



วารสารวิจัย

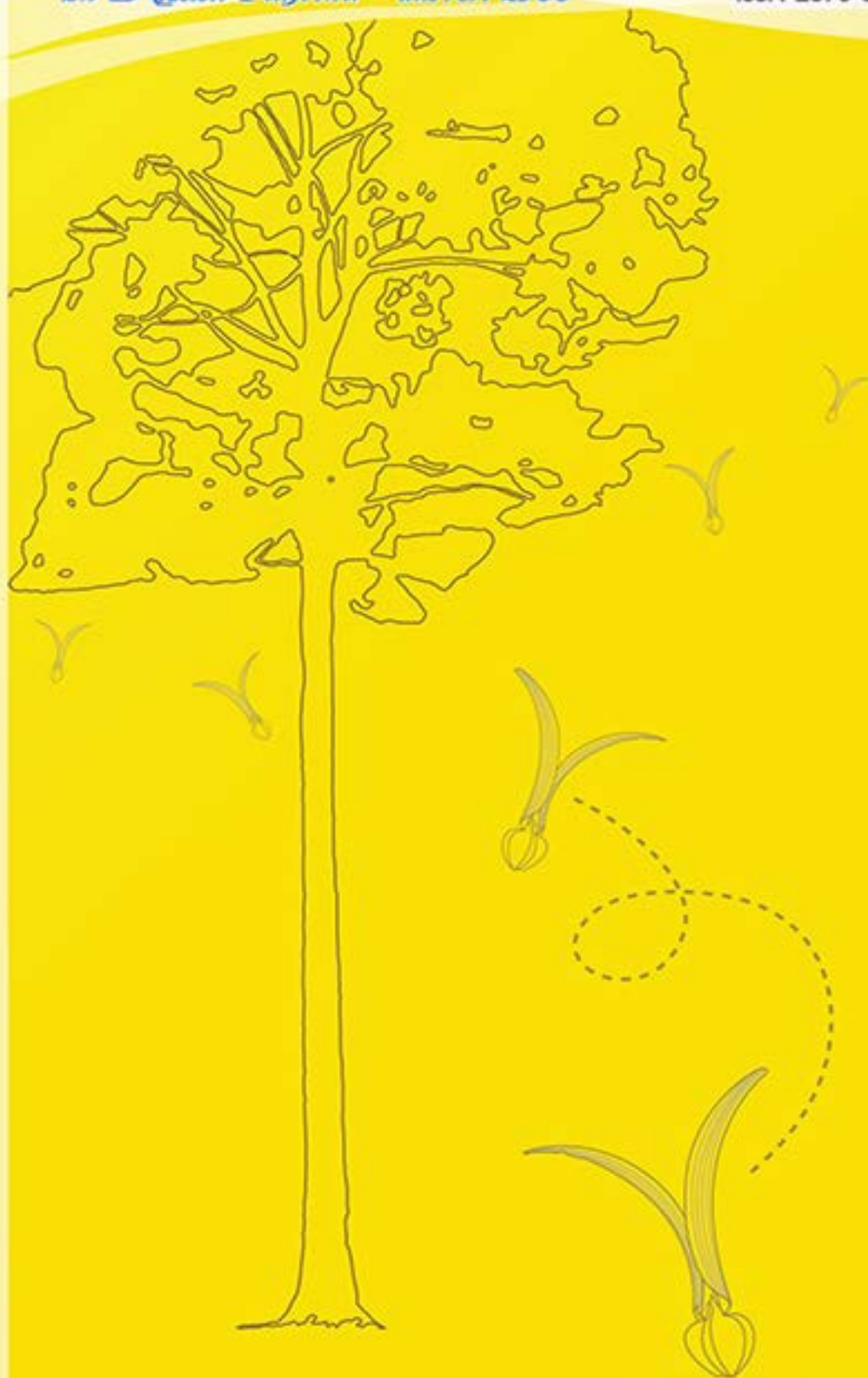
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal

ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 มกราคม – เมษายน 2566

ISSN 1906-6627 (Print)

ISSN 2673-0197 (Online)



วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

คณะกรรมการที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.อุทัยรัตน์ ณ นคร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง จักรใจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.เผด็จศักดิ์ จารยะพันธุ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วารสารวิจัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัย (Peer review)

รองศาสตราจารย์ ดร.สาวยรุพ ชัยวานิชศิริ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพพล เลิศวัฒนาสกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.คัชรินทร์ ศิริวงศ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ เรืองแสง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มินตรา ศิลอุดม	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.รัชณี เจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิดา เพ็ชรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤมล มงคลชนวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติกานต์ กร้ามาตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมภู ยิ้มโต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรวิทย์ อุปถัมภานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริยา ฉลาด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.อิทธิโรจน์ มะโน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสาวณีย์ ชัยเพชร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พรรณ อำพันธ์ทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรเดช สุวิทย์รักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.วรรณนิสา นุชคุ้ม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พันทิพย์ ปิยะทัศนานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.บุรฉัตร นัตริวิระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วราฤทธิ์ พานิชกิจโกศลกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภัตรา ประทุมชาติ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ สายกระสุน	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐรา อ่อนน้อม	มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร.อำนาจ เจริญรัตน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร.จันทิรา วงศ์เขียว	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตตะวัน กุโปลา	มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ ต้นเรือน	มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ดร.อภิชาติ สังข์ทอง	มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
ดร.กฤษณะ ช่องศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีฐิต์พล หนูพรหม	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ดร.ผจงจิต พิจิตบรรจง	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณทิพย์ กาหยิ	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรัญญา มิ่งเมือง	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.พิรพรรณ พลบุรี	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รสพร เขียมจริยธรรม	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณทิพา เจริญไทยกิจ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย หวังวโรดม	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เทวี ทองแดง คาร์ริลา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุธ จิตตงาม	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์สุธา วัฒนสิทธิ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยรัตน์ ศิริวงศ์ไพศาล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลักขณา ไชยมงคล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรดี สรวินุต	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ดร.ธีรพงศ์ ไพโรจน์ศิริกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ดร.ศุภนนท์ ตุ่นีม	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉรา จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ เตชะวุฒิพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทความทุกเรื่องก่อนลงตีพิมพ์ในวารสารฯ ได้ผ่านการพิจารณากลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ อย่างน้อย 2 ท่าน

วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.สุวัจน์ ธัญรส

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 จุฑาเกตุ

คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Professor Ir. Dr. Anuar Mat Safar

University Malaysia Perlis, Malaysia

Professor Mitsuhiro 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

รองศาสตราจารย์ณัฐวรรธน์ ปภาวสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิ่น จันจุฬา

คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติรี หอมเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริโรตม์ เกตุแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

รองศาสตราจารย์ ดร.พูนสุข อุดม

คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์เกษรา คูหา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ประพจน์ 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.ณัฐพงศ์ แก้วบุญมา

คณะเทคโนโลยีการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลักษมี วิทยา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหพงศ์ สมวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิกรม ฉันทรางกูร

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ดร.ทรงสิน ชีระกุลพิศุทธิ์

คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ดร.ทักษิณ ขาวเนียม

คณะคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
ดร.กิตติมา ตันติหาชัย

คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

นางสาวกุลิกา ชนะเสวตร

วิทยาลัยการโรงแรมและการท่องเที่ยว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

วัตถุประสงค์	เพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่บทความวิจัย (Research article) ของบุคลากร นักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย รวมทั้งบทความวิจัยของบุคคลภายนอก
ฝ่ายจัดทำ	นางสาวบุญบรรจง สายลาด สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย นางสาวพนิดา ชูเวท สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
เจ้าของลิขสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ขอบเขต	เป็นวารสารวิชาการที่ครอบคลุมสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กำหนดการเผยแพร่	ปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 มกราคม - เมษายน ฉบับที่ 2 พฤษภาคม - สิงหาคม ฉบับที่ 3 กันยายน - ธันวาคม
การเผยแพร่	Online
จัดทำโดย	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 179 หมู่ 3 ตำบลไม้ฝาด อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง 92150 โทรศัพท์ 0 7520 4070 โทรสาร 0 7520 4071 E-mail: rdisv.journal@gmail.com Website: https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutsvrj/index
Print ISSN	1906-6627
Online ISSN	2673-0197

สารบัญ

การใช้แป้งกล้วยน้ำว้าทดแทนแป้งมันสำปะหลังในเส้นลอดช่องสิงคโปร์.....	1-13
ไผ่แดง ขวัญใจ และ สุวดี พองอินทร์	
ผลของการเคลือบเมล็ดด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพร่วมกับอนุพันธ์คูมาริน.....	14-23
ต่อการดูดน้ำและการงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวาน	
ณัฐกัญญา มหิยานนท์ พรศิริ เลี้ยงสกุล นงพงา จรัสโสภณ	
อรวรรณ ชุนหาติ และ กนกวรรณ เทียงธรรม	
การทำนายอันตรกิริยาระหว่างสารพิษเคมีที่พบได้ในพืชท้องถิ่นกับโปรตีนที่สำคัญของ.....	24-36
<i>Helicobacter pylori</i> ด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์	
มิตี เจียรพันธุ์ และ ศักดิ์ชัย กรรमारากร	
ลักษณะภายนอกและสัณฐานวิทยาของไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์.....	37-48
สิริวดี พรหมน้อย สุภาวดี แหยมคง และ เกษญา มิ่งฉาย	
การประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนแบบผสมผสานผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับ.....	49-59
ใช้กับชุดบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารทะเล	
กิตติกร ชันแก้ว และ นุชนาฏ นิลออ	
การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด.....	60-73
อัจฉรา คลวิทยาคุณ จิรภัทร ไกรสมรส ปฏิภาณ จันทศิริ	
วิศรา วุฒิชติ และ อำไพ สงวนแว	
การพัฒนาผลิตภัณฑ์เมี่ยงค่านิดแห่งเพื่อสุขภาพ.....	74-90
รตนพร บรรทัด เพ็ญภา ลีมัน ปาริสุทธิ์ เณลิมชัยวัฒน์	
และ ดวงกมล แสงธีรกิจ	
ลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชระหว่าง.....	91-104
เทอร์มอพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวและฟางข้าว	
นันทยา เก่งเขตรกิจ และ ธาปณี วงศ์ปรีดี	

คอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เสาฐานอ้อยบดละเอียดปริมาณสูง.....	105-120
ร่วมกับผดงแคลเซียมคาร์บอเนต	
ทวิช กล้าแท้ Trinh Nhat Ho Tran Sambath Men	
วิชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล	
การพัฒนาชุดอาหารกล่องพลังงานต่ำจากอาหารไทยวังสวนสุนันทา.....	121-132
จิราพร วิสูตรานนท์ ปัทมา หิรัญโณภาส นันทัง เพ็ญขจรพิง	
ธิดารัตน์ แสนพรม และ นฤมล เปียเชื้อ	
ผลของประจุสมดุลของอนุภาคและความเร็วด้านหน้าต่อประสิทธิภาพ.....	133-151
การกรองอนุภาคของแผ่นกรองนอนวูฟเวนและผ้าทอ	
วิสูตร อาสนวิจิตร และ พานิช อินต๊ะ	
Development of Ceramic Clay Map Web Service in Thailand.....	152-164
by Applying GIS	
Anantakul Intarapadung	
ผลของแซนแทนกัมและกระบวนการผลิตต่อการยืดอายุการเก็บรักษา.....	165-181
กาสะแม : กาสะแมแม่ประครอง จังหวัดพัทลุง	
ชนิษฐา พันชูกลาง และ อภิชาติ พันชูกลาง	
การศึกษาความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาและความกลัวการหกล้มของ.....	182-197
ผู้สูงอายุในจังหวัดนครราชสีมา	
สุภารัตน์ ค้างสันเทียะ และ พรศิริ จงกล	
การศึกษาประสิทธิภาพของเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบ.....	198-212
สำหรับตัวแบบการถอดอยพหุคูณ	
วรางคณา เรียนสุทธิ์	
การพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคา.....	213-224
ดวงทิพย์ ไข่แก้ว อรทัย เจริญสิทธิ์ และ นัฐนันท์ ทวีรัตน์ชนน	
Ethanol Fermentation from Cassava Starch Hydrolysate by Thermotolerant.....	225-235
Yeast <i>Pichia kudriavzevii</i> using Batch and Fed-batch Cultures	
Chutima Kaewkrajay and Thanida Yongyuen	

การศึกษาชนิดและปริมาณของสารก่อเจลและสารให้ความหวาน..... 236-247

ในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่น้ำตาลโตนดสด

สุริย์พร กังสนันท์ ศิริพร รัชฎ์แก้ว และ ศการัตต์ คุมมะระ

Some Hematological Parameter and Survival Rate of Nile tilapia..... 248-259

(*Oreochromis niloticus*) Fed with Dietary Garlic Cloves (*Allium sativum*)

in Post-Challenge with *Aeromonas hydrophila*

Nudtha Nithikulworawong

การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคั่นเซสำหรับ..... 260-276

การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ

กรณีศึกษา ผู้ผลิตเซรามิก อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ ชาตรี หอมเขียว พิรพงษ์ พันระศรี

และ ปรีชญา ชุมศรี

การใช้แป้งกล้วยน้ำว้าทดแทนแป้งมันสำปะหลังในเส้นลอดช่องสิงคโปร์

The Use of Banana Flour Substituted for Tapioca Flour in Singapore Cendol Noodle

ไผ่แดง ขวัญใจ* และ สุวาลี ฟองอินทร์

Paidaeng Khwanchai* and Suwalee Fong-In

Received: 23 February 2021, Revised: 22 April 2021, Accepted: 31 August 2021

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาการใช้แป้งกล้วยน้ำว้าทดแทนแป้งมันสำปะหลังในผลิตภัณฑ์เส้นลอดช่องสิงคโปร์ โดยทดแทนด้วยแป้งกล้วยในสูตรที่ระดับต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 0 (สูตรตัวอย่างควบคุม) 10 20 30 40 จากนั้นวิเคราะห์ค่าสี พบว่าเส้นลอดช่องสิงคโปร์มีค่าความสว่าง (L^*) ลดลง ส่วนค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการทดแทนแป้งกล้วยในสูตรเพิ่มขึ้น ค่า hue ($^\circ$) อยู่ระหว่าง 43.44-63.18 ซึ่งแสดงสีส้มแดง-สีเหลือง และเส้นลอดช่องที่ใช้แป้งกล้วยน้ำว้า ร้อยละ 40 มีค่า ΔE สูงสุดเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม สำหรับค่าความแน่นเนื้อและความเหนียวของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง เมื่อทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยในระดับที่สูงขึ้น การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่าการทดแทนด้วยแป้งกล้วยที่ระดับร้อยละ 10 ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) กับการทดแทนด้วยแป้งกล้วยที่ระดับร้อยละ 20 และการทดแทนที่ทั้งสองระดับนี้ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงกว่าตัวอย่างควบคุม ดังนั้น จึงเลือกสูตรที่มีการทดแทนด้วยแป้งกล้วยที่ระดับร้อยละ 20 และเมื่อเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการกับสูตรตัวอย่างควบคุม พบว่าสูตรดังกล่าวได้รับปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่า เมื่อเทียบกับสูตรตัวอย่างควบคุม นอกจากนี้ยังมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม

คำสำคัญ: แป้งกล้วย, แป้งมันสำปะหลัง, เส้นลอดช่องสิงคโปร์, สมบัติทางกายภาพ

ABSTRACT

The purpose of this research was to study the use of Num-Wa banana flour to substitute tapioca starch in Singapore Cendol noodles. Banana flour was replaced with formulas at different levels, namely, 0 (control sample formula), 10, 20, 30, 40% w/w. It was found that the lightness value (L^*) decreased as the banana starch content in the formula increased, while redness value (a^*) and yellowness value (b^*) were increased. Hue ($^\circ$) was between 43.44-63.18 (orange red-yellow color) and Singapore Cendol noodles that were substituted with banana flour at 40% had the highest ΔE . The firmness and toughness of the product were reduced when replacing tapioca flour with banana flour at a higher level. For sensory quality evaluation, there was no statistically significant difference ($p>0.05$) between the replacement of 10% and 20% banana flour on overall liking score. Substitutions at levels of 10% and 20% received a higher overall preference score than the control sample. Therefore, the formula with a 20% banana flour substitution was chosen to compare the nutritional values with the control formula. It was found that the protein content increased two times compared to the control sample. Moreover, it also had lower carbohydrate content than the control sample.

Key words: banana flour, tapioca flour, Singapore Cendol noodle, physical properties

บทนำ

กล้วยน้ำว้า (*Musa sapientum* Linn. (ABB group) ‘Kluai Nam Wa’) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย เพราะปลูกและดูแลรักษาง่าย สามารถผลิตได้มาก และให้ผลผลิตตลอดปี และจัดว่าเป็นผลไม้ราคาถูก ปลูกได้ทุกภาคของประเทศไทย โดยในบรรดากล้วยทั้งหมด กล้วยน้ำว้าถือเป็นกล้วยที่ให้แคลเซียมสูงสุดและยังอุดมไปด้วยวิตามินบี 1 วิตามินบี 2 วิตามินบี 6 และวิตามินซี นอกจากนี้สารอาหารที่ทำให้กล้วยน้ำว้าพิเศษกว่ากล้วยชนิดอื่นๆ นั่นคือเป็นแหล่งของโปรตีน กรดแอมิโนอาร์จินินและฮิสติดีน (Jaiturong *et al.*, 2020; Ruangsanka and Santhalunai, 2020) การผลิตกล้วยน้ำว้าในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นโดยในปี พ.ศ. 2559 มีพื้นที่การเก็บเกี่ยวผลผลิตกล้วยน้ำว้าเท่ากับ 181,902.34 ไร่ เก็บเกี่ยวผลผลิตได้ปริมาณ 918,539.97 ตัน ผลผลิตต่อเนื้อที่เก็บเกี่ยว 5,049.63

กิโลกรัมต่อไร่ และราคาที่เกษตรกรขายได้เฉลี่ย 12.98 บาทต่อกิโลกรัม (Subanmanee, 2020) บางฤดูกล้วยน้ำว้าก็ให้ผลผลิตที่มีจำนวนมากและล้นตลาด ผลผลิตที่เกินความต้องการของผู้บริโภคก่อให้เกิดความเสียหายจากการเน่าเสียของผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว และส่งผลกระทบต่อเกษตรกรโดยตรง ด้วยเหตุนี้ถ้าหากมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการปรับปรุงคุณภาพและเพิ่มความหลากหลายให้แก่ผลิตภัณฑ์จากกล้วยน้ำว้าจะสามารถกระตุ้นเศรษฐกิจทางการเกษตรเพื่อส่งออกสร้างรายได้ให้ประเทศมากขึ้น กล้วยน้ำว้ามีสรรพคุณทางยา คือช่วยบรรเทาอาการเจ็บคอ ระบายท้อง ปาก รักษาโรคกระเพาะ ช่วยเพิ่มพลังให้แก่สมอง มีสารต้านอนุมูลอิสระ ลดอาการนอนไม่หลับ ป้องกันมะเร็ง ลดระดับคอเลสเตอรอล และไตรกลีเซอไรด์ในเลือด เป็นต้น (Vatanasuchart *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2012) นอกจากนี้ยังพบว่าคาร์โบไฮเดรตในกล้วยน้ำว้าดิบประกอบด้วยสตาร์ช

ที่เรียกว่า แป้งทนการย่อย (resistant starch) ซึ่งเป็น
สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยของเอนไซม์ ไม่ดูดซึมภายใน
ลำไส้เล็กของมนุษย์ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายเส้นใยอาหาร
(Jaiturong *et al.*, 2020; Falcomer *et al.*, 2019)

การนำกล้วยมาแปรรูปเป็นแป้งเพื่อใช้ทำ
ประโยชน์อื่นๆ หรือทำเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่แล้ว แป้ง
กล้วยยังสามารถเก็บรักษาได้นาน แป้งกล้วยเป็น
วัตถุดิบที่มีคุณค่าในทางอุตสาหกรรมอาหาร Fida *et al.* (2020) กล่าวถึงแป้งกล้วยว่ามีคุณค่าทาง
โภชนาการสูง มีปริมาณโปรตีน วิตามินบี วิตามินซี
และเกลือแร่สูงกว่าแป้งหลายชนิด เช่น แป้งมัน
สำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งสาลี เป็นต้น จึงมีการ
ส่งเสริมให้มีการผลิตและนำแป้งกล้วยไปใช้
ประโยชน์หลากหลายมากขึ้น โดยมีหลายงานวิจัยที่มี
การศึกษาการใช้แป้งกล้วยทดแทนแป้งที่เป็น
ส่วนผสมหลักในผลิตภัณฑ์ขนมอบ ได้แก่ ขนมปัง
เค้ก ลูกเกด บิสกิต บาวน์ มัฟฟิน โดนัท เป็นต้น
(Agama-Acevedo *et al.*, 2012; Alvarenga *et al.*,
2018; Chong and Noor Aziah, 2008; Dangsungwal
et al., 2011; Kaur *et al.*, 2017; Loza *et al.*, 2017;
Mohamed *et al.*, 2010; Noor Aziah *et al.* 2012;
Seguchi *et al.*, 2014; Subanmanee, 2020) นอกจากนี้
ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้แป้งกล้วยในผลิตภัณฑ์
อาหารเส้น ได้แก่ กล้วยเดี่ยว เส้นหมี่ บะหมี่ พาสต้า
 เป็นต้น (Agama-Acevedo *et al.*, 2009; Ovando-
Martinez *et al.*, 2009; Saifullah *et al.*, 2009; Yu *et al.*, 2020)

ลวดช่องสังคโปร์เป็นขนมหวานที่คนไทย
นิยมรับประทานกันมาช้านาน เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำ
จากแป้งมันสำปะหลังหรืออาจผสมกับแป้งชนิดอื่น
เช่น แป้งเท้ายายม่อม ซึ่งองค์ประกอบหลักของแป้ง
มันสำปะหลังจะประกอบไปด้วยคาร์โบไฮเดรตเป็น
ส่วนใหญ่ (Chumkaew, 2019) ดังนั้น ในการศึกษา
นี้จะศึกษาปริมาณการใช้แป้งกล้วยน้ำว้าที่เหมาะสม

เพื่อทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วนในผลิตภัณฑ์
เส้นลวดช่องสังคโปร์ เพื่อเป็นการเพิ่มคุณค่าทาง
โภชนาการให้แก่เส้นลวดช่องสังคโปร์ นอกจากนี้ ยัง
เป็นการลดต้นทุนการผลิตในด้านวัตถุดิบ และลด
ปัญหาที่จะทำให้ผลผลิตกล้วยน้ำว้าที่ล้นตลาด
กลับมามีราคา ทั้งนี้ยังเป็นการเพิ่มทางเลือกให้แก่
ผู้บริโภคในการบริโภคเส้นลวดช่องสังคโปร์อีกด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบ

กล้วยน้ำว้าดิบ (*Musa sapientum* L.) โดย
กล้วยมีอายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 110-125 วัน
นับตั้งแต่ออกปลีกล้วย ซื้อมาจากเกษตรกรในท้องถิ่น
อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ส่วนวัตถุดิบอื่นๆ ซื้อมา
จากตลาดสดและห้างสรรพสินค้าในจังหวัดพะเยา

2. การเตรียมแป้งกล้วยน้ำว้า

เตรียมแป้งกล้วยน้ำว้า (banana flour) โดย
คัดแปลงจากกรรมวิธีการผลิตของ Abbas *et al.*
(2013) เริ่มจากนำกล้วยน้ำว้าดิบมาทำความสะอาด
แล้วนำไปนึ่งนาน 10 นาที แล้วทำให้เย็น จากนั้น
ปอกเปลือกและหั่นเป็นชิ้นลูกเต๋ารูขนาด 0.3×0.3×0.3
เซนติเมตร แขนในสารละลายโพแทสเซียมเมแทไบ
ซัลไฟด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 เป็นเวลา 5 นาที
นำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ
60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นทำการ
บดกล้วยแห้งจนละเอียดด้วยเครื่องบดตัวอย่างอาหาร
แบบ variable speed rotor mill ยี่ห้อ Fritsch รุ่น
Pulverisette 14 ผลิตที่ประเทศเยอรมนี ทำการร่อน
ด้วยตะแกรงร่อนขนาด 80 เมช บรรจุแป้งกล้วยน้ำว้า
ในถุงออลูมิเนียมฟอยล์เก็บไว้ในที่แห้งเพื่อใช้ในการ
ผลิตเส้นลวดช่องสังคโปร์

3. กรรมวิธีการผลิตเส้นลวดช่องสังคโปร์

ผลิตเส้นลวดช่องสังคโปร์สูตรดั้งเดิมโดย
คัดแปลงจากกรรมวิธีการผลิตของ Chumkaew

(2019) เริ่มจากนำน้ำเปล่าที่ตวงให้ได้ปริมาตร 70 มิลลิลิตร มาต้มให้เดือด และใส่สีผสมอาหาร (R114AG apple green colour) ลงไป 2 มิลลิลิตร เทน้ำเดือดผสมลงในแป้งมันสำปะหลังปริมาณ 100 กรัม เคลี่ยให้เข้ากัน แล้วใช้มือวนคให้เข้ากัน ใช้ที่คลึงแป้งคลึงบางๆ หนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร ตัดเป็นเส้นแท่งกว้างประมาณ 0.5 เซนติเมตร ยาวประมาณ 4 เซนติเมตร ต้มน้ำให้ร้อนจนเดือด แล้วนำเส้นแป้งที่เตรียมไว้ลงไปต้มนานประมาณ 1 นาที เมื่อเส้นลอดช่องสุกนำเส้นลอดช่องตักใส่น้ำเย็นอุณหภูมิประมาณ 15 องศาเซลเซียส ซึ่งตัวลอดช่อง

จะมีสีใสเมื่อเวลาสัมผัสกับน้ำเย็น ตักเส้นลอดช่องพักไว้ จะได้เส้นลอดช่องสีคอปร์

4. การศึกษาปริมาณการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยน้ำว้า

ผลิตเส้นลอดช่องสีคอปร์ตามวิธีการในข้อ 3 โดยนำแป้งกล้วยน้ำว้าลงทดแทนแป้งมันสำปะหลังในการผลิตเส้นลอดช่องสีคอปร์ที่ 5 ระดับ คือ ร้อยละ 0 (ตัวอย่างควบคุม), 10, 20, 30 และ 40 ดังตารางที่ 1 จากนั้นจึงนำเส้นลอดช่องสีคอปร์ที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์คุณภาพและลักษณะทางกายภาพเปรียบเทียบกับเส้นลอดช่องสูตรดั้งเดิม (ตัวอย่างควบคุม)

ตารางที่ 1 ปริมาณการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยน้ำว้า

ส่วนผสม	สูตรควบคุม	ปริมาณแป้งกล้วยน้ำว้าที่ใช้ทดแทน (กรัม/100 กรัม)			
		10	20	30	40
แป้งมันสำปะหลัง	100	90	80	70	60
แป้งกล้วยน้ำว้า	0	10	20	30	40
น้ำเปล่า	70	70	70	70	70
สีเขียวผสมอาหาร	2	2	2	2	2

5. การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ

5.1 การวัดค่าสี

วัดค่าสีของเส้นลอดช่องสีคอปร์โดยนำเส้นลอดช่องใส่ลงในหลอดบรรจุตัวอย่าง (cuvette) จนเต็ม นำไปวัดด้วยเครื่องวัดสี Hunter lab รุ่น ColorQuest XE ผลิตที่ USA ใช้ค่าการส่องแสง (illuminant) D65 และ 10° observer angle โดยค่า L^* คือค่าความสว่างของสี ซึ่งมีค่า 0 - 100 ที่ 0 แสดงถึงสีดำ และ 100 แสดงถึงสีขาว ค่า a^* แสดงถึง สีแดง - สีเขียว ค่า b^* แสดงถึง สีเหลือง - น้ำเงิน นำค่าต่างๆ ที่วัดได้มาคำนวณและรายงานผลในรูป hue angle (H°) ซึ่งเป็นค่าเฉดสี มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 360 องศา ส่วนค่า chroma เป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงความอิ่มตัว

ของสี โดยมีค่าเข้าใกล้ 0 หมายถึง วัตถุมีสีซีดจาง และมีค่าเข้าใกล้ 60 หมายถึง วัตถุมีสีเข้ม และค่า ΔE ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างของสี (Pathare *et al.*, 2013) ทำการทดลอง 6 ซ้ำ เมื่อ $\text{hue} = \tan^{-1}(b^*/a^*)$ โดยที่ a^* และ $b^* > 0$ ส่วน $\text{chroma} = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ และ $\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$ เมื่อ $\Delta L^* = L^*(\text{ตัวอย่าง}) - L_0^*$, $\Delta a^* = a^*(\text{ตัวอย่าง}) - a_0^*$ และ $\Delta b^* = b^*(\text{ตัวอย่าง}) - b_0^*$ โดยที่ L_0^* , a_0^* และ b_0^* คือค่าสีของเส้นลอดช่องสีคอปร์ตัวอย่างควบคุม

5.2 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเส้นลอดช่องสีคอปร์ ได้แก่ ความเหนียวและความแน่น เนื้อ นำตัวอย่างเส้นลอดช่องสีคอปร์มาจัดเรียงชิด

กันให้ได้ 3 เส้น ให้มีความยาว 10 เซนติเมตร บนแผ่นตัดทดสอบโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA.XT.plus (Stable Microsystems Texture Technologies Inc, UK) ทำการทดสอบในลักษณะของแรงตัดด้วยหัววัดแบบหัวใบมีดตัด (knife and blade) ความเร็วของใบมีด 10.00 mm/s และความเร็วถอยกลับ 2.00 mm/s โดยทำการตัดจนเส้นลวดช่องขาด บันทึกค่าแรงตัดขาดด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Texture exponent 32 อัตราการบันทึก 400 จุดต่อวินาที ค่าความแน่นเนื้อแปรผลจากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเปลี่ยนรูป (deformation) กับค่าแรงสูงสุด (peak force) ที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ ส่วนค่าความเหนียวแปรผลมาจากค่าของแรงสูงสุดที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ ทำการทดลอง 6 ซ้ำ

6. การทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส

นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคเพื่อเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุด โดยการประเมินทางด้านประสาทสัมผัสทางด้านกายภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส ความยืดหยุ่น และการยอมรับโดยรวม ใช้เทคนิควิธีให้คะแนนความชอบแบบ 9 - point hedonic scale ใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน โดยให้ผู้ทดสอบชิมในแต่ละคนบันทึกขึ้นของความชอบและความไม่ชอบของตัวอย่างออกมาเป็นคะแนนจากการกำหนดลำดับความชอบเป็น 9 ลำดับ คือ ลำดับที่ 9 ชอบมากที่สุด 8 ชอบมาก 7 ชอบปานกลาง 6 ชอบเล็กน้อย 5 รู้สึกเฉยๆ 4 ไม่ชอบเล็กน้อย 3 ไม่ชอบปานกลาง 2 ไม่ชอบมาก และลำดับที่ 1 ไม่ชอบมากที่สุด

7. การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์เส้นลวดช่องสิงคโปรที่ได้รับคัดเลือกเป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพร่วมกับการทดสอบทางประสาทสัมผัส นำมาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น เถ้า โปรตีน

ไขมัน เส้นใย และคาร์โบไฮเดรต ตามวิธี AOAC (2006) เพื่อเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์เส้นลวดช่องสิงคโปรสูตรดั้งเดิมกับผลิตภัณฑ์เส้นลวดช่องสิงคโปรสูตรที่มีการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยน้ำว่าที่ได้รับคุณภาพเหมาะสมที่สุด

8. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ โดยวิเคราะห์คุณภาพด้านต่างๆ ของตัวอย่างทั้งหมด 3 ซ้ำ ส่วนการทดสอบทางประสาทสัมผัสวางแผนการทดลองแบบ Randomized Completed Block Design (RCBD) วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนด้วยวิธี ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จากนั้นเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ

ภาพที่ 1 แสดงรูปถ่ายของเส้นลวดช่องสิงคโปรที่ผลิตโดยการทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วนด้วยแป้งกล้วยน้ำว่า จะเห็นได้ว่าเส้นลวดช่องสิงคโปรตัวอย่างควบคุม (ร้อยละ 0) มีลักษณะปรากฏเป็นสีเขียวออกใสซึ่งเป็นลักษณะสีโดยทั่วไปของเส้นลวดช่องสิงคโปรที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง ในขณะที่เส้นลวดช่องสิงคโปรที่มีการทดแทนด้วยแป้งกล้วยน้ำว่าจะมีคุณลักษณะของสีเปลี่ยนแปลงไป โดยจะมีคุณลักษณะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ยังมีการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยน้ำว่าในปริมาณระดับร้อยละที่เพิ่มขึ้น จะทำให้สีของเส้นลวดช่องเปลี่ยนไปเป็นสีเหลืองมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณการทดแทนที่ระดับร้อยละ 30 และ 40 จะเห็นได้ว่าสีของเส้นลวดช่องมีลักษณะเป็นสีเหลืองคล้ำจนสูญเสียคุณลักษณะของสี

ของเส้นลวดช่องสิงคโปร์ เนื่องจากแป้งกล้วยน้ำว้าที่นำมาผลิตเส้นลวดช่องมีสีค่อนข้างคล้ำ (สีน้ำตาลอ่อน) ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังมีสีขาวสว่าง ดังนั้นเมื่อมีการใช้แป้งกล้วยน้ำว้ามากขึ้น สีของผลิตภัณฑ์จะมีสีคล้ำขึ้น

การทดสอบค่าสีของเส้นลวดช่องสิงคโปร์ที่มีการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าที่ระดับแตกต่างกัน พบว่าค่าความสว่าง (L^*) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ตามระดับปริมาณที่เพิ่มขึ้นของแป้งกล้วยน้ำว้าที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังในสูตรเส้นลวดช่องสิงคโปร์ ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ตามระดับปริมาณแป้งกล้วยน้ำว้าที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลัง (ตารางที่ 2) แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีแป้งกล้วยมากกว่ามีความมืดมากกว่า และมีความเป็นสีแดงและสีเหลืองมากกว่า และเมื่อคำนวณค่า hue angle ($^\circ$) พบว่าเส้นลวดช่องมีค่าอยู่ระหว่าง 43.44-63.18 ซึ่งแสดงค่าสีส้มแดง-สีเหลือง

ส่วนค่า chroma พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับแป้งกล้วยที่ทดแทนแสดงว่าเส้นลวดช่องมีสีเข้มขึ้น (Pathare *et al.*, 2013) และเมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของสี (ΔE) เทียบกับสูตรควบคุม พบว่าเส้นลวดช่องที่ใช้แป้งกล้วยน้ำว้าร้อยละ 10-40 มีค่า ΔE อยู่ระหว่าง 7.33-28.62 โดยเส้นลวดช่องสูตรที่มีระดับการทดแทนร้อยละ 40 มีค่า ΔE สูงสุด การทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยทำให้คุณลักษณะโดยทั่วไปของเส้นลวดช่องสิงคโปร์ที่มีลักษณะเส้นที่ใสเปลี่ยนแปลงไป (ภาพที่ 1 และตารางที่ 2) โดยเปลี่ยนเป็นเส้นที่ขุ่นเพิ่มมากขึ้นตามระดับการทดแทน การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ในค่าสีเป็นคุณลักษณะที่เกิดจากสารประกอบฟีนอลที่ออกซิไดซ์ได้ซึ่งมีอยู่มากในกล้วยมีการฟอร์มตัวขึ้นมาในเส้นลวดช่องที่มีการทดแทนด้วยแป้งกล้วย (Chong and Noor Aziah, 2008; Mohamed *et al.*, 2010) ซึ่งสารประกอบเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล



ภาพที่ 1 เส้นลวดช่องสิงคโปร์ที่มีการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าที่ระดับแตกต่างกัน; ทดแทนด้วยแป้งกล้วยที่ระดับ (1) ร้อยละ 0 (ตัวอย่างสูตรควบคุม), (2) ร้อยละ 10, (3) ร้อยละ 20, (4) ร้อยละ 30 และ (5) ร้อยละ 40

นอกจากนี้ เนื่องจากแป้งกล้วยน้ำว้าแรกเริ่มที่ใช้ในการผลิตเส้นลวดช่องสิงคโปร์มีสีเหลืองนวลไม่ขาว เมื่อเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งอาจเกิด

เนื่องจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) ระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์และโปรตีน หรือปฏิกิริยาสีน้ำตาลจากการกระทำของเอนไซม์ (enzymatic browning)

ในระหว่างกระบวนการผลิตแป้ง (Mohamed *et al.*, 2010) โดยค่าความสว่าง L^* ของแป้งกล้วยน้ำว้าจะอยู่ที่ 88.60-88.88 ส่วนของแป้งสาลีนั้นมีค่าความสว่างอยู่ที่ 89.37-92.97 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งสาลีมีความสว่างกว่าแป้งกล้วยน้ำว้า (Subanmancee, 2020) ดังนั้น

เมื่อใช้แป้งกล้วยน้ำว้าทดแทนแป้งมันสำปะหลังในเส้นลอดช่องสิงคโปร์ในระดับที่มากขึ้น จึงทำให้เส้นลอดช่องมีค่าความสว่างลดลงเมื่อเทียบกับเส้นลอดช่องสิงคโปร์สูตรควบคุม

ตารางที่ 2 ค่าสีของเส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่มีการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าที่ระดับแตกต่างกัน

แป้งกล้วย (g/100g)	ค่าสี					
	L^*	a^*	b^*	hue angle ($^\circ$)	chroma	ΔE
0	55.50±1.48 ^a	8.30±1.13 ^d	7.86±1.09 ^c	43.44±1.06 ^c	11.43±1.05 ^d	-
10	51.44±0.21 ^a	9.86±0.35 ^c	13.76±0.65 ^d	54.37±0.54 ^b	16.93±0.44 ^c	7.33±0.52 ^c
20	46.30±0.58 ^b	11.29±0.12 ^b	19.30±0.45 ^c	59.67±0.28 ^a	22.36±0.29 ^b	10.25±0.39 ^c
30	41.01±0.44 ^c	12.71±0.61 ^a	24.01±0.75 ^b	62.10±0.54 ^a	27.17±0.68 ^a	22.14±0.64 ^b
40	34.65±0.91 ^d	13.53±0.34 ^a	26.74±1.46 ^a	63.18±0.93 ^a	29.99±0.87 ^a	28.62±1.08 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 3 แสดงการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเส้นลอดช่องสิงคโปร์ พบว่าเส้นลอดช่องสิงคโปร์ตัวอย่างสูตรควบคุมมีค่าความแน่นเนื้อสูงสุด โดยที่เส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่มีการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าทุกระดับมีค่าความแน่นเนื้อต่ำกว่าเส้นลอดช่องสูตรตัวอย่างควบคุม และเมื่อเปรียบเทียบเส้นลอดช่องในสูตรที่มีการทดแทนแป้งกล้วยด้วยกัน พบว่าความแน่นเนื้อของเส้นลอดช่องมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทาง

สถิติ ($p > 0.05$) สำหรับค่าความเหนียวของเส้นลอดช่องสิงคโปร์ พบว่าการใช้แป้งกล้วยน้ำว้าทดแทนแป้งมันสำปะหลังในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าแรงตัดสูงสุดที่แสดงถึงค่าความเหนียวของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลง โดยตัวอย่างควบคุมได้รับค่าความเหนียวสูงสุด ในขณะที่ตัวอย่างเส้นลอดช่องที่มีการทดแทนด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าทุกสูตรมีค่าความเหนียวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 3 ค่าเนื้อสัมผัสของเส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่มีการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าที่ระดับแตกต่างกัน

แป้งกล้วย (g/100g)	เนื้อสัมผัส	
	ความแน่นเนื้อ (N/mm)	ความเหนียว (N)
0	0.25±0.02 ^a	0.040±0.002 ^a
10	0.16±0.02 ^b	0.021±0.005 ^b
20	0.14±0.01 ^{bc}	0.019±0.003 ^b

ตารางที่ 3 (ต่อ)

แป้งกล้วย (g/100g)	เนื้อสัมผัส	
	ความแน่นเนื้อ (N/mm)	ความเหนียว (N)
30	0.12±0.02 ^c	0.017±0.002 ^b
40	0.13±0.01 ^{bc}	0.017±0.004 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ค่าความแน่นเนื้อเป็นค่าที่แสดงถึงแรงที่ใช้จนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเจลตัวอย่างในขณะที่มีการตัดของใบมีดในครั้งแรก แสดงถึงความเหนียวของเจลที่ทำการวัด การทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าในเส้นลอดช่องสิงคโปร์ ส่งผลให้ค่าความแน่นเนื้อและความเหนียวของผลิตภัณฑ์ลดลง (ตารางที่ 3) โดยค่าความแน่นเนื้อของเจลเส้นลอดช่องมีค่าลดลงจาก 0.25 ถึง 0.13 และค่าความเหนียวลดลงจาก 0.040 ถึง 0.017 เมื่อมีการใช้แป้งกล้วยทดแทนในสูตร จะเห็นได้ว่าแป้งกล้วยส่งผลทำให้เจลแข็งขาดความแน่นเนื้อและความเหนียวอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ทั้งนี้การเติมแป้งกล้วยในส่วนผสมทำให้ความเข้มข้นของเจลแข็งเจือจางลงซึ่งเป็นสาเหตุให้ความแน่นเนื้อของเจลลดลง นอกจากนี้เกิดขึ้นเนื่องจากแป้งกล้วยมีความหนืดและคุณสมบัติในการยึดเกาะที่ต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลัง (Saeleaw and Schleining, 2010; Mota *et al.*, 2000) โดย Wang *et al.* (2012) ได้อธิบายว่ากำลังการพองตัวของแป้งกล้วยดิบเมื่อได้รับความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นเมื่อทำการผสมแป้งเข้าด้วยกัน เม็ดแป้งกล้วยดิบจึงดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวที่ช้ากว่าแป้งมันสำปะหลัง

ทำให้ความหนืดที่จะเกิดเจลเกิดช้ากว่าแป้งมันสำปะหลัง ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังเกิดการดูดซับน้ำและการพองตัวที่เร็วกว่าทำให้เกิดการพองตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า นอกจากนี้แป้งมันสำปะหลังมีความเสถียรของเม็ดแป้งที่พองตัวหลังจากการเกิดเจลาติไนเซชัน (breakdown) สูงกว่าแป้งกล้วยดิบ

2. ผลการศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัส

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่มีการทดแทนด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าที่ระดับต่างๆ ให้ผลแสดงดังตารางที่ 4 พบว่าผู้บริโภครับรู้ความชอบด้านสีลดลงตามระดับปริมาณแป้งกล้วยน้ำว้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เนื่องจากการใช้แป้งกล้วยน้ำว้าทดแทนแป้งมันสำปะหลังทำให้เส้นลอดช่องเปลี่ยนเป็นสีเหลืองคล้ำ และจะมีความเป็นสีเหลืองคล้ำเพิ่มขึ้นตามระดับปริมาณแป้งกล้วยที่ทดแทนในสูตร ส่งผลทำให้คะแนนความชอบด้านสีของผู้ทดสอบได้รับคะแนนลดลงตามลำดับ อย่างไรก็ตาม คุณภาพด้านกลิ่นพบว่าผู้บริโภครับรู้คะแนนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ในทุกระดับการทดแทน

ตารางที่ 4 คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเส้นลวดช่องสิงคโปรที่มีการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยน้ำว่าที่ระดับแตกต่างกัน

แป้งกล้วยที่ ทดแทน (g/100g)	สี	กลิ่น	ลักษณะ ปรากฏ	เนื้อสัมผัส	ความ ยืดหยุ่น	ความชอบ โดยรวม
0	7.07±1.55 ^a	5.67±1.79 ^a	5.87±1.83 ^{ab}	5.60±1.97 ^{bc}	5.27±2.01 ^b	6.20±1.97 ^{bc}
10	6.97±1.90 ^a	5.90±1.60 ^a	6.53±1.35 ^a	6.30±1.57 ^{ab}	6.47±1.27 ^a	6.93±1.23 ^a
20	6.20±1.51 ^b	5.93±1.68 ^a	6.30±1.31 ^{ab}	6.43±1.38 ^a	6.40±1.30 ^a	6.67±1.34 ^{ab}
30	5.47±1.83 ^{bc}	5.43±1.79 ^a	6.00±1.57 ^{ab}	5.80±1.54 ^{abc}	5.90±1.18 ^{ab}	6.23±0.89 ^{bc}
40	5.13±1.69 ^c	5.53±1.67 ^a	5.73±1.41 ^b	5.57±1.83 ^c	5.70±1.78 ^b	5.73±1.23 ^c

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เส้นลวดช่องสิงคโปรทดแทนด้วยแป้งกล้วยน้ำว่าที่ปริมาณร้อยละ 20 ได้รับคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสสูงสุด รองลงมาคือระดับร้อยละ 10 โดยได้รับคะแนนที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งได้รับคะแนนสูงกว่าเส้นลวดช่องสิงคโปรที่ทดแทนด้วยแป้งกล้วยน้ำว่าที่ระดับร้อยละ 30 40 และ 0 ทั้งนี้การทดแทนด้วยแป้งกล้วยน้ำว่าที่ระดับร้อยละ 30 และ 40 ได้รับคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญกับตัวอย่างสูตรควบคุม (ร้อยละ 0)

ส่วนความชอบโดยรวม พบว่าเส้นลวดช่องสิงคโปรที่ทดแทนด้วยแป้งกล้วยน้ำว่าที่ระดับร้อยละ 10 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนสูงสุดคือ 6.93±1.23 คะแนน รองลงมาคือระดับร้อยละ 20 ได้รับคะแนน 6.67±1.34 คะแนน ซึ่งได้รับคะแนนความชอบโดยรวมมากกว่าตัวอย่างควบคุม (6.20±1.97 คะแนน) อย่างไรก็ตาม การทดแทนด้วยแป้งกล้วยที่ระดับร้อยละ 20 ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) กับตัวอย่างที่ทดแทนด้วยแป้งกล้วยที่ระดับร้อยละ 10 นอกจากนี้ยังได้รับคะแนนด้านกลิ่นและลักษณะ

ปรากฏแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญกับตัวอย่างสูตรควบคุม ดังนั้น จึงเลือกเส้นลวดช่องสิงคโปรที่ทดแทนด้วยแป้งกล้วยน้ำว่าที่ระดับร้อยละ 20 นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเปรียบเทียบกับเส้นลวดช่องสิงคโปรสูตรควบคุม

3. ผลการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการ

จากการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์โดยการนำเส้นลวดช่องสิงคโปรที่มีการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยน้ำว่าที่ระดับร้อยละ 20 เปรียบเทียบกับเส้นลวดช่องสิงคโปรสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ จากตารางที่ 5 พบว่าการทดแทนด้วยแป้งกล้วยน้ำว่าที่ระดับร้อยละ 20 มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่า คือร้อยละ 0.35±0.02 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างสูตรควบคุม (ร้อยละ 0.16±0.01) ผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Wang *et al.* (2012) ที่ได้มีการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยในขนมแครกเกอร์ ซึ่งพบว่าปริมาณโปรตีนในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งกล้วยที่ทดแทน นอกจากนี้เส้นลวดช่องสิงคโปรที่ทดแทนด้วยแป้งกล้วยน้ำว่าที่ระดับร้อยละ 20 ยังมี

คาร์โบไฮเดรตต่ำกว่าตัวอย่างสูตรควบคุม($p<0.05$) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะ

ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้นมากกว่าตัวอย่างสูตรควบคุม

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นลอดช่องสิงคโปร์สูตรควบคุมและสูตรทดแทนด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าที่ระดับร้อยละ 20

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	สูตรควบคุม	แป้งกล้วย ร้อยละ 20
ความชื้น	70.4±0.185 ^a	71.81±0.63 ^a
เถ้า	0.24±0.04 ^b	0.39±0.00 ^a
โปรตีน	0.16±0.01 ^b	0.35±0.02 ^a
ไขมัน	0.07±0.03 ^a	0.06±0.04 ^a
เส้นใย	14.56±0.33 ^a	14.39±0.19 ^a
คาร์โบไฮเดรต	14.57±1.56 ^a	13.02±0.50 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

การทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าที่ระดับร้อยละ 20 ทำให้เส้นลอดช่องสิงคโปร์มีปริมาณ โปรตีนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างเส้นลอดช่องสิงคโปร์สูตรควบคุม ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang *et al.* (2012) ที่ศึกษาการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยในขนมขบเคี้ยว ซึ่งเมื่อทดแทนที่ระดับร้อยละ 20 ทำให้มีปริมาณโปรตีนสูงถึง 0.87 กรัม/100 กรัม เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม (0.12 กรัม/100กรัม) โดยทั่วไปแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไปมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 0.53 ในขณะที่แป้งกล้วยน้ำว้ามีปริมาณโปรตีนสูงกว่าคือร้อยละ 1.88 (Nimsung, 2007) ดังนั้น ปริมาณโปรตีนที่เพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์เส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่มีการทดแทนด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าที่ระดับร้อยละ 20 จึงเป็นผลมาจากปริมาณโปรตีนในแป้งกล้วยน้ำว้าที่มีมากกว่าในแป้งมันสำปะหลังนั่นเอง

สรุป

การศึกษาการใช้แป้งกล้วยน้ำว้าทดแทนแป้งมันสำปะหลังที่ระดับแตกต่างกันในเส้นลอดช่องสิงคโปร์ โดยวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและการทดสอบทางประสาทสัมผัสเพื่อเลือกสูตรที่เหมาะสม เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าสีของเส้นลอดช่องสิงคโปร์ พบว่าค่าความสว่าง (L^*) มีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับร้อยละที่ทดแทน นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าค่า hue angle และ ΔE มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งกล้วยในสูตรเส้นลอดช่องเพิ่มขึ้น สำหรับคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส พบว่าค่าความแน่นเนื้อและความเหนียวของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงเมื่อทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าในระดับที่เพิ่มขึ้น การทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสพบว่า การทดแทนที่ระดับร้อยละ 10 ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุด รองลงมาคือที่ระดับร้อยละ 20 อย่างไรก็ตาม การทดแทนในทั้งสองระดับนี้ได้รับคะแนนการยอมรับโดยรวมแตกต่างกัน

อย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p>0.05$) และให้คะแนนการยอมรับโดยรวมสูงกว่าตัวอย่างสูตรควบคุม นอกจากนี้การทดแทนด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าที่ระดับร้อยละ 20 ยังได้รับคะแนนด้านกลิ่นและลักษณะปรากฏที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ดังนั้น การทดแทนด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าที่ระดับร้อยละ 20 จึงได้รับการคัดเลือกเป็นสูตรที่มีการทดแทนด้วยระดับที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี เพื่อประเมินคุณภาพด้านคุณค่าทางโภชนาการ พบว่าการทดแทนด้วยแป้งกล้วยน้ำว้าที่ระดับร้อยละ 20 มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างสูตรควบคุม และยังมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตต่ำกว่าตัวอย่างสูตรควบคุม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ รวมถึงเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Abbas, F.M.A., Saifullah, R. and Azhar, M.E. 2013. Assessment of physical properties of ripe banana flour prepared from two varieties: Cavendish and Dream banana. **International Food Research Journal** 16: 183-189.
- Agama-Acevedo, E., Islas-Hernandez, J.J., Osorio-Díaz, P., Rendón-Villalobos, R., Utrilla-Coello, R.G., Angulo, O. and Bello-Pérez, L.A. 2009. Pasta with unripe banana flour: Physical, texture, and preference study. **Journal of Food Science** 74(6): 263-267.
- Agama-Acevedo, E., Islas-Hernández, J.J., Pacheco-Vargas, G., Osorio-Díaz, P. and Bello-Pérez, L.A. 2012. Starch digestibility and glycemic index of cookies partially substituted with unripe banana flour. **LWT - Food Science and Technology** 46(1): 177-82.
- Alvarenga, N., Taipina, M., Raposo, N., Dias, J., Carvalho, M.J., Amara, O., Santos, M.T., Silva, M.M. and Lidon, F.C. 2018. Development of biscuits with green banana flour irradiated by ^{60}Co : preservation in modified atmosphere packaging. **Emirates Journal of Food & Agriculture** 30(6): 496-502.
- AOAC. 2006. **Official Methods of Analysis**. 18th ed. Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, Maryland, U.S.A.
- Chong, L.C. and Noor Aziah, A.A. 2008. Influence of partial substitution of wheat flour with banana (*Musa paradisiaca* var. Awak) flour on the physico-chemical and sensory characteristics of doughnuts. **International Food Research Journal** 15: 119-124.
- Chumkaew, K. 2019. The effects of the amount of black sesame on quality of Singapore Cendol with black sesame seeds in skimmed milk. **Srinakharinwirot Science Journal** 35(1): 75-88. (in Thai)
- Dangsungwal, N., Siri Wong, N. and Riebroy, S. 2011. Use of banana flour substituted for wheat flour in brownie, pp 66-73. *In Proceedings of 49th Kasetsart University Annual Conference: Agricultural Extension and Home Economics.*

- Kasetsart University Press, Kasetsart University.
(in Thai)
- Falcomer, A.L., Riquette, R.F.R., Romão de Lima, B., Ginani, V.C. and Zandonadi, R.P. 2019. Health benefits of green banana consumption: A systematic review. **Nutrients** 11(6): 1222.
- Fida, R., Pramafisi, G. and Cahyana, Y. 2020. Application of banana starch and banana flour in various food product: A review. **Earth and Environmental Science** 443: 012057.
- Jaiturong, P., Laosirisathian, N., Sirithunyalug, B., Eitssayeam, S., Sirilun, S., Chaiyana, W., and Sirithunyalug, J. 2020. Physicochemical and prebiotic properties of resistant starch from *Musa sapientum* Linn., ABB group, cv. Kluai Namwa Luang. **Heliyon** 6: e05789.
- Kaur, K., Singh, G. and Singh, N. 2017. Development and evaluation of gluten free muffins utilizing green banana flour. **Bioved Journal** 28(2): 359-365.
- Lozal, A., Quispe, M., Villanueva1, J. and Peláe, P.P. 2017. Development of functional cookies with wheat flour, banana flour (*Musa paradisiaca*), sesame seeds (*Sesamum indicum*) and storage stability. **Scientia Agropecuaria** 8(4): 315-325.
- Mohamed, A., Xu, J. and Singh, M. 2010. Yeast leavened banana - bread: formulation, processing, colour and texture analysis. **Food Chemistry** 118(3): 620-626.
- Mota, R.V., Lajolo, F.M., Ciacco, C. and Cordenunsi, B.R. 2000. Composition and functional properties of banana flour from different varieties. **Starch/Stärke** 52: 63-68.
- Nimsung, P. 2007. Properties of raw banana flour and starch using for food industry. Master Thesis of Science (Food Science), Kasetsart University. (in Thai)
- Noor Aziah, A.A., Ho, L.H., Noor Shazliana, A.A. and Bhat, R. 2012. Quality evaluation of steamed wheat bread substituted with green banana flour. **International Food Research Journal** 19(3): 869-876.
- Ovando-Martinez, M., Sáyago-Ayerdi, S., Agama-Acevedo, E., Goñi, I. and Bello-Pérez, L.A. 2009. Unripe banana flour as an ingredient to increase the undigestible carbohydrates of pasta. **Food Chemistry** 113(1): 121-126.
- Pathare, P.B., Opara, L.U. and Al-Said, F. 2013. Colour measurement and analysis in fresh and processed food: A review. **Food and Bioprocess Technology** 6: 36-60.
- Ruangsa, S. and Santhalunai, P. 2020. The most suitable condition for stimulation of Kluai Nam Wa Khieo, *Musa* (ABB Group), ripening with plant leaves. **PSRU Journal of Science and Technology** 5(2): 72-87. (in Thai)
- Saeleaw, M. and Schleining, G. 2010. Effect of blending cassava starch, rice, waxy rice and wheat flour on physico-chemical properties of flour mixtures and mechanical and sound emission properties of cassava crackers. **Journal of Food Engineering** 100: 12-24.
- Saifullah, R., Abbas, F.M.A., Yeoh, S.Y. and Azhar, M.E. 2009. Utilization of green banana flour as a functional ingredient in yellow noodle. **International Food Research Journal** 16: 373-379.

- Seguchi, M., Tabara, A., Iseki, K., Takeuchi, M. and Nakamura, C. 2014. Development of gluten-free bread baked with banana (*Musa* spp.) flour. **Food Science and Technology Research** 20(3): 613-619.
- Subanmanee, N. 2020. Effect of soaking banana in various solutions and application of banana flour in madeleine cake. **Journal of Food Technology** 15(2): 110-121. (in Thai)
- Vatanasuchart, N., Niyomwit, B. and Narasri, W. 2012. Resistant starch, physicochemical and structural properties of bananas from different cultivars with an effect of ripening and processing. **Kasetsart Journal (Natural Science)** 46(3): 461-472.
- Wang, Y., Zhang, M. and Mujumdar, A.S. 2012. Influence of green banana flour substitution for cassava starch on the nutrition, color, texture and sensory quality in two types of snacks. **LWT - Food Science and Technology** 47: 175-182.
- Yu, A.H.M., Phoon, P.Y., Ng, G.C.F. and Henry, C.J. 2020. Physicochemical characteristics of green banana flour and its use in the development of konjac-green banana noodles. **Journal of Food Science** 85(10): 3026-3033.

ผลของการเคลือบเมล็ดด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพร่วมกับอนุพันธ์คูมาริน ต่อการดูดน้ำและการงอกของเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวาน

Effect of Seed Coating with Biopolymer and Coumarin Derivative on Water Uptake and Germination of Sweet Corn Seed

ณัฐกัญญา มหิษานนท์¹ พรศิริ เลียงสกุล¹ นงพงา จรัสโสภณ² อรวรรณ ชุนหาชาติ³
และ กนกวรรณ เทียงธรรม^{1*}

Natkanya Mahisanon¹, Ponsiri Liangsakul¹, Nongpanga Jarussophon², Orawan Chunhachart³
and Kanokwan Teingtham^{1*}

Received: 2 June 2021, Revised: 4 September 2021, Accepted: 19 November 2021

บทคัดย่อ

คุณสมบัติของสารเคลือบเมล็ดพอลิเมอร์ชีวภาพนอกจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว สารเคลือบต้องไม่มีผลต่อการงอกของเมล็ด การดูดน้ำของเมล็ดเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการงอก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการดูดน้ำของเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวานที่เคลือบเมล็ดด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพร่วมกับอนุพันธ์คูมารินที่มีคุณสมบัติเรืองแสง สามารถสร้างเอกลักษณ์ให้กับเมล็ดพันธุ์เพื่อป้องกันการผลิตเมล็ดพันธุ์ปลอมได้ โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) จำนวน 4 ซ้ำ ตั้งทดลอง 6 กรรมวิธี ได้แก่ 1) ไม่เคลือบเมล็ด 2) เคลือบเมล็ดด้วยพอลิ-แกมมา-กลูตามิกแอซิด (PGA) 3) เคลือบเมล็ดด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) 4) เคลือบเมล็ดด้วยพอลิเมอร์ทางการค้า (CSC) 5) เคลือบเมล็ดด้วย PGA ร่วมกับ CMC และอนุพันธ์คูมาริน (PGA+CMC+COU) และ 6) เคลือบเมล็ดด้วย CSC ร่วมกับ COU (CSC+COU) ผลการทดลองพบว่า ในช่วง 24 ชั่วโมงแรกหลังการดูดน้ำ เมล็ดที่ถูกเคลือบด้วย PGA, CMC และ PGA+CMC+COU มีการดูดน้ำ

¹ ภาควิชาพืชไร่ฯ คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

¹ Department of Agronomy, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

² โครงการจัดตั้งภาควิชาเคมี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

² Chemistry Division, Department of Science, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

³ สาขาจุลชีววิทยา ภาควิชาวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมชีวภาพ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

³ Division of Microbiology, Department of Science and Bioinnovation, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140 Thailand.

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

ไม่แตกต่างจากเมล็ดที่ไม่ถูกเคลือบ ในขณะที่เมล็ดที่เคลือบด้วย CSC และ CSC+COU มีการดูดน้ำสูงที่สุด แต่ที่ระยะ 66 ชั่วโมงหลังการดูดน้ำ ซึ่งเป็นระยะที่รากเริ่มแทงทะลุออกมาจากเปลือกหุ้มเมล็ด เมล็ดที่ไม่ถูกเคลือบมีการดูดน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือเมล็ดที่เคลือบด้วย PGA และ CMC ส่วนเมล็ดที่เคลือบด้วย CSC, PGA+CMC+COU และ CSC+COU มีการดูดน้ำต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม เมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวานที่ไม่ถูกเคลือบและเมล็ดพันธุ์ที่ถูกเคลือบทุกกรรมวิธี มีเปอร์เซ็นต์รากแรกเกิด เปอร์เซ็นต์ความงอก และน้ำหนักแห้งต้นกล้าไม่แตกต่างกัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สารเคลือบเมล็ดพันธุ์พอลิเมอร์ชีวภาพร่วมกับอนุพันธ์คูมารินสามารถใช้เคลือบเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวานได้ โดยไม่มีผลต่อการงอกของเมล็ด

คำสำคัญ: การดูดน้ำ, การเคลือบเมล็ดพันธุ์, พอลิ-แกมมา-กลูตามิกแอซิด, อนุพันธ์คูมาริน

ABSTRACT

A desired biopolymer composite for seed coating is eco-friendly without negative effect on seed germination. Seed imbibition is a critical process for successful germination. Therefore, an objective of this research was to investigate water uptake rates of sweet corn seed coated with composites of biopolymers and a new coumarin derivative which is fluorescent that could create seed identity to prevent counterfeit seed. The experiment was laid out in a completely randomized design (CRD) with four replications and six treatments of seed coating as follows: (1) uncoated seeds, (2) seeds coated with poly- γ -glutamic acid (PGA), (3) carboxymethyl cellulose (CMC), (4) commercial polymer (CSC), (5) PGA+CMC+coumarin (PAG+CMC+COU), and (6) CSC+COU. It was found that at the initial of imbibition of 24 hrs, water uptake rates of coated seeds with PGA, CMC and PGA+CMC+COU were not different from those of uncoated seeds while seeds coated with CSC and CSC+COU had the highest water uptake rate. At the imbibition of 66 hrs, when radicle is visible, uncoated seeds had the highest water uptake rate followed by seeds coated with PGA and CMC while seeds coated with CSC, PGA+CMC+COU and CSC+COU had the lowest water uptake rate. However, there were no differences in percentage of radicle emergence, germination and seedling dry weight of uncoated and coated sweet corn seeds with all treatments. The results indicated that the biopolymer and coumarin derivative can be used for seed coating of sweet corn seed and has no effect on seed germination.

Key words: water uptake, seed coating, poly-gamma-glutamic acid, coumarin

บทนำ

เทคโนโลยีการเคลือบเมล็ดด้วยฟิล์มบางๆ หรือพอลิเมอร์ถูกพัฒนาขึ้นและใช้กันอย่างแพร่หลาย ในอุตสาหกรรมเมล็ดพันธุ์ การเคลือบเมล็ดช่วยให้

สารเคมีป้องกันกำจัดโรคและแมลง หรือสารออกฤทธิ์อื่นๆ เช่น ธาตุอาหาร หรือฮอร์โมนพืชเกาะติดบนเปลือกหุ้มเมล็ดได้ดี ช่วยลดการสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพสารออกฤทธิ์ต่างๆ มากกว่าการคลุก

เมล็ด ทั้งนี้เมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวานเป็นเมล็ดพันธุ์ที่จำเป็นต้องมีการคลุมหรือเคลือบเมล็ดด้วยสารป้องกันกำจัดโรคและแมลง เนื่องจากเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวาน โดยเฉพาะสายพันธุ์ที่ควบคุมด้วยยีน *shrunken-2 (sh2)* มีความหวานสูง มักมีเชื้อราก่อโรคติดมากับเมล็ด ทำให้เมล็ดมีความแข็งแรง และอายุการเก็บรักษาต่ำ (Wilson and Mohan, 1998) นอกจากการเคลือบเมล็ดเพื่อป้องกันกำจัดโรคและแมลงแล้ว การเคลือบเมล็ดยังสามารถสร้างเอกลักษณ์เพื่อป้องกันการปลอมเมล็ดพันธุ์ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในธุรกิจเมล็ดพันธุ์ได้ (Phupamok, 2008) อย่างไรก็ตามการใช้สารเคมีทางการเกษตรส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม สารเคลือบเมล็ดที่ไม่มีผลตกค้างในดิน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นทางเลือกที่สอดคล้องกับการพัฒนาอย่างยั่งยืนในปัจจุบัน มีรายงานว่าคุณารินเป็นสารธรรมชาติที่พบในพืชทั่วไปมีคุณสมบัติเรืองแสงและสามารถยับยั้งเชื้อราที่ก่อโรคพืชได้ (Al-Amieri *et al.*, 2012; Montagner *et al.*, 2008) แต่มีรายงานผลทางลบของคุณารินต่อการงอกของเมล็ด โดยยับยั้งการงอกในเมล็ดข้าวสาลี (Abenavoli *et al.*, 2006) ทำให้เมล็ดข้าวงอกช้าลง (Chen *et al.*, 2019) อย่างไรก็ตาม ผลของคุณารินต่อการงอกและการเจริญเติบโตของต้นกล้าขึ้นขึ้นกับอนุพันธ์ของคุณาริน ทั้งนี้ Poonsawas (2019) ได้สังเคราะห์คุณาริน 4-Methyl-7-Stearoyl-2H-chromen-2-one และทดสอบผลของคุณารินที่สังเคราะห์ขึ้นโดยการเคลือบเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศร่วมกับพอลิเมอร์ชีวภาพ พอลิ-แกมมา-กลูตามิกแอซิด (PGA) ที่ได้จากแบคทีเรียแกรมบวกในสกุล *Bacillus* ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี (Shih and Van, 2001) และพบว่า คุณารินที่สังเคราะห์ไม่ส่งผลต่อความงอกและการเจริญเติบโตของต้นกล้ามะเขือเทศ การใช้ PGA ที่มีคุณสมบัติดูดความชื้นได้ดี เป็นพอลิเมอร์เคลือบเมล็ดอาจมีผลต่อการดูดน้ำของเมล็ด เมล็ดที่ดูดน้ำรวดเร็วเกินไปอาจ

ส่งผลทำให้การงอกลดลงได้ (Woodstock, 1988) Gorim and Asch (2017) รายงานว่าการเคลือบเมล็ดด้วยสารเคลือบ Freudenberger Feldsaaten GmbH ที่มีองค์ประกอบของสารเพิ่มการดูดน้ำ (hydro-absorber) ทำให้เมล็ดพืชดูดน้ำได้เร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ถูกเคลือบจากการตรวจวัดการดูดน้ำที่ระยะเวลา 30 ชั่วโมงหลังการดูดน้ำ ในขณะที่ Yildirim (2020) รายงานว่า การเคลือบเมล็ดด้วย เจลวุ้นทางจระเข้และกลีเซอรอล (propanetriol) มีผลทำให้อัตราการดูดน้ำ และความเร็วในการงอกของเมล็ดข้าวสาลิลดลง จากรายงานข้างต้นแสดงให้เห็นว่า สารที่ใช้เคลือบเมล็ดมีผลในการดูดน้ำของเมล็ดแตกต่างกัน ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเคลือบเมล็ดด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพและพอลิเมอร์ชีวภาพร่วมกับสารอนุพันธ์คุณารินเปรียบเทียบกับกรณีไม่เคลือบเมล็ด และการเคลือบเมล็ดด้วยพอลิเมอร์การค้า และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxymethyl cellulose, CMC) หรือพอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ ต่อการดูดน้ำของเมล็ดที่อาจส่งผลต่อความงอก และการเจริญเติบโตของต้นกล้าได้

วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองนี้ใช้เมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวานพันธุ์ SM1351 จากบริษัทผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวานจำกัด เป็นข้าวโพดหวาน ชนิด *sh2* วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) จำนวน 4 ซ้ำ กรรมวิธีในการเคลือบเมล็ด 6 กรรมวิธี ได้แก่ 1) ไม่เคลือบเมล็ด (ควบคุม) 2) เคลือบเมล็ดด้วยพอลิ-แกมมา-กลูตามิกแอซิด (PGA) 60% W/W 3) เคลือบเมล็ดด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC; Alfa Aesar, Great Britain) 60% W/W 4) เคลือบเมล็ดด้วยพอลิเมอร์ทางการค้า (CSC; Seedworx Flare 1, Centor Group) 60% W/W

5) เคลือบเมล็ดด้วยพอลิ-แกมมา-กลูตามิกแอซิด ร่วมกับโซเดียมคาร์บอเนตซีเมทิลเซลลูโลส และอนุพันธ์คูมาริน (PGA+CMC+COU) 30-60-10% W/W และ 6) เคลือบเมล็ดด้วยพอลิเมอร์ทางการค้า ร่วมกับอนุพันธ์คูมาริน (CSC+COU) 60-0.5% W/W โดยเคลือบเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวานด้วยสารเคลือบเมล็ดตามกรรมวิธีข้างต้นอัตรา 30 มิลลิลิตรต่อเมล็ดพันธุ์ 1 กิโลกรัม ด้วยเครื่องเคลือบเมล็ดพันธุ์แบบถังหมุน (rotary coating machine HR160) หลังจากนั้น นำเมล็ดพันธุ์ที่ผ่านการเคลือบตามกรรมวิธีต่างๆ มาลดความชื้นโดยใช้ตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เพื่อให้ความชื้นเมล็ดลดลงเหลือประมาณ 10% แล้วนำเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวานที่ผ่านการเคลือบ และไม่เคลือบ มาตรวจวัดอัตราการคุดน้ำ ที่ดัดแปลงตามวิธีการของ Kaewsorn *et al.* (2014) โดยนำเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวานแต่ละกรรมวิธี ละ 5 กรัม จำนวน 4 ซ้ำ บันทึกน้ำหนักเมล็ดพันธุ์เริ่มต้น จากนั้นนำเมล็ดพันธุ์ไปเพาะในกระถางเพาะความงอกที่แช่ด้วยน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใส่ในกล่องพลาสติกแล้วปิดฝา บันทึกน้ำหนักของเมล็ดที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 6 ชั่วโมง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยการนำเมล็ดออกมาแล้วชั่งน้ำด้วยกระต่ายที่บริเวณผิวเมล็ดให้แห้ง แล้วนำเมล็ดไปชั่งน้ำหนักทันที น้ำหนักของเมล็ดที่เพิ่มขึ้น คือ ปริมาณน้ำที่เมล็ดดูดเข้าไป เมื่อชั่งน้ำหนักเสร็จแล้วนำเมล็ดกลับไปแช่ต่อทันที แล้วคำนวณหาอัตราการคุดน้ำของเมล็ด (%) จากสูตร

$$W = \frac{(W_i - W_0) \times 100}{W_0}$$

โดย W = อัตราการคุดน้ำของเมล็ด
หลังจาก i ชั่วโมง (%),
 W_i = น้ำหนักเมล็ดหลังจากคุดน้ำ i
ชั่วโมง (กรัม),

W_0 = น้ำหนักเริ่มแรกของเมล็ด
ก่อนคุดน้ำ (กรัม) (Tian *et al.*, 2014)

ประเมินรากแรกเกิด โดยเฉพาะเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวานแต่ละกรรมวิธีด้วยกระต่ายเพาะแบบ between paper (BP) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซ้ำละ 50 เมล็ด จำนวน 4 ซ้ำ ตรวจนับเมล็ดที่มีรากแรกเกิดที่ 66 ชั่วโมงหลังเพาะ ตามวิธีของ ISTA (2020) ดัดแปลงตามวิธีการประเมินรากแรกเกิดของข้าวโพดไร่ โดยนับเฉพาะเมล็ดที่มีรากงอกอย่างน้อย 2 มิลลิเมตร ตรวจวัดความงอกมาตรฐาน (standard germination) โดยเฉพาะเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวานในทราย โดยสุมเมล็ดข้าวโพดหวาน ตัวอย่างละ 50 เมล็ด 4 ซ้ำ เพาะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วประเมินความงอกที่ 4 และ 7 วันหลังเพาะ ตามวิธีของ ISTA (2020) และตรวจวัดน้ำหนักแห้งต้นกล้า โดยอบตัวอย่างต้นกล้าปกติที่อายุ 7 วันหลังเพาะเมล็ดตามวิธีการเดียวกับการตรวจวัดความงอกมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักแห้งต้นกล้า จำนวนเป็นน้ำหนักแห้งต่อต้น (Daungpattara, 1986) และวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการคุดน้ำ เปอร์เซ็นต์รากแรกเกิด เปอร์เซ็นต์ความงอก และน้ำหนักแห้งต้นกล้า ตามแผนการทดลองแบบ CRD และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแต่ละลักษณะด้วยวิธี Duncan's Multiply Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ด้วยโปรแกรม Statistical Tool for Agricultural Research, STAR 2.0.1 (IRRI, 2018)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จาก Figure 1 แสดงอัตราการคุดน้ำของเมล็ดข้าวโพดหวานที่เคลือบด้วยกรรมวิธีต่างๆ 6 กรรมวิธีหลังการคุดน้ำทุกๆ 6 ชั่วโมงจนครบ 120 ชั่วโมง พบว่า การคุดน้ำของเมล็ดข้าวโพดหวานที่ถูก

เคลือบเมล็ดทุกกรรมวิธี สามารถแบ่งเป็น 3 ระยะตามรูปแบบการดูดน้ำที่ Marcus (1969) และ Chanprasert (1994) รายงาน ยกเว้นเมล็ดที่ไม่ถูกเคลือบ แสดงอัตราการดูดน้ำเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ โดยเมล็ดที่ถูกเคลือบทั้ง 5 กรรมวิธี มีการดูดน้ำของเมล็ดแบ่งเป็น 3 ระยะ โดยระยะแรกมีการดูดน้ำอย่างรวดเร็ว หรือเรียกว่าระยะดูดน้ำ (imbibition phase) ระยะที่ 2 เป็นระยะที่เกิดกระบวนการเมทาบอลิซึมต่างๆ เกิดขึ้นเรียกว่า ระยะงัน (lag phase) ความชันของกราฟหรืออัตราการดูดน้ำเริ่มลดลง และระยะที่ 3 เป็นระยะที่รากแทงทะลุผ่านเปลือกหุ้มเมล็ดออกมา หรือระยะการเจริญเติบโตของคัพภะ (embryo growth) ทำให้การดูดน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งเพราะมีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้ำมากขึ้น (Siri, 2009) โดยที่ระยะหลังดูดน้ำ 24 ชั่วโมง เมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวานที่เคลือบด้วย CSC และ CSC+COU มีอัตราการดูดน้ำสูงสุดและไม่แตกต่างกัน โดยมีอัตราการดูดน้ำ 101.86 และ 98.19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนเมล็ดที่ไม่เคลือบ และเมล็ดที่เคลือบด้วย PGA, CMC และ PGA+CMC+COU มีอัตราการดูดน้ำไม่แตกต่างกัน (82.59, 86.60, 89.74 และ 86.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) แต่ในระยะ

หลังดูดน้ำ 48 ชั่วโมงพบว่า เมล็ดที่เคลือบด้วย PGA+CMC+COU มีการดูดน้ำต่ำที่สุด (113.44 เปอร์เซ็นต์) แต่เมล็ดในกรรมวิธีอื่นๆ มีอัตราการดูดน้ำไม่แตกต่างกัน (118.34 - 124.74 เปอร์เซ็นต์) ทั้งนี้หลังการดูดน้ำที่ 72, 96 และ 120 ชั่วโมง พบว่า เมล็ดที่ไม่เคลือบมีการดูดน้ำสูงที่สุด ตามด้วยเมล็ดที่เคลือบด้วย PGA และ CMC ซึ่งมีการดูดน้ำไม่แตกต่างกัน ส่วนเมล็ดที่เคลือบด้วย CSC, PGA+CMC+COU และ CSC+COU มีการดูดน้ำต่ำที่สุด แต่ไม่แตกต่างกัน

จากผลการตรวจวัดเปอร์เซ็นต์รากแรกเกิด เปอร์เซ็นต์ความงอก และน้ำหนักแห้งต้นกล้า พบว่า เมล็ดข้าวโพดหวานที่ไม่ถูกเคลือบ และเมล็ดที่ถูกเคลือบทุกกรรมวิธีมีเปอร์เซ็นต์รากแรกเกิด เปอร์เซ็นต์ความงอก และน้ำหนักแห้งต้นกล้าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยที่ 66 ชั่วโมงหลังเพาะเมล็ด ข้าวโพดหวานมีรากแรกเกิด 87.00-91.00 เปอร์เซ็นต์ ความงอก 87.50 - 95.50 เปอร์เซ็นต์ และน้ำหนักแห้งต้นกล้า 1.91 - 2.22 เปอร์เซ็นต์ (Table 1 และ Figure 2)

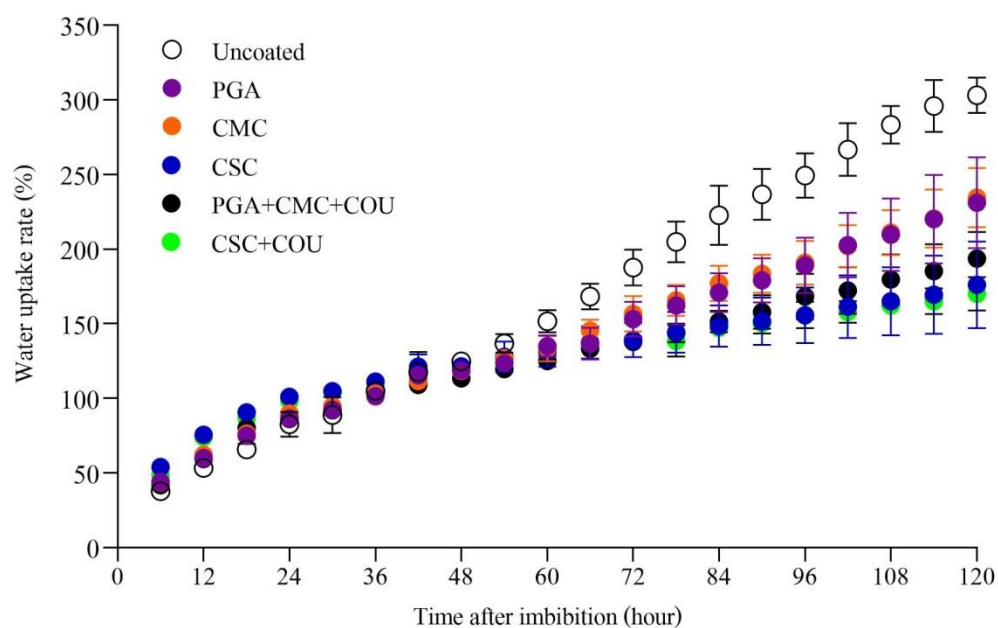


Figure 1 Imbibition of uncoated sweet corn seeds and coated with poly- γ -glutamic acid (PGA), carboxymethyl cellulose (CMC), commercial polymer (CSC), poly- γ -glutamic acid+carboxymethyl cellulose+Coumarin (PAG+CMC+COU) and commercial polymer+Coumarin (CSC+COU) at 0-120 hours after imbibition

Table 1 Radicle emergence (%), germination (%) and seedling dry weight (mg/plant) of sweet corn seed coated with six different coating treatments.

