บแคมของคอมพิวเตอร์ ในรูปแบบสามมิติที่มีมุมมอง 360 องศา ซึ่งเป็นการแสดงผลแบบ real time กระบวนการทำงานของเทคโนโลยีโลกเสมือนผสมผสานโลกจริงประกอบด้วย 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ (1) การวิเคราะห์ภาพ (2) การคำนวณค่าตำแหน่งเชิง 3 มิติ (pose estimation) ของมาร์คเกอร์เทียบกับกล้อง (3) กระบวนการสร้างภาพโมเดลสามมิติ (Ditcharoen *et al.*, 2014) ปัจจุบัน

เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมได้นำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาเพิ่มขึ้น เช่น การศึกษาวิจัยเรื่อง การพัฒนาแอปพลิเคชันความเป็นจริงเสริมในทางการศึกษา ได้กล่าวถึงข้อดีของการนำเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมมาใช้ในการเรียนการสอน ช่วยให้ผู้เรียนมีความกระตือรือร้นในการเรียนมีความสนใจในวัตถุเสมือนที่ยากต่อการเรียนรู้และด้วยวัยของนักเรียนที่มีความคุ้นเคยกับการใช้งานเทคโนโลยีจึงทำให้ผู้เรียนมีความเข้าใจได้อย่างรวดเร็ว (Pantelic and Vukovac, 2017) รวมถึงการศึกษาวิจัยเรื่อง เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมประยุกต์ใช้ทางการศึกษาพยาบาลมาใช้ในการเรียนการสอนภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติให้ผู้เรียนมีความมั่นใจสามารถนำความรู้ลงสู่การปฏิบัติอย่างถูกต้อง (Busarathid *et al.*, 2020) และ การศึกษาวิจัยการพัฒนาแอปพลิเคชันด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมเพื่อส่งเสริมการเรียนรู้ศิลปวัฒนธรรมภูมิปัญญาเรื่องการทำบราของชุมชนบ้านบราตร ช่วยให้ผู้เรียนมีผลการเรียนรู้สูงกว่าก่อนการเรียนรู้ (Phiwma and Mutchima, 2018) มีงานวิจัยหลายเรื่องกล่าวถึงประโยชน์ของเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมช่วยให้ผู้เรียนเห็นเนื้อหาในมุมมองสามมิติ ช่วยให้ผู้เรียนมองเห็นภาพ มีความจดจ่อ ช่วยเพิ่มแรงจูงใจ และความพึงพอใจของผู้เรียนในขณะที่ทำกิจกรรมการเรียนรู้ ช่วยให้ผู้เรียนได้เข้าถึงประสบการณ์การเรียนรู้ (Özdemir, 2017)

ดังนั้นเพื่อให้การเรียนรู้ในรูปแบบเดิมของโรงเรียนที่เคยมีการเรียนการสอนเพียงแค่ผู้สอนป้อนเนื้อหาและอ่านข้อมูลจากหนังสือ ตำรา โดยผู้เรียนไม่เคยสัมผัสและเห็นกระบวนการจริงได้มากเท่าที่ควรเนื่องจากเป็นเรื่องที่หาดูได้ยากและไม่เป็นที่นิยมของชุมชนในปัจจุบันแล้ว จึงไม่มีการถ่ายทอดความรู้จากบรรพบุรุษและไม่สามารถเก็บข้อมูลเพิ่มเติมได้ ทำให้มีช่องว่างในการเผยแพร่องค์ความรู้ที่ค่อนข้างน้อยนอกจากไปชมในพิพิธภัณฑ์แหล่งเตา

อินทขิล ถึงแม้ว่าทางโรงเรียนจะมีการเชิญปราชญ์ชาวบ้านและผู้ที่มีประสบการณ์เกี่ยวกับเตาเผาอินทขิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผามาบรรยายและถ่ายทอดข้อมูลอยู่บ้าง แต่ก็หาเวลาที่เหมาะสมของผู้บรรยายได้ยากเพราะต้องประกอบอาชีพหลัก และด้วยข้อจำกัดนี้ งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มาเก็บรักษา และเผยแพร่องค์ความรู้เกี่ยวกับเตาเผาอินทขิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา เผยแพร่องค์ความรู้บนเครือข่ายอินเทอร์เน็ต สามารถใช้งานได้ง่าย สะดวกทุกที่ ทุกเวลา และนำเอาเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมนำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับเตาเผาอินทขิลและการผลิตเครื่องปั้นดินเผา ให้มีความน่าสนใจ สามารถเรียนรู้ได้ด้วยตนเอง เหมือนกับว่าผู้เรียนได้สัมผัสจากประสบการณ์จริง และสามารถนำไปปฏิบัติตามได้ ผู้เรียนได้เรียนรู้เรื่องที่สอดคล้องกับความสามารถและความต้องการของตนเอง ที่เน้นการเรียนรู้จากบริบทของสังคมที่เป็นจริง โดยข้อมูลองค์ความรู้นั้นไม่ได้สูญหายไปกับผู้ถ่ายทอด ลดปัญหาและอุปสรรคในการถ่ายทอดองค์ความรู้ในรูปแบบเดิมเป็นการเพิ่มความหลากหลายในการนำเสนอข้อมูลเป็นการเพิ่มแหล่งเรียนรู้ ทั้งยังช่วยส่งเสริมด้านการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม ช่วยกระตุ้นเศรษฐกิจของชุมชน กระตุ้นให้ชุมชนตระหนัก และเห็นความสำคัญของมรดกทางวัฒนธรรมส่งผลให้ช่วยกันอนุรักษ์สืบสานมรดกทางวัฒนธรรมของท้องถิ่นอย่างยั่งยืนต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงประยุกต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้เรื่อง เตาอินทขิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา เพื่อหาประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้เรื่องเตาเผาอินทขิล และการผลิต

เครื่องปั้นดินเผา โดยใช้วิธี Black box และเพื่อเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของผู้เรียนก่อนและหลังการเรียนรู้ด้วยแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้เรื่องเตาอินทขิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา

1. สมมติฐานการวิจัย

1.1 ประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้เรื่องเตาเผาอินทขิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา โดยใช้วิธี Blackbox อยู่ในเกณฑ์ดี (มีค่าเฉลี่ยเกิน 3.50)

1.2 การเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ของผู้เรียนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

2. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

2.1 ประชากร ได้แก่

2.1.1 ผู้ที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ชุมชนอินทขิล อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่

2.1.2 อาจารย์ นักวิชาการ นักศึกษา ของมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

2.2 กลุ่มตัวอย่าง ได้มาด้วยวิธีการเลือกจากประชากรที่มีลักษณะตรงตามวัตถุประสงค์ที่จะศึกษา เพื่อให้ได้บุคคลที่สามารถให้ข้อมูลตรงตามที่ต้องการ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

2.2.1 กลุ่มตัวอย่างในการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบเนื้อหาและประเมินประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน คัดเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Selection) เพื่อให้ได้บุคคลที่สามารถให้ข้อมูลตรงตามที่ต้องการและกระจายอยู่ในขอบเขตของการศึกษา ซึ่งการศึกษานี้ได้คัดเลือกตัวแทนดังนี้ ตัวแทนในชุมชนจำนวน 2 คน ตัวแทนนักวิชาการจากสถาบันอุดมศึกษาจำนวน 5 คน

2.2.2 กลุ่มตัวอย่างในการศึกษาองค์ความรู้ ใช้งานแอปพลิเคชัน ทำแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ และประเมินความพึงพอใจของแอปพลิเคชัน คัดเลือกกลุ่มตัวอย่างจากวิธีการสุ่มอย่างง่าย

ได้แก่ นักศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่จำนวน 15 คน และนักเรียนโรงเรียนป้าจิ้งแฉงวิทยาจำนวน 15 คน

3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ใช้เครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยวิธีการใช้แบบสอบถาม และการสัมภาษณ์เป็นวิธีการหลัก โดยการพิจารณาปรากฏการณ์ภายใต้สภาพแวดล้อม และความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในชุมชน ผู้วิจัยใช้เครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูลดังต่อไปนี้

3.1 แบบประเมินประสิทธิภาพของผู้เชี่ยวชาญ การวิจัยครั้งนี้ใช้แบบประเมินประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน ประกอบด้วยข้อมูลผู้ตอบแบบสอบถามด้านประสิทธิภาพด้านการใช้งานของสื่อสารสนเทศ เช่น สื่อสารสนเทศแสดงข้อมูลได้ถูกต้อง ครบถ้วน ตรงตามความต้องการด้านการออกแบบและการจัดรูปแบบ เช่น ภาษารูปภาพที่ใช้มีความสอดคล้องกันสามารถสื่อถึงเรื่องราวได้อย่างเหมาะสม ด้านการนำไปใช้งาน เช่น สื่อการเรียนรู้นำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้จริง แบบสอบถามชนิดมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) มีระดับมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับของลิเคิร์ต (Spencer, 2015) คือ เห็นด้วยมากที่สุด เห็นด้วยมาก เห็นด้วยปานกลาง เห็นด้วยน้อย และเห็นด้วยน้อยที่สุด โดยข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์โดยใช้สถิติความถี่ และค่าร้อยละ ประกอบการพรรณนา

3.2 แบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ในการวิจัยครั้งนี้ใช้แบบสอบถามความพึงพอใจการใช้แอปพลิเคชัน ประกอบด้วยข้อมูลผู้ตอบแบบสอบถาม ความพึงพอใจด้านเนื้อหา เช่น การนำเสนอเนื้อหาต่อการทำความเข้าใจ ความพึงพอใจด้านการออกแบบและการจัดรูปแบบ เช่น สื่อสารสนเทศมีสีสันสดใสและสวยงาม ความพึงพอใจ

ด้านการใช้งาน เช่น สื่อการเรียนรู้นำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้จริง แบบสอบถามชนิดมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) มีระดับมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับของลิเคิร์ต (Spencer E, 2015) คือ เห็นด้วยมากที่สุด เห็นด้วยมาก เห็นด้วยปานกลาง เห็นด้วยน้อย และเห็นด้วยน้อยที่สุด โดยข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามในส่วนนี้จะทำการวิเคราะห์โดยใช้สถิติความถี่ และค่าร้อยละ ประกอบการพรรณนา

3.3 แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ของการเรียนรู้ผ่านแอปพลิเคชัน เป็นแบบทดสอบก่อนและหลังการใช้งานจำนวน 10 ข้อ ใช้ทดสอบก่อนและหลังการเรียนรู้ผ่านแอปพลิเคชัน ผ่านการตรวจสอบความเหมาะสม ประเมินค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) โดยตัวแทนนักวิชาการจากสถาบันอุดมศึกษาจำนวน 5 คน ได้เท่ากับ 1.0 สามารถนำแบบทดสอบไปใช้งานได้ โดยข้อมูลที่ได้จากการทำแบบทดสอบ จะทำการวิเคราะห์โดยใช้การทดสอบค่า t-test และการทดสอบค่า t-score

4. ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยใช้กระบวนการออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้เรื่องเตาเผาอินทิลใช้ หลักการออกแบบกระบวนการเรียนรู้และพัฒนาอย่างเป็นระบบ ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาบริบทชุมชน และเก็บรวบรวมข้อมูล