Seed coating		Radicle emergence (%)	Germination (%)	Seedling dry weight (mg/plant)
1	Control (uncoated)	87.00	87.50	1.91
2	PGA	91.00	91.00	1.94
3	CMC	88.00	91.00	2.22
4	CSC	90.00	90.00	2.00
5	PGA+CMC+COU	88.50	95.00	1.91
6	CSC+COU	90.00	95.50	2.01
F-test		ns ^{1/}	ns	ns
% CV		5.36	7.50	20.42

^{1/} ns = not significant

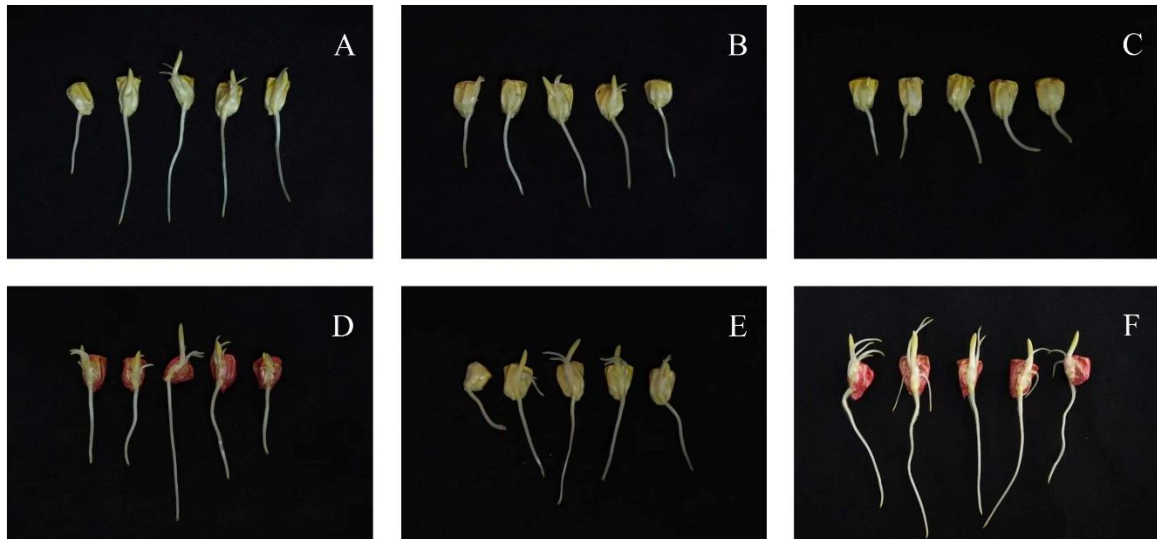


Figure 2 Radicle emergence of A) uncoated sweet corn seeds and coated seeds with B) poly- γ -glutamic acid (PGA), C) carboxymethyl cellulose (CMC), D) commercial polymer (CSC), E) poly- γ -glutamic acid+carboxymethyl cellulose+coumarin (PAG+CMC+COU) and F) commercial polymer+coumarin (CSC+COU) at 66 hours after imbibition.

ในระยะแรกของการดูดน้ำ เมล็ดจะดูดน้ำ โดยการแพร่ (diffusion) ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วในการดูดน้ำของเมล็ดเกี่ยวข้องกับค่าศักย์ของน้ำ (water potential) หรือสถานะทางพลังงานของน้ำ โดยน้ำจะเคลื่อนที่จากที่ที่มีค่าศักย์ของน้ำสูงไปต่ำ น้ำบริสุทธิ์จะมีค่าศักย์ของน้ำสูงที่สุดเท่ากับศูนย์ ส่วนค่าศักย์ของสารละลายจะมีค่าเป็นลบ ค่าศักย์ของน้ำรอบๆ เมล็ด และค่าศักย์ของน้ำภายในเซลล์เป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการดูดน้ำของเมล็ด นอกจากนี้ ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุเพาะกับเมล็ด หรือการยอมให้น้ำซึมผ่าน (permeability) ของเปลือกหุ้มเมล็ด ยังเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดน้ำของเมล็ดอีกด้วย (Chanprasert, 1994; Woodstock, 1988) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการดูดน้ำ หรือที่ระยะแรกของการดูดน้ำ (imbibition phase) เมล็ดที่ถูกเคลือบด้วย PGA, CMC และ PGA+CMC+COU มีความสามารถในการดูดน้ำไม่แตกต่างจากเมล็ดที่ไม่ถูกเคลือบ แสดงให้เห็นว่า การเคลือบเมล็ดไม่มีผลทำให้การดูด

น้ำลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเคลือบทุกกรรมวิธีมีคุณภาพสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ทั้ง PGA และ CMC (Shih and Van, 2001; Wan and Lee, 1974) ส่วนเมล็ดที่เคลือบด้วย CSC และ CSC+COU มีการดูดน้ำมากกว่าเมล็ดที่ไม่ได้เคลือบและเคลือบด้วยกรรมวิธีอื่นๆ ทั้งนี้ พอลิเมอร์ทางการค้า (CSC) อาจมีผลช่วยให้เมล็ดมีการดูดน้ำเพิ่มขึ้นในระยะแรก แต่เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 3 หรือที่ระยะ 66 ชั่วโมงหลังดูดน้ำ ซึ่งเป็นระยะที่รากเริ่มแทงทะลุออกมาจากเปลือกหุ้มเมล็ดหรือเปลือกผลในเมล็ดข้าวโพด จากผลการทดลองพบว่า เมล็ดที่ไม่ถูกเคลือบมีการดูดน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือเมล็ดที่เคลือบด้วย PGA และ CMC ส่วนเมล็ดที่เคลือบด้วย CSC, PGA+CMC+COU และ CSC+COU มีการดูดน้ำต่ำที่สุด ทั้งนี้ในระยะที่ 3 ของการงอกหรือระยะที่รากมีการแทงทะลุผ่านเปลือกหุ้มเมล็ดออกมา ความสามารถในการดูดน้ำของรากที่งอกออกมามีผลต่อการดูดน้ำในระยะนี้ นอกจากนี้ ค่าศักย์ของน้ำรอบๆ ราก ยังมีผลต่อการ

คุณน้ำของเซลล์ราก สารละลายรอบๆ รากของเมล็ดที่ไม่ถูกเคลือบย่อมมีค่าศักย์ของน้ำสูงกว่า เมล็ดที่ถูกเคลือบ จึงมีผลทำให้เมล็ดที่ไม่เคลือบมีการดูดน้ำที่ระยะที่ 3 สูงกว่าเมล็ดที่ถูกเคลือบทุกกรรมวิธี และเมื่อพิจารณาชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเคลือบพบว่า เมล็ดที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ธรรมชาติเพียงอย่างเดียว (PGA และ CMC) โดยไม่มีสารกুমารินเป็นส่วนประกอบมีอัตราการดูดน้ำสูงกว่า เมล็ดที่เคลือบด้วย CSC, PGA+CMC+COU และ CSC+COU ทั้งนี้มีรายงานว่า กุมารินมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของราก (Lee *et al.*, 2007) โดย Lupini *et al.* (2014) รายงานว่า กุมารินมีบทบาทสำคัญต่อกลไกการเคลื่อนย้ายออกซินในเมล็ด *Arabidopsis thaliana* โดยกুমาริน ที่ระดับความเข้มข้น 10^{-4} M ยับยั้งการยืดยาวของรากแรกเกิด (primary root) ลดจำนวนและความยาวของรากแขนง (lateral root) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า เมล็ดข้าวที่แช่ในสารละลายกুমารินมีความงอกลดลง โดยกুমารินมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มขึ้นของ ABA ในเมล็ดข้าวระหว่างการงอก โดยยับยั้งการแสดงออกของยีน *OsABA8'ox2/3* ในเอ็มบริโอข้าวระหว่างการงอก (Chen *et al.*, 2019) เมล็ดที่เคลือบด้วยสารเคลือบที่มีกুমารินเป็นองค์ประกอบในการทดลองครั้งนี้ มีการดูดน้ำต่ำกว่ากรรมวิธีการอื่นๆ อาจเป็นผลมาจากการเจริญเติบโตของรากที่อาจถูกยับยั้งด้วยกুমารินในระยะแรกของขบวนการงอก แต่อย่างไรก็ตามผลการยับยั้งการเจริญเติบโตของรากในการทดลองนี้แสดงไม่ชัดเจน หรืออาจมีผลยับยั้งเพียงเล็กน้อย เนื่องจากผลการประเมินเปอร์เซ็นต์รากแรกเกิดที่ 66 ชั่วโมงหลังเพาะ เพอร์เซ็นต์ความงอก และน้ำหนักแห้งต้นกล้าหลังเพาะ 7 วัน พบว่า เมล็ดข้าวโพดหวานที่ไม่ถูกเคลือบและเมล็ดที่ถูกเคลือบทุกกรรมวิธี มีเปอร์เซ็นต์รากแรกเกิด เพอร์เซ็นต์ความงอก และน้ำหนักแห้งต้นกล้าไม่แตกต่างกัน โดยใน Figure 2 แสดงให้เห็นว่าที่ระยะ 66 ชั่วโมง

หลังเพาะ การงอกของรากแรกเกิดในทุกกรรมวิธีไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเนื่องจากเมล็ดข้าวโพดหวานที่ใช้ในการทดลองมีความงอกและความแข็งแรงสูง ซึ่งสอดคล้องกับ Wilson and Geneve (2004) ที่ทดลองเคลือบเมล็ดข้าวโพดหวานชนิด *sh2* ที่มีความแข็งแรงสูงและต่ำ ด้วยสารป้องกันกำจัดเชื้อรา Apron FL + Captan 400 + Thiram 42S + Vitavax 34 และใช้พอลิเมอร์การค้า CelPass เปรียบเทียบกับการไม่เคลือบเมล็ด เคลือบเมล็ดด้วยพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียว และเคลือบเมล็ดด้วยสารป้องกันเชื้อราเพียงอย่างเดียว ผลการทดลองพบว่า พอลิเมอร์ไม่มีผลต่อการงอกและการดูดน้ำของเมล็ดทั้งในเมล็ดที่มีความแข็งแรงสูงและต่ำ แต่ในเมล็ดที่มีความแข็งแรงต่ำ สารป้องกันกำจัดเชื้อราไม่ผลต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้า แต่ไม่มีผลในเมล็ดที่มีความแข็งแรงสูง

สรุป

การเคลือบเมล็ดด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพร่วมกับอนุพันธ์กুমารินไม่มีผลต่อการดูดน้ำของเมล็ดในระยะแรก แต่มีผลทำให้การดูดน้ำช้ากว่าเมล็ดที่ไม่ได้เคลือบหลังจาก 66 ชั่วโมง แต่ไม่ส่งผลต่อการงอกของเมล็ด โดยเมล็ดที่ไม่ถูกเคลือบและถูกเคลือบทุกกรรมวิธีมีเปอร์เซ็นต์รากแรกเกิด เพอร์เซ็นต์ความงอก และน้ำหนักแห้งต้นกล้าไม่แตกต่างกัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสารประกอบพอลิเมอร์ชีวภาพร่วมกับอนุพันธ์กুমารินมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นสารเคลือบเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดหวานเพื่อป้องกันการปลอมเมล็ดพันธุ์ อย่างไรก็ตามการเคลือบเมล็ดพันธุ์อาจส่งผลให้อายุการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์สั้นลง ควรมีการศึกษาผลของการเคลือบเมล็ดพันธุ์ด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพร่วมกับอนุพันธ์กুমารินต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์ระหว่างการเก็บรักษาต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.ปิยะฉัตร ฬกามาศ ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องเคลือบเมล็ดพันธุ์ และขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้สนับสนุนงบประมาณเพื่อทำการวิจัย ประจำปี 2562 ภายใต้โครงการ “การพัฒนาสูตรสารเคลือบเมล็ดพันธุ์ด้วยพอลิเมอร์กับสารอนุพันธ์คูมารินบนผิวของเมล็ดพืช”

เอกสารอ้างอิง

- Abenavoli, M.R., Cacco, G., Sorgona, A., Marabottini, R., Paolacci, A.R., Ciaffì, M. and Badiani, M. 2006. The Inhibitory effects of coumarin on the germination of durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. *durum*, CV. SIMETO). **Journal of Chemical Ecology** 32: 488-506.
- Al-Amiery, A.A., Kadhum, A.A.H. and Mohamad, A.B. 2012. Antifungal activities of new coumarins. **Molecules** 17: 5713-5723.
- Chanprasert, W. 1994. **Seed Physiology**. Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Chen, B.X., Peng, Y.X., Gao, J.D., Zhang, Q., Liu, Q.J., Fu, H. and Liu, J. 2019. Coumarin-induced delay of rice seed germination is mediated by suppression of abscisic acid catabolism and reactive oxygen species production. **Frontiers in Plant Science** 10: 1-12.
- Daungpattara, J. 1986. **Seed Testing and Analysis**. Agri Book Group, Bangkok. (in Thai)
- Gorim, L. and Asch, F. 2017. Seed coating increases seed moisture uptake and restricts embryonic oxygen availability in germinating cereal seeds. **Biology** 6: 1-14.
- IRRI. 2018. **Statistical tool for agricultural research**. International Rice Research Institute, Manila, Philippines.
- ISTA. 2020. **International rules for seed testing**. Seed Science and Technology. The International Seed Testing Association, Bassersdorf, Switzerland.
- Kaewsorn, P., Boonyuen, P. and Chulaka, P. 2014. Preliminary study of physical characteristic and imbibition of some cucurbit seeds. **Agricultural Science Journal** 45: 549-552. (in Thai)
- Lee, H.K., Oh, S.R., Kwon, O.K., Ahn, K.S., Lee, J., Kim, J.C., Min, B.S. and Joung, H. 2007. Isolation of coumarins and ferulate from the roots of angelica *purpureaefolia* and the antitumor activity of khellactone. **Wiley Interscience** 21: 406-409.
- Lupini, A., Araniti, F., Sunseri, F. and Abenavoli, M.R. 2014. Coumarin interacts with auxin polar transport to modify root system architecture in *Arabidopsis thaliana*. **Plant Growth Regulation** 74: 23-31.
- Marcus, A. 1969. Kinetics of water uptake by seeds. **Symposia of the Society for Experimental Biology** 23: 143-160.
- Montagner, C., de Souza, S.M., Groposo, C., Delle Monache, F., Smânia, E.F. and Smânia, A. 2008. Antifungal activity of coumarins. **Zeitschrift für Naturforschung** 63: 21-28.

- Phupamok, B. 2008. Providing a quality assurance label for quality seed shops to improve seed industrial standard of Thailand. **Technologychaoban** 443: 70-71. (in Thai)
- Poonsawas, K. 2019. Investigation and development of seed coating from poly- γ -glutamic acid and coumarin derivative. Special problem. Bachelor of Science (Chemistry), Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus. (in Thai)
- Shih, I.L. and Van, Y.T. 2001. The production of poly- γ -glutamic acid) from microorganisms and its various applications. **Bioresource Technology** 79: 207-225.
- Siri, B. 2009. **Seed Science**. Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen. (in Thai)
- Tian, Y., Guan, B., Zhou, D., Yu, J., Li, G. and Lou, Y. 2014. Responses of seed germination, seedling growth, and seed yield traits to seed pretreatment in maize (*Zea mays* L.). **The Scientific World Journal** 2014: 834630.
- Wan, L.S.C. and Lee, P.F.S. 1974. CMC of polysorbates. **Journal of Pharmaceutical Sciences** 63: 136-137.
- Wilson, D.O. and Mohan, S.K. 1998. Unique seed quality problems of *sh2* sweet corn. **Seed Technology** 20: 176-186.
- Woodstock, L.W. 1988. Seed imbibition: A critical period for successful germination. **Journal of Seed Technology** 12: 1-15.
- Yildirim, M. 2020. Effects of coating treatment with aloe vera and glycerol on germination delay and seed viability of wheat under different water levels. **Journal of Agriculture and Nature** 23: 994-1004.

การทำนายอันตรกิริยาระหว่างสารพฤกษเคมีที่พบได้ในพืชท้องถิ่น กับโปรตีนที่สำคัญของ *Helicobacter pylori* ด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์

In silico Prediction of the Interaction between Phytochemicals in Local Plants and Crucial Proteins of *Helicobacter pylori*

มิตี เจียรพันธุ์* และ สักดิ์ชัย กรรमारังกูร

Miti Jearaphunt* and Sakchai Kanmarangkool

Received: 25 June 2021, Revised: 22 September 2021, Accepted: 14 October 2021

บทคัดย่อ

Helicobacter pylori แบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของโรคหลายชนิด ตั้งแต่การติดเชื้อในกระเพาะอาหารไปจนถึงมะเร็งในกระเพาะอาหาร วิธีการการติดเชื้อคือการใช้ยาปฏิชีวนะ แต่พบว่ามีเชื้อบางสายพันธุ์ที่สามารถต้านยาปฏิชีวนะได้ การมีข้อมูลของสารประกอบที่สามารถใช้พัฒนาเป็นยาปฏิชีวนะจึงมีความจำเป็นต่อการต้านเชื้อเหล่านั้น การศึกษาครั้งนี้เป็นการค้นหาสารพฤกษเคมีในพืชท้องถิ่นที่สามารถจับกับโปรตีนของ *H. pylori* คือ GyrA และ PBP2 โดยใช้เทคนิคโปรตีน-ลิแกนด์ docking ผลการศึกษาพบว่า จากสารพฤกษเคมีที่ทดสอบ 24 ชนิด quercetin และ panduratin A เป็นสารพฤกษเคมีที่จับกับโปรตีนทดสอบได้ดีที่สุดสองอันดับแรก สารทั้งสองจึงมีศักยภาพในการนำไปศึกษาและพัฒนาเพื่อใช้เป็นยาต่อไป

คำสำคัญ: *Helicobacter pylori*, สารพฤกษเคมี, โมเลกุลาร์ docking

ABSTRACT

Helicobacter pylori is a bacterium responsible for several diseases from infection in the stomach to stomach cancer. The treatment for the infection is to use antibiotics, but some antibiotic-resistant strains are found. Therefore, the information of compounds for the new antibiotic candidates against those bacterial strains is crucial. The current study aimed to screen the plausible candidates from phytochemicals found in local plants that could bind to *H. pylori* proteins: GyrA and PBP2. This was implemented by using protein–ligand docking technique. The results showed that out of 24 phytochemicals tested, quercetin and panduratin A were the topmost favorable ligands. Thus, these ligands have potential for drug development.

Key words: *Helicobacter pylori*, phytochemical, molecular docking

บทนำ

Helicobacter pylori เป็นแบคทีเรียแกรมลบ ที่เจริญได้ในระบบทางเดินอาหาร อาจนำไปสู่การเกิดโรคแผลในทางเดินอาหาร กระเพาะอาหารอักเสบ จนถึงความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งกระเพาะอาหาร (Tsay and Hsu, 2018) การกำจัดเชื้อ *H. pylori* นั้นใช้ยาปฏิชีวนะ เช่น levofloxacin และ amoxicillin (Chu *et al.*, 2020) ยาปฏิชีวนะ levofloxacin มีการออกฤทธิ์แบบ broad-spectrum สามารถยับยั้งได้ทั้งแบคทีเรียแกรมลบและแกรมบวก โดยเป็นตัวยับยั้งของเอนไซม์ DNA gyrase (Gyr) (Trespacios-Rangél *et al.*, 2016) ส่วน amoxicillin เป็นยาปฏิชีวนะที่มีการออกฤทธิ์แบบ moderate spectrum สามารถป้องกันการสร้างผนังเซลล์ส่วนเพปติโดไกลแคนจากการบล็อกโปรตีน penicillin binding proteins (PBP) (Mégraud and Lehours, 2007) ปัจจุบันพบการดื้อยา levofloxacin และ amoxicillin ของเชื้อ *H. pylori* (Chu *et al.*, 2020) การศึกษาเพื่อหาสารที่สามารถใช้ต่อยอดเป็นยาปฏิชีวนะทดแทนสารชนิดเดิมจึงมีความสำคัญ

สารพฤกษเคมีเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบในพืชผ่านการสกัดด้วยวิธีการต่างๆ และถูกใช้ในการรักษาโรคมานานเป็นเวลานาน การคัดเลือก

สารพฤกษเคมีที่เหมาะสมนั้นอาจใช้เทคนิคโมเลกุลาร์ด็อกกิงซึ่งเป็นเทคนิคการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (*In silico*) ที่ทดสอบความสามารถในการจับกันของลิแกนด์กับโปรตีน มีการใช้เทคนิคนี้เพื่อหาสารพฤกษเคมีสำหรับใช้ต่อยอดเป็นยาหลายชนิด เช่น ยาต้านไวรัส (Tahir ul Qamar *et al.*, 2020) และมาลาเรีย (Chaturvedi *et al.*, 2019) สำหรับการศึกษาเป็นการใช้เทคนิคโมเลกุลาร์ด็อกกิงทำนายการจับกันระหว่างสารพฤกษเคมีที่พบได้ในพืชท้องถิ่นกับโปรตีนในกระบวนการเมแทบอลิซึมของ *H. pylori* เพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับพัฒนาเป็นยารักษาโรคต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. โครงสร้างโปรตีนและลิแกนด์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดสอบอันตรกิริยาระหว่างโปรตีนจากเชื้อ *H. pylori* กับสารพฤกษเคมีต่างๆ นี้ โปรตีนที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ DNA gyrase A (GyrA) และ Penicillin-Binding Protein (PBP) เนื่องจากโปรตีน GyrA นี้ยังไม่มีโครงสร้างในฐานข้อมูล PDB โครงสร้างที่ใช้จึงได้จากการทำโมเดลเปรียบเทียบ (homology model) ซึ่งดาวน์โหลดได้จากเซิร์ฟเวอร์ของ SWISS-MODEL (<https://swissmodel.expasy.org/> SMR: P48370) (Waterhouse

et al., 2018; Bienert *et al.*, 2017) โครงสร้างโปรตีนของ PBP ที่มีในฐานข้อมูล Protein Data Bank เป็นโครงสร้างของ PBP2 (PDB ID: 5LP4) ซึ่งได้มาจากการเทคนิค X-RAY diffraction (Contreras-Martel *et al.*, 2017) โครงสร้าง 3 มิติของสารพฤษเคมีที่ใช้เป็นลิแกนด์ในการทดสอบทั้งหมด 24 ชนิด ซึ่งพบในสมุนไพรไทย ได้แก่ หอมแดง (Pan *et al.*, 2018) ข่า (Wu *et al.*, 2014) กระชาย (Kanjanasirirat *et al.*, 2020) กวางตุ้งดอก (Ragasa *et al.*, 2016) พริกขี้หนู (Rivera *et al.*, 2019) ขี้เหล็ก ใบบัวบก มะกรูด หม่อน (Siriamornpun *et al.*, 2014) ยอ (Siriamornpun *et al.*, 2014; Abou Assi *et al.*, 2017) ผักชี (Mandal and Mandal, 2015)

ขี้หว่า (Li and Jiang, 2004) ตะไคร้ (Brügger *et al.*, 2019) สะระแหน่ (Nair, 2007) โหระพา (Purkayastha and Nath, 2006) พริกไทย (Meghwal and Goswami, 2013) จิง (de Lima *et al.*, 2018) และ โครงสร้าง 3 มิติของลิแกนด์ควบคุม 3 ชนิด ได้แก่ levofloxacin ซึ่งเป็นตัวยับยั้งของเอนไซม์ GyrA (Trespacios-Rangél *et al.*, 2016) penicillin และ amoxicillin ที่สามารถยับยั้ง PBP (Mégraud and Lehours, 2007) ดาวน์โหลดจากฐานข้อมูล PubChem (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>) โดยมีข้อมูล PubChem CID ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สารพฤษเคมีที่ใช้เป็นลิแกนด์ในการทดสอบ

PubChem CID	สารพฤษเคมี	แหล่งที่พบ	ชื่อภาษาไทย
5280343	Quercetin	<i>Allium ascalonicum</i>	หอมแดง
2758	Eucalyptol	<i>Alpinia galangal</i>	ข่า
6483648	Panduratin A	<i>Boesenbergia rotunda</i>	กระชาย
5281654	Isorhamnetin	<i>Brassica rapa</i> var. <i>parachinensis</i>	กวางตุ้งดอก
689043	Caffeic acid	<i>Brassica rapa</i> var. <i>parachinensis</i>	กวางตุ้งดอก
1548943	Capsaicin	<i>Capsicum frutescens</i>	พริกขี้หนู
23217	1-heptadecene	<i>Cassia siamea</i>	ขี้เหล็ก
7362	Furfural	<i>Cassia siamea</i>	ขี้เหล็ก
12533	Octadecanal	<i>Centella asiatica</i>	ใบบัวบก
5280435	Phytol	<i>Citrus hystrix</i>	มะกรูด
638072	Squalene	<i>Citrus hystrix</i>	มะกรูด
6549	Linalool	<i>Coriandrum sativum</i>	ผักชี
5280443	Apigenin	<i>Coriandrum sativum</i>	ผักชี
7461	γ - terpinene	<i>Cuminum cyminum</i>	ขี้หว่า
7463	P-Cymene	<i>Cuminum cyminum</i>	ขี้หว่า
638011	Citral	<i>Cymbopogon citratus</i>	ตะไคร้
1254	Menthol	<i>Mentha piperita</i>	สะระแหน่
984	Palmitaldehyde	<i>Morinda citrifolia</i>	ยอ
998	Benzenacetaldehyde	<i>Morinda citrifolia</i>	ยอ
6293	Alizarin	<i>Morinda citrifolia</i>	ยอ

ตารางที่ 1 (ต่อ)

PubChem CID	สารพฤกษเคมี	แหล่งที่พบ	ชื่อภาษาไทย
8063	Pentanal	<i>Morus alba</i>	หม่อน
22311	Limonene	<i>Ocimum basilicum</i>	โหระพา
638024	Piperine	<i>Piper nigrum</i>	พริกไทย
442793	Gingerol	<i>Zingiber officinale</i>	ขิง
149096	Levofloxacin		- (ลิแกนด์ควบคุม)
2349	Penicillin		- (ลิแกนด์ควบคุม)
33613	Amoxicillin		- (ลิแกนด์ควบคุม)

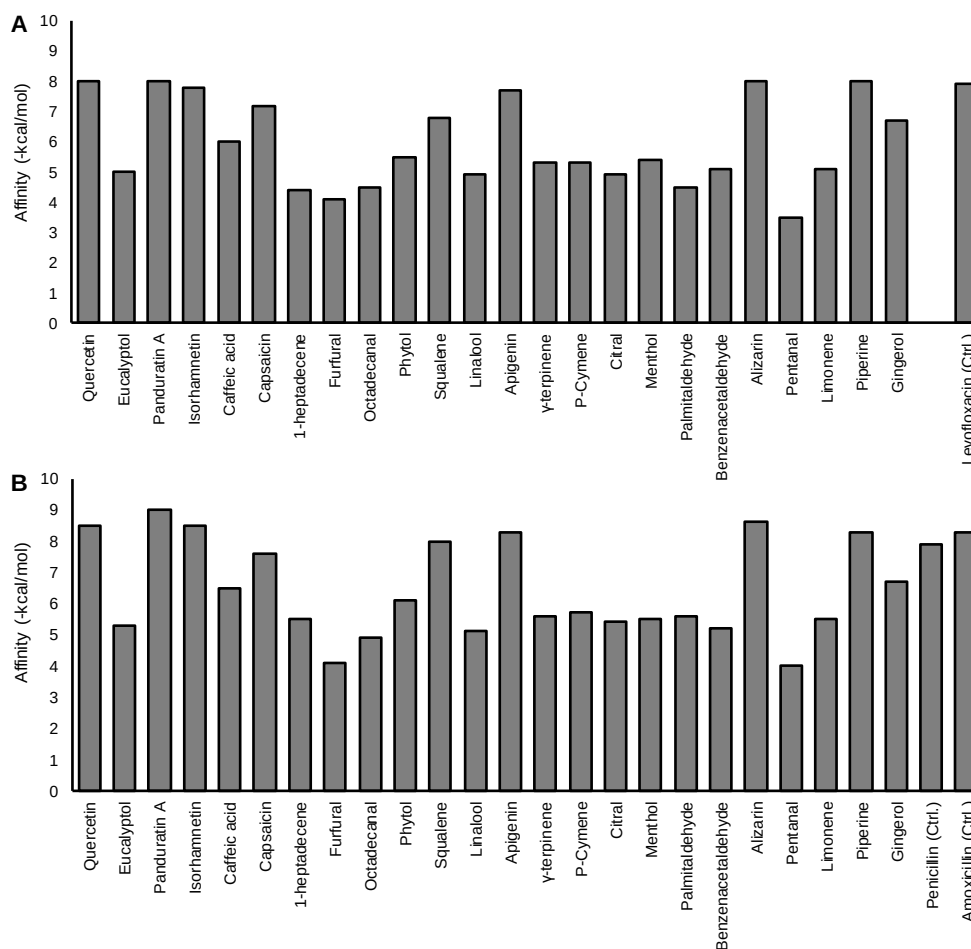
2. โมเลกุลาร์ด็อกกิงและการวิเคราะห์ผล

ทดสอบอันตรกิริยาระหว่างโปรตีน GyrA และ PBP กับลิแกนด์ด้วยวิธี blind docking แบบ flexible docking ด้วย CB-Dock ที่สามารถทำนาย binding site และขนาด cavity แล้วคัดด้วยอัลกอริทึมของ AutoDock Vina (Liu *et al.*, 2020) โดยอัปโหลดไฟล์ โปรตีนและลิแกนด์ผ่านเว็บเซิร์ฟเวอร์ (<http://clab.labshare.cn/cb-dock/php/index.php>) ใช้ parameter ที่ค่าเริ่มต้น คือ จำนวน cavities เท่ากับ 5 บันทึกและเปรียบเทียบค่าสัมพรรคภาพ (affinity) กับลิแกนด์ควบคุม คัดเลือก ลิแกนด์ที่มีค่า affinity ดีกว่าลิแกนด์ควบคุมและตรวจสอบ กรดอะมิโนที่มีอันตรกิริยากับลิแกนด์ด้วยภาพที่สร้าง โดย NGL Viewer (Rose *et al.*, 2018) ซึ่งเป็นอินเทอร์เฟซ ในหน้าแสดงผลของ CB-Dock

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

เมื่อทดสอบการจับกันระหว่าง GyrA กับ ลิแกนด์ทั้ง 24 ชนิด ด้วยวิธีโมเลกุลาร์ด็อกกิง ได้ค่า

affinity ระหว่าง -3.5 ถึง -8.0 kcal/mol (ภาพที่ 1A) พบว่า quercetin, alizarin, panduratin A และ piperine เป็น ลิแกนด์ที่มีค่า affinity ดีกว่า levofloxacin ที่เป็นลิแกนด์ ควบคุม โดยลิแกนด์ทั้งสี่มีค่า affinity เท่ากับ -8.0 kcal/mol ในขณะที่ levofloxacin มีค่า -7.9 kcal/mol สำหรับค่า affinity ของ PBP2 กับลิแกนด์ที่ทดสอบ พบว่าอยู่ ระหว่าง -4.0 ถึง -9.0 kcal/mol (ภาพที่ 1B) โดย panduratin A, alizarin, quercetin และ isorhamnetin มีค่า affinity อยู่ที่ -9.0, -8.6, -8.5 และ -8.5 kcal/mol ตามลำดับ ในขณะที่ penicillin มีค่า -7.9 kcal/mol และ amoxicillin -8.3 kcal/mol จากค่า affinity ข้างต้นจึงตรวจสอบ อันตรกิริยาระหว่าง quercetin, alizarin, panduratin A และ piperine กับกรดอะมิโนของ GyrA และตรวจสอบ อันตรกิริยาระหว่าง panduratin A, alizarin, quercetin และ isorhamnetin กับกรดอะมิโนของ PBP2 ต่อไป



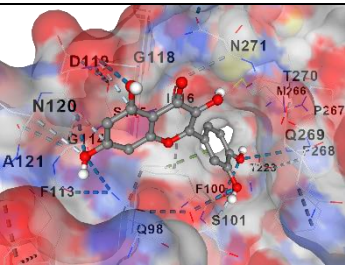
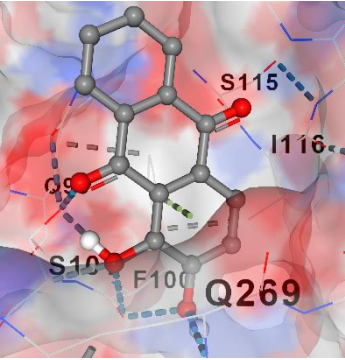
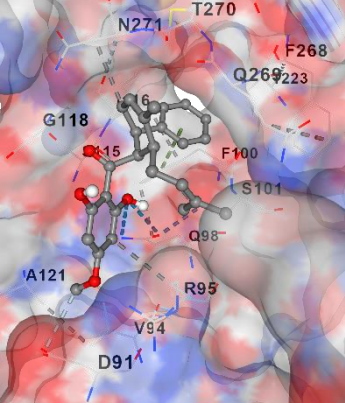
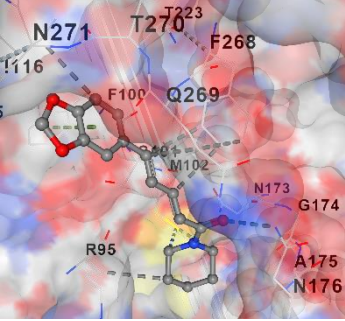
ภาพที่ 1 ค่า affinity ของการจับกับลิแกนด์ของ GyrA (A) และ PBP2 (B)

เมื่อตรวจสอบกรดอะมิโนของ GyrA ที่มีอันตรกิริยากับ quercetin, alizarin, panduratin A และ piperine จาก interactive 3D viewer พบว่า quercetin, alizarin และ panduratin A จับกับ GyrA บนเพปไทด์สาย A ในขณะที่ piperine จับกับเพปไทด์สาย B เช่นเดียวกับ levofloxacin ที่เป็นลิแกนด์ควบคุม (ตารางที่ 2)

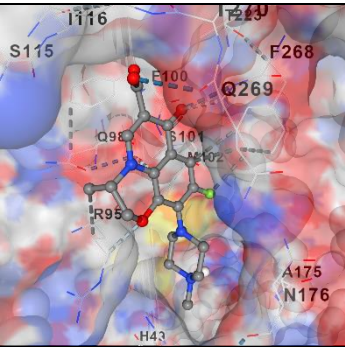
แรงที่ลิแกนด์ใช้จับกับโปรตีนมีทั้งแรงไฮโดรโฟบิก พันธะไฮโดรเจน และ π - π stacking แตกต่างไปตามชนิดของลิแกนด์ จำนวนพันธะไฮโดรเจนพบได้ตั้งแต่ 3-9 พันธะ โดยลิแกนด์ quercetin เกิดพันธะไฮโดรเจน 9 พันธะ กับกรดอะมิโน Gln98, Phe100, Ser101 (2 พันธะ), Gly118 (2 พันธะ), Asp119,

Asn120 และ Gln269 ส่วน alizarin เกิดพันธะไฮโดรเจน 6 พันธะ กับกรดอะมิโน Phe100 (2 พันธะ), Ser101 (3 พันธะ) และ Gln269 สำหรับ panduratin A เกิดพันธะไฮโดรเจน 3 พันธะที่กรดอะมิโน Asp91 และ Gln98 (2 พันธะ) ลิแกนด์ piperine ที่จับกับโปรตีนบนเพปไทด์สาย B พบว่ามีการจับด้วยพันธะไฮโดรเจน 3 พันธะ ที่กรดอะมิโน Met102 (2 พันธะ) และ Asn176 ส่วนลิแกนด์ควบคุม levofloxacin เกิดพันธะไฮโดรเจน 5 พันธะ กับกรดอะมิโน Arg95, Ser101 และ Gln269 (3 พันธะ) (ตารางที่ 2) นอกจากนี้ยังพบว่า piperine มีอันตรกิริยากับกรดอะมิโนที่มีอันตรกิริยากับ levofloxacin ทั้งหมด 3 อะมิโน ได้แก่ Arg95, Phe268 และ Gln269 (ตารางที่ 2 ตัวหนา)

ตารางที่ 2 Affinity, ภาพจำลอง 3D และกรดอะมิโนของ GyrA ที่มีอันตรกิริยากับลิแกนด์

ลิแกนด์	Affinity (kcal/mol)	ภาพจำลอง 3D	กรดอะมิโนของ GyrA ที่มีอันตรกิริยากับลิแกนด์	จำนวน พันธะ H
Quercetin	-8.0		(Chain A) <u>Hydrogen bond</u> Gln98, Phe100, Ser101, Gly118, Asp119, Asn120, Gln269 <u>Weak Hydrogen bond</u> Ser101, Gly118 <u>π-π stacking</u> Phe100	9
Alizarin	-8.0		(Chain A) <u>Hydrogen bond</u> Phe100 (x2), Ser101 (x2), Gln269 <u>Weak Hydrogen bond</u> Ser101 <u>π-π stacking</u> Phe100	6
Panduratin A	-8.0		(Chain A) <u>Hydrophobic contact</u> Arg95, Ile116, Asn271 <u>Hydrogen bond</u> Gln98 (x2) <u>Weak Hydrogen bond</u> Asp91 <u>π-π stacking</u> Phe100	3
Piperine	-8.0		(Chain B) <u>Hydrophobic contact</u> Arg95, Ile116, Phe268 (x2), Gln269 <u>Hydrogen bond</u> Asn176 <u>Weak Hydrogen bond</u> Met102 (x2) <u>π-π stacking</u> Phe100	3

ตารางที่ 2 (ต่อ)

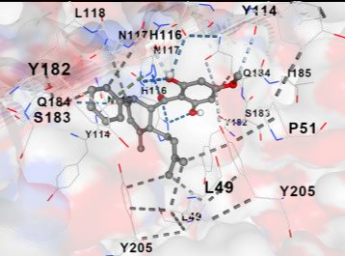
ลิแกนด์	Affinity (kcal/mol)	ภาพจำลอง 3D	กรดอะมิโนของ GyrA ที่มีอันตรกิริยากับลิแกนด์	จำนวน พันธะ H
Levofloxacin (Ctrl.)	-7.9		(Chain B) Hydrophobic contact Arg95, Phe268 (x2), Gln269 Hydrogen bond Gln269 (x2) Weak Hydrogen bond Arg95, Ser101, Gln269	5

สำหรับลิแกนด์ที่มีอันตรกิริยากับ PBP2 นั้นพบว่าทั้ง panduratin A, quercetin และ isorhamnetin มีอันตรกิริยากับเพปไทด์ทั้งสองสายเช่นเดียวกับลิแกนด์ควบคุม ส่วน alizarin มีอันตรกิริยากับเพปไทด์สาย A เพียงสายเดียว จากการวิเคราะห์พบพันธะไฮโดรเจนตั้งแต่ 2 - 9 พันธะ โดยอันตรกิริยาระหว่าง panduratin A กับ PBP2 มีพันธะไฮโดรเจนมากที่สุดคือ 9 พันธะที่กรดอะมิโน His116 (2 พันธะ) และ Asn117 บนเพปไทด์สาย A Leu113, Asn115, His116 (2 พันธะ), Gln184 และ Tyr205 บนเพปไทด์สาย B ลิ

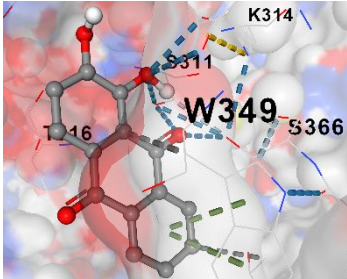
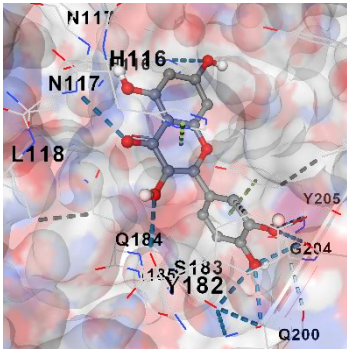
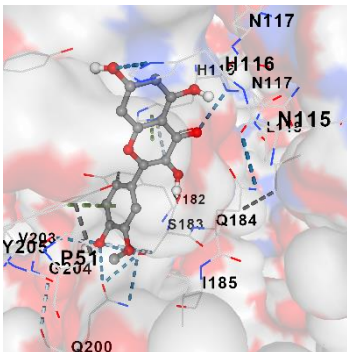
แกนด์ alizarin, quercetin และ isorhamnetin จับกับ PBP2 ด้วยพันธะไฮโดรเจน 5, 8 และ 8 พันธะตามลำดับ (ตารางที่ 3)

เมื่อพิจารณากรดอะมิโนที่มีอันตรกิริยากับลิแกนด์พบว่า panduratin A ที่มีค่า affinity น้อยที่สุดมีกรดอะมิโนที่เกิดอันตรกิริยาในรูปแบบและตำแหน่งเดียวกับ penicillin (ตัวหนา) และ amoxicillin (ตัวเอียง) ทั้งหมด 3 อะมิโน ได้แก่ Tyr205, His116 และ Gln184

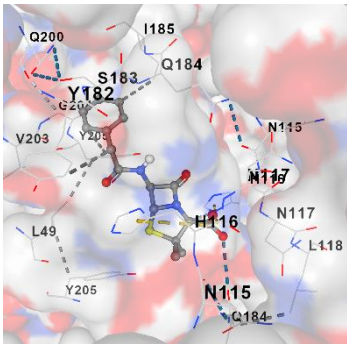
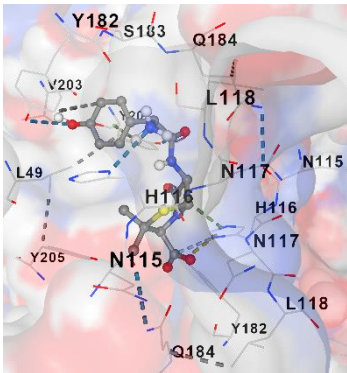
ตารางที่ 3 Affinity, ภาพจำลอง 3D และกรดอะมิโนของ PBP2 ที่มีอันตรกิริยากับลิแกนด์

ลิแกนด์	Affinity (kcal/mol)	ภาพจำลอง 3D	กรดอะมิโนของ PBP2 ที่มีอันตรกิริยากับลิแกนด์	จำนวน พันธะ H
Panduratin A	-9.0		(Chain A) Hydrophobic contact Leu49, Gln184, Tyr205 Hydrogen bond His116 (x2), Asn117 (Chain B) Hydrophobic contact Leu49, <i>His116</i> , Asn117, Gln184, Tyr205 Hydrogen bond Asn115, <i>His116</i> Weak Hydrogen bond Leu113,	9

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ลิแกนด์	Affinity (kcal/mol)	ภาพจำลอง 3D	กรดอะมิโนของ PBP2 ที่มีอันตรกิริยากับลิแกนด์	จำนวน พันธะ H
Alizarin	-8.6		His116, Gln184, Tyr205 π - π stacking His116 (Chain A) Hydrophobic contact Trp349, Thr498 Hydrogen bond Ser311 (x2), Ser366, Asp368 (x2) π - π stacking Trp349 (x2)	5
Quercetin	-8.5		Hydrogen bond Asn117 π - π stacking His116 (Chain B) Hydrophobic contact Tyr182 Hydrogen bond His116, Tyr182 (x2), Ser183, Gln200, Val203 (x2) π - π stacking Tyr205	8
Isorhamnetin	-8.5		Hydrogen bond Asn117 Weak Hydrogen bond His116 π - π stacking His116 (Chain B) Hydrophobic contact Tyr182 Hydrogen bond His116, Ser183, Gln200, Val203 Weak Hydrogen bond Ser183 (x2) π - π stacking Tyr205	8

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ลิแกนด์	Affinity (kcal/mol)	ภาพจำลอง 3D	กรดอะมิโนของ PBP2 ที่มีอันตรกิริยากับลิแกนด์	จำนวน พันธะ H
Penicillin (Ctrl.)	-7.9		(Chain A) Hydrophobic contact Tyr182, Ile185, Tyr205 Weak Hydrogen bond His116 Ionic Interaction His116 (Chain B) Hydrogen bond Gln184 Ionic Interaction His116	2
Amoxicillin (Ctrl.)	-8.3		(Chain A) Hydrophobic contact Tyr182 Hydrogen bond Tyr182, Tyr205 Weak Hydrogen bond His116 π - π stacking His116, Tyr205 Ionic Interaction His116 (Chain B) Hydrogen bond His116	4

จากผลการทดลองข้างต้นซึ่งใช้เทคนิคโมเลกุลาร์ docking ระหว่างโปรตีนเป้าหมายกับสารพฤษเคมีจากสมุนไพรทั้งหมด 24 ชนิด พบว่ามี 5 ชนิด ได้แก่ quercetin, panduratin A, alizarin, isorhamnetin และ piperine ที่สามารถจับกับโปรตีนเป้าหมายได้ใกล้เคียงหรือดีกว่าลิแกนด์ควบคุมซึ่งเป็นยาปฏิชีวนะ สารพฤษเคมีที่จับได้ทั้ง GyrA และ PBP2 แล้วเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างลิแกนด์กับกรดอะมิโนได้ดี 2 อันดับแรก คือ quercetin และ panduratin A แม้ว่าจากการศึกษาจะเห็นได้ว่าพบ ionic interaction ระหว่างลิแกนด์ควบคุมทั้ง penicillin และ amoxicillin ที่ตำแหน่ง His116 ของ PBP2 ก็ตาม แต่ค่า affinity

ของ quercetin และ panduratin A ยังคงต่ำกว่า penicillin และ amoxicillin อาจมีสาเหตุจากอันตรกิริยาที่ตำแหน่งอื่นสามารถจับได้ดีกว่าลิแกนด์ควบคุม เมื่อ quercetin จับกับ GyrA เกิดพันธะไฮโดรเจน 9 พันธะ และเมื่อจับ PBP2 เกิดพันธะไฮโดรเจน 8 พันธะ ซึ่งว่า quercetin มีศักยภาพในการจับกับทั้ง GyrA และ PBP2 และยับยั้งเชื้อ *H. pylori* ได้ quercetin เป็นสารกลุ่มฟิโอฟินอลที่พบได้ในพืช เช่น *A. ascalonicum* หรือหอมแดง (Pan *et al.*, 2018) ความสามารถของ quercetin มีทั้งฤทธิ์ด้านการอักเสบ ด้านไวรัส และมีส่วนช่วยในระบบภูมิคุ้มกัน (Li *et al.*, 2016) นอกจากความสามารถในการจับ GyrA ของ *H. pylori* แล้ว ยังพบว่า quercetin

สามารถจับกับ gyrase B ของ *Escherichia coli* (Plaper et al., 2003) สามารถยับยั้ง *H. pylori* ผ่านกระบวนการ membrane disruption ยับยั้งเอนไซม์ในกระบวนการสร้างกรดไขมันของเชื้อ (Baker, 2020) และจับกับ HsrA ที่เป็นแอกทิเวเตอร์ในกระบวนการถอดรหัส (González et al., 2019) สำหรับ panduratin A เมื่อจับกับ GyrA เกิดพันธะไฮโดรเจน 3 พันธะ เมื่อจับกับ PBP2 เกิดพันธะไฮโดรเจน 9 พันธะ และมีการเกิดอันตรกิริยากับกรดอะมิโนเดียวกันกับตำแหน่งที่ยาปฏิชีวนะซึ่งเป็นลิแกนด์ควบคุมจับได้รวม 3 อะมิโน และเป็นลิแกนด์ที่มีค่า affinity ดีที่สุดในลิแกนด์ที่ทดสอบ จึงเป็นลิแกนด์ที่มีศักยภาพในการจับกับโปรตีนทั้งสองชนิดและยับยั้งเชื้อ *H. pylori* ได้ panduratin A เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบในไรโซมของ *B. rotunda* หรือกระชาย (Kanjanasirirat et al., 2020) มีการศึกษาชี้ว่า panduratin A มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ *Staphylococcus aureus* (Rukayadi et al., 2009) ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ช่องปาก และมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อกลุ่ม *Enterococci* ที่พบในลำไส้ (Eng-Chong et al., 2012) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาพบว่าสารสกัดจาก *B. rotunda* ช่วยลดการอักเสบและยับยั้งเชื้อ *H. pylori* ได้ (Rosdianto et al., 2020; Bhamarapravati et al., 2006) ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถของ panduratin A ในการจับกับโปรตีนที่สำคัญของ *H. pylori* ชี้ว่า panduratin A เป็นสารที่มีศักยภาพในการยับยั้ง *H. pylori* ได้ และ quercetin และ panduratin A อาจเป็นลิแกนด์ที่สามารถใช้ต่อ ยอดเพื่อยับยั้งเชื้อ *H. pylori* สายพันธุ์ดื้อยา โดยอาจยืนยันผลด้วยเทคนิค molecular dynamics simulation ก่อนการทดสอบในห้องปฏิบัติการและในสัตว์ทดลอง

นอกจาก quercetin และ panduratin A แล้ว สารพฤษเคมีที่น่าสนใจอีกชนิดคือ alizarin ที่จับกับ PBP2 ได้ดีแม้จะจับในตำแหน่งที่ต่างกับลิแกนด์ควบคุม หากการกลายพันธุ์ของ *H. pylori* สายพันธุ์

ดื้อยาเกิดในตำแหน่งที่เกิดอันตรกิริยากับยาปฏิชีวนะ การใช้ลิแกนด์ที่จับในตำแหน่งอื่นอาจช่วยยับยั้งเชื้อแทนยาปฏิชีวนะเดิมได้ alizarin จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการศึกษาในห้องปฏิบัติการต่อไป

สรุป

- About Assi, R., Darwis, Y., Abdulbaqi, I.M., Khan, A.A., Vuanghao, L. and Laghari, M.H. 2017. *Morinda citrifolia* (Noni): A Comprehensive Review on Its Industrial Uses, Pharmacological Activities, and Clinical Trials. **Arabian Journal of Chemistry** 10(5): 691-707.
- Baker, D.A. 2020. Plants against *Helicobacter pylori* to Combat Resistance: An Ethnopharmacological Review. **Biotechnology Reports** 26: e00470.
- Bhamarapravati, S., Juthaprueth, S., Mahachai, W. and Mahady, G. 2006. Antibacterial Activity of *Boesenbergia rotunda* (L.) Mansf. and *Myristica fragrans* Houtt. against *Helicobacter pylori*. **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 28(Suppl.1): 157-63.
- Bienert, S., Waterhouse, A., De Beer, T.A.P., Tauriello, G., Studer, G., Bordoli, L. and Schwede, T. 2017. The SWISS-MODEL Repository-New Features and Functionality. **Nucleic Acids Research** 45(D1): D313-19.
- Brügger, B.P., Martínez, L.C., Plata-Rueda, A., Castro, B.M. de C.e., Soares, M.A., Wilcken, C.F., Carvalho, A. G., Serrão, J.E. and Zanuncio, J.C. 2019. Bioactivity of the *Cymbopogon citratus* (Poaceae) Essential Oil and Its Terpenoid Constituents on the Predatory Bug, *Podisus nigrispinus* (Heteroptera: Pentatomidae). **Scientific Reports** 9(1): 1-8.

- Chaturvedi, P., Raina, V., Solanki, P.S. and Saxena, V.L. 2019. In Silico Prediction of Anti-Plasmodial Activity of Spices: Targeting Malarial Proteases. **Journal of Clinical and Diagnostic Research** 13(8): KC01- KC06.
- Chu, A., Wang, D., Guo, Q., Lv, Z., Yuan, Y. and Gong, Y. 2020. Molecular Detection of *H. pylori* Antibiotic-resistant Genes and Molecular Docking Analysis. **The FASEB Journal** 34(1): 610-18.
- Contreras-Martel, C., Martins, A., Ecobichon, C., Trindade, D.M., Matteï, P.J., Hicham, S., Hardouin, P., Ghachi, M. El, Boneca, I.G. and Dessen, A. 2017. Molecular Architecture of the PBP2-MreC Core Bacterial Cell Wall Synthesis Complex. **Nature Communications** 8(776): doi: 10.1038/s41467-017-00783-2.
- de Lima, R.M.T., dos Reis, A.C., de Menezes, A.A.P.M., Santos, J.V. de O., Filho, J.W.G.d.O., Ferreira, J.R.d.O., de Alencar, M.V.O.B., da Mata, A.M. O.F., Khan, I.N., Islam, A., Uddin, S.J., Ali, E.S., Islam, M.T., Tripathi, S., Mishra, S.K., Mubarak, M.S. and Melo-Cavalcante, A.A.d.C. 2018. Protective and Therapeutic Potential of Ginger (*Zingiber Officinale*) Extract and [6]-Gingerol in Cancer: A Comprehensive Review. **Phytotherapy Research** 32(10): 1885-1907.
- Eng-Chong, T., Yean-Kee, L., Chin-Fei, C., Choon-Han, H., Sher-Ming, W., Li-Ping, C.T., Gen-Teck, F., Khalid, N., Abd Rahman, N., Karsani, S.A., Othman, S., Othman, R. and Yusof, R. 2012. *Boesenbergia rotunda*: From Ethnomedicine to Drug Discovery. **Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine** 2012: doi: 10.1155/2012/473637.
- González, A., Salillas, S., Velázquez-Campoy, A., Espinosa Angarica, V., Fillat, M.F., Sancho, J. and Lanas, Á. 2019. Identifying Potential Novel Drugs against *Helicobacter pylori* by Targeting the Essential Response Regulator HsrA. **Scientific Reports** 9(1): 1-13.
- Kanjanasirirat, P., Suksatu, A., Manopwisedjaroen, S., Munyoo, B., Tuchinda, P., Jearawuttanakul, K., Seemakhan, S., Charoensutthivarakul, S., Wongtrakoongate, P., Rangkasene, N., Pitiporn, S., Waranuch, N., Chabang, N., Khemawoot, P., Sa-ngiamsuntorn, K., Pewklang, Y., Thongsri, P., Chutipongtanate, S., Hongeng, S., Borwompinyo, S. and Thitithanyanont, A. 2020. High-Content Screening of Thai Medicinal Plants Reveals *Boesenbergia Rotunda* Extract and Its Component Panduratin A as Anti-SARS-CoV-2 Agents. **Scientific Reports** 10(1): 1-12.
- Li, R. and Jiang, Z.T. 2004. Chemical Composition of the Essential Oil of *Cuminum cyminum* L. from China. **Flavour and Fragrance Journal** 19(4): 311-313.
- Li, Y., Yao, J., Han, C., Yang, J., Chaudhry, M.T., Wang, S., Liu, H. and Yin, Y. 2016. Quercetin, Inflammation and Immunity. **Nutrients** 8(3): doi: 10.3390/nu8030167.
- Liu, Y., Grimm, M., Dai, W.t., Hou, M. chun, Xiao, Z.X. and Cao, Y. 2020. CB-Dock: A Web Server for Cavity Detection-Guided Protein-Ligand Blind Docking. **Acta Pharmacologica Sinica** 41(1): 138-144.

- Mandal, S. and Mandal, M. 2015. Coriander (*Coriandrum sativum* L.) Essential Oil: Chemistry and Biological Activity. **Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine** 5(6): 421-428.
- Meghwal, M. and Goswami, T.K. 2013. *Piper nigrum* and Piperine: An Update. **Phytotherapy Research** 27(8): 1121-1130.
- Mégraud, F. and Lehours, P. 2007. *Helicobacter pylori* Detection and Antimicrobial Susceptibility Testing. **Clinical Microbiology Reviews** 20(2): 280-322.
- Nair, B. 2007. Final Report on the Safety Assessment of *Capsicum annuum* Extract, *Capsicum annuum* Fruit Extract, *Capsicum annuum* Resin, *Capsicum annuum* Fruit Powder, *Capsicum frutescens* Fruit, *Capsicum frutescens* Fruit Extract, *Capsicum frutescens* Resin, and Capsaicin. **International Journal of Toxicology** 26(SUPPL. 1): 3-106.
- Pan, Y., Zheng, Y.M. and Ho, W.S. 2018. Effect of Quercetin Glucosides from Allium Extracts on HepG2, PC-3 AND HT-29 Cancer Cell Lines. **Oncology Letters** 15(4): 4657-4661.
- Plaper, A., Golob, M., Hafner, I., Oblak, M., Šolmajer, T. and Jerala, R. 2003. Characterization of Quercetin Binding Site on DNA Gyrase. **Biochemical and Biophysical Research Communications** 306(2): 530-36.
- Purkayastha, J. and Nath, S.C. 2006. Composition of the Camphor-Rich Essential Oil of *Ocimum basilicum* L. Native to Northeast India. **Journal of Essential Oil Research** 18(3): 332-334.
- Ragasa, C.Y., Guardamano, J.D., Tan, M.C.S. and Shen, C.C. 2016. Chemical Constituents of *Brassica rapa Chinensis* L. and *Brassica rapa* Var. *Parachinensis* (Baily) Hanelt. **International Journal of Current Pharmaceutical Review and Research** 7(5): 316-318.
- Rivera, M.L.C., Hassimotto, N.M.A., Bueris, V., Sircili, M.P., Almeida, F.A. and Pinto, U.M. 2019. Effect of *Capsicum frutescens* Extract, Capsaicin, and Luteolin on Quorum Sensing Regulated Phenotypes. **Journal of Food Science** 84(6): 1477-1486.
- Rosdianto, A.M., Puspitasari, I.M., Lesmana, R. and Levita, J. 2020. Bioactive Compounds of *Boesenbergia* sp. and Their Anti-Inflammatory Mechanism: A Review. **Journal of Applied Pharmaceutical Science** 10(7): 116-126.
- Rose, A.S., Bradley, A.R., Valasatava, Y., Duarte, J.M., Prlić, A. and Rose, P.W. 2018. NGL Viewer: Web-Based Molecular Graphics for Large Complexes. **Bioinformatics** 34(21): 3755-3758.
- Rukayadi, Y., Lee, K., Han, S., Yong, D. and Hwang, J.K. 2009. In Vitro Activities of Panduratin A against Clinical *Staphylococcus* Strains. **Antimicrobial Agents and Chemotherapy** 53(10): 4529-4532.
- Siriamornpun, S., Sriket, C. and Sriket, P. 2014. Phytochemicals of Thai Local Edible Herbs. **International Food Research Journal** 21(3): 1045-1052.
- Tahir ul Qamar, M., Alqahtani, S.M., Alamri, M. and Chen, L.L. 2020. Structural Basis of SARS-CoV-2 3CLpro and Anti-COVID-19 Drug Discovery from Medicinal Plants.

- Journal of Pharmaceutical Analysis** 10(4): 313-319.
- Trespalcios-Rangél, A.A., Otero, W., Arévalo-Galvis, A., Poutou-Piñales, R.A., Rimbara, E. and Graham, D.Y. 2016. Surveillance of Levofloxacin Resistance in *Helicobacter pylori* Isolates in Bogotá-Colombia (2009-2014) edited by M. Galdiero. **PLOS ONE** 11(7): e0160007.
- Tsay, F.W. and Hsu, P.I. 2018. *H. pylori* Infection and Extra-Gastrointestinal Diseases. **Journal of Biomedical Science** 25(1): 65.
- Waterhouse, A., Bertoni, M., Bienert, S., Studer, G., Tauriello, G., Gumienny, R., Heer, F.T., de Beer, T.A.P., Rempfer, C., Bordoli, L., Lepore, R. and Schwede, T. 2018. SWISS-MODEL: Homology Modelling of Protein Structures and Complexes. **Nucleic Acids Research** 46(W1): W296-W303.
- Wu, Y., Wang, Y., Li, Z.H., Wang, C.F., Wei, J.Y., Li, X.L., Wang, P.J., Zhou, Z.F., Du, S.S., Huang, D.Y. and Deng, Z.W. 2014. Composition of the Essential Oil from *Alpinia galanga* Rhizomes and Its Bioactivity on *Lasioderma serricorne*. **Bulletin of Insectology** 67(2): 247-254.

ลักษณะภายนอกและสัณฐานวิทยาของไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์

Phenotypic Characteristics and Morphology of Khiew-Phalee Chicken in Uttaradit Province

สิริวดี พรหมน้อย^{1*} สุภาวดี แหยมคง² และ เฉยฉา มิ่งฉาย³

Siriwadee Phromnoi^{1*} Suphawadee Yeamkong² and Chedsada Mingchai³

Received: 14 June 2021, Revised: 23 September 2021, Accepted: 14 October 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะภายนอกและสัณฐานวิทยาสำหรับกำหนดลักษณะประจำพันธุ์ไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์ โดยสุ่มตัวอย่างไก่ จำนวน 55 ตัว จากฟาร์มของเกษตรกรในจังหวัดอุดรดิตถ์ วิเคราะห์และนำเสนอข้อมูลด้วยสถิติพรรณนา ผลการวิจัยพบว่า ลักษณะภายนอกที่สำคัญคือ หงอนหินและตุ้มหูสีแดงสำหรับสีเขียวอมดำที่เป็นสีเฉพาะของไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์นั้น ปรากฏชัดเจนบริเวณ ตา ปาก สร้อยคอ สร้อยหลัง สร้อยปีก ขนปีก หางกะลวย และหางพัด ตามลำดับ ขณะที่ผลการเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่า ทุกลักษณะ (น้ำหนัก ความสูงลำตัว ความยาวลำตัว ความกว้างลำตัว ความยาวปีก ความยาวแข้งบน ความยาวแข้งล่าง และความยาวเท้า) ของอายุไก่เขียวพาลี 2 ช่วงอายุ (อายุ 4-9 เดือน และ 9 เดือนขึ้นไป) มีความแตกต่างระหว่างเพศ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) โดยช่วงอายุทั้ง 2 ของไก่เขียวพาลี พบว่าเพศผู้มีค่าเฉลี่ยสัณฐานวิทยาทุกลักษณะมากกว่าเพศเมีย จากผลการศึกษาสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการกำหนดลักษณะประจำพันธุ์ของไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์ และเป็นเกณฑ์การคัดเลือกไก่ให้ตรงตามลักษณะประจำพันธุ์ เพื่อใช้ประโยชน์ด้านเศรษฐกิจและการอนุรักษ์สายพันธุ์

คำสำคัญ: ไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์, ลักษณะภายนอก, การอนุรักษ์สายพันธุ์

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรดิตถ์ 53000

¹ Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University, Muang, Uttaradit 53000, Thailand.

² คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

² Faculty of Food and Agricultural Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok 65000, Thailand.

³ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรดิตถ์ 53000

³ Faculty of Agriculture, Uttaradit Rajabhat University, Muang, Uttaradit 53000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): siriwadee@uru.ac.th Tel: 08 1751 0399

ABSTRACT

This research study determined phenotypic characteristics and morphology to characterize indigenous Khiew-Palee Chicken in Uttaradit Province. The sample included 55 chickens randomly selected from farms in the province. Descriptive statistics were used to analyze and present data. The results showed that dominant phenotypic characteristics were hin comb and red earlobe. The Khiew-Palee Chicken was characterized by its blackish green color, which was clearly visible around the eyes, beak, neck plumage, back plumage, wing plumage, wing, long curve tail and back tail respectively. The morphological comparison results showed that all characteristics (weight, body height, body length, body width, wing length, upper shank length, lower shank length and foot length) of the two age groups (4-9 months and over 9 months) were statistically significant difference between sexes ($p < 0.001$). It was found that males were on average larger than females in all morphological characteristics. The study findings can serve as the breed characterizations of indigenous Khiew-Palee Chickens in Uttaradit Province, and as the selection criteria for chickens with desired qualities according to the Standard of Perfection, which can be used for local economy and breed conservation purposes.

Key words: Uttaradit Khiew-Phalee chicken, phenotypic characteristics, breeding conservation

บทนำ

ปัจจุบันรัฐบาลให้ความสำคัญกับการพัฒนาเศรษฐกิจฐานรากโดยใช้ประโยชน์จากความหลากหลายทางชีวภาพของชุมชนและท้องถิ่น เนื่องจากประเทศไทยมีจุดเด่นที่สามารถแข่งขันกับประเทศอื่นๆ ได้ อาทิเช่น ความหลากหลายทางชีวภาพและภูมิปัญญา เป็นสิ่งที่ควรมีการศึกษาและนำมาใช้ประโยชน์ให้ถูกต้อง และบูรณาการร่วมกันระหว่างหน่วยงานกับชุมชนให้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน (Biodiversity-Based Economy Development Office (Public Organization), 2017) โดยประเทศไทยมีไก่พื้นเมืองเป็นมรดกทางวัฒนธรรมและเป็นทรัพย์สินทางภูมิปัญญาของชุมชนที่มีความหลากหลายทางชีวภาพ การเลี้ยงไก่พื้นเมืองคือการส่งเสริมให้เกษตรกรรายย่อยสามารถพึ่งพาตนเอง เพิ่มรายได้ และสร้างอาชีพในท้องถิ่น รวมทั้งเป็นการอนุรักษ์พันธุ์กรรมของไก่พื้นเมืองไปในคราวเดียวกัน (Chaiyachet *et al.*, 2016) อย่างไรก็ตาม

ตาม สายพันธุ์ไก่พื้นเมืองมีความหลากหลายเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีสายพันธุ์อื่นมาปะปน โดยเกิดจากการที่นำไก่สายพันธุ์พม่าและเวียดนาม มาผสมกับไก่พื้นเมืองไทยเพื่อประโยชน์ในการขยายพันธุ์ให้เป็นไก่ชน ทำให้สายพันธุ์ไก่พื้นเมืองของไทยค่อยๆ หายไป รวมถึงขาดลักษณะเฉพาะเจาะจง จึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการศึกษาลักษณะ และมาตรฐานเฉพาะประจำพันธุ์เพื่อไม่ให้เกิดเหตุการณ์ในกรณีดังกล่าว (Food and Agricultural Organization (FAO), 2012)

สำหรับมาตรฐานเฉพาะประจำพันธุ์และอุดมทัศน์ไก่พื้นเมืองไทย มีความสัมพันธ์กับภูมิปัญญา ไม่ว่าจะเป็นลักษณะรูปร่าง หน้าตา สีขน เกสัด กิริยา ชันเชิง ฯลฯ ได้นำมาเป็นข้อกำหนดลักษณะประจำพันธุ์ภายนอกของไก่ (Phenotype) ไก่ที่มีอุดมทัศน์สวยงามจะได้มาตรฐานตามข้อกำหนดมีพฤติกรรมชนเก่ง และเป็นสายพันธุ์แท้ (Meesiripan, 2001) แต่ปัจจุบันลักษณะภายนอกที่

ปรากฏกับลักษณะตามอุดมทัศน์ของสายพันธุ์ไก่พื้นเมืองมีความแตกต่างไปจากลักษณะเดิม เช่น ไก่เหลืองหางขาวมีลักษณะตามอุดมทัศน์ที่ถูกต้องคือ หน้าหงอนบางกลางหงอนสูง สร้อยระยะย้าหน้านกยูง และลักษณะพิเศษที่นิ้วเท้า คือ เลื้อยซ่อนเล็บ เหน็บใบในไซบาดาล เกิดผลลาญศัตรู และลักษณะที่เป็นมงคลเสริมบารมี ซึ่งจะแตกต่างจากไก่เหลืองหางขาวที่พบโดยทั่วไป คือ มีพระเจ้าห้าพระองค์เป็นหย่อมขนสีขาวห้าแห่งที่บริเวณหัวหลังหงอน หัวปีกทั้งสองข้าง และบริเวณข้อขาทั้งสองข้าง (Tungtrakapoung, 2015) แต่ลักษณะไก่เหลืองหางขาวที่พบในปัจจุบันส่วนใหญ่จะมีลักษณะหงอนที่หลากหลายแตกต่างกันไป บางพื้นที่มีการผสมกับสายพันธุ์พม่าหรือสายพันธุ์อื่นๆ ซึ่งแสดงถึงความเปลี่ยนแปลงของสายพันธุ์ไก่พื้นเมืองในปัจจุบัน (Yaemkong and Nguyen Ngoc, 2019) นอกจากนี้ Chirarat *et al.* (2016) ได้ศึกษาความหลากหลายของลักษณะภายนอกที่ปรากฏในสายพันธุ์ไก่พื้นเมืองตามลักษณะอุดมทัศน์ในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก พบว่า ไก่พื้นเมืองในอำเภอบางกระทุ่มและอำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก มีความแตกต่างด้านสายพันธุ์ ซึ่งพบมากกว่า 10 สายพันธุ์ที่ปรากฏโดยทั่วไป

จังหวัดอุดรดิตถ์ตั้งอยู่ในภาคเหนือตอนล่าง เป็นประตูดินแดนล้านนาตะวันออก ที่มีทัศนียภาพ

ทางวัฒนธรรมภูมิปัญญา มีสัตว์ประจำถิ่นที่เป็นอัตลักษณ์คือ ไก่เขียวพาลี เป็นไก่ประจำพระองค์ของพระยาพิชัยดาบหัก (ภาพที่ 1) ได้รับการรับรองพันธุ์จากกรมปศุสัตว์ให้เป็นสัตว์เลี้ยงไทยประจำถิ่นเมื่อปี พ.ศ. 2556 (Biodiversity Research and Development Section, 2014) ไก่เขียวพาลีเป็นทรัพยากรที่มีคุณค่าของประเทศ สามารถเลี้ยงเพื่อเพิ่มมูลค่าได้ ทั้งเป็นไก่นุรักษ์ ไก่ประกวดตามอุดมทัศน์เพื่อความสวยงามหรือเลี้ยงแข่งขันต่อสู้เพื่อสันตนาการ ทำให้ไก่มีมูลค่าเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากจากการเก็บข้อมูลเบื้องต้นในปัจจุบันมีเกษตรกร และผู้ประกอบการฟาร์ม มีจำนวนพ่อแม่พันธุ์ไม่มากนักที่มีการเลี้ยงและมีข้อมูลในการเลี้ยง แต่สามารถสร้างมูลค่าจากการจำหน่ายไก่เขียวพาลี ทั้งในส่วนของไข่ไก่ ที่มีราคาฟองละ 200-500 บาท ลูกไก่อายุ 2 เดือนราคา 1,500 บาท ไก่เต็มวัยอายุ 8 เดือนราคา 3,000 บาท และบางตัวที่มีลักษณะดีจะมีราคาถึง 25,000-30,000 บาท ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะพันธุ์กรรมที่ปรากฏ โดยลูกคามีทั้งในประเทศและกลุ่มประเทศตะวันออกกลาง (Phromnoi *et al.*, 2021) จากมูลค่างกล่าวจึงสามารถส่งเสริมให้เป็นสินค้าเกษตรที่สร้างอาชีพและรายได้ให้ประชาชนของจังหวัดอุดรดิตถ์ได้อย่างเป็นรูปธรรม



(ก)

(ข)

ภาพที่ 1 ไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์ (ก) เพศผู้ (ข) เพศเมีย

อย่างไรก็ตามสถานการณ์ของไก่เขียวพาลีที่พบคือ มีผู้รู้จักสายพันธุ์นี้จำนวนน้อย มีปริมาณไก่ที่ลดลง และขาดการบูรณาการเพื่อส่งเสริมเกษตรกรอย่างเป็นรูปธรรม ทั้งนี้ Phromnoi and Dontongdang (2016) ได้ศึกษาความหลากหลายทางชีวภาพของไก่เขียวพาลี ในอำเภอพิชัย จังหวัดอุดรดิตถ์ พบว่า ไก่เขียวพาลีจัดอยู่ในกลุ่ม *Gallus gallus* ที่มีความใกล้ชิดกับไก่พื้นเมืองจากประเทศจีนและเวียดนาม รวมทั้งมีความหลากหลายทางพันธุกรรมของกลุ่มไก่เขียวพาลีด้วยกันเอง ประกอบกับการศึกษาลักษณะประจำสายพันธุ์ของไก่เขียวพาลียังมีการศึกษาและรายงานไม่แพร่หลายมากนัก และมีลายลักษณ์อักษรทางวิชาการที่ยังไม่ชัดเจน ทำให้ไม่สามารถส่งเสริมเกษตรกรในการเลี้ยงเพื่อใช้ประโยชน์และอนุรักษ์อย่างเป็นรูปธรรมได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะภายนอกและสัณฐานวิทยา สำหรับการกำหนดลักษณะประจำพันธุ์ของไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์ เพื่อเป็นประโยชน์ในการวางแผนการอนุรักษ์ และปรับปรุงพันธุ์ไก่เขียวพาลีต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาลักษณะภายนอกไก่เขียวพาลี

ดำเนินการวิจัยเชิงสำรวจในจังหวัดอุดรดิตถ์ สุ่มตัวอย่างแบบจำเพาะเจาะจง (Purposive sampling) จากเกษตรกรผู้เลี้ยงไก่เขียวพาลีในลักษณะฟาร์ม และมีการเลี้ยงอย่างต่อเนื่องมากกว่า 5 ปี ได้แก่ ฟาร์ม

ของเกษตรกรรายย่อย (อำเภอพิชัย จังหวัดอุดรดิตถ์) ฟาร์มของผู้ประกอบการสัตว์ปีก (อำเภอลับแล จังหวัดอุดรดิตถ์) และฟาร์มที่เป็นศูนย์การเรียนรู้ไก่เขียวพาลี อำเภอพิชัย จังหวัดอุดรดิตถ์) ได้ตัวอย่างไก่เขียวพาลี จำนวน 55 ตัว (เพศผู้จำนวน 23 ตัว และเพศเมียจำนวน 32 ตัว) การเก็บข้อมูลโดยจัดกลุ่มตามลักษณะภายนอก (Phenotypic qualitative traits) ได้แก่ ลักษณะหงอน สีหงอน สีขนหู สีฝ่าปัดจมูก สีรอบตา สีสร้อยคอ สีสร้อยหลัง สีสร้อยปีก สีสร้อยใต้ปีก (ข้างลำตัว) สีปีกนอก สีหางกะลวย สีหางพัด สีเล็บ/แข้ง/เดือย นำข้อมูลที่ได้มาเทียบเคียงกับ (1) ลักษณะประจำพันธุ์ตามเกณฑ์ลักษณะและมาตรฐานไก่เขียวหางดำ กรมปศุสัตว์ พ.ศ. 2546 (Livestock Biodiversity Research Project, 2003) และ (2) ลักษณะและมาตรฐานประจำพันธุ์ของไก่พระยาพิชัยดาบหัก (เขียวพาลี) กรมปศุสัตว์ พ.ศ. 2556 (Biodiversity Research and Development Section, 2014) โดยใช้ความเห็นของผู้เชี่ยวชาญด้านไก่พื้นเมือง ประกอบด้วย นายสัตวแพทย์ชำนาญการพิเศษ และนักวิชาการสัตวบาลชำนาญการพิเศษ สำนักพัฒนาพันธุ์สัตว์ กรมปศุสัตว์ และการประเมินด้วยภาพถ่าย โดยใช้กล้องถ่ายภาพ DSLR ยี่ห้อ CANNON 5D mark 2 Lens 24-70 F2.8 ISO 200 ปรับรับแสงให้สัมพันธ์กับสภาพแสงจริง (White Balance) และตั้งค่า F-Stop 5.6 - 6.3 กับ Shutter Speed 200 - 250



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)



(ช)

ภาพที่ 2 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไก่เขียวพาลี (ก) การชั่งน้ำหนักตัว (ข) การวัดความสูงลำตัว (ค) การวัดความยาวลำตัว (ง) การวัดความกว้างลำตัว (จ) การวัดความยาวปีก (ฉ) การวัดความยาวหน้าแข้ง และ (ช) การวัดความยาวเท้า

2. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาไก่เขียวพาลี

การรวบรวมข้อมูลลักษณะสัณฐานวิทยา ประกอบด้วยข้อมูล น้ำหนัก ความสูงลำตัว ความยาวลำตัว ความกว้างลำตัว ความยาวปีก ความยาวหน้าแข้ง (บนและล่าง) และความยาวเท้า คัดแปลงจากวิธีที่ได้ระบุใน (FAO, 2012) ดังแสดงในภาพที่ 2

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลลักษณะภายนอกและสัณฐานวิทยาไก่เขียวพาลี ด้วยสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ค่าร้อยละ (Percentage) ค่าสูงสุด (Maximum) และค่าต่ำสุด (Minimum) และค่าเฉลี่ยแบบลิสแควร์ถูกคำนวณค่าและนำมาใช้ในการเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยา ระหว่างเพศของ 2 ช่วงอายุของไก่เขียวพาลีอุตรดิตถ์

ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ในโปรแกรมสำเร็จรูป SAS (SAS, 2004)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ลักษณะภายนอกของไก่เขียวพาลี

ผลการศึกษาลักษณะภายนอกบริเวณหัวของไก่เขียวพาลีจังหวัดอุตรดิตถ์ (ภาพที่ 3 และตารางที่ 1) พบว่า ลักษณะหงอนเป็นหงอนหิน (100%) สีตุ้มหูเป็นสีแดง (100%) สีขนหมีสีดำ (50.91%) มากกว่าสีเขียวอมดำ (49.09%) สีฝ่าปดจุมกมีสีเขียวอมดำ (83.64%) มากกว่าสีดำ (16.36%) สีรอบตาดำ พบว่าส่วนใหญ่มีสีเขียวอมดำ (43.64%) รองลงมาเป็นสีส้มลาย (29.09%) และสีเหลือง (27.27%) ตามลำดับ สีปาก พบว่า เป็นสีเขียวอมดำทั้งหมด (100%)



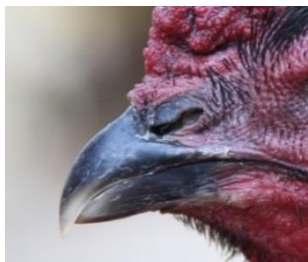
(ก)



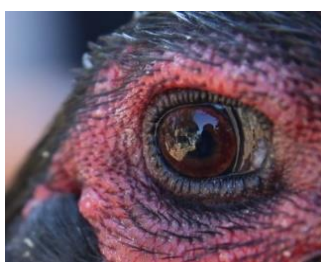
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพที่ 3 ลักษณะภายนอกบริเวณหัวของไก่เขียวพาลี (ก) ลักษณะหงอนหิน (ข) สีของตุ้มหูกมีสีแดง (ค) สีขนหูกมีสีเขียวอมดำ (ง) สีฝ่าปิดจุมูกมีสีเขียวอมดำ (จ) สีรอบตาดำมีสีเขียวอมดำ (ฉ) สีปากมีสีเขียวอมดำ

ตารางที่ 1 จำนวนและร้อยละของลักษณะภายนอกบริเวณหัวไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรธานี

ลักษณะภายนอก	คณะเพศ		เพศผู้		เพศเมีย	
	จำนวน	ร้อยละ (%)	จำนวน	ร้อยละ (%)	จำนวน	ร้อยละ (%)
ลักษณะหงอน						
หงอนหิน	55	100.00	23	100	32	100
สีหงอน						
สีแดง	55	100.00	23	100	32	100
สีขนหูก						
สีดำ	28	50.91	10	43.48	18	56.25
สีเขียวอมดำ	27	49.09	13	56.52	14	43.75
สีฝ่าปิดจุมูก						
สีดำ	9	16.36	2	8.70	7	21.88
สีเขียวอมดำ	46	83.64	21	91.30	25	78.13
สีรอบตาดำ						
สีเหลือง	15	27.27	11	47.83	4	12.50
สีเขียวอมดำ	24	43.64	7	30.43	17	53.13
สีส้มลาย	16	29.09	5	21.74	11	34.38
สีปาก						
เขียวอมดำ	55	100.00	23	100	32	100

ขณะที่ข้อมูลลักษณะภายนอกบริเวณลำตัว (ภาพที่ 4 และตารางที่ 2) พบว่า สีสร้อยคอ สีสร้อย หลัง สีสร้อยปีก สีสร้อยใต้ปีก (ข้างลำตัว) สีปีกนอก

สีหางกะลวย และสีหางพัด พบว่า เป็นสีเขียวอมดำ ทั้งหมด (100%) และสีเล็บ / แข้ง / เดือย มีสีเขียวอมดำ (89.09%) มากกว่าสีดำ (10.91%) ตามลำดับ



(ก)



(ข)



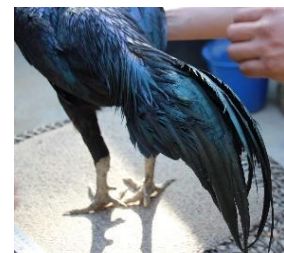
(ค)



(ง)



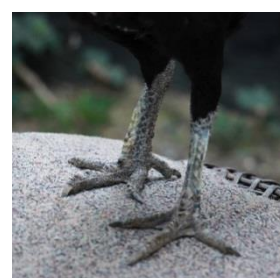
(จ)



(ฉ)



(ซ)



(ช)

ภาพที่ 4 ลักษณะภายนอกบริเวณลำตัวของไก่เขียวพาลี (ก) สีสร้อยคอมีสีเขียวอมดำ (ข) สีสร้อยหลังมีสีเขียวอมดำ (ค) สีสร้อยปีกมีสีเขียวอมดำ (ง) สีสร้อยใต้ปีกมีสีเขียวอมดำ (จ) สีปีกนอกมีสีเขียวอมดำ (ฉ) หางกะลวยมีสีเขียวอมดำ (ซ) สีหางพัดมีสีเขียวอมดำ และ (ช) สีเล็บ/แข้ง/เดือยมีสีเขียวอมดำ

ตารางที่ 2 ร้อยละของลักษณะภายนอกบริเวณลำตัวไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรธานี

ลักษณะ ภายนอก	คณะเทศ		เพศผู้		เพศเมีย	
	จำนวน	ร้อยละ (%)	จำนวน	ร้อยละ (%)	จำนวน	ร้อยละ (%)
สีสร้อยคอ						
สีเขียวอมดำ	55	100.00	23	100.00	32	100.00
สีสร้อยหลัง						
สีเขียวอมดำ	55	100.00	23	100.00	32	100.00
สีสร้อยปีก						
สีเขียวอมดำ	55	100.00	23	100.00	32	100.00

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ลักษณะ ภายนอก	คณะเพศ		เพศผู้		เพศเมีย	
	จำนวน	ร้อยละ (%)	จำนวน	ร้อยละ (%)	จำนวน	ร้อยละ (%)
สีสร้อยได้ปีก						
(ข้างลำตัว)						
สีเขียวอมดำ	55	100.00	23	100.00	32	100.00
สีปีกนอก						
สีเขียวอมดำ	55	100.00	23	100.00	32	100.00
สีหางกะลวย						
สีเขียวอมดำ	55	100.00	23	100.00	32	100.00
สีหางพัด						
สีเขียวอมดำ	55	100.00	23	100.00	32	100.00
สีเล็บ/แข้ง/เดือย						
สีเขียว	6	10.91	1	4.35	5	15.63
สีเขียวอมดำ	49	89.09	22	95.65	27	84.38

จากผลการศึกษาลักษณะภายนอกไก่อีรวาว พาลีจังหวัดอุดรดิตถ์ มีลักษณะที่ตรงและใกล้เคียงกับ ข้อมูลของกรมปศุสัตว์ที่มีการศึกษาและอ้างอิงไว้ และผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่า ลักษณะภายนอก ของไก่อีรวาวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์ที่เด่นชัดคือ หงอน หินและมีสีแดงสด สอดคล้องกับการศึกษาของ Yaemkong (2014) ที่ศึกษาความหลากหลายของ ลักษณะภายนอกของไก่พื้นเมืองในพื้นที่จังหวัด พิษณุโลก พบว่า ไก่พื้นเมืองทุกสายพันธุ์มีลักษณะ เป็นหงอนหิน ขณะที่ผลการศึกษาในเรื่องของสีสร้อย (สร้อยคอ สร้อยหลัง และสร้อยปีก) สีขนและหาง ของไก่อีรวาวพาลีอุดรดิตถ์พบว่า เป็นสีเขียวอมดำ ทั้งหมด แตกต่างจากไก่อีรวาวหางดำของ Livestock Biodiversity Research Project (2003) ที่ระบุว่า สี สร้อยต้องเป็นสีเขียว แต่ส่วนสีขนและหางเป็นสีดำ และเมื่อนำผลจากการศึกษาในครั้งนี้ไปเปรียบเทียบกับ ไก่อีรวาวพาลีชัยคอบหัก (เขียวพาลี) ที่ได้รับการ รับรองพันธุ์จากกรมปศุสัตว์ (Biodiversity Research

and Development Section, 2014) พบว่า มีความสอดคล้อง ในส่วนของสีสร้อยคอ สร้อยหลัง และสร้อยปีก สีตา สีขนหูลีฟ้าปิดจมูก สีเล็บ แข้ง และเดือย ที่เป็นสีเขียว อมดำ และมีความแตกต่างกับไก่อีรวาวพาลีชัยคอบหัก (เขียวพาลี) เฉพาะส่วนสีขน สีหางกะลวย และหางพัด ที่เป็นสีดำ ส่วนผลจากการศึกษาครั้งนี้เป็นสีเขียว อมดำ

2. ลักษณะทางสัณฐานวิทยาไก่อีรวาวพาลี

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลไก่อีรวาวพาลีอุดรดิตถ์ จำนวน 55 ตัว (เพศผู้ จำนวน 23 ตัว และเพศเมีย 32 ตัว) ของลักษณะสัณฐานวิทยาของไก่อีรวาวพาลี ภาพรวม (ตารางที่ 3) พบว่า ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักตัวมี ค่าเท่ากับ 2.50 ± 0.58 กก. ความสูงลำตัวมีค่าเท่ากับ 52.48 ± 6.71 ซม. ความยาวลำตัวมีค่าเท่ากับ 21.87 ± 1.95 ซม. ความกว้างลำตัวมีค่าเท่ากับ 15.33 ± 2.09 ซม. ความยาวปีกมีค่าเท่ากับ 17.89 ± 3.25 ซม. ความ ยาวแข้งบนมีค่าเท่ากับ 13.63 ± 2.49 ซม. ความยาว

แข้งล่างมีค่าเท่ากับ 10.98 ± 1.56 ซม. และความยาว

เท้ามีค่าเท่ากับ 8.34 ± 1.28 ซม.

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของลักษณะทางสัณฐานวิทยาไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์

ลักษณะสัณฐานวิทยา	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
น้ำหนัก (กก.)	2.50 ± 0.58
ความสูงลำตัว (ซม.)	52.48 ± 6.71
ความยาวลำตัว (ซม.)	21.87 ± 1.95
ความกว้างลำตัว (ซม.)	15.33 ± 2.09
ความยาวปีก (ซม.)	17.89 ± 3.25
ความยาวแข้งบน (ซม.)	13.63 ± 2.49
ความยาวแข้งล่าง (ซม.)	10.98 ± 1.56
ความยาวเท้า (ซม.)	8.34 ± 1.28

จากผลการศึกษาทางด้านลักษณะทางสัณฐานวิทยาไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์ (ตารางที่ 4) พบว่า ไก่เขียวพาลีในครั้งนี้แบ่งออกเป็น 2 ช่วงอายุ ได้แก่ ช่วงอายุ 4-9 เดือน และ 9 เดือนขึ้นไป โดยในช่วงอายุ 4-9 เดือน เพศผู้ มีน้ำหนักเฉลี่ย 2.75 กิโลกรัม ความสูงเฉลี่ย 57.00 เซนติเมตร และไก่เขียวพาลีเพศเมียมีน้ำหนักเฉลี่ย 2.11 กิโลกรัม ความสูงเฉลี่ย 48.31 เซนติเมตร ส่วนไก่เขียวพาลีในช่วงอายุ 9 เดือนขึ้นไปเพศผู้ มีน้ำหนักเฉลี่ย 3.38 กิโลกรัม ความสูงเฉลี่ย 62.13 เซนติเมตร และเพศเมียมีน้ำหนักเฉลี่ย 2.16 กิโลกรัม ความสูงเฉลี่ย 47.44 เซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Biodiversity Research and

Development Section (2014) ที่ว่า ลักษณะประจำพันธุ์ทั่วไปของไก่พระยาพิชัยดาบหัก (เขียวพาลี) คือ เป็นไก่ขนาดกลาง น้ำหนักโดยเฉลี่ยเพศเมียประมาณ 2.00 กิโลกรัมขึ้นไป ความสูง 45 เซนติเมตรขึ้นไป และเพศผู้ต้องมีน้ำหนักเฉลี่ย 3 กิโลกรัมขึ้นไป และความสูงตั้งแต่ 60 เซนติเมตรขึ้นไป ซึ่งจากการศึกษาในครั้งนี้พบว่า ถ้าเป็นไก่เขียวพาลีเพศผู้ที่ช่วงอายุ 4-9 เดือน ความสูงและน้ำหนักเฉลี่ยที่พบยังมีขนาดค่อนข้างเล็กเมื่อเทียบกับรายงานของ Biodiversity Research and Development Section (2014) แต่ถ้าอายุ 9 เดือนขึ้นไปจึงจะมีส่วนสูงและน้ำหนักที่เป็นไปตามเกณฑ์ประจำพันธุ์

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า p -value ลักษณะสัณฐานวิทยา จำแนกตามช่วงอายุของไก่เขียวพาลี

ลักษณะสัณฐานวิทยา	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		p -value
	เพศผู้	เพศเมีย	
ช่วงอายุ 4-9 เดือน			
- น้ำหนัก (กก.)	2.75 ± 0.47^a	2.11 ± 0.27^b	<0.0001
- ความสูงลำตัว (ซม.)	57.00 ± 4.61^a	48.31 ± 3.84^b	<0.0001
- ความยาวลำตัว (ซม.)	22.80 ± 1.47^a	21.69 ± 0.95^b	<0.0001
- ความกว้างลำตัว (ซม.)	15.47 ± 2.72^a	14.88 ± 1.45^b	<0.0001

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ลักษณะสัณฐานวิทยา	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		p-value
	เพศผู้	เพศเมีย	
- ความยาวปีก (ซม.)	19.73 $\pm$ 4.35 ^a	16.08 $\pm$ 1.19 ^b	<0.0001
- ความยาวแข้งบน (ซม.)	15.57 $\pm$ 2.29 ^a	13.15 $\pm$ 1.57 ^b	<0.0001
- ความยาวแข้งล่าง (ซม.)	12.27 $\pm$ 1.22 ^a	10.35 $\pm$ 0.94 ^b	<0.0001
- ความยาวเท้า (ซม.)	9.43 $\pm$ 1.40 ^a	8.23 $\pm$ 1.01 ^b	<0.0001
ช่วงอายุ 9 เดือนขึ้นไป			
- น้ำหนัก (กก.)	3.38 $\pm$ 0.48 ^a	2.16 $\pm$ 0.31 ^b	<0.0001
- ความสูงลำตัว (ซม.)	62.13 $\pm$ 1.96 ^a	47.44 $\pm$ 2.29 ^b	<0.0001
- ความยาวลำตัว (ซม.)	23.50 $\pm$ 1.20 ^a	20.50 $\pm$ 2.20 ^b	<0.0001
- ความกว้างลำตัว (ซม.)	17.88 $\pm$ 1.46 ^a	14.42 $\pm$ 1.03 ^b	<0.0001
- ความยาวปีก (ซม.)	20.25 $\pm$ 1.91 ^a	16.61 $\pm$ 2.23 ^b	<0.0001
- ความยาวแข้งบน (ซม.)	14.88 $\pm$ 2.31 ^a	11.81 $\pm$ 1.84 ^b	<0.0001
- ความยาวแข้งล่าง (ซม.)	11.94 $\pm$ 1.21 ^a	9.94 $\pm$ 1.35 ^b	<0.0001
- ความยาวเท้า (ซม.)	8.63 $\pm$ 1.06 ^a	7.39 $\pm$ 0.53 ^b	<0.0001

^{a,b}ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแต่ละแถวเดียวกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาตามช่วงอายุของไก่ 2 ช่วง ได้แก่ ไก่เขียวพาลีที่มีอายุช่วง 4-9 เดือน และช่วงอายุ 9 เดือนขึ้นไป (ตารางที่ 4) ได้แก่ พบว่าทุกลักษณะ (น้ำหนัก ความสูงลำตัว ความยาวลำตัว ความกว้างลำตัว ความยาวปีก ความยาวแข้งบน ความยาวแข้งล่าง และความยาวเท้า) เพศผู้มีความมากกว่าเพศเมียแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (<0.0001) สอดคล้องกับการศึกษาของ Chaiyachet *et al.* (2016) ที่ศึกษาลักษณะภายนอกและการจำแนกสายพันธุ์ไก่พื้นเมืองไทยในจังหวัดมหาสารคาม พบว่ามีความแตกต่างระหว่างเพศ โดยเพศผู้มีน้ำหนัก ความสูง ความยาวปีก ความยาวหลัง ความยาวกระดูกหน้าแข้ง ความยาวเท้าถึงหลัง และความยาวจงอยปากถึงหงอนมากกว่าเพศเมีย ($p < 0.05$) เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Kumpala *et al.* (2016) พบว่า น้ำหนักและสัดส่วนร่างกาย ได้แก่ ความกว้าง

และความยาวอก ความยาวรอบอก ความยาวลำตัว ความยาวแข้ง ความสูงจากเท้าถึงฐานหงอน ความสูงจากเท้าถึงปลายหงอน และความสูงจากเท้าถึงไหล่ในไก่พื้นเมืองเพศผู้มากกว่าไก่พื้นเมืองเพศเมีย

จากผลการวิจัยเห็นได้ชัดเจนว่า ลักษณะภายนอกและสัณฐานวิทยาของไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์ มีความแตกต่างจากข้อมูลของกรมปศุสัตว์ ทั้งไก่พื้นเมืองเขียวหางดำ (Livestock Biodiversity Research Project, 2003) และไก่พระยาพิชัยดาบหัก (เขียวพาลี) (Biodiversity Research and Development Section, 2014) ทั้งที่ไก่ที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นไก่สายพันธุ์เขียวหางดำ เพียงแต่มีการผสมข้ามสายพันธุ์ตามวัตถุประสงค์ของผู้เลี้ยง (Rattanapradit *et al.*, 2016) ดังนั้น จึงควรนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ ไปร่วมกำหนดลักษณะที่เฉพาะเจาะจงที่เป็นเอกลักษณ์ของไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์ เพื่อใช้ประโยชน์ใน

การวางแผนการอนุรักษ์ และปรับปรุงพันธุ์ไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์ ตลอดจนเป็นแนวทางในการศึกษาพันธุศาสตร์ระดับโมเลกุลเชิงลึกถึงลักษณะเฉพาะเจาะจงของไก่เขียวพาลี เพื่อพัฒนาสู่การเป็นทรัพยากรที่มีคุณค่าของประเทศ เพื่อการเลี้ยงแบบเพิ่มมูลค่าให้เป็นไก่นูรักษ์หรือไก่ประกวดตามอุดมทัศน์ ตลอดจนสามารถส่งเสริมให้เป็นสินค้าเกษตรจากทรัพยากรพื้นถิ่นที่สร้างอาชีพและรายได้ให้ประชาชนอย่างเป็นรูปธรรม สอดคล้องต่อการพัฒนาสัตว์เศรษฐกิจเป็นแบบอย่างที่ดีในการอนุรักษ์ความหลากหลายทางชีวภาพของไทยต่อไป

สรุป

ผลการศึกษาลักษณะภายนอกของไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์พบว่า มีลักษณะหงอนหิน ตุ่มหู มีสีแดงสด ตาสีเขียวอมดำ ปาก ฝ่าปัดจุมูก แข็ง เคี้ยวและเลี้ยว ส่วนใหญ่เป็นสีเขียวอมดำ สร้อยคอ สร้อยหลัง สร้อยปีก พื้นขน หางพัด และหางกะลวย มีสีเขียวอมลักษณะที่ศึกษาเหล่านี้มีความใกล้เคียงกับลักษณะประจำพันธุ์ของไก่พระยาพิชัยดาบหัก (เขียวพาลี) ที่ได้รับการรับรองพันธุ์จากกรมปศุสัตว์ ผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ มีลักษณะที่ไม่สอดคล้องกับที่ได้การรับรองพันธุ์ในส่วนอง สีของพื้นขน หางกะลวย และหางพัด ซึ่งสามารถนำข้อมูลไปใช้เพื่อกำหนดลักษณะที่เฉพาะเจาะจงของไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์ได้ และจากข้อมูลลักษณะฐานวิทย์ของไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์ของ 2 ช่วงอายุมีความแตกต่างระหว่างเพศ โดยเพศผู้มีน้ำหนัก ความสูงลำตัว ความยาวลำตัว ความกว้างลำตัว ความยาวปีก ความยาวแข้งบน ความยาวแข้งล่าง และความยาวเท้ามากกว่าเพศเมีย (<0.0001) ผลการศึกษาเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงพันธุ์ต่อไป นอกจากนี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมด้านลักษณะทางพันธุกรรมเพื่อแสดงถึง

ความสัมพันธ์ของลักษณะที่ปรากฏกับพันธุกรรมที่จะยืนยันสายพันธุ์ของไก่เขียวพาลีจังหวัดอุดรดิตถ์เพื่อการอนุรักษ์ไก่เขียวพาลีสายพันธุ์แท้และตรงตามลักษณะประจำพันธุ์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2563 ภายใต้โครงการพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานความหลากหลายทางชีวภาพของไก่เขียวพาลีสัตว์ประจำถิ่นของจังหวัดอุดรดิตถ์ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถทางการแข่งขันบนฐานการอนุรักษ์และใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน และขอขอบคุณภาคีเครือข่ายวิจัยไก่พื้นเมืองอุดรดิตถ์ ซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่าง 3 หน่วยงาน ได้แก่ สำนักงานปศุสัตว์จังหวัดอุดรดิตถ์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ และมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิผู้เชี่ยวชาญด้านไก่พื้นเมืองในการให้คำแนะนำการจำแนกลักษณะประจำพันธุ์ไก่เขียวพาลี

เอกสารอ้างอิง

- Biodiversity-Based Economy Development Office (Public Organization). 2017. **Economic Development Strategic Framework from biological 20 years: 2017-2036**. Published documents, Biodiversity-Based Economy Development Office, Bangkok. (in Thai)
- Biodiversity Research and Development Section. 2014. **Khiew-Palee native chicken**. Available source: <http://breeding.dld.go.th/biodiversity/chm/R%20.%20W/R%20.%20W.html>, January 6, 2014. (in Thai)

- Chaiyachet, O., Prakobsaeng, N. and Ponddee, N. 2016. Phenotypic Characterization and Identification of Thai Native Chickens in Maha Sarakham Province. **Prawarun Agricultural Journal** 13(2): 155-165. (in Thai)
- Chirarat, N., Soipeth, U., Chalermnan, N., Rattanapradit, P., Yaemkong, S., Laorodphan, N., Jaipong, P., Charoensuk, R., Numthuam, S. and Incharoen, T. 2016. Diversity of phenotypic characteristics of Thai native chicken in Phitsanulok province. **Khon Kean Agriculture Journal** 44(Suppl. 2): 395-400. (in Thai)
- Food and Agricultural Organization (FAO). 2012. **Phenotypic characterization of animal genetic resources**. FAO Animal Production and Health Guidelines No.11., Rome, Italy.
- Kumpala, K., Kuha, K., Termsombattaworn, P. and Nasinprom, N. 2016. Study on morphology of Thai native chickens of ethnic groups in Nan province. **Khon Kean Agriculture Journal** 44(Suppl. 1): 377-381. (in Thai)
- Livestock Biodiversity Research Project. 2003. **Characteristics and standards of Thai native chickens**. Published documents, Department of livestock development. (in Thai)
- Meesiripan, P. 2001. Farmer's potential on native chicken production, Uttaradit province. Master Thesis of Science (Agriculture), Chiang Mai University. (in Thai)
- Phromnoi, S. and Dontongdang, S. 2016. Genetic diversity of Khiew-Palee in Pichai district, Uttaradit province from the mitochondrial cytochrome B gene. **Phranakorn Rajabhat Research Journal (Science and Technology)** 11(Special edition): 355-365. (in Thai)
- Phromnoi, S., Mingchai, C., Yeamkong, S., Khetpiyarat, P., Chitmun, S., Rodboonsong, S. and Thanarak, R. 2021. **Research Report on Economic development based on biodiversity of Khiew-Palee as endemic animal to increase competitiveness on conservation and sustainability in Uttaradit Province**. National Research Council of Thailand. (in Thai)
- Rattanapradit, P., Yaemkong, S., Laorodphan, N., Jaipong, P., Charoensuk, R., Numthuam, S., Incharoen, T., Chirarat, N. and Soipeth, U. 2016. Difference of traditional and wisdom of Thai native chicken farmers in Phitsanulok province. **Khon Kean Agriculture Journal** 44(Suppl. 2): 254-261. (in Thai)
- SAS. 2004. **STAT User's Guide**. SAS Institute, North Carolina.
- Tungtrakanpoung, N. 2015. **Native Chicken Naresuan, Phitsanulok Province**. Published documents, Trakoonthai Printing House Limited Partnership, Phitsanulok. (in Thai)
- Yaemkong, S. 2014. Diversity of phenotypic characteristics of Thai indigenous chickens in Phitsanulok province. **Rajabhat Journal of Sciences, Humanities & Social Sciences** 15(2): 63-73. (in Thai)
- Yaemkong, S. and Nguyen Ngoc, T. 2019. Diversity of phenotypic characteristics of White Tailed -Yellow Chicken populations reared under free range system in Phitsanulok Province, Thailand. **Biodiversitas Journal of Biological Diversity** 20(5): 1271-1280.

การประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนแบบผสมผสานผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้กับ ชุดบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารทะเล

Application of Hybrid Renewable Energy in Electricity Generation for Seafood Industrial Wastewater Treatment Industry

กิตติกร ขันแก้ว^{1*} และ นุชนาฏ นิลอ²

Kittikorn Khanklaeo^{1*} and Nutchanat Ninlaor²

Received: 3 February 2021, Revised: 3 August 2021, Accepted: 13 September 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้กับชุดบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารทะเล เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการบำบัด โดยการนำพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมมาใช้ในการทำงานของระบบควบคุมกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 350 วัตต์ ควบคุมการเคลื่อนที่ของแผงตามดวงอาทิตย์ และกังหันลมแบบแกนตั้ง ขนาด 70 วัตต์ จำนวน 2 ตัว แบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ 150 แอมแปร์ต่อชั่วโมง มีระบบควบคุมการทำงานด้วยบอร์ด Arduino แล้วทำการเขียนโปรแกรมผ่านบอร์ด Lattepanda โดยนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้ไปใช้กับชุดทดลองบำบัดน้ำเสีย ขนาด 80 ลิตร จากการทดสอบการทำงานในการบำบัดน้ำเสียพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายน้ำ ร้อยละ 98.17 98.12 และ 62.95 ตามลำดับ และมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด โดยพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม สามารถผลิตได้เฉลี่ย 3,002.8 วัตต์ ชั่วโมง ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียในแต่ละรอบใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวน 296 วัตต์ชั่วโมง และมีต้นทุนต่อหน่วยการผลิต 7.61 บาทต่อลูกบาศก์เมตร จะเห็นว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เพียงพอกับปริมาณไฟฟ้าที่ต้องการใช้ โดยในช่วงฤดูร้อนสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าช่วงฤดูฝน

คำสำคัญ: พลังงานทดแทน, พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานลม, บำบัดน้ำเสีย, อาหารทะเล

¹ สาขาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง 92150

¹ Department of Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Trang Campus, Sikao, Trang 92150, Thailand.

² สาขาวิทยาศาสตร์ทางทะเลและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง 92150

² Department of Marine Science and Environment, Faculty of Science and Fisheries Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Trang Campus, Sikao, Trang 92150, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): kh_kittikorn@hotmail.com Tel: 08 1080 6869

ABSTRACT

Objective of this research is to apply solar and wind energy to generate electricity for treating wastewater from the seafood industry to reduce the use of electrical energy in the treatment. Electric energy produced from solar and wind was used in the operation of the wastewater treatment control system. It was implemented by using a 350-watt solar cell to control the movement of the panels following the sun and two 70-Watt vertical axis wind turbines with 12 Volt 150 Amp-hour battery. Arduino board was used for a control system and LattePanda board was used in programming. The electric energy obtained was then used with the 80 liters wastewater treatment. The results revealed that the removal efficiencies of COD TSS and TDS are 98.17%, 98.12% and 62.95%, respectively. These are found to be within the standard. The electric power from solar energy and wind power can produce an average of 3,002.8 Watt hours where the wastewater treatment process uses 296 Watt hours of electricity in each cycle. The cost per production unit is 7.61 Baht per cubic meter. It was clearly indicated that the electricity produced is sufficient for the basic needs of electricity. During the summer, it can produce more electricity than rainy season.

Key words: renewable, solar energy, wind energy, wastewater treatment, seafood

บทนำ

ประเทศไทยตั้งอยู่ในพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการนำพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมไปใช้ประโยชน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ย 4-5 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน โดยศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยมีการกระจายตามพื้นที่ที่รังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อปี พบว่าบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุด 18-20 เมกกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน และเมื่อทำการเฉลี่ยความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยทั้งปีของพื้นที่ทั่วประเทศ พบว่ามีค่าเท่ากับ 4.88 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน (Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2017) และจากการสำรวจศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย พบว่าเป็นเขตที่มีความเร็วลมต่ำถึงปานกลาง 4-5 เมตรต่อวินาที ส่งผลให้การนำกังหันลมมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าควรเริ่มต้นที่ความเร็วลมไม่เกิน

3 เมตรต่อวินาที (Energy Policy and Planning Office, 2015)

อุตสาหกรรมอาหารทะเล เป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำจำนวนมากในกระบวนการผลิต ทั้งจากขั้นตอนการล้างวัตถุดิบ ล้างผลิตภัณฑ์ และล้างทำความสะอาดเครื่องจักร ฯลฯ โดยน้ำที่ผ่านการใช้แล้วจะมีการปนเปื้อนของเศษเนื้อปลา เลือดปลา หรือชิ้นส่วนของวัตถุดิบ ส่งผลให้น้ำมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในปริมาณสูง จะต้องบำบัดให้คุณภาพน้ำมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนด ก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารทะเลมักใช้การบำบัดแบบเดิมอากาศ ซึ่งเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสีย คือ ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบบำบัดค่อนข้างสูง เนื่องจากมีความจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ เช่น บั้มดูดตะกอนจุลินทรีย์ เครื่องเดิมอากาศ เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช)

เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Sirianantapaiboon, 2014) ดังนั้นจึงได้ศึกษาการนำพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมมาผลิตไฟฟ้าสำหรับใช้กับชุดบำบัดน้ำเสียเพื่อใช้สำหรับอุตสาหกรรมอาหารทะเล รวมถึงกิจกรรมอื่นๆ ที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ในการรองรับและบำบัดน้ำเสีย ในการออกแบบชุดบำบัดสามารถติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลมในพื้นที่บ่อบำบัดได้โดยตรง ซึ่งสามารถเพิ่มขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าได้ตามปริมาณการบำบัดที่ต้องการโดยติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลมที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าที่มากขึ้น หรืออาจผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานอื่นๆ ที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรม นอกจากนั้นยังสามารถออกแบบชุดบำบัดแบบเคลื่อนที่ เพื่อใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียขนาดเล็กเฉพาะกิจ เช่น โรงงานปลาแป้น แปะปลาในย่านชุมชน ร้านอาหาร และอาจนำไปใช้กับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ โดยการศึกษาเป็นการช่วยส่งเสริมให้ใช้พลังงานทดแทน เพื่อลดภาระค่าไฟฟ้าของระบบบำบัดน้ำเสีย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ชุดบำบัดน้ำเสียพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม

ชุดบำบัดน้ำเสียใช้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมเพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ปั๊มเติมอากาศ ปั๊มดูดน้ำ ระบบเปิด-ปิด น้ำ ไบพาสกวนสาร ฯลฯ ลักษณะของชุดบำบัดน้ำเสีย ดังภาพที่ 1(ก)

1.1 ถังบำบัดน้ำเสีย

1.1.1 ถังผสมสารเคมี ปริมาตร 80 ลิตร ทำจากอะคริลิก ส่วนบนของถังมีชุดเติมสารส้มและโพลีเมอร์ และมีสเต็ปเปอร์มอเตอร์ควบคุมการหมุนของไบพาส ส่วนล่างของถังเป็นรูปกรวยพร้อมมีวาล์วเปิด-ปิด เพื่อถ่ายตะกอนออกจากถัง

1.1.2 ถังเติมอากาศ ปริมาตร 80 ลิตร เป็นถังพลาสติกที่ทำหน้าที่รับน้ำที่แยกตะกอนแล้วจากถังผสมสารเคมี ภายในถังมีจุลินทรีย์และปั๊มเติมอากาศ

1.1.3 ถังตกตะกอน ปริมาตร 80 ลิตร ทำจากอะคริลิก มีหน้าที่ตกตะกอนจุลินทรีย์ ส่วนล่างของถังเป็นรูปกรวยพร้อมมีวาล์วเปิด-ปิด เพื่อดูดตะกอนจุลินทรีย์กลับไปยังถังเติมอากาศ

1.2 การผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับชุดบำบัดน้ำเสีย

1.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 350 วัตต์ ชนิด Mono Crystalline แรงดันสูงสุดที่ 47.24 โวลต์ กระแสสูงสุดที่ 9.61 แอมแปร์

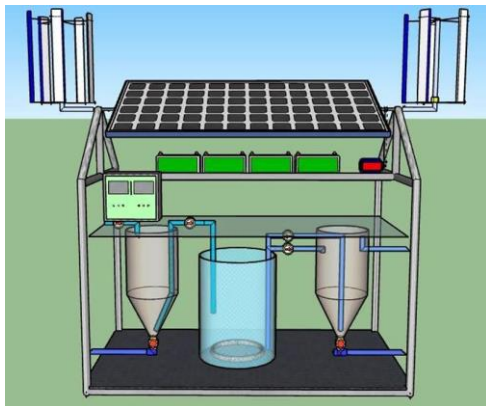
1.2.2 กังหันลมแบบแกนตั้ง โครงสร้างภายนอกเป็นสังกะสี มีน้ำหนักเบา มีใบพัดจำนวน 10 ใบ ความสูง 60 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร จำนวน 2 ตัว ขับเคลื่อนไบพาสด้วยเจนเนอเรเตอร์ ขนาด 12 โวลต์ 70 วัตต์ 1.2 แอมแปร์ นำมาต่ออนุกรมจำนวน 2 ตัว เพื่อให้มีแรงดันขนาด 24 โวลต์

1.2.3 แบตเตอรี่ ชนิด Deep Cycle ขนาด 12 โวลต์ 150 แอมแปร์ต่อชั่วโมง จำนวน 4 ก้อน นำมาต่อกันแบบอนุกรมจำนวน 2 ชุด ชุดละ 2 ก้อน แล้วนำมาต่อกันแบบขนานเพื่อให้ได้แรงดัน ขนาด 24 โวลต์ 300 แอมแปร์ต่อชั่วโมง พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลมจะถูกเก็บไว้ในแบตเตอรี่

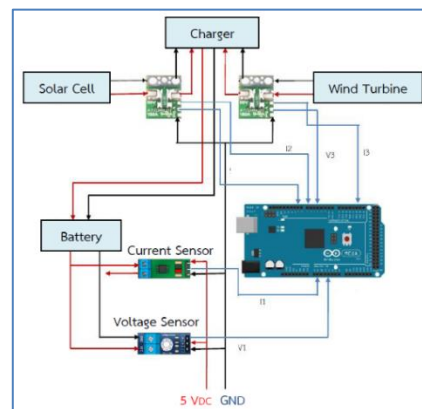
1.2.4 การควบคุมและแสดงผลการทำงาน มีการควบคุมการทำงานของชุดบำบัดน้ำเสียผ่านบอร์ด Arduino (Pumpuang, 2018) ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม โดยจะทำหน้าที่รับค่าต่างๆ เช่น ค่าความขุ่น ออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ ระดับน้ำ และแสดงผลผ่านบอร์ด Lattepanda และบอร์ด Arduino ยังทำหน้าที่

ควบคุมการทำงานของมอเตอร์สำหรับใบพัด บั้มเติม
อากาศ บั้มดูดน้ำ วาล์วเปิด-ปิด ถึง การเชื่อมต่อ

วงจรไฟฟ้าดังภาพที่ 1(ข)



(ก)



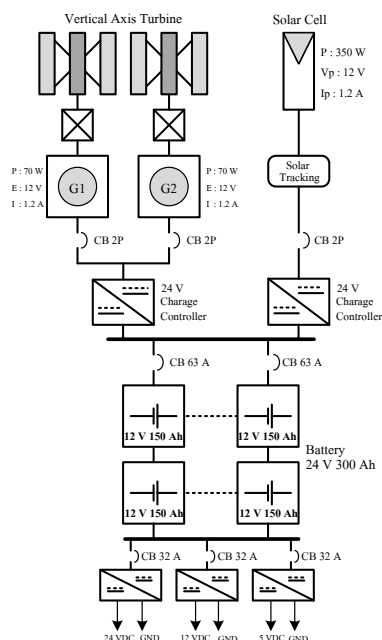
(ข)

ภาพที่ 1 ก) ชุดบำบัดน้ำเสียพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม

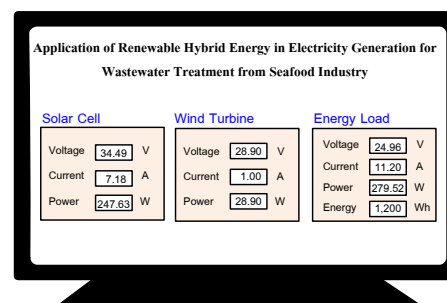
ข) การเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลม

ระบบการผลิตและจ่ายไฟฟ้า การแสดงค่า
ปริมาณไฟฟ้า และค่าคุณภาพน้ำผ่านทางหน้าจอของ
ชุดบำบัด ดังภาพที่ 2(ก) และ 2(ข) และผังการ

ควบคุมการใช้กำลังไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์
และพลังงานลม ดังภาพที่ 3



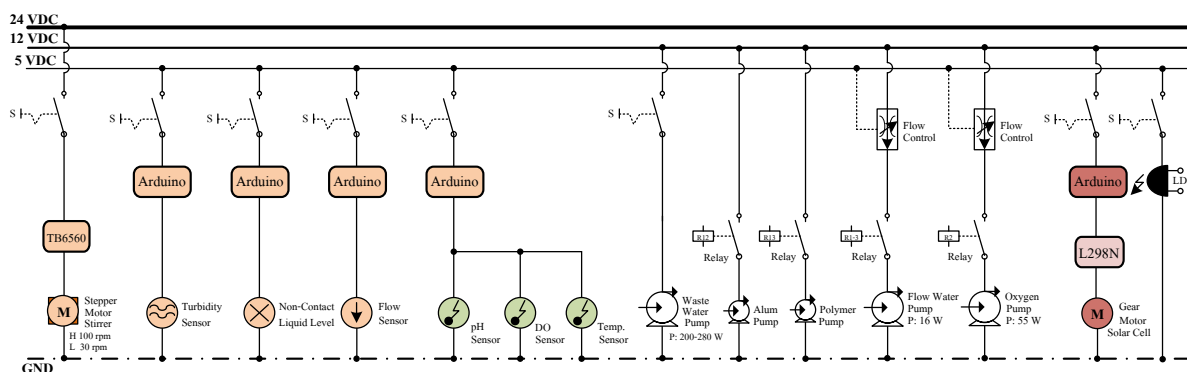
(ก)



(ข)

ภาพที่ 2 ก) วงจรการผลิตและจ่ายไฟฟ้าของระบบบำบัดน้ำเสีย

ข) การแสดงค่าปริมาณไฟฟ้าและค่าคุณภาพน้ำผ่านทางหน้าจอ



ภาพที่ 3 วงจรการควบคุมการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย

2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1 การเก็บข้อมูลพลังงาน ทำการเก็บข้อมูล ความเข้มแสงอาทิตย์และความเร็วลม จากนั้นนำไป คำนวณหาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ แล้วนำข้อมูลที่ ได้เทียบกับภาระของระบบไฟฟ้าที่ต้องใช้ในชุด บำบัดน้ำเสียส่วนต่างๆ เช่น บั๊มเติมอากาศ บั๊มดูดน้ำ การทำงานของใบพัด การปล่อยน้ำออกจากถัง ฯลฯ

2.2 การบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมี เป็น การเติมสารส้มและโพลิเมอร์ในอัตราส่วนที่ เหมาะสมเพื่อแยกตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำเสีย มีขั้นตอนดังนี้

2.2.1 การหาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม (Jar Test) โดยการใช้สารส้มและโพลิเมอร์เพื่อทำให้ เกิดการรวมตัวของตะกอน และสามารถแยกตะกอน ออกจากน้ำเสียได้ (Lawrence *et al.*, 2010) ทำโดย ตวงน้ำเสียปริมาตร 0.5 ลิตร ใส่บีกเกอร์ จำนวน 6 ใบ จากนั้นเติมสารส้มความเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 1 2 3 4 5 และ 6 มิลลิลิตร และเติมโพลิเมอร์ความ เข้มข้นร้อยละ 1 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ทุกใบ จะเห็นว่าตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียมีการจับ ตัวและตกตะกอน ทำซ้ำอีกรอบโดยใช้ปริมาณ สารส้มเท่ากับที่เติมในบีกเกอร์ที่ลักษณะน้ำมีความ ไสมากที่สุด และเติมโพลิเมอร์ ปริมาตร 1 2 3 4 5 และ 6 มิลลิลิตร จะทำให้ได้ปริมาณสารส้มและโพลิ

เมอร์ที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสีย โดยจะนำไปใช้ ในการทดสอบกับชุดบำบัดน้ำเสีย

2.2.2 ทำการค่อนน้ำจากถังรวมน้ำเสียเข้าสู่ ถังผสมสารเคมี จากนั้นเติมสารส้มและโพลิเมอร์ลง ในถังผสมสารเคมีด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ได้จาก ข้อ 2.2.1 เปิดใบพัดกวนให้น้ำเสียและสารเคมีผสม เข้ากัน โดยเมื่อเติมสารส้มกวนด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที และเมื่อเติมโพลิเมอร์ กวนด้วยความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที (Cristovao *et al.*, 2014) เก็บตัวอย่างน้ำที่แยก ขึ้นกับตะกอนไปทำการวิเคราะห์หาค่าพีเอช ซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายน้ำ (APHA., 2012) จากนั้นเปิดวาล์วส่งน้ำเสียส่วนบนที่ไม่มี ตะกอนแขวนลอยไปยังถังเติมอากาศ และเปิดวาล์ว ถ่ายตะกอนออกจากถังทางส่วนล่างที่มีลักษณะเป็น รูปกรวย

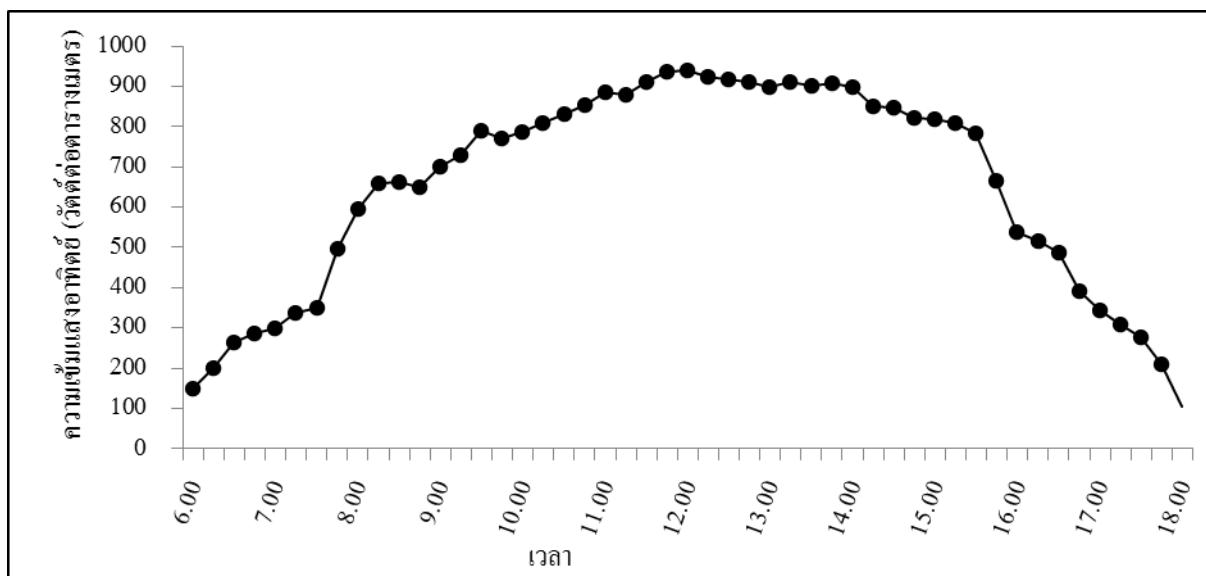
2.3 การบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบเอเอส ซึ่ง ประกอบด้วยถังเติมอากาศ และถังตกตะกอน (Department of Industrial Works, 2011) โดยในถัง เติมอากาศมีความเข้มข้นของจุลินทรีย์ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำที่ถูกส่งมายังถังเติมอากาศ จะมีการเติมออกซิเจนให้จุลินทรีย์ใช้ย่อยสลาย สารอินทรีย์ที่ยังเหลืออยู่ในน้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นจะส่งน้ำเสียและจุลินทรีย์ไปยังถังตกตะกอน

และปล่อยให้แยกชั้น เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยจุลินทรีย์จะตกตะกอนลงสู่ส่วนล่างของถัง และน้ำใสจะอยู่ส่วนบน เก็บตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์หาค่า พีเอช ซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายน้ำ จากนั้นปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วออกนอกชุดบำบัด ส่วนจุลินทรีย์จะดูด กลับไปยังถังเดิมอากาศเพื่อใช้งานต่อไป

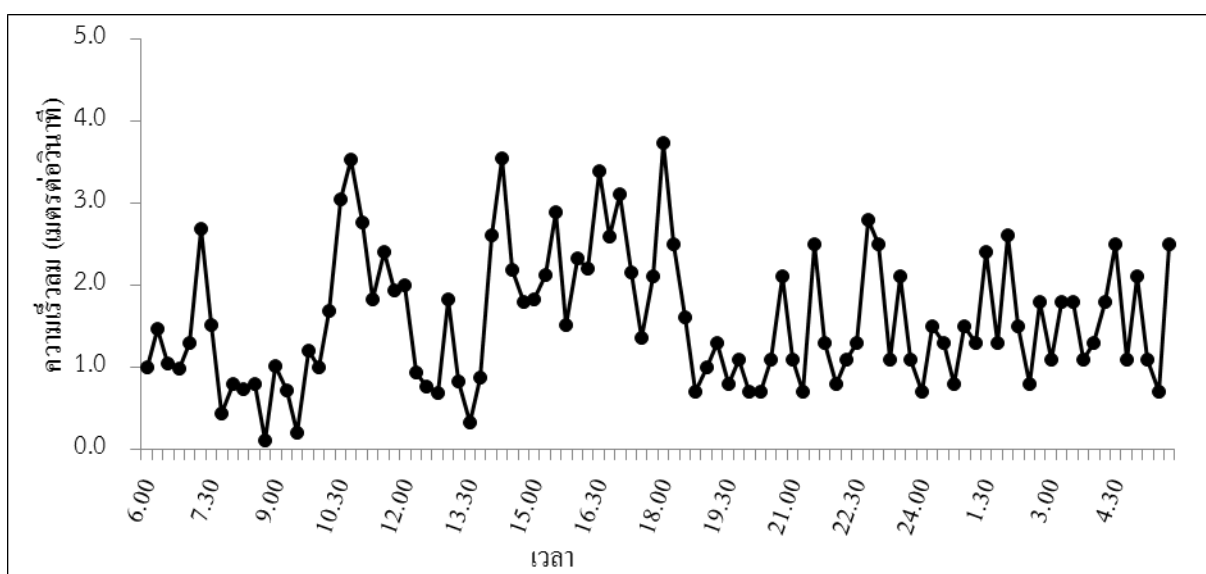
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้

ข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และความเร็วลมที่เวลาต่างๆ ในแต่ละวัน โดยทำการเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 1 เดือน พบว่าความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ย 649 วัตต์ต่อตารางเมตรต่อวัน และความเร็วลมมีค่าเฉลี่ย 1.7 เมตรต่อวินาที ดังภาพที่ 4 และ 5



ภาพที่ 4 ข้อมูลความเข้มของแสงอาทิตย์ในแต่ละวัน



ภาพที่ 5 ข้อมูลความเร็วลมในแต่ละวัน

จากการวัดความเข้มแสงอาทิตย์และความเร็วลมขณะทำการทดสอบงานวิจัย พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการตรวจวัดศักยภาพระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมขนาดจิ๋วบริเวณชายฝั่งทะเลอันดามัน (Khanklaeo, 2013) และมีค่าความเร็วลมใกล้เคียงกับรายงานโครงการจัดทำแผนที่ลมระดับไมโครสเกลสำหรับส่งเสริมการพัฒนาพลังงานลมในประเทศไทย สถานีเสาวัดความเร็วลมภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (Janjai *et al.*, 2013) และพบว่าในช่วงฤดูร้อนสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าช่วงฤดูฝน

จากข้อมูลนำค่าที่ได้มาคำนวณพลังงานไฟฟ้า โดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดเท่ากับ 3,002.8 วัตต์ชั่วโมง ซึ่งผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม 2,671.3 และ 331.5 วัตต์ชั่วโมง

ตามลำดับ มีสัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกังหันลม ร้อยละ 89:11 ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมที่ทำการทดลองในพื้นที่เดียวกัน โดยสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าในแต่ละวันพบว่าพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ร้อยละ 75-85 และพลังงานลมผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ร้อยละ 8-15 (Khanklaeo *et al.*, 2017) ทั้งนี้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลต่างๆ

2. การทดสอบชุดบำบัดน้ำเสีย

การประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนแบบผสมผสานผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้กับชุดบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารทะเล การทดสอบทำในพื้นที่โล่งที่มีแสงอาทิตย์และเป็นพื้นที่รับลมได้ทุกทิศทาง ลักษณะของชุดบำบัดน้ำเสีย แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ลักษณะของชุดบำบัดน้ำเสียด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม

2.1 การหาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม (Jar Test) พบว่า น้ำเสียปริมาตร 0.5 ลิตร ต้องใช้ปริมาณสารส้ม 6 มิลลิลิตร และโพลิเมอร์ 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำอัตราส่วนของสารส้มและโพลิเมอร์ ไปคำนวณเพื่อใช้ในการเติมลงในถังเติมสารเคมีของชุดบำบัด

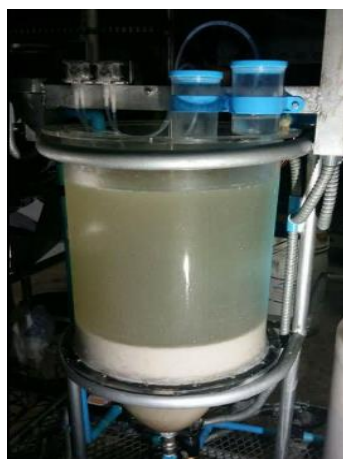
2.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยชุดบำบัด

2.2.1 การบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมี เมื่อเติมน้ำเสียลงในถังผสมสารเคมีปริมาตร 70 ลิตร และเติมสารส้ม ($6 \times 2 \times 70$) 840 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมโพลิเมอร์ ($1 \times 2 \times 70$) 140 มิลลิลิตร กวนให้ผสมกันด้วย โดยปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการทำ

ปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียที่นำมาใช้ จะสังเกตเห็นว่าเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชัน โดยสารเคมีจะเกิดการแตกตัวและจับกับตะกอนแขวนลอยขนาดเล็ก ทำให้ตะกอนแขวนลอยจะค่อยๆ มารวมกลุ่มกันจับตัวเป็นฟล็อกและมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น แล้วตกลงสู่ข้างล่างของถัง (Cristovao *et al.*, 2014) ดังภาพที่ 7(ก) ส่วนบนจะเป็นน้ำที่แยกตะกอนแขวนลอยออกไปแล้วจะส่งไปบำบัดโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพ

2.2.2 การบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยใช้ระบบเอเอส ซึ่งในถังเดิมอากาศมีการเติม

อากาศเพื่อให้จุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายอินทรีย์ในน้ำเสีย และมีใบพัดกวนเพื่อให้ น้ำเสียและจุลินทรีย์มีการสัมผัสกันทั่วถึงตลอดเวลา ลักษณะน้ำเสียและจุลินทรีย์ในถัง ดังภาพที่ 7(ข) และเมื่อทิ้งให้ตกตะกอนในถังตกตะกอนเพื่อแยกจุลินทรีย์และน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วส่วนบนจะมีลักษณะน้ำใสและตะกอนก็จะตกลงข้างล่าง ดังภาพที่ 7(ค) จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำหลังการบำบัดไปวิเคราะห์หาค่าต่างๆ และดูจุลินทรีย์กลับไปยังถังเดิมอากาศเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียในรอบต่อไป



(ก) ถังผสมสารเคมี



(ข) ถังเดิมอากาศ



(ค) ถังตกตะกอน

ภาพที่ 7 ลักษณะของน้ำในถังของชุดบำบัด

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางชีวภาพ ดังตารางที่ 1 โดยในการบำบัดทางเคมี จะเห็นว่าของแข็งแขวนลอยมีค่าน้อยลงในขณะที่ของแข็งละลายน้ำมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในน้ำเสียมีทั้งของแข็งละลายน้ำจากตัวอย่างน้ำก่อนการบำบัด และของแข็งที่เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำที่เกิดจากสารเคมีที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาโคแอกกูแลนต์ (Cristovao *et al.*, 2014) ซึ่งได้แก่สารส้มและ

โพลิเมอร์ที่ใช้ในการทำให้เกิดฟล็อกและตกตะกอนสารแขวนลอยในน้ำเสีย

ในการบำบัดทางชีวภาพด้วยระบบเอเอส จุลินทรีย์ในถังเดิมอากาศจะย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD มีค่าสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Moussaoui *et al.* (2019)

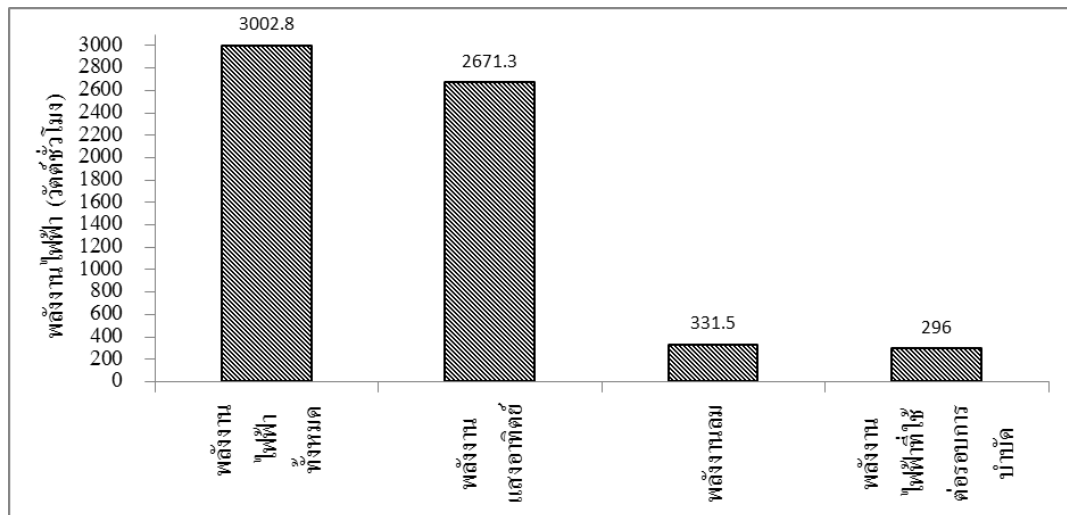
ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่บำบัดโดยชุดบำบัดเสีย

ตัวอย่างน้ำ	พารามิเตอร์			
	พีเอช	ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ของแข็งละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
น้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด	6.43	6,300	2,550	4,750
น้ำเสียหลังบำบัดทางเคมี	6.41	4,133	650	7,175
น้ำเสียหลังบำบัดทางชีวภาพ	7.26	115	48	1,760
ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ(ร้อยละ)		97.22	92.62	75.47
ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียรวม(ร้อยละ)		98.17	98.12	62.95

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำจะเห็นว่าชุดบำบัดน้ำเสียสามารถบำบัดน้ำเสียได้โดยน้ำที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพตามเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนดตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม พ.ศ. 2559 โดยชุดทดลองการบำบัดน้ำเสียทั้งการบำบัดทางเคมีและการบำบัดทางชีวภาพพบว่ามี

ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ของแข็งแขวนลอย (TSS) และของแข็งละลายน้ำ (TDS) เท่ากับร้อยละ 98.17 98.12 และ 62.95 ตามลำดับ

การประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนแบบผสมผสานผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้กับชุดบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารทะเล พบว่าต้องใช้พลังงานไฟฟ้า 296 วัตต์ชั่วโมงต่อการบำบัด ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลมเฉลี่ย 3,002.8 วัตต์ชั่วโมง ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับชุดบำบัด

เมื่อทำการทดสอบชุดบำบัดอย่างต่อเนื่อง โดยใช้ปริมาตรน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร พบว่าต้นทุนต่อหน่วยการผลิตเป็น 2.53 กิโลวัตต์ชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่ายกรณีไฟฟ้าหน่วยละ 3 บาท คิดเป็นเงิน 7.61 บาท ซึ่งในระบบบำบัดน้ำเสียอุปกรณ์เดิมอากาศและเครื่องสูบน้ำใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดเป็นร้อยละ 70 และ 25 ของการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบบำบัดน้ำเสียทั้งหมด

จากการศึกษาเทคโนโลยีชุดบำบัดน้ำเสียสำเร็จรูปแบบเคลื่อนที่ชนิดเดิมอากาศที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ส่วนใหญ่แหล่งพลังงานได้จากพลังงานไฟฟ้า ซึ่งแตกต่างกับชุดบำบัดในงานวิจัยที่ต้องการเน้นการนำพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพในพื้นที่มาใช้ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงาน เพื่อช่วยลดต้นทุนค่าไฟฟ้าในการเดินระบบ

สรุป

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลมนำมาใช้กับปั๊มเดิมอากาศปั๊มดูดน้ำ ระบบเปิด-ปิด น้ำ ไบพาสกวนสาร โดยสามารถผลิตไฟฟ้าได้เฉลี่ย 3,002.8 วัตต์ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งเพียงพอกับการะทางไฟฟ้าที่ต้องการใช้กับชุด

บำบัดน้ำเสีย โดยสามารถบำบัดน้ำเสียให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีค่าซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายน้ำเท่ากับ 115 48 และ 1,760 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีต้นทุนต่อหน่วยผลิต 7.61 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ชุดบำบัดสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม และสามารถเพิ่มขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าได้ตามปริมาณการบำบัดที่ต้องการ นอกจากนี้หากมีข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่สร้างบ่อเก็บน้ำเสียก็นำชุดบำบัดน้ำเสียนี้ไปใช้ในรูปแบบเคลื่อนที่ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนทุนสำหรับการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- APHA. 2012. **Standard method for the examination of water and wastewater**. 22th ed. American Public Health Association and the Water Environment Federation, Washington DC., USA.

- Cristovao, R.O., Botelho, C.M., Martins, R.J., Loureiro, J.M. and Boaventura, R.A. 2014. Primary treatment optimization of a fish canning wastewater from a Portuguese plant. **Water Resources and Industry** 6(2014): 51-63.
- Department of Alternative Energy Development and Efficiency. 2017. **Project to improve solar energy potential map from satellite imagery for Thailand**. Published documents, Ministry of Energy, Bangkok. (in Thai)
- Department of Industrial Works. 2011. **Wastewater treatment system**. 3th ed. Department of Industrial Works, Bangkok. (in Thai)
- Energy Policy and Planning Office. 2015. **Project to study measures to promote electricity production from renewable energy**. Published documents, Ministry of Energy, Bangkok. (in Thai)
- Janjai, S., Promsen, W. and Masiri, I. 2013. **A Final Report of the Project: Generation of Microscale Wind Maps for Promoting Wind Energy Utilization in Thailand**. Published documents, Department of Physics, Silpakorn University, Bangkok. (in Thai)
- Khanklaeo, K. 2013. The Small Hybrid Solar and Wind for Unelectrified Home Coastal Area in Thailand, pp. 751-756. *In Proceedings of InternationalConference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies (2013 AEDCEE)*. Thaksin University, Thailand.
- Khanklaeo, K., Karnjana, S. and Inpan, P.H. 2017. Landslide Warning System by Solar Energy and Wind Energy for Community, pp. 1-8. *In Proceedings of 16th National Environmental Conference and 6th International Conference on Environmental Engineering*. Environmental Engineering Association of Thailand. (in Thai)
- Lawrence, K., Nazih, K., William, A. and Donald, B. 2010. **Flotation Technology**. Humana Press, New York.
- Moussaoui, T.El., Belloulid, M.O., Jaouad, Y., Mandi, L. and Ouazzani, N. 2019. Municipal sewage wastewater treatment by activated sludge process : results of a pilot scale study. **Applied Journal of Environmental Engineering Science** 5(4): 390-401.
- Pumpuang, P. 2018. **Writing and application of Arduino programs**. Se-Education Public Company Limited, Bangkok. (in Thai)
- Siriantapaiboon, S. 2014. **Wastewater treatment system**. Top Publishing, Bangkok. (in Thai)

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด

Development of Crispy Vegetable Chip with Protein Supplement from Crickets

อัจฉรา ดลวิทยาคุณ* จิรภัทร ไกรสมรส ปฏิภาณ จันทศิริ วริศรา วุฒิชชาติ และ อำไพ สงวนแว

Achara Dholvitayakhun*, Jiraphat Krisomros, Patipha Chantharasiri, Warissara Wutthichat
and Ampai Sanguanval

Received: 19 May 2021, Revised: 9 July 2021, Accepted: 31 August 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด โดยทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของไขมันที่ร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 เพื่อใช้ผสมในผักโขมและกระเจี๊ยบเขียว วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีทดสอบความชอบ (9-Point Hedonic Scales) ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมของผักแผ่นประกอบด้วย ผักโขม : กระเจี๊ยบเขียว : ไขมันที่ร้อยละ 40 : 40 : 20 มีคะแนนความชอบรวมอยู่ในเกณฑ์ชอบปานกลาง (7.47 ± 11.33) ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความสว่าง (L^*) 28.34 ค่าสีแดง (a^*) -2.08 ค่าสีเหลือง (b^*) 13.77 ความหนา 0.25 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำอิสระ 0.54 และเมื่อนำสูตรดังกล่าวมาเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักผักตามลำดับ พบว่า ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดร้อยละ 10 มีคะแนนการยอมรับมากที่สุดอยู่ในเกณฑ์ชอบปานกลาง (7.27 ± 1.17) ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความสว่าง (L^*) 14.43 ค่าสีแดง (a^*) 4.73 ค่าสีเหลือง (b^*) 21.37 ความหนา 0.26 มิลลิเมตร และปริมาณน้ำอิสระ 0.54 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณค่าทางโภชนาการประกอบด้วย โปรตีนร้อยละ 24.38 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 48.37 ไขมันร้อยละ 5.32 ปริมาณแคลอรีทั้งหมดร้อยละ 6.22 ปริมาณเส้นใยร้อยละ 8.56 ค่าพลังงานความร้อน 423.98 กิโลแคลอรีต่อตัวอย่าง 100 กรัม และหนึ่งหน่วยบริโภค 30 กรัม มีปริมาณโปรตีน 7 กรัม ซึ่งมีปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับเต้าหู้ยักอย่างสาหร่ายแผ่นทางการค้า ดังนั้นผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบที่เสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดร้อยละ 10 จึงสามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพได้ในอนาคต

คำสำคัญ: ผักแผ่นอบกรอบ, ยอดผักโขม, กระเจี๊ยบเขียว, ไขมัน, จิ้งหรีด

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก 41/1 ตำบลไม้งาม อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000
Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, 41/4 Mai-Ngarm, Muang, Tak 63000, Thailand.

* ผู้เขียนประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): achara2518@yahoo.co.th Tel: 08 5910 8165

ABSTRACT

The objective of this research was to develop a crispy vegetable chip with a protein supplement from crickets. Different ratios of watermeal at 5%, 10%, 15%, 20% and 25% by weight of chayote and okra were studied. Chemical, physical properties, and a sensory evaluation by 9-point hedonic scales of the crispy vegetable chip were investigated. Results revealed that the suitable crispy vegetable chip was mixed with chayote, okra, and watermeal at a ratio of 40%: 40%: 20%, respectively. This product had the overall sensory satisfaction at a medium level (7.47 ± 1.33). The color L^* , a^* , b^* values were 28.34, -2.08 and 13.77 respectively; thickness was 0.25 mm and water activity was 0.54. Therefore, the crispy vegetable chip at this ratio was selected for supplementing protein from crickets at 5, 10, and 15 % by weight of vegetable. It was found that the crispy vegetable chip with 10% of crickets had a satisfaction score at a medium level (7.27 ± 1.17). This product had L^* , a^* , and b^* values of 14.43, 4.73, and 21.37, respectively; thickness was 0.26 mm. and water activity was 0.54. The nutrition analysis showed that the developed product consisted of 24.38% protein, 48.37% carbohydrate, 5.32% fat, 6.22% total ash, 8.56% fiber, and 423.98 kcal/100 gram product. The protein content was 7 grams which was higher than that of the protein content of the commercial seaweed snack based on a serving size of 30 grams. Therefore, crispy vegetable chip with 10% of crickets can be developed into healthy food products in the future.