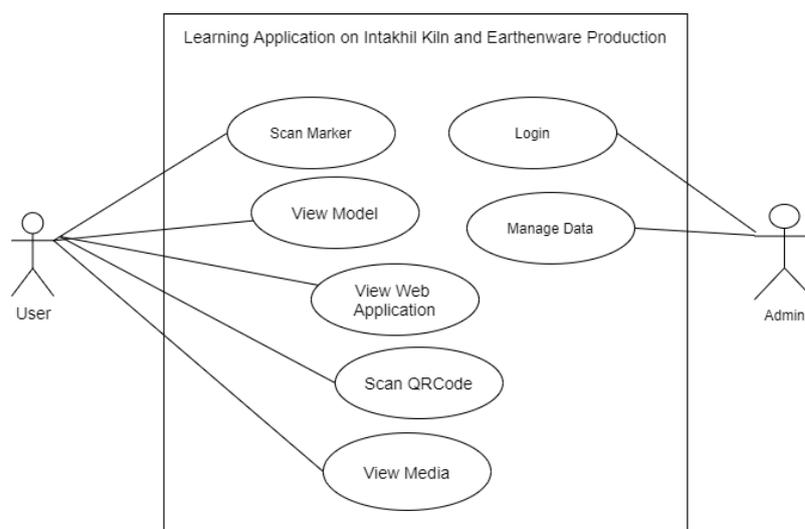
ศึกษาบริบทชุมชน เกี่ยวกับเตาเผาอินทิล พิธิภัณฑ์แหล่งเตาอินทิลเมืองแกน การผลิตเครื่องปั้นดินเผา และเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ สรุปประเด็นตรวจสอบข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับตัวแทนชุมชน และตัวแทนอาจารย์ นักวิชาการ ของมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ จำนวน 7 คน ส่วนของขอบเขตของเนื้อหา ประกอบด้วย เตาเผาอินทิล ขั้นตอนการผลิต

เครื่องปั้นดินเผา พิพิธภัณฑ์แหล่งเตาอินทขิลเมือง
 แคน ส่วนของรูปแบบของแอปพลิเคชัน สื่อสารสนเทศ
 ครอบคลุมด้วย เว็บแอปพลิเคชัน โปสเตอร์ สื่อ
 วิดีโอ สื่อความเป็นจริงเสริม สื่อสามารถใช้งานผ่าน
 ทางคิวอาร์โค้ด ส่วนของเครื่องมือที่ใช้สำหรับการ
 พัฒนาแอปพลิเคชัน ใช้ภาษา PHP เป็นภาษาสคริปต์
 ที่ใช้สำหรับการพัฒนาเว็บ ภาษา PHP เป็นภาษาแบบ
 โอเพนซอร์ส สามารถพัฒนาเว็บตั้งแต่ขนาดเล็กไป
 จนถึงขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อน (The PHP Group,
 2021) ใช้โปรแกรม Adobe Animate CC ในการทำ
 วิดีโอแอนิเมชัน Adobe Animate CC เป็นเครื่องมือ
 สำหรับการสร้างและออกแบบแอนิเมชัน เพิ่มความ
 น่าสนใจให้กับเนื้อหาในบทเรียน สามารถนำเสนอ
 ได้หลายแพลตฟอร์มเข้าถึงผู้ใช้งานได้หลากหลาย
 อุปกรณ์ (Adobe, 2021) ส่วนของแอปพลิเคชันความ
 เป็นจริงเสริม ใช้โปรแกรม Blender สร้างโมเดลสาม
 มิติ Blender เป็นเครื่องมือสำหรับสร้างงานสามมิติ
 แบบโอเพนซอร์ส มีเครื่องมือในการสร้างงานสามมิติ
 ไปจนถึงการสร้างการเคลื่อนไหวตัดต่อวิดีโอ
 (Blender, 2021) ใช้โปรแกรม Vuforia สำหรับสร้าง
 มาร์คเกอร์ Vuforia เป็นแพลตฟอร์มสำหรับการ

พัฒนา AR รองรับการใช้งานบนโทรศัพท์ แท็บเล็ต
 (PTC, 2021) ใช้โปรแกรม Android Studio ในส่วน
 ของการพัฒนา Mobile Application ส่วนของโปสเตอร์
 เพื่อใช้เป็นการเรียนการสอนในห้องเรียน ใช้โปรแกรม
 Photoshop เป็นเครื่องมือสำหรับการแก้ไข ประกอบ
 ภาพ ไปจนถึงวาดภาพดิจิทัลแอนิเมชัน ออกแบบ
 ภาพกราฟิก และ Illustrator เป็นเครื่องมือสำหรับ
 สร้างภาพแบบเวกเตอร์ สำหรับใช้งานทุกอุปกรณ์ไม่ว่า
 จะเป็นเว็บ อุปกรณ์มือถือ ไปจนถึงออกแบบโลโก้
 ภาพประกอบหนังสือ (Adobe, 2021) เครื่องมือที่ใช้
 ในการทดสอบการทำงานของแอปพลิเคชันความเป็น
 จริงเสริมเป็นสมาร์ทโฟน ระบบปฏิบัติการ Android
 5.0 ขึ้นไป

ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์และการออกแบบระบบ

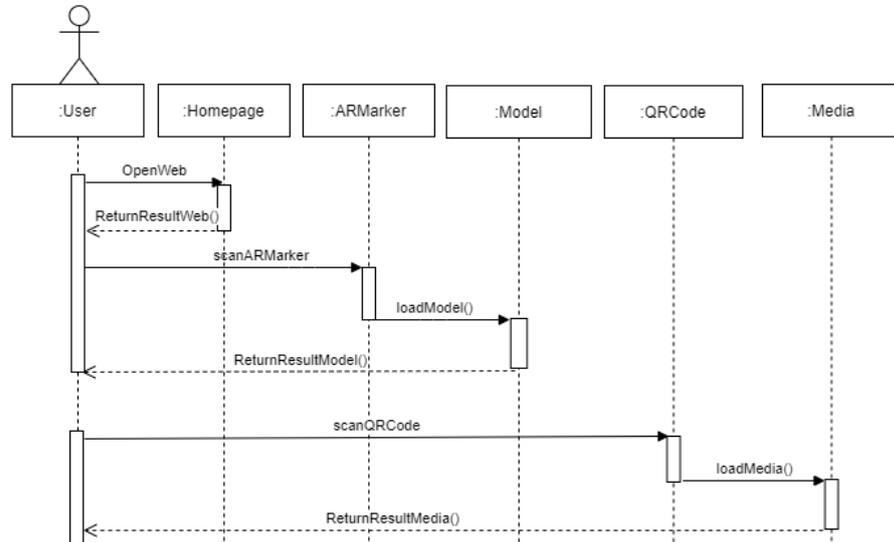
วิเคราะห์และออกแบบระบบแอปพลิเคชัน
 ส่งเสริมการเรียนรู้เรื่องเตาอินทขิล และการผลิต
 เครื่องปั้นดินเผา คณะผู้วิจัยนำข้อมูลที่ได้วิเคราะห์
 และออกแบบความต้องการของแอปพลิเคชัน จากนั้น
 จัดทำ Use Case Diagram และ Sequence Diagram