Keywords: crispy vegetable chip, chayote, okra, watermeal, crickets

บทนำ

ในปัจจุบันการเติบโตของธุรกิจขนมขบเคี้ยวในประเทศไทยมีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2561 มีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.8 จากปี 2560 ซึ่งมีมูลค่า 37,236 ล้านบาท และในปี 2562 คาดว่าตลาดขนมขบเคี้ยวจะมีมูลค่ารวม 38,457 ล้านบาท (Sirisatsuvo *et al.*, 2019) กลุ่มขนมขบเคี้ยวที่มีการเจริญเติบโตมากที่สุด คือ กลุ่มขนมขบเคี้ยวประเภทอื่นๆ เช่น สาหร่าย เมล็ดพืช ปลา ปลาหมึก และแมลง โดยมีการเจริญเติบโตขึ้นถึงร้อยละ 19 จากปี 2557 (Food Intelligence Center, 2016) ทั้งนี้ เนื่องจากแนวโน้มปัจจุบันคนส่วนใหญ่เริ่มหันมาดูแลสุขภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการสำรวจของศูนย์วิจัยกสิกรไทย (Kasikorn Research Center,

2020) พบว่าแนวโน้มขนมขบเคี้ยวที่ตอบสนองความต้องการในตลาด ควรมีจุดขายด้านนวัตกรรมการผลิตที่ดีต่อสุขภาพ เช่น ใช้วัตถุดิบคุณภาพสูงปรุงแต่งน้อย ให้คุณค่าทางโภชนาการสูง รสชาติอร่อย และแปลกใหม่จากวัตถุดิบในท้องถิ่น ทำให้ปัจจุบันมีความพยายามพัฒนาและวิจัยผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่มีประโยชน์เพิ่มขึ้น เช่น ขนมขบเคี้ยวจากแอปเปิ้ล (Kowalska *et al.*, 2018) ข้าวเกรียบผสมสาหร่ายทะเล (Supanpayak *et al.*, 2020) และผักแผ่นจากกระเจี๊ยบเขียวและผักบุงจิ้น (Saengthongpinit *et al.*, 2020) ตลอดจนมีการพัฒนาเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ เช่น ผลิตภัณฑ์สาหร่ายปรุงรสกรอบที่นิยมเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามสาหร่ายส่วนใหญ่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาขนมขบเคี้ยวที่มีสารอาหารครบถ้วนเหมาะสม สำหรับบริโภคในทุกกลุ่มอายุ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำผักแผ่นอบกรอบปรุงรส โดยเน้นผักที่มีอยู่ในท้องถิ่นมาพัฒนาเป็นขนมขบเคี้ยว และเพิ่มโปรตีนจากแมลงที่จัดเป็นแหล่งโปรตีนในอนาคตเพื่อเพิ่มทางเลือกให้กับกลุ่มผู้บริโภค ในการทดลองครั้งนี้จึงได้นำผัก 3 ชนิด ประกอบด้วย ชาโยเต้ เป็นผลผลิตทางการเกษตรของชนเผ่าพื้นเมือง อำเภอมะนัง จังหวัดตาก นิยมบริโภคด้วยการผัด ยังไม่มีการนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น ชาโยเต้มีปริมาณสารอาหารหลายชนิดประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต 4.51 กรัม วิตามินซี 7.70 มิลลิกรัม เส้นใย 1.70 กรัม โปรตีน 0.82 กรัม แคลเซียม 17 มิลลิกรัม ธาตุเหล็ก 0.34 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม มีคุณสมบัติช่วยขับปัสสาวะ บำรุงหัวใจ และหลอดเลือด (Boonchuay, 2017) นำมาผสมกับกระเจี๊ยบเขียว ที่มีสารเมือกอยู่ในผัก เป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์โครงสร้างหลักเป็นแรมโนกาแลคทูโรแนน (rhamnogalacturonan) คล้ายเพกทิน มีสมบัติเป็นสารให้ความหนืด จึงมีส่วนช่วยในการจับตัว (Tanthawanit, 2018; Jaichuen and Samutsri, 2014) ทำให้สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเสริม และนำมาผสมรวมกับไข่น้ำหรือไข่ฝาคี้น้ำลักษณะสีเขียวขนาดเล็กคล้ายไข่ปลาที่มีโปรตีนสูง (plant protein) ร้อยละ 45 ของน้ำหนักแห้ง (Pradtanaplian, 2020) แคลเซียม 59 มิลลิกรัม และเบต้า-คาโรทีน 64.16 RE ในส่วนที่ทานได้ 100 กรัม (Chaikulsareewath and Amsem, 2007) ตลอดจนมีการเสริมโปรตีนเข้าไปในผักแผ่น โดยใช้จิ้งหรีดที่มีโปรตีนสูงถึงร้อยละ 69 เมื่อเทียบกับโปรตีนในเนื้อวัวเนื้อหมูและไก่ที่มีร้อยละ 43, 29 และ 31 ตามลำดับ จิ้งหรีดจัดเป็นโปรตีนทางเลือก (Pradtanaplian, 2019) โดยทำการศึกษาการขึ้นรูปผักแผ่น อัตราส่วนของผักที่เหมาะสมในการทำผักแผ่น และอัตราส่วนของ

จิ้งหรีดที่เสริมในผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางกรอบ รสชาติ และมีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบ

ชาโยเต้ (ตลาดคอยมูเซอล่าง จังหวัดตาก) กระเจี๊ยบเขียวพันธุ์ okar และ ไข่ น้ำ หรือ ฝาคี้น้ำ (ตลาดเช้าเทศบาล 3 จังหวัดตาก) ซอสทอดรียากิ (ตราทาคุมิ อายิ บริษัทอายิโนะโมะโตะ จำกัด ประเทศไทย) ผงบาร์บีคิว (ตราไทเซฟ บริษัทโพร์ ฟูดส์ จำกัด, ประเทศไทย) และจิ้งหรีดพันธุ์ทองดำ (ตลาดนั่งยองคลองขาม, จังหวัดตาก) วิธีการเตรียมจิ้งหรีดผง นำจิ้งหรีดมาล้างทำความสะอาด อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ปั่นด้วยเครื่องบดของแห้ง นาน 2 นาที ร่อนด้วยตะแกรงขนาด 60 เมช เก็บใส่ถุงซีลสุญญากาศแบบเรียบ (Nylon film) แช่ตู้เย็นอุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการทดลอง

วิธีการเตรียมจิ้งหรีดผง

นำจิ้งหรีดมาล้างทำความสะอาด อบ (Fry King รุ่น FR-45D) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ปั่นด้วยเครื่องบดของแห้ง (PHILIPS รุ่น HR1393) นาน 2 นาที ร่อนด้วยตะแกรงขนาด 60 เมช เก็บใส่ถุงซีลสุญญากาศแบบเรียบ (Nylon film) และเก็บรักษาในอุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส

วิธีการเตรียมผักแผ่น

คัดแปลงมาจาก (Tanganurat et al., 2018) เริ่มจากนำผักที่ใช้ในการทดลองจำนวนรวม 500 กรัม อัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 1 มาล้างทำความสะอาด หั่นผัก (ชาโยเต้และกระเจี๊ยบเขียว) ขนาด 1 นิ้ว นึ่งในลังถึงที่มีน้ำเดือด นาน 5 นาที พักให้เย็น นำผักที่พักไว้ในเครื่องปั่น (JTC รุ่น TM-800A) และเติมน้ำ 300 กรัม ปั่นนาน 2 นาที นำผักที่ปั่นขึ้นตั้งไฟให้อุณหภูมิของผักได้ 100 องศาเซลเซียส จับเวลานาน 2

นาที และนำส่วนผสมของเครื่องปรุงน้ำแป้งที่ใช้ปริมาณคงที่กับผักแผ่นทั้ง 5 สูตรต่อน้ำหนักผัก 800 กรัม ตามอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 1 โดยเริ่มจากผสม พริกไทยป่น เกลือ น้ำตาลทราย ซีอิ๊วขาว พริก

ป่นละเอียด แป้งมันสำปะหลัง น้ำเปล่า ผสมให้เข้ากัน เทส่วนผสมเครื่องปรุงลงในผักป่น คนต่อนาน 5 นาที ยกลงจากทั้งไว้ในเย็น (อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมน้ำแป้งที่ใช้ผสมในผักแผ่น

ส่วนผสม	ร้อยละ
น้ำเปล่า (ผสมเครื่องปรุง)	80.16
แป้งมันสำปะหลัง	16.03
น้ำตาลทราย	2.40
พริกป่น	0.40
เกลือ	0.40
ซีอิ๊วขาว	0.40
พริกไทยป่น	0.20
รวม	100

วิธีการขึ้นรูปผักแผ่น

กรรมวิธีการขึ้นรูปตัดแปลงจาก (Deepanya, 2009) โดยนำผักป่นผสมน้ำแป้งที่ผ่านความร้อนในปริมาณ 180 กรัม/ถาด มาตักใส่ถาดที่มีแผ่นรองเทปร้อน ขนาด 27×36 เซนติเมตร เกลี่ยให้เรียบให้เสมอกัน นำเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง และนำออกจากตู้อบพักไว้ให้เย็น นาน 2 นาที ตัดขนาด 3×10 เซนติเมตร เก็บใส่ถุงร้อน (Polypropylene; PP ขนาด 9×14 เซนติเมตร)

วิธีการคลื่อน้ำซอสเทอริยากิผสมผงบาร์บีคิว

โดยนำผักแผ่นที่ผ่านการอบมาเคลือบด้วยน้ำซอสเทอริยากิผสมผงบาร์บีคิว ส่วนผสมคัดแปลงจาก (Chucherd and Limtiyayothin, 2016) เริ่มจากนำซอสเทอริยากิ, น้ำเปล่าและผงบาร์บีคิวในอัตราส่วนร้อยละ 29, 57 และ 14 ตามลำดับ ผสมให้เข้ากัน และใช้แปลงทาน้ำซอสเคลือบลงบนผักแผ่นทั้ง 2 ด้าน อบอุ่นด้วยตู้อบ (Kitchen Mall รุ่น HT-D10P) อุณหภูมิ

100 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง พักให้เย็น นาน 2 นาที บรรจุในถุงออลูมิเนียมฟอยล์

2. การศึกษาอัตราส่วนของไขมันที่เสริมในผักแผ่นอบกรอบเคลือบปรุงแต่งกลิ่นรส

การศึกษ้อัตราส่วนของไขมันที่เสริมในผักแผ่น 2 ชนิดที่ใช้เป็นส่วนประกอบหลักคือ ซาโยเต้ และกระเจี๊ยบเขียว จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า ซาโยเต้เป็นผักมีเส้นใยสูงเป็นส่วนให้เนื้อเส้นใยของผักแผ่น ในขณะที่กระเจี๊ยบเขียวจะเป็นส่วนให้เส้นใยและตัวประสาน เนื่องจากสารเมือกในกระเจี๊ยบเขียวเป็นสารที่จำพวกพอลิแซ็กคาไรด์โครงสร้างหลักเป็น แรมโนกาแลคทูโรแนน (Rhamnogalacturonan) คล้ายเพคตินมีสมบัติเป็นสารให้ความหนืด (Noiduang and Phochai, 2011) ช่วยในการจับตัวเป็นแผ่นได้ จึงใช้ผักทั้งสองชนิดเป็นส่วนประกอบหลัก และปรับเปลี่ยนด้วยไขมันที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงในรูปโปรตีนจากพืช มาเสริมเข้าไปในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 ของน้ำหนักผัก (เกินร้อยละ

30 เนื่องจากใช้น้ำมีลักษณะเมื่อดกลมเล็กเมื่อผสมในปริมาณมากจะเป็นแผ่นและขาดออกจากกัน) อัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2 นำทั้ง 5 สูตรมาผลิต

และขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ผักแผ่นตามกรรมวิธีการเตรียมผักแผ่นที่ใช้ในการทดลอง และนำผลิตภัณฑ์ผักแผ่นมาวิเคราะห์คุณภาพในด้านต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 2 อัตราส่วนของใช้น้ำเพื่อเสริมในผักแผ่นอบกรอบ

สูตร	ชาโยเต้	กระเจี๊ยบเขียว	ใช้น้ำ
	ร้อยละ	ร้อยละ	ร้อยละ
1	47.5	47.5	5
2	45	45	10
3	42.5	42.5	15
4	40	40	20
5	37.5	37.5	25

การตรวจคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบ

- วัดค่าสีในระบบ CIE ด้วยเครื่องวัดค่าสี (Henter Lab รุ่น MiniScan EZ LAV) วัดค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) โดยวัดค่าตรงกลางของชิ้นของตัวอย่างผักแผ่นอบกรอบทั้ง 5 สูตร

- วัดความหนาของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper รุ่น MEXCO 150 มิลลิเมตร 0.02 มิลลิเมตร/6" $\times$ 1/1000 in) วัดความหนาของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นจำนวน 3 แผ่นวัด 3 ซ้ำ

- ตรวจสอบลักษณะรูปร่าง (Morphology) ของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบทั้ง 5 ตัวอย่าง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope) กำลังขยาย 60 เท่า นำตัวอย่างมาตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง $\times$ ยาว 1 นิ้ว แล้วใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องเพื่อลักษณะรูปร่างและลักษณะภายในของเส้นบันทึกผลภาพถ่ายแต่ละสูตร

- วัดปริมาณน้ำอิสระ water activity (a_w) ของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบ (ก่อนเคลือบและหลังเคลือบน้ำซอส) โดยนำผักแผ่นอบกรอบมาบิบ

ให้แตกและนำไปใส่เครื่องวัดค่า a_w (novasina รุ่น LabSwift- a_w) วัดตัวอย่างๆ ละ 3 ซ้ำ

- วัดคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเคลือบปรุงแต่งกลิ่นรส โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design; RCBD) ใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน ที่เคยรับประทานผักแผ่นหรือสาหร่ายปรุงรส ด้วยวิธี 9-point hedonic scale ให้คะแนนความชอบ 1 ถึง 9 (1=ไม่ชอบมากที่สุด และ 9=ชอบมากที่สุด) ในคุณลักษณะด้านสี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม นำคะแนนที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี Duncan, s New Multiple Test เพื่อคัดเลือกตัวอย่างที่มีคะแนนความชอบสูงสุดไปใช้ในขั้นต่อไป

3. การศึกษาปริมาณจิ้งหรีดผงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบ

เลือกสูตรผักแผ่นที่เหมาะสมจากข้อที่ 2 มาเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดผง 3 ระดับคือ ร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักผัก กรรมวิธีการผลิตผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดมีวิธีการผลิตตามข้อ 2

โดยใช้จึงหรีดผงในขั้นตอนการผสมพร้อมกับเครื่องปรงน้ำแป้ง จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพโดยวัดค่าสี วัดความหนาวัดคุณภาพทางเคมีโดยวัดปริมาณน้ำอิสระเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 2 และทางประสาทสัมผัสของผักแผ่นอบกรอบปรุงรสเสริมโปรตีนจากจึงหรีด 3 ระดับด้วยวิธี 9 - point hedonic scale ประเมินคุณภาพในด้านสี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม ใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน เพื่อคัดเลือกตัวอย่างที่มีคะแนนความชอบรวมสูงสุดไปใช้ในขั้นต่อไป

4. การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจึงหรีด

นำผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจึงหรีด ที่ได้รับความชอบสูงสุดในการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสมาวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการโดยวัด ปริมาณความชื้น (Moisture) ปริมาณไขมัน (Fat) ปริมาณเส้นใย (Fiber) ปริมาณเถ้า (Ash) ปริมาณโปรตีน (Protein) และคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรต ตามวิธีที่กำหนดโดย AOAC (2000) หาค่าปริมาณพลังงานของผลิตภัณฑ์ โดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter, AC500 และนำข้อมูลที่ได้มาจัดทำข้อมูลโภชนาการแบบย่อ

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การศึกษาอัตราส่วนของไขมันที่เสริมในผักแผ่นอบกรอบเคลือบปรุงแต่งกลิ่นรส

ผลการศึกษาอัตราส่วนของไขมันร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 ของน้ำมันผัก ที่เสริมลงในผักชาโยเต้และกระเจี๊ยบเขียว ทั้ง 5 สูตร ต่อคุณลักษณะในด้านต่างๆ พบว่า

1.1 ค่าสี พบว่า ค่าสีของผักแผ่นอบกรอบทั้ง 5 ระดับที่ผ่านการเคลือบปรุงแต่งกลิ่นรส ค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีเขียว ($-a^*$) และค่าสีเหลือง (b^*) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดย

เมื่อเพิ่มปริมาณไขมันในระดับเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ลดลง ในขณะที่ค่าสีเขียว ($-a^*$) เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 3

1.2 ความหนา ผักแผ่นอบกรอบ ทั้ง 5 ระดับพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ผลลัพธ์จะมีความหนาอยู่ในช่วง 0.25-0.26 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งค่าความหนาของผักแผ่นอบกรอบจะใกล้เคียงกับงานวิจัยผลิตภัณฑ์ชาโยเต้แผ่นปรุงรส (Deepanya, 2009) และใบบัวแผ่นทอดกรอบ (Tanganurat *et al.*, 2018) มีความหนาเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร

1.3 ลักษณะรูปร่าง (Morphology) ของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบทั้ง 5 ตัวอย่าง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope) กำลังขยาย 60 เท่า พบว่า ผักแผ่นอบกรอบสูตรที่เพิ่มไขมันจะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบ มีปริมาณเส้นใยที่ปรากฏลดลงตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากไขมันมีลักษณะเป็นเม็ดกลมเล็กๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 - 1.5 มิลลิเมตร และมีน้ำเป็นองค์ประกอบถึงร้อยละ 89 - 97 โดยน้ำหนัก (Landolt and Kandeler, 1987; Cheerapattiyut, 2009) ปริมาณไขมันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ลักษณะปรากฏของเส้นใยขาวลดลงเมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งจะสอดคล้องกับการทดลองเบื้องต้นที่พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของไขมันจะทำให้การประสานของผักแผ่นลดลงการขึ้นรูปเป็นแผ่นทำได้ยากขึ้น

1.4 ปริมาณน้ำอิสระ water activity (a_w) ของผักแผ่นอบกรอบก่อนเคลือบและหลังเคลือบน้ำซอสทั้ง 5 ระดับมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 3 ผักแผ่นที่มีส่วนผสมของไขมันเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระเพิ่มขึ้นทั้งก่อนและหลังเคลือบน้ำซอส ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำในโครงสร้างของไขมันมีปริมาณ

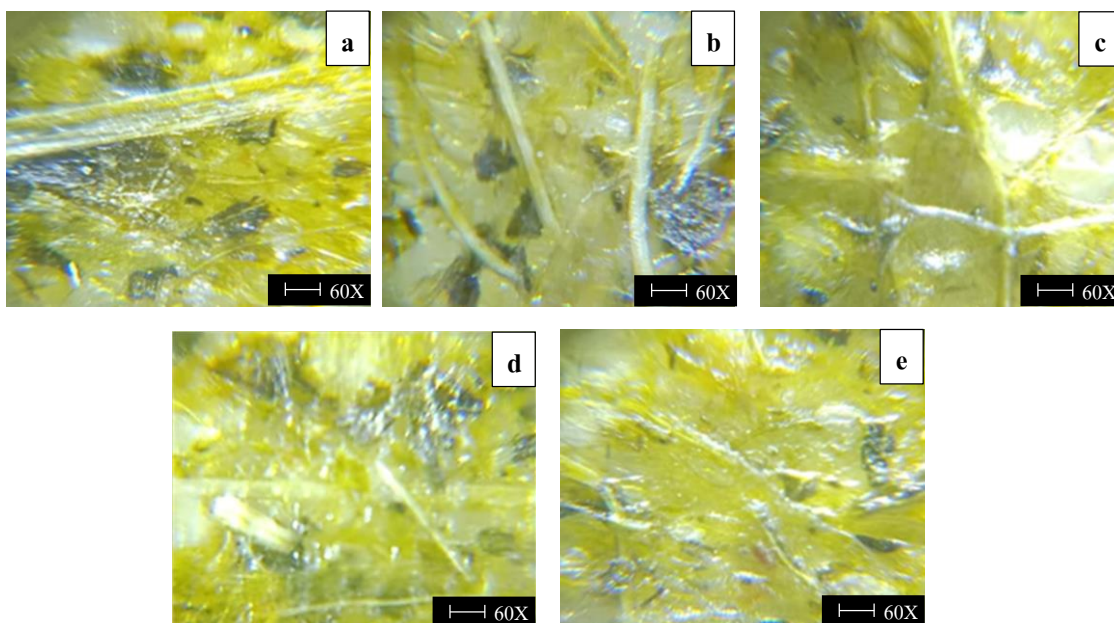
มากที่สุดคือร้อยละ 97 ในขณะที่ชาโยเต้และกระเจียบเขียวมีปริมาณน้ำอู้อยู่ร้อยละ 89.7 และ 90.8 ของน้ำหนักผัก 100 กรัม (Nutrition Division, 2001) ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนของไข่น้ำเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระในแต่ละสูตรเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยทั้ง 5 สูตรจะมีปริมาณน้ำอิสระก่อนนำไปเคลือบอยู่ในช่วง 0.53 - 0.60 และเมื่อนำไปเคลือบน้ำซอสปริมาณน้ำอิสระจะลดลงทั้ง 5 สูตร อยู่

ในช่วง 0.55 - 0.54 เนื่องจากในการเคลือบซอส ต้องนำอบให้แห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง จึงทำให้ปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเคลือบลดลงมากกว่าก่อนเคลือบ โดยผลิตภัณฑ์ทั้ง 5 สูตรมีปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์สำหรับทะเลอบ (มผช.515/2547) คือ ไม่เกิน 0.60 (Thai Industrial Standards Institute, 2004)

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีและกายภาพของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบ 5 สูตร

สูตร	ค่าสี			ความหนา ^{ns} (มิลลิเมตร)	ปริมาณน้ำอิสระ (a _w)	
	L*	a*	b*		ก่อนเคลือบ	หลังเคลือบ
1	30.00 ^a ±0.33	-1.14 ^b ±0.13	15.53 ^b ±0.31	0.25±0.01	0.56 ^a ±0.01	0.55 ^c ±0.05
2	29.25 ^{ab} ±0.34	-1.40 ^b ±0.02	14.62 ^{ab} ±0.47	0.26±0.02	0.55 ^a ±0.03	0.54 ^a ±0.04
3	29.46 ^{ab} ±0.14	-2.02 ^a ±0.05	13.94 ^a ±0.42	0.25±0.01	0.57 ^b ±0.02	0.54 ^a ±0.02
4	28.34 ^b ±0.53	-2.08 ^a ±0.02	13.77 ^a ±0.18	0.25±0.01	0.58 ^b ±0.05	0.54 ^{ab} ±0.06
5	27.14 ^c ±0.47	-2.16 ^a ±0.26	13.74 ^a ±0.75	0.26±0.02	0.60 ^c ±0.04	0.54 ^{bc} ±0.04

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



ภาพที่ 1 โครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ฟกแผ่นรอบ 5 สูตร โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 60X ของ (a) ผักผสมไข่น้ำร้อยละ 5 (b) ผักผสมไข่น้ำร้อยละ 10 (c) ผักผสมไข่น้ำร้อยละ 15 (d) ผักผสมไข่น้ำร้อยละ 20 (e) ผักผสมไข่น้ำร้อยละ 25

1.5 การทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส ของผลิตภัณฑ์ฟกแผ่นรอบ ทั้ง 5 อัตราส่วน มีคะแนนความชอบสี ด้านกลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) อย่างไรก็ตามฟกแผ่นสูตรที่ 4 (ไข่น้ำที่ร้อยละ 20) มีแนวโน้มคะแนนความชอบรวมมากที่สุด โดยมี

คะแนนความชอบสี ด้านกลิ่น รสชาติ และความชอบ โดยอยู่ในระดับ ชอบปานกลาง (7.13 - 7.47) ดังแสดงในตารางที่ 4 จึงนำอัตราส่วนของสูตรที่ 4 ประกอบด้วย ไข่เต๋, กระเจี๊ยบเขียว และไข่น้ำ ที่ร้อยละ 40, 40 และ 20 ตามลำดับ เพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

ตารางที่ 4 คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสของฟกแผ่นรอบเคลือบปรุงแต่งกลิ่นรส

สูตร	คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส			
	สี ^{ns}	กลิ่น ^{ns}	รสชาติ ^{ns}	ความชอบโดยรวม ^{ns}
1	7.07±1.51	7.13 ±1.48	7.17±1.46	7.43±1.63
2	7.40±1.28	7.33 ±1.06	7.10±1.52	7.20±1.21
3	7.57±1.19	7.00 ±1.64	7.03±1.90	7.13±1.63
4	7.47±1.20	7.13 ±1.31	7.13±1.53	7.47±1.33
5	6.90±1.54	6.73±1.62	6.83±1.78	7.07±1.76

หมายเหตุ: ^{ns} ค่าเฉลี่ยของแนวตั้ง หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.5

2. การศึกษาปริมาณจิ้งหรีดผดต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบ

ผลการศึกษาอัตราส่วนของจิ้งหรีดที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด 3 ระดับ คือ ร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักผักตามลำดับ ต่อคุณลักษณะในด้านต่างๆ พบว่า

2.1 ค่าสี ของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดที่ผ่านการเคลือบปรุงแต่งกลิ่นรสทั้ง 3 ระดับ พบว่า เมื่ออัตราส่วนของจิ้งหรีดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ ค่าความสว่าง (L^*) ลดลง ค่าสีแดง (a^*) เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อค่าสีเหลือง (b^*) ของผลิตภัณฑ์ ($p > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 5 ทั้งนี้เนื่องจากจิ้งหรีดผด มีลักษณะเป็นผงหยาบสีน้ำตาลดำทำให้ค่าความสว่างลดลงในขณะที่ค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับวิจัยที่ศึกษาผลของจิ้งหรีดผดต่อคุณภาพผักกึ๋นแปงข้าวเจ้า (Sanom and Jangchud, 2020) และคุกกี้ข้าวโอ๊ต (Biró *et al.*, 2020) ที่พบว่าผลิตภัณฑ์จะมีสีคล้ำขึ้น เมื่ออัตราส่วนของจิ้งหรีดผดเพิ่มขึ้น

2.2 ความหนา ของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดที่ผ่านการเคลือบปรุง

แต่งกลิ่นรส ทั้ง 3 ระดับ พบว่า อัตราส่วนของจิ้งหรีดที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อขนาดความหนาของผักแผ่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดทั้ง 3 ระดับมีความหนาอยู่ในช่วง 0.25 - 0.26 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับของผลิตภัณฑ์แผ่นก่อนเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด

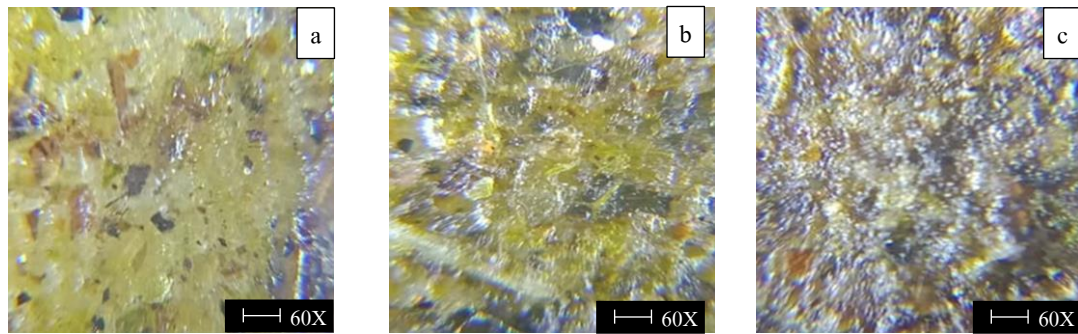
2.3 ลักษณะรูปร่าง (Morphology) ของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดทั้ง 3 ระดับ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope) กำลังขยาย 60 เท่า พบว่า เมื่อปริมาณจิ้งหรีดผดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้สีของผักแผ่นมีสีคล้ำขึ้นมีจุดดำๆ กระจายทั่วตามประมาณจิ้งหรีดที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2

2.4 ปริมาณน้ำอิสระ water activity (a_w) ของผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดทั้ง 3 ระดับ พบว่า อัตราส่วนของจิ้งหรีดที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อปริมาณน้ำอิสระของผักแผ่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ตัวอย่างจะมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.44 - 0.46 ซึ่งทั้ง 3 สูตรมีปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อาหารทะเลอบ (Thai Industrial Standards Institute, 2004)

ตารางที่ 5 คุณลักษณะทางเคมีและกายภาพของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีด

จิ้งหรีดผด (ร้อยละ)	ค่าสี			ความหนา ^{ns} (มิลลิเมตร)	ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ^{ns}
	L^*	a^*	b^{*ns}		
5	15.26 ^a ±0.20	4.62 ^b ±0.05	21.52±0.44	0.25±0.03	0.46±0.02
10	14.43 ^a ±0.39	4.73 ^a ±0.11	21.37±0.53	0.26±0.02	0.45±0.02
15	13.90 ^b ±0.12	4.94 ^a ±0.05	20.36±0.36	0.25±0.02	0.44±0.05

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



ภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิงหรีด 3 สูตร โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 60X ของ (a) จิงหรีดผงร้อยละ 5 (b) จิงหรีดผงร้อยละ 10 (c) จิงหรีดผงร้อยละ 15

2.5 การทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส
ของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิงหรีดร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักผักตามลำดับ พบว่า ผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ตัวอย่างมีคะแนนความชอบด้านสี รสชาติ และความชอบโดยรวมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่ออัตราส่วนของจิงหรีดผงเพิ่มขึ้นส่งผลให้คะแนนความชอบด้านสีลดลงเนื่องจาก ผลิตภัณฑ์จะมีสีคล้ำเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนของจิงหรีดผงที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่คะแนนรสชาติและความชอบรวมจะเพิ่ม

มากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของจิงหรีดเพิ่มขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิงหรีดร้อยละ 10 มีคะแนนด้านรสชาติ และความชอบโดยรวมมากที่สุด คือ อยู่ในระดับความชอบปานกลาง ดังแสดงในตารางที่ 6 จึงเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิงหรีดร้อยละ 10 มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป ซึ่งมีส่วนประกอบของผักขวยเต้, กระจับเขียว, ใ้ยน้า และจิงหรีดผง ที่ร้อยละ 35, 35, 20 และ 10 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 คะแนนประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบที่เสริมจิงหรีด

จิงหรีดผง (ร้อยละ)	คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส			
	สี	กลิ่น ^{ns}	รสชาติ	ความชอบโดยรวม
5	7.23 ^b ±1.22	6.83±1.21	6.70 ^a ±1.99	6.67 ^a ±1.91
10	6.73 ^a ±1.41	6.97±1.47	7.17 ^b ±1.37	7.27 ^b ±1.17
15	6.77 ^a ±1.52	6.83±1.09	6.95 ^b ±1.45	6.97 ^b ±1.35

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

3. การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิงหรีด

ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิงหรีด

ร้อยละ 10 พบว่า มีค่า ปริมาณความชื้น โปรตีน เยื่อใยรวม ไขมัน เถ้า คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 7.19, 24.38, 8.56, 5.32, 6.22, 48.37 ตามลำดับ และพลังงาน 423.98 กิโลแคลอรี/100กรัม ดังแสดงในตารางที่ 7

โดยพบว่า ผลผลิตพันธุ์ที่พัฒนาขึ้นจะมีปริมาณไขมัน โปรตีนและคาร์โบไฮเดรต เพิ่มขึ้นในขณะที่เยื่อใย และเถ้าลดลงเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ชาโยเต้แผ่นปรุงรส (Deepanya, 2009) ที่มีปริมาณไขมัน เยื่อใย โปรตีน เถ้า และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 2.89, 16.42, 18.54, 11.24 และ 44.57 กรัมต่อ 100 กรัมตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารอาหารที่ให้พลังงาน (โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต) ในจิ้งหรีดที่เสริมเข้าไปในผลิตภัณฑ์ร้อยละ 10 มีปริมาณสูง โดยจิ้งหรีด 100 กรัมมีปริมาณโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตคิดเป็นร้อยละ 53.4, 25.4 และ 17.4 ตามลำดับ (Sihamala *et al.*, 2018) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดส่งผลให้

ผลิตภัณฑ์ลูกก็แบ่งข้าวเจ้ามีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น (Sanom and Jangchud, 2020) เมื่อนำผลวิเคราะห์มาจัดทำเป็นข้อมูลโภชนาการแบบย่อ พบว่า ผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบที่เสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดร้อยละ 10 หน่วยบริโภค (30 กรัม) ให้พลังงาน 127 กิโลแคลอรี พลังงานไขมันทั้งหมด 18 กิโลแคลอรี โปรตีน 7 กรัม คาร์โบไฮเดรต 15 กรัม ไขมันทั้งหมด 2 กรัม ใยอาหาร 3 กรัม ดังในแสดงตารางที่ 8 ผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบที่เสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดร้อยละ 10 ที่พัฒนาขึ้นมีปริมาณโปรตีน 7 กรัมมากกว่าผลิตภัณฑ์สำหรับแผ่นทางการค้าที่มีโปรตีน 4 กรัม จึงคาดว่า จะสามารถส่งเสริมเพื่อให้เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพต่อไปได้ในอนาคต

ตารางที่ 7 คุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดร้อยละ 10

สารอาหาร	ปริมาณ (ร้อยละ/100 กรัม)
ปริมาณน้ำอิสระ (a_w)	0.56±0.02
ความชื้น	7.19±0.42
โปรตีน	24.38±0.79
เยื่อใยรวม	8.52±0.46
ไขมัน	5.32±0.07
เถ้า	6.22±0.02
คาร์โบไฮเดรต	48.37±0.02
พลังงาน (Kcal/100)	423.98

ตารางที่ 8 ฉลากโภชนาการแบบย่อของผลิตภัณฑ์ผักแผ่นอบกรอบเสริมโปรตีนจากจิ้งหรีดร้อยละ 10

ข้อมูลโภชนาการ	
หนึ่งหน่วยบริโภค : 1 ถูง (30 กรัม)	
จำนวนหน่วยบริโภคต่อ ถูง : 1	
คุณค่าทางโภชนาการต่อหนึ่งหน่วยบริโภค	
พลังงานทั้งหมด 127 กิโลแคลอรี พลังงานไขมันทั้งหมด 18 กิโลแคลอรี	
ร้อยละของปริมาณที่แนะนำต่อวัน*	
ไขมันทั้งหมด 2 ก.	3
โปรตีน 7 ก.	

ตารางที่ 8 (ต่อ)

คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด 15 ก.	5
ใยอาหาร 3 ก.	12
ร้อยละของปริมาณสารอาหารที่แนะนำให้บริโภคต่อวันสำหรับคนไทยอายุตั้งแต่ 6 ปีขึ้นไป (Thai RDI) โดยคิดจากความต้องการพลังงานวันละ 2,000 กิโลแคลอรี	

สรุป

การผลิตผักแผ่นอบกรอบ พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตผักแผ่นอบกรอบประกอบด้วยชาโยเต้ร้อยละ 40 กระเจียบเขียวร้อยละ 40 ใช้น้ำร้อยละ 20 และจิ้งหรีดผงร้อยละ 10 ของน้ำหนักผัก มีคะแนนความชอบโดยรวมอยู่ในระดับชอบปานกลาง ผลผลิตทั้งหมดมีค่าความสว่าง (L*) 14.43 ค่าสีแดง (a*) 4.73 ค่าสีเหลือง (b*) 21.37 ความหนา 0.26 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำอิสระ 0.54 และคุณค่าทางโภชนาการประกอบด้วย ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน ใยรวม ไบโอฟีน แก้ว คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 7.19, 24.38, 8.56, 5.32, 6.22, 48.37 ตามลำดับ และพลังงาน 423.98 กิโลแคลอรี/100 กรัม

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists.** 17th ed. The Association of Official Analytical Chemists Inc, Washinton DC, USA.
- Biró, B., Sipos, M.A., Kovács, A., Badak-Kerti, K., Pásztor-Huszár, K. and Gere, A. 2020. Cricket -Enriched Oat Biscuit: Technological Analysis and Sensory Evaluation. **Foods** 9(11): 1-17.
- Boonchuay, P. 2017. **Chayote.** Available Source: <http://www.agriinfo.doae.go.th/year60/plan t/.pdf>, July 13, 2020. (in Thai)

- Chaikulsareewath, A. and Amsem, P. 2007. Production of *Wolffia globosa* Hartog & Plas Yoghurt. **Journal of Food Technology, Siam University** 3(1): 30-36. (in Thai)
- Cheerapatyut, K. 2009. Product Innovation of High Calcium Rice Vegetative Seasoning from Water Meal (*Wolffia globose*). Master Thesis of Science (Technopreneurship and Innovation Management), Chulalongkorn University. (in Thai)
- Chucherd, C. and Limtiyayothin, N. 2016. The Seasoned Star Gooseberry Baked Sheet Product. Bachelor of Home Economics (Food Service Industry), Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. (in Thai)
- Deepanya, W. 2009. **Research Report on Development Product of Seasoned Chayote leather.** Food Science and Technology, Rajabhat Phetchabun University. (in Thai)
- Food Intelligence Center. 2016. **Snack market in Thailand.** Available Source: <http://fic.nfi.or.th/MarketOverviewDomesticDetail.php?id=116>, January 25, 2021. (in Thai)
- Jaichuen, P. and Samutsri, V. 2014. The optimum extraction temperature of mucilage polysaccharide from Okra, Jew's ear mushroom, Ceylon spinach, and Paco Fern, pp. 415-419. *In Proceedings of Rethink: Social Development*

- for Sustainability in ASEAN Community.** Khon Kaen University, Khon Kaen. (in Thai)
- Kasikorn Research Center. 2020. **Snack Business in Indonesia.** K SME Analysis. Available Source: https://kasikornbank.com/SiteCollectionDocuments/business/sme/knowledge/article/KSMEAnalysis/Thaisnack_SME/Thaisnack_SME.pdf, January 25, 2021. (in Thai)
- Kowalska, H., Marzec, A., Kowalska, J., Samborska, K., Tywonek, M. and Lenart, A. 2018. Development of apple chips technology. **Heat and Mass Transfer/Waerme-Und Stoffuebertragung** 54(12): 3573-3586.
- Landolt, E. and Kandeler, R. 1987. **Biosystematic investigations in the family of duckweeds (Lemnaceae).** Vol.2. Veroff, Geobot. Inst., Zurich.
- Noiduang, P. and Phochai, P. 2011. Utilization of mucilage from Okra (*Abelmoschus esculentus* L. Moench.) as a stabilizer in Yanang (*Tiliacora triandra* Diels.) leave ice cream. **Journal of Food Technology, Siam University** 6(1): 35-43. (in Thai)
- Nutrition Division. 2001. **Nutritive Values of Thai Foods.** The Printing Office to Assist Veterans Organization, Nonthaburi. (in Thai)
- Pradtanaplian, M. 2019. **“Insect” New Food Trend.** NFI Food Innovation Issue. Available Source: <https://www.nfi.or.th/datas/files/Fab-BugTrend.pdf>, March 21, 2021. (in Thai)
- Pradtanaplian, M. 2020. **Water Meal High Protein Extract.** NFI Food Innovation Issue. Available Source: <https://www.nfi.or.th/datas/files/Oc> t-News-BugProtein.pdf, March 21, 2021. (in Thai)
- Saengthongpinit, W., Thakham, S., Thepthumtim, P. and Fuangfoo, P. 2015. Development of Okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) and Water Spinach (*Ipomoea aquatica* Var. reptans) Sheet as a Healthy Snack, pp. 1-10. **In The 7th NPRU National Academic Conference.** Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, Thailand. (in Thai)
- Sanom, P. and Jangchud, K. 2020. Effect of Cricket (*Acheta Domesticus*) Powder, Soy Protein Isolate and Xanthan Gum on the Qualities of Rice Flourbased Cookies. **RMUTP Research Journal** 14(2): 72-84. (in Thai)
- Sihamala, O., Saraboot, N., Chunthanom, P. and Bhulaidok, S. 2018. Nutritional value of Edible insects in Kalasin Province. **King Mongkut's Agricultural Journal** 36(2): 98-105. (in Thai)
- Sirisatsuvo, P., Tiangsoongnern, L. and Parncharoen, C. 2019. Marketing Factors Affecting the Impulse Buying Behavior of Snack Food Consumers of Generation X, Y and Z in Thailand. **Suthiparithat** 33(108): 145-159. (in Thai)
- Supanpayak, J., Chalermchaiwat, P. and Limsuwan, T. 2020. Effect of Drying Condition on the Quality of Sea Lettuce (*Ulva rigida*) and Its Application in Crispy Snack. **KKU Science Journal** 48(2): 227-235. (in Thai)
- Tanganurat, P., Lichanporn, I. and Nanthachai, N. 2018. Development of Crispy Fried Lotus

- Leaf Chip. **Agricultural Sciences Journal** 49(2): 658-660. (in Thai)
- Tanthawanit, O. 2018. **Narachip Okra Honor plant species.** Organic Farming and the Natural. Available Source: https://www.techntoday/article_86050, July 15, 2020. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. 2004. **Thai community product standard (Roasted Seaweed) 515/2547.** Available Source: http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps515_47.pdf, February 3, 2021. (in Thai)

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแท่งเพื่อสุขภาพ

Product Development of Healthy Miang Kham Bar

รตนพร บรรทัด¹ เพ็ญภา ลิ้มวัน¹ ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์^{1*} และ ดวงกมล แสงธีรกิจ²

Ratanaphon Banthad¹, Pennapa Limwan¹, Parisut Chalermchaiwat^{1*} and Duangkamon Sangteerakij²

Received: 1 August 2021, Revised: 18 October 2021, Accepted: 4 November 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแท่งที่ผลิตจากพืชผสมกับน้ำซอสเมี่ยงคำ นำไปขึ้นรูปแท่งแล้วอบแห้ง ศึกษาปริมาณของวัตถุดิบหลัก 3 ชนิด ด้วยการจัดตั้งทดลองแบบผสม คือ โปรตีนเกษตร (ร้อยละ 20-45) มะพร้าวคั่ว (ร้อยละ 20-40) และข้าวพอง (ร้อยละ 30-50) ต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของเมี่ยงคำชนิดแท่ง ผลการศึกษาพบว่าปริมาณโปรตีนเกษตรที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น แต่ค่าความสว่างและค่าความแข็งลดลง การเพิ่มปริมาณข้าวพองส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสพบว่า การเพิ่มมะพร้าวคั่วทำให้คะแนนความชอบด้านกลิ่นรสเมี่ยงคำ และรสชาติเพิ่มขึ้น นำสูตรโปรตีนเกษตร : มะพร้าวคั่ว : ข้าวพอง เท่ากับร้อยละ 32.50:30:37.50 ซึ่งมีปริมาณโปรตีนและมีคะแนนความชอบมากที่สุด มาศึกษาการทดแทนน้ำตาลมะพร้าวด้วยน้ำตาลไอโซมอลต์ในน้ำซอสเมี่ยงคำ ที่ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม), 15 และ 25 พบว่า ปริมาณน้ำตาลไอโซมอลต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่างเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งลดลง และไม่พบความแตกต่างทางสถิติต่อค่าคะแนนความชอบโดยรวม ($p>0.05$) จากทั้งสามสูตรนี้ เมื่อเก็บรักษา 15 วัน พบว่าสูตรที่มีน้ำตาลไอโซมอลต์ได้รับคะแนนความชอบในด้านความแข็ง ความเหนียว และความชอบโดยรวมมากกว่าสูตรควบคุม ผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแท่งที่พัฒนาได้ (40 กรัมต่อหนึ่งหน่วยบริโภค) จัดเป็นอาหารขบเคี้ยวชนิดแท่งเพื่อสุขภาพ โดยเป็นแหล่งของโปรตีน (6.66 กรัม) ตามเกณฑ์ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) มีค่าพลังงานสะสม เท่ากับ 4.72 กิโลแคลอรีต่อกรัม และมีคะแนนความชอบอยู่ในระดับชอบมาก

คำสำคัญ: เมี่ยงคำ, ไอโซมอลต์, โปรตีน, อาหารจากพืช, อาหารขบเคี้ยวชนิดแท่ง

¹ สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

¹ Food and Nutrition Program, Department of Home Economics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand.

² สาขาวิชาการจัดการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

² Food management Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Muang, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

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

ABSTRACT

The objective of this research was to develop Miang Kham bars, which are constructed of plant-based ingredients combined with Miang Kham sauce, dried, and formed into bars. The effects of three ingredients: texturized soy protein (20-45%) roasted dry coconut flake (20-40%) and puffed rice (30-50%) on the physical, chemical and sensory qualities of the product were investigated by using a mixture design. The results showed that increasing the texturized soy protein increased the protein content but decreased the lightness and hardness values of the product. Hardness rose as puffed rice content increased. The results of the sensory evaluation revealed that adding more roasted dry coconut flake increased the liking of the flavor and taste of Miang Kham. The formula consisting of texturized soy protein: roasted dry coconut flake: puffed rice at 32.50:30:37.50 had the highest protein content and liking score. In order to produce Miang Kham sauce, the effects of substituting isomalt for coconut sugar at levels of 0%(control), 15%, and 25% were examined. The results showed that adding isomalt increased lightness while decreasing hardness. There was no significant difference in overall liking score with these three formulas ($p>0.05$). After 15 days of storage, it was found that isomalt-containing formula received higher ratings for hardness, toughness, and overall liking than the control. The developed Miang Kham bar (40 g/ serving) was a healthy snack bar with a source of protein (6.66 g) after Ministry of Public Health Notification (No 182). The energy value was 4.72 kcal/g and the liking score of the product was “like very much”.

Key words: Miang Kham, isomalt, protein, plant-based food, snack bar

บทนำ

เมี่ยง คือ ของกินเล่นที่ใช้ใบไม้บางชนิด เช่น ใบชะพลู และใบทองหลาง เพื่อใช้ในการห่อเครื่องซึ่งมีถั่วลิสง มะพร้าว กุ้งแห้ง หัวหอม และขิงเป็นส่วนประกอบ เมี่ยงมีหลายชนิดเรียกชื่อแตกต่างกัน ได้แก่ เมี่ยงคำ เมี่ยงลาว และเมี่ยงส้ม (Royal Academy, 2021) เมี่ยงคำ เป็นเมี่ยงที่รับประทานในรูปแบบของว่างพอดีคำ โดยการนำใบชะพลูหรือใบทองหลางมาใส่เครื่องหลายอย่าง เช่น กุ้งแห้ง ขิง มะนาว หอมแดง พริกขี้หนู มะพร้าวคั่ว ถั่วลิสง และเติมน้ำเมี่ยงรสชาติเค็มหวานลงไป จากนั้นจึงห่อเป็นคำก่อนรับประทาน เมี่ยงคำเป็นอาหารว่างที่มีรสชาติเค็ม หวาน มัน เป็นที่นิยมมากในอดีตดังมีกล่าวใน

กาพย์เห่ชมเครื่องว่าง บทพระราชนิพนธ์ของพระบาทสมเด็จพระมงกุฎเกล้าเจ้าอยู่หัว (รัชกาลที่ 6) ว่า “เมี่ยงค่าน้ำลายสอ เมี่ยงสมอเมี่ยงปลาทุ ข้าวคลุกคลุกไก่หมู น้ำพริกกล้วยหัวโองา” (Na-Songkhla, n.d.) จนในปี พ.ศ. 2557 กรมส่งเสริมวัฒนธรรม กระทรวงวัฒนธรรม ได้ประกาศขึ้นทะเบียน เมี่ยงคำ ให้เป็นมรดกภูมิปัญญาทางวัฒนธรรมของชาติ (Sanamchandra Palace Library, 2018) นอกจากรสชาติแล้วเมี่ยงคำยังเป็นอาหารว่างที่มีครบทั้ง 5 หมู่ในคำเดียว มีปริมาณใยอาหารสูง (Suphanpayak, 2002) และยังมีสารพฤกษเคมีที่ได้จากสมุนไพรต่างๆ ได้แก่ ใบชะพลู มีเบต้าแคโรทีนค่อนข้างสูง ขิง หอมแดง และมะนาว มีสารประกอบในกลุ่ม ฟลาโวนอยด์ ที่มีฤทธิ์ต้าน

อนุมูลอิสระ ช่วยป้องกันการเกิดโรคมะเร็งได้ (Deepanya, 2013) แต่ในปัจจุบันนั้นหารับประทานได้ยากเนื่องจากเมียงคำใช้วัตถุดิบหลายชนิด ต้องใช้เวลาในการเตรียมวัตถุดิบที่ค่อนข้างพิถีพิถัน และอายุการเก็บรักษาค่อนข้างสั้น โดยเมียงคำสด จะสามารถเก็บไว้ได้ 3-5 วัน จึงถูกทดแทนด้วยอาหารว่างสมัยใหม่ที่สามารถเก็บรักษาได้นาน และพกพาได้สะดวก โดยเฉพาะในปัจจุบันที่มีการพัฒนาอาหารขบเคี้ยวชนิดแท่ง เพื่อตอบโจทยชีวิตที่เร่งรีบ และพฤติกรรมผู้บริโภคที่เปลี่ยนแปลงไปของกลุ่มวัยรุ่น และวัยทำงาน ดังจะเห็นได้ว่าการนำเมียงคำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ในหลายรูปแบบ เช่น เมียงคำอบกรอบ เมียงคำชุบแป้งทอด และข้าวพองอบกรอบรสเมียงคำ เป็นต้น (Kaewsuksaeng, 2015; Vatthanakul, 2015; Bureau of Vocational Education Research and Development, 2016)

ไอโซมอลต์ (Isomalt) เป็นสารให้ความหวานประเภทน้ำตาลแอลกอฮอล์ ที่ได้จากการเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำตาลซูโครสด้วยเอนไซม์ไอโซมอลโทไลส ตามด้วยการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) ได้เป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ มีความหวาน ร้อยละ 45-60 ของน้ำตาลทราย (Sucrose) และให้พลังงาน 2 กิโลแคลอรีต่อกรัม ไอโซมอลต์มีคุณสมบัติทนความร้อนในการประกอบอาหาร ไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลทั้งรูปแบบของปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) และคาราเมลไลเซชัน (Caramelization) นอกจากนั้นยังไม่ทำให้เกิดความรู้สึกตกค้างในปาก (After taste) จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อลดปริมาณพลังงานในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มที่ปราศจากน้ำตาลและยังช่วยในด้านการยืดอายุการเก็บรักษาเนื่องจากมีคุณสมบัติไม่ดูดความชื้น (Tiefenbacher, 2017) ไอโซมอลต์ถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ทอฟฟี่ ขนมอบ ช็อคโกแลต ขนมขบเคี้ยวจากผัก เคลือบผลิตภัณฑ์ลูกอม และหมากฝรั่ง เป็น

ต้น (Tavera-Quiroz *et al.*, 2015; Grembecka *et al.*, 2018)

อาหารจากพืช (Plant-based food) คืออาหารที่ทำมาจากพืช ผัก ผลไม้ เห็ด รวมไปถึงธัญพืช และถั่ว ซึ่งเป็นทางเลือกใหม่ของผู้ที่ต้องการลดการบริโภคเนื้อสัตว์ โดยเน้นใช้โปรตีนจากพืช (Plant-based protein) เพื่อทำเป็นอาหาร กระแสโปรตีนทางเลือกที่มาจากพืช เดิมเป็นที่นิยมกันในตลาดเฉพาะกลุ่มของผู้บริโภคมังสวิรัต (Vegetarian) แต่ปัจจุบันกลับเป็นตลาดกระแสหลักของโลกที่มีกำลังซื้อมากพอที่จะทำให้ผู้ประกอบการผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดกลุ่มดังกล่าว (Food Intelligence center, 2019) โดยส่วนหนึ่งขับเคลื่อนจากกลุ่มมังสวิรัตแบบยืดหยุ่น (Flexitarian) คือ ผู้ที่บริโภคเนื้อสัตว์เป็นบางครั้ง หรือพยายามลดการบริโภคเนื้อสัตว์ โดยเฉพาะในกลุ่มประเทศยุโรป มีรายงานว่าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2557-2561 มูลค่าตลาดรวมของเนื้อเทียมที่ทำจากพืช เติบโตขึ้นถึงร้อยละ 451 ซึ่งในปี พ.ศ. 2561 ยอดขายเนื้อเทียมทั่วโลกมีมูลค่า 19,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ขณะที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้รวมถึงประเทศไทยมีขุมทรัพย์มังสวิรัต และวีแกน ในปี พ.ศ. 2555-2559 เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 440 และในปัจจุบัน ปี พ.ศ. 2564 ภาพรวมของกลุ่มมังสวิรัตแบบยืดหยุ่น มีส่วนแบ่งทางการตลาดทั่วโลกถึงร้อยละ 42 การบริโภคดังกล่าวเป็นไปตามแนวโน้มของอาหารที่ดีต่อสุขภาพ และการสร้างความยั่งยืนรวมถึงตระหนักถึงสวัสดิภาพสัตว์ (Animal Welfare) ควบคู่กับการรักษาสิ่งแวดล้อมจากการทำปศุสัตว์ทั่วโลกที่มีการปล่อยแก๊สเรือนกระจกราว ร้อยละ 14 ต่อปี (Thai Health Promotion Foundation, 2018; SME Thailand, 2020; Ho, 2021; Lupang, 2021) การพัฒนาผลิตภัณฑ์เหล่านี้จึงมีแนวโน้มเติบโตทางการตลาดค่อนข้างสูง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์เมียงคำชนิดแท่งเพื่อสุขภาพที่มีคุณค่า

ทางโภชนาการโดยเฉพาะโปรตีนสูง ลดปริมาณน้ำตาลซึ่งเป็นสาเหตุการเกิดโรคติดต่อไม่เรื้อรัง (Non-communicable diseases; NCDs) นอกจากนั้นยังสะดวกในการบริโภค เก็บรักษาได้นาน ตอบโจทย์กลุ่มผู้บริโภค มังสวิรัติแบบยืดหยุ่น และกลุ่มที่รับประทานโปรตีนจากพืชเป็นหลักอีกด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สูตรและวิธีการผลิตเมี่ยงคำชนิดแห้ง

วัตถุดิบในการผลิตเมี่ยงคำชนิดแห้ง แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนน้ำซอสเมี่ยงคำ และวัตถุดิบส่วนของแห้ง เตรียมการผลิตดังนี้

1.1 น้ำซอสเมี่ยงคำ

เริ่มจากการนำขิง (ร้อยละ 3.06) ข่า (ร้อยละ 4.08) ตะไคร้ (ร้อยละ 3.40) หอมแดง (ร้อยละ 14.63) มาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำมาคั่วในกระทะด้วยไฟอ่อนให้มีกลิ่นหอมเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำวัตถุดิบทั้งหมดที่คั่วเสร็จมาปั่นด้วยเครื่องปั่นยี่ห้อ Philips 600 วัตต์ รุ่น HR 2068/20 ประเทศไทย และตำต่อให้ละเอียด แล้วนำมาผสมคลุกกับกะปิเจ (ร้อยละ 6.80) ให้เข้ากัน จากนั้นนำน้ำตาลมะพร้าว (ร้อยละ 40.81) ซีอิ๊วขาวเจ (ร้อยละ 6.80) น้ำมันมะพร้าว (ร้อยละ 6.80) และเบะแซ 20 กรัม (ร้อยละ 6.80) มาเคี่ยวในหม้อเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำส่วนผสมที่คลุกกับกะปิลงไปเคี่ยวต่อด้วยไฟอ่อนเป็นเวลา 10 นาที จนขึ้นได้ที่ เติมน้ำมันงา (ร้อยละ 3.40) แล้วเคี่ยวต่อ 3 นาที จึงนำน้ำซอสเมี่ยงคำมาทดสอบด้วยวิธี Spoon test คัดแปลงตามวิธีการของ Anonymous (n.d.) โดยการหยดน้ำซอสลงในน้ำที่เตรียมไว้ ถ้าซอสมีการเกาะตัวดีจะไม่มีการกระจายตัวออก ได้เป็นน้ำซอสเมี่ยงคำ

1.2 วัตถุดิบของแห้ง

1.2.1 ข้าวพองจากข้าวสังข์หยดพัทลุง และข้าวขาวดอกมะลิ 105 (Sriwilai *et al.*, 2018a) เม็ด

มะม่วงหิมพานต์ พริกแห้ง และมะพร้าวคั่ว นำไปอบโดยในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังอบวัตถุดิบมีค่า a_w เท่ากับ 0.30 ± 0.00 , 0.37 ± 0.01 , 0.52 ± 0.01 และ 0.34 ± 0.01 ตามลำดับ

1.2.2 โปรตีนเกษตร นำโปรตีนเกษตรไปทอดให้สุกและนำไปอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังอบโปรตีนเกษตรมีค่า a_w เท่ากับ 0.32 ± 0.01

1.2.3 ใบชะพลู การเตรียมใบชะพลูคัดแปลงตามวิธีการของ Kitjavorasatien (2010) โดยนำใบชะพลูมาหั่นขนาด 5 มิลลิเมตร ตามความกว้างของใบ แล้วนำไปอบที่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที หลังอบใบชะพลูมีค่า a_w เท่ากับ 0.55 ± 0.03

1.3 ขั้นตอนการผลิต

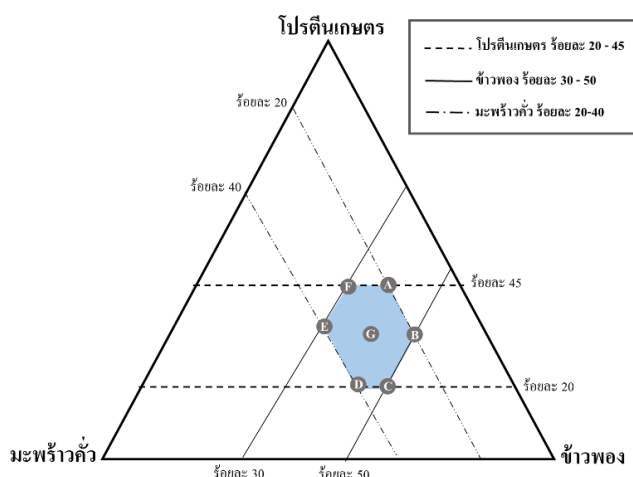
นำส่วนผสมของน้ำซอส และของแห้งมาผสมกันในอัตราส่วน 1:1 (โดยน้ำหนัก) โดยเทน้ำซอสลงในชามผสมของแห้งแล้วคลุกให้เข้ากัน จากนั้นนำไปอัดแท่งด้วยเครื่องขึ้นรูปขนาด $4 \times 2 \times 2$ ลูกบาศก์เซนติเมตร น้ำหนักแท่งละ 10 กรัม จากนั้นนำมาอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เมื่อครบเวลา 30 นาที นำมาพลิกแล้วอบต่ออีก 1 ชั่วโมง (a_w เท่ากับ 0.40 ± 0.05) ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) และนำผลิตภัณฑ์บรรจุใส่ถุงพลาสติกโพลีเอทิลีน

2. การศึกษาปริมาณของโปรตีนเกษตร มะพร้าวคั่ว และข้าวพอง ต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้ง

วางแผนการทดลองแบบผสม (Mixture design) ศึกษา 3 ปัจจัย คือ ปริมาณโปรตีนเกษตร ร้อยละ 20 - 45 ปริมาณมะพร้าวคั่ว ร้อยละ 20 - 40 และปริมาณข้าวพอง (ข้าวพองจากข้าวสังข์หยดพัทลุง : ข้าวพองจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในอัตราส่วน 1:1)

ร้อยละ 30 - 50 โดยมีปริมาณของแห้งที่เหลือ คือเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ใบชะพลู และพริกแห้ง คงที่เท่ากับร้อยละ 9.75, 0.50 และ 0.25 ตามลำดับ เกิดส่วนที่ซ้อนทับกันดังภาพที่ 1 และได้สูตรการทดลองแตกต่างกันทั้งหมด 7 สูตร (A-G) ดังตารางที่ 1

จากนั้นผลิตเมี่ยงคำชนิดแห้งตามวิธีการข้อ 1.3 เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณภาพต่างๆ ดังนี้



ภาพที่ 1 Mixture design แสดงการทับซ้อนกันของปริมาณโปรตีนเกษตร มะพร้าวคั่ว และข้าวพอง

ตารางที่ 1 สูตรของเมี่ยงคำชนิดแห้งที่มีปริมาณร้อยละของโปรตีนเกษตร มะพร้าวคั่ว และข้าวพองที่แตกต่างกัน

สูตร	โปรตีนเกษตร (ร้อยละ)	มะพร้าวคั่ว (ร้อยละ)	ข้าวพอง (ร้อยละ)
A	45	20	35
B	30	20	50
C	20	30	50
D	20	40	40
E	30	40	30
F	45	25	30
G	32.50	30	37.50

2.1 คุณภาพทางกายภาพ

2.1.1 ค่าสี วัดด้วยเครื่องวัดสี ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Colourflex ประเทศสหรัฐอเมริกา วัดค่าสีในระบบ CIE Lab โดยค่าสี L^* (ค่าความสว่างมีค่า 0-100 โดย 0 หมายถึง วัตถุที่มีความสว่างสีดำ ค่า 100 หมายถึง วัตถุที่มีค่าความสว่างสีขาว) ค่าสี a^* (+

หมายถึง วัตถุที่มีสีแดง, - หมายถึง วัตถุที่มีสีเขียว) ค่าสี b^* (+ หมายถึง วัตถุที่มีสีเหลือง, - หมายถึง วัตถุที่มีสีน้ำเงิน) วัดค่าตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

2.2.2 ค่าเนื้อสัมผัส โดยใช้เครื่อง Texture analyzer ยี่ห้อ Stable Micro Systems รุ่น TA.XT plus ประเทศอังกฤษ ตามวิธีการของ (Chueanopparat *et*

al., 2021) ใช้หัววัดแบบ Three - point bending ด้วยความเร็วในการทดสอบ (Test speed) 5 มิลลิเมตรต่อวินาที Pre-test speed 5 มิลลิเมตรต่อวินาที Post-test speed 10 มิลลิเมตรต่อวินาที รายงานผลเป็นค่าความแข็ง (Hardness) มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) วัดค่าตัวอย่างละ 5 ซ้ำ

2.2 คุณภาพทางเคมี

วัดค่า a_w ด้วยเครื่องวัดวอเตอร์แอคทิวิตี (Water activity) ยี่ห้อ Aqualab รุ่น 4 ประเทศสหรัฐอเมริกา วัดปริมาณความชื้น ตามวิธีการของ AOAC (2019) และปริมาณโปรตีน ด้วยวิธีของ Kjeldahl Method (AOAC, 2019) คำนวณหาปริมาณโปรตีนได้จาก ร้อยละโปรตีน = ร้อยละไนโตรเจน x Kjeldahl factor (6.25) วัดค่าตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

2.3 การประเมินทางประสาทสัมผัส

ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ (9-point hedonic scale) กับผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนกลุ่มเป้าหมาย อายุระหว่าง 18-30 ปี จำนวน 50 คน ซึ่งเป็นนิสิตและบุคลากรของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพมหานคร โดยต้องเป็นผู้ทดสอบชิมที่เคยรับประทานเมี่ยงคำมาก่อน คุณลักษณะที่ทำการประเมินความชอบได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี ความแข็ง กลิ่นรสเมี่ยงคำ รสชาติ และความชอบโดยรวม

3. ศึกษาปริมาณการทดแทนน้ำตาลมะพร้าวด้วยน้ำตาลไอโซมอลต์ต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้ง

นำสูตรเมี่ยงคำชนิดแห้งที่มีปริมาณโปรตีนสูง และเป็นที่ยอมรับของผู้ทดสอบจากข้อ 2 มาศึกษาการใช้น้ำตาลไอโซมอลต์เพื่อทดแทนน้ำตาลมะพร้าวในสูตรน้ำซอสเมี่ยงคำ โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ศึกษาการทดแทนที่ระดับ ร้อยละ 0 (ตัวอย่างควบคุม), ร้อยละ 15 และ 25 ตามลำดับ แล้วนำผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิด

แห้งมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ วัดค่าสี และวัดค่าเนื้อสัมผัสด้วยวิธีการเดียวกับข้อ 2.1 คุณภาพทางเคมี ได้แก่ วัดค่า a_w ตามวิธีการข้อ 2.2 และนำมาประเมินทางประสาทสัมผัส (วันที่ 0) คุณลักษณะที่ทำการประเมินความชอบได้แก่ สี กลิ่น รสเมี่ยงคำ ความแข็ง ความเหนียว รสชาติ และความชอบโดยรวม ตามวิธีการข้อ 2.3

จากนั้นทำการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้ง (วันที่ 0) ในถุงพลาสติกโพลีเอทิลีน และบรรจุใส่กล่อง ปิดสนิทเป็นเวลา 15 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) แล้วนำมาประเมินทางประสาทสัมผัสหลังเก็บรักษานาน 15 วัน คุณลักษณะที่ทำการประเมินความชอบได้แก่ สี กลิ่น รสเมี่ยงคำ ความแข็ง ความเหนียว รสชาติ และความชอบโดยรวม ตามวิธีการข้อ 2.3

4. ศึกษาคุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งที่พัฒนาได้

นำผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งที่พัฒนาได้มาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ได้แก่

4.1 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ

วัดปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน ปริมาณเส้นใยหยาบ และปริมาณคาร์โบไฮเดรต ตามวิธีการของ AOAC (2019) วัดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

4.2 ค่าพลังงานสะสม

วัดค่าพลังงานสะสมโดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ยี่ห้อ PARR รุ่น 6100 ประเทศสหรัฐอเมริกา รายงานเป็นหน่วยกิโลแคลอรี (kcal) วัดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่

ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการศึกษาปริมาณของโปรตีนเกษตร มะพร้าวคั่ว ข้าวพองต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสในผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแท่ง

ผลการศึกษาปริมาณของโปรตีนเกษตร มะพร้าวคั่ว และข้าวพองที่แตกต่างกัน 7 สูตร ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 2 ด้านลักษณะปรากฏพบว่าในสูตร A และ F มีปริมาณ

ของโปรตีนเกษตรมากที่สุดทำให้เห็นโปรตีนเกษตรชัดเจน สีของผลิตภัณฑ์จึงมีสีค่อนข้างเข้ม ในขณะที่สูตร B และ C มีปริมาณของข้าวพองมากที่สุด ลักษณะของผลิตภัณฑ์มีความพองตัว และสีของผลิตภัณฑ์มีความอ่อนกว่าสูตรอื่น ในส่วนของสูตร D และ E มีปริมาณมะพร้าวคั่วมากที่สุดลักษณะของผลิตภัณฑ์ดูมีความแน่นเพราะมะพร้าวคั่วจะทำให้มีช่องว่างของผลิตภัณฑ์น้อยลง สูตร G มีปริมาณสัดส่วนที่ใกล้เคียงกันจึงทำให้เห็นส่วนผสมต่างๆ ทั้งโปรตีนเกษตร มะพร้าวคั่ว และข้าวพองได้ทั่วชั้นของผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 2 ผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแท่งที่มีปริมาณโปรตีนเกษตร : มะพร้าวคั่ว : ข้าวพอง ที่แตกต่างกัน 7 สูตร สูตร A (45:20:35) , สูตร B (30:20:50), สูตร C (20:30:50), สูตร D (20:40:40), สูตร E (20:40:30), สูตร F (45:25:30), และสูตร G (32.50:30:37.50)

1.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแท่ง

ผลการวัดค่าสีพบว่าผลิตภัณฑ์ทั้ง 7 สูตร มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 2 โดยสูตรที่มีปริมาณโปรตีนเกษตรมากส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความสว่าง (L^*) น้อย ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในสูตร A ที่มีปริมาณโปรตีนเกษตรมากที่สุดจึงทำให้ค่าความสว่าง (L^*) น้อยที่สุดในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) มากที่สุด เพราะโปรตีนเกษตรมีสีน้ำตาลเข้ม เนื่องจากขั้นตอนของการเตรียมที่นำไปทอดและอบให้แห้ง จึงทำให้

เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดหรือการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ ที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) กับกรดอะมิโน โปรตีน หรือสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ โดยมีความร้อนเร่งปฏิกิริยา (Rattanapanone, 2008) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chayasiripan *et al.* (2013) ที่รายงานว่าปริมาณโปรตีนเกษตรที่เพิ่มขึ้นในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวชนิดแท่งรสหมี่กรอบ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความสว่าง (L^*) ลดลง และทำให้ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนั้นส่วนประกอบของ

มะพร้าวคั่วยังเป็นปัจจัยร่วมที่ทำให้ค่าความเป็นสีแดง (a^*) สูงขึ้น เนื่องจากมะพร้าวคั่วมีสีน้ำตาลเช่นกัน ผลการวิเคราะห์ด้านเนื้อสัมผัส พบว่าสูตรที่มีปริมาณโปรตีนเกษตรมาก จะทำให้ความสามารถในการยึดเกาะกันของวัตถุดิบในผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งลดลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความแข็งแรงน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chayasiripan *et al.* (2013) ที่พบว่าเมื่อส่วนประกอบในสูตรมีปริมาณโปรตีนเกษตรมาก ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวชนิดแห้งรสหมี

กรอบจะมีค่าความแข็งแรงลดลง ซึ่งในการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า สูตร A มีค่าความแข็งแรงน้อยที่สุด (38.2 N) เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนเกษตรมากที่สุด ในขณะที่สูตร C มีค่าความแข็งแรงมากที่สุด (94.68 N) เนื่องจากปริมาณโปรตีนเกษตรน้อยที่สุด แต่ทั้งนี้ส่วนประกอบอื่นก็ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงเช่นกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปริมาณข้าวพองมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรง รองลงมาคือมะพร้าวคั่ว และ โปรตีนเกษตร ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้ง

คุณภาพ	สูตร (โปรตีนเกษตร : มะพร้าวคั่ว : ข้าวพอง)						
ทาง	A	B	C	D	E	F	G
กายภาพ	(45:20:35)	(30:20:50)	(20:30:50)	(20:40:40)	(20:40:30)	(45:25:30)	(32.50:30:37.50)
L*	29.88±0.54 ^d	36.61±0.2 ^b	38.64±0.41 ^a	35.85±0.26 ^b	32.55±0.4 ^c	32.57±0.2 ^c	38.51±0.95 ^a
a*	10.49±0.81 ^a	8.49±0.47 ^{bc}	7.44±0.26 ^{cd}	7.45±0.41 ^{cd}	8.96±0.28 ^b	7.82±1.00 ^{cd}	7.24±0.31 ^d
b*	22.80±0.63 ^a	22.66±0.40 ^{ab}	22.79±1.10 ^a	21.57±0.20 ^{ab}	21.56±0.64 ^{ab}	20.77±0.19 ^b	22.29±0.88 ^a
ความแข็งแรง (N)	38.21±1.72 ^d	77.21±1.43 ^b	94.68±12.21 ^a	45.56±3.46 ^{cd}	51.08±8.45 ^c	43.54±4.22 ^{cd}	47.77±4.26 ^c

หมายเหตุ: a-d คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

1.2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้ง

ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งทั้ง 7 สูตรอยู่ในช่วง 0.40-0.44 ซึ่งมีค่า a_w ตรงตามเกณฑ์มาตรฐานของผัก ผลไม้ และธัญชาติอัดแห้ง (มผช. 902/2559) (Thai Industrial Standards Institute, 2016) การที่ค่า a_w ต่ำกว่า 0.60 นั้น เป็นช่วงที่ปลอดภัยจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (Rattanapanone, 2008) เพราะค่า a_w บอกระดับปริมาณน้ำอิสระที่เชื้อจุลินทรีย์ใช้ในการเจริญเติบโตที่เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุม และป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร มีผลโดยตรงต่ออายุ

การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์นั้นเอง จากการทดลองพบว่า สูตร F มีค่า a_w มากที่สุด เป็นผลมาจากการมีปริมาณโปรตีนเกษตรมากที่สุด โดยโปรตีนเกษตรมีคุณสมบัติในการดูดความชื้นได้ดี (Narkrugs, 1993) ซึ่งค่า a_w ที่ได้สอดคล้องกับปริมาณความชื้นที่วัดได้ กล่าวคือ เมื่อผลิตภัณฑ์มีค่า a_w สูงปริมาณความชื้นก็สูงด้วย ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้ง พบว่าสัดส่วนของโปรตีนเกษตรที่มากของสูตร A และ F ส่งผลให้มีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณความชื้นมากกว่าสูตรอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 สอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ Kitcharoenthawornchai and Hamsilawat (2015) พบว่าการเพิ่มปริมาณของโปรตีนเกษตรใน

การผลิตนักเกิดเนื้อเทียมส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ปริมาณโปรตีนที่วิเคราะห์ได้มีค่าแตกต่างกันทั้ง 7 สูตร โดยสูตรที่มีปริมาณโปรตีนมากที่สุดสามอันดับแรกคือ สูตร A, G และ F มีค่าเท่ากับร้อยละ 17.04, 16.64 และ 16.23 ตามลำดับ เนื่องจากในสูตรมีส่วนของโปรตีนเกษตรมากที่สุด รองลงมาคือข้าวพอง และมีปริมาณมะพร้าวคั่วน้อยที่สุด มีผลทำให้ค่าโปรตีนที่วัดได้มีค่ามาก ทั้งนี้เพราะปริมาณโปรตีนเริ่มต้นในวัตถุดิบที่นำมาใช้มีค่าที่แตกต่างกันตามประเภทของอาหาร กล่าวคือโปรตีนเกษตรมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 49.74 (Institute of Food Research and Product Development, 2013) ข้าวพองที่ผลิตจากแป้งข้าวกล้องหอมมะลิ 105 และแป้งข้าวกล้องงาหิวดพัทลุง มีปริมาณโปรตีน ร้อยละ 7.09 และ 8.48 (Sriwilai *et al.*, 2018b) มะพร้าวคั่ว มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 7.50 (Boong, 2015)

ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสแสดงดังตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแท่งทั้ง 7 สูตรไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในด้านลักษณะปรากฏ สี ความแข็ง และความชอบโดยรวม แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในด้านกลิ่นรสเมี่ยงคำและรสชาติ พบว่าสูตร E ได้รับคะแนนความชอบสูงที่สุด มีคะแนนความชอบอยู่ในระดับชอบปานกลาง (7.24) เนื่องจากสูตร E มีสัดส่วนของปริมาณมะพร้าวคั่วมากที่สุด จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นหอมของ

มะพร้าวคั่วที่ชัดเจน ช่วยเสริมกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ซึ่งกลิ่นรสเหล่านี้เป็นสารหอมระเหยกลุ่มไพราซีน (Pyrazine) ฟูแรน (Furans) และไพโรล (Pyrroles) ที่เกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ในระหว่างการคั่ว ทำให้มีกลิ่นถั่ว (Nut-like) และกลิ่นหอมหวาน (Saittagaroon *et al.*, 1984) ช่วยส่งเสริมให้รสชาติของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแท่งให้ดียิ่งขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Sukjuntra *et al.* (2012) ที่รายงานว่าถึงแม้มะพร้าวคั่วจะเป็นส่วนผสมของเครื่องเคียงใส่เพียง ร้อยละ 5 ของผลิตภัณฑ์ข้าวยำก็ใช้ได้ แต่เป็นเครื่องเคียงที่ขาดไม่ได้เนื่องจากส่งผลต่อรสชาติของข้าวยำ ในขณะที่สูตร A และ B ได้คะแนนความชอบด้านกลิ่นรสเมี่ยงคำ และรสชาติ น้อยที่สุด โดยมีคะแนนความชอบอยู่ในระดับชอบเล็กน้อย เนื่องจากสูตร A และ B มีปริมาณสัดส่วนของมะพร้าวคั่วที่คั่วได้นั้นเอง จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณของมะพร้าวคั่วมีผลต่อการเพิ่มคะแนนความชอบในด้านกลิ่นรสและรสชาติ

จากเกณฑ์การคัดเลือกสูตรเมี่ยงคำชนิดแท่งที่มีปริมาณโปรตีนสูง และเป็นที่ยอมรับของผู้ทดสอบจึงเลือก สูตร G ไปทำการศึกษาการทดแทนน้ำตาลมะพร้าวด้วยน้ำตาลไอโซมอลต์ต่อเนื่องจากผลการประเมินทางประสาทสัมผัสแสดงให้เห็นว่าสูตร G มีคะแนนความชอบด้านกลิ่นรส และรสชาติ เทียบเท่ากับสูตร E และยังคงมีปริมาณโปรตีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยทางสถิติ ($p > 0.05$) กับสูตร A ซึ่งมีปริมาณโปรตีนมากที่สุดด้วย

ตารางที่ 3 คุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งที่มีปริมาณโปรตีนเกษตร มะพร้าวคั่ว และข้าวพองที่แตกต่างกัน

คุณภาพทางเคมี	สูตร (โปรตีนเกษตร : มะพร้าวคั่ว : ข้าวพอง)						
	A	B	C	D	E	F	G
	(45:20:35)	(30:20:50)	(20:30:50)	(20:40:40)	(20:40:30)	(45:25:30)	(32.50:30: 37.50)
a_w	0.43±0.01 ^{ab}	0.40±0.00 ^c	0.40±0.001 ^c	0.43±0.00 ^{ab}	0.42±0.00 ^{cd}	0.44±0.00 ^a	0.43±0.00 ^{ab}
ความชื้น (ร้อยละ)	10.41±0.80 ^{abc}	9.92±0.03 ^{cd}	10.25±0.26 ^{bcd}	10.68±0.10 ^{ab}	9.66±0.49 ^d	11.02±0.72 ^a	10.29±0.34 ^{bcd}
โปรตีน (ร้อยละ)	17.04±0.15 ^a	14.27±0.51 ^{de}	14.77±1.02 ^{cd}	13.76±0.10 ^e	13.35±0.16 ^e	16.23±0.41 ^b	16.64±0.42 ^{ab}

หมายเหตุ: a-e คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้ง

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	สูตร (โปรตีนเกษตร : มะพร้าวคั่ว : ข้าวพอง)						
	A	B	C	D	E	F	G
	(45:20:35)	(30:20:50)	(20:30:50)	(20:40:40)	(20:40:30)	(45:25:30)	(32.50:30: 37.50)
ลักษณะปรากฏ ^{ns}	7.00±0.90	7.06±1.13	7.16±1.02	6.90±1.25	6.82±1.10	7.12±1.08	7.06±1.13
สี ^{ns}	6.86±1.18	7.02±1.22	7.06±1.15	6.88±1.26	6.68±1.25	7.10±1.22	6.96±1.28
ความแข็ง ^{ns}	6.58±1.46	6.50±1.63	6.52±1.53	6.56±1.53	6.70±1.50	6.46±1.45	6.36±1.56
กลิ่นรสเมี่ยงคำ	6.30±1.39 ^c	6.50±1.52 ^{bc}	6.78±1.42 ^{ab}	6.96±1.12 ^{ab}	6.98±1.46 ^a	6.90±1.43 ^{ab}	6.60±1.47 ^{abc}
รสชาติ	6.52±1.54 ^b	6.66±1.44 ^b	6.92±1.46 ^{ab}	7.04±1.20 ^{ab}	7.24±1.12 ^a	7.00±1.33 ^{ab}	6.84±1.50 ^{ab}
ความชอบโดยรวม ^{ns}	6.92±1.22	7.04±1.14	7.10±1.23	7.16±1.18	7.26±1.19	7.04±1.12	6.98±1.32

หมายเหตุ: ns คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

a-c คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2. ผลการศึกษาการทดแทนน้ำตาลมะพร้าวด้วยน้ำตาลไอโซมอลต์ต่อคุณภาพทางกายภาพ และประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้ง

2.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

นำผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งที่ผลิตจากสูตร G ในข้อ 1 มาศึกษาการทดแทนน้ำตาลมะพร้าวด้วยไอโซมอลต์ที่ระดับแตกต่างกัน พบว่าค่าความสว่าง (L^*) ของเมี่ยงคำชนิดแห้งที่มีปริมาณไอโซมอลต์ที่ร้อยละ 15 และ 25 มีค่าความสว่างมากกว่าสูตรควบคุม (ปริมาณไอโซมอลต์ร้อยละ 0) แสดงดัง

ตารางที่ 5 เนื่องจากไอโซมอลต์เป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่ไม่มีหมู่รีดิวซ์ จึงไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยามลาร์ดที่ทำให้เกิดสีน้ำตาล ในขณะที่น้ำตาลมะพร้าวมีน้ำตาลรีดิวซ์เป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่จึงทำให้เกิดปฏิกิริยามลาร์ดขึ้น จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีที่เข้มกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srisangwan (2012) ที่ได้ศึกษาผลของการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อค่าสีในขนมอาลัว พบว่า การเพิ่มปริมาณน้ำตาลไอโซมอลต์มีผลทำให้ค่าความสว่าง (L^*) เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ด้านเนื้อสัมผัส พบว่าค่าความ

แข็งของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้ง ณ วันที่ 0 สูตรที่มีน้ำตาลไอโซมอลต์ร้อยละ 15 และ 25 มีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าสูตรควบคุม เนื่องจากไอโซมอลต์มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่าน้ำตาลซูโครสจึงทำให้ตกผลึกได้ง่ายและตกผลึกได้ดีเมื่อมีความเข้มข้น ผลึกของไอโซมอลต์จะเป็นผลึกขนาดเล็กแตกต่างจากน้ำตาลมะพร้าวซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นน้ำตาลซูโครสและน้ำตาลอินเวิร์ทซึ่งเมื่อนำมาเคี่ยวทำให้เกิดการตกผลึกที่มีขนาดใหญ่ ส่งผล

ให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็ง (Ninlanon and Sumana, 2016; Inprasit *et al.*, 2018) ผลการศึกษาสอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ Ho and Pulsawat (2020) พบว่าคุกกี้ที่ทดแทนน้ำตาลทรายบางส่วนด้วยไอโซมอลต์ (ร้อยละ 50) ส่งผลให้ค่าความแข็งของคุกกี้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม (ลดลงจาก 3.39 kg เป็น 2.42 kg)

ตารางที่ 5 คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งวันที่ 0

คุณภาพทางกายภาพ	ปริมาณไอโซมอลต์ (ร้อยละ)		
	0 (สูตรควบคุม)	15	25
L*	34.49±0.16 ^c	37.57±0.31 ^b	38.42±0.44 ^a
a* ^{ns}	5.70±0.64	6.59±0.36	6.04±0.39
b*	15.25±0.64 ^b	19.17±1.55 ^a	18.64±0.33 ^a
ความแข็ง (N)	44.77±4.90 ^a	33.18±3.06 ^b	32.96±2.02 ^b

หมายเหตุ: ns คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

a-c คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2.2 ผลการประเมินทางประสาทสัมผัส

ผลการประเมินทางประสาทสัมผัส ณ วันที่ผลิตเสร็จ (วันที่ 0) พบว่าทุกสูตรมีค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบด้านสี ความแข็ง ความเหนียว รสชาติ และความชอบโดยรวม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในขณะที่ด้านกลิ่นรส

เมี่ยงคำ มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสูตรควบคุมได้รับคะแนนความชอบด้านกลิ่นรสเมี่ยงคำสูงสุด เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีกลิ่นหอมของน้ำตาลมะพร้าวที่ชัดเจนกว่าสูตรที่มีการใช้น้ำตาลไอโซมอลต์ แต่ทั้งนี้คะแนนของทั้ง 3 สูตรก็ยังอยู่ในระดับชอบปานกลางเช่นเดียวกัน (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 6 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้ง วันที่ 0 และวันที่ 15

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	ปริมาณไอโซมอลต์ (ร้อยละ)		
	0 (สูตรควบคุม)	15	25
วันที่ 0			
สี ^{ns}	7.26±1.10	7.46±1.23	7.32±1.13
กลิ่นรสเมี่ยงคำ	7.46±1.05 ^a	7.06±1.23 ^b	7.24±1.16 ^b
ความแข็ง ^{ns}	6.88±1.20	6.96±1.07	7.14±1.18
ความเหนียว ^{ns}	6.72±1.37	6.80±1.23	7.06±1.20
รสชาติ ^{ns}	7.34±1.23	7.04±1.12	7.28±1.25
ความชอบโดยรวม ^{ns}	7.40±0.99	7.18±1.01	7.42±1.03
วันที่ 15			
สี ^{ns}	7.55±1.05	8.10±0.64	7.85±1.13
กลิ่นรสเมี่ยงคำ ^{ns}	7.75±0.639	7.50±1.0.89	7.85±1.34
ความแข็ง	7.20±1.00 ^b	7.95±0.83 ^a	8.15±0.75 ^a
ความเหนียว	6.85±1.13 ^b	7.85±0.93 ^a	8.25±0.72 ^a
รสชาติ ^{ns}	7.80±0.83	7.90±0.64	7.95±0.60
ความชอบโดยรวม	7.30±0.92 ^b	8.00±0.56 ^a	8.15±0.88 ^a

หมายเหตุ: ns คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

a-b คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

เมื่อนำผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 15 วันแล้วนำไปประเมินทางประสาทสัมผัสอีกครั้งพบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อคะแนนความชอบของผลิตภัณฑ์ในด้านความแข็ง ความเหนียว และความชอบโดยรวม โดยสูตรที่มีปริมาณน้ำตาลไอโซมอลต์ร้อยละ 15 และ 25 ได้คะแนนความชอบมากที่สุด คือ 8.00 และ 8.15 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับชอบมาก (ตารางที่ 6) โดยเฉพาะคะแนนความชอบในด้านความแข็ง และความเหนียวที่มีค่าเพิ่มขึ้นจากวันที่ 0 เนื่องจากน้ำตาลไอโซมอลต์จะช่วยเพิ่มความคงตัวของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้ง