ภาพที่ 1 Use Case Diagram แอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้

จากภาพที่ 1 Use Case Diagram ผู้ใช้งานสามารถสแกนมาร์คเกอร์เพื่อเข้าถึงข้อมูลในลักษณะของโมเดลสามมิติ ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงสารสนเทศ

ผ่านทางเว็บแอปพลิเคชัน และผู้ใช้งานสามารถสแกนคิวอาร์โค้ดเพื่อเข้าถึงข้อมูลสารสนเทศ ผู้ดูแลระบบสามารถล็อกอินเข้าไปจัดการข้อมูล



ภาพที่ 2 Sequence Diagram ของแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้

จากภาพที่ 2 เมื่อผู้ใช้งานเรียกใช้งานเว็บแอปพลิเคชัน ระบบแสดงหน้าเว็บให้กับผู้ใช้งาน เมื่อผู้ใช้งานเปิดแอปพลิเคชันสแกนมาร์คเกอร์ ระบบแสดงโมเดลสามมิติของมาร์คเกอร์ที่เลือก เมื่อผู้ใช้งานสแกนคิวอาร์โค้ด ระบบแสดงสารสนเทศให้กับผู้ใช้งานตามคิวอาร์โค้ดที่สแกน

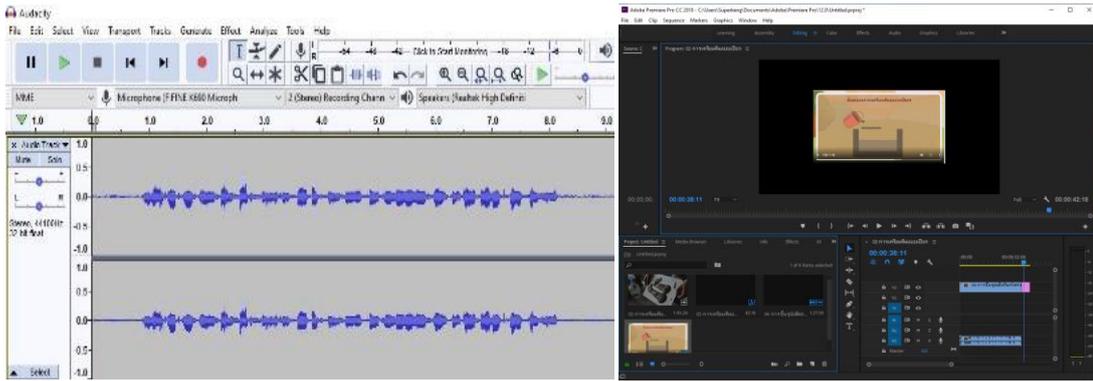
ขั้นตอนที่ 3 การพัฒนา

การพัฒนาแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้ เรื่องเตาอินทนิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา ประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

1) ขั้นตอนการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน หลังจากการวิเคราะห์และออกแบบ ขั้นตอนนี้พัฒนา

เว็บโดยใช้ภาษา PHP ให้เว็บมีส่วนของการแสดงข้อมูล แสดงสื่อวิดีโอ และสามารถดาวน์โหลดแอปพลิเคชันความเป็นจริงเสริม พร้อมทั้งแสดงส่วนของมาร์คเกอร์ ส่วนการพัฒนาสื่อประกอบด้วยการออกแบบโครงสร้างแผนผังในการนำเสนอเนื้อหา พัฒนาส่วนของแอนิเมชันใช้โปรแกรม Adobe Animate CC บันทึกเสียงประกอบเพื่อใช้ในการนำเสนอข้อมูล ใช้โปรแกรม Audacity แล้วจึงนำเอาเสียงที่บันทึกมาประกอบในการบรรยายเนื้อหาเกี่ยวกับแอนิเมชันที่จัดทำเป็นวิดีโอใช้โปรแกรม Adobe Premiere Pro CC

ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 อัดเสียง และตัดต่อวิดีโอ

2) ขั้นตอนการพัฒนาแอปพลิเคชันความเป็นจริงเสริม ประกอบด้วยการออกแบบโมเดลออกแบบภาพสำหรับเป็นมาร์กเกอร์ จากนั้นพัฒนาส่วนของกรขึ้นรูปโมเดลสามมิติตามลักษณะโครงสร้างแบบ Nurbs สำหรับขึ้นโมเดลที่มีลักษณะโค้งเว้า เช่น แก้ว แจกัน กระถาง และ โครงสร้างแบบ Poligonal ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงเลขาคณิต เช่น เต้าเผา

จากนั้นใส่ลวดลายพื้นผิว จัดแสงเงา จากนั้นประมวลผลออกมาเป็นงานแบบสามมิติ ด้วยโปรแกรม Blender ดังภาพที่ 4 เมื่อได้งานสามมิติแล้วใช้โปรแกรม Vuforia สำหรับสร้างมาร์กเกอร์ และใช้ Android Studio พัฒนาส่วนของแอปพลิเคชันใช้งานบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์



ภาพที่ 4 แสดงการออกแบบเต้าอิฐดินเผา ออกแบบมาร์กเกอร์ และพัฒนาโมเดล 3 มิติ

3) ส่วนของโปสเตอร์ใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนทั้งในห้องเรียน และนอกห้องเรียน ได้ทำการออกแบบและจัดทำไฟล์โปสเตอร์ขนาด A1 โดยใช้โปรแกรม Photoshop และ Illustrator เพื่อให้ผู้เรียนสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ง่าย สามารถเรียนรู้ได้ทุกสถานที่ใช้อุปกรณ์เพียงสมาร์ทโฟน สามารถเข้าถึงสื่อได้ผ่านทางคิวอาร์โค้ด และสามารถดาวน์โหลดแอปพลิเคชันความเป็นจริงเสริมได้ทางโปสเตอร์ จากนั้นจัดทำโปสเตอร์ ด้วยวินิล พิมพ์