มากขึ้น รวมทั้งผลิตภัณฑ์มีความเหนียวติดพันเวลาเคี้ยว น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srisangwan (2012) ที่ศึกษาการเติมสารให้ความหวานพวกน้ำตาลแอลกอฮอล์ทดแทนน้ำตาลทรายในขนมอาลัว พบว่าการใช้ไอโซมอลต์ทำให้ส่วนผสมมีความหนืดน้อยกว่าสูตรควบคุม อาจเนื่องจากไอโซมอลต์มีจุดเดือดที่สูงกว่าซูโครส (Anke and Ingrid, 2006) เมื่อให้ความร้อนกับส่วนผสม น้ำจึงระเหยได้น้อยจึงทำให้น้ำในระบบมีมากส่งผลให้ความเข้มข้นของส่วนผสมน้อยจึงมีความหนืดต่ำ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งมีความเหนียวติดพันน้อยลง

ในส่วนของการคะแนนความชอบด้านความแข็งแรงพบว่าผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งที่มีไอโซมอลต์ได้รับคะแนนความชอบเพิ่มขึ้นจากวันที่ 0 และการใช้ไอโซมอลต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คะแนนความชอบด้านความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากผลิตภัณฑ์ยังคงความแข็งไว้ได้มากกว่าสูตรควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srisangwan (2012) ที่ศึกษาการใช้ไอโซมอลต์ทดแทนซูโครสในขนมอาลัวที่ระดับร้อยละ 25, 50 และ 75 ทำให้ขนมอาลัวมีความแข็งแรงมากกว่าสูตรควบคุมเพราะไอโซมอลต์ละลายน้ำได้น้อย ทำให้มีจุดอิมิตัวต่ำเมื่อใช้ทดแทนมากขึ้นจะเกิดเป็นลักษณะแข็งขึ้น ดังนั้นสูตรที่เหมาะสมในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้ง คือ เมี่ยงคำที่ทดแทนน้ำตาลมะพร้าวด้วยไอโซมอลต์ที่ระดับร้อยละ 15 เนื่องจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใส่ไอโซมอลต์ช่วยให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะด้านเนื้อสัมผัส ความแข็งแรงและความเหนียวที่มักเป็นปัญหาต่อผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวชนิดแห้งในระหว่างการผลิตดีขึ้น อีกทั้งผลการประเมินทางประสาทสัมผัสได้รับคะแนนความชอบมากที่สุดและไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) กับสูตรที่

ใช้ไอโซมอลต์ ร้อยละ 25 เมื่อคำนวณต้นทุนในเรื่องค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบที่ใช้พบว่าสูตรที่เติมน้ำตาลไอโซมอลต์ที่ระดับร้อยละ 15 มีต้นทุนที่ต่ำกว่าด้วย

3. ผลการศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งที่พัฒนาได้

ตารางที่ 8 แสดงคุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งที่พัฒนาได้ พบว่ามีปริมาณคาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน ความชื้น เถ้า และเส้นใยหยาบ เท่ากับ ร้อยละ 47.16, 18.05, 16.64, 11.32, 3.85 และ 2.98 ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ได้ เมี่ยงคำชนิดแห้งที่พัฒนาได้เป็นแหล่งของโปรตีน เนื่องจากมีปริมาณของโปรตีนตรงกับประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) พ.ศ. 2541 โดยสามารถกล่าวอ้างได้ว่าเป็นแหล่งของโปรตีน ต้องมีปริมาณโปรตีน ร้อยละ 10-19 ของ Thai RDI หรือมีโปรตีนไม่น้อยกว่า 5 กรัมต่อหน่วยบริโภค ซึ่งหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงในกลุ่มอาหารขบเคี้ยว และขนมหวานตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 182) พ.ศ. 2541 ระบุปริมาณไว้ที่ 40 กรัม

ตารางที่ 8 คุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งที่พัฒนาได้

คุณภาพทางเคมี	ปริมาณ
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	47.16±0.44
ไขมัน (ร้อยละ)	18.05±2.75
โปรตีน (ร้อยละ)	16.64±0.42
ความชื้น (ร้อยละ)	11.32±0.18
เถ้า (ร้อยละ)	3.85±0.06
เส้นใยหยาบ (ร้อยละ)	2.98±0.00
พลังงาน (กิโลแคลอรีต่อกรัม)	4.72± 0.02

ดังนั้นผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 16.64 เมื่อบริโภคที่ปริมาณ 40 กรัม

จะได้ปริมาณโปรตีนเท่ากับ 6.66 กรัมต่อหนึ่งหน่วยบริโภค จึงสามารถกล่าวอ้างได้ว่าผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำ

ชนิดแห้งเป็นแหล่งของโปรตีน และผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งมีการใช้น้ำตาลมะพร้าวและน้ำตาลไอโซมอลต์ ซึ่งน้ำตาลมะพร้าวเป็นน้ำตาลที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ (Glycemic Index, GI) โดยมีค่า GI อยู่ในช่วง 35 ถึง 42 ซึ่งช่วยควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดไม่ให้สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (Trinidad *et al.*, 2010) และผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งที่พัฒนาได้นี้มีพลังงานสะสม 4.72 กิโลแคลอรีต่อกรัม หรือเท่ากับ 188.80 กิโลแคลอรีต่อ 1 หน่วยบริโภค (40 กรัม)

จากการทดลองเก็บรักษาเบื้องต้นที่อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) พบว่าสูตรที่มีการใส่ไอโซมอลต์สามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน 2 เดือน ในขณะที่สูตรควบคุมเก็บรักษาไว้ได้เพียง 1 เดือน ซึ่งการเสื่อมเสียที่พบคือการสูญเสียลักษณะเนื้อสัมผัส เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่มีความใกล้เคียงกันจากงานวิจัย คือ ัญพิขผสมใบชะพลูอัดแห้ง พบว่า สามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้นาน 1.5 เดือน (Kitjaworasatien, 2010) แสดงให้เห็นว่าการใส่ไอโซมอลต์ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาในผลิตภัณฑ์เมี่ยงคำชนิดแห้งเพื่อสุขภาพได้

สรุป

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถนำเมี่ยงคำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์เป็นเมี่ยงคำชนิดแห้งที่ผลิตจากพืชทั้งหมด (Plant-based food) และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค สูตรประกอบด้วย ส่วนของแห้ง ได้แก่ โปรตีนเกษตร ร้อยละ 12.84 มะพร้าวคั่ว ร้อยละ 11.85 ข้าวพอง ร้อยละ 14.81 เม็ดมะม่วงหิมพานต์ ร้อยละ 9.75 ใบชะพลูอบแห้ง ร้อยละ 0.50 พริกขี้หนูสวนแห้ง ร้อยละ 0.25 และส่วนของเหลวคือน้ำซอสเมี่ยงคำ ได้แก่ จิง ร้อยละ 1.44 ข่า ร้อยละ 1.92 ตะไคร้ ร้อยละ 1.60 หอมแดง ร้อยละ 6.89 กะปิเจ ร้อยละ 3.21 น้ำตาลมะพร้าว ร้อยละ 16.35 ไอโซมอลต์ ร้อยละ 5.77 ซีอิ๊วขาวเจ ร้อยละ 3.21 น้ำมะขามป้อม

ร้อยละ 4.81 แบะแซ ร้อยละ 3.21 และน้ำมะนาว ร้อยละ 1.60 จัดเป็นอาหารขบเคี้ยวชนิดแห้งที่คงเอกลักษณ์รสชาติเมี่ยงคำซึ่งแสดงถึงความเป็นไทย มีคุณค่าทางโภชนาการโดยเฉพาะเป็นแหล่งของโปรตีน นอกจากนั้นการใช้ไอโซมอลต์ทดแทนน้ำตาลมะพร้าวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเมี่ยงคำชนิดแห้งให้สามารถเก็บรักษานานถึง 2 เดือน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางการสร้างความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ให้กับกลุ่มผู้บริโภคมังสวิรัตแบบยืดหยุ่น และกลุ่มที่รับประทานโปรตีนจากพืชเป็นหลักอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนางสาวธัชชา ญูแจทอง และนางสาวสุนิสา ด้วงนุ้ม สำหรับความช่วยเหลือ และคำแนะนำในเรื่องอุปกรณ์ และเครื่องมือในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 2019. **Official method of analysis of Association of Official Analytical Chemists**. 21th ed. Association of Official Analytical Chemists International, Gaithersburg, USA.
- Anke, S. and Ingrid, W.E. 2006. Isomalt, pp. 177-184. In Helen, M., ed. **Sweeteners and Sugar Alternatives in Food Technology**. Blackwell Publishing, United Kingdom.
- Anonymous. n.d. **The cold water candy test**. Available Source: <https://www.exploratorium.edu/cooking/candy/sugar-stages.html#softball>, October 2, 2021.
- Boong. 2015. **Nuts, coconut meat, raw Nutrition Facts**. Available Source: <https://www.calf>

- orlife.com/calories/nuts-coconut-meat-raw, May 26, 2021.
- Bureau of Vocational Education Research and Development. 2016. **Miang Cereal Stick**. Available Source: <http://thaiinvention.net/detail.php?p=cHJvamVjdF9pZD01OTExMyZjZmdfaWQ9MzYmY29tcGV0X2lkPTI=&cond=JnNfY29tcGV0PTE=>, March 16, 2021. (in Thai)
- Chayasiripan, D., Jangchud, K., Jangchad, A., Chariyachotilert, S. and Kongcharoenkiat, S. 2013. Effect of main ingredients on qualities of snack bar flavored Mee-Krob, pp.392-399. In **Proceedings of 51st Kasetsart University Annual Conference: Agricultural Extension and Home Economics, Agro-Industry**. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Chueanopparat, J., Charoenying, V., Sangteerakij, D., Chalermchaiwat, P. and Chantaro, P. 2021. Development of Pad Thai crispy bar. **RMUTP Research Journal** 15(1): 156-166. (in Thai)
- Deepanya, W. 2013. **Research Report on Development of Product Miang Kum Kao Leum-Pua**. Phetchabun Rajabhat University. (in Thai)
- Food Intelligence center. 2019. **Final report: Vegan Food Market Study Project to support the development of the Thai food industry**. Available Source: http://www.oie.go.th/assets/portals/1/files/study_report/finalreportvegan.pdf, July 16, 2021. (in Thai)
- Grembecka, M., Melton, L., Shahidi, F. and Varelis, P. 2018. **Encyclopedia of Food Chemistry**. Academic Press, Cambridge.
- Ho, L.H. and Pulsawat, M.M. 2020. Effects of partial sugar replacement on the physicochemical and sensory properties of low sugar cookies. **International Food Research Journal** 27(3): 557-567.
- Ho, S. 2021. **42% Of Global Consumers Are Flexitarians & Driving Mainstream Plant-Based Shift, New Report Says**. Available Source: <https://www.greenqueen.com.hk/42-of-global-consumers-are-flexitarians-driving-mainstream-plant-based-shift-new-report-says/>, July 10, 2021. (in Thai)
- Inprasit, K., Mongkonchart, P., Chookaew, L., Pengkham, T. and Chuenwattana, S. 2018. Shelf-life extension of Foi Thong by using sweeteners. **Bulletin of Applied Sciences** 7(7): 49-59. (in Thai)
- Institute of Food Research and Product Development. 2013. **Soy Protein**. Available Source: <http://www.ifrpd.ku.ac.th/th/products/ifrpd-protein.php>, July 16, 2021. (in Thai)
- Kaewsuksaeng, F. 2015. **Crispy puffed rice, Miang Kham flavor**. Available Source: http://www.thai-explore.net/search_detail/result/3108, July 16, 2021. (in Thai)
- Kitcharoenthawornchai, N. and Harnsilawat, T. 2015. Characterization of meat analogue nugget: effect of textured vegetable protein. **Food and Applied Bioscience Journal** 3(2): 121-129. (in Thai)
- Kitjaworasatien, S. 2010. Chaploo leaves added cereal bar product. Master Thesis of Home economics (Home Economics Technology), Rajamangala

- University of Technology Phra Nakhon. (in Thai)
- Lupang. 2021. **Who is Flexitarian and how is it important to the plant-based market until Nestlé decided to penetrate this market in Thailand.** Available Source: <https://www.marketingoops.com/news/flexitarian-target-plant-based/>, July 17, 2021. (in Thai)
- Na-Songkhla. n.d. **Thai foods from Thai literature book II.** 1st ed. Production printing Ltd., Bangkok. (in Thai)
- Narkrugs, W. 1993. Study on taro flour, mungbean protein isolate and white sesame used in meat analogue production. **King Mongkut's Agricultural Journal** 11(3): 14-25. (in Thai)
- Ninlanon, W. and Sumana, B. 2016. Development of Coconut Sugar Production in Local Industry Level. **Rajabhat Rambhai Barni Research Journal** 10(3): 49-54. (in Thai)
- Rattanapanone, N. 2008. **Food Chemistry.** 3rd ed. Odeon Store, Bangkok. (in Thai)
- Royal Academy. 2021. **Dictionary online: Miang.** Available Source: <https://dictionary.orst.go.th>, July 16, 2021. (in Thai)
- Saittagaroorn, S., Kawakishi, S. and Namiki, M. 1984. Aroma Constituents of Roasted Coconut. **Agricultural and Biological Chemistry** 48(9): 2301-2307.
- Sanamchandra Palace Library. 2018. **Miang Kham, Thai Wisdom Heritage.** Available Source: <http://www.snamcn.lib.su.ac.th/snclibblog/?tag>, July 16, 2021. (in Thai)
- SME Thailand. 2020. **The plant-based trend in Thailand, the market is hot in 2021 with Flexitarian consumers.** Available Source: <https://www.smethailandclub.com/entrepreneur-6646-id.html>, July 10, 2021. (in Thai)
- Srisangwan, N. 2012. Nutritional improvement of A-LUA and FOI-Thong desserts by using non sugar sweeteners. Master Thesis of Science (Food Technology), Silpakorn University. (in Thai)
- Sriwilai, S., Chalermchaiwat, P., Siriwoog, N. and Chantaro, P. 2018a. The influence of barrel temperature and feed moisture on chemical, physical and sensory quality of high protein extrudates from Khao dawk mali 105 brown rice flour. **King Mongkut's Agricultural Journal** 36(3): 158-167. (in Thai)
- Sriwilai, S., Chalermchaiwat, P., Siriwoong, N. and On-nom, N. 2018b. Effect of chicken protein powder content and rice varieties on quality of extrudates made from Sungyod Phatthalung and Khao Dawk Mali 105 brown rice flour. **Srinakharinwirot Science Journal** 34(1): 109-124. (in Thai)
- Sukjuntra, J., Sulongku, N., Salae, S., Kanga, N., Mahakhir, A. and Dulhama, A. 2012. **Research Report on Development of Local Food to Business.** Faculty of Sciences, Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University. (in Thai)
- Suphanpayak, S. 2002. Development of reference recipes for commonly consumed Thai one-plate dishes and snack and their nutritive values. Master Thesis of Science (Nutrition), Mahidol University. (in Thai)

- Tavera-Quiroz, M.J., Urriza, M., Pinotti, A. and Bertola, N. 2015. Baked snack from green apples formulated with the addition of isomalt. **LWT - Food Science and Technology** 62(2): 1004-1010.
- Thai Health Promotion Foundation. 2018. **Flexitarian**. Available Source: <https://www.thaihealth.or.th/Content/49070-Flexitarian.html>, July 8, 2021. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. 2016. **Thai community product standard: Fruit Vegetable and cereal bar (902/2562)**. Available Source: <http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps090262.pdf>, July 8, 2021. (in Thai)
- Tiefenbacher, K.F. 2017. **Technology of Main Ingredients: Sweeteners and Lipids**. Academic Press, Cambridge.
- Trinidad, P., Aida, C., Rosario, S. and Rosario, R. 2010. Glycemic index of commonly consumed carbohydrate foods in the Philippines. **Journal of Functional Food** 2(4): 271-274.
- Vatthanakul, S. 2015. **Product Development of leaf wrapped bite appetizer (Miang Kam Thai Style)**. Available Source: http://www.thai-explore.net/search_detail/result/2176, July 16, 2021. (in Thai)

ลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชระหว่าง เทอร์มอพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวและฟางข้าว

Characterization of Sandwich Structured Composites between Rice Flour-based Thermoplastic Starch and Rice Straw

นันทยา เก่งเขตรัก^{1*} และ ธาปณี วงศ์ปรีดี²

Nanthaya Kengkhetkit^{1*} and Thapanee Wongpreedee²

Received: 30 April 2021, Revised: 18 July 2021, Accepted: 31 August 2021

บทคัดย่อ

วัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชระหว่างเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช (TPS) จากแป้งข้าว และฟางข้าว (RS) ถูกเตรียมเพื่อศึกษาผลของชนิด TPS ของแป้งข้าวเหนียว (GTPS) ข้าวเจ้า (RTPS) และแป้งผสม (MTPS) รวมถึงรูปแบบวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิช (3 และ 5 ชั้น) ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นและสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุ พบว่าวัสดุเชิงประกอบ RS-TPS ทุกสูตรมีค่าความหนาแน่นลดลงเมื่อเทียบกับ TPS และรูปแบบการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของวัสดุที่ได้ จากสมบัติความทนแรงดึงพบว่าวัสดุเชิงประกอบ RS-TPS มีแนวโน้มค่ามอดูลัสแรงดึง และค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 193-461 และ 111-194 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ TPS เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ประสิทธิภาพการปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง TPS ของวัสดุเชิงประกอบ วัสดุเชิงประกอบ RS-GTPS พบว่ามีแนวโน้มการปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงได้สูงสุด จากภาพถ่าย SEM พบว่า GTPS ซึ่งมีค่าดัชนีการไหลที่สูง สามารถไหลเข้าไปแทรกในชั้นเสริมแรง RS ได้ดีกว่า TPS ชนิดอื่นๆ ในระหว่างการกดอัด ส่งผลให้สมบัติความทนแรงดึงของวัสดุดังกล่าวเพิ่มขึ้น ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบใช้ RTPS ที่มีค่าดัชนีการไหลต่ำซึ่งพบการไหลแทรกตัวในชั้น RS ได้น้อย วัสดุเชิงประกอบระบบนี้มีการปรับปรุงค่ามอดูลัสแรงดึงเท่านั้น แต่ไม่พบการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึง นอกจากนี้ วัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิช 3 ชั้น พบว่ามีสมบัติความทนแรงดึงที่ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิช 5 ชั้นในทุกกรณีที่ศึกษา

คำสำคัญ: เทอร์มอพลาสติกสตาร์ช, ฟางข้าว, แป้งข้าว, วัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิช

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดพิษณุโลก 65000

¹ Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Phitsanulok 65000, Thailand.

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง จังหวัดระยอง 21120

² Faculty of Engineering and Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Rayong Campus, Rayong 21120, Thailand.

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

ABSTRACT

The sandwich structured composites with rice flour-based thermoplastic starch (TPS) and rice straw (RS) were prepared. The effects of different TPS types (glutinous rice flour (GTPS), rice flour (RTPS), and mixed rice flour (MTPS)) and types of sandwiched composite (3 and 5 layers) on the density and tensile properties of these composites were investigated. The results showed that the density of all RS-TPS composites was lower than each neat TPSs. The differences of TPSs types and sandwiched composite types did not affect the density of these materials. On the contrary, the tensile modulus and tensile strength of all RS-TPS composites showed a strong improvement with an increase up to 193-461% and 111-194%, respectively, compared with each neat TPS. However, the efficiency of composite's tensile property improvement strongly depended on the TPS types. Composite using GTPS having high melt flow index displayed high potential to improve the tensile properties. The SEM investigation revealed that the GTPS matrix easily flowed and wetted into the RS reinforcement layer during compression. This resulted in enhancing the composite's tensile properties. In contrast, using RTPS with a low melt flow index in composites did not show evidence of RTPS penetrating into RS layer. So, RS-RTPS composite showed only the improvement in tensile modulus but not in tensile strength. The sandwich composite with three layers showed better improvement in tensile properties compared with five layers in all TPS composite types.

Key words: thermoplastic starch, rice straw, rice flour, sandwich structured composites

บทนำ

ในปัจจุบันวิกฤตปัญหาภาวะโลกร้อน ปัญหามลพิษพลาสติก และสถานการณ์การขาดแคลนแหล่งเชื้อเพลิงและวัตถุดิบจากแหล่งปิโตรเคมี ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นหนึ่งในสถานการณ์ที่ทำให้ในทุกภาคส่วนมีการคำนึงถึงและตื่นตัวในเรื่องการพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมกันอย่างมาก แนวทางหนึ่งที่มีความสนใจเพิ่มมากขึ้นคือแนวทางในการพัฒนาวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ซึ่งจะเป็นการนำวัสดุทางธรรมชาติ (Bio-based materials) มาใช้ในการผลิตเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) (Mohanty *et al.*, 2002) วัสดุธรรมชาติที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลาสติกดังกล่าวได้มีหลายชนิด เช่น แป้ง (Starch)

เซลลูโลส (Cellulose) คอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุจากธรรมชาติเหล่านี้เป็นวัตถุดิบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าวัตถุดิบจากแหล่งปิโตรเคมี และยังเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สร้างทดแทนใหม่ได้ (Bayer *et al.*, 2014) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุจากธรรมชาติทั้งหลาย แป้งนับเป็นวัตถุดิบหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากมีปริมาณมาก หาง่าย ราคาถูก และสามารถย่อยสลายได้ แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีอยู่ในส่วนต่างๆ ของพืช เช่น เมล็ด หัว ราก เป็นต้น พืชที่มีปริมาณแป้งมากได้แก่ ข้าว มันฝรั่ง มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวสาลี ซึ่งผลผลิตของพืชเหล่านี้มีปริมาณที่มาก หาได้ง่าย ราคาถูก และสามารถปลูกทดแทนได้ (Varda *et al.*, 2014) และพืชต่างๆ เหล่านี้ที่เป็นแหล่งวัตถุดิบของแป้งล้วนแต่เป็นพืชเศรษฐกิจของไทย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตข้าวได้เป็นปริมาณมาก และสามารถผลิตข้าวได้หลายชนิด มีพื้นที่ปลูกข้าวกระจายอยู่ทั่วทุกภาคและมีแนวโน้มในการผลิตเพิ่มขึ้นทุกปี ที่ผ่านมาประเทศไทยเคยประสบปัญหาการผลิตข้าวในปริมาณที่เกินความต้องการอยู่มาก ในอนาคตจึงต้องมีแนวคิดในการจัดการการผลิตและการใช้ประโยชน์จากข้าวให้สมดุล (Honnak, 2020) นอกจากนี้ในแต่ละรอบการปลูกข้าว จะมีปริมาณของเศษเหลือทิ้งจากการเก็บเกี่ยวข้าวต่างๆ เป็นจำนวนมาก เช่น แกลบและฟางข้าว มีการประมาณถึงปริมาณของเศษเหลือใช้จากการปลูกข้าวไว้ว่า จากนาข้าวที่ได้รับผลผลิตข้าวเปลือก 1,000 กิโลกรัม จะมีปริมาณฟางข้าวจำนวนมากถึง 1,300 กิโลกรัม ถึงแม้ฟางข้าวอาจจัดเป็นฟางก้นจ้านำไปใช้ประโยชน์ได้เพิ่มขึ้นอีก แต่ก็ยังมีเพียงบางกลุ่มของเกษตรกรเท่านั้น ชวนาโดยส่วนใหญ่ยังคงมีพฤติกรรมการเผาฟางข้าวอยู่เนื่องจากโดยส่วนมากชาวนาต้องการเร่งการผลิตจึงมักจะเลือกใช้วิธีการเผาฟางเพื่อเริ่มรอบการปลูกใหม่ (Pollution Control Department, 2004)

จากแนวโน้มการปลูกข้าวที่เพิ่มขึ้น ร่วมกับวิกฤตของปัญหาของปริมาณเศษเหลือใช้จากการปลูกข้าวที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แนวทางหนึ่งของการพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์ที่น่าสนใจ คือ การนำเอาแป้งจากข้าวและวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตข้าวมาเพิ่มมูลค่า โดยงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะศึกษาความเป็นไปได้ของการนำแป้งจากข้าวแต่ละชนิดมาเตรียมเป็นเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch; TPS) และเสริมแรงด้วยฟางข้าว (Rice straw; RS) ซึ่งนอกจากจะเป็นแนวทางพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทดแทนวัสดุจากปิโตรเคมีที่ย่อยสลายไม่ได้และตกค้างกลายเป็นปัญหาคอขวดแล้ว ยังเป็นการส่งเสริมให้มีแนวทางในการใช้ประโยชน์จากข้าว

และวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตข้าวในรูปแบบที่หลากหลาย และเป็นการสร้างคุณค่าและมูลค่าเพิ่มให้กับวัตถุดิบจากกระบวนการปลูกข้าวอีกด้วย

โดยทั่วไปแล้วแป้งไม่สามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการทางความร้อนเหมือนพลาสติกทั่วไป เนื่องจากเกิดการไหม้และเสื่อมสภาพก่อนหลอม ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีกระบวนการเปลี่ยนแปลงให้เป็นเทอร์มอพลาสติก เพื่อให้สามารถขึ้นรูปได้โดยกระบวนการ เดียวกับพลาสติกทั่วไป ซึ่งวิธีในการเตรียมแป้งให้เป็นเทอร์มอพลาสติก ทำได้โดยการเติมสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) เช่น น้ำกลีเซอรอล และซอร์บิทอล เป็นต้น เมื่อนำสารเสริมสภาพพลาสติกมาผสมกับแป้งในสถานะที่มีการให้ความร้อน ความดัน และแรงเฉือน จะได้วัสดุที่เรียกว่าเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชซึ่งสามารถขึ้นรูปโดยกระบวนการหลอมได้ อย่างไรก็ตามการใช้งานของวัสดุจำพวกเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชยังมีข้อจำกัดในเรื่องของสมบัติเชิงกลที่มีค่าต่ำ แนวทางหนึ่งที่ยกมาใช้ในการปรับปรุงเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชเพื่อให้มีสมบัติที่ดีขึ้นคือ การใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นตัวเสริมแรงในวัสดุดังกล่าว จากรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเชิงประกอบระหว่างเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชและเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านมาต่างๆ พบว่า การใช้เส้นใยเสริมแรงในเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและทำให้ได้วัสดุมีสมบัติที่ดีขึ้นได้ (Ma *et al.*, 2005; Prachayawarakorn *et al.*, 2011; Kaewtatip and Thongmee, 2012) อย่างไรก็ตาม ในงานต่างๆ ที่มีการรายงานมาส่วนมากมักจะขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบนี้โดยผ่านขั้นตอนสองขั้นตอนคือ การผสมแป้งกับเส้นใยด้วยเครื่องผสมแบบให้ความร้อนเพื่อให้ได้เม็ดคอมปาวด์เสียก่อน จากนั้นจึงนำเม็ดคอมปาวด์มาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบ (Battezzore *et al.*, 2016; Prachayawarakorn *et al.*, 2013; Saiah *et al.*, 2009) ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้

มีข้อจำกัดในส่วนของการเตรียมวัสดุที่ต้องใช้เครื่องมืออุตสาหกรรมเฉพาะทางที่มีราคาค่อนข้างสูง อาจจะเป็นข้อจำกัดหนึ่งสำหรับการนำไปใช้งานบางอย่าง ที่มีความต้องการวัสดุที่มีต้นทุนการผลิตไม่สูงมากนัก

ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ TPS จากแป้งข้าวแต่ละชนิดและ RS ในรูปแบบแผ่นวิชและจะทำการประเมินถึงปัจจัยของชนิดของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวแต่ละชนิด และรูปแบบการขึ้นรูปแบบโครงสร้างแผ่นวิชที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและกายภาพของวัสดุเชิงประกอบที่ได้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้แนวทางการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชอีกแนวทางหนึ่ง ที่สามารถผลิตได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก มีต้นทุนในการผลิตต่ำลง (ลดขั้นตอนการใช้เครื่องมือผสมที่มีราคาสูง) และง่ายต่อการนำไปผลิตได้จริง ซึ่งจะเป็นแนวทางในการส่งเสริมให้มีการใช้งานวัสดุจาก

เทอร์มอพลาสติกสตาร์ชและเส้นใยธรรมชาติอย่างกว้างขวางมากขึ้น

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ

1.1 การเตรียมฟางข้าว

นำฟางข้าว (RS) มาทำความสะอาดโดยการล้างน้ำ เพื่อเอาสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ออก ฟังให้แห้ง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วตัดให้มีขนาดประมาณ 25 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาปั่นด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูงประมาณ 30 วินาที เพื่อให้ RS กระจายตัว โดย RS ที่เตรียมได้มีลักษณะดังภาพที่ 1 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเฉลี่ย 1 มิลลิเมตร และ 7.9 มิลลิเมตร ตามลำดับ



ภาพที่ 1 ลักษณะของฟางข้าวที่เตรียมได้ในงานวิจัย

1.2 การเตรียมแป้งข้าว

การเตรียมแป้งข้าว โดยการ โม่ น้ำ (Kengkhetkit and Mopoung, 2019) มีวิธีการดังนี้ นำข้าวเจ้า (พันธุ์ กข 41) และ ข้าวเหนียว (พันธุ์ กข 6) มาเตรียมเป็นผงแป้งด้วยเครื่องบดโม่ หลังจากโม่แล้วทิ้งให้แป้งข้าวตกตะกอนแยกจากน้ำ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง รินส่วนน้ำออกและนำไปตากให้แห้ง

แป้งที่ตากแห้งแล้วนำมาบด ร่อน เพื่อนำไปใช้เตรียมเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช (TPS) ต่อไป แป้งข้าวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มี 3 ชนิด คือ แป้งข้าวเจ้า (Rice flour), แป้งข้าวเหนียว (Glutinous rice flour) และแป้งผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าผสมแป้งข้าวเหนียว (Mixed flour) ที่อัตราส่วน 1:1 ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวแต่ละชนิดที่เตรียมได้นั้นจะมีความชื้นในปริมาณที่

ใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างกันของปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคติน โดยจะพบว่าปริมาณอะไมโลสของแป้งข้าวเจ้าจะมีปริมาณสูงสุดตามด้วยแป้งผสมและแป้งข้าวเหนียว ตามลำดับ (Kengkhetkit and Mopoung, 2019)

2. การเตรียมวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชระหว่างเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวและฟางข้าว

การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ TPS จากแป้งข้าวแต่ละชนิด และ RS มีปัจจัยที่ใช้สำหรับการศึกษา คือ ชนิดของ TPS จากแป้งข้าวชนิดต่างๆ และรูปแบบการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชระหว่าง TPS และ RS 2 รูปแบบ (ขึ้นรูปแบบโครงสร้างแซนวิช 3 ชั้น และ 5 ชั้น) โดยมีขั้นตอนดังนี้

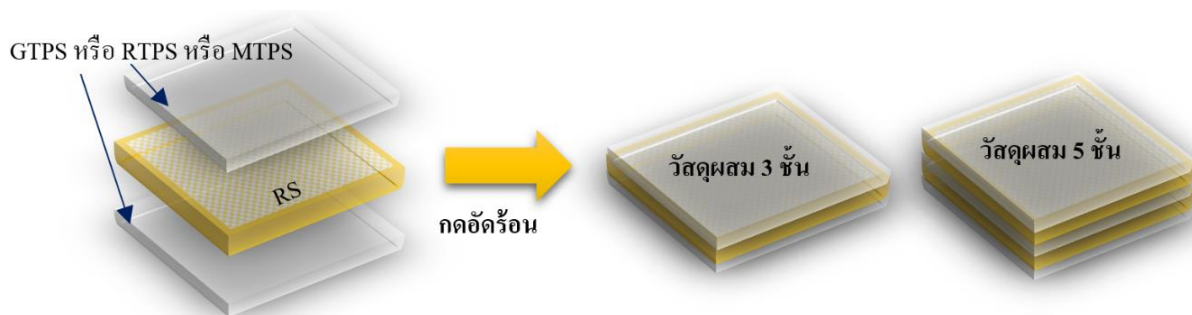
2.1 การเตรียมแผ่นเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าว

นำแป้งข้าวแต่ละชนิดผสมกับกลีเซอรอลซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) ในอัตราส่วน 60:40 ตามลำดับ นวดส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันในถุงพอลิโพรพิลีนประมาณ 3 นาที เก็บส่วนผสมที่ได้ไว้ 24 ชั่วโมงในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จากนั้นนำส่วนผสมแป้งมาทำการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ที่กำลัง 1000 วัตต์ เป็นเวลา 30 วินาที (คนส่วนผสม ทุกๆ 15 วินาที) เพื่อให้แป้งบางส่วนเกิดเจล นำเจลแป้ง 15 กรัมมาวางบนแม่พิมพ์ ทำการกดอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ระยะเวลา 15 นาที จะได้แผ่น TPS ที่มีความหนาประมาณ 0.8-1 มิลลิเมตร นำแผ่น TPS มาตัดเป็น

แผ่นขนาด 120×120 มิลลิเมตร โดยแต่ละแผ่น TPS ที่เตรียมได้มีน้ำหนักประมาณ 8 กรัม ทั้งนี้ TPS ที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเจ้า, แป้งข้าวเหนียว และ แป้งผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าผสมแป้งข้าวเหนียวที่อัตราส่วน 1:1 จะถูกกำหนดเป็นตัวย่อชื่อว่า RTPS, GTPS และ MTPS ตามลำดับ โดยจากผลการศึกษาที่ผ่านมาของผู้วิจัย (Kengkhetkit and Mopoung, 2019) พบว่า TPS จากแป้งข้าวแต่ละชนิดนั้นมีค่าดัชนีการไหลแตกต่างกัน โดย GTPS มีค่าดัชนีการไหลมากกว่า MTPS และ RTPS ตามลำดับ

2.2 การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชระหว่างเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวแต่ละชนิดและฟางข้าว

นำแผ่น TPS จากข้อ 2.1 วางบนแผ่นแม่พิมพ์ขนาด 120×120 มิลลิเมตร นำ RS ประมาณ 8 กรัม วางกระจายให้สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น TPS จากนั้นนำแผ่น TPS อีกแผ่น ประกบด้านบนชั้น RS จากนั้นนำไปกดอัดที่ อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ระยะเวลา 15 นาที (ก่อนอัดอุ่นร้อน 15 นาที) ทำการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบระหว่าง TPS และ RS ทั้งแบบ 3 ชั้น และ 5 ชั้น ดังภาพที่ 2 หลังจากนั้นนำแผ่นวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชที่ได้มาทำการตัดเป็นชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป ทั้งนี้มีการกำหนดชื่อตัวอย่างที่ศึกษา คือ RS-X-Y เมื่อ RS, X และ Y หมายถึง ฟางข้าว, ชนิดของ TPS จากแป้งข้าวที่ใช้ และจำนวนชั้นของวัสดุเชิงประกอบ ตามลำดับ โดยส่วนผสมของแต่ละตัวอย่างที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 2 ลักษณะการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชแบบ 3 ชั้น และ 5 ชั้น

ตารางที่ 1 สูตรวัสดุเชิงประกอบที่ทำการศึกษา

ตัวอย่าง	จำนวนชั้น		ร้อยละโดยน้ำหนักของ
	เทอร์มอพลาสติกสตาร์ช	ฟางข้าว	ฟางข้าวในวัสดุเชิงประกอบ
RS-GTPS-3	แป้งข้าวเหนียว 2 ชั้น	1 ชั้น	33.33
RS-GTPS-5	แป้งข้าวเหนียว 3 ชั้น	2 ชั้น	40
RS-RTPS-3	แป้งข้าวเจ้า 2 ชั้น	1 ชั้น	33.33
RS-RTPS-5	แป้งข้าวเจ้า 3 ชั้น	2 ชั้น	40
RS-MTPS-3	แป้งผสม 2 ชั้น	1 ชั้น	33.33
RS-MTPS-5	แป้งผสม 3 ชั้น	2 ชั้น	40

3. การทดสอบลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบ โครงสร้างแบบแซนวิชระหว่างเทอร์มอพลาสติก สตาร์ชจากแป้งข้าวและ ฟางข้าว

3.1 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ TPS จากแป้งข้าวและ RS ในแต่ละสูตร

ชิ้นงานตัวอย่างแต่ละสูตรจะถูกนำมาตัด
แนวขวาง จากนั้นทำการศึกษาสัณฐานวิทยาพื้นผิว
ภาคตัดขวางของวัสดุเชิงประกอบ โดยใช้กล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning
Electron Microscopy; SEM) ของบริษัท Hitachi รุ่น
TM-1000 ที่กำลังขยาย 50x, 100x และ 1200x

3.2 ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบระหว่าง TPS จากแป้งข้าวและ RS ในแต่ละสูตร

ชิ้นงานถูกตัดให้มีขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร
และ ยาว 20 มิลลิเมตร เพื่อทำการหาความหนาแน่น
ของชิ้นงานด้วยเครื่องชั่งเชิงวิเคราะห์ของบริษัท
METTLER TOLEDO รุ่น XS105 Dual Range แต่ละ
วัสดุทำการหาค่าความหนาแน่นจำนวน 3 ชิ้น เพื่อหา
ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของวัสดุเชิงประกอบนั้นๆ

3.3 สมบัติความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ ระหว่าง TPS จากแป้งข้าวและ RS ในแต่ละสูตร

นำแผ่นวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบ
แซนวิชทั้ง 3 ชั้น และ 5 ชั้น ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วย
เครื่องกดอัด โดยมีความหนาประมาณ 2 และ 3 มิลลิเมตร
ตามลำดับ มาทำการตัดให้ชิ้นงานมีขนาดกว้าง 10
มิลลิเมตร และยาว 90 มิลลิเมตร แล้วนำมาทดสอบ
สมบัติความทนแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

(Universal testing machine) ของบริษัท Testometric รุ่น M350-10CT ใช้น้ำหนักโหลดเซลล์ (Load cell) 1 กิโลนิวตัน มีระยะทดสอบ (Gauge length) 50 มิลลิเมตร ชิ้นงานถูกดึงด้วยอัตราการดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที ค่ามอดูลัสแรงดึงที่ร้อยละความเครียดเท่ากับ 1 (Tensile modulus at 1% strain) และค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ของแต่ละตัวอย่างหาจากค่าเฉลี่ยจากการทดสอบตัวอย่างสุตรละ 5 ชิ้น

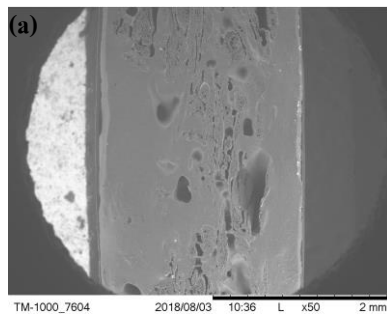
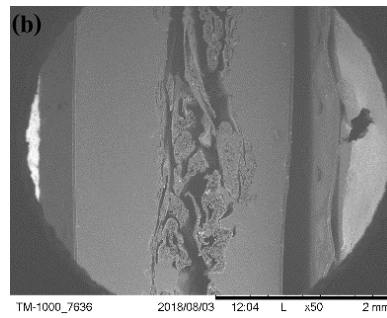
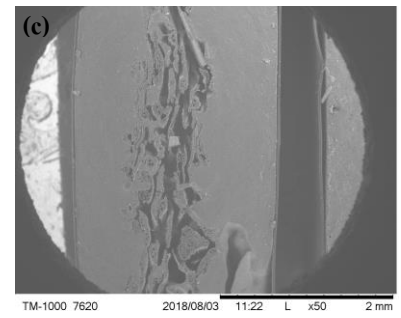
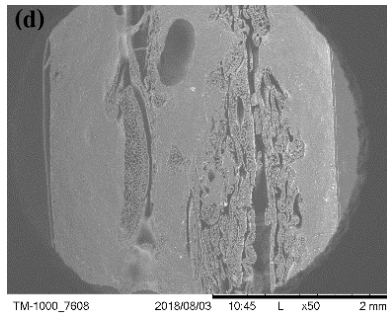
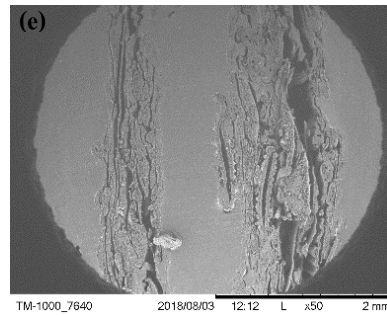
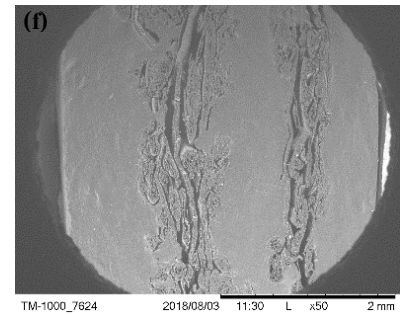
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ลักษณะผิวหน้าพื้นผิวภาคตัดขวางของวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชระหว่าง TPS จากแป้งข้าว และ RS ที่กำลังขยาย 50x, 100x และ 1200x แสดงดังภาพที่ 3-5 ตามลำดับ จากภาพ SEM ภาคตัดขวางของวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชสุตรต่างๆ ที่กำลังขยายต่ำ 50x (ภาพที่ 3) พบว่าวัสดุเชิงประกอบ RS-TPS จากแป้งข้าวแต่ละชนิดที่เตรียมได้ มีลักษณะของจำนวน 3 และ 5 ชั้นตามรูปแบบที่ได้ขึ้นรูปไว้

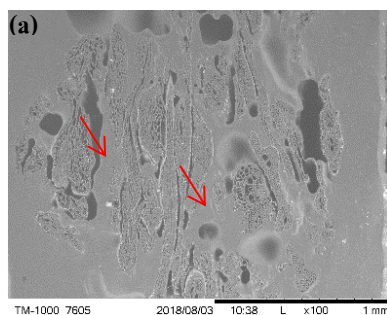
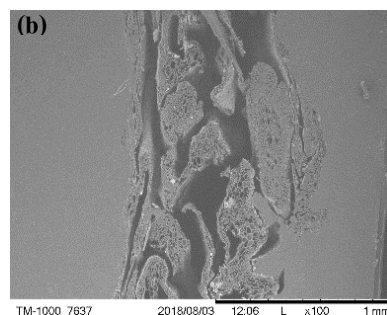
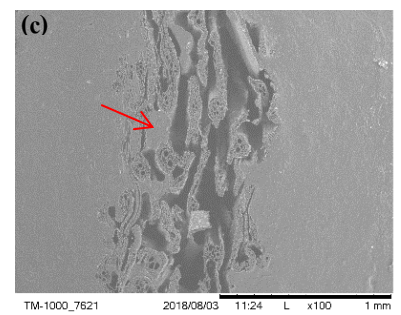
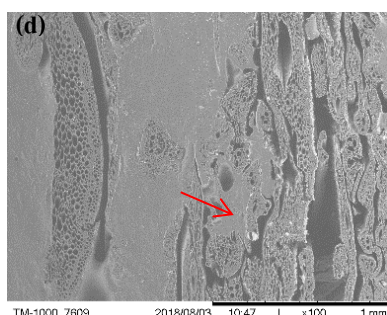
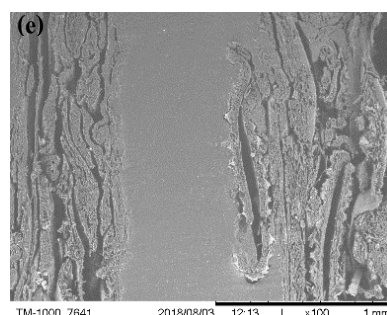
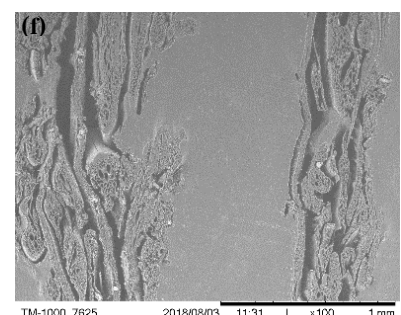
ภาพที่ 4 แสดงภาพ SEM ที่กำลังขยาย 100x ทำให้เห็นถึงลักษณะการไหลแทรกตัวของ TPS (ลูกศรสีแดง) แต่ละชนิดในชั้น RS ซึ่งแม้ว่าจากภาพ SEM ของวัสดุเชิงประกอบทุกสุตร (ภาพที่ 4a-4f) จะไม่พบส่วนของ TPS ไหลเข้าไปแทรกอยู่เลยในส่วนบริเวณตรงกลางของชั้น RS เลย แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบภาพตัดขวางของวัสดุเชิงประกอบจาก TPS แต่ละชนิดในภาพที่ 4 นั้น จะพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ TPS จากแป้งข้าวแต่ละชนิดมีลักษณะ

การไหลแทรกเข้าไปในชั้น RS ที่แตกต่างกัน TPS จากแป้งข้าวเหนียว (GTPS) จะพบว่ามีการไหลแทรกเข้าไปในส่วนชั้น RS ได้ดีที่สุด (ภาพที่ 4a และ 4d) ในขณะที่วัสดุที่ใช้ TPS จากแป้งผสม (MTPS) พบว่ามีการไหลแทรกเข้าไปในชั้น RS เพียงเล็กน้อย (ภาพที่ 4c และ 4f) และวัสดุที่ใช้ TPS จากแป้งข้าวเจ้า (RTPS) จะไม่พบว่ามี RTPS ไหลแทรกในชั้น RS เลยแต่จะพบอยู่แค่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้น RS เท่านั้น (ภาพที่ 4b และ 4e)

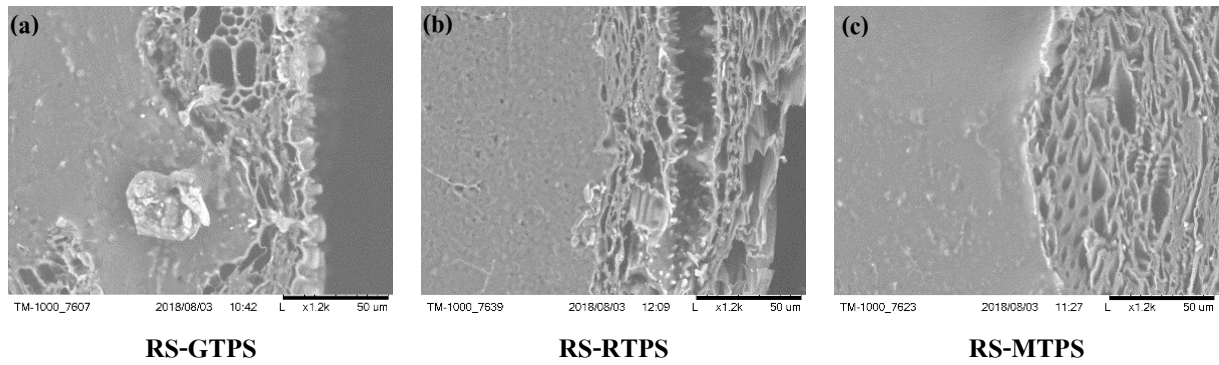
ผลความแตกต่างของลักษณะผิวหน้าด้วย SEM ที่ได้นี้ เป็นผลมาจาก TPS แต่ละชนิดมีค่าดัชนีการไหลที่ต่างกัน พบว่าค่าดัชนีการไหลของ GTPS มีค่าสูงสุด ตามด้วย MTPS และ RTPS ตามลำดับ (Kengkhetkit and Mopoung, 2019) ซึ่งค่าดัชนีการไหลนี้เป็นค่าที่แสดงถึงความหนืดของสารเมื่อหลอมเหลว สารที่มีค่าดัชนีการไหลสูงจะมีความหนืดที่ต่ำ ด้วยเหตุนี้วัสดุเชิงประกอบที่ใช้ GTPS (ดัชนีการไหลสูง) จึงพบการไหลแทรกเข้าไปในชั้น RS ได้มากที่สุด ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่ใช้ RTPS (ดัชนีการไหลต่ำ) จะไม่พบการไหลแทรกเข้าไปในชั้น RS เลย อย่างไรก็ตามเนื่องจากทั้งในส่วน of TPS จากแป้งข้าวและ RS ถือว่าเป็นสารที่มีสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilicity) ดังนั้นจากภาพที่ 5a-5c จะพบได้ชัดเจนว่าตรงบริเวณรอยต่อของพื้นผิวของ RS กับ TPS ทุกชนิด มีความเข้ากันได้ ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้พบได้เช่นเดียวกันในงานวิจัยต่างๆ ที่ได้มีการรายงานไว้ (Zhang *et al.*, 2011; Kaewtatip and Thongmee, 2014)

**RS-GTPS-3****RS-RTPS-3****RS-MTPS-3****RS-GTPS-5****RS-RTPS-5****RS-MTPS-5**

ภาพที่ 3 สัณฐานวิทยาพื้นผิวภาคตัดขวางของวัสดุเชิงประกอบระหว่างเทอร์มอพลาสติกสไตร์ชจากแป้งข้าวแต่ละชนิดกับฟางข้าว ที่กำลังขยาย 50X

**RS-GTPS-3****RS-RTPS-3****RS-MTPS-3****RS-GTPS-5****RS-RTPS-5****RS-MTPS-5**

ภาพที่ 4 สัณฐานวิทยาพื้นผิวภาคตัดขวางของวัสดุเชิงประกอบระหว่างเทอร์มอพลาสติกสไตร์ชจากแป้งข้าวแต่ละชนิดกับฟางข้าว ที่กำลังขยาย 100X



ภาพที่ 5 สัณฐานวิทยาพื้นผิวภาคตัดขวางบริเวณรอยต่อของวัสดุเชิงประกอบระหว่างเทอร์มอพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวแต่ละชนิดกับฟางข้าวแบบแซนวิช 3 ชั้น ที่กำลังขยาย 1200X

ตารางที่ 2 แสดงค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ TPS จากแป้งข้าวชนิดต่างๆ และ RS โดยพบว่า ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบในแต่ละสูตรมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.08-1.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบรูปแบบแซนวิชในงานวิจัยนี้ มีแนวโน้มความหนาแน่นต่ำกว่าวัสดุ TPS จากแป้งข้าวแต่ละชนิด (GTPS, RTPS และ MTPS) ที่มีค่าความหนาแน่นไม่แตกต่างกัน ซึ่งอยู่ในช่วง 1.36-1.37 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Kengkhetkit and Mopoung, 2019) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธีการขึ้น

รูปวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิช TPS ไม่ได้ไหลเข้าไปแทรกในชั้น RS ทุกชั้น จึงพบช่องว่างในบริเวณของชั้นของ RS (ดังภาพที่ 4a-4f) ซึ่งส่งผลได้แนวโน้มความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ TPS จากแป้งข้าวและ RS มีค่าที่ต่ำกว่าวัสดุ TPS จากแป้งข้าวแต่ละชนิด (GTPS, RTPS และ MTPS) เพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบพบว่า วัสดุเชิงประกอบในระบบที่ใช้ GTPS มีแนวโน้มความหนาแน่นสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ RTPS และ MTPS เล็กน้อย

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นของเทอร์มอพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าว และวัสดุเชิงประกอบเทอร์มอพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวแต่ละชนิด และฟางข้าว

ตัวอย่าง	ความหนาแน่น (g/cm^3)	แหล่งข้อมูล
GTPS	1.36 $\pm$ 0.01	(Kengkhetkit and Mopoung, 2019)
RTPS	1.37 $\pm$ 0.01	(Kengkhetkit and Mopoung, 2019)
MTPS	1.37 $\pm$ 0.01	(Kengkhetkit and Mopoung, 2019)
RS-GTPS-3	1.20 $\pm$ 0.05	
RS-GTPS-5	1.20 $\pm$ 0.06	
RS-RTPS-3	1.11 $\pm$ 0.01	
RS-RTPS-5	1.08 $\pm$ 0.02	
RS-MTPS-3	1.11 $\pm$ 0.03	
RS-MTPS-5	1.17 $\pm$ 0.01	

สมบัติความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ RS-TPS แต่ละชนิดแบ่งขาว แสดงดังภาพที่ 6 ค่ามอดูลัสแรงดึงที่ร้อยละความเครียดเท่ากับ 1 (Tensile modulus at 1%strain; ภาพที่ 6a) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการเสียรูปในช่วงต้นของการรับแรงดึง (ที่ระยะยืดร้อยละ 1) ส่วนค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength; ภาพที่ 6b) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการรับความเค้นสูงสุดก่อนที่วัสดุจะเริ่มขาดหรือแตกออกจากกัน จากผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุ TPS ที่เตรียมจากแป้งข้าวต่างๆ พบว่าสมบัติความทนแรงดึงของ TPS แต่ละชนิด (GTPS, RTPS และ MTPS) จะมีค่าค่อนข้างต่ำ และมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย โดยค่ามอดูลัสแรงดึง และค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุ TPS จากแป้งข้าวนี้นี้มีค่าอยู่ในช่วง 7.23-8.20 เมกะพาสคัล และ 0.44-0.48 เมกะพาสคัล ตามลำดับ (Kengkhetkit and Mopoung, 2019)

จากภาพที่ 6a แสดงได้ชัดเจนว่า การใช้ RS สามารถเป็นตัวเสริมแรงให้กับ TPS ได้ โดยวัสดุเชิงประกอบ TPS จากทุกชนิด และ RS มีแนวโน้มค่ามอดูลัสแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่ามอดูลัสแรงดึงของวัสดุ TPS ที่ไม่ได้ผสม RS ซึ่งแนวโน้มนี้สอดคล้องกับงานวิจัยต่างๆ ที่ได้รายงานไว้เกี่ยวกับพัฒนาวัสดุเชิงประกอบ TPS ซึ่งได้พบเช่นเดียวกันว่า การเติมเส้นใยจากธรรมชาติสามารถปรับปรุงค่ามอดูลัสแรงดึงของ TPS ได้ (Ma *et al.*, 2005; Prachayawarakorn *et al.*, 2011; Wattanakornsiri *et al.*, 2011) นอกจากนี้ ภาพที่ 6a ยังเห็นได้ชัดเจนว่า แม้ว่าการใช้ RS เป็นตัวเสริมแรงในระบบ GTPS, MTPS และ RTPS นั้นจะส่งผลให้ค่ามอดูลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบในทุกๆ ระบบ มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นก็ตาม แต่ประสิทธิภาพในการปรับปรุงค่ามอดูลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบแต่ละระบบ (RS-GTPS, RS-MTPS และ

RS-RTPS) มีค่าที่แตกต่างกันคือ ร้อยละ 311-461, ร้อยละ 210-265 และร้อยละ 193-219 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับวัสดุที่ไม่ได้เติม RS

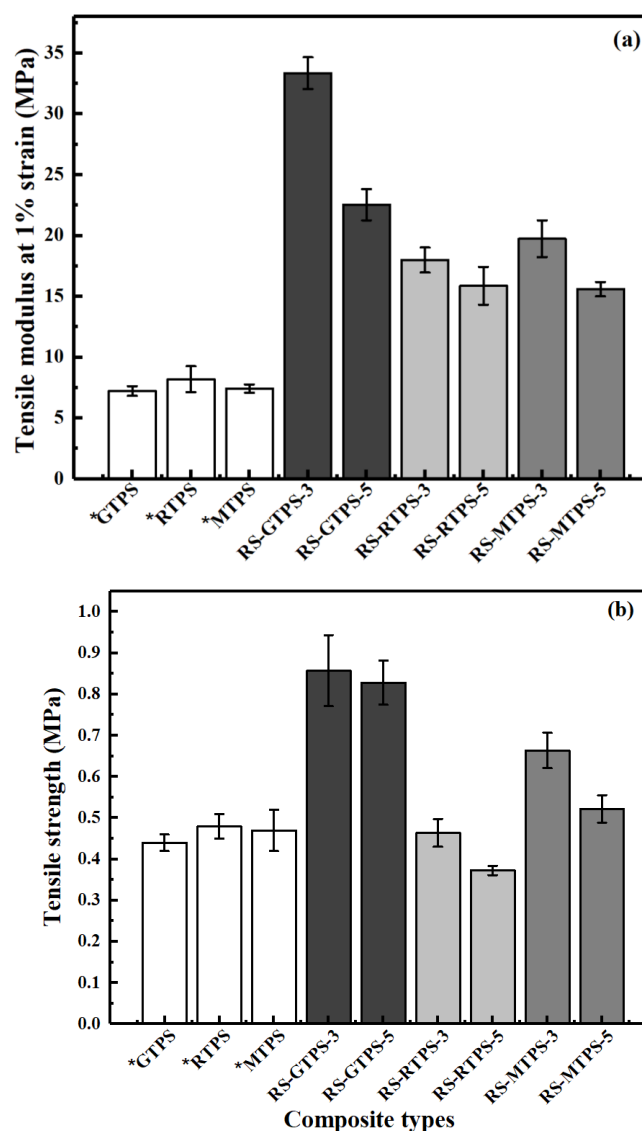
โดยจากหลักฐานภาพ SEM สามารถใช้อธิบายแนวโน้มค่ามอดูลัสแรงดึงข้างต้นได้อย่างชัดเจนว่า เนื่องจากบริเวณรอยต่อของพื้นผิวของ RS และ TPS ทั้ง 3 ชนิดมีความเข้ากันได้ดี (ภาพที่ 5) ดังนั้นในช่วงต้นของการได้รับแรงดึงที่ร้อยละความเครียดเท่ากับ 1 จึงทำให้การถ่ายโอนแรงที่ได้รับระหว่างเมทริกซ์และตัวเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบนี้เกิดขึ้นได้ดี วัสดุเชิงประกอบทุกสูตรจึงมีค่าความต้านทานการเสียรูปที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบ TPS แต่ละชนิดแบ่งขาว จะพบว่า วัสดุเชิงประกอบในระบบ GTPS จะมีความเข้ากันได้ดีมากกว่าวัสดุเชิงประกอบระบบอื่นๆ ด้วยเหตุนี้วัสดุเชิงประกอบระบบ GTPS จึงมีแนวโน้มประสิทธิภาพการปรับปรุงค่ามอดูลัสแรงดึงที่ดีที่สุด ซึ่งลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกันนี้พบได้ในงานวิจัยต่างๆ เกี่ยวกับการใช้ TPS ร่วมกับเส้นใยธรรมชาติอื่นๆ ที่ได้มีการรายงานไว้ (Ma *et al.*, 2005; Prachayawarakorn *et al.*, 2011; Kaewtatip and Thongmee, 2012)

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชที่มีจำนวนชั้นแตกต่างกัน พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีการขึ้นรูปแบบโครงสร้างแซนวิช 3 ชั้น มีแนวโน้มค่ามอดูลัสแรงดึงที่สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีการขึ้นรูปแบบโครงสร้างแซนวิช 5 ชั้นในทุกๆ ระบบที่ทำการศึกษา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิช 3 ชั้น มีความเข้ากันได้ดีระหว่าง TPS และ RS ที่ดีกว่า ดังภาพ SEM (ภาพที่ 3-4) ที่พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่ทำการขึ้นรูปโครงสร้างแบบแซนวิชจำนวน 3 ชั้น มี TPS ไหลเข้าไปแทรกในชั้น RS ได้ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ทำการขึ้นรูปโครงสร้างแบบแซนวิช 5 ชั้น ด้วยเหตุนี้

ค่ามอดูลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ RS-TPS แบบ
แซนวิช 3 ชั้นจึงพบว่ามีแนวโน้มที่สูงกว่า

ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิง
ประกอบ RS-TPS แต่ละชนิด แสดงดังภาพที่ 6b โดย
จากผลการทดลองพบว่า ชนิดของ TPS ที่ใช้ในการ
เตรียมวัสดุเชิงประกอบส่งผลอย่างมากต่อค่าความ
ต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่ได้ โดยพบได้
ชัดเจนว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิง
ประกอบระบบที่ใช้ GTPS มีค่าสูงสุด ตามด้วยวัสดุ
เชิงประกอบระบบ MTPS โดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ

188-194 และ ร้อยละ 111-141 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ
TPS ที่ไม่ได้เติม RS ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบ
ระบบที่ใช้ RTPS จะไม่พบการปรับปรุงค่าความ
ต้านทานแรงดึงเลย เมื่อพิจารณาอิทธิพลของรูปแบบ
การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบต่อค่าความต้านทานแรง
ดึงพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปโครงสร้างแบบ
แซนวิชจำนวน 3 ชั้นจะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่
สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปโครงสร้างแบบแซนวิช
5 ชั้นในทุกๆระบบที่ทำการศึกษา



ภาพที่ 6 สมบัติความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบแต่ละสูตร (a) tensile modulus at 1%strain และ (b) tensile strength เปรียบเทียบกับระบบ GTPS, RTPS และ MTPS (Kengkhetkit and Mopoung, 2019)*

แนวโน้มการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ RS-TPS แต่ละชนิดที่แตกต่างกันนี้อาจเนื่องมาจาก TPS ที่ใช้ในวัสดุเชิงประกอบแต่ละระบบ มีค่าดัชนีการไหลที่แตกต่างกัน จากภาพ SEM (ภาพที่ 3-5) พบว่า ในวัสดุเชิงประกอบระบบที่ TPS สามารถไหลเข้าไปแทรกในส่วนของชั้น RS ได้ดี (RS-GTPS และ RS-MTPS) ทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวเชิงกล (เกิด Mechanical interlocking) ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชและชั้นเสริมแรง (ฟางข้าว) ซึ่งเป็นกลไกเข้ามาช่วยในการถ่ายโอนความเค้นขณะได้รับแรง (Prachayawarakorn *et al.*, 2013; Wattanakornsiri *et al.*, 2011) ดังนั้นจึงทำให้พบว่าวัสดุเชิงประกอบในระบบที่ใช้ GTPS และ MTPS มีค่าความต้านทานแรงดึงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุ TPS ที่ไม่ได้เติม RS ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบในระบบ RTPS ที่มีค่าดัชนีการไหลที่ต่ำกว่า ในระหว่างกดอัด RTPS ที่มีความหนืดสูง ยากที่จะไหลเข้าไปแทรกในชั้นของ RS ทำให้วัสดุเชิงประกอบในระบบนี้ขาดกลไกที่ช่วยถ่ายโอนแรงที่ได้รับระหว่างเมทริกซ์และเส้นใย ด้วยเหตุนี้วัสดุเชิงประกอบระบบ RTPS จึงไม่พบการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงเลย

สรุป

จากผลการศึกษาแนวทางการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิชระหว่างเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวและฟางข้าว พบว่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบในแต่ละชนิดของแป้งข้าวที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีไม่แตกต่างกัน มีค่าอยู่ในช่วง 1.08-1.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อย่างไรก็ตามจากการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงเห็นได้ชัดเจนว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีการใช้ RS เป็นตัวเสริมแรงมีแนวโน้มสมบัติความทนแรงดึงที่ดีกว่าวัสดุ TPS ที่ไม่ได้เติม RS อย่างไรก็ตามชนิดของ

TPS จากแป้งข้าวที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบดังกล่าว ส่งผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่ได้ โดยจากการทดลองจะพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีการใช้เทอร์มอพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียว (GTPS) จะพบว่ามีแนวโน้มของสมบัติความทนแรงดึงที่ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบในระบบที่ใช้ MTPS และ RTPS โดยในวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ GTPS สามารถปรับปรุงค่ามอดูลัสแรงดึง และ ค่าความต้านทานแรงดึง ได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 311-461 และ ร้อยละ 188-194 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับวัสดุ GTPS ที่ไม่ได้มีการเติม RS ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวนี้สอดคล้องกับผลทางสถิติฐานวิทยาที่ได้ทำการศึกษาด้วยภาพ SEM ที่พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีการใช้ GTPS (มีค่าดัชนีการไหลที่สูงกว่า MTPS และ RTPS) จะพบว่ามี GTPS สามารถไหลเข้าไปแทรกในส่วน of ชั้น RS ได้ดีกว่าการใช้ MTPS และ RTPS ซึ่งทำให้วัสดุเชิงประกอบในระบบที่ใช้ GTPS นี้ เกิดการยึดเหนี่ยวเชิงกลระหว่าง GTPS และ RS ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบระบบนี้นอกจากนี้จากผลของจำนวนชั้นในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ TPS และ RS โครงสร้างแบบแซนวิช 3 ชั้นจะมีสมบัติความทนแรงดึงที่ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างแบบแซนวิช 5 ชั้นในทุกกรณีที่ทำการศึกษา ทั้งนี้แนวคิดข้างต้นเป็นการพัฒนาองค์ความรู้การใช้ประโยชน์จากข้าวในรูปแบบใหม่ แม้ว่าข้าวจะมีรูปแบบการใช้ประโยชน์พื้นฐานหลักคือการบริโภค แต่ที่ผ่านมาในบางช่วงปี เกษตรก็ประสบปัญหาวิกฤตราคาข้าวตกต่ำ ดังนั้นการพัฒนาองค์ความรู้การใช้ประโยชน์จากข้าวในประเภทต่างๆ อาจเป็นประโยชน์และเป็นทางเลือกหนึ่งแก่เกษตรกรผู้ผลิตข้าวได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
งบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลล้านนา พิษณุโลก

เอกสารอ้างอิง

- Battegazzore, D., Bocchini, S. and Frache, A. 2016. Thermomechanical improvement of glycerol plasticized maize starch with high loading of cellulose, flax and talc fillers. **Polymer International** 65: 955-962.
- Bayer, I.S., Guzman-Puyol, S., Heredia-Guerrero, J.A., Ceseracciu, L., Pignatelli, F., Ruffilli, R., Cingolani, R. and Athanassiou, A. 2014. Direct transformation of edible vegetable waste into bioplastics. **Macromolecules** 47: 5135-5143
- Honnak, C. 2020. Guidelines for development, production and marketing of Thai rice. **Journal of Thai Ombudsman** 13(1): 91-116. (in Thai)
- Kaewtatip, K. and Thongmee, J. 2012. Studies on the structure and properties of thermoplastic starch/luffa fiber composites. **Materials and Design** 40: 314-318.
- Kaewtatip, K. and Thongmee, J. 2014. Preparation of thermoplastic starch/treated bagasse fiber composites. **Starch/Staerke** 66: 724-728.
- Kengkhetkit, N. and Mopoung, R. 2019. Physical and Mechanical Properties of Thermoplastic Starches from Wet Milled Rice Flours. **Agricultural Science Journal** 50(Suppl. I): 442-448. (in Thai)
- Ma, X., Yu, J. and Kennedy, J.F. 2005. Studies on the properties of natural fibers-reinforced thermoplastic starch composites. **Carbohydrate Polymers** 62: 19-24.
- Mohanty, A.K., Misra, M. and Drzal, L.T. 2002. Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world. **Journal of Polymers and the Environment** 10: 19-26.
- Pollution Control Department. 2004. Effects of open burning. **Journal of Burning-Free Agriculture** 2: 2-3. (in Thai)
- Prachayawarakorn, J., Chaiwatyothin, S., Mueangta, S. and Hanchana, A. 2013. Effect of jute and kapok fibers on properties of thermoplastic cassava starch composites. **Materials and Design** 47: 309-315.
- Prachayawarakorn, J., Ruttanabus, P. and Boonsom, P. 2011. Effect of Cotton Fiber Contents and Lengths on Properties of Thermoplastic Starch Composites Prepared from Rice and Waxy Rice Starches. **Journal of Polymers and the Environment** 19: 274-282.
- Saiah, R., Sreekumar, P.A., Gopalakrishnan, P., Leblanc, N., Gattin, R. and Saiter, J.M. 2009. Fabrication and characterization of 100% green composite: Thermoplastic based on wheat flour reinforced by flax fibers. **Polymer Composites** 30: 1595-1600.
- Varda, M., Darshan, M. and Nishith, D. 2014. Can a starch based plastic be an option of environmental friendly plastic?. **Journal of Global Biosciences** 3(3): 681-685.
- Wattanakornsiri, A., Pachana, K., Kaewpirom, S., Sawangwong, P. and Migliaresi, C. 2011. Green composites of thermoplastic corn

starch and recycled paper cellulose fibers.

Songklanakarin Journal of Science and Technology 33(4): 461-467.

Zhang, Y., Thompson, M. and Liu, Q. 2011. The effect of pea fiber and potato pulp on thermal property,

surface tension, and hydrophilicity of starch-based bioplastics. **Carbohydrate Polymers** 86: 700-707.

คอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เถ้าขาน้อยบดละเอียดปริมาณสูง ร่วมกับผงแคลเซียมคาร์บอเนต

High Strength Concrete Containing High Volume Ground Bagasse Ash Blended with Calcium Carbonate Powder

ทวิช กล้าแท้* Trinh Nhat Ho Tran Sambath Men วีระชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

Tawich Klathae*, Trinh Nhat Ho Tran, Sambath Men, Weerachart Tangchirapat

and Chai Jaturapitakkul

Received: 21 July 2021, Revised: 13 October 2021, Accepted: 27 October 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความต้องการสารลดน้ำพิเศษ ความพรุน กำลังอัด และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าขาน้อยบดละเอียด (GB) ในปริมาณสูงโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 65, 70, 75 และ 80 ร่วมกับการใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CC) ร้อยละ 15, 10, 5 และ 0 คงที่ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (65GB15CC, 70GB10CC, 75GB5CC และ 80GB) ทุกอัตราส่วนผสม ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตกำลังสูงผสม GB ในปริมาณสูง มีความต้องการสารลดน้ำพิเศษมากกว่าคอนกรีตควบคุม (CON) ในขณะที่ CC สามารถช่วยลดความต้องการสารลดน้ำพิเศษของคอนกรีตกำลังสูงได้ร้อยละ 25 ถึง 50 ความพรุนของคอนกรีตกำลังสูงมีค่ามากขึ้นตามปริมาณการแทนที่ของ GB ที่เพิ่มขึ้น กำลังอัดที่อายุ 28 วัน คอนกรีต 80GB, 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC สามารถพัฒนากำลังอัดเท่ากับ 56.8, 58.2, 65.2 และ 55.5 MPa ตามลำดับ ซึ่งจัดเป็นคอนกรีตกำลังสูง (มากกว่า 55 MPa) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าคอนกรีตกำลังสูงที่แทนที่ด้วย GB ร่วมกับ CC มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงร้อยละ 60 ถึง 61 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CON จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า GB เป็นวัสดุพอชโซลานที่สามารถใช้ร่วมกับ CC เพื่อแทนที่ OPC ได้ถึงร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อผลิตคอนกรีตกำลังสูงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้

คำสำคัญ: เถ้าขาน้อยปริมาณสูง, คอนกรีตกำลังสูง, แคลเซียมคาร์บอเนต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เลขที่ 126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha Uthit Road, Bang Mot, Thung Khru, Bangkok 10140, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): Tawich.civil@mail.kmutt.ac.th Tel: 08 4149 7426

ABSTRACT

This research aimed to investigate the superplasticizer (SP) requirement, porosity, compressive strength and environmental impact of high strength concrete (HS-C) containing high volume ground bagasse ash (GB) at 65, 70, 75 and 80 wt% of binder blended with calcium carbonate powder (CC) at 15, 10, 5 and 0 wt% of binder while containing Portland cement type I (OPC) at 20 wt% of binder (65GB15CC, 70GB10CC, 75GB5CC and 80GB, respectively). The results indicated that the HS-C containing high volume GB required SP more than HS-C made with OPC 100 wt% of binder (CON). However, the use of CC could reduce SP requirement about 25-50 % as compared with 80GB concrete. With the rise in GB content, the porosity of HS-C increased. The compressive strengths at 28 days and the 80GB, 75GB5CC, 70GB10CC and 65GB15CC concretes had the compressive strengths of 56.8, 58.2, 65.2 and 55.5 MPa, respectively which were higher than 55 MPa and could be classified as HS-C. For environmental impacts, GB blended with CC concretes showed a reduction in carbon dioxide emission of 60-61% as compared with CON concrete. It is suggested that GB was a good pozzolanic material and incorporating of CC could replace OPC up to 80 wt% of binder for producing green HS-C.