ด้วยกระดาษอาร์ตแบบเคลือบ แบบไม่เคลือบ ทดสอบการใช้งานแอปพลิเคชันผ่านโปสเตอร์ ทดสอบการสแกนด้วยคิวอาร์โค้ด

เมื่อพัฒนาแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้และทดสอบการทำงาน ทีมผู้วิจัยได้นำแอปพลิเคชันที่พัฒนาไปให้ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 7 คนตรวจสอบด้านเนื้อหา ประเมินประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน ส่งเสริมการเรียนรู้เรื่องเต้าเผาอิฐดินเผา และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา โดยใช้วิธีการ Blackbox เป็นการ

ประเมินการทำงานโดยผู้เชี่ยวชาญประเมินภาพรวมการทำงานของแอปพลิเคชัน โดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประเมินค่าเพื่อประเมินระดับความคิดเห็นในแต่ละส่วน แบบสอบถามประเมินประสิทธิภาพมีลักษณะเป็นมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับของลิเคิร์ต (Likert, 1932) คือ เห็นด้วยมากที่สุด เห็นด้วยมาก เห็นด้วยปานกลาง เห็นด้วยน้อย และเห็นด้วยน้อยที่สุด ในเนื้อหาการประเมินประกอบด้วย ด้านประสิทธิภาพการใช้งานของสื่อสารสนเทศ ด้านการออกแบบและการจัดรูปแบบ ด้านการนำไปใช้งานสำหรับเกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้ กำหนดเกณฑ์ดังนี้

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

ตารางที่ 1 แบบแผนการทดลอง

กลุ่ม	Pretest	Treatment	Posttest
กลุ่มทดลอง	T ₁	X	T ₂
ความหมายของสัญลักษณ์			
T ₁	หมายถึง การทดสอบก่อนเรียน		
X	หมายถึง การจัดกิจกรรมการเรียนรู้โดยใช้แอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้ และสื่อสารสนเทศ		
T ₂	หมายถึง การทดสอบหลังเรียน		

การทดลองใช้งานแอปพลิเคชันและสื่อสารสนเทศกับกลุ่มตัวอย่างช่วงภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2563 ที่โรงเรียนป่าจี่วังแดงวิทยาในวันที่ 31 มีนาคม 2564 ได้มีการเก็บข้อมูลการทดลองใช้ในรายวิชาทัศนศิลป์ กลุ่มสาระการเรียนรู้ศิลปะ ชั้นประถมศึกษาปีที่ 5 โดยให้ผู้เรียนทำแบบทดสอบ

จากนั้นนำผลการประเมินของผู้เชี่ยวชาญมาหาค่าเฉลี่ยและเปรียบเทียบกับเกณฑ์คุณภาพ พบว่าผู้เชี่ยวชาญประเมินประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันได้ค่าเฉลี่ยทั้ง 3 ด้านเท่ากับ 4.67 (S.D. = 0.53) ผู้เชี่ยวชาญประเมินแอปพลิเคชัน ด้านประสิทธิภาพการใช้งานของสื่อสารสนเทศ ด้านการออกแบบและจัดรูปแบบ และด้านการนำไปใช้งานอยู่ในระดับมากที่สุด ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ในเกณฑ์ดี (มีค่าเฉลี่ยเกิน 3.50) สามารถนำไปใช้งานได้

ขั้นตอนที่ 4 การนำไปใช้

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ใช้แบบแผนการทดลองแบบ One-group Pretest Posttest Design ดำเนินการทดลองกับกลุ่มทดลองกลุ่มเดียวดำเนินการสังเกตผู้เข้าร่วมการทดลอง มีการเก็บคะแนนก่อนเรียน และจัดกิจกรรมการเรียนรู้โดยใช้แอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้ พร้อมสื่อสารสนเทศ จากนั้นเก็บคะแนนหลังเรียน รูปแบบการทดลอง (Fitz-Gibbon and Morris, 1987) แสดงดังตารางที่ 1

ก่อนเรียน ใช้เวลา 15 นาที จากนั้นเรียนรู้เนื้อหาจากสื่อสารสนเทศและแอปพลิเคชัน ใช้เวลา 30 นาที แล้วจึงทำแบบทดสอบหลังเรียน ใช้เวลา 15 นาที ดังภาพที่ 5 จากนั้นประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 คน



ภาพที่ 5 การทดลองใช้งานแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้

ขั้นตอนที่ 5 การประเมินผล

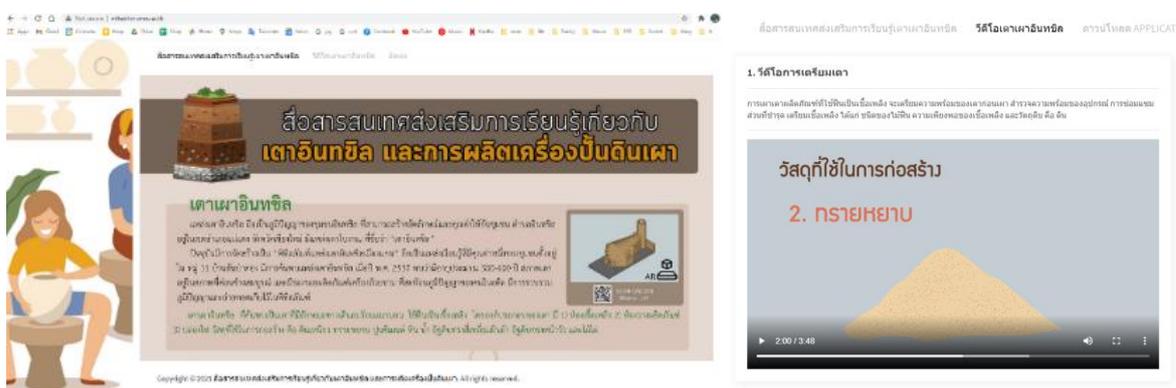
เป็นการนำคะแนนจากการทำแบบทดสอบก่อนเรียนและแบบทดสอบหลังเรียน มาเปรียบเทียบ ประเมินผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่โดยใช้สถิติ t-Test และ T-Score และนำผลการประเมินความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างที่ได้หาค่าความพึงพอใจต่อการใช้งานแอปพลิเคชันของกลุ่มตัวอย่างโดยใช้สถิติ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการพัฒนาแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้เรื่องเตาเผาอินทิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา สามารถเข้าถึงข้อมูลและดาวน์โหลดแอปพลิเคชัน ได้ที่

<http://www.inthakhin.cmru.ac.th/> การพัฒนาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1.1 เว็บไซต์แอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้เรื่องเตาอินทิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา นำเสนอข้อมูลในรูปแบบของเว็บผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต แสดงดังภาพที่ 6 ประกอบด้วยข้อความ ภาพนิ่ง วิดีโอ เนื้อหาประกอบด้วย การสร้างเตาเผาอินทิล เป็นเตาเผาที่ใช้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง การเตรียมเตาประกอบด้วยสำรวจความพร้อมของอุปกรณ์ การซ่อมแซมส่วนที่ชำรุด เตรียมเชื้อเพลิง การเตรียมเนื้อดินแบบเปียก การเตรียมเนื้อดินแบบแห้ง การขึ้นรูปและการปั้นดินเผา การดำเนินการเผา และพิพิธภัณฑ์แหล่งเตาอินทิล



ภาพที่ 6 เว็บไซต์แอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้เตาอินทิล และวิดีโอการผลิตเครื่องปั้นดินเผา

1.2 แอปพลิเคชัน ความเป็นจริงเสริม นำเสนอเตาเผาอินทิล และเครื่องปั้นดินเผาในรูปแบบโมเดลสามมิติ ประกอบด้วยโมเดลสามมิติ

ของเตาเผาอินทิล แก้ว แจกัน และกระถาง สามารถแสดงการทำงานได้แบบสามมิติ 360° แสดงดังภาพที่



ภาพที่ 7 แอปพลิเคชันความเป็นจริงเสริมแสดงผลแบบโมเดลสามมิติ

1.3 โปสเตอร์เพื่อใช้เป็นสื่อกลางในการจัดการเรียนการสอนในห้องเรียนสามารถเชื่อมโยงไปยังเว็บไซต์ได้ผ่านทางคิวอาร์โค้ดเพื่อใช้งานสื่อวิดีโอ แอนิเมชันให้ความรู้ และสามารถใช้เป็นมาร์ค

เกอร์สำหรับใช้งานแอปพลิเคชันความเป็นจริงเสริมเพื่อเข้าใช้งานแสดงภาพโมเดลสามมิติ แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 โปสเตอร์ มาร์คเกอร์แก้ว มาร์คเกอร์แจกัน

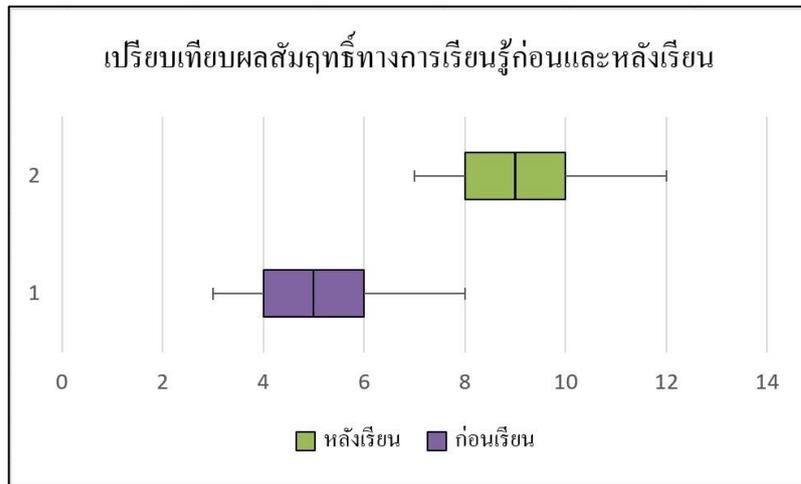
2. ผลการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้หลังการใช้งานแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้เรื่อง

เตาเผาอินทขิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา

ตารางที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้

รายการ	N (คน)	คะแนนเต็ม	\bar{x}	df	t	p
ก่อนเรียน	30	10	5.10	29	15.23*	1.13
หลังเรียน	30	10	9.10			

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05



ภาพที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้

จากตารางที่ 2 จากการวิเคราะห์พบว่า ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้หลังการเรียนด้วยแอปพลิเคชัน ค่า t ที่คำนวณมีค่าเท่ากับ 15.23 จากค่า $df = 29$ เมื่อเปิดตารางได้ค่า $t = 1.69$ เมื่อค่า t ที่คำนวณ มากกว่า t จากตาราง จึงยอมรับได้ว่าหลังจากการใช้แอปพลิเคชันทำให้มีผลการเรียนรู้สูงกว่าก่อนการใช้งานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และจากภาพที่ 9 ผลการ

เปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนจากบ็อกซ์พล็อต คะแนนหลังเรียนนั้นสูงกว่าคะแนนก่อนเรียน

3. ผลการหาประสิทธิภาพผลทางการเรียนของผู้เรียนหาได้จากการทำแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนของผู้เรียนเพื่อเปรียบเทียบกับการวัดผลคะแนนก่อนเรียนและหลังเรียน

ตารางที่ 3 แสดงค่าประสิทธิผลทางการเรียนรู้ของผู้เรียน

ประสิทธิผลการเรียนรู้	N	Mean	S.D.	ค่าเฉลี่ย T-Score เพิ่มขึ้น	T-Score เพิ่มขึ้น คิดเป็นร้อยละ
คะแนนสอบหลังเรียน (E_{post}) – คะแนนสอบก่อนเรียน (E_{pre})	30	7.10	2.33	17.19	41.52