Key words: high volume bagasse ash, calcium carbonate, high strength concrete

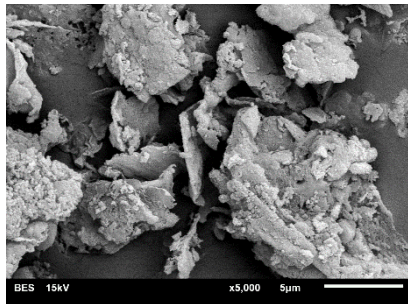
บทนำ

คอนกรีตที่ใช้ปอซโซลานปริมาณสูง (High Volume Pozzolan Concretes, HVPC) เริ่มมีการศึกษาในปีทศวรรษ 1980 โดย The Canadian Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET) ซึ่งออกแบบโดยใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณสูงเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ร้อยละ 55 ถึง 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สำหรับงานคอนกรีตโครงสร้างอาคารในประเทศแคนาดา (Malhotra, 1986; Bilodeau and Malhotra, 2000; Malhotra, 2002) ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่และเป็นการลดปริมาณการผลิต OPC ซึ่งใช้พลังงานความร้อนสูงถึง 1,500 °C ในการผลิตปูนเม็ด โดยในปี 2016 พบว่าทั่วโลกมีการผลิต OPC มากกว่า 4.65 พันล้านตัน (The European Cement Association (CEMBUREAU), 2018) ซึ่งทุกๆ 1 ตันของ OPC ที่

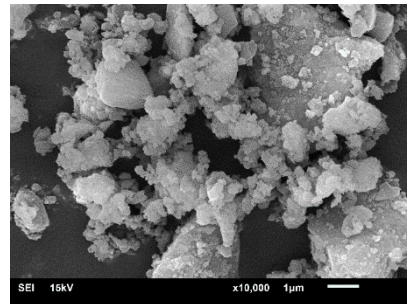
ผลิตได้ มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) สู่บรรยากาศราวๆ 1 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 5 ถึง 7 ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่ปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศของโลก ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) ต่อมาเริ่มมีการศึกษาวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ เพื่อนำมาใช้ในการแทนที่ OPC ในปริมาณสูง (Chindaprasirt *et al.*, 2007; Awal and Abubakar, 2011; Johari *et al.*, 2012) นอกจากนี้ Kakhuntodd *et al.* (2012) ได้ศึกษาคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหิน (FFA) และเถ้าปาล์มน้ำมัน (GPA) ในปริมาณสูงแทนที่ OPC ร้อยละ 0, 20, 40, 55 และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีต FFA20, FFA40 และ FFA55 มีค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 28 วัน ในขณะที่คอนกรีต GPA40, GPA55 และ GPA70 มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 28 และ 90 วัน นอกจากนี้คอนกรีต FFA20, FFA40, FFA55, FFA70, GPA20 และ GPA40

ที่อายุ 28 และ 90 วัน มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม และความพรุนลดลงตามอายุของคอนกรีต ต่อมาในปี 2017 Rerkpiboon *et al.* (2017) ศึกษาผลกระทบของเถ้าขานอ้อยบดละเอียด (GBA) ที่มีต่อความต้องการสารลดน้ำพิเศษ กำลังอัด โดยใช้ GBA แทนที่ OPC ร้อยละ 35, 50, 65 และ 80 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่า

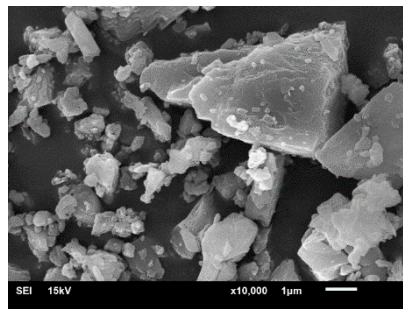
ปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ GBA แทนที่ OPC ในปริมาณที่มากขึ้น การใช้ GBA แทนที่ OPC อัตราร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 90 วัน



(a) เถ้าขานอ้อยจากโรงงาน (BA) กำลังขยาย 5,000 เท่า



(b) เถ้าขานอ้อยบดละเอียด (GB) กำลังขยาย 10,000 เท่า



(c) ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CC) กำลังขยาย 10,000 เท่า

ภาพที่ 1 ภาพถ่ายขยายอนุภาค

เถ้าขานอ้อย (Bagasse Ash) เป็นวัสดุปอชโซลานชนิดหนึ่งซึ่งมีส่วนประกอบหลัก คือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) มีค่าอยู่ช่วงร้อยละ 65 ถึง 75 ที่อยู่ในภาพที่ไม่เป็นผลึกในปริมาณสูง (Singh *et al.*, 2000) ซึ่งมีศักยภาพสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ เมื่อทำการบดเถ้าขานอ้อยให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น หรือทำให้มีขนาดอนุภาคและความพรุนลดลง อีกทั้งประเทศไทยมีปริมาณเถ้าขานอ้อยที่เพียงพอต่อการพัฒนา เพื่อนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไปได้ ถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยของการใช้เถ้าขานอ้อยทั้งในประเทศ และต่างประเทศ ออกมาอย่างต่อเนื่อง แต่งานวิจัยเหล่านั้นเป็นเพียง

งานวิจัยที่พิจารณาถึงสมบัติเบื้องต้นของมอร์ตาร์หรือคอนกรีต ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อย ในปริมาณร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (Chusilp *et al.*, 2009; Cordeiro *et al.*, 2009; Rajasekar *et al.*, 2018) ในขณะที่งานวิจัยที่พัฒนาการใช้เถ้าขานอ้อยในปริมาณสูงยังมีน้อยมาก อีกทั้งยังไม่พบการใช้เถ้าขานอ้อยปริมาณสูง ในงานคอนกรีตกำลังสูงในปัจจุบัน (Rerkpiboon *et al.*, 2017; Chindaprasirt *et al.*, 2020; Klathae *et al.*, 2020)

จากการรวบรวมข้อมูลการศึกษาต่างๆ พบว่าการใช้เถ้าขานอ้อยในปริมาณสูง ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังช่วงต้นค่อนข้างต่ำ และมีความ

ต้องการน้ำหรือความต้องการสารลดน้ำพิเศษที่สูงมาก เพื่อยังคงความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสด ดังนั้นจึงควรมีการเพิ่มกำลังอัดในช่วงต้นของคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อย โดยใช้วัสดุทางเลือกใหม่ที่ผลิตได้ในประเทศและมีความสามารถในการเติมแทรกเข้าไปสู่ภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์และวัสดุป่อชโซลานได้ดี เช่น ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate powder) ที่เกิดจากกระบวนการย่อยหิน ด้วยสาเหตุที่แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อย (Inert material) (Liu and Yan, 2010) มีลักษณะรูปร่างของอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ มีขนาดเล็กมาก สามารถช่วยเติมเต็มช่องว่างได้ดี ทำให้กำลังอัดในช่วงต้นสามารถ

พัฒนาได้ดียิ่งขึ้น (Yahia *et al.*, 2005; Felekoglu, 2007; Esping, 2008; Sua-Iam and Makul, 2013) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาการใช้เถ้าขานอ้อยในปริมาณสูงร่วมกับผงแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเป็นการนำข้อดีของวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ร่วมกัน เพื่อให้ได้คอนกรีตกำลังสูงที่มีสมบัติที่ดีกว่าการเลือกใช้เถ้าขานอ้อยหรือผงแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่ง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC), เถ้าขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล (BA), เถ้าขานอ้อยบดละเอียด (GB) และผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CC),

Oxide	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	Specific gravity	Median particle size, d_{50} (μm)
OPC	20.5	4.7	3.3	64.2	1.3	2.6	0.3	0.2	2.8	—	3.15	12.5
BA	59.6	9.3	5.3	8.5	1.8	0.2	0.9	3.3	11.1	74.2	2.06	37.0
GB	63.4	8.1	6	8.8	1.7	2.8	0.2	1.5	7.5	77.5	2.17	4.67
CC	<0.1	<0.1	<0.1	54.8	0.6	—	—	—	43.8	—	2.70	2.64

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ตามมาตรฐาน มอก 15-2555 (Thai Industrial Standard, 2012) มีลักษณะ เป็นฝุ่นผง เนื้อละเอียด มีสีเทาเข้ม มีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 64.2 และ LOI เท่ากับ 2.8 เถ้าขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล (BA) ลักษณะทั่วไปของเถ้าขานอ้อยก่อนบด มีสีน้ำตาลเทาเล็กน้อย เนื้อเถ้าหยาบมองเห็นเป็นเม็ดมีเหลี่ยมมุมไม่มีรูปทรงชัดเจน มีความพรุนภาพที่ 1 (a) องค์ประกอบหลักทางเคมี คือ SiO₂ มีค่าเท่ากับ 59.6 และมี LOI เท่ากับร้อยละ 11.1 ของน้ำหนัก เถ้าขานอ้อยบดละเอียด (GB) โดยนำ BA อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110±5 °C เป็นเวลา 24 h. จากนั้นนำมา

บดละเอียดด้วยเครื่องบดแบบตกระทาบ (Los Angeles abrasion machine) ใช้ปริมาณเถ้าขานอ้อยครั้งละ 10 kg ต่อจำนวนลูกเหล็กขนาดน้ำหนัก 50 kg. หลังจากบดเป็นเวลา 4 h. นำเถ้าขานอ้อยประมาณ 100 g. มาใช้ในการหาความละเอียด ด้วยวิธีการร่อนแบบเปียก (Wet Sieve Analysis) โดยใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 และนำไปอบที่อุณหภูมิ 110±5 °C เป็นเวลา 24 hr. จะได้ขนาดอนุภาคของเถ้าขานอ้อยข้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งลักษณะทั่วไป มีสีดำสนิท เนื้อเถ้ามีขนาดเล็กละเอียด ภาพที่ 1 (b) มีองค์ประกอบหลัก คือ SiO₂, อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์

(Fe₂O₃) เท่ากับร้อยละ 63.4, 8.1 และ 6.0 ตามลำดับ ซึ่งมีผลรวมทั้ง 3 องค์ประกอบหลัก เท่ากับ 77.5 เมื่อจัดประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 (American Society for Testing and Materials, 2015) ตรงตามประเภทของวัสดุปอซโซลาน Class C ซึ่งต้องมีผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ อยู่ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 70 นอกจากนี้ยังพบว่า GB มี CaO, ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) และแมกเนเซียมออกไซด์ (MgO) เท่ากับ 8.8 1.5 และ 1.7 ตามลำดับ มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา

(Loss on Ignition, LOI) เท่ากับ 7.5 โดยน้ำหนัก ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CC) จากบริษัทผู้ผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต ในประเทศไทย มีลักษณะเป็นผงละเอียดแสดงในภาพที่ 1 (c) สีครีมอ่อนใกล้เคียงขาว มีลักษณะคล้ายแป้ง CC มีองค์ประกอบหลักทางเคมีคือ CaO มีค่าเท่ากับ 54.8 และมี LOI ที่สูงเท่ากับร้อยละ 43.8 ของน้ำหนัก ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของ CaCO₃ โดยสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน ได้แก่ OPC, BA, GB และ CC แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 2 สมบัติจำเพาะของมวลรวม

Properties	Fineness modulus	Specific gravity	Water absorption (%)
River Sand	2.84	2.66	1.04
Crushed Granite	5.52	2.63	0.68

มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษาเป็นวัสดุจากธรรมชาติ คือหินแกรนิตและทรายแม่น้ำ ตามลำดับ โดยมีสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าการดูดซึมน้ำ และโมดูลัสความละเอียด แสดงดังตารางที่ 2 โดยมีมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดมีค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าการดูดซึมน้ำดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งมวล

รวมละเอียดมีขนาดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 โดยมีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.84 และมวลรวมหยาบมีขนาดใหญ่อยู่เท่ากับ 10 mm. มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 5.52

2. วิธีการเตรียมวัสดุ การผสม และการทำตัวอย่างทดสอบคอนกรีตกำลังสูง

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูง

Mix	Mix proportion (kg/m ³)						SP* (wt% of binder)	W/B	Slump (mm)
	OPC	CC	GB	Fine Agg.	Coarse Agg.	Water			
CON	560	-	-	760	955	157	1.0	0.28	190
80GB	112	-	448	685	860	157	4.0	0.28	180
75GB5CC	112	28	420	690	860	157	3.0	0.28	170
70GB10CC	112	56	392	690	865	157	2.5	0.28	175
65GB15CC	112	84	364	695	870	157	2.0	0.28	185

* สารลดน้ำพิเศษมีน้ำเป็นส่วนผสมอยู่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

คอนกรีตกำลังสูงใช้ GB แทนที่ OPC ในอัตราส่วนร้อยละ 65, 70, 75 และ 80 ร่วมกับ CC ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 10, 5 และ 0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ โดยคงที่อัตราส่วนของ OPC ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (65GB15CC, 70GB10CC, 75GB5CC และ 80GB) ทุกส่วนผสมตามลำดับ ใช้สารลดน้ำพิเศษชนิดโพลีคาร์บอกซิเลต (Polycarboxylate-based) ชนิด F ตามมาตรฐาน ASTM C494 (American Society for Testing and Materials, 2016) เพื่อควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้คงที่เท่ากับ 0.28 และควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ระหว่าง 150 ถึง 200 mm. โดยกำหนดปริมาณวัสดุประสาน (OPC+GB+CC) เท่ากับ 560 kg/m^3 โดยส่วนผสมคอนกรีตและสัญลักษณ์ แสดงในตารางที่ 3

3. การทดสอบสมบัติของวัสดุประสาน

สมบัติทางกายภาพของ CC, GB และ OPC ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188 (American Society for Testing and Materials, 2014a) ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Median particle size; d_{50}) ทดสอบสมบัติทางเคมีโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) และถ่ายภาพขยายกำลังสูงของอนุภาคของ GB และ CC โดยใช้เครื่องถ่ายภาพ Scanning Electron Microscope (SEM)

4. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง

ทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 1, 7, 28 และ 90 วัน โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. และ สูง 200 mm. หลังจากการหล่อคอนกรีต 24 h. จึงทำการถอดแบบหล่อคอนกรีต และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1 วัน ส่วนที่เหลือนำไปบ่มน้ำประปา โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 (American Society for Testing and Materials, 2014b) โดยทดสอบ 3 ตัวอย่างเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

5. การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนของซีเมนต์เพสต์โดยวิธี Thermogravimetric analysis (TGA)

ทำการศึกษาซีเมนต์เพสต์สองชนิด ได้แก่ ซีเมนต์เพสต์ 70GB10CC และ 80GB โดยวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบ โดยการกำหนดสภาวะความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน และมีอัตราการไหล 120 ml/min โดยให้อัตราของความร้อนถูกรักษาให้ต่อเนื่องจาก 10°C /ต่ำสุด และความร้อนสูงสุดถึง $1,000^\circ\text{C}$ โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $10^\circ\text{C}/\text{min}$ เพื่อวิเคราะห์การลดลงของปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ของปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์เพสต์

6. การทดสอบความพรุนของคอนกรีตกำลังสูง

ทดสอบหาความพรุนของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C642 (American Society for Testing and Materials, 2013) โดยนำตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. สูง 200 mm. มาตัดตามขวางที่ตำแหน่งหัวและท้ายของตัวอย่าง เพื่อให้ได้ก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. สูง 100 mm. หลังจากนั้นตัดก้อนตัวอย่างอีกครั้งที่กึ่งกลางความยาวเพื่อให้ได้ก้อนตัวอย่างทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. สูง 50 mm. เพื่อหลีกเลี่ยงการเยิ้มของคอนกรีตส่วนบนซึ่งเป็นส่วนที่มีกำลังต่ำและมีความพรุนสูง โดยนำก้อนตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^\circ\text{C}$ เป็นระยะเวลา 24 h. แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อบันทึกเป็นน้ำหนักอบแห้ง (Mass_d , g.) จากนั้นนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 48 h. แล้วจึงนำขึ้นจากน้ำเพื่อเช็ดผิวและชั่งน้ำหนัก เพื่อบันทึกเป็นน้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้งหลังแช่น้ำ (Mass_s , g.) นำก้อนตัวอย่างไปต้มในน้ำเดือดเป็นระยะเวลา 5 h. หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงเป็นระยะเวลา 14 h. แล้วจึงนำขึ้นจากน้ำเพื่อเช็ดผิวและชั่งน้ำหนัก (Mass_c , g.) และสุดท้ายนำก้อนตัวอย่างชั่งน้ำหนักในน้ำ (Mass_w , g.)

ตามลำดับ ความหนาแน่น และความพรุน และการดูด

ซึมน้ำของคอนกรีต สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$\text{Porosity (\%)} = \left(\frac{\text{Mass}_c - \text{Mass}_a}{\text{Mass}_c - \text{Mass}_d} \right) \times 100 \quad (1)$$

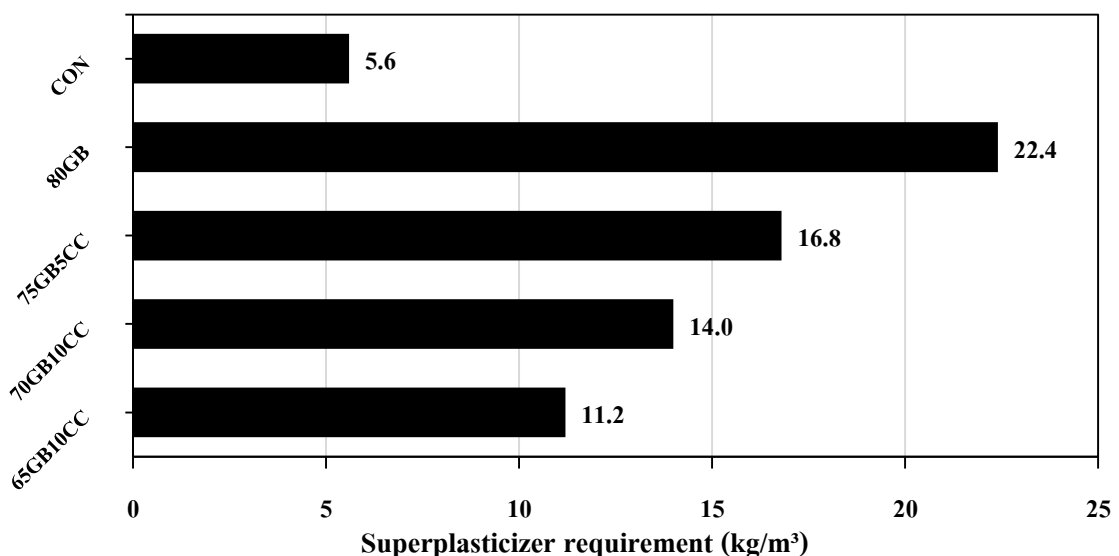
เมื่อ Mass_a หมายถึง น้ำหนักหลังอบแห้ง, Mass_c หมายถึง น้ำหนักในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งหลังแช่น้ำ, Mass_d หมายถึง น้ำหนักในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งหลังต้มในน้ำ, และ Mass_d หมายถึง น้ำหนักขณะชั่งในน้ำ

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ความต้องการสารลดน้ำพิเศษ

ตารางที่ 3 แสดงอัตราส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูง พบว่าปริมาณการใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer, SP) ในส่วนผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ GB แทนที่ OPC ในปริมาณที่มากขึ้น กล่าวคือคอนกรีตซึ่งใช้ GB แทนที่ OPC ในอัตราร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในส่วนผสมใช้ปริมาณ SP ร้อยละ 4.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

หรือเท่ากับ 22.4 kg/m^3 (ภาพที่ 2) ซึ่งสูงกว่าคอนกรีต CON หรือคอนกรีตที่ใช้ OPC เพียงอย่างเดียว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.6 kg/m^3 หรือคิดเป็นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สาเหตุเนื่องจากลักษณะอนุภาคของ GB ที่ผ่านการบดมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม และมีผิวขรุขระ และมีความพรุนสูง ดังแสดงในภาพที่ 1 (a) และความละเอียดของ GB ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ $4.67 \mu\text{m}$ ซึ่งเล็กกว่า OPC ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ $12.50 \mu\text{m}$ ดังนั้น GB จึงมีพื้นที่ผิวมากกว่า OPC เมื่อมีน้ำหนักเท่ากัน ทำให้มีความต้องการน้ำและ SP เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับวัสดุปอชโซลานที่เป็นเถ้าชีวมวลอื่นๆ เช่น เถ้าแกลบ และเถ้าปาล์มน้ำมัน (Chindaprasirt *et al.*, 2007; Tangchirapat *et al.*, 2009)



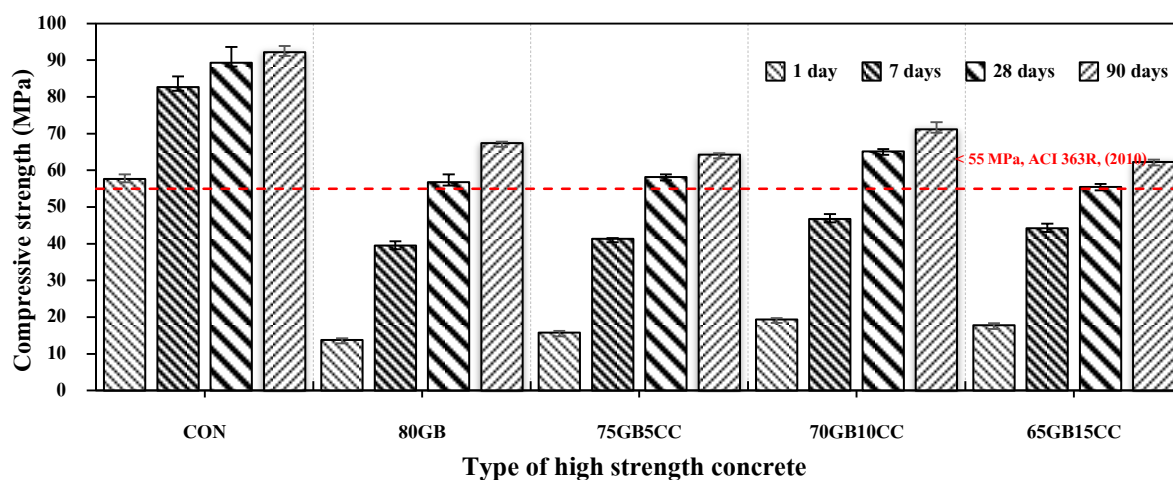
ภาพที่ 2 ความต้องการสารลดน้ำพิเศษของคอนกรีตกำลังสูง

ในขณะที่การใช้ CC ร่วมกับ GB พบว่า ปริมาณความต้องการ SP ที่ใช้มีค่าลดลงตามปริมาณ การแทนที่ของ CC ใน GB ที่เพิ่มขึ้น โดยผลของการ แทนที่ในคอนกรีต 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC มีปริมาณความต้องการใช้ SP ร้อยละ 3.0, 2.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หรือ เท่ากับ 16.8, 14.0 และ 11.2 kg/m³ ตามลำดับ (ภาพที่ 2) เพื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ระหว่าง 150 ถึง 200 mm. ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคของ CC ที่เล็กกว่า GB และ OPC จะไปแทรกตัวอยู่ระหว่าง GB และ OPC ส่งผลให้การกระจายตัวดีขึ้น และการเพิ่ม CC เป็นการลดปริมาณ GB อีกทั้ง CC มีความความ พูนน้อยกว่า GB (จากภาพที่ 1) จึงส่งผลให้ปริมาณ ความต้องการ SP ลดลงเมื่อใช้ CC ในปริมาณมากขึ้น (Felekoglu, 2007; Esping, 2008; Sua-Iam and Makul, 2013)

2. กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง

ภาพที่ 3 แสดงผลทดสอบการพัฒนากำลัง อัดของคอนกรีตกำลังสูง โดยคอนกรีต CON มี ผลทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 7, 28 และ 90 วัน มีค่า เท่ากับ 57.7 82.7 89.3 และ 92.2 MPa ตามลำดับ เมื่อ ทำการแทนที่ OPC ด้วย GB ร่วมกับ CC ที่อายุ 1 วัน

คอนกรีต 80GB, 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 13.8, 15.8, 19.4 และ 17.8 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 24, 27, 34 และ 31 ของคอนกรีต CON ตามลำดับ ต่อมาที่อายุ 7 วัน คอนกรีต 80GB, 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC มีค่ากำลัง อัดเท่ากับ 39.5, 41.1, 46.8 และ 44.2 MPa หรือคิด เป็นร้อยละ 48, 52, 57 และ 54 ของคอนกรีต CON ตามลำดับ เนื่องจากการแทนที่ OPC ด้วย GB ปริมาณ สูง ทำให้ปริมาณ OPC ลดลงจำนวนมาก ส่งผลให้ Ca(OH)₂ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นน้อย จึงทำให้ ปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงแรกเกิดขึ้นได้ช้า ส่งผล ให้การพัฒนากำลังอัดในระยะแรกมีค่าน้อยกว่า คอนกรีตที่มี OPC เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (Rerkpiboon *et al.*, 2015; Chindaprasirt *et al.*, 2020; Klathae *et al.*, 2020) อย่างไรก็ตามการใช้ CC ร่วมกับ GB ในคอนกรีตกำลังสูง สามารถช่วยพัฒนากำลังอัด ในช่วงต้นให้มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจาก CC มีความละเอียดสูง ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นเพิ่มขึ้น จากผล ของการเติมเต็มช่องว่าง (Filler material) ของคอนกรีต (Felekoglu, 2007; Esping, 2008; Sua-Iam and Makul, 2013)



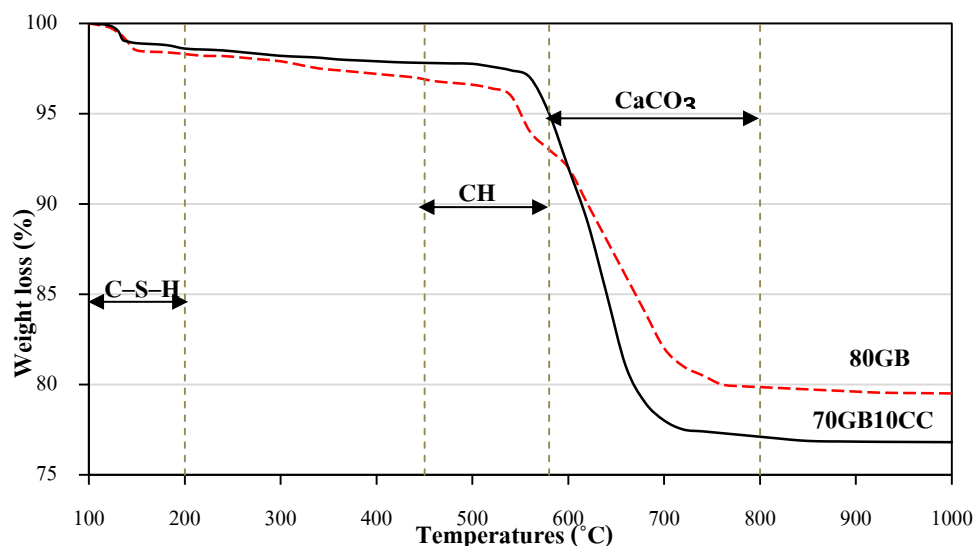
ภาพที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง

ที่อายุ 28 และ 90 วัน คอนกรีต 80GB, 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 55.5 ถึง 71.2 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 62 ถึง 77 ของคอนกรีต CON ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่แทนที่ OPC ด้วย GB ปริมาณสูงร่วมกับ CC และมี OPC เพียง 112 kg/m³ สามารถพัฒนากำลังอัดคอนกรีตได้มากกว่า 55 MPa ซึ่งจัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงตามมาตรฐาน ACI 363R (American Concrete Institute, 2010) ทั้งนี้เนื่องจาก GB มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า OPC ทำให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่ดี ส่งผลให้กำลังอัดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพียงพอที่จะไปชดเชยกับกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สูญเสียไปจากการแทนที่ OPC นอกจากนี้ อนุภาคที่มีขนาดเล็กของ GB ยังสามารถแทรกตัวในอนุภาคของ OPC ทำให้เนื้อคอนกรีตมีการอัดแน่นมากขึ้น และมีความชื้นน้ำมากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ GB แทนที่ OPC ในปริมาณสูง ร่วมกับ CC ส่งผลทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจาก CC มีส่วนช่วยในการกระจายขนาดคละระหว่าง GB และ OPC ส่งผลให้ Ca(OH)₂ จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และ SiO₂ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาปอซโซลาน ส่งผลให้เกิดเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ในคอนกรีต

มากขึ้น (Felekoglu, 2007; Sua-Iam and Makul, 2013; Shaikh and Supit, 2014)

3. ผลการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของซีเมนต์เพสต์

ภาพที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) ของซีเมนต์เพสต์ที่มี GB ร้อยละ 80 (80GB) และซีเมนต์เพสต์ที่มี GB ร้อยละ 70 ร่วมกับ CC ร้อยละ 10 (70GB10CC) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อายุ 60 วัน ผลการทดสอบพบว่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างรวดเร็วในช่วงในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 100 ถึง 450 °C ซึ่งช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเกิดจากการสูญเสียของน้ำหรือความชื้นในโครงสร้าง และการสลายตัวของ Ettringite รวมถึง C-S-H ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่าง OPC กับน้ำ (Bai *et al.*, 2003; Kroehong and Sinsiri, 2012) ต่อมาที่อุณหภูมิ 450 ถึง 580 °C ซึ่งช่วงอุณหภูมิดังกล่าวปริมาณ Ca(OH)₂ จะเกิดการสลายตัวในรูปของ CaO และน้ำบางส่วนเมื่อได้รับความร้อน ส่วนการวิเคราะห์การสลายตัวของซีเมนต์เพสต์เมื่อได้รับความร้อนช่วงอุณหภูมิ 580 ถึง 800 °C พบว่ากระบวนการดังกล่าวได้เปลี่ยนโครงสร้างของ CaCO₃ (El-Jazairi and Illston, 1977; Chindaprasirt *et al.*, 2007; Kroehong and Sinsiri, 2012)



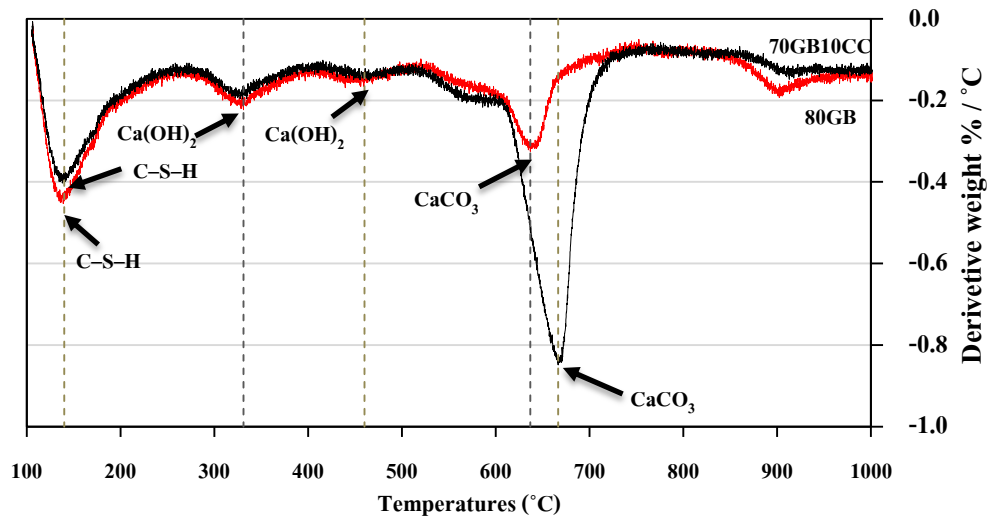
ภาพที่ 4 ผลต่างของน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าขาน้อยปริมาณสูง และซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าขาน้อยปริมาณสูง ร่วมกับผงแคลเซียมคาร์บอเนต

จากผลการทดสอบปริมาณคงเหลือของ Ca(OH)_2 ซึ่งสามารถวิเคราะห์จากการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 450 ถึง 580 °C (Chaipanich and Nochaiya, 2010; Kroehong and Sinsiri, 2012; Feng *et al.*, 2019) โดยเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ 80GB และซีเมนต์เพสต์ 70GB10CC ที่อายุการบ่ม 60 วัน พบว่าซีเมนต์เพสต์ 70GB10CC มีปริมาณ Ca(OH)_2 คงเหลือร้อยละ 6.86 โดยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ 80GB ซึ่งมีปริมาณ Ca(OH)_2 คงเหลือร้อยละ 7.93 โดยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ แม้ว่าจะมีปริมาณ OPC ที่เท่ากันเนื่องจาก CC ซึ่งมีขนาดเล็กและมีความสามารถในการกระจายขนาดคละของวัสดุผง ทำให้ปริมาณช่องว่างลดลง ส่งผลให้มีการทำปฏิกิริยาระหว่าง Ca(OH)_2 ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน กับ SiO_2 ได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ดี ทำให้ปริมาณ Ca(OH)_2 ลดลงระหว่างการทำปฏิกิริยา (Chaipanich and Nochaiya, 2010; Kroehong and Sinsiri, 2012; Sua-Iam and Makul, 2013) และนำไปสู่การพัฒนากำลังอัดที่ดีขึ้นของซีเมนต์เพสต์ 70GB10CC

ภาพที่ 5 แสดงผลการสูญเสียน้ำหนักเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Derivative thermogravimetric analysis, DTG) พบว่าการสลายตัวของสารประกอบซีเมนต์เพสต์เริ่มสลายตัวอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 260 °C อัตราการสลายตัวของสารประกอบซีเมนต์เพสต์ลดลง การสลายตัวของสารประกอบซีเมนต์เพสต์ที่อัตราการให้ความร้อนต่างกันส่งผลให้มีลักษณะต่างกันไป โดยซีเมนต์เพสต์เกิดการสลายตัวสูงสุด 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ ที่อุณหภูมิ 140 และ 670 °C ตามลำดับ กล่าวได้ว่าช่วงของอุณหภูมิที่ทำให้เกิดพีคของ DTG ของแต่ละอัตราการให้ความร้อนจะมี 2 ช่วง คือ ที่ 140 ถึง 330 และ 630 ถึง 670 °C ซึ่งเป็นช่วงเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตามอุณหภูมิของ C-S-H, Ca(OH)_2 และ CaCO_3 และเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ (Chaipanich and Nochaiya, 2010; Kroehong and Sinsiri, 2012; Feng *et al.*, 2019; Saladi and Ashraf, 2020) ซึ่งพบว่าขนาดของอนุภาค รวมถึงชนิดของวัสดุประสานมีสมบัติการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนที่แตกต่างกัน และช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอยู่ในช่วง 50 ถึง 200 °C สำหรับ C-S-H ต่อมาที่อุณหภูมิ 400 ถึง 500 สำหรับ Ca(OH)_2

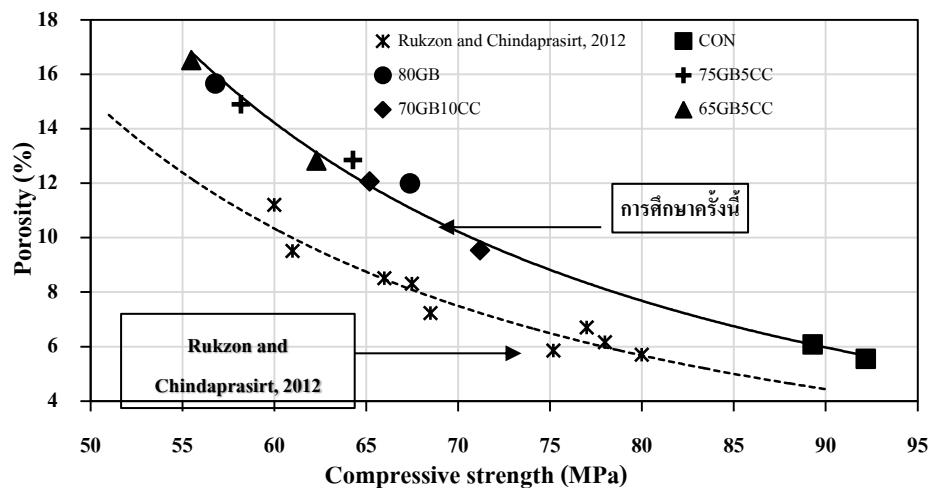
และในช่วงที่สามอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 600 ถึง 1,000 °C ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงของ CaCO_3 ซึ่งมีองค์ประกอบ

ของ CaO และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) (Feng *et al.*, 2019)



ภาพที่ 5 การสูญเสียน้ำหนักเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าขาน้อยปริมาณสูง และซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าขาน้อยปริมาณสูง ร่วมกับผงแคลเซียมคาร์บอเนต

4. ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง ที่อายุ 28 และ 90 วัน

ภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง ที่อายุ 28 และ 90 วัน โดยคอนกรีต CON มีค่าความพรุนของคอนกรีตเท่ากับร้อยละ 6.07 และ 5.54 ในขณะที่มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 89.3 และ 92.2 MPa ที่อายุ 28 และ 90

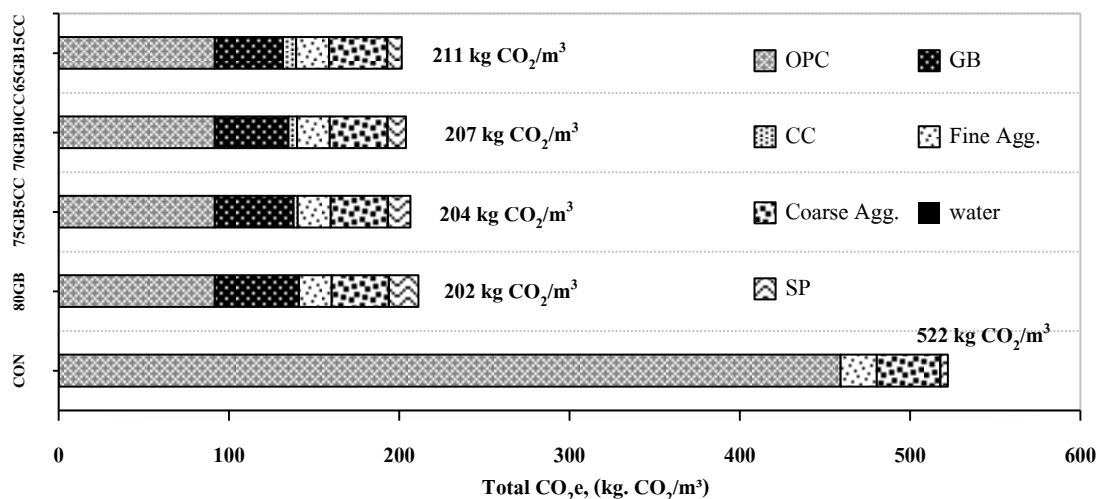
วัน ตามลำดับ คอนกรีต 80GB มีค่าความพรุนสูงกว่าคอนกรีต CON โดยค่าความพรุนของคอนกรีต 80GB ที่อายุ 28 วัน คือร้อยละ 12.88 และลดลงเป็นร้อยละ 11.99 ที่อายุ 90 วัน ในขณะที่มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 และ 90 วัน เท่ากับ 56.8 และ 67.4 MPa ตามลำดับ

สำหรับคอนกรีตกำลังสูงที่มี GB ในปริมาณสูงร่วมกับ CC แทนที่ OPC โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีต 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC มีค่าความพรุนที่อายุ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 14.89, 12.06 และ 16.52 และลดลงเหลือร้อยละ 12.84, 9.53 และ 12.82 ตามลำดับ ที่อายุ 90 วัน ในขณะที่มีค่ากำลังอัดอยู่ระหว่าง 55.5 ถึง 71.2 MPa อายุ 28 และ 90 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความพรุนของคอนกรีตกำลังสูงทั้งหมด ลดลงตามอายุที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีต นอกจากนี้ค่าความพรุนของคอนกรีตกำลังสูงจะเพิ่มขึ้นตามการแทนที่ของ GB ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณ GB มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของ OPC มีปริมาณที่ลดลง ด้วยเหตุนี้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน) จึงไม่เพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินาออกไซด์จาก GB (Singh *et al.*, 2000; Rukzon and Chindaprasirt, 2012) อย่างไรก็ตามสำหรับคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ GB ร่วมกับ CC แทนที่ OPC พบว่าอนุภาคนาขนาดเล็กของ CC ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ $2.64 \mu\text{m}$ มีส่วนช่วยในการเติมเต็มช่องว่างและ

ลดความพรุนของคอนกรีตกำลังสูง ส่งผลให้มีช่องว่างที่ซึมน้ำผ่านได้ต่ำกว่าในอายุช่วงต้นของคอนกรีต (Liu and Yan, 2010; Sua-Iam and Makul, 2013)

นอกจากนี้ยังพบว่าร้อยละความพรุนของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่น และเนื้อคอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น (Rukzon and Chindaprasirt, 2012) นอกจากนี้ อนุภาคนาเล็กของ CC ที่สามารถกระจายส่วนคละของวัสดุประสานได้ดี ส่งผลให้ GB สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีมากขึ้น ทำให้ช่องว่างในเนื้อซีเมนต์เพสต์ และช่องว่างระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ช่องว่างมีขนาดเล็กลง ทำให้ร้อยละความพรุนของคอนกรีตต่ำลง (Sua-Iam and Makul, 2013; Shaikh and Supit, 2014)

5. การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตคอนกรีตกำลังสูง



ภาพที่ 7 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตคอนกรีตกำลังสูง

ภาพที่ 7 แสดงข้อมูลผลการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของคอนกรีต

กำลังสูง 1 m^3 โดยค่าการปล่อย CO_2 ของ OPC และ GB มีค่าเท่ากับ 820.0 และ 110.0 กก. CO_2/t ตามลำดับ (Nisbet

et al., 2002; Huber Crete, 2015; Chindaprasirt *et al.*, 2020) ในขณะที่ส่วนประกอบอื่นๆ ของคอนกรีตกำลังสูง ได้แก่ มวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ น้ำ และสารลดน้ำพิเศษ มีค่าการปล่อย CO_2 เท่ากับ 28.0, 39.0, 1.0 และ 772.0 kg. CO_2/t ตามลำดับ (Nisbet *et al.*, 2002; Huber Crete, 2015; Leeuwen *et al.*, 2016; Chindaprasirt *et al.*, 2020) การปล่อย CO_2 ของคอนกรีตกำลังสูง 1 m^3 พบว่าคอนกรีต CON มีค่าการปล่อย CO_2 เท่ากับ 522 กก. CO_2/m^3 ในขณะที่คอนกรีตกำลังสูง 80GB มีค่าการปล่อย CO_2 เท่ากับ 211 กก. CO_2/m^3 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 59 ของคอนกรีต CON ในส่วนของคอนกรีตกำลังสูงที่มี GB ร่วมกับ CC แทนที่ OPC ผลการคำนวณพบว่าคอนกรีต 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC มีค่าการปล่อย CO_2 เท่ากับ 207, 204 และ 202 กก. CO_2/m^3 ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 60 ถึง 61 ของคอนกรีต CON

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าค่าการปล่อย CO_2 ของคอนกรีตกำลังสูงลดลงเมื่อปริมาณของ GB และ CC เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตกำลังสูง 80GB, 75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC สามารถลดค่าการปล่อย CO_2 ได้มากถึงร้อยละ 59 ถึง 61 ของคอนกรีต CON จากผลการวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใช้ GB ในปริมาณสูง ร่วมกับ CC ในคอนกรีตกำลังสูงสามารถลดการปล่อย CO_2 ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้ นอกจากนี้การใช้ GB ในปริมาณสูงยังมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ การลดปริมาณขยะ และลดพื้นที่การกองเก็บเถ้าขานอ้อยในโรงงาน อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของเถ้าขานอ้อยจากอุตสาหกรรมอ้อย หรือน้ำตาล รวมถึงเป็นการพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

สรุป

1. ความต้องการสารลดน้ำพิเศษ (superplasticizer, SP) ของคอนกรีตกำลังสูงเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้

GB ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ CC ร่วมกับ GB สามารถลดความต้องการ SP ได้ถึงร้อยละ 25 ถึง 50 เมื่อเทียบกับคอนกรีต 80GB

2. คอนกรีตที่ใช้ GB ในปริมาณสูงร่วมกับ CC แทนที่ OPC โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (75GB5CC, 70GB10CC และ 65GB15CC) จัดเป็นคอนกรีตกำลังสูงที่อายุ 28 วัน คือมีกำลังอัดสูงกว่า 55 MPa แม้จะมี OPC ในส่วนผสมคอนกรีตเพียง 112 kg/m^3

3. ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ GB ในปริมาณสูงร่วมกับ CC ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ลดลง เป็นผลเนื่องจาก CC มีความสามารถในการกระจายส่วนละเอียดของวัสดุประสาน ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น นำไปสู่การพัฒนากำลังอัดที่ดีขึ้นของซีเมนต์เพสต์ 70GB10CC

4. ความพรุนของคอนกรีตกำลังสูงมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ GB ที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ GB ในปริมาณสูงร่วมกับ CC สามารถลดค่าความพรุนของคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยค่าความพรุนของคอนกรีตจะมีค่าลดลง เมื่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น

5. คอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ GB ร่วมกับ CC แทนที่ OPC ในปริมาณสูง สามารถลดค่าการปล่อย CO_2 ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง 1 m^3 ได้มากถึงร้อยละ 60 ถึง 61 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CON

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สัญญาเลขที่ 144-145/2560 ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์ทุนการศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา แก่ผู้เขียน และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนสถานที่ และเครื่องมือในการทำการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- American Concrete Institute. 2010. ACI 363R Report on High-Strength Concrete, ACI Committee. American Concrete Institute & International Organization for Standardization, Farmington Hills, Michigan.
- American Society for Testing and Materials. 2013. ASTM C642 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.
- American Society for Testing and Materials. 2014a. ASTM C188 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.
- American Society for Testing and Materials. 2014b. ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.
- American Society for Testing and Materials. 2015. ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.
- American Society for Testing and Materials. 2016. ASTM C494 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, United States.
- Awal, A.A. and Abubakar, S.I. 2011. Properties of concrete containing high volume palm oil fuel ash: a short-term investigation. **Malaysian Journal of Civil Engineering** 23(2): 54-66.
- Bai, J., Chaipanich, A., Kinuthia, J.M., O'Farrell, M., Sabir, B.B., Wild, S. and Lewis, M.H. 2003. Compressive strength and hydration of wastepaper sludge ash-ground granulated blastfurnace slag blended pastes. **Cement and Concrete Research** 33(8): 1189-1202.
- Bilodeau, A. and Malhotra, V.M. 2000. High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development. **ACI Materials Journal** 97(1): 41-48.
- Chaipanich, A. and Nochaiya, T. 2010. Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly ash-silica fume pastes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry** 99(2): 487-49.
- Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. and Jaturapitakkul, C. 2007. Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash. **Construction and Building Materials** 21(7): 1492-1499.
- Chindaprasirt, P., Kroehong, W., Damrongwiriyanupap, N., Suriyo, W. and Jaturapitakkul, C. 2020. Mechanical properties, chloride resistance and microstructure of portland fly ash cement concrete containing high volume bagasse ash. **Journal of Building Engineering** 31: 101415.
- Chusilp, N., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K. 2009. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. **Construction and Building Materials** 23(11): 3352-3358.
- Cordeiro, G.C., Toledo Filho, R.D., Tavares, L.M. and Fairbairn, E.D.M.R. 2009. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as

- pozzolanic admixture in concrete. **Cement and Concrete Research** 39(2): 110-115.
- El-Jazairi, B. and Illston, J.M. 1977. A simultaneous semi-isothermal method of thermogravimetry and derivative thermogravimetry, and its application to cement pastes. **Cement and Concrete Research** 7(3): 247-257.
- Esping, O. 2008. Effect of limestone filler BET (H_2O) -area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research** 38(7): 938-944.
- Felekoglu, B. 2007. Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). **Conservation and Recycling** 51(4): 770-791.
- Feng, Y., Kero, J., Yang, Q., Chen, Q., Engström, F., Samuelsson, C. and Qi, C. 2019. Mechanical activation of granulated copper slag and its influence on hydration heat and compressive strength of blended cement. **Materials** 12(5): 772.
- Huber Crete. 2015. **Let huber crete calcium carbonate help you produce the brightest white concrete building products possible. Marble Falls, Texas: Huber Carbonates, LLC.** Available Source: <https://www.hubermaterials.com/userfiles/files/PFDocs/Let%20HuberCrete%20Help%20You%20Manufacture%20Superior%20Concrete.pdf>. June 25, 2020.
- Johari, M.M., Zeyad, A.M., Bunnori, N.M. and Ariffin, K.S. 2012. Engineering and transport properties of high-strength green concrete containing high volume of ultrafine palm oil fuel ash. **Construction and Building Materials** 30: 281-288.
- Kakhuntodd, N., Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Homwuttiwong, S. 2012. The investigation of water permeability of high volume pozzolan concrete. **Journal of Science Technology** 31: 563-570.
- Klathae, T., Tanawuttiiphong, N., Tangchirapat, W., Chindaprasirt, P., Sukontasukkul, P. and Jaturapitakkul, C. 2020. Heat evolution, strengths, and drying shrinkage of concrete containing high volume ground bagasse ash with different LOIs. **Construction and Building Materials** 258: 119443.
- Kroehong, W. and Sinsiri, T. 2012. A study microstructure of blended cement paste containing palm oil fuel ash. **KMUTT Research & Development Journal** 35(2): 187-200. (in Thai)
- Leeuwen, R.V., Kim, Y.J. and Sriraman, V. 2016. The effects of limestone powder particle size on the mechanical properties and the life cycle assessment of concrete. **Journal of Civil Engineering Research** 6(4): 104-113.
- Liu, S. and Yan, P. 2010. Effect of limestone powder on microstructure of concrete. **Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition** 25(2): 328-331.
- Malhotra, V.M. 1986. Superplasticized fly ash concrete for structural applications. **Concrete International** 8(12): 28-31.
- Malhotra, V.M. 2002. High-performance high-volume fly ash concrete. **Concrete International** 24(7): 30-34.

- Nisbet, M.A., VanGeem, M.G., Gajda, J. and Marceau, M. 2002. **Environmental life cycle inventory of Portland cement concrete**. Available Source: http://www.vangeemconsulting.com/73_Environmental_Life_Cycle_Inverntory_SN_2137.pdf, December 20, 2020.
- Rajasekar, A., Arunachalam, K., Kottaisamy, M. and Saraswathy, V. 2018. Durability characteristics of ultra high strength concrete with treated sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials** 171: 350-356.
- Rerkpiboon, A., Tanawutti Phong, N., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. 2017. Effects of high-volume ground bagasse ash on compressive strength and heat evolution of concrete, pp. B-045. *In International conference, The 2nd ACF Symposium Innovations for sustainable concrete infrastructures*. Chiang Mai, Thailand.
- Rerkpiboon, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. 2015. Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash. **Construction and Building Materials** 101: 983-989.
- Rukzon, S. and Chindaprasirt, P. 2012. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. **Materials & Design** 34: 45-50.
- Saladi, N. and Ashraf, W. 2020. Ground and Sieved Bio Ash versus Coal Fly Ash: Comparative Analysis of Pozzolanic Reactivity. **Journal of Materials in Civil Engineering** 32(12): 04020377.
- Shaikh, F.U. and Supit, S.W. 2014. Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO_3) nanoparticles. **Construction and building materials** 70: 309-321.
- Singh, N.B., Singh, V.D. and Rai, S. 2000. Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. **Cement and Concrete Research** 30: 1485-1488.
- Sua-Iam, G. and Makul, N. 2013. Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. **Journal of Cleaner Production** 57: 308-319.
- Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P. 2009. Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete. **Construction and Building Materials** 23(7): 2641-2646.
- Thai Industrial Standard. 2012. TIS. 15-2555. Quality Standards for Industrial Products Portland Cement: Part I specification. TISI, Bangkok. (in Thai)
- The European Cement Association (CEMBUREAU). 2018. **Activity Report 2017 (1st ed)**. CEMBUREAU. Brussels, Belgium. Available Source: <https://cembureau.eu/media/1716/activity-report-2017.pdf>. December 20, 2020.
- Yahia, A., Tanimura, M. and Shimoyama, Y. 2005. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio. **Cement and Concrete Research** 35(3): 532-539.

การพัฒนาชุดอาหารกล่องพลังงานต่ำจากอาหารไทยวังสวนสุนันทา

Development of Low-calorie Meal Box Sets from Suan Sunandha's Palace Cuisine

จิราพร วีณุตตรานนท์* ปัทมา หิรัญโยภาส นันท์ยง เฟื่องขจรฟุ้ง ธิดารัตน์ แสนพรม และ นฤมล เปียเชื้อ

Jiraporn Weenuttranon*, Patthama Hirunyophat, Nunyong Fuengkajhornfung, Tidarat Sanphom
and Narumon Piaseu

Received: 21 July 2021, Revised: 7 October 2021, Accepted: 4 November 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำชุดอาหารกล่อง (Meal box) จากอาหารไทยวังสวนสุนันทาที่ดีต่อสุขภาพ เพื่อพัฒนาเป็นอาหารกล่องที่ใช้ประโยชน์ได้จริงในเชิงพาณิชย์ ซึ่งรวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือสำรวจความต้องการของผู้บริโภคจากบุคลากรของมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ที่มีอายุ 18-60 ปี จำนวน 250 คน พบว่าอาหารที่ผู้บริโภคต้องการและมีสารอาหารจำเป็นต่อร่างกายเหมาะสมต่อการนำมาจัดชุดอาหารกล่อง ประกอบด้วย ข้าวไรซ์เบอร์รี่หุงสุก ข้าวงาบไก่ ทอดมันสิงคโปร์ แกงรัญจวน ซุปปอดโอโพ (ซุปเนื้อ) น้ำพริกมะเขือเทศ น้ำพริกมะขาม น้ำพริกมะกรูด แสงสว่างกุ้ง ยำดอกขจร และยำหัวปลี จากนั้น นำมาจัดเป็นชุดอาหารกล่องจำนวน 5 ชุด โดยมีพลังงาน 424.12 ถึง 588.17 กิโลแคลอรี/ชุด คำนวณจากโปรแกรม INMUCAL-Nutrients V.4.0 และนำมาทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยวิธีการให้คะแนนความชอบแบบ 9 ระดับ ใช้ผู้ทดสอบ จำนวน 100 คน ผลการทดสอบพบว่าชุดอาหารกล่องทั้ง 5 ชุด มีคะแนนความชอบในทุกคุณลักษณะ เท่ากับ 6.46 ถึง 8.34 คะแนน โดยผู้บริโภคให้ความสนใจ และยอมรับผลิตภัณฑ์ชุดอาหารกล่องจากอาหารไทยวังสวนสุนันทา เท่ากับ ร้อยละ 85.0 และ 83.6 ตามลำดับ โดยสรุปอาหารชุดที่สร้างขึ้นทั้ง 5 ชุด สามารถนำไปใช้ต่อ ยอดการผลิตชุดอาหารกล่องในเชิงพาณิชย์ได้

คำสำคัญ: ชุดอาหารกล่อง, อาหารพลังงานต่ำ, อาหารชาววังสวนสุนันทา

ABSTRACT

This research aimed to develop low-calorie meal box sets from Suan Sunandha's Palace Cuisine recipes, which can be used for commercial purposes. The questionnaire was used to collect the data from 250 staff in the age range 18 to 60 years from Suan Sunandha Rajabhat University. The results revealed that consumers' favorite dishes could be applied to meal box including cooked riceberry rice, roasted Thai rice, Singapore deep fried cakes, Ranchuan curry, Pot-au-Feu, spicy tomato dip, chili tamarind sauce dip, spicy kaffir lime dip, broiled shrimp salad with Thai herb sauce, cowslip flower salad and Thai banana blossom salad. The favorite dishes were selected and formulated into 5 sets of meal box. The energy of each meal box (calculated by INMUCAL-Nutrients V.4.0 software) ranged from 424.12 to 588.17 kcal/serving. The sensory evaluation was observed by 100 untrained panels from the University using a 9-point hedonic scale. The findings showed that 5 meal box sets were given with a high score of 6.46 to 8.34 in all characteristics. It could be presumed that the consumers accepted meal boxes and were interested in those from Suan Sunandha's Palace Cuisine with 85.0% and 83.6%, respectively. In conclusion, these meal box sets could be implemented for commercial purposes.

Key words: meal box, low calorie meal, Suan Sunandha's Royal Cuisine

บทนำ

ภาวะน้ำหนักเกินและโรคอ้วน จัดเป็นปัญหาสาธารณสุขที่สำคัญของคนไทย โดยจากรายงานสุขภาพคนไทยปี พ.ศ. 2557 พบว่าคนไทยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักตัวเพิ่มขึ้น 2 เท่าในรอบ 20 ปี ซึ่งมีความเสี่ยงต่อโรคอ้วน และโรคไม่ติดต่อเรื้อรังอื่นๆ (Thai Health Promotion Foundation, 2014; Division of Non Communicable Diseases, 2015) โดยเฉพาะช่วงวัยทำงานจนถึงวัยสูงอายุ (Thai Health Promotion Foundation, 2014) จากปัญหาดังกล่าวจัดว่าเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาประเทศ ทำให้สูญเสียงบประมาณและเวลาในการรักษาพยาบาล ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เกิดภาวะการณดังกล่าวเกิดจากการบริโภคอาหารของคนไทยที่เปลี่ยนแปลงไป จากการนิยมรับประทานอาหารตะวันตกและอเมริกันตามกระแสนิยม (Senawongwiwat, 2007) ซึ่งประกอบด้วยแป้ง เนื้อสัตว์ และไขมันปริมาณสูง แต่มีผักปริมาณน้อย

ซึ่งได้รับสารอาหารที่ไม่สมดุลต่อร่างกาย (Bureau of Nutrition, 2006) โดยการศึกษาของ Alidadi *et al.* (2020) และ Roth and Polotsky (2012) พบว่าการจำกัดพลังงาน (Caloric restriction) โดยลดปริมาณพลังงานของอาหารลงร้อยละ 20-30 สามารถลดการเกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรังทั้งในมนุษย์และสัตว์ทดลอง และยังช่วยให้มีอายุยืนยาวขึ้นอีกด้วย สอดคล้องกับ Kim (2019) พบว่าการลดพลังงานในอาหาร โดยลดปริมาณของไขมัน (Low-fat diet) ทำให้อัตราการเจ็บป่วยและตายจากโรคไม่ติดต่อเรื้อรังลดลงได้ในระยะยาว โดยเฉพาะโรคอ้วน โรคหัวใจและหลอดเลือด และโรคมะเร็ง เป็นต้น ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการพัฒนาชุดอาหารกล่องจากอาหารไทยวังสวนสุนันทาพลังงานต่ำ โดยเฉพาะตำรับอาหารชาววังสวนสุนันทาเป็นตำรับอาหารไทยดั้งเดิมที่พัฒนาขึ้นจากภูมิปัญญาชาววังสวนสุนันทา มีความเป็นเอกลักษณ์ในเรื่องของวิธีการปรุงอาหาร ความสมดุล

ของรสชาติที่กลมกล่อม รวมถึงความหลากหลายของวัตถุดิบที่ส่วนใหญ่มาจากเครื่องเทศที่มีคุณสมบัติทางสมุนไพร สมควรอนุรักษ์ไว้ อีกทั้งยังเป็นต้นแบบของอาหารไทยที่สามารถส่งเสริมและต่อยอด เพื่อให้เป็นที่รู้จักกันมากยิ่งขึ้น

ดังนั้น งานวิจัยมุ่งเน้นการพัฒนาชุดอาหารกล่อง (Meal box) อาหารไทยวังสวนสุนันทาเพื่อสุขภาพ โดยการควบคุมพลังงานของชุดอาหารจากการคัดเลือกและจัดเมนูอาหารให้มีพลังงานจากไขมันต่ำกว่า 22 กรัม/ชุด ตามปริมาณสารอาหารที่แนะนำให้บริโภคประจำวันสำหรับคนไทยอายุตั้งแต่ 6 ปีขึ้นไป (Thai RDI) ซึ่งกำหนดให้ปริมาณไขมันทั้งหมด (Total fat) ไม่เกิน 65 กรัมต่อวัน ซึ่งเมื่อคิดเป็นปริมาณไขมันต่อมื้ออาหาร ไม่ควรเกิน 22 กรัม (The public health ministry, 1998) ทำให้สามารถบริโภคได้ทุกกลุ่มวัย อีกทั้งเป็นการฟื้นฟูการรับประทานอาหาร

ชาววังสวนสุนันทาสู่วัฒนธรรมร่วมสมัยอย่างต่อเนื่อง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การสำรวจความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่ออาหารไทยวังสวนสุนันทา

รวบรวมการศึกษาจากเอกสารงานวิจัยของ Piaseu *et al.* (2011) หนังสือกับข้าวในวัง โดย Ninrat (2002) และหนังสือสำนักศิลปวัฒนธรรม (Suan Sunandha Rajabhat University, 1994a) โดยรวบรวมตำรับอาหารตามประเภทอาหาร สำหรับเป็นตัวเลือกในการจัดทำชุดอาหารกล่องได้ดังแสดงในตารางที่ 1 นำรายชื่อตำรับอาหารสำรวจความต้องการผู้บริโภคโดยใช้แบบสอบถามวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนา และวิเคราะห์พลังงานโดยกำหนดจากการกระจายพลังงานตามหลักโภชนาการ

ตารางที่ 1 รายชื่อตำรับอาหารไทยวังสวนสุนันทา

ประเภทอาหาร	รายชื่อเมนูอาหาร
ข้าว และข้าวปรุง	ข้าวไรซ์เบอร์รี่หุงสุก ข้าวในกะหล่ำปลี ข้าวในปลีกล้วย ข้าวบด ข้าวบายศรีปากชาม และข้าวปั้น
อาหารว่าง	สะเต๊ะลือ ข้าวต้มหิมะ ข้าวแช่ขาววัง ข้าวต้มกะทิ และทอดมันสิงคโปร์
น้ำพริกและผักเคียง	น้ำพริกขี้หนือ น้ำพริกมะขาม ปลาแร่ในกะลา น้ำพริกตะไคร้ น้ำพริกลูกหน่าเลียบ น้ำพริกมะม่วง น้ำพริกมะปราง น้ำพริกตะลิงปริง น้ำพริกมะแว้ง น้ำพริกมะเขือเทศ น้ำพริกเต้าเจี้ยวหรือเต้าหู้ยี้ น้ำพริกกระท้อน น้ำพริกปลาทูกรอบ น้ำพริกมะกรูด และน้ำพริกมะขม
ยำ	ยำดอกขจร ยำตะขอย ยำไก่ย่างเต่า ยำถั่วพู ยำห้วปลี และแสสร้างกุ้ง
ต้มจืด และแกง	มันมันเนื้อ แกงจืดลูกรอก แกงรัญจวน แกงปลาตุ๋นอย่างปลาไหล ไก่นมวัว แกงเทโพพะเนงเนื้อ และซุปร้อนโอโม่ (ซุปร้อน)
ผลไม้และอาหารหวาน	ผลไม้สด มะปรางรี และผลไม้ลอยแก้ว

ที่มา: Piaseu *et al.* (2011), Suan Sunandha Rajabhat University (1994a), Suan Sunandha Rajabhat University (1994b), Eiamprapai, 2011)

การสำรวจความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่ออาหารไทยวังสวนสุนันทา เพื่อใช้ในการคัดเลือกเมนูอาหาร สำหรับการพัฒนาเป็นชุดอาหารกล่อง โดยศึกษาผู้บริโภคซึ่งเป็นบุคลากรของมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ที่มีอายุ 18-60 ปี และไม่มีประวัติการแพ้อาหาร จำนวน 250 คน เครื่องมือที่ใช้คือแบบสอบถาม ประกอบด้วย ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ปัจจัยในการเลือกซื้ออาหารไทยวังสวนสุนันทา และการคัดเลือกเมนูอาหารไทยวังสวนสุนันทาตามประเภทอาหาร ได้แก่ ข้าว อาหารว่าง น้ำพริกพร้อมผักเคียงและยำ ต้มจืด และแกง ในการทดสอบผู้บริโภคได้เห็นเมนูอาหารทั้งหมดจากภาพถ่ายพร้อมรายละเอียดส่วนผสม โดยให้ผู้บริโภคคัดเลือกเมนูที่ชอบ ประเภทละ 1 เมนู จำนวน 33 รายการอาหาร นำมาวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา

2. การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของชุดอาหารไทยวังสวนสุนันทา

นำเมนูอาหารที่ผ่านการคัดเลือกจากผู้บริโภคในขั้นตอนที่ 1 มาจัดเป็นชุดอาหาร ทั้งหมด 5 ชุด เกณฑ์ในการจัดชุดอาหาร ประกอบด้วย ข้าว อาหารคาว (อาหารว่าง น้ำพริก กับข้าวและแกง ซุป) 2 เมนู และผลไม้ 1 ชนิด (Bunnag, 2015) จากนั้นคำนวณคุณค่าทางโภชนาการของชุดอาหารไทยวังสวนสุนันทาในรูปแบบของชุดอาหารกล่อง ได้แก่ พลังงาน ปริมาณคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน คอเลสเตอรอล น้ำตาล โยอาหาร แคลเซียม และ โซเดียม โดยใช้โปรแกรม INMUCAL-Nutrients V.4.0 เกณฑ์การพิจารณากำหนดให้ปริมาณพลังงานไม่เกิน 600 กิโลแคลอรีต่อชุดอาหาร (Thai Dietetic Association, 2020) และปริมาณไขมันไม่เกิน 65 กรัม/ชุดอาหาร ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 182 พ.ศ. 2541 เรื่องสารอาหารที่แนะนำให้บริโภคประจำวันสำหรับคนไทยอายุตั้งแต่ 6 ปีขึ้นไป (Ministry of Public health, 1998)

3. การศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อชุดอาหารไทยวังสวนสุนันทา

การศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ ด้วยวิธีการ Central Location Test (CLT) ใช้วิธีสุ่มตัวอย่างโดยไม่อาศัยความน่าจะเป็น (Non-probability) แบบสะดวก (Convenience sampling) สถานที่ทดสอบ คือ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา จำนวนผู้ทดสอบ 100 คน และไม่มีประวัติการแพ้อาหาร วางแผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) ทำการทดสอบชุดอาหารไทยวังสวนสุนันทา จำนวน 5 ชุด ปริมาณจัดลงชุดอาหาร 370 กรัม และมีการเว้นระยะของการทดสอบ 15 นาที โดยแบบสอบถามการยอมรับของผู้บริโภค จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ประกอบด้วยข้อมูลทางประชากร ได้แก่ อายุ เพศ และอาชีพ เป็นต้น และปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ ส่วนที่ 2 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ใช้วิธีการให้คะแนนความชอบ (9- point hedonic scale)

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิจัยครั้งนี้วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสถิติอ้างอิงคือ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่ออาหารไทยวังสวนสุนันทา

ผลการสำรวจความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่ออาหารไทยวังสวนสุนันทา เพื่อใช้ในการคัดเลือก

เมนูอาหาร สำหรับการพัฒนาเป็นชุดอาหารกล่อง
วิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

ประกอบด้วย เพศ สถานภาพ อายุ อาชีพ รายได้ และ
รายจ่ายค่าอาหารเฉลี่ยของครอบครัว แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 จำนวนและร้อยละของผู้ตอบแบบสอบถามจำแนกตามข้อมูลทั่วไป

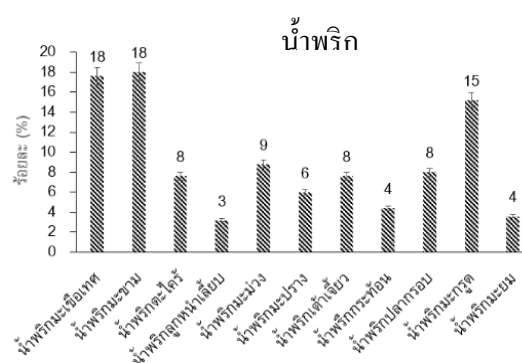
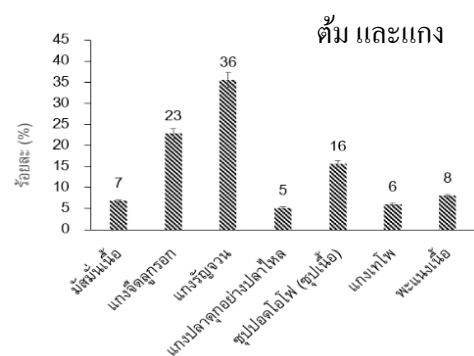
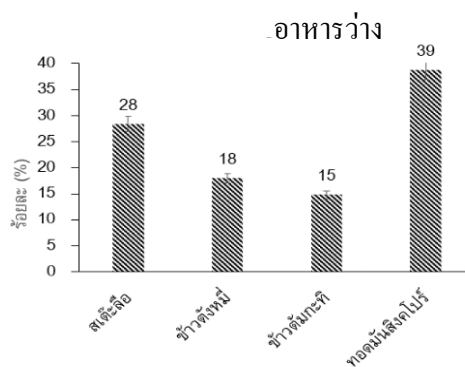
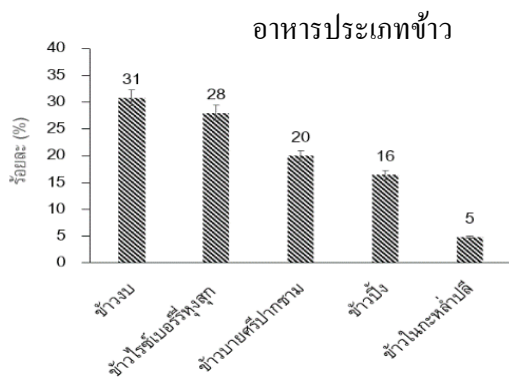
ข้อมูลทั่วไป	จำนวน (คน)	ร้อยละ
เพศ		
ชาย	130	52.0
หญิง	120	48.0
สถานภาพ		
โสด	206	82.4
สมรส	44	17.6
อายุ		
น้อยกว่า 20 ปี	40	16.0
20 - 30 ปี	152	60.8
31 - 40 ปี	36	14.4
มากกว่า 40 ปี	22	8.8
อาชีพ		
นักเรียน/นักศึกษา	149	59.6
พนักงานบริษัทเอกชน/รัฐวิสาหกิจ	20	8.0
พนักงานมหาวิทยาลัย	50	20.0
ธุรกิจส่วนตัว/ค้าขาย	31	12.4
รายได้		
ต่ำกว่า 10,000 บาท	55	22.0
10,001 - 15,000 บาท	75	30.0
15,001 - 20,000 บาท	95	38.0
ตั้งแต่ 20,001 บาทขึ้นไป	25	10.0
รายจ่ายค่าอาหารเฉลี่ยของครอบครัว		
50 - 100 บาท/วัน	55	22.0
101 - 200 บาท/วัน	56	22.4
201 - 300 บาท/วัน	81	32.4
301 - 400 บาท/วัน	36	14.4
401 - 500 บาท/วัน	12	4.8
500 บาทขึ้นไป	10	4.0

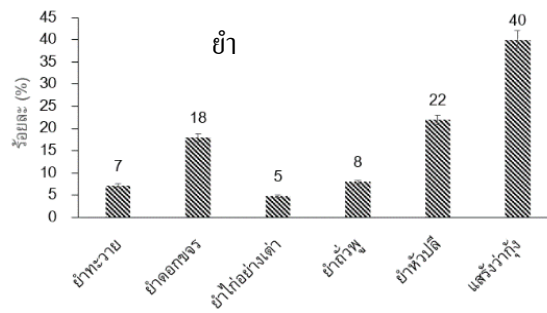
จากตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม พบว่า ส่วนใหญ่เป็นเพศชายมีสถานะภาพโสด อายุ 20 - 30 ปี อยู่ในวัยเรียนและทำงาน มีรายได้เฉลี่ยต่อเดือน 15,001 - 20,000 บาท และรายจ่ายค่าอาหารเฉลี่ยของครอบครัวอยู่ในช่วง 201-300 บาท/วัน

เมื่อวิเคราะห์ปัจจัยการเลือกซื้ออาหารไทยวังสวนสุนันทา พบว่า ในด้านราคาของอาหารไทยวังสวนสุนันทาในรูปแบบของชุดอาหารกล่อง ส่วนใหญ่ยอมรับราคาต่ำกว่า 50 บาท/กล่อง และ 51 - 80 บาท/กล่อง คิดเป็นร้อยละ 45.6 รองลงมาคือราคา 81 - 120 บาท/กล่อง และส่วนใหญ่มีความพึงพอใจจากการเคยรับประทานอาหารไทยวังสวนสุนันทาอยู่ในเกณฑ์มาก คิดเป็นร้อยละ 75.2 อาจเนื่องมาจากรสชาติของอาหารไทยวังสวนสุนันทา มีรสชาติดี ถูกปากผู้บริโภค ประกอบกับการรับรู้เรื่องราวเกี่ยวกับอัตลักษณ์ของอาหารชาววังทางด้านคุณภาพของวัตถุดิบและเครื่องปรุง รสชาติ การปรุง และการตกแต่ง Piaseu *et al.* (2011) และ Krajangsaeng *et al.*

(2018) ศึกษาภาพลักษณ์และอัตลักษณ์อาหารไทยมีอิทธิพลต่อการเลือกซื้ออาหารของผู้บริโภค พบว่าอาหารชาววังสวนสุนันทายังเป็นต้นแบบของอาหารไทยที่สามารถส่งเสริมและต่อยอดอาหารไทยวังสวนสุนันทาเพื่อสุขภาพมีความสัมพันธ์กับผู้บริโภคมีความใส่ใจสุขภาพต้องการความหลากหลายของอาหาร

การวิเคราะห์ผลการคัดเลือกเมนูอาหารไทยวังสวนสุนันทาแยกประเภทอาหารได้ทั้งหมด 5 ประเภท คือ อาหารประเภทข้าว อาหารว่าง ต้มและแกง น้ำพริก และยำ พบว่าเมนูอาหารที่ได้รับการคัดเลือกจากผู้บริโภคมีค่าเฉลี่ยมากที่สุดในแต่ละประเภทอาหาร และมีความเหมาะสมต่อการนำมาจัดชุดอาหารกล่องในเชิงพาณิชย์ ประกอบด้วย ข้าวกล้องหุงสุก ซึ่งผู้บริโภคได้ให้ข้อเสนอแนะว่าควรเป็นข้าวไรซ์เบอร์รี่ ข้าวขบไก่ ทอดมันลิงคโปร์ แกงรัญจวน ซุปปอดโอโฟ (ซุปเนื้อ) น้ำพริกมะเขือเทศ น้ำพริกมะขาม น้ำพริกมะกรูด แสร้งว่ากุ้ง ยำดอกขจร และยำห้วปลี (ภาพที่ 1)





ภาพที่ 1 กราฟแสดงร้อยละของผู้บริโภคที่คัดเลือกเมนูอาหารไทยวังสวนสุนันทา ประเภทข้าว อาหารว่าง ดั้มและแกง น้ำพริก และยำ

2. คุณค่าทางโภชนาการของชุดอาหารไทยวังสวนสุนันทา

การพัฒนาอาหารไทยวังสวนสุนันทาในรูปแบบของชุดอาหารกล่อง โดยนำเมนูอาหารที่ผ่านการคัดเลือกจากผู้บริโภค มาจัดเป็นชุดอาหารกล่องทั้งหมด 5 ชุด ประกอบด้วยข้าว อาหารคาว 2 เมนู และผลไม้ 1 ชนิด ผลการคำนวณคุณค่าทางโภชนาการของอาหารชาววังสวนสุนันทาทั้งในรูปแบบชุดอาหารกล่อง (ตารางที่ 2) โดยใช้โปรแกรม INMUCAL-Nutrients V.4.0 ผลการทดลองพบว่าชุดอาหารกล่องที่ 1 มีพลังงานทั้งหมดและปริมาณไขมันต่ำที่สุด ส่วนชุดอาหารกล่องที่มีพลังงานทั้งหมดและปริมาณไขมันสูงสุดคือ ชุดอาหารที่ ๓ แต่อย่างไรก็ตามทุกชุดของอาหารมีค่าพลังงานไม่เกิน 600 กิโลแคลอรี ซึ่งไม่เกิน 1 ใน 3 ของพลังงานที่ควรจะได้รับในแต่ละวัน (1,800-2,000 กิโลแคลอรี) และปริมาณไขมันไม่เกิน 65 กรัม/ชุดอาหารกล่อง โดยการบริโภคอาหารที่มีพลังงานสูงนั้นเป็นสาเหตุของภาวะน้ำหนักเกินและโรคอ้วน ซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อโรคไม่ติดต่อเรื้อรังอื่นๆ ได้แก่ โรคทางระบบหัวใจและหลอดเลือด โรคเบาหวาน และโรคเมตาบอลิก เป็นต้น จากรายงานวิจัยของ Alidadi *et al.* (2020) และ Roth and Polotsky (2012) พบว่า การจำกัดพลังงาน (Caloric restriction) สามารถลดการเกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรังทั้งในมนุษย์และสัตว์ทดลองได้ นอกจากนี้ Kim (2019) รายงาน

ว่าการลดพลังงานในอาหารจากการลดปริมาณของไขมัน ส่งผลต่อการลดอัตราการตาย และการเจ็บป่วยจากโรคไม่ติดต่อเรื้อรังได้ในระยะยาวได้ นอกจากนี้ชุดอาหารกล่อง ทั้งหมด 5 ชุด ยังประกอบด้วยสารอาหารสำคัญที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย ประกอบโปรตีน ไขมัน และแคลเซียม อยู่ในช่วง 20.1-44.2, 2.4-5.6 และ 61.4-262.3 กรัมต่อหนึ่งหน่วยบริโภค เนื่องจากส่วนประกอบหลักของพัฒนาข้าวกล่องทำมาจากข้าวกล้อง เนื้อสัตว์ ผัก สมุนไพร และผลไม้ ซึ่งเป็นแหล่งของสารอาหารดังกล่าว เมื่อพิจารณาอาหารชุดที่ 1, 2, 3 และ 5 พบว่ามีปริมาณโซเดียมค่อนข้างสูง อาจเป็นเพราะมีการใช้ส่วนผสมที่มาจากเครื่องแกง กะปิ น้ำปลา และเกลือในการปรุงรส ซึ่งอาจมีการพัฒนาชุดข้าวกล่องโดยการลดปริมาณโซเดียมเพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการเป็นอาหารเพื่อสุขภาพมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามลักษณะเด่นของอาหารชาววังสวนสุนันทาเป็นที่รู้จักแพร่หลายเป็นประเภทเครื่องจิ้ม มีรสชาติที่กลมกล่อมทั้งรสเปรี้ยว เค็ม หวาน ขม เลือกใช้เครื่องปรุงโดยเฉพาะสมุนไพรมาเป็นส่วนประกอบของอาหารมีการจัดในรูปแบบชุดอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ ครบถ้วน Reid (1988) พบว่า มิติโภชนาการและสุขภาพอาหารไทย เพราะมีผักและสมุนไพรซึ่งออกฤทธิ์เป็นยารักษาโรคหรือช่วยให้สุขภาพแข็งแรง

ตารางที่ 3 การจัดเมนูอาหารไทยวังสวนสุนันทาในรูปแบบของชุดอาหารกล่องต่อหนึ่งหน่วยบริโภค

ชุดที่	ชุดอาหารกล่อง			
	ข้าว	อาหารคาว 1	อาหารคาว 2	ผลไม้
1	ข้าวไรซ์เบอร์รี่หุงสุก	ทอดมันลิงคโปร์	แกงรัญจวน	แตงโม
2	ข้าวงบไก่	ซูปปอดโอโฟ (ซูปเนื้อ)	-	ส้ม
3	ข้าวไรซ์เบอร์รี่หุงสุก	น้ำพริกมะเขือเทศ	แตงกวากุ้ง	ส้ม
4	ข้าวไรซ์เบอร์รี่หุงสุก	น้ำพริกมะขาม	ยำดอกขจร	สับปะรด
5	ข้าวไรซ์เบอร์รี่หุงสุก	ยำหัวปลี	น้ำพริกมะกรูด	แตงโม

หมายเหตุ: - หมายถึง ไม่ระบุเมนูอาหารคาว 2



ภาพที่ 2 ชุดอาหารกล่องอาหารไทยวังสวนสุนันทา

ตารางที่ 4 คุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทยวังสวนสุนันทาทั้ง 5 รูปแบบต่อหนึ่งหน่วยบริโภค

เมนูอาหาร	พลังงานทั้งหมด(กิโลแคลอรี)	ไขมัน(กรัม)	คอเลสเตอรอล(มิลลิกรัม)	โปรตีน(กรัม)	คาร์โบไฮเดรต(กรัม)	น้ำตาล(กรัม)	ใยอาหาร(กรัม)	แคลเซียม(มิลลิกรัม)	โซเดียม(มิลลิกรัม)	คาร์โบไฮเดรต : โปรตีน : ไขมัน (%)
ชุดที่ 1	347.4	4.2	99.3	43.6	79.4	20.0	5.0	69.5	1260.9	59 : 36 : 6
ชุดที่ 2	570.2	12.3	94.3	44.2	70.8	8.1	2.4	61.4	1385.8	50 : 31 : 19
ชุดที่ 3	450.4	8.9	111.9	25.0	67.5	15.8	4.4	262.3	1584.5	50 : 31 : 19
ชุดที่ 4	588.2	18.3	68.3	25.1	80.9	28.8	5.6	87.6	658.9	55 : 17 : 28
ชุดที่ 5	424.1	9.0	44.6	20.1	65.7	17.3	4.4	127.2	1339.9	62 : 19 : 19

หมายเหตุ ชุดที่ 1 ประกอบด้วย ข้าวไรซ์เบอร์รี่หุงสุก ทอดมันลิงคโปร์ แกงรัญจวน และแตงโม

ชุดที่ 2 ประกอบด้วย ข้าวงบไก่ และอาหารจาก ซูปปอดโอโฟ (ซูปเนื้อ) และส้ม

ชุดที่ 3 ประกอบด้วย ข้าวไรซ์เบอร์รี่หุงสุก น้ำพริกมะเขือเทศ และผักเคียง* แตงกวากุ้ง และส้ม

ชุดที่ 4 ประกอบด้วย ข้าวไรซ์เบอร์รี่หุงสุก น้ำพริกมะขาม และผักเคียง* ยำดอกขจร และสับปะรด

ชุดที่ 5 ประกอบด้วย ข้าวไรซ์เบอร์รี่หุงสุก น้ำพริกมะกรูด และผักเคียง* หมูหวาน ยำหัวปลี และแตงโม

* ผักเคียง ประกอบด้วย ผักกาดขาว ถั้วฝักยาว และแตงกวา

3. ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อชุดอาหารไทยวังสวนสุนันทา

เมื่อวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัสชุดอาหารกล่องอาหารไทยวังสวนสุนันทา จำนวน 5 ชุด (ตารางที่ 5) พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนด้านความชอบโดยรวมอาหารกล่องชุดที่ 3, 4 และ 5 มีคะแนนความชอบมากกว่าชุดที่ 1 และ 2 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาคะแนนความชอบชุดอาหารกล่องทั้ง 5 ชุดในทุกคุณลักษณะ เท่ากับ 6.46 - 8.34 คะแนน ซึ่งมากกว่า 6 ขึ้นไป อยู่ในเกณฑ์ที่ได้รับการยอมรับของผู้บริโภค อีกทั้งประกอบด้วยสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกาย ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน วิตามิน และเกลือแร่ เป็นต้น สามารถนำไปใช้ต่อยอดในเชิงพาณิชย์ได้ โดยเฉพาะอาหารกล่องชุดที่ 3, 4 และ 5 ซึ่งมีคะแนนความชอบอยู่ระหว่าง 8.00-8.19 ซึ่งมีความชอบอยู่ในเกณฑ์ระดับมาก

ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค พบว่าผู้บริโภคให้ความสนใจชุดอาหารไทยวังสวนสุนันทา ร้อยละ 85.0 เนื่องมาจากคุณค่าของอาหารไทยวังสวนสุนันทา และคุณค่าทางโภชนาการซึ่งเมนูในชุดอาหารกล่องส่วนใหญ่ประกอบด้วยข้าวไรซ์เบอร์รี่ แกงและซุป น้ำพริก ยำ และผลไม้ ซึ่งในชุดอาหารประกอบด้วยอาหารหลัก 5 หมู่ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compound) พบในข้าวกล้อง ผัก เครื่องเทศ และสมุนไพร เป็นต้น ซึ่งมีประโยชน์ในเชิงสุขภาพ นอกจากนี้พฤติกรรมของผู้บริโภคที่ให้ความสำคัญต่อสุขภาพ ทำให้ผู้บริโภคใช้เป็นปัจจัยในการเลือกซื้อเพื่อการบริโภคมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jun *et al.* (2014) การเลือกเมนูที่ดีต่อสุขภาพหรือไขมันต่ำจะสามารถช่วยพัฒนาและปรับปรุงฟื้นฟูสุขภาพของร่างกายได้ นอกจากนี้ผู้บริโภค ร้อยละ 83.6 ให้การยอมรับในชุดอาหาร ระบุเหตุผลว่าชุดอาหารกล่องอาหารไทยวังสวนสุนันทามีความแปลกใหม่อยากทดลอง

ประกอบกับอัตลักษณ์ของอาหารที่ปัจจัยหนึ่งในการยอมรับของผู้บริโภค ซึ่งสอดคล้องกับ Krajangsaeng *et al.* (2018) พบว่าคุณค่าของอาหารไทยมีความเฉพาะตัวทางด้านรสชาติ ซึ่งเป็นผลมาจากวัตถุดิบและเครื่องปรุงรสที่มีความหลากหลาย ตลอดจนวิธีในการประกอบอาหารไทยมีความพิถีพิถัน และประณีต สอดคล้องกับผลการทดลองซึ่งผู้บริโภคได้ให้เหตุผลว่าเมนูอาหารไทยวังสวนสุนันทาในบางเมนูอาหารไม่สามารถรับประทานได้ทั่วไป เช่น ข้าวงับไก่ แกงริ้วจวน และซุปรอดโอโพ (ซูปเนื้อ) เป็นต้น ผู้บริโภคที่มีการรับรู้เกี่ยวกับอาหาร โดยเฉพาะความเข้าใจและการรับรู้เกี่ยวกับโภชนาการของอาหารนั้นๆ และผู้บริโภคส่วนใหญ่จะให้ความสนใจต่อการออกแบบบรรจุภัณฑ์ร่วมกับการเพิ่มข้อมูลด้านคุณค่าทางโภชนาการในรูปแบบของฉลากโภชนาการ Thecasana (2018) รายงานว่าผู้ผลิตอาหารใช้ฉลากเป็นเครื่องมือในการสื่อสารและโฆษณาผลิตภัณฑ์แก่ผู้บริโภคและเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์และการแข่งขันทางการค้า หน่วยงานภาครัฐใช้เป็นเครื่องมือในการติดตามตรวจสอบคุณภาพอาหาร และให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์กับผู้บริโภค สอดคล้องกับ Weenuttranon (2016) พบว่าพฤติกรรมผู้บริโภคอาหารเพื่อสุขภาพ ด้านผลิตภัณฑ์พิจารณาจากอาหารเพื่อสุขภาพ มีฉลากระบุวัน/เดือน/ปี ที่ผลิตชัดเจน มีเครื่องหมายรับรองคุณภาพและมาตรฐานสากลตามข้อกำหนดของกระทรวงสาธารณสุข บรรจุภัณฑ์ที่สะดวกในการบริโภคความสะดวกของอาหาร และการพิจารณาความเรียบร้อยของบรรจุภัณฑ์อาหาร และงานวิจัยของ Nangam (2018) รายงานว่าผู้บริโภคจะมีการรับรู้คุณภาพของอาหารคลีน ซึ่งจัดเป็นอาหารเพื่อสุขภาพผ่านการรับรู้คุณค่าทางโภชนาการที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพ เช่นเดียวกับ Pomsuk (2011) พบว่าปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมผู้บริโภคอาหารเพื่อ

สุขภาพคือข้อมูลด้านคุณค่าทางโภชนาการ ทั้งนี้ เนื่องจากกลุ่มผู้บริโภคอาหารเพื่อสุขภาพ มีความต้องการสารอาหารครบถ้วนตามหลักโภชนาการช่วย

สร้างภูมิคุ้มกันโรค และป้องกันโรคต่างๆ (Nunthasin, 2015)

ตารางที่ 5 คุณภาพทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์อาหารไทยวังสวนสุนันทาลังงานต่ำ^{1,2}

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	ชุดอาหารกล่อง				
	1	2	3	4	5
ลักษณะปรากฏ	7.55 ^b ± 1.64	6.98 ^c ± 1.84	8.17 ^a ± 1.44	8.27 ^a ± 1.34	8.34 ^a ± 1.37
สี	7.34 ^b ± 1.51	6.85 ^c ± 1.72	7.98 ^a ± 1.53	8.19 ^a ± 1.45	8.13 ^a ± 1.56
กลิ่น	7.38 ^a ± 1.53	6.82 ^b ± 1.80	7.59 ^a ± 1.57	7.71 ^a ± 1.39	7.66 ^a ± 1.66
รสชาติ	7.68 ^a ± 1.71	6.46 ^b ± 1.74	8.01 ^a ± 1.71	7.88 ^a ± 1.62	8.03 ^a ± 1.59
เนื้อสัมผัส	7.51 ^a ± 1.59	6.73 ^b ± 1.50	7.95 ^a ± 1.51	7.88 ^a ± 1.44	7.80 ^a ± 1.57
ความชอบโดยรวม	7.58 ^b ± 1.57	6.58 ^c ± 1.53	8.00 ^a ± 1.58	8.07 ^a ± 1.41	8.19 ^a ± 1.59

¹ Mean ± SD, n = 100

² ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

สรุป

การพัฒนาชุดอาหารกล่อง (Meal box) อาหารไทยวังสวนสุนันทาลังงานต่ำโดยการควบคุมพลังงานทั้งหมดและไขมันให้เป็นยอมรับของผู้บริโภค และมีความเหมาะสมต่อการนำมาจัดชุดอาหารกล่องในเชิงพาณิชย์ ประกอบด้วย ข้าวกล้องหุงสุก ข้าวงบกั๊กทอดมันสิงคโปร์ แกงรัญจวน ซุปปอดโอโพ (ซุปเนื้อ) น้ำพริกมะเขือเทศ น้ำพริกมะขาม น้ำพริกมะกรูด แสร้งว่ากุ้ง ยำดอกขจร และยำห้วปลี และเมื่อนำมาจัดเป็นชุดอาหารกล่อง ประกอบด้วยข้าว 1 อย่าง อาหารคาว 2 อย่าง และผลไม้ 1 อย่าง ได้ปริมาณพลังงานไม่เกิน 600 กิโลแคลอรี และปริมาณไขมันไม่เกิน 65 กรัม/ชุดอาหารกล่อง โดยมีคะแนนความชอบเท่ากับ 6.46 - 8.34 คะแนน อยู่ในช่วงชอบเล็กน้อยถึงชอบมาก โดยผู้บริโภคให้ความสนใจ และยอมรับชุดอาหารไทยวังสวนสุนันทา เท่ากับ ร้อยละ 85.0 และ 83.6 ตามลำดับ แสดงว่าผลิตภัณฑ์นี้สามารถนำไปใช้

ต่อยอดในเชิงพาณิชย์ได้ เนื่องจากมีสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกาย ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน ใยอาหาร และแคลเซียม เป็นต้น อีกทั้งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตชุดข้าวกล่องประกอบเนื้อสัตว์ ผัก ผลไม้ และเครื่องเทศ ซึ่งสามารถหาซื้อได้ทั่วไปตามตลาดและซูเปอร์มาร์เก็ต ทำให้มีต้นทุนการผลิตที่ไม่สูงมาก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

Alidadi, M., Banach, M., Guest, P.C., Bo, S., Jamialahmadi, T. and Sahebkar, A. 2020. The effect of

- caloric restriction and fasting on cancer. Seminars in Cancer Biology 2020.** Available Source: <https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2020.09.010>, March 31, 2021.
- Bunnag, C. 2015. **Food and Beverage Services.** 1sted. Chulalongkorn University Press, Bangkok. (in Thai)
- Bureau of Nutrition. 2006. **Food-based Dietary Guidelines.** Published documents. The war veterans organization's printing house, Department of Health, Bangkok. (in Thai)
- Division of Non Communicable Diseases. 2015. **Disability-Adjusted Life Years: DALY.** Published documents. International Health Policy Program Foundation, Bangkok. (in Thai)
- Eiamprapai, W. 2011. **Research Report on Research and development to restore Suan Sunandha recipes to contemporary culture.** Suan Sunandha Rajabhat University, Bangkok. (in Thai)
- Jun, J.H., Kang, J.H. and Arendt, S.W. 2014. The effects of health value on healthful food selection intention at restaurants: Considering the role of attitudes toward taste and healthfulness of healthful foods. **International Journal of Hospitality Management** 42: 85-91.
- Kim, H. 2019. **New study confirms the long-term benefits of a low-fat diet.** Available Source: https://www.eurekalert.org/pub_releases/2019-09/fhcr-nsc082919.php, April 1, 2021.
- Krajangsaeng, K., Chanasith, K. and Pasunon, P. 2018. Perceived image and identity of Thai food affects the behavior of teenagers in Bangkok. **Journal of Humanities and Social Sciences Thonburi University** 13(2): 47-57. (in Thai)
- Ministry of Public health. 1998. **Notification of the Ministry of Public Health (No.182): Thai recommended daily in takes-Thai RDI.** Available Source: <http://food.fda.moph.go.th/Rules/dataRules/4-4-2ThaiRDI.pdf>, April 1, 2021. (in Thai)
- Nangam, W. 2018. The Influence of Causal Factors Effecting repurchases Intention of Clean Food Among Consumers in Bangkok. Master Thesis of Business Administration, Rajamangala University of Technology Krungthep. (in Thai)
- Ninrat, N. 2002. **Life in the house with the Wang Sunandha cookbook.** Alpha brain publishing Co., Ltd., Bangkok. (in Thai)
- Nunthasin, N. 2015. Factors affecting consumer's consumption behavior and loyalty toward health food in Bangkok Metropolis. **Journal of Cultural Approach** 16(9): 3-18. (in Thai)
- Piaseu, N., Nittayasuk, A., Uanhakate, K., Khamparat, N., Yachaisri, S. and Kamdaeng, O. 2011. **Research Report on A research and development of course syllabus management in order to improve student to manage catering business in Suan Sunandha's Thai cuisine.** Thailand Science Research and Innovation (TSRI). (in Thai)
- Pomsuk, P. 2011. Healthy Food Consumption and Related Factors of the Workforce Age in Urban and Ruarl Area at Banglamung District, Chon Buri Province. Master Thesis of Community

- Nurse Practitioner, Burapha University. (in Thai)
- Reid, A. 1988. **Southeast Asia in the age of commerce 1450-1680 (Vol. Volume One: The Lands below the Winds)**. Yale University Press, London.
- Roth, L.W. and Polotsky, A.J. 2012. Can we live longer by eating less? A review of caloric restriction and longevity. **Maturitas** 71(4): 315-319.
- Senawongwiwat, S. 2007. Efficiency of Weight Control Thai Diets: Case study Kasetsart University's Government Employees. Master Thesis of Science, Kasetsart University. (in Thai)
- Suan Sunandha Rajabhat University. 1994a. **Nam Prik Chaowang**. 1st ed. Keawjawjorm print & publishing Suan Sunandha Rajabhat University, Bangkok. (in Thai)
- Suan Sunandha Rajabhat University. 1994b. **The Legend of Royal Thai Cuisine**. 1st ed. Keawjawjorm print & publishing Suan Sunandha Rajabhat University, Bangkok. (in Thai)
- Thai Dietetic Association. 2020. **Dietary reference intake for Thais 2020**. Published documents.
- Bureau of Nutrition, Department of Health, Ministry of Public Health, Bangkok. (in Thai)
- Thai Health Promotion Foundation. 2014. **Health Promotion Program Implementation Manual for Simple Health Promotion Program**. Published documents. Thai health promotion foundation, Bangkok. (in Thai)
- The public health ministry. 1998. **Notification of the Ministry of Public Health, No. 182: Re: Nutrition Labelling**. Ministry of Public Health, Nonthaburi. (in Thai)
- Thecasana, P. 2018. Development Smart Label to Boost Revenue Using Augmented Reality Technology. **Journal of Project in Computer Science and Information Technology** 4(2):1-6. (in Thai)
- Weenuttranon, J. 2016. Factors Related to Health Food Consumption Behavior of Undergraduate Students in Rajabhat University of Bangkok Metropolis. Master Thesis of Home Economics, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. (in Thai)

ผลของประจุสมดุลของอนุภาคและความเร็วด้านหน้าต่อประสิทธิภาพ

การกรองอนุภาคของแผ่นกรองนอนวูฟเวนและผ้าทอ

Effects of Particle Equilibrium Charge and Face Velocity on the Particle

Filtration Efficiency of Non-Woven Filter and Woven Fabric Filter

วิสูตร อาสนวิจิตร * และ พานิช อินต๊ะ

Visut Asanavijit * and Panich Intra

Received: 1 June 2021, Revised: 3 August 2021, Accepted: 31 August 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาผลของประจุสมดุลของอนุภาคและความเร็วด้านหน้าต่อประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของแผ่นกรองนอนวูฟเวนและผ้าทอ ในการศึกษาวัสดุกรองหน้ากาก N95 และผ้าไมโครไฟเบอร์ได้ทดสอบกับอนุภาคโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ (PSL) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 ไมครอน ตัวทำให้เป็นกลางและเครื่องคัดแยกขนาดแบบไฟฟ้าสถิตถูกใช้เพื่อคัดแยกขนาดอนุภาคละอองลอยและเครื่องนับอนุภาคถูกใช้สำหรับการวัดค่าความเข้มข้นจำนวนอนุภาคที่ก่อนและหลังผ่านวัสดุตัวอย่าง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกรองของอนุภาคโซเดียมคลอไรด์และอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ของผ้าทอและแผ่นกรองนอนวูฟเวนมีค่าลดลงในช่วง 0.57 ถึง 7.84% เนื่องจากสถานะประจุสมดุลของอนุภาค ทำให้เห็นได้ว่าการเพิ่มความเร็วด้านหน้าส่งผลให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของผ้าทอเพิ่มขึ้น สำหรับแผ่นกรองนอนวูฟเวนประสิทธิภาพการกรองอนุภาคจะลดลงตามการเพิ่มของความเร็วด้านหน้า

คำสำคัญ: อนุภาคละออง, ประจุไฟฟ้าสถิต, ประสิทธิภาพการกรอง, ความเร็วด้านหน้า, ผ้าทอ

หน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงใหม่ 50220

Research Unit of Applied Electric Field in Engineering, College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50220, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail) : iamvisut@gmail.com Tel : 08 5040 1595

ABSTRACT

The aim of this paper is to determine the effects of particle equilibrium charge and face velocity on the particle filtration efficiency of non-woven filter and woven fabric. In this study, N95 respirator filter media and microfiber fabric were tested against sodium chloride (NaCl) and polystyrene Latex (PSL) particles in diameter of 0.3 μm . A neutralizer and an electrostatic size classifier were used to classify the size of aerosol particles and a particle counter was used for measuring the particle number concentration at the upstream and downstream of the sample materials. Experimental results showed that filtration efficiency of NaCl and PSL particles of woven fabric and non-woven filter decreased due to particle equilibrium charge state in the ranges from 0.57 to 7.84%. It can be seen that increasing the face velocity resulted in the increase of the particle filtration efficiency of woven fabric. For non-woven fabric, particle filtration efficiency decreased as face velocity rose.

Key words: aerosol Particle, electrostatic charge, filtration efficiency, face velocity, woven fabric

บทนำ

การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 ไปทั่วทุกภูมิภาคของโลกด้วยยอดผู้ติดเชื้อถึง 133,681,724 ราย และเสียชีวิต 2,900,921 ราย สำหรับประเทศไทย มีผู้ติดเชื้อ 68,984 ราย และเสียชีวิต 245 ราย ข้อมูล ณ วันที่ 2 พฤษภาคม 2564 (Department of Disease Control, 2021) การแพร่ระบาดดังกล่าวส่งผลให้เกิดปัญหาการขาดแคลนอุปกรณ์ทางการแพทย์ โดยเฉพาะหน้ากากอนามัยประเภทใช้ครั้งเดียว (Disposable surgical masks) และหน้ากาก N95 (N95 masks) โดยพบว่าความต้องการหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 เพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ 2-3 เท่า ส่งผลทำให้ราคาของหน้ากากอนามัยสูงขึ้นมากหลายเท่า และด้วยสถานการณ์ที่ไม่เป็นปกติของการแพร่ระบาดดังกล่าวจึงส่งผลทำให้โรงงานผู้ผลิตหน้ากากอนามัยไม่สามารถส่งหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ให้กับโรงพยาบาลได้ตามปกติ ในขณะที่ความต้องการหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ของประชาชนเพื่อใช้ในการช่วยป้องกันไวรัสโควิด-19 ก็สูงขึ้นจนเกิดสถานการณ์ตึงเครียดหนักไปทั่วประเทศ

จากปัญหาการขาดแคลนหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 ดังกล่าว จึงได้มีการนำเอาวัสดุผ้าทั่วไปมาใช้ในการป้องกันด้านระบบทางเดินหายใจ ดังนั้นหน้ากากผ้าจึงเป็นอีกทางเลือกสำหรับผู้คนในช่วงที่มีการแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 มีงานวิจัยที่แนะนำเกี่ยวกับวัสดุป้องกันระบบทางเดินหายใจอื่นๆ รวมถึงวัสดุผ้าทั่วไป เช่น เสื้อยืด ผ้าเช็ดหน้า และผ้าพันคอ (O'Dowd *et al.*, 2020) ในกรณีที่ไม่มีหน้ากากอนามัยและหน้ากาก N95 เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับผู้คนที่จะนำมาใช้ชั่วคราวเพื่อป้องกันระบบทางเดินหายใจขณะเข้าสู่สภาพแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนไวรัส เช่น การใส่อยู่ภายในบ้าน การใส่ออกไปทำงานข้างนอกบ้านที่ต้องเสี่ยงต่อการติดเชื้อไวรัสโควิด-19 ในที่ชุมชน และการใส่สถานที่ทำงาน ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าวัสดุผ้าทั่วไปที่นำมาใช้ทดแทนในการทำหน้ากากดังกล่าวเหล่านี้ไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อการป้องกันระบบทางเดินหายใจ และยังไม่มีการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการกรองอนุภาคขนาดใหญ่และอนุภาคขนาดเล็ก รวมถึงไวรัสต่างๆ ซึ่งข้อมูลต่างๆ เหล่านี้เป็นตัว

บ่งชี้สำคัญที่จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้เข้าใจถึงประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของหน้ากากผ้าและวัสดุผ้า ซึ่งความรู้เกี่ยวกับประสิทธิภาพการกรองของวัสดุผ้าทั่วไปของประเทศไทยสำหรับอนุภาคที่ขนาดเล็กมีค่อนข้างจำกัด ในต่างประเทศได้มีการศึกษาประสิทธิภาพการกรองของหน้ากากผ้าและวัสดุผ้าทั่วไปกับอนุภาคขนาดเล็ก (Rengasamy *et al.*, 2010) และประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของผ้าทั่วไปที่ใช้ในหน้ากากผ้าทางเดินหายใจ (Sickbert-Bennett *et al.*, 2020) มีการศึกษาประสิทธิภาพของผ้าสำหรับทำหน้ากากอนามัยแบบผ้าด้วยตัวเอง (Aydin *et al.*, 2020) สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขนาดเล็กของวัสดุผ้าชัดเจนในช่วงก่อนหรือช่วงที่โควิด-19 ระบาด จึงทำให้เกิดการขาดความรู้และความเข้าใจในการนำวัสดุผ้ามาใช้ทำหน้ากากอนามัยแบบผ้าทำให้เกิดความเสี่ยงไม่สามารถป้องกันการติดเชื้อได้

ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของวัสดุกรองอนุภาคทั้งผ้าทอและแผ่นกรองนอนวูฟเวนจะขึ้นอยู่กับ 5 กลไกคือกลไกการแพร่ (Diffusion) กลไกการกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อย (Inertial impaction) กลไกการสกัดกั้น (Interception) กลไกการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravitational settling) และกลไกการดึงดูดด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction) (Hinds, 1999; Willeke and Baron, 1993) โดยการสกัดกั้นและกลไกการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงเป็นกลไกที่ทำหน้าที่ในการดักกรองอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า $0.5\ \mu\text{m}$ การสกัดกั้นและการแพร่กระจายเป็นกลไกที่ทำหน้าที่ในการกรองอนุภาคขนาดในช่วง $0.1\ \mu\text{m}$ ถึง $0.5\ \mu\text{m}$ ส่วนการแพร่กระจายและการดึงดูดด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นกลไกที่ทำหน้าที่ในการดักกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า $0.1\ \mu\text{m}$ (Hinds, 1999) แผ่นกรองทุกชนิดจะมีประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นต่ำในช่วงอนุภาคขนาด 0.1 ถึง $0.5\ \mu\text{m}$

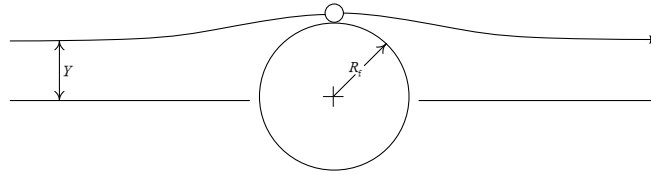
เนื่องจากเป็นช่วงขนาดอนุภาคที่กลไกการแพร่กระจายการกระทบด้วยแรงเฉื่อยและการสกัดกั้นดักกรองได้ต่ำ โดยขนาดอนุภาคที่สามารถผ่านทะลุแผ่นกรองได้ดีที่สุด (Most penetrating particle size) คืออนุภาคขนาด $0.3\ \mu\text{m}$ (Willeke and Baron, 1993) ในการวิจัยนี้จึงสนใจใช้อนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $0.3\ \mu\text{m}$ ในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของวัสดุกรองเนื่องจากเป็นขนาดอนุภาคที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองตามมาตรฐานของหน้ากากกรองอากาศหรือฝุ่นและอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $0.3\ \mu\text{m}$ ยังเป็นส่วนประกอบหลักของอนุภาคขนาดเล็กหรือฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ที่เป็นตัวกลางสำคัญในการแพร่กระจายไวรัสโควิด-19 เข้าสู่ร่างกายผ่านระบบทางเดินหายใจ (Fushimi *et al.*, 2008) และหากแผ่นกรองหรือวัสดุกรองสามารถกรองอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $0.3\ \mu\text{m}$ ได้ก็เท่ากับว่าสามารถที่จะกรองอนุภาคในช่วงขนาดอื่นได้ดีเช่นกัน

ถ้าพิจารณาอนุภาคที่มีขนาดในช่วงไม่เกิน $0.3\ \mu\text{m}$ กลไกการดึงดูดระหว่างอนุภาคกับเส้นใยของแผ่นกรองด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตเป็นกลไกที่น่าสนใจในการเสริมประสิทธิภาพการกรองอนุภาคในช่วงดังกล่าวของวัสดุกรอง เนื่องจากอากาศในธรรมชาติ ทุกๆ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรของอากาศจะประกอบด้วย 1,000 ไอออนที่มีจำนวนของไอออนบวกและลบเท่ากันโดยประมาณและมีการชนกันแบบสุ่มของอนุภาคละอองลอยกับไอออนอากาศทั่วไปทำให้อนุภาคมีประจุไฟฟ้า (Hinds, 1999) ดังนั้นอนุภาคละอองลอยที่ผ่านแผ่นกรองในการใช้งานจริงจะมีทั้งสถานการณ์กระจายประจุที่สมดุล (Equilibrium charge distribution) และไม่สมดุล (Non-equilibrium charge distribution) เนื่องจากการชนกันระหว่างอนุภาคและไอออนบวกและลบในอากาศที่อัตราการชนต่างกัน ซึ่งอนุภาคที่มีประจุสมดุลและไม่สมดุลนี้จะให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคที่ต่างกัน ในการ

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM F2299-03, EN149 และ 42 CFR 84 ได้กำหนดให้มีการทดสอบกับอนุภาคที่มีประจุสมดุลหรืออนุภาคที่เป็นกลาง เนื่องจากการลดผลของประจุไม่สมดุลเริ่มต้นของอนุภาคในขณะทดสอบ แต่อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานแผ่นกรองอนุภาคจริงในอากาศทั่วไปมีทั้งอนุภาคที่สมดุลและไม่สมดุลประจุตามที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงผลของประจุสมดุลและไม่สมดุลของอนุภาคที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกรองอนุภาค (Particle filtration efficiency) ข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์สำหรับการเสริมหรือเพิ่มประสิทธิภาพการกรองด้วยกลไกไฟฟ้าสถิต รวมไปถึงการศึกษาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับผลของอัตราการหายใจเข้าและออกของมนุษย์ขณะทำกิจกรรมต่างๆ ที่สอดคล้องกับความเร็วด้านหน้า (Face velocity) ต่อประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขนาด $0.3 \mu\text{m}$ ในต่างประเทศได้มีการวิจัยผลของประจุไฟฟ้าสถิตของอนุภาคต่อประสิทธิภาพการกรองด้วยฟิลเตอร์ไฟเบอร์และชิ้นส่วนกรอง (Lundgren and Whitby, 1965; Chen and Huang, 1998) และผลของความเร็วด้านหน้า ความหนาแน่น และความหนาของแผ่นนาโนไฟเบอร์ต่อประสิทธิภาพการกรองของตัวกรองเส้นใยนาโน (Rodrigues *et al.*, 2017) การศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกและความเร็วด้านหน้าสำหรับตัวกรองนาโนไฟเบอร์แบบอิเล็กโทรสปิน (Leung *et al.*, 2010; Xia *et al.*, 2018) และการศึกษาทดลองการกรองละอองลอยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ความเร็วหน้าฟิลเตอร์ปานกลาง (Sanchez *et al.*, 2013) จากงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับผลของประจุไฟฟ้าสถิตของอนุภาคและความเร็วด้านหน้า

ต่อประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของแผ่นกรองนอนวูฟเวนของเส้นใยระดับนาโนซึ่งเป็นวัสดุสำหรับทำหน้ากากอนามัยแบบใช้ครั้งเดียว สำหรับการศึกษาผลดังกล่าวกับผ้าทอที่ใช้สำหรับทำหน้ากากอนามัยแบบผ้ายังมีการศึกษาในวงจำกัดทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งขัดแย้งกับการใช้หน้ากากอนามัยแบบผ้าอย่างกว้างขวางในสถานการณ์แพร่ระบาดของโควิด-19 ในปัจจุบัน นอกจากนี้ การศึกษาเกี่ยวกับความแตกต่างของประสิทธิภาพการกรองระหว่างอนุภาค NaCl และ PSL กับผ้าทอก็จะเป็นประโยชน์กับการพัฒนาปรับปรุงโครงสร้างเส้นใยและลักษณะการทอของผ้าทอเพื่อใช้เป็นวัสดุกรองอนุภาคสำหรับหน้ากากอนามัยแบบผ้าเนื่องจากอนุภาคทั้ง 2 ชนิดนี้ใช้เป็นอนุภาคในการทดสอบในหลายมาตรฐาน เช่น ASTM F2299-03, EN149, CWA17553 และ 42 CFR 84

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือผลของประจุสมดุลของอนุภาคและความเร็วด้านหน้าต่อประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของผ้าทอกับอนุภาคโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ (PSL) เทียบกับแผ่นกรองนอนวูฟเวนที่อัตราการไหลในช่วง 6 ถึง 28.3 L/min สอดคล้องกับความเร็วด้านหน้าคือ 5 ถึง 27 cm/s ในการศึกษาจะใช้วัสดุกรองหน้ากาก N95 และผ้าไมโครไฟเบอร์ในการทดสอบ โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์กับการพัฒนาปรับปรุงโครงสร้างเส้นใยลักษณะการทอและประจุไฟฟ้าสถิตบนเส้นใยของผ้าทอเพื่อใช้เป็นวัสดุกรองอนุภาคสำหรับหน้ากากอนามัยแบบผ้าต่อไป สำหรับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการศึกษางานวิจัยนี้จะประกอบด้วย การกรองอนุภาคและการกระจายประจุสมดุล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 1 หลักการกรองอนุภาคของเส้นใยเดี่ยว (Willeke and Baron, 1993)

การกรองอนุภาค (Filtration theory) เป็น การอธิบายการกรองอนุภาคของตัวกรองเส้นใยไฟเบอร์ (Fibrous filter) ที่พิจารณาการดักจับอนุภาค ด้วยเส้นใยเดี่ยว (Single fiber) ประสิทธิภาพของเส้นใยเดี่ยว (Single-fiber efficiency) จะถูกนิยามเป็น อัตราส่วนของจำนวนอนุภาคที่กระทบเส้นใยต่อ

จำนวนอนุภาคที่จะกระทบหากเส้นกระแส (Streamlines) ไม่ถูกเบี่ยงเบนไปรอบเส้นใย ถ้ารัศมีของเส้นใย R_f กำจัดทุกอนุภาคที่อยู่ภายในชั้นความหนา Y ดังภาพที่ 1 ประสิทธิภาพของเส้นใยเดี่ยว η จะถูกนิยามเป็น (Willeke and Baron, 1993)

$$\eta = \frac{Y}{R_f} \quad (1)$$

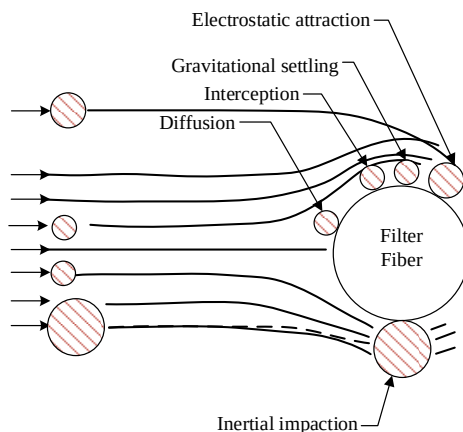
ประสิทธิภาพโดยรวมหรือประสิทธิภาพรวม E ของตัวกรองที่ประกอบด้วยหลายเส้นใยในแผ่นสามารถอธิบายตามความสัมพันธ์ของ

ประสิทธิภาพของเส้นใยเดี่ยวได้คือ (Willeke and Baron, 1993)

$$E = 1 - \exp \left[\frac{-4\eta\alpha L}{\pi d_f (1 - \alpha)} \right] \quad (2)$$

เมื่อ α คือความแข็งหรือความหนาแน่นของตัวกรอง (1 - ความพรุน (Porosity)) L คือความลึกหรือความหนาของตัวกรองและ d_f คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ปกติแล้วเส้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะถูกเบี่ยงเบนจากเส้นกระแสเนื่องจากหลายกลไกผลที่ตามมาคืออนุภาคจะชนกับพื้นผิว

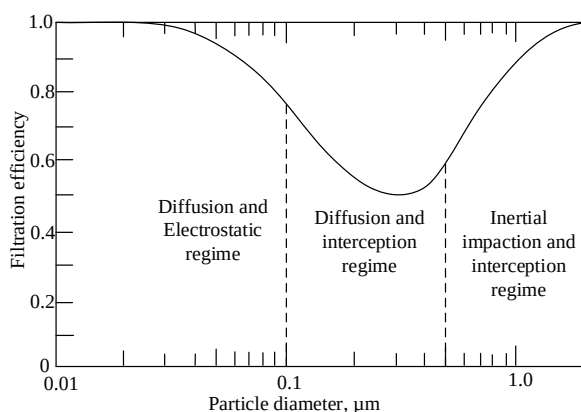
ของเส้นใยและจะเกาะติดหรือสะสมอยู่บนเส้นใย โดยกลไกสำคัญที่ทำให้อนุภาคเกาะติดหรือสะสมตัวอยู่บนเส้นใยคือการแพร่ การกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อย การสกัคกัน การตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง และการดึงดูดด้วยไฟฟ้าสถิตดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กลไกการกรองอนุภาคของเส้นใยเดี่ยว

ดังนั้น ประสิทธิภาพของเส้นใยเดี่ยว η สามารถสมมติด้วยการประมาณที่ประกอบด้วย ผลรวมเลขคณิตของประสิทธิภาพแต่ละตัวจากกลไกการแพร่ η_{diff} กลไกการกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อย η_{imp} กลไกการสกัดกั้น η_{inter} กลไกการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วง η_{grav} และกลไกการดึงดูดด้วยไฟฟ้าสถิต η_{elec} โดยการสกัดกั้นและกลไกการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงเป็นกลไกที่ทำหน้าที่ในการดักกรองอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า $0.5 \mu m$ การสกัดกั้นและการแพร่กระจายเป็นกลไกที่ทำหน้าที่ในการกรองอนุภาคขนาดในช่วง $0.1 \mu m$ ถึง $0.5 \mu m$

ส่วนการแพร่กระจายและการดึงดูดด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นกลไกที่ทำหน้าที่ในการดักกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า $0.1 \mu m$ (Hinds, 1999; (Willeke and Baron, 1993) ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งประสิทธิภาพการกรองอนุภาคจะต่ำในช่วงอนุภาคขนาด 0.1 ถึง $0.5 \mu m$ เนื่องจากเป็นช่วงขนาดอนุภาคที่กลไกการแพร่กระจาย การกระทบด้วยแรงเฉื่อยและการสกัดกั้นดักกรองได้ต่ำ โดยขนาดอนุภาคที่สามารถผ่านทะลุแผ่นกรองได้ดีที่สุด (Most penetrating particle size) คืออนุภาคขนาด $0.3 \mu m$ (Willeke and Baron, 1993)



ภาพที่ 3 ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคเทียบกับขนาดอนุภาคที่แสดงถึงกลไกการกรองอนุภาคแต่ละช่วงขนาด (Willeke and Baron, 1993)

การกระจายประจุสมดุลในธรรมชาติประจุต่ำสุดของอนุภาคละอองลอยจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่ง

เงื่อนไขนี้ไม่ค่อยเกิดขึ้นเนื่องจากการชนกันแบบสุ่มของอนุภาคละอองลอยกับไอออนอากาศทั่วไป โดย

ทุกๆ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรของอากาศจะประกอบด้วย 1,000 ไอออนที่มีจำนวนของไอออนบวกและลบ เท่ากันโดยประมาณ อนุภาคละอองลอยที่เริ่มเป็น กลางจะได้รับประจุโดยการชนกับไอออนเนื่องจาก การเคลื่อนที่ด้วยความร้อนแบบสุ่ม อนุภาคละอองลอย ที่เริ่มเป็นกลางจะสูญเสียประจุอย่างช้าๆ เนื่องจาก อนุภาคที่มีประจุดึงดูดไอออนที่มีประจุตรงข้าม กระบวนการที่สมบรูณ์นี้จะนำไปสู่สถานะสมดุล ประจุ (Equilibrium charge state) ที่เรียกว่าการกระจาย ประจุสมดุลของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann equilibrium charge distribution) และยังเรียกว่าสถานะคงที่ (Steady-state) คงที่ (Stationary) หรือการกระจายประจุสมดุล

แบบสองขั้วหรือไบโพลาร์ (Bipolar equilibrium charge distribution) การกระจายประจุสมดุลของโบลต์ซมันน์ จะแสดงถึงการกระจายประจุของละอองลอยในสมดุล ประจุด้วยไอออนแบบสองขั้ว จำนวนชั้นต่ำของ ประจุจะน้อยมากๆ กับความน่าจะเป็นทางสถิติที่บาง อนุภาคจะไม่มีประจุและอนุภาคอื่นๆ จะมีหนึ่งประจุ หรือมากกว่าหนึ่งประจุ สำหรับความเข้มข้นที่เท่ากัน ของไอออนบวกและลบ การประมาณการสำหรับ อากาศปกติ เศษของอนุภาค, f_n , ของขนาดที่กำหนด จะมี, n , หน่วยพื้นฐานของประจุบวกหรือลบคือ (Hinds, 1999)

$$f_n = \frac{\exp(K_E n^2 e^2 / d_p kT)}{\sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(K_E n^2 e^2 / d_p kT)} \quad (3)$$

เมื่อ $K_E = 1 / 4\pi\epsilon_0 \epsilon_0$ คือค่าสภาพยอมของ อากาศว่าง (Permittivity of free space) มีหน่วย เป็นฟารัดต่อเมตร (F/m) (มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m) n คือค่าจำนวนประจุเฉลี่ย e คือค่าประจุ อิเล็กตรอน (มีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} C) d_p ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลางอนุภาค k คือค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์

(Boltzmann's constant) มีค่าเท่ากับ 1.380658×10^{-23} J/K T คืออุณหภูมิทำงาน สำหรับอนุภาคที่มีขนาด ใหญ่กว่า $0.5 \mu\text{m}$ สมการที่ 3 จะเป็นสมการที่แสดง การกระจายปกติ (Normal distribution) และสามารถ เขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายคือ (Hinds, 1999)

$$f_n = \left(\frac{K_E e^2}{\pi d_p kT} \right)^{1/2} \exp \left(\frac{-K_E n^2 e^2}{d_p kT} \right) \quad (4)$$

สมการนี้มีค่าความแตกต่างจากสมการที่ 3 ไม่เกิน 7 % สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่มากกว่า $0.02 \mu\text{m}$ และไม่เกิน 0.04% สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่มากกว่า $0.05 \mu\text{m}$ สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า $0.05 \mu\text{m}$ ทั้งสมการที่ 5 และ 6 จะประเมินค่าเศษอนุภาคที่มี ประจุต่ำกว่าความเป็นจริงและต้องใช้กระบวนการ ที่ซับซ้อน โดยการกระจายประจุจะสมมาตรศูนย์นั้น

คือเศษอนุภาคที่มีประจุบวกจะเท่ากับเศษอนุภาคที่มี ประจุลบ สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า $0.1 \mu\text{m}$ การกระจายจะประกอบด้วยเศษอนุภาคที่ไม่มีประจุ และเศษอนุภาคที่มีประจุเดี่ยวที่มีประจุบวกและประจุ ลบเท่ากัน โดยจำนวนประจุเฉลี่ย (Average charge) $\bar{n}$ สามารถคำนวณได้จาก (Hinds, 1999)

$$\bar{n} \approx 2.37 \sqrt{d_p} \quad (5)$$

ซึ่งสมการที่ 5 จะให้ความถูกต้องประมาณ $\pm 5\%$ สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า $0.2 \mu\text{m}$ โดยอัตราที่ละอองลอยจะไปสู่การกระจายประจุสมดุล

ของโพลต์ซมันน์จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนแบบไบโพลาร์และสามารถหาได้จาก (Hinds, 1999)

$$\frac{n(t)}{n_0} = \exp(-4\pi K_e e Z_i N_i t) \quad (6)$$

เมื่อ $n(t)$ คือจำนวนประจุบนอนุภาคหลังจากที่ได้รับไอออนแบบไบโพลาร์ที่ความเข้มข้น N_i และเวลา t ถ้า n_0 คือประจุที่เวลา $t=0$ และ Z_i คือความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าของไอออน (Ion electrical mobility) ซึ่งเศษอัตราการคายประจุ (Fractional discharge rate) จะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคหรือประจุเริ่มต้น โดยไอออนแบบไบโพลาร์สามารถสร้างได้หลายวิธี เช่น โคโรนา ดิสชาร์จ (Corona discharge) แสง UV หรือโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric) และกัมมันตรังสี (Radiation) จากแหล่งกำเนิด α -ray หรือ β -ray เช่น ^{85}Kr , ^{241}Am และ ^{210}Po (Intra and Tippayawong, 2009)

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษานี้จะทดลองผลของประจุสมดุลของอนุภาคและความเร็วของด้านหน้าที่มีต่อประสิทธิภาพ การกรองของอนุภาคโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ (PSL) กับวัสดุกรองหน้ากาก N95 และผ้าไมโครไฟเบอร์ โดยวัสดุกรองหน้ากาก N95 จะใช้เป็นวัสดุกรองอ้างอิง ประสิทธิภาพสำหรับแผ่นกรองแบบนอนวูฟเวน สำหรับผ้าไมโครไฟเบอร์จะเป็นตัวแทนของวัสดุผ้าที่ใช้สำหรับทำแผ่นกรองหน้ากากอนามัยแบบผ้าที่มีใช้กันทั่วไป ในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบตามวิธีการทดสอบมาตรฐานของมาตรฐาน ASTM F2299-03 ซึ่งเป็นวิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับการหาประสิทธิภาพการกรองและการทะลุผ่านของหน้ากากอนามัยทางการแพทย์โดยการใช้อุณหภูมิ

กลมชนิดโพลิสไตรีนลาเท็กซ์กำหนดโดยสมาคมการทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials) (ASTM International, 2017) ภาพที่ 4 แสดงภาพถ่ายของวัสดุกรองหน้ากาก N95 และผ้าไมโครไฟเบอร์ วัสดุผ้าที่ใช้ในการทดสอบจะถูกตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4.76 cm มีพื้นที่ในการทดสอบประมาณ 17.8 cm^2 ตารางที่ 1 และ 2 แสดงสมบัติทางกายภาพของผ้าไมโครไฟเบอร์และวัสดุกรองหน้ากาก N95 ที่ใช้ในการทดสอบนี้คืออัตราส่วนผสมเส้นใย (Fiber mixture ratio) โครงสร้างผ้า (Fabric structure) ความหนา (Thickness) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย (Fiber diameter) ขนาดรูพรุน (Pore size) และความต่างของความดันในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบค่าการซึมผ่านของอากาศ (Air permeability) ของวัสดุผ้าไมโครไฟเบอร์ตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบการซึมผ่านของอากาศ (Air permeability tester) ของสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ ภาพที่ 5 แสดงแผนภาพอุปกรณ์การทดลองสำหรับการประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของวัสดุผ้าในการศึกษานี้ วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วย ประกอบด้วยอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ (PSL) อนุภาคโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (Atomizer aerosol generator) แหล่งจ่ายอากาศสะอาด (Filtered air supply) เครื่องอัดอากาศ (Air compressor) ตัวไล่ความชื้นแบบแพร่ (Diffusion dryer) ตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง (Aerosol neutralizer) ชุดวาล์วปรับความเข้มข้น (Concentration adjustment

valve) เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic size classifier) เครื่องวัดขนาดอนุภาคแบบสแกนความเคลื่อนที่ได้ (Scanning Mobility

Particle Sizer) มาโนมิเตอร์ (Manometer) ห้องทดสอบ (Test chamber) ห้องผสมและเจือจางละอองลอย (Aerosol mixing and dilution chamber)



(ก) วัสดุกรองหน้ากาก N95



(ข) ผ้าไมโครไฟเบอร์

ภาพที่ 4 ภาพถ่ายของวัสดุกรองหน้ากาก N95 และผ้าไมโครไฟเบอร์

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของผ้าไมโครไฟเบอร์ ที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวแปร	ช่วงการวิเคราะห์
อัตราส่วนผสมเส้นใย	PES 100%
โครงสร้างผ้า	ขนาดเกลียว : - จำนวนห่วงถัก : 20×14 น้ำหนักผ้า : 280 g/m ²
ความหนา (mm)	3.41
ค่าการซึมผ่านของอากาศ (cm ³ /cm ² /s)	12.9

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุกรองหน้ากาก N95 ที่ใช้ในการทดสอบ

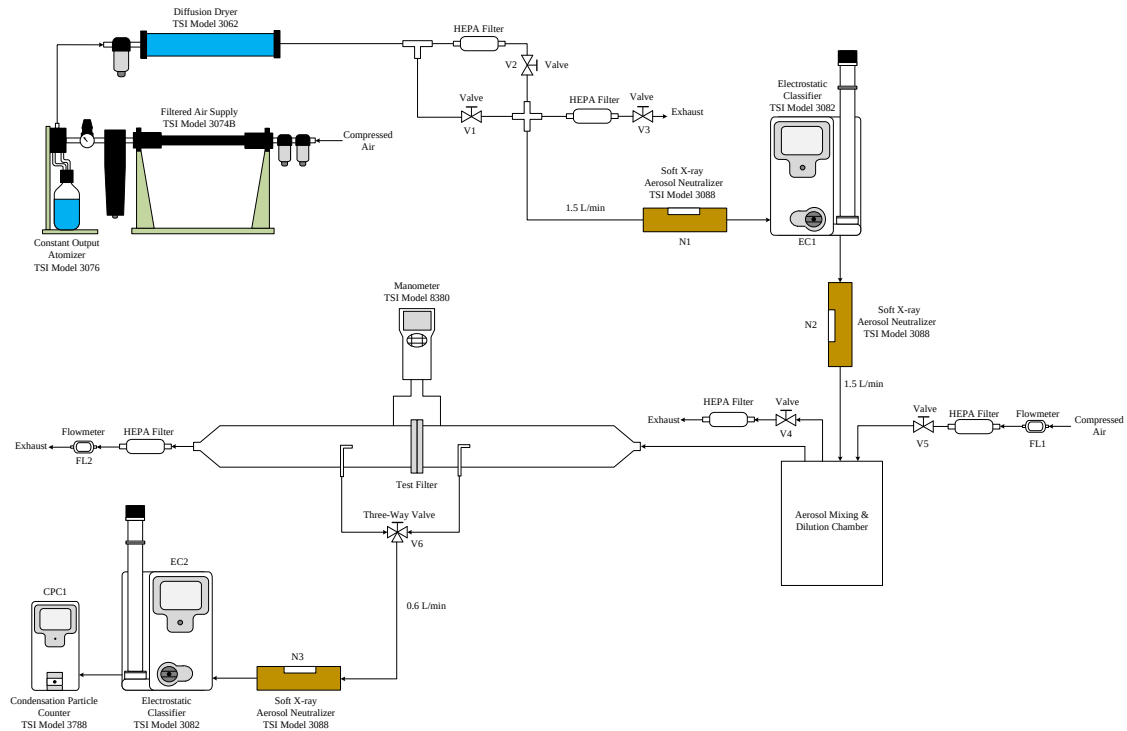
ตัวแปร	ช่วงการวิเคราะห์
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย	20-25 μm
ขนาดรูพรุน	50-200 μm
ความหนา (mm)	3.5
ความต่างของความดัน (mmH ₂ O/cm ²)	12.9

มาตรวัดการไหล (Flow meter) และตัวกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง (HEPA filter) ภาพที่ 6 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์และเครื่องมือการทดลอง สำหรับการศึกษานี้ ในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองนี้ใช้อนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 nm หรือ 0.3 μm ของ Thermo Scientific™ Dri-Cal™ มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทาง

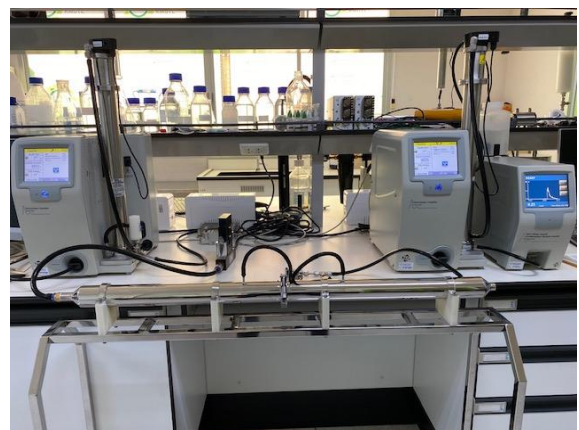
เรขาคณิต (Geometric standard deviation) 1.6 % ที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐานจากสถาบันแห่งชาติของมาตรฐานและเทคโนโลยี (National Institute of Standards and Technology, NIST) ของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยอนุภาคโพลีสไตรีนลาเท็กซ์ที่ผสมในน้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water) ในสัดส่วน 1000 : 1 และอนุภาคโซเดียมคลอไรด์ที่ผสม

ในน้ำกลั่นปราศจากไอออนในสัดส่วน 0.9 g ต่อ 100 mL โดยอนุภาคทั้ง 2 ชนิดถูกจ่ายด้วยแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบบะตอมไมเซอร์ (Model 3076, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) จากนั้นอนุภาคจะผ่านเข้าไปยังตัวไล่ความชื้นแบบแพร์ (Model 3062, TSI

Inc., St. Paul, MN, USA) เพื่อกำจัดละอองน้ำและความชื้นออก โดยความเข้มข้นของอนุภาคสามารถปรับให้เหมาะสมได้ด้วยชุดวาล์วปรับความเข้มข้นด้านหลังตัวไล่ความชื้น



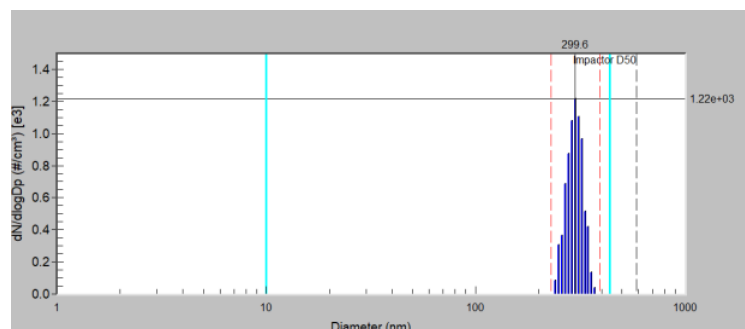
ภาพที่ 5 แผนภาพอุปกรณ์การทดลองสำหรับการประเมินประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของวัสดุผ้า



ภาพที่ 6 ภาพถ่ายอุปกรณ์และเครื่องมือการทดลองสำหรับการศึกษานี้

หลังจากชุดวาล์วปรับความเข้มข้น อนุภาค จะถูกทำให้มีสมมูลประจุ โปลต์ซมันน์ ด้วยตัวทำให้ ละอองลอยเป็นกลางแบบ Soft X-ray (Model 3088, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) เพื่อคัดแยกขนาด อนุภาคแบบความเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้า ด้วยเครื่อง คัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต (Model 3082, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) โดยทำการแยกอนุภาค ตกค้างที่เป็นอนุภาคแร่ธาตุของน้ำออกให้ได้เฉพาะ อนุภาคที่มีขนาดเดียวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $0.3\ \mu\text{m}$ ซึ่งอนุภาคตกค้างเหล่านี้อาจมีผลต่อการทดสอบ ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของวัสดุกรองในช่วง ขนาดอนุภาคเล็กกว่า $0.3\ \mu\text{m}$ เพื่อหลีกเลี่ยงผลของ อนุภาคตกค้างดังกล่าว ต้องมีการคัดแยกขนาด อนุภาคก่อนด้วยเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบ ไฟฟ้าสถิต ภาพที่ 7 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคที่ ผ่านการคัดแยกขนาดด้วยเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค แบบไฟฟ้าสถิต มีเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (Median diameter) เท่ากับ 303.2 nm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Mean diameter) เท่ากับ 304.3 nm เส้นผ่านศูนย์กลาง เฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometric mean diameter) เท่ากับ 303.6 nm เส้นผ่าศูนย์กลางฐานนิยม (Mode diameter) เท่ากับ 299.6 nm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิต

(Geometric standard deviation) เท่ากับ 1.07 หลังจาก คัดแยกขนาดแล้วอนุภาคถูกทำให้มีสภาพประจุเป็น กลางหรือมีสมมูลประจุด้วยตัวทำให้ละอองลอยเป็น กลางแบบ Soft X-ray (Model 3088, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) เพื่อป้องกันการสูญเสียอนุภาคในระบบ หรือในท่อและห้องทดสอบตัวอย่าง (Liu and Pui, 1974) ในการศึกษาใช้ท่อซิลิโคนนำไฟฟ้า และท่อเหล็กกล้า ไร้สนิม เป็นท่อสำหรับนำส่งและการเก็บตัวอย่าง อนุภาคเพื่อป้องกันการสูญเสียของอนุภาคในระบบ ทดสอบ โดยท่อซิลิโคนนำไฟฟ้าและท่อเหล็กกล้าไร้ สนิมมีค่าการทะลุผ่านของอนุภาคระหว่าง 100-300 nm มากกว่า 95 (Timko *et al.*, 2009) ในการศึกษาจะ ทำการปิด/เปิดตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลางเพื่อ ศึกษาผลของประจุสมมูลและประจุไม่สมมูลของ อนุภาค โดยการปิดตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง อนุภาคจะประจุเริ่มต้นตามธรรมชาติไม่มีการกระจาย ประจุสมมูลของโพลต์ซมันน์และการเปิดตัวทำให้ ละอองลอยเป็นกลาง อนุภาคจะเข้าสู่การกระจาย ประจุสมมูลของโพลต์ซมันน์ หลังจากผ่านตัวทำให้ ละอองลอยเป็นกลาง อนุภาคเข้าไปยังห้องผสมและ เจือจางละอองลอยเพื่อเจือจางกับอากาศให้ได้อัตรา การไหลและความเข้มข้นของอนุภาคที่ต้องการ



ภาพที่ 7 การกระจายขนาดอนุภาคขนาด 0.3 ไมครอน

สำหรับสภาพการใช้งานจริงของหน้ากาก การหายใจปกติของมนุษย์จะประมาณ 5-6 ลิตรต่อ นาทิ ส่วนการหายใจขณะทำงานหนักจะประมาณ 25

-80 ลิตรต่อนาที ซึ่งการใช้งานจริงมีโอกาสเกิดการ ไหลแบบปั่นป่วนได้ ในการศึกษานี้ได้ทดสอบผล ของความเร็วด้านหน้าต่อประสิทธิภาพการกรอง

อนุภาคในช่วงความเร็วการไหล 5-27 cm/s ซึ่งเป็นอัตราการไหลช่วงการหายใจปกติไปจนถึงขณะทำงานหนักที่อาจเกิดการไหลแบบปั่นป่วนได้ โดย

$$V = \frac{Q}{A} \quad (7)$$

จากสมการที่ 7 จะได้อัตราการไหลอนุภาคในช่วงประมาณ 5.3-28.3 L/min จากนั้นอัตราการไหลที่ต้องการสำหรับการทดสอบของอนุภาคขนาด 0.3 μm จะผ่านเข้าไปยังห้องทดสอบ (Test chamber) ซึ่งมีแผ่นวัสดุกรองทดสอบอยู่ภายใน ในส่วนของห้องทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.76 cm ยาว 100 cm ซึ่งตัวอย่างวัสดุ (Material specimen) จะอยู่ห่างจากทางเข้าอนุภาค (Particle inlet) 10 เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (Duct diameters) โดยหัวเก็บตัวอย่างอนุภาค (Particle sampling probe) ก่อนแผ่นกรองจะห่างจากตัวอย่างวัสดุ 2 เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (9.52 cm) และหัวเก็บตัวอย่างอนุภาคหลังแผ่นกรองจะห่างจากตัวอย่างวัสดุ 3 เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (14.28 cm) หัวเก็บตัวอย่างทั้งสองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 cm การเก็บตัวอย่างอนุภาคในการทดสอบนี้จะเป็นการเก็บตัวอย่างแบบไอโซไคเนติก (Isokinetic sampling) ทิศทางของของไหลที่ทางเข้าหัววัดและแกนของหัวเก็บตัวอย่างอยู่ในแกนเดียวกันคือขนานกับเส้นการไหลของของไหลและความเร็วของของไหลที่จุดทางเข้าหัววัดมีค่าเท่ากับความเร็วของการไหลภายนอก

ความเร็วด้านหน้า V หาได้จากอัตราการไหล Q และพื้นที่ทดสอบ A คือ

โดยในขณะทดสอบได้มีการวัดค่าความต่างความดันของแผ่นวัสดุด้วยมาโนมิเตอร์ (Model 8380, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) โดยการหาประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของวัสดุในการศึกษานี้จะทำการวัดการกระจายขนาดอนุภาคในลักษณะเชิงจำนวน (Number weighted particle size distribution) ทั้งก่อน (Upstream) และหลังผ่าน (Downstream) วัสดุทดสอบด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาคแบบสแกนความเคลื่อนที่ได้ (Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)) ที่ประกอบด้วย ตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง เครื่องคัดแยกขนาดอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตและเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบควบแน่น (Model 3788, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) สำหรับการสูญเสียของอนุภาคภายใน SMPS มีการใช้อัลกอริทึมการสูญเสียการแพร่กระจาย (Diffusion loss algorithm) ในซอฟต์แวร์ควบคุมการวัดของ SMPS เมื่อขนาดอนุภาคละอองลอยเล็กกว่า 100 nm (Reineking and Porstendörfer, 1986) โดยประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของตัวกรอง η_{exp} จะสามารถคำนวณได้จาก

$$\eta_{\text{exp}} = \frac{C_{\text{inlet}} - C_{\text{outlet}}}{C_{\text{inlet}}} \times 100 \quad (8)$$

เมื่อ C_{inlet} คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคก่อนผ่านของตัวกรองและ C_{outlet} คือความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคหลังผ่านของตัวกรอง ตารางที่ 3 แสดงช่วงและค่าของตัวแปรที่ทดสอบ ใน

การทดสอบนี้จะควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดสอบที่ 25°C และ 55 %RH เมื่อ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์

ตารางที่ 3 ช่วงและค่าของตัวแปรที่ทดสอบ

ตัวแปร	ช่วงการวิเคราะห์
ชนิดของอนุภาค	NaCl และ PSL
ความเข้มข้นของจำนวนอนุภาค	$3.5 \times 10^5 - 1.5 \times 10^6$ particles/cm ³
ขนาดอนุภาค	0.3 μ m
พื้นที่ทดสอบแผ่นกรอง	17.8 cm ²
อัตราการไหล	5.3 - 28.3 L/min
ความเร็วด้านหน้า	5 - 27 cm/s
ความชื้นสัมพัทธ์ในขณะทดสอบ	55 %RH
ความดันบรรยากาศขณะทดสอบ	1 atm
อุณหภูมิในขณะทดสอบ	25°C

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ตารางที่ 5 และ 6 แสดงประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของผ้าทอและแผ่นกรองนอนูฟเวนเมื่อประจุไม่สมดุลและประจุสมดุล จากตารางที่ 5 พบว่า ผ้าทอหรือผ้าไมโครไฟเบอร์จะได้ประสิทธิภาพการกรองของอนุภาค NaCl ประมาณ 22.13 % และ 20.02 % เมื่อประจุไม่สมดุลและประจุสมดุล ตามลำดับ ให้ค่าประสิทธิภาพการกรองอนุภาคต่างกันประมาณ 2.11 % และสำหรับแผ่นกรองนอนูฟเวนหรือวัสดุกรองหน้ากาก N95 (ตารางที่ 6) จะได้ประสิทธิภาพการกรองของอนุภาค NaCl ประมาณ 99.07 % และ 98.50 % เมื่อประจุไม่สมดุลและประจุสมดุล ตามลำดับ และให้ค่าประสิทธิภาพการกรองต่างกันประมาณ 0.57 % สำหรับอนุภาค PSL ในตารางที่ 5 ผ้าทอหรือผ้าไมโครไฟเบอร์จะได้ประสิทธิภาพการกรองของอนุภาค PSL ประมาณ 34.89 % และ 27.05 % เมื่อประจุไม่สมดุลและประจุสมดุล ตามลำดับ ให้ค่าประสิทธิภาพการกรองต่างกันประมาณ 7.84 % และสำหรับแผ่นกรองนอนูฟเวนหรือวัสดุกรองหน้ากาก N95 (ตารางที่ 6) จะได้ประสิทธิภาพการกรองของอนุภาค PSL ประมาณ 98.86 % และ 95.24 % เมื่อ

ประจุไม่สมดุลและประจุสมดุล ตามลำดับ และให้ค่าประสิทธิภาพการกรองต่างกันประมาณ 3.61 % จากผลการทดลองพบเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อใช้ตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลางมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของวัสดุกรองทั้งสองลดลงเนื่องจากการประจุสมดุลของอนุภาคหรือการกระจายประจุสมดุลของโพลีเมอร์ที่แสดงถึงการกระจายประจุอนุภาคในสมดุลประจุด้วยไอออนแบบไบโพลาร์ จากสมการที่ 3 และ 4 สามารถประมาณค่าการกระจายประจุของอนุภาคขนาด 0.3 μ m ได้คืออนุภาคที่ไม่มีประจุจะมีประมาณ 30% และอนุภาคที่ได้รับประจุ + และ -1 มีประมาณ 22.5% อนุภาคที่ได้รับประจุ + และ -2 มีประมาณ 9.6% อนุภาคที่ได้รับประจุ + และ -3 มีประมาณ 2.6% และอนุภาคที่ได้รับประจุ + และ - มากกว่า 3 มีประมาณ 0.3 % ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 จากค่าประมาณการของสมการที่ 3 และ 4 จะเห็นว่าอนุภาคที่ไม่ได้รับประจุมีประมาณ 30% และอนุภาคที่มีประจุทั้งบวกและลบมีประมาณ 70% ส่งผลทำให้อนุภาคที่ไม่มีประจุกว่า 30% สามารถผ่านทะลุได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีประจุ

ตารางที่ 4 ผลการประมาณค่าการกระจายประจุของอนุภาคขนาด 0.3 μm

ขนาดอนุภาค (μm)	ร้อยละของอนุภาคที่ได้รับประจุ (%)								
	<-3	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	>+3
0.3	0.3	2.6%	9.6%	22.5%	30%	22.5%	9.6%	2.6%	0.3 %

สำหรับประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของผ้าไมโครไฟเบอร์จะลดลงชัดเจนเนื่องจากวัสดุกรองหน้ากาก N95 และผ้าไมโครไฟเบอร์มีความต่างกันตรงที่ประจุไฟฟ้าสถิตบนเส้นใยของผ้า โดยปกติวัสดุกรองหน้ากาก N95 มีความหนาแน่นประจุไดโพล (Dipole Charge density) เท่ากับ 0.27, 21.57 และ $0.23 \mu\text{C}/\text{m}^2$ สำหรับชั้นด้านใน ชั้นกลางและชั้นด้านนอก ตามลำดับ (Yim *et al.*, 2020) ซึ่งจะถูกอัดประจุไฟฟ้าสถิตให้กับเส้นใยเพื่อเสริมประสิทธิภาพการกรองด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตระหว่าง

อนุภาคและเส้นใย จึงสามารถดักกรองอนุภาคได้ดีขึ้น ถึงแม้ว่าอนุภาคจะมีเปอร์เซ็นต์ที่ไม่มีประจุสูง แต่ประสิทธิภาพการกรองก็ไม่ได้ลดลงมากนัก ส่วนผ้าทอหรือผ้าไมโครไฟเบอร์โดยส่วนใหญ่จะไม่มีประจุไฟฟ้าสถิตบนเส้นใยหรือถ้ามีก็อาจจะน้อย จึงทำให้อนุภาคที่ไม่มีประจุสามารถผ่านทะลุได้ง่ายเพราะไม่มีแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตระหว่างอนุภาคกับเส้นใย ผ้าสำหรับความแตกต่างของประสิทธิภาพการกรองอนุภาค NaCl และ PSL สำหรับผ้าทอและแผ่นกรองนอนวูฟเวนแสดงในตารางที่ 5 และ 6

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของผ้าทอที่มีประจุไม่สมดุลและประจุสมดุล

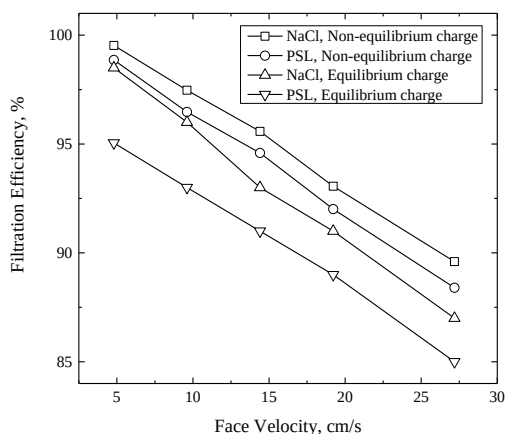
ชนิดของอนุภาค	ประจุไม่สมดุล			ประจุสมดุล			ความแตกต่าง
	ก่อนผ่าน	หลังผ่าน	ประสิทธิภาพ (%)	ก่อนผ่าน	หลังผ่าน	ประสิทธิภาพ (%)	
NaCl	1.16×10 ⁶	9.00×10 ⁵	22.13	1.15×10 ⁶	9.22×10 ⁵	20.02	2.11
PSL	3.82×10 ⁵	2.49×10 ⁵	34.89	3.89×10 ⁵	2.84×10 ⁵	27.05	7.84
ความแตกต่างระหว่าง NaCl และ PSL			12.75	ความแตกต่างระหว่าง NaCl และ PSL			7.03

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของแผ่นกรองนอนวูฟเวนที่มีประจุที่ไม่สมดุลและประจุที่สมดุล

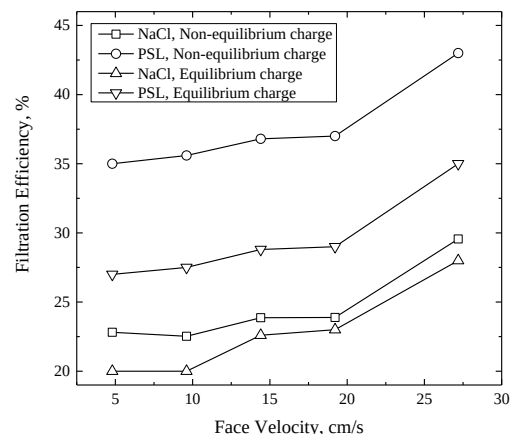
ชนิดของอนุภาค	ประจุไม่สมดุล			ประจุสมดุล			ความแตกต่าง
	ก่อนผ่าน	หลังผ่าน	ประสิทธิภาพ (%)	ก่อนผ่าน	หลังผ่าน	ประสิทธิภาพ (%)	
NaCl	1.12×10 ⁶	1.04×10 ⁴	99.07	1.13×10 ⁶	1.69×10 ⁴	98.50	0.57
PSL	3.84×10 ⁵	4.39×10 ³	98.86	3.89×10 ⁵	1.85×10 ⁴	95.24	3.61
ความแตกต่างระหว่าง NaCl และ PSL			0.22	ความแตกต่างระหว่าง NaCl และ PSL			3.25

พบว่าผ้าทอจะให้ความแตกต่างของประสิทธิภาพการกรองอนุภาคระหว่างชนิด NaCl และ PSL ก่อนข้างสูงเมื่อประจุไม่สมดุลและประจุสมดุลคือ 12.75 % และ 7.03 % ตามลำดับ ส่วนแผ่นกรองนอนวูฟเวนประสิทธิภาพการกรองอนุภาคระหว่างชนิด NaCl และ PSL จะมีความต่างกันในการเกิดประจุไม่สมดุลและประจุสมดุลคือ 0.22 % และ 3.25 % ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการกรองที่แตกต่างกันของอนุภาคทั้ง 2 ชนิดนี้กับผ้าทอและแผ่นกรองนอนวูฟเวนเนื่องจากจำนวนประจุเริ่มต้นและการสมดุลประจุของอนุภาค 2 ชนิดนี้ต่างกัน และความแตกต่างของค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของอนุภาค (Dielectric constant) (Hinds, 1999) จึงทำให้มีการกระจายประจุที่ต่างกัน รวมถึงปัจจัยที่เกิดจากรูปร่างของอนุภาค (Particle shape) ด้วย โดยที่อนุภาค PSL จะเป็นอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ที่เป็นรูปทรงกลม (Sphere) ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลมจะมีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ฉายภาพทรงกลมเทียบเท่า (Equivalent sphere projected area diameter) ส่วนอนุภาค NaCl จะเป็นอนุภาคเกล็ดมีลักษณะเป็นผลึกไม่เป็นรูปทรงกลม (Non-sphere)

ซึ่งอนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลมจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ฉายภาพทรงกลมเทียบเท่า โดยเมื่อเทียบขนาดทรงกลมปริมาตรเทียบเท่า (Equivalent volume sphere) ระหว่างอนุภาคที่ไม่เป็นทรงกลมและอนุภาคทรงกลมจะมีค่าที่ต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยของรูปร่างของอนุภาค (Shape factor) โดยที่อนุภาคที่มีลักษณะไม่เป็นทรงกลมจะมีผลกระทบกับแรงเสียดลาก (Drag force) และจำนวนประจุต่ออนุภาค (Number of charge per particle) ในพื้นที่ผิวที่ต่างกัน ส่งผลให้ความสามารถเคลื่อนตัวเชิงอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic motion) และความสามารถเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า น้อยกว่าอนุภาคที่เป็นทรงกลม มีผลต่อกลไกกระทบและกลไกการสกัดกั้นระหว่างอนุภาคกับเส้นใยของแผ่นกรอง (Hinds, 1999) ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคทั้ง 2 ชนิดนี้แตกต่างกัน ภาพที่ 8 แสดงประสิทธิภาพการกรองอนุภาค 0.3 μm ทั้งแบบ NaCl และ PSL เทียบกับความเร็วด้านหน้าช่วง 5 ถึง 27 cm/s ของผ้าทอและแผ่นกรองนอนวูฟเวนที่สมดุลและไม่สมดุลประจุ



(ก) แผ่นกรองนอนวูฟเวน



(ข) ผ้าทอ

ภาพที่ 8 ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคแบบ NaCl และ PSL เทียบกับความเร็วด้านหน้า

จากภาพในกรณีแผ่นกรองนอนวูฟเวนเมื่อความเร็วด้านหน้าสูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคลดลง อนุภาค PSL จะทะลุผ่านได้ดีกว่าอนุภาค NaCl และอนุภาคที่มีประจุสมดุลจะทะลุผ่านได้ดีกว่าอนุภาคที่มีประจุไม่สมดุล โดยความเร็วสูงสุดที่ 27 cm/s ประสิทธิภาพการกรองของอนุภาค 0.3 μm จะเท่ากับ 89.6%, 88.4%, 87.3% และ 85.0% สำหรับอนุภาค NaCl และ PSL ที่ประจุสมดุลและไม่สมดุล ตามลำดับ สำหรับผ้าทอเมื่อความเร็วด้านหน้าสูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคสูงขึ้น โดยความเร็วด้านหน้าสูงสุดที่ 27 cm/s ประสิทธิภาพการกรองของอนุภาค 0.3 μm จะเท่ากับ 29.5%, 43.1%, 28.3% และ 35.2% สำหรับอนุภาค NaCl และ PSL ที่ประจุสมดุลและไม่สมดุล ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพการกรองของวัสดุกรองโดยทั่วไปแล้วจะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค คุณสมบัติของวัสดุตัวกรอง ความเร็วด้านหน้า ลักษณะการทอ ความพรุน (Porosity) ขนาดรูพรุน (Pore size) และความหนาของวัสดุผ้าเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกรองอนุภาค โดยวัสดุผ้าที่มีความพรุนต่ำสุดและขนาดรูพรุนเล็กจะให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคสูง วัสดุผ้าที่มีความพรุนสูงสุดและขนาดรูพรุนใหญ่จะให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคต่ำ และวัสดุผ้าที่มีความพรุนสูงและขนาดรูพรุนเล็กจะให้ค่าด้านทานการไหลของอากาศสูง ปกติแล้ววัสดุผ้าจะมีความพรุนต่ำและขนาดรูพรุนที่ใหญ่ (มากกว่า 10 μm หรือเท่ากับ 1000 μm) ซึ่งใหญ่กว่าอนุภาคขนาด 0.3 μm ที่ใช้ในการทดสอบในการศึกษานี้ จึงทำให้อนุภาคขนาด 0.3 μm ทะลุผ่านได้ง่ายโดยมีการแพร่กระจายและการสกัดกั้นกับเส้นใยของวัสดุน้อย สำหรับหน้ากาก N95 มีความพรุนสูงและขนาดรูพรุนเล็ก (Yim *et al.*, 2020) จึงให้ประสิทธิภาพการกรองที่สูงกว่า จากสมการที่ 2 จะสามารถอธิบายถึงผลของความหนาของวัสดุกรองต่อประสิทธิภาพการกรอง

อนุภาคคือความหนาของวัสดุผ้าจะเป็นฟังก์ชันของประสิทธิภาพการกรองอนุภาค โดยวัสดุกรองที่มีความหนาจะสามารถกรองอนุภาคได้ดีกว่าวัสดุกรองที่มีความบางกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการศึกษานี้ โดยผ้าไมโครไฟเบอร์มีความหนา 3.41 mm และหน้ากาก N95 มีความหนา 3.5 mm หน้ากาก N95 ให้ประสิทธิภาพการกรองที่สูงกว่าผ้าไมโครไฟเบอร์ สำหรับผลของความเร็วด้านหน้านั้นจะมีผลต่อประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขนาด 0.3 μm ในกรณีของวัสดุผ้าไมโครไฟเบอร์ที่มีความพรุนต่ำ ขนาดรูพรุนใหญ่และมีลักษณะการจัดวางเส้นใยแบบตาข่ายมีการปะทะกันระหว่างอนุภาคกับเส้นใยทิศทางเดียวคือด้านผิวข้างของเส้นใยดังรูปที่ 3 เมื่อความเร็วด้านหน้าสูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขนาด 0.3 μm สูงขึ้น เนื่องจากเมื่อความเร็วด้านหน้าสูงขึ้นจะส่งผลให้มีโมเมนตัม (Momentum) หรือแรงเฉื่อยสูงขึ้นตาม จึงสามารถดักกรองอนุภาคด้วยกลไกการสกัดกั้นอนุภาคกับเส้นใยของวัสดุผ้าได้ดีขึ้นตาม ส่วนในกรณีของหน้ากาก N95 มีความพรุนสูง ขนาดรูพรุนเล็กและมีลักษณะการจัดวางเส้นใยแบบที่ไม่เป็นระเบียบมีการปะทะกันระหว่างอนุภาคกับเส้นใยหลายทิศทาง เมื่อความเร็วด้านหน้าสูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคขนาด 0.3 μm ลดลงเนื่องจากเมื่อความเร็วด้านหน้าสูงขึ้นจะส่งผลให้มีโมเมนตัมหรือแรงเฉื่อยสูง จึงทำให้อนุภาคสามารถผ่านทะลุได้ง่ายเนื่องจากอนุภาคสามารถเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างเส้นใยที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบได้ง่ายหลายทิศทาง ที่ได้อธิบายไว้ในทฤษฎีการกรองข้างต้น ซึ่งมาตรฐาน ASTM F2100-19e1 จะกำหนดความเร็วด้านหน้าในช่วง 0.5 ถึง 25 cm/s ตามมาตรฐาน (ASTM International, 2019) ในส่วนของผลประจุไฟฟ้าสถิตในวัสดุกรองหน้ากาก N95 จะมีไฟฟ้าสถิตหรือประจุไฟฟ้าที่เส้นใยจึงทำให้ดักกรองอนุภาคขนาดเล็กกว่า

0.3 μm ได้ดีกว่าวัสดุผ้าที่เกิดผลไฟฟ้าสถิตน้อยกว่า (Hinds, 1999) โดยไฟฟ้าสถิตบนเส้นใยจะช่วยเสริมประสิทธิภาพการกรองด้วยแรงดึงดูดและผลักทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ระหว่างอนุภาคและเส้นใยจึงให้สามารถดักกรองอนุภาคขนาดเล็กกว่า 0.3 μm ได้ดีขึ้น

สรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอผลของประจุสมมูลของอนุภาคและความเร็วด้านหน้าที่มีต่อประสิทธิภาพการกรองของอนุภาคโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และอนุภาคโพลิสไตรีนลาเท็กซ์ (PSL) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 ไมครอน กับแผ่นกรองนอนวูฟเวนจากวัสดุกรองหน้ากาก N95 และแผ่นผ้าไมโครไฟเบอร์จากผ้าทอ ในการทดสอบนี้ได้กำหนดอัตราการไหลในช่วงประมาณ 6 ถึง 28.3 L/min สอดคล้องกับความเร็วด้านหน้าในช่วงประมาณ 5 ถึง 27 cm/s ตัวทำให้เป็นกลางและเครื่องคัดแยกขนาดแบบไฟฟ้าสถิตร่วมถูกใช้เพื่อคัดแยกขนาดอนุภาคละอองลอยและเครื่องนับอนุภาคถูกใช้สำหรับการวัดความเข้มข้นจำนวนของอนุภาคที่ก่อนและหลังผ่านวัสดุตัวอย่าง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผ้าทอจะได้ประสิทธิภาพการกรองของอนุภาค NaCl ประมาณ 22.13 % และ 20.02 % เมื่อประจุไม่สมดุลและประจุสมดุล ตามลำดับ และแผ่นกรองนอนวูฟเวนจากวัสดุกรองหน้ากาก N95 จะได้ประสิทธิภาพการกรองของอนุภาค NaCl ประมาณ 99.07 % และ 98.50 % เมื่อประจุไม่สมดุลและประจุสมดุล ตามลำดับ สำหรับอนุภาค PSL ผ้าทอจะได้ประสิทธิภาพการกรองของอนุภาค PSL ประมาณ 34.89 % และ 27.05 % เมื่อประจุไม่สมดุลและประจุสมดุล ตามลำดับ และสำหรับแผ่นกรองนอนวูฟเวนจากวัสดุกรองหน้ากาก N95 จะได้ประสิทธิภาพการกรองของอนุภาค PSL ประมาณ 98.86 % และ 95.24 % เมื่อประจุไม่สมดุล

และประจุสมดุล ตามลำดับ ความแตกต่างของประสิทธิภาพการกรองอนุภาค NaCl และ PSL สำหรับแผ่นกรองนอนวูฟเวนให้ความแตกต่างเล็กน้อยคือ 0.22 % และ 3.25 % เมื่อประจุไม่สมดุลและประจุสมดุล ตามลำดับ ส่วนผ้าทอจะให้ความแตกต่างค่อนข้างสูงคือ 12.75 % และ 7.03 % เมื่อประจุไม่สมดุลและประจุสมดุล ตามลำดับ จากผลการทดลองยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วด้านหน้าส่งผลให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของผ้าทอเพิ่มขึ้น ส่วนแผ่นกรองนอนวูฟเวนประสิทธิภาพการกรองอนุภาคลดลงตามการเพิ่มของความเร็วด้านหน้า

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อีโอเพื่ออุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ในการทดสอบทั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- ASTM International. 2017. **Standard Test Method for Determining the Initial Efficiency of Materials Used in Medical Face Masks to Penetration by Particulates Using Latex Spheres (ASTM F2299/F2299M-03)**. Available Source: <https://www.astm.org/Standards/F2299.htm>, October 15, 2020.
- ASTM International. 2019. **Standard Specification for Performance of Materials Used in Medical Face Masks (ASTM F2100-19e1)**. Available Source: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/F2100-19E1.htm>, October 15, 2020.