จากตารางที่ 3 พบว่าคะแนนสอบหลังเรียนและคะแนนสอบก่อนเรียนมีความแตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างคะแนนก่อนเรียนและหลังเรียนเท่ากับ 7.10 พบว่าคะแนนเฉลี่ยหลังเรียนเพิ่มขึ้นจากคะแนนก่อนเรียนคิดเป็นร้อยละ 41.52

4. การประเมินความพึงพอใจการใช้งานแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้เรื่องเตาเผาอินทิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผาพบว่า ผู้ใช้ประเมินความพึงพอใจจากการใช้งานของแอปพลิเคชันได้ค่าเฉลี่ยทั้ง

3 ด้าน ประกอบด้วยด้านเนื้อหา ด้านการออกแบบ และการจัดรูปแบบ ด้านการใช้งาน เท่ากับ 4.44 (S.D. = 0.66) มีความพึงพอใจในระดับมาก

จากการสำรวจข้อมูลเกี่ยวกับเตาอินทิล ในพื้นที่ชุมชนหมู่บ้านอินทิล อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ เมื่อรวบรวมองค์ความรู้เกี่ยวกับเตาอินทิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา นำข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาพัฒนาเป็นแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้เรื่องเตาเผาอินทิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา

ประกอบด้วยเว็บแอปพลิเคชัน โปสเตอร์ให้ความรู้ และแอปพลิเคชันความเป็นจริงเสริม สื่อที่พัฒนา สอดคล้องกับแนวทางการนำเทคโนโลยีมาจัดการ เรียนรู้ในศตวรรษที่ 21 เพื่อกระตุ้นความสนใจ สร้าง ความสนุกสนานในการเรียน ช่วยผู้เรียนที่ไม่ถนัด การอ่านมีโอกาสเรียนรู้ในรูปแบบที่ตนเองมีความ ถนัดมากขึ้น ทั้งในรูปแบบของการดูภาพ 2 มิติ ภาพ 3 มิติ และการฟังเสียงประกอบ (Srinarang, 2019) จากนั้นนำไปใช้กับกลุ่มตัวอย่าง พบว่า กลุ่มตัวอย่าง ให้ความสนใจในกระบวนการถ่ายทอด และแอปพลิเคชันที่นำมาใช้งาน ทั้งวิดีโอ ข้อมูลบนโปสเตอร์ โดยเฉพาอย่างยิ่งแอปพลิเคชันความเป็นจริงเสริม ในการถ่ายทอดความรู้เป็นอย่างดี สามารถดึงดูด ความสนใจของผู้เรียนได้มากเหมาะแก่การเป็นแหล่ง เรียนรู้ของนักเรียน ครูผู้สอนให้ความสนใจและ ต้องการนำไปใช้เป็นการเรียนการสอนในภาค เรียนถัดไป ทั้งนี้เนื่องจากแอปพลิเคชันที่พัฒนาได้ ผ่านการวิเคราะห์และออกแบบระบบอย่างเป็น ขั้นตอน ผ่านการประเมินความพึงพอใจโดย ผู้เชี่ยวชาญทั้งด้านประสิทธิภาพการใช้งานสื่อสารสนเทศ ด้านการออกแบบและการจัดรูปแบบ ด้าน การนำไปใช้งาน และผ่านการปรับปรุงทำให้ระบบที่ พัฒนามีประสิทธิภาพ การใช้งานง่าย สะดวก และผล การประเมินประสิทธิภาพอยู่ในระดับมากที่สุด

ผลการประเมินความรู้พบว่าผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ของผู้เรียนหลังเรียนดีขึ้น ได้คะแนน สอบเฉลี่ยหลังเรียนเพิ่มขึ้นจากก่อนเรียน ทั้งนี้ เนื่องจากผู้เรียนมีความสนุกสนาน และมีความสนใจ ในการเรียน ดังที่ ณีภูษา ผิวมา และปริศนา มัชฌิมา (Phiwma and Mutchima, 2018) ศึกษาถึงการพัฒนา แอปพลิเคชันด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมเพื่อ ส่งเสริมการเรียนรู้ศิลปวัฒนธรรมภูมิปัญญาเรื่องการทำบาตรของชุมชนบ้านบาตร กล่าวไว้ว่า การใช้แอปพลิเคชันด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมทำให้ผล

การเรียนรู้ของผู้ใช้งานหลังการจัดการเรียนรู้มีคะแนน เฉลี่ยสูงกว่าก่อนการเรียนรู้ และยังคงคล้อยกับ งานวิจัยของ (Supaartagorn and Chaisuwan, 2019) พัฒนาหนังสือวรรณคดีไทยสามมิติ เรื่อง หลวิชัย คาวิ ด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมบน ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ พบว่า ช่วยให้ผู้ใช้มี ความเข้าใจ เพิ่มแรงจูงใจในการศึกษา และช่วย อนุรักษ์มรดกทางวัฒนธรรมในชุมชน และการ ประเมินความพึงพอใจการใช้งานแอปพลิเคชันมี ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก สอดคล้องกับงานวิจัย ของ (Charoenroop, 2017) ได้ศึกษาถึง การประยุกต์ ใช้ความเป็นจริงเสริมนำเสนอแหล่งท่องเที่ยว ทัศนศึกษาวัดพระแก้ว จังหวัดเชียงราย ผู้ใช้มีความ พึงพอใจมาก มีรูปแบบการนำเสนอที่น่าสนใจ

การพัฒนาแอปพลิเคชันในงานวิจัยนี้จัดเป็น สารสนเทศทางวัฒนธรรมได้ ดังที่ วิศปีย์ ชัยช่วย (Chaichuay, 2017) กล่าวถึงการนำเอาวิทยาการและ เทคโนโลยีมาใช้อนุรักษ์และสร้างความตระหนักรู้ เกี่ยวกับมรดกทางวัฒนธรรม สอดคล้องกับประเด็น มรดกทางวัฒนธรรมกับเทคโนโลยีในการเป็น สื่อกลางเพื่อนำเสนอเนื้อหา สอดคล้องกับมรดกทาง วัฒนธรรมที่อยู่ในรูปดิจิทัลด้วยการนำเอาเทคโนโลยี สามมิติหรือเทคโนโลยีเสมือนเข้ามาช่วยในการ นำเสนอและการเผยแพร่มรดกวัฒนธรรมที่เป็นงาน ศิลปวัตถุและโบราณวัตถุ และยังคงคล้อยกับมรดก ทางวัฒนธรรมกับการศึกษาในการบูรณาการมรดก ทางวัฒนธรรมกับกระบวนการเรียนรู้

สรุป

การพัฒนาแอปพลิเคชันส่งเสริมการเรียนรู้ เรื่องเตาอินทิล และการผลิตเครื่องปั้นดินเผา พบว่า แอปพลิเคชันที่พัฒนา ประกอบด้วย 3 ส่วน ส่วนแรก เว็บแอปพลิเคชันให้ความรู้เกี่ยวกับเตาอินทิล และ การผลิตเครื่องปั้นดินเผา ส่วนที่สองแอปพลิเคชัน

ความเป็นจริงเสริมนำเสนอเตาเผาอินทิล และ เครื่องปั้นดินเผาในรูปแบบโมเดลสามมิติ ส่วนที่สาม โปรแกรมนำเสนอข้อมูลเตาเผาอินทิลและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเตาเผาอินทิล เช่น แจกัน แก้ว กระจ่าง ทั้งสามส่วนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยผลการวิจัยพบว่า ผู้เชี่ยวชาญพึงพอใจต่อแอปพลิเคชัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.67 มีความเหมาะสมอยู่ในระดับมากที่สุด เมื่อนำไปใช้งานกับกลุ่มตัวอย่าง ผลการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ของผู้เรียนก่อนและหลังเรียนรู้ด้วยแอปพลิเคชันมีค่าเฉลี่ยหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ประสิทธิภาพทางการเรียนรู้หลังเรียนเพิ่มขึ้นจากก่อนเรียนคิดเป็นร้อยละ 41.52 และความพึงพอใจโดยผู้ใช้งานอยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.44 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.66

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2563

เอกสารอ้างอิง

- Adobe. 2021. **Adobe Animate**. Adobe. Available Source: https://www.adobe.com/th_en/products/animate.html, January 20, 2021.
- Blender. 2021. **Blender**. Blender. Available Source: <https://www.blender.org/>, January 20, 2021.
- Busarathid, K., Busarathid, J., jessadatitukul, D. and Pongtharatik, J. 2020. Augmented Reality Technology: Nursing Education Application. **Christian University Journal** 26(1): 104-111. (in Thai)
- Chaichuay, V. 2017. Cultural Heritage Information: Concept and Research Issues. **Journal of Information Science** 35(2): 130-153. (in Thai)
- Charoenroop, N. 2017. Applications of Augmented Reality to Present Tourist Information : A Case Study of Phrakaew Temple, Chiangrai Province, Thailand. **Journal of Modern Management Science** 10(1): 13-30. (in Thai)
- Chiangmai Cultural Office. 2021. **Intangible Cultural Heritage**. Chiangmai Cultural Office. Available Source: <https://www.Chiangmaiculture.net/web/index.php?r=site%2Fdetail&id=216&type=culture>, January 14, 2021. (in Thai)
- Ditcharoen, N., Polyiam, K., Vangkahad, P. and Jarujamrus, P. 2014. Development of Learning Media in Topics of Atomic Structure and Chemical Bond with Augmented Reality Technology. **Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning** 5(1): 21-27. (in Thai)
- Fitz-Gibbon, C.T. and Morris, L.L. 1987. **How to design a program evaluation**. CA:Sage, Newbury Park.
- Likert, R. 1932. A Technique for the Measurement of Attitudes, pp. 5-55. In Woodworth, R.S., ed. **Archives of Psychology**. New York University, New York.
- Netwong, T. 2020. The Using Resource Based Learning of Local Wisdom to Effectiveness Local Wisdom Knowledge Management by ICT of Students in Information Technology Program. **Journal of Yala Rajabhat University** 15(1): 40-47. (in Thai)

- Özdemir, M. 2017. Educational augmented reality (AR) applications and development process, pp. 26-53. *In Mobile Technologies and Augmented Reality in Open Education*. IGI Global.
- Pantelic, A. and Vukovac, D.P. 2017. The Development of Educational Augmented Reality Application: A Practical Approach, pp. 8745-8752. *In The 10th Annual International Conference of Education, Research and Innovation, Seville*. Spain.
- Phiwma, N. and Mutchima, P. 2018. The Development of the Augmented Reality Application for Arts, Culture and Local Wisdom Learning Support on Alms Bowl Making at Ban Batra Community. *Parichart Journal Thaksin University* 31(1): 241-262. (in Thai)
- PTC. 2021. **Vuforia Training Catalog**. PTC. Available Source: <https://www.ptc.com/en/ptc-university/training-catalogs/vuforia-training>, January 20, 2021.
- Sittirit, C. 2016. Tangible and Intangible : Similarities among the Diversities of the Cultural Heritage. *Journal of Humanities and Social Sciences* 8(2): 141-160. (in Thai)
- Spencer, E.H. 2015. How to analyze Likert and other rating scale data. *Currents in Pharmacy Teaching and Learning* 7(6): 836-850.
- Srinarang, W. 2019. Learning Technology in the 21st Century. *IPST Magazine* 47(219): 26-29. (in Thai)
- Srirochana, N. 2015. The Development of Archives Institute of Culture and Art Website Srinakharinvirot University. *Institute of Culture and Arts* 16(2): 1-10. (in Thai)
- Supaartagorn, C. and Chaisuwan, K. 2019. Three-dimensional Thai Literature Book: Holwichai and Kawee with Augmented Reality Technology on Android Operating System. *Journal of Information Science and Technology* 9(2): 13-23. (in Thai)
- The PHP Group. 2021. **PHP**. PHP release on hold. Available Source: <https://www.php.net/>, January 20, 2021.