- Aydin, O., Emon, B., Cheng, S., Hong, L., Chamorro, L.P. and Saif, M.T.A. 2020. Performance of Fabrics for Home-made Masks Against the Spread of COVID-19 through Droplets: **A Quantitative Mechanistic Study. Extreme Mechanics Letters** 40: 100924.
- Chen, C.C. and Huang, S.H. 1998. The effects of particle charge on the performance of a filtering facepiece. **American Industrial Hygiene Association Journal** 59(4): 227-233.
- Department of Disease Control. 2021. **COVID-19 situation report**. Available Source: <https://covid19.ddc.moph.go.th/>, May 2, 2021. (in Thai)
- Fushimi, A., Hasegawa, S., Takahashi, K., Fujitani, Y., Tanabe, K. and Kobayashi, S. 2008. Atmospheric Fate of Nuclei-mode Particles Estimated from the Number Concentrations and Chemical Composition of Particles Measured at Roadside and Background Sites. **Atmospheric Environment** 42: 949-59.
- Hinds, W.C. 1999. **Aerosol Technology**. John Wiley & Sons, New York.
- Intra, P. and Tippayawong, N. 2009. Progress in unipolar corona discharger designs for airborne particle charging: a literature review. **Journal of Electrostatics** 67(4): 605-615.
- Leung, W.W.F., Hung, C.H. and Yuen, P.T. 2010. Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate. **Separation and Purification technology** 71(1): 30-37.
- Liu, B.Y.H and Pui, D.Y.H. 1974. Equilibrium bipolar charge distribution of aerosols. **Journal of Colloid and Interface Science** 49(2): 305-312.
- Lundgren, D.A. and Whitby, K.T. 1965. Effect of particle electrostatic charge on filtration by fibrous filters. **Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development** 4(4): 345-349.
- O'Dowd, K., Nair, K.M., Forouzandeh, P., Mathew, S., Grant, J., Moran, R., Bartlett, J., Bird, J. and Pillai, S.C. 2020. Face Masks and Respirators in the Fight Against the COVID-19 Pandemic: A Review of Current Materials. **Advances and Future Perspectives. Materials** 13: 3363.
- Reineking, A. and Porstendörfer, J. 1986. Measurements of Particle Loss Functions in a Differential Mobility Analyzer (TSI, Model 3071) for Different Flow Rates. **Aerosol Science and Technology** 5: 483-486.
- Rengasamy, S., Eimer, B. and Shaffer, R.E. 2010. Simple Respiratory Protection Evaluation of the Filtration Performance of Cloth Masks and Common Fabric Materials Against 20-1000 nm Size Particles. **The Annals of Occupational Hygiene** 54(7): 789-798.
- Rodrigues, M.V., Barrozo, M.A.S., Gonçalves, J.A.S. and Coury, J.R. 2017. Effect of particle electrostatic charge on aerosol filtration by a fibrous filter. **Powder Technology** 313: 323-331.
- Sanchez, A.L., Hubbard, J.A., Dellinger, J.G. and Servantes, B.L. 2013. Experimental study of electrostatic

- aerosol filtration at moderate filter face velocity. **Aerosol Science and Technology** 47(6): 606-615.
- Sickbert-Bennett, E.E., Samet, J.M., Clapp, P.W., Chen, H., Berntsen, J., Zeman, K.L., Tong, H., Bennett, D.J. and Bennett, W.D. 2020. Filtration Efficiency of Hospital Face Mask Alternatives Available for Use During the COVID-19 Pandemic. **JAMA Internal Medicine** 180(12): 1607-1612.
- Timko, M.T., Yu, Z., Kroll, J., Jayne, J.T., Worsnop, D.R., Miake-Lye, R.C., Onasch, T.B., Liscinsky, D., Kirchstetter, T.W., Destailats, H., Holder, A.L., Smith, J.D. and Wilson, K.R. 2009. Sampling Artifacts from Conductive Silicone Tubing. **Aerosol Science and Technology** 43(9): 855-865.
- Willeke, K. and Baron, P.A. 1993. **Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications.** John Wiley & Sons, New York.
- Xia, T., Bian, Y., Zhang, L. and Chen, C. 2018. Relationship between pressure drop and face velocity for electrospun nanofiber filters. **Energy and Buildings** 158: 987-999.
- Yim, W., Cheng, D., Patel, S., Kou, R., Meng, Y.S. and Jokerst, J.V. 2020. KN95 and N95 Respirators Retain Filtration Efficiency despite a Loss of Dipole Charge during Decontamination. **ACS Applied Materials & Interfaces** 12(49): 54473-54480.

การพัฒนาเว็บเซอร์วิสแผนที่ดินเซรามิกในประเทศไทย โดยประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ Development of Ceramic Clay Map Web Service in Thailand by Applying GIS

อนันตกุล อินทรผดุง *

Anantakul Intarapadung *

Received :2 May 2021, Revised :8 July 2021, Accepted :4 August 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเว็บเซอร์วิสรวบรวมแหล่งดินเซรามิกในประเทศไทยโดยประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ที่สามารถรองรับการแสดงตำแหน่งพื้นที่สัมปทานบนแผนที่กูเกิลแมพ และคำนวณหาขนาดพื้นที่ที่ได้รับสัมปทาน การพัฒนาเว็บเซอร์วิสในงานวิจัยนี้แบ่งออก 3 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) ส่วนจัดเก็บข้อมูลตำแหน่งพื้นที่สัมปทาน (2) ส่วนการนำข้อมูลตำแหน่งละติจูดและลองจิจูดมาแสดงผลขนาดเขตแหล่งดินเซรามิกบนแผนที่กูเกิลแมพ และ (3) ส่วนการเรียกเซอร์วิสจากเว็บแอปพลิเคชันด้วยกัน การออกแบบสถาปัตยกรรมเว็บเซอร์วิสจะประยุกต์สถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์เอ็มวีซี (MVC Architecture) และการพัฒนาเว็บเซอร์วิสในงานวิจัยนี้จะพัฒนาด้วยภาษาจาวาผ่าน SOAP โปรโตคอล และใช้ฐานข้อมูล MySQL ผลลัพธ์การนำเว็บเซอร์วิสลงทะเบียนผ่าน UDDI และติดตั้งใช้งานผ่านเว็บไซต์สมาคมเซรามิกส์ไทยเพื่อรองรับการร้องขอเซอร์วิสจากเว็บแอปพลิเคชันด้วยภาษา WSDL จากกลุ่มตัวอย่างผู้ประกอบการเหมืองแร่ ในภาคใต้และภาคเหนือที่มีการคัดเลือกแบบเจาะจง พบว่าระบบเว็บเซอร์วิสสามารถแสดงประเภทดินเซรามิกและแหล่งดินเซรามิกที่สำรวจได้ในระดับจังหวัด อำเภอ ตำบล สามารถแสดงตำแหน่งพื้นที่ผ่านกูเกิลแมพ และมีการคำนวณพื้นที่ขนาดในระดับ ตารางเมตร หรือจำนวนไร่ และสามารถคำนวณขนาดพื้นที่ได้ตรงกับผลการลงพื้นที่สำรวจจริงจากผู้ประกอบการเหมืองแร่ จำนวน 5 แห่งในจังหวัดระนอง และลำปาง นอกจากนี้ระบบยังสามารถแสดงผลจำนวนสำรองดินเซรามิกที่ได้จับเก็บไว้ กรณีพื้นที่มีการยกเลิกสัมปทานไปแล้ว

คำสำคัญ: ดินเซรามิก, พื้นที่สัมปทาน, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์, เว็บแมพเซอร์วิส, สถาปัตยกรรมเอ็มวีซี

หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพมหานคร 10220

Program in Technology Management, Faculty of Industrial Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok 10220, Thailand.

* Corresponding author, e-mail: anantakul@pnru.ac.th Tel: 08 9813 6171

ABSTRACT

The objective of this research was to develop a web service to collect ceramic clay in Thailand by applying the Geographic Information Systems (GIS) that can support concession area location on Google Map and calculate the area size that had web service development concessions. This research was divided into three main parts: (1) data storage section for concession area location, (2) latitude and longitude location data display for ceramic clay area size on Google Map, and (3) service call section from web applications. Web service architecture design was applied to MVC Architecture. Web service development in this research was developed in Java through SOAP protocol and using MySQL database for storing ceramic ground positions. Web service implementation results were registered via UDDI and installed through the Thai Ceramics Association website in order to support requests for service from web applications in WSDL languages. From the mining operators in the south and north with purposive sampling, it was found that the web service system was able to show the types and sources of ceramic clay surveyed at the provincial, district, and sub-district levels which were able to show the location of the area through Google Map and calculate the area size in square meters or *rai*. The area size calculated from the web service and the field survey at five mining sites of Ranong and Lampang was found precisely the same. It is also possible to display the number of ceramic clay reserves that have been captured in the event of a concession revocation.

Key words: ceramic clay, concession area, GIS, MVC architecture, web map services

INTRODUCTION

Ceramic is clay pottery made mostly of ball clay, a lump of clay formed by the precipitation of kaolin, which is made up of kaolinite. The chemical component comprising approximately 40-60% silica, 30% alumina, and about 10% of crystallized water and organic matter makes the soil extremely fine (The Department of Science Service, 2021). This clay is tough, when dry or calcined. It has high strength, and after firing, it becomes white or cream (Bazina *et al.*, 2014). Therefore, ceramic entrepreneurs use ball clay to integrate the crockery production process as an indispensable material. Currently, there are 638 registered ceramic factories in Thailand: 275 plants in the north, 273 in the central, 42 in the east, 23 in the northeast, and 25 in the south (Information and Communication Technology Center, Department of Industrial Works, 2021). In Lampang province alone, there are over 200 ceramic factories (Lampang Ceramic Association, 2021) including these well-known ones: Indra Ceramic Factory, Silp Nakhon Factory, and Lampang Khoon Ceramic Factory. In Ratchaburi province, there are 58 ceramic factories with these

large-scaled producers: Crown Ceramic Factory, Thao Hong Thai Factory, and Rattanakosin 2 Factory (Ratchaburi Ceramic Association, 2021). The clays for producing ceramics are in Ranong, Lampang, Ratchaburi, Nonthaburi, Nakhon Ratchasima provinces. (Department of Mineral Resources, 2018).

The problem is that several of the government-allowed ceramic clays have run out. According to the Department's survey, various mineral deposits were identified only by specifying the location and length of the concession, and the area size could not be mentioned in the concession document, so the size and location of the area could not be determined clearly, which is difficult to explore and manage in the ceramic industry mineral clusters (Department of Mineral Resources, 2018). Therefore, to make the ceramic clay mineral resources more manageable, this research uses latitude and longitude coordinates collected in the document to show the map size and determine the area size through the Geographic Information Systems (GIS) to support the management of mineral resources, ceramic industry and mine operators relevant agencies in both the

public and private sectors or the general public can know the sources of ceramic clay. Google Map is well known as the map operator that many software developers can use it via Google API without a fee. The users do not need to install map programs.

MATERIALS AND METHODS

Web Service

Web Service is a service between web applications that can work together freely without being attached to the platform

with the exchange of information through the SOAP protocol or RESTful protocol (Rodriguez, 2015) to help increase service efficiency, such as a secure web service for electronic tuition payments (AlHawari and Mohammad, 2020). The behavior of the web service system serves requests from clients and client responses through the communication protocol HTTP in the XML file format, and a web service consists of 3 parts: (1) Service Consumer, (2) Service Provider, and (3) Service Registry as shown in Figure 1.

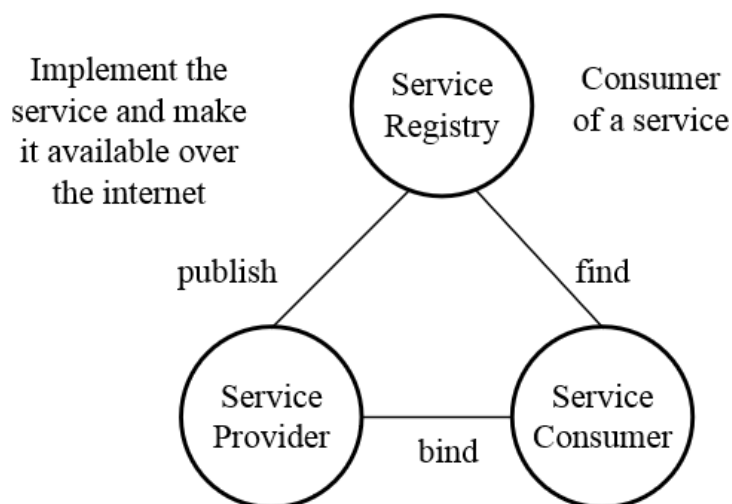


Figure 1 Web service Architecture (AI-Shargabi, 2020)

From Figure 1, The service running process starts with the service consumer requesting service that has been registered (UDDI Register). When a service is found, it will be executed by the service provider. The WSDL language is the language used to describe message communication between web services in SOAP messages (The Apache Software Foundation, 2018). When using the service, the service consumers must utilize WSDL files, indicating details of receiving-sending data, to install in the targeted software, that uses the service. Components of the SOAP document are the structure of the

XML language. It consists of 3 parts: (1) part of identifying the requester (SOAP envelop), (2) the SOAP header, and (3) the part used to call the service, including the parameters passing between the services (SOAP body) such as a SOAP protocol for communication between service requesters and providers of currency exchange rates by as for SOAP request sending the value of Hong Kong 1000 HKD. When the service calculates the exchange rate, it will reply to the SOAP response reply to the Thai currency at 4,250 baht, as shown in Figure 2.

SOAP Request

```

<?xml version = "1.0" encoding = "UTF-8">
<S: Envelope xmlns: S= "http:// schemas.">
  <SOAP-ENV: Header />
  <S: Body>
    <ns2: exchange xmlns: ns2= http://ws/>
      <hkd> 100.00 </hkd>
    </ns2: exchangeRequest>
  </S: Body>
</S: Envelope>

```

SOAP Response

```

<?xml version = "1.0" encoding = "UTF-8">
<S: Envelope xmlns: S= "http:// schemas.">
  <SOAP-ENV: Header />
  <S: Body>
    <ns2: exchange xmlns: ns2= http://ws/>
      <return> 4250.00 </return>
    </ns2: exchangeResponse>
  </S: Body>
</S: Envelope>

```

Figure 2 Structure of SOAP protocol**Web Service Architecture Design**

Web service architecture design integrated ceramic clay sources in this research with applications of web services and GIS can be divided into two software components: (1) This web service section supported the location of the land concession area, and (2) the ceramic land area size display section. They consisted of a part of the area display

through Google Maps and a portion of the area size calculation at each concession point. The development of a Ceramic Clay Map WS in this research in Java to support service consumption between web applications together via SOAP protocol, with WSDL language as the language used to describe the form of communication between web applications, as shown in Figure 3.

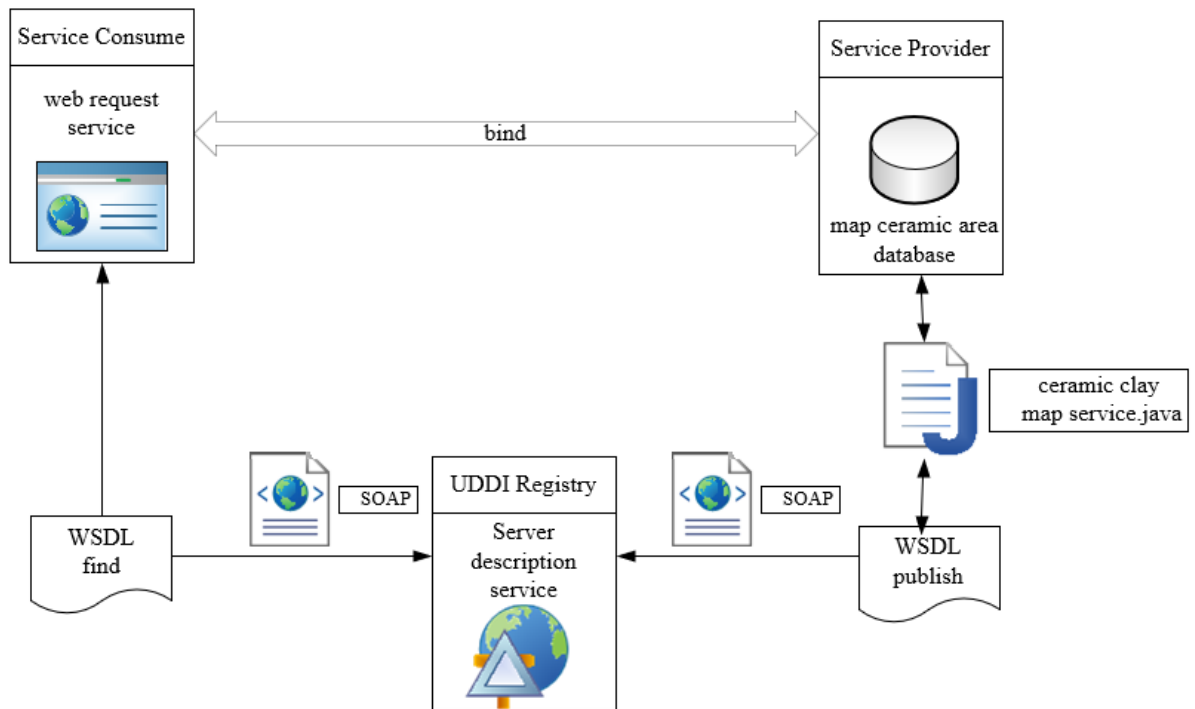


Figure 3 Web service developing

Software architecture design of a Ceramic Clay Map Web Service in Thailand in this research applied MVC Architecture. It consisted of a MapService package that stored the geographic coordinate system of the ceramic land concession number, and

the MapServiceWS package that displayed the results of the ceramic territories on the Google Map by extracting data from the MySQL database system, as shown in Figure 4.

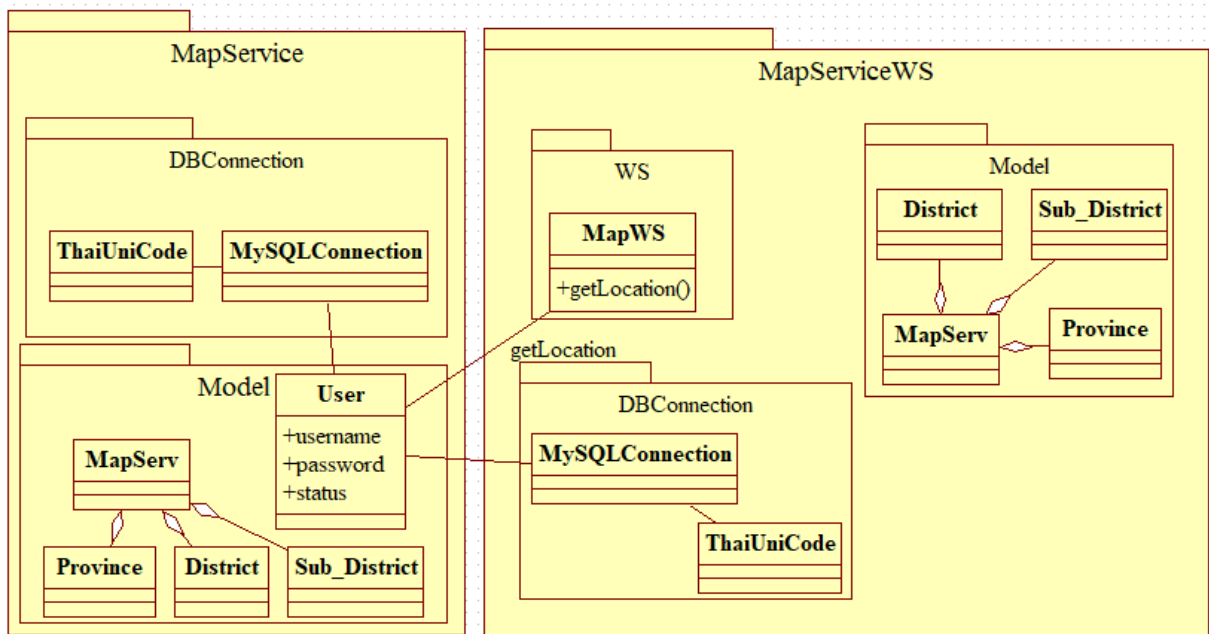


Figure 4 Web service architecture collecting the sources of clay and ceramics in Thailand

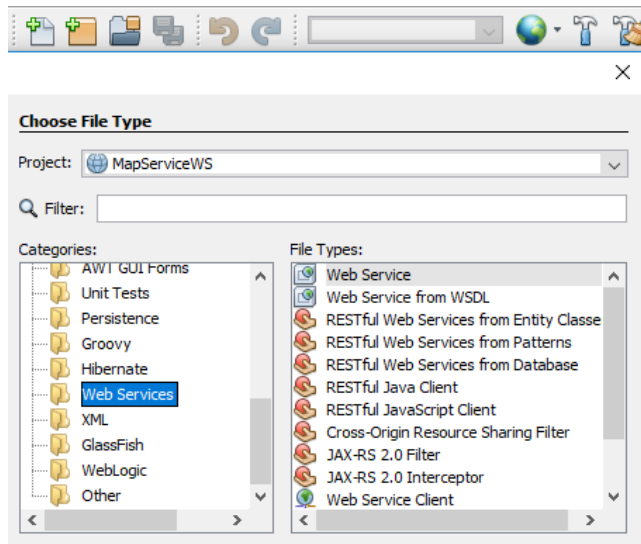
The web service architecture components are shown in Figure 4. The two packages were designed according to the MVC pattern, which

consisted of models that stored ceramic resources: province, district, sub-district, ceramic clay type, latitude, and longitude.

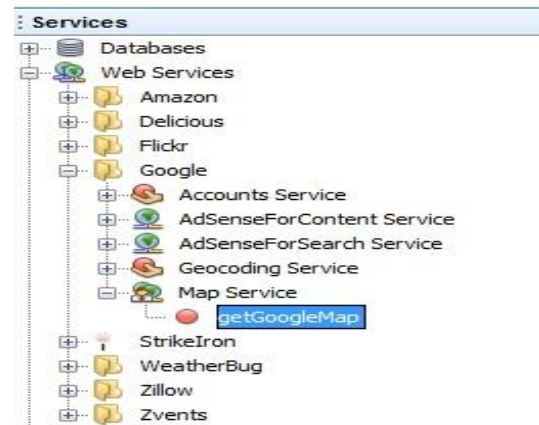
The view served to display the results through the web page window: results, area size, a land source on Google map, detailed information, number of rai or square meters, including reserve ceramic clay. The control was responsible for calculating the size of each concession area, receiving data from the web application, and storing it in a database such as location data, latitude, and longitude, etc.

Web Service Architecture Implementation

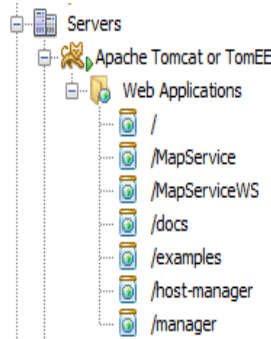
Developing and testing web services with NetBeans (The Apache Software Foundation, 2018). The service was developed to support the subordinate, including getLocation, getSize, and getImage service, as shown in Figure 5.



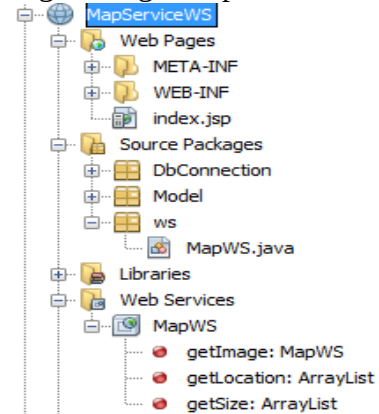
(a) Netbean IDE 8.2



(b) Using a Google map in the web service



(c) Connecting the database via Tomcat sever



(d) Service distribution part

Figure 5 Processing the Web service development on GIS

From Figure 5 (a) Components of the NetBeans IDE 8.2. used to develop web services in this research in Java Figure 5 (b) is a Google Map plug-in that can be run through NetBeans. Figure 5 (c) is testing web services through Apache Tomcat, and Figure 5 (d) is a component of the MapWS that has been developed.

It will consist of packages to store the class files for installing the web service and call the web service. In the instruction

set in Table 1. Line 1 indicates the location of the web service with a @WebServicePath prefix mark to provide specific access to the MapWS class and call the getLocation method in line 5 with a @WebMethod prefix mark. This method will retrieve the geographic coordinate system in the MySQL database system to send back to the requester, as shown in Table 1.

Table 1 Web service instruction set, MapWS class

1.	@WebService(serviceName = "MapWS")
2.	public class MapWS {
3.	private String lat = "";
4.	private String lng = "";
5.	@WebMethod(operationName = "getLocation")
6.	public ArrayList<Model.MapServ> getLocation(@WebParam(name = "province")) {
7.	MysqlConn mysqlConn = new MysqlConn();
8.	ThaiUnicode thaiUnicode = new ThaiUnicode();
9.	String cond = "";
10.	ArrayList<Model.MapServ> maps = new ArrayList<Model.MapServ>();
11.	ResultSet rs;
12.	}

The part of sending a message to each other will be sent in the form of a SOAP message consisting of Envelop,

Header, and Body (Bolz, 2020) as shown in Table 2 of the instruction set.

Table 2 The SOAP message instruction set, the request part**SOAP Request**

```
<?xml<S:Envelope xmlns:SOAP-ENV="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/">
  <SOAP-ENV:Header/>
  <S:Body>
    <ns2: getLocation xmlns:ns2="http://thaiceramicsociety.or.th/ MapServiceWS/MapWS
?xsd=1">
      <itemProvinceID>province_id </itemProvinceID >
      <itemPrvinceTitle>province_title </itemPrvinceTitle >
      <itemDistrictID> district_id </itemDistrictID >
      <itemDistrictTitle> district_title </itemDistrictTitle >
      <itemSubDistrictID> sub_district_id </itemSubDistrictID >
      <itemSubDistrictTitle> sub_district_title </itemSubDistrictTitle >
      <itemLocation> location </itemLocation >
    </ns2: getLocation >
  </S:Body>
</S:Envelope>
```

The statements in Table 2 is the SOAP Request portion of the Service Request Side, which consisted of the SOAP Header and the SOAP Message Body segment, comprising of province code, province name, district

code, district name, district code, the name of the district, and the coordinates of the said area. The response to a request was a set of SOAP response instructions, as shown in Table 3.

Table 3 The SOAP statement, the response part**SOAP Response**

```

<?xml<S:Envelope xmlns:SOAP-ENV="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/">
  <SOAP-ENV:Header/>
  <S:Body>
    <ns2: getLocation xmlns:ns2="http://thaiceramicsociety.or.th/
MapServiceWS/MapWS?xsd=1">
      <return> province_id </return>
      <return> province_title </return>
      <return> district_id </return>
      <return> district_title </return>
      <return> sub_district_id </return>
      <return> sub_district_title </return>
      <return> location </return>
    </ns2:addResponse>
  </S:Body>
</S:Envelope>

```

RESULTS AND DISCUSSION

Results of ceramic clay mab web service in Thailand through GIS are the same as the study by Fauzi (2020). Displaying details of ceramic clay sources stored in the database shows the collected ceramics

sites in Thailand that consists of provinces, districts, sub-districts, clay types, and the number of reserved clay in the area that has expired the concession, as shown in Figure 6.

Area					
Total area size 338,785 square meters or 212 rai, total reserve of clay 9,500,000 tons.					
#	Province	District	Sub-district	Raw Material Types	Reserve of Clay (ton)
(๓)	Tak	Ban Tak	Tak Tok	Ball Clay	0
(๓)	Phayao	Chiang Muan	Ban Mang	Ball Clay	0
(๓)	Ranong	Mueang Ranong	Hat Som Paen	Kaolin	0
(๓)	Ranong	Mueang Ranong	Hat Som Paen	Kaolin	0
(๓)	Ratchaburi	Chom Bueng	Chom Bueng	Kaolin	0
(๓)	Lopburi	Chai Badan	Kut Ta Phet	Kaolin	0
(๓)	Lampang	Ngao	Nagae	Kaolin	0
(๓)	Lampang	Muang Pang	Thung Kwang	Ball Clay	0
(๓)	Lampang	Sopprab	Sopprab	Kaolin and Ball clay	9,500,000

Figure 6 Detail of clay source.

The support part of entering the ceramic clay concession area position through the Add/Edit icon on the left column can specify the ceramic clay type, province, district, sub-district, and the specified geographic

coordination system in the concession or survey number, including the amount of ceramic clay in the case of the reserved area as shown in Figure 7.

Figure 7 Web browser window to add/edit coordinates ceramic clay area size.

The results showed that the area size of ceramic clay was divided into 2 parts, namely No.1. area size display through Google Map (Gong *et al.*, 2015) and No.2. area size calculation in square meters or number of rai (Sayar *et*

al., 2005). In addition, it can display the result of the reserve of ceramic clay that has been collected in the event that the concession has been canceled, as shown in Figure 8.

Figure 8 Web browser window with the land size of the ceramic clay area

For supporting service requested from the web application, the WSDL file displayed on the URL can be imported through <http://thaiceramicsociety.or.th/MapService>

Document that can be installed on the web application that needed service request, as shown in Figure 9.

Web Services

Endpoint	Information
Service Name: {http://ws/}MapWS Port Name: {http://ws/}MapWSPort	Address: http://thaiceramicsociety.or.th:80/MapServiceWS/MapWS WSDL: http://thaiceramicsociety.or.th:80/MapServiceWS/MapWS?wsdl Implementation class: ws.MapWS
Service Name: {http://ws/}TestWs Port Name: {http://ws/}TestWsPort	Address: http://thaiceramicsociety.or.th:80/MapServiceWS/TestWs WSDL: http://thaiceramicsociety.or.th:80/MapServiceWS/TestWs?wsdl Implementation class: ws.TestWs

Figure 9 A web browser window showing WSDL language file sharing.

The results of the collection of ceramic clay were obtained from the researcher's survey and the concession documents of the Department of Mineral Resources and the documents of the Mineral Town Association, Lampang Province. The area size calculated by the web service and the actual field survey by the researcher was the same. The survey was conducted in five mining areas in Ranong and Lampang provinces, as purposive sampling. Those are (1) MRD Co., Ltd., Tambon Hat

Som Paen, Mueang district, Ranong Province (2) Mrd-Ecc Co., Ltd., Tambon Sopprab, Sopprab district, Lampang Province (3) SCG Co., Ltd., Tambon Sopprab, Sopprab district, Lampang Province (4) Phatara Ratana Clays & Minerals and Serirat Mining Co., Ltd., Chae Hom district, Lampang (5) Mueang Chiang Muan Co., Ltd., Tambon Banpu, Mueang Chiang Muan district, Lampang Province. Some selected pictures of the field survey are shown in Figure 10.



Figure 10 The field survey at a mining site of MRD Co., Ltd.

The results of the survey from entrepreneurs who receive the experience

are details of the location data as displayed in Table 4.

Table 4 Samples of ceramic clay sources collected

Province	District	Sub-district	Clay type	Coordinates		Area size Square meters/Rai	Reserve (tonnes)
				Latitude	Longitude		
Ranong	Mueang Ranong	Hat Som Paen	Kaolin	9.9496	98.6882	110,519.75 /69.07	0
				9.9463	98.6876		
				9.9458	98.6854		
				9.9493	98.6825		
Ranong	Mueang Ranong	Hat Som Paen	Kaolin	9.9394	98.6872	167,496.80 /104.69	0
				9.9358	98.6878		
				9.9360	98.6853		
				9.9399	98.6847		
Lam Pang	Sopprab	Na Yang	Kaolin and Ball clay	18.5492	99.5891	Run out of concessions	9,500,000
Lam Pang	Chae Hom	Chae Hom	Kaolin	18.5276	99.5523	60,768.41 / 37.98	
				18.5240	99.5523		
				18.5222	99.5495		

From the sample data in Table 4, the results of the survey of ceramic sources to be provided into the web service system revealed that they could store location, province, district, sub-district, clay type, latitude, and longitude, and area size. In addition, the total ceramic clay reserves were included, for example, Ranong Province. The researcher surveyed 2 areas, namely Mueang Ranong District, and Hat Som Paen Subdistrict which was still operating concessions, and Lampang Province 2 areas, namely Chae Hom District, and Sop Prap District that were exhausted the concession, which was in the process of restoring the clay, so they had a reserve of 9,500,000 tons of ceramic clay.

To use a web map service, the users must insert data via a web ceramic map system by indicating the location of the ceramic clay, either in one latitude and longitude location or more than one location, in the database and transfer it into the Google Map. The obtained data will automatically calculate the size of the area in square meters or *rai* (1 *rai* is equivalent to 1,600 square meters) via the functions of Google Map. The latitude and longitude position derived from the concession numbers the mining concessioners received from the Department of Mineral Resources, reflecting the reliability of the information. The data can also show

reserved ceramic clay in the exhausted concession areas where the concessioners declared to the researcher.

CONCLUSION

The design and development of ceramic clay map web service in this research aimed to collect ceramic clay by applying the MVC architecture to develop, modify, maintain, and design a software architecture that met international standards. The functionality was divided into two parts: the MapService package, the MapServiceWS package, and the secondary web service development emphasizing communication between layers of web applications through SOAP protocol in Java with NetBeans 8.2.

Web service registration and implementation results revealed that WSDL file-sharing was supported by implementing the web application for those who wished to request services from a ceramic clay map web service from this study. The web service collected ceramic clay by applying GIS in research by using latitude and longitude locations stored in a database displaying the area size of ceramic clay via Google Map and calculating the size of the ceramic land area. However, to use the ceramic clay map on Google Map during the development, the developers can register to use the Google Map without any fee. For long-term use, the fee will be

collected by the Google platform rules (Google Maps Platform, 2021).

Using MVC architecture to design web service in this research has advantages which include the separation of operation from service parts, service requests, and the management of a database of ceramic clay locations. Nevertheless, there are complicated issues in dealing with documents on model views and the viewpoints working under the functions at the control component. So, this architecture still cannot completely separate the view from the control parts (Dathan and Ramnath, 2014).

The dissemination of web services in the development of web services and geographic information systems to help assess the raw materials used for the ceramic industry in Thailand can support calls between web applications, web development, and a web service that was registered in the UDDI Registry. The operators using the web services can bring WSDL file from this URL: <http://thaiceramicsociety.or.th:80/MapServiceWS/MapWS?wsdl> and install it on their application. Those potential users are Ceramic Operator Government Agencies, the Thai Ceramics Association Lampang Ceramic Association, the Ratchaburi Ceramic Association Mining Association, the Lampang Industry Office of Space, and Geographic Information Technology (Public Organization), and the Department of Geological Resources for the implementation, and others.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the National Research Council of Thailand (NRCT). Special thanks of gratitude shall be given to these five mining companies: (1) MRD Co., Ltd., (2) Mrd-Ecc Co., Ltd., (3) SCG Co., Ltd., (4) Phatara Ratana Clays & Minerals and Serirat Mining Co., Ltd., and (5) Mueang Chiang Muan Co., Ltd.

REFERENCES

- AlHawari, F. and Mohammad, S.H. 2020. Secure and robust web services for e-payment of tuition fees. **International Journal of Engineering Research and Technology** 13(7): 1795-1801.
- Al-Shargabi, B. 2020. Web service composition in cloud: A fuzzy rule model. **Journal of Recent Advances in Computer Science and Communications (Formerly : Recent Patents on Computer Science)** 13(3): 446-453.
- Bazina, M.M., Ahmata, M.A., Zaidana, N., Ismailb, F.A. and Ahmada, N. 2014. Effect of starch addition on microstructure and strength of ball clay membrane. **Journal Technology (Sciences & Engineering)** 69(9): 117-120.
- Bolz, S. 2020. **Transforming SOAP Messages with XSLT**. Another Random Developer Blog. Available Source: <http://blog.jdevelop.eu/>, February 24, 2021.
- Dathan, B. and Ramnath, S. 2014. **Object-Oriented Analysis, Design and Implementation**. 2nd ed. Press (India) Private Limited. Telengana, India.
- Department of Mineral Resources. 2018. **Mineral Resources Map**. Department of Mineral Resources. Available Source: <http://webeng.dmr.go.th/>, January 5, 2021. (In Thai)
- Fauzi, C. 2020. Implementation of Y-Model GIS web development in inventory of environmental roads, drainage and septic tanks: A study case, pp. 1-6. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, England and Wales.
- Gong, J., Geng, J. and Chen, Z. 2015. Real-time GIS data model and sensor web service platform for environmental data management. **International Journal of Health Geographics** 14(1): 1-13.
- Google Maps Platform. 2021. **Billing overview for Google Maps Platform products**. Google Maps Platform Billing. Available Source: <https://developers.google.com/maps/billing/gmp-billing/>, June 30, 2021.

- Information and Communication Technology Center, Department of Industrial Works. 2021. **Entrepreneurs Ceramic Industry in Thailand**. Available Source: <https://ict.dip.go.th/en/>, June 30, 2021. (In Thai)
- Lampang Ceramic Association. 2021. **Lampang Ceramic Entrepreneur**. Business Registration. Available Source: <https://www.thaifranchisecenter.com/home.php>, July 1, 2021. (In Thai)
- Ratchaburi Ceramic Association. 2021. **Ratchaburi Ceramic Entrepreneur**. Business Registration. Available Source: https://rismep.dip.go.th/organization/organization_detail/141, July 1, 2021. (In Thai)
- Rodriguez, A. 2015. **Security setup for RESTful web services**. IBM. Available Source: <https://developer.ibm.com/technologies/web-development/articles/ws-restful/>, March 15, 2021.
- Sayar, A., Pierce, M. and Fox, G. 2005. Developing GIS visualization web services for geophysical applications. **In Conference: ISPRS 2005 Spatial Data Mining Workshop At: Middle East Technical University**. Ankara, Turkey.
- The Apache Software Foundation. 2018. **Netbean IDE 8.2**. Informer Technologies, Inc. Available Source: <https://netbeans.org>, January 5, 2021.
- The Department of Science Service. 2021. **Ceramic manufacturing proces**. Department of Science Service Ministry of Higher Education Science, Research and Innovation. Available Source: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2542_47_151_p36-40.pdf, July 1, 2021. (In Thai)

ผลของแซนแทนกัมและกระบวนการผลิตต่อการยืดอายุการเก็บรักษา

กาะแม : กาะแมแม่ประคอง จังหวัดพัทลุง

Effect of Xanthan Gum and Processing on Shelf Life Extension of

Karamae: Karamae Maeparkong, Phatthalung

ขนิษฐา พันชุกกลาง * และ อภิชาติ พันชุกกลาง

Khanittha Punchuklang * and Apichart Punchuklang

Received: 14 January 2021, Revised: 4 October 2021, Accepted: 9 November 2021

บทคัดย่อ

กาะแมเป็นขนมไทยที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบหลักจึงมีอายุการเก็บรักษาสั้น 7-14 วัน โดยมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งขึ้นเนื่องจากการคั่วของแป้งและมีกลิ่นหืน ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของแซนแทนกัมร่วมกับกระบวนการผลิตต่อการยืดอายุการเก็บรักษา กาะแม โดยมีการจัดตั้งทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียล 2×3 ในแผนการทดลองแบบสุ่มโดยตลอด ปัจจัยที่ศึกษามี 2 ปัจจัย ได้แก่ วิธีการผลิตกาะแม 2 ระดับ คือ วิธีที่ 1 กวนโดยเติมส่วนผสมที่ละส่วนและไม่ต้มกะทิ (วิธีมาตรฐาน) และวิธีที่ 2 กวนโดยเติมส่วนผสมที่ละส่วนและใช้กะทิต้มกับน้ำตาลก่อนเติมในส่วนผสม และศึกษาปริมาณการเติมแซนแทนกัม 2 ระดับ ที่ร้อยละ 0.25 และ 0.5 ของน้ำหนักแป้ง บรรจุในถุงไนลอนในสภาวะสุญญากาศร่วมกับการใช้สารดูดซับออกซิเจน เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 49 วัน แล้วทำการตรวจสอบคุณลักษณะของกาะแมทุก 7 วัน พบว่าปริมาณความชื้นของกาะแมวิธีมาตรฐานที่ไม่เติมแซนแทนกัมและสารดูดซับออกซิเจนและวิธีมาตรฐานที่ไม่เติมแซนแทนกัมแต่เติมสารดูดซับออกซิเจน มีอัตราการสูญเสียความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว เท่ากับ ร้อยละ 36 และ 32 ตามลำดับ ในขณะที่กาะแมที่เติมแซนแทนกัมมีอัตราการสูญเสียความชื้น เท่ากับ ร้อยละ 4-15 โดยกาะแมวิธีที่สองที่เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.5 มีค่า L^* และค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ($p > 0.05$) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น นอกจากนี้กาะแมวิธีมาตรฐานที่ไม่เติมแซนแทนกัมมีคะแนนความชอบทุกด้านลดลง ($p \leq 0.05$) ในวันที่ 14 ในขณะที่กาะแมที่เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.5 มีคะแนนความชอบลดลงในวันที่ 28 โดยกาะแมวิธีที่สองที่เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.5 มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุด ซึ่งสามารถยืดอายุการเก็บรักษา กาะแม ได้จากเดิม 7 วัน เป็น 28 วัน

คำสำคัญ: กาะแม, แซนแทนกัม, การยืดอายุการเก็บรักษา, สารดูดซับออกซิเจน, กาะแมแม่ประคอง

คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ตำบลเขารูปช้าง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

Faculty of Agricultural Technology, Songkhla Rajabhat University, Khao Roob Chang, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): Khanittha.mu@skru.ac.th

ABSTRACT

Karamae, a Thai traditional dessert, only lasts 7 to 14 days before becoming harder from retrograded and rancid starch. The purpose of this research was to examine the combined effect of xanthan gum (XN) and processing methods on the extension of Karamae's shelf life. Karamae processing was used at two levels in a factorial 2×3 completely randomized design. The first method involved adding each ingredient one at a time while using fresh coconut milk (the standard method), and the second method involved doing the same while using boiled coconut milk sweetened with sugar. Two levels of XN content were studied at 0.25, and 0.5% of starch weight. Karamae was preserved in a nylon bag with vacuum condition and oxygen absorbers at room temperature (30 °C) for 49 days. The characteristics of all samples were determined every 7 days. The results revealed that the moisture loss of Karamae (without XN) with and without oxygen absorber dramatically decreased after a 49-day storage at 32 and 36% whereas the sample containing XN displayed a moisture loss of 4-15%. Moreover, the L* and hardness increased ($p>0.05$) with longer storage times in the second method using 0.5% XN. In addition, after 14 days of storage, the overall preference scores of the standard method processing of Karamae without XN and oxygen absorber significantly reduced ($p\leq0.05$). However, the overall preference scores were lower at 28 days for both methods with 0.5% XN. The findings indicated that the standard method with 0.5% XN showed the highest overall preference scores. As a result, the shelf life of Karamae could be prolonged from 7 days to 28 days of storage time using the combination method of the second method and 0.5% XN.

Key words: Karamae, xanthan gum, shelf life extension, oxygen absorber, Karamae Maeprakong

บทนำ

กอละแมเป็นขนมไทยพื้นบ้านที่ทำจากแป้งข้าวเหนียว กะทิ น้ำตาลปึกที่กวนจนเหนียว ปัจจุบันมีการผลิตในตลาดและมีการจำหน่ายแพร่หลาย โดยมีลักษณะการผลิตเป็นแบบอุตสาหกรรมขนาดย่อมทำการผลิตและจำหน่ายในลักษณะเป็นของฝากหน้าร้าน อย่างไรก็ตามบางร้านมีความต้องการกระจายสินค้าไปยังต่างจังหวัดและมีความต้องการส่งออกไปจำหน่ายยังตลาดต่างประเทศ แต่มีปัญหาเรื่องอายุการเก็บรักษา กอละแมที่มีอายุการเก็บรักษาสั้นประมาณ 7 วัน โดยกอละแมจะมีกลิ่นเหม็นหืนและเนื้อสัมผัสมีลักษณะเปลี่ยนจากลักษณะเนื้อนุ่มเหนียวยืดหยุ่นเปลี่ยนเป็นเนื้อรวนแห้งและแข็ง (Attabhanyo *et al.*,

2017) ซึ่งเป็นดัชนีสำคัญในการบ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์กอละแม

การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช (starch retrogradation) หรือการคืนตัวของแป้งเป็นปรากฏการณ์ที่ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ ซึ่งนำไปสู่การเกิดผลึกบางส่วนในองค์ประกอบของสตาร์ชภายหลังการเกิดกระบวนการเจลาติไนซ์เซชัน การเกิดรีโทรเกรเดชันมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การยอมรับของผู้บริโภค และอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เมื่อเกิดรีโทรเกรเดชันทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์และการยอมรับของผู้บริโภคลดต่ำลง เช่น ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมอบ และผลิตภัณฑ์อาหารอื่นที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ

(Wang *et al.*, 2015) ผลิตภัณฑ์สูญเสียความสามารถในการอุ้มน้ำ (Limsangouan *et al.*, 2018) เกิดการสูญเสียความชื้นทำให้เนื้อแป้งแข็งกระด้าง โดยสาเหตุเกิดจากการคั่นตัวของแป้ง ซึ่งการคั่นตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ปริมาณ และขนาดของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน โดยเกิดการจับกันใหม่ของสายอะมิโลสซึ่งเป็นโมเลกุลสายสั้นภายในเม็ดแป้งภายหลังเม็ดแป้งแตกออกหรือเกิดเจลาติไนซ์เซชัน เกิดเป็นร่างแหและมีการบีบน้ำออกจากโครงข่ายเรียกว่าการสูญเสียน้ำ (syneresis) ซึ่งการจับตัวกันของอะมิโลสจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการเกิดรีโทรเกรเดชันและเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นก็จะเกิดรีโทรเกรเดชันเนื่องจากการจับตัวกันของสายอะมิโลเพกทิน (Whistler *et al.*, 1984; Sobolewska-Zielinska and Fortuna, 2010) วิธีที่สามารถป้องกันการเกิดรีโทรเกรเดชันมีหลายวิธี เช่น การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในที่ที่มีความชื้นสูงหรือการควบคุมความชื้นในการเก็บรักษาแต่ยังมีโอกาสในการเกิดรีโทรเกรเดชันในระยะยาวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้ การเติมสารอิมัลซิไฟเออร์และสารลดแรงตึงผิว เช่น กลีเซอรอล โมโนสเตียเรท โมโนกลีเซอไรด์ เป็นต้น ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารช่วยให้เนื้อนุ่ม และยังสามารถเกิดการจับตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอะมิโลสในองค์ประกอบของสตาร์ชได้ซึ่งสามารถป้องกันการแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์ได้ (Seeta *et al.*, 2016) นอกจากนี้การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อป้องกันการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช ในระหว่างการเก็บรักษาโดยการปรับปรุงคุณสมบัติการไหลและลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร (Seeta *et al.*, 2016) ซึ่งจากการศึกษาผลของโพลิแซ็กคาไรด์

ต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชแป้งข้าวสาลี หลังจากเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 วัน พบว่าการเติมโพลิแซ็กคาไรด์และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 5 สามารถป้องกันการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลแป้งข้าวสาลีได้โดยมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของตัวอย่างน้อยกว่าเจลที่ไม่เติมโพลิแซ็กคาไรด์แปดเท่าและสองเท่าตามลำดับ (Zhou *et al.*, 2008) นอกจากนี้จากการศึกษา พบว่าการเติมแซนแทนกัมร้อยละ 5 สามารถยับยั้งการเกิดรีโทรเกรเดชันของเจลสตาร์ชมันสำปะหลังที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสได้ในระยะยาว (Pongsawatmanit *et al.*, 2013) นอกจากนี้ปัจจัยด้านความแข็งของผลิตภัณฑ์ กาละเมที่เป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ กาละเมแล้ว ปัจจัยด้านกลิ่นหืนซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างน้ำมันและออกซิเจนในระหว่างการเก็บรักษาและการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ยังเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของกาละเม โดยการใช้ระบบการบรรจุที่สามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการเจริญของจุลินทรีย์ เช่น การบรรจุในสภาวะที่เหมาะสมในบรรจุภัณฑ์ที่ปรับสภาพบรรยากาศ การบรรจุในภาวะสุญญากาศร่วมกับสารดูดซับออกซิเจน เพื่อชะลอการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ กาละเม นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่าวิธีการกวนกาละเมมีผลต่อความแข็งของกาละเมในระหว่างการเก็บรักษาซึ่งพบว่าวิธีการกวนกาละเมโดยการเติมน้ำกะทิก่อนแล้วนำมาผสมกับส่วนผสมน้ำตาลทราย จะทำให้ไขมันแตกตัวทำให้โปรตีนที่มีอยู่ในกะทิเกิดการตกตะกอนและทำให้ไขมันอยู่ในรูปที่สามารถจับกับโมเลกุลของอะมิโลสได้ดีทำให้ลดการเกิดการคั่นตัวของแป้งและการเกิดการคั่นตัวของแป้งจะลดลงหากไขมันที่เดิมมีกรดไขมันขนาดเล็ก โดยกาละเมมีค่าความแข็งน้อยกว่ากาละเมที่กวนโดยนำส่วนผสมทั้งหมดมาผสมรวมกันก่อนนำไปกวน (Attabhanyo *et al.*, 2017)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาอายุการเก็บรักษากาละแมโดยการศึกษาลักษณะแทนกัน กระบวนการผลิต และสภาวะการเก็บรักษาในถุงไนลอนในสภาวะสุญญากาศร่วมกับการใช้สารดูดซับออกซิเจน ต่อคุณลักษณะทางเคมี กายภาพ และคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของกาละแม โดยใช้สูตรและวิธีการผลิตของกาละแมประคองเป็นวิธีมาตรฐาน ทั้งนี้เพื่อให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษากาละแมแม่ประคอง จังหวัดพัทลุงให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้นานมากกว่า 7 วัน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงการยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีแป้งหรือสตร้าเป็นองค์ประกอบได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การผลิตกาละแมสูตรมาตรฐาน

ตารางที่ 1 ส่วนผสมกาละแมสูตรมาตรฐาน

ส่วนผสม	ปริมาณ (ร้อยละ)
น้ำกะทิ (หัวกะทิ)	38.74
น้ำตาลทราย	27.67
แป้งข้าวเหนียว	22.14
น้ำตาลปีบ	11.07
เกลือ	0.38

ที่มา: Dechprarom (2018)

ทำการเก็บรักษากาละแมสูตรมาตรฐานที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 49 วัน โดยการบรรจุกาละแมที่ห่อเป็นรูปสามเหลี่ยมใส่ในบรรจุภัณฑ์ถุงร้อนไนลอนหรือถุง PP (Polypropylene; PP) ทำการสุ่มตรวจคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์สูตรมาตรฐานทุกๆ 7 วัน ดังนี้

- วัดปริมาณความชื้นของกาละแม (AOAC, 2000)

ทำการเตรียมส่วนผสมตามตารางที่ 1 แล้วทำการผลิตกาละแมสูตรมาตรฐานตามวิธีของกาละแมแม่ประคอง (ภาพที่ 1) โดยการนำน้ำตาลทรายผสมกับน้ำกะทิคนจนน้ำตาลทรายละลายแล้วกรองใส่ในกระทะกวน เติมเกลือ และน้ำตาลปีบ กวนโดยใช้ไฟแรงเป็นเวลา 35 นาที ได้ลักษณะของส่วนผสมที่เป็นสีน้ำตาลไหม้ (คาราเมล) แล้วเติมแป้งข้าวเหนียวที่ไม่เตรียมไว้แล้ว กวนโดยใช้ไฟปานกลางเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้กาละแมที่มีลักษณะเหนียว ใส และไม่ติดกระทะ แล้วนำกาละแมมาใส่ถาดที่รองด้วยถุงพลาสติกทาเคลือบด้วยน้ำมันเล็กน้อย พักให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้กาละแมเซตตัว แล้วตัดเป็นชิ้นและห่อเป็นรูปสามเหลี่ยมด้วยถุงพลาสติกใสชนิดโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) ได้ผลิตภัณฑ์กาละแม

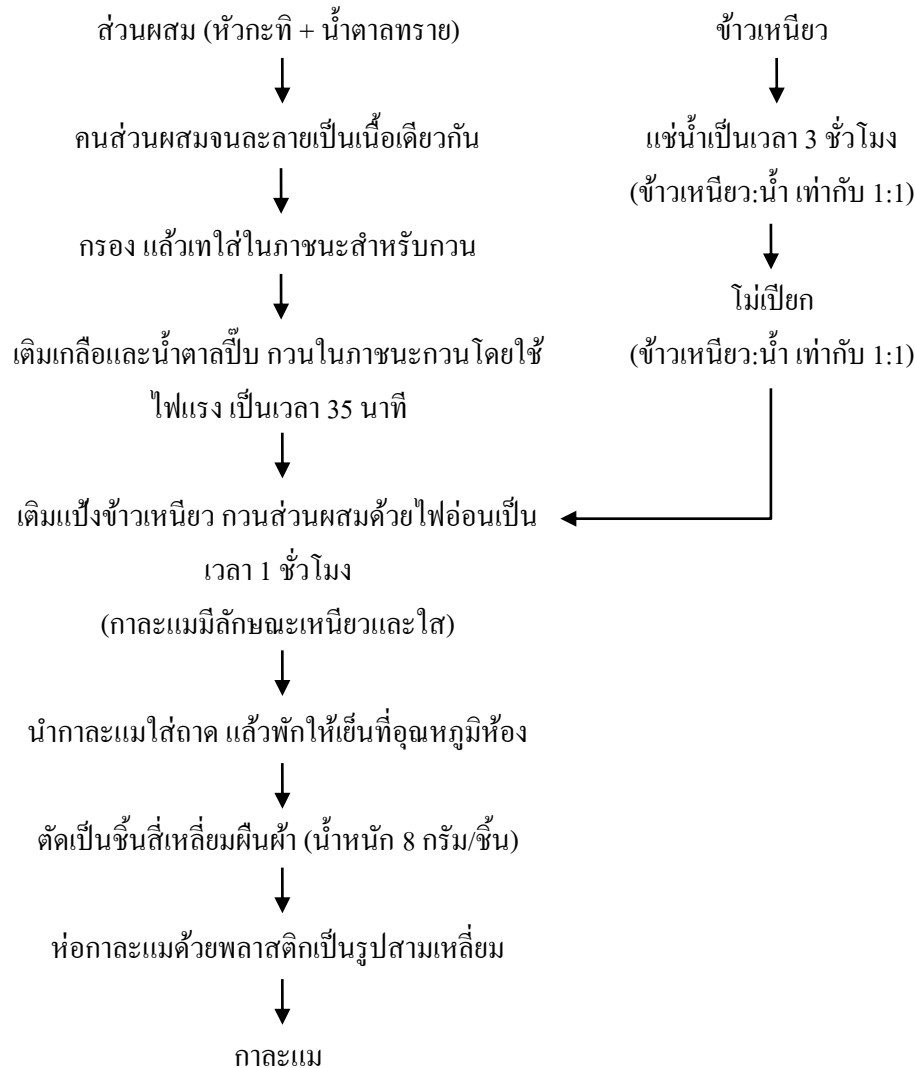
- วัดค่าสี L^* , a^* และ b^* ด้วยระบบ CIE-lab scale โดย L^* คือค่าความสว่าง (0-100) ค่า a^* แสดงค่าความเป็นสีเขียว/สีแดง และค่า b^* แสดงค่าความเป็นสีน้ำเงิน/สีเหลือง

- วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส โดยทำการวัดค่าความแข็ง (hardness; g) และแรงเฉือน (work of shear; g.sec) ของกาละแม ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อ

สัมผัส Texture Analyzer (TA.XT2 Plus) ใช้หัววัดเป็นใบมีดเดี่ยว (HPD/BS Blade set with knife)

- ทดสอบคุณลักษณะด้านประสาทสัมผัสโดยการประเมินคุณลักษณะทางด้านลักษณะปรากฏ

สี กลิ่น กลิ่นรส ความนุ่มเหนียว และความชอบโดยรวมของกาดะแมด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) โดยใช้ผู้ทดสอบชิมทั่วไปจำนวน 30 คน



ภาพที่ 1 การผลิตกาดะแมวิธีมาตรฐาน, Dechprarom (2018)

2. ศึกษาผลของแซนแทนกัมและกระบวนการผลิตต่อการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์กาดะแม

ทำการเตรียมกาดะแมตามสูตรมาตรฐานดังข้อ (1) และเติมแซนแทนกัมที่ระดับร้อยละ 0, 0.25 และ 0.50 ของน้ำหนักแป้งข้าวเหนียว แล้วผลิตกาดะแมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 2 วิธีคือ วิธีแรก การผลิต

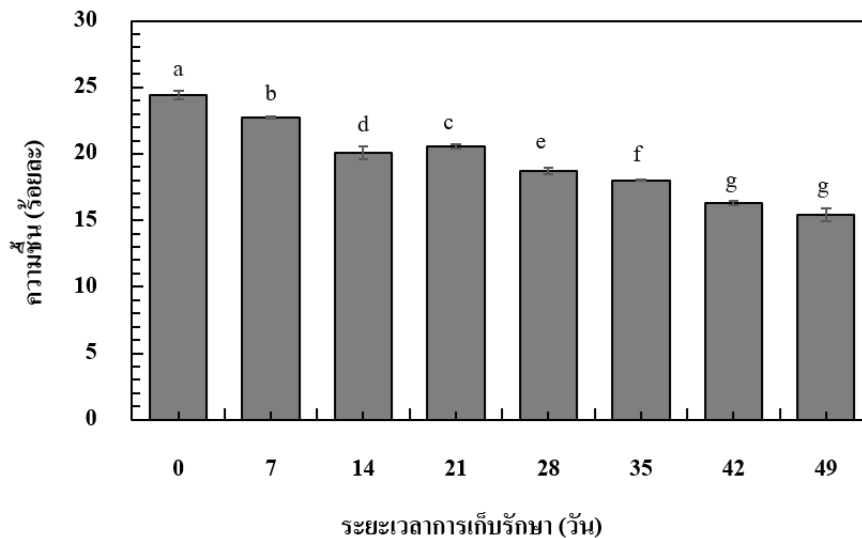
กาดะแมวิธีมาตรฐาน (ภาพที่ 1) กวนโดยผสมส่วนผสมที่ละส่วนและไม่ต้มกะทิ และวิธีที่สอง การผลิตกาดะแมวิธีที่ 2 กวนโดยการเติมส่วนผสมที่ละส่วนโดยการนำน้ำกะทิต้มกับน้ำตาลทรายและน้ำตาลปีบก่อนเติมในส่วนผสม (Attabhanyo *et al.*, 2017) ดังภาพที่ 2

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. คุณลักษณะของกาละแมสูตรมาตรฐานระหว่างการเก็บรักษา

จากการศึกษาคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์กาละแมสูตรมาตรฐานที่ทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 49 วัน พบว่าปริมาณความชื้นมีแนวโน้มลดลง (ภาพที่ 3)

ส่วนค่าสี L^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ($p>0.05$) ค่า a^* และ b^* มีแนวโน้มลดลง ($p>0.05$) ในระหว่างการเก็บรักษา (ตารางที่ 2) เนื่องจากอิทธิพลของการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์กาละแมและการเกิดรีโทรเกรเดชั่นหรือการคืนตัวของแป้งในระหว่างการเก็บรักษา



ภาพที่ 3 ปริมาณความชื้นของกาละแมสูตรมาตรฐานที่บรรจุในถุง PP ในสภาวะปกติที่ไม่ใช้สารดูดซับออกซิเจน ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 49 วัน

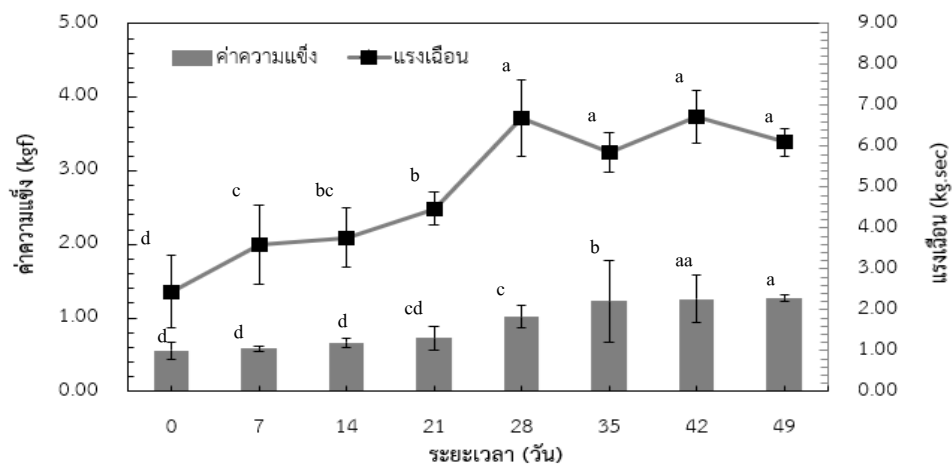
ตารางที่ 2 ค่าสี L^* , a^* และ b^* ของกาละแมสูตรมาตรฐานที่บรรจุในถุง PP ในสภาวะปกติที่ไม่ใช้สารดูดซับออกซิเจน ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 49 วัน

ระยะเวลา (วัน)	ค่าสี		
	L^*	a^*	b^*
0	15.21±0.21 ^b	9.99±1.46 ^a	12.23±0.86 ^{ab}
7	14.88±0.96 ^b	10.42±0.16 ^a	13.43±1.07 ^a
14	14.88±0.85 ^b	10.44±0.34 ^a	11.71±0.87 ^{bc}
21	15.25±1.98 ^b	9.32±0.53 ^a	12.06±0.28 ^{ab}
28	15.60±0.72 ^b	7.28±0.34 ^d	11.58±0.90 ^{bc}
35	20.94±0.55 ^a	5.43±0.32 ^c	11.74±0.59 ^{bc}
42	21.50±0.83 ^a	5.65±0.42 ^c	10.60±0.70 ^c
49	20.06±1.66 ^a	8.46±0.06 ^b	10.72±0.65 ^c

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งและแรงเฉือนของกอลูเมสตรมาตรฐาน พบว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นส่งผลให้กอลูเมมีค่าความแข็งและค่าแรงเฉือนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยกอลูเมเริ่มมีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งหลังจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 14 วัน (ภาพที่ 4) ทั้งนี้เนื่องจากการสูญเสียความชื้นในระหว่างการเก็บรักษาโดยเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันไอน้ำในอาหารกับความดันไอน้ำในบรรยากาศทำให้ความชื้นเกิดการถ่ายเทออกจากชิ้นอาหารประกอบกับการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชในระหว่างการเก็บรักษา โดยในกระบวนการผลิตกอลูเมจะเกิดกระบวนการเจลาติไนเซชันของเม็ดสตาร์ชทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความหนืดและใสมากขึ้นซึ่งเกิดขึ้นหลังจากการให้ความร้อนในระหว่างการกวนแป้ง โดยจะทำให้เม็ดแป้งเกิดการดูดซับน้ำและมีการพองตัวเพิ่มขึ้นจนเม็ดแป้งแตกออก และทำให้เม็ดแป้งเกิดสภาพการละลายมากขึ้นโดยมีโครงสร้างอะไมโลสและอะไมโลเพกตินกระจายหลุดออกจากเม็ดแป้ง และเมื่อปล่อยให้ผลิตภัณฑ์กอลูเมเย็นตัวลงระหว่างรอการแช่ตัวจะทำให้โมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกตินกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่อย่างมีระเบียบด้วยพันธะ

ไฮโดรเจนแบบเกลียวคู่ในรูปผลึกที่มีความแข็งแรงกว่าเดิม เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติมีลักษณะเป็นเจล เรียกกระบวนการนี้ว่ารีโทรเกรเดชัน หรือ การคืนตัวของแป้ง (Sriroth and Piyachomkwan, 2007) ซึ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันจะเกิดอย่างช้าๆ ในช่วงแรกและจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้นจนทำให้เกิดผลึกแข็ง (crystalline) ของโครงสร้างซึ่งมีลักษณะการเรียงตัวที่แน่นมากขึ้นและบีบน้ำออกจากเจล เรียกว่า ซินเนอริซิส (syneresis) ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นลดลงและมีลักษณะที่แห้งแข็งและกระด้าง (Sriroth and Piyachomkwan, 2007; Ratithammatorn, 2016) สอดคล้องกับการศึกษาสภาวะการเก็บรักษาต่อการยืดอายุการเก็บรักษาข้าวหลามโดยพบว่าค่าความแข็งของข้าวหลามมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บรักษานานขึ้นเนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวเหนียว (Changso, 2020) ซึ่งการคืนตัวของแป้งจะมีผลโดยตรงต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของอาหาร โดยแป้งที่มีการคืนตัวน้อยกว่าจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่มกว่าแป้งที่มีการคืนตัวมากกว่า โดยเฉพาะในระหว่างการเก็บรักษาจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะแห้งและร่วนกว่า (Phuphechr et al., 2009)



ภาพที่ 4 ค่าความแข็งและแรงเฉือนของกอลูเมสตรมาตรฐานที่บรรจุในถุง PP ในสภาวะปกติที่ไม่ใช้สารดูดซับออกซิเจนระหว่างเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 49 วัน

จากการประเมินคุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสของกอลูแมสตรมาตรฐานที่ระยะเวลาการเก็บรักษาเริ่มต้น 0 วัน (ตารางที่ 3) พบว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส (กลิ่นหืน) ความนุ่มเหนียว และความชอบโดยรวมอยู่ในระดับชอบมาก (7.33-7.50) และเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นส่งผลให้คะแนนความชอบด้านต่างๆ ลดน้อยลง โดยมีคะแนนลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 14 วัน

ซึ่งคะแนนความชอบด้าน กลิ่นรส ความเหนียวนุ่ม และความชอบโดยรวม เท่ากับ 6.73, 7.07 และ 7.17 ตามลำดับ เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีกลิ่นหืนและมีเนื้อสัมผัสแห้งแข็ง กระด้าง อันเป็นผลมาจากการการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์กอลูแมสและเกิดรีโพรเกรเดชันของสตาร์ชดังกล่าวข้างต้น และการเกิดกลิ่นหืนเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันจากน้ำมันที่ใช้ทาผาครอบใส่กอลูแมสหลังกวนเสร็จและรอการเซตตัว

ตารางที่ 3 คะแนนทดสอบคุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสของของกอลูแมสตรมาตรฐานที่บรรจุในถุง PP ในสภาวะปกติที่ไม่ใช้สารดูดซับออกซิเจนระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 42 วัน

ระยะเวลา (วัน)	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น (กลิ่นหืน)	กลิ่นรส	ความนุ่ม เหนียว	ความชอบ โดยรวม
0	7.50±0.63 ^a	7.50±0.57 ^a	7.50±0.73 ^a	7.57±0.68 ^a	7.33±0.61 ^a	7.50±0.73 ^a
7	7.30±0.53 ^{ab}	7.67±0.48 ^a	7.33±0.61 ^{ab}	7.13±0.63 ^{ab}	7.47±0.82 ^a	7.37±0.76 ^a
14	7.40±0.67 ^{ab}	7.60±0.77 ^a	7.10±0.80 ^{bc}	6.73±0.98 ^{bc}	7.07±0.94 ^b	7.17±0.95 ^{ab}
21	7.10±0.76 ^{bc}	6.97±0.72 ^b	6.77±0.94 ^{cd}	6.60±0.86 ^c	6.57±0.86 ^b	6.80±0.76 ^b
28	6.43±0.63 ^c	7.03±0.76 ^b	6.63±0.49 ^d	6.77±0.57 ^{bc}	6.03±0.89 ^c	6.23±0.97 ^c
35	6.83±0.53 ^{cd}	7.13±0.78 ^b	6.10±0.76 ^c	4.83±0.87 ^d	6.00±0.82 ^c	6.27±0.78 ^c
42	6.67±0.61 ^{de}	6.47±0.63 ^c	4.20±0.89 ^f	3.67±0.96 ^c	5.40±0.85 ^d	5.83±0.75 ^c

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
ไม่มีการทดสอบชิมในวันที่ 49 เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีกลิ่นหืนและมีลักษณะแข็งมาก

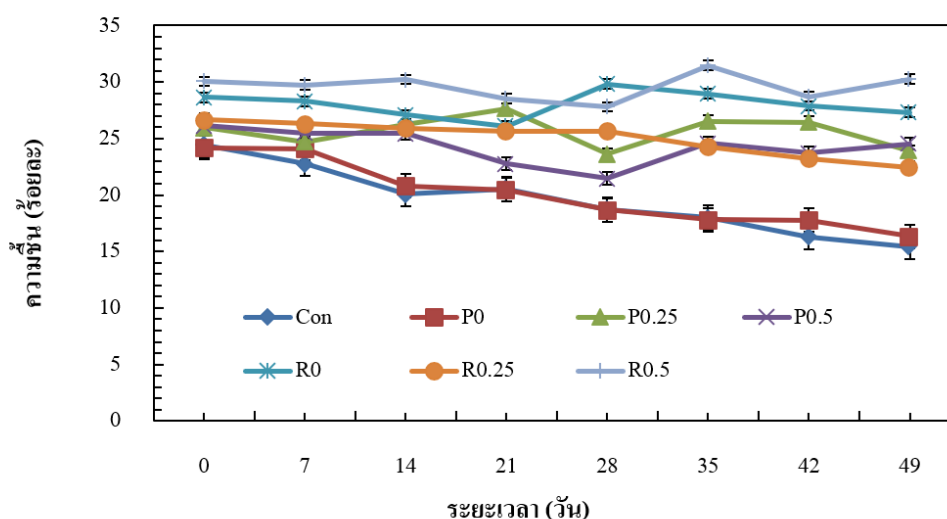
2. ผลของแซนแทนกัมและกระบวนการผลิตต่อการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์กอลูแมส

จากการศึกษาผลของแซนแทนกัมและวิธีการผลิตกอลูแมสต่อการยืดอายุการเก็บรักษา กอลูแมส โดยทำการศึกษาการเติมแซนแทนกัมที่ระดับร้อยละ 0.25 และ 0.05 ของน้ำหนักแป้ง และผลิตกอลูแมสด้วยวิธีการผลิตกอลูแมสวิธีมาตรฐาน (กวนโดยเติมส่วนผสมที่ละส่วนและไม่ต้มกะทิ) และการผลิตกอลูแมสวิธีที่ 2 (กวนโดยการเติมส่วนผสมและต้มกะทิ) และบรรจุในถุงไนลอนในสภาวะสุญญากาศ ร่วมกับการใช้สารดูดซับออกซิเจน แล้วทำการเก็บ

รักษาที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 49 วัน (ใช้ตัวอย่างกอลูแมสวิธีแม่ประกอบที่บรรจุในถุงโพลิโพรพิลีนและไม่ใช้สารดูดซับออกซิเจนเป็นชุดควบคุม) ทำการสุ่มตรวจสอบคุณภาพทุกสัปดาห์ พบว่าปริมาณความชื้นของกอลูแมสชุดควบคุมและวิธีแม่ประกอบที่ไม่เติมแซนแทนกัม (สภาวะสุญญากาศร่วมกับการใช้สารดูดซับออกซิเจน) มีความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 49 วัน (ภาพที่ 5) คิดเป็นร้อยละ 36 และ 32 ตามลำดับ โดยกอลูแมสที่บรรจุในสภาวะสุญญากาศร่วมกับการใช้สารดูดซับออกซิเจนมีอัตราการลดลงของความชื้นน้อยกว่ากอลูแมสที่บรรจุใน

สภาวะปกติ ทั้งนี้เนื่องจากการบรรจุในสภาวะสุญญากาศร่วมกับสารดูดซับออกซิเจนสามารถช่วยลดอัตราการถ่ายเทของความเร็วขึ้นได้ สอดคล้องกับการศึกษาวิธีการบรรจุที่เหมาะสมต่อการยืดอายุการเก็บรักษาข้าวหอมมะลิพบว่า การเก็บรักษาข้าวหอมมะลิแบบดั้งเดิมซึ่งเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ได้ปิดสนิททำให้อุณหภูมิและอากาศชื้นผ่านเข้าออกได้มากกว่า ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความชื้นมากกว่าและเกิดอัตราการลดลงของค่าวอเตอร์แอคทิวิตีมากกว่าการบรรจุแบบสุญญากาศ (Changso, 2020) นอกจากนี้การแช่แข็ง

สองวิธีที่เติมแซนแทนกัมมีอัตราการสูญเสียความชื้นน้อยกว่าชุดการทดลองที่ไม่เติมแซนแทนกัม โดยมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 4-15 เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำที่ดีทำให้สามารถกักเก็บน้ำไว้ภายในโครงสร้างของกาละแมได้ในระหว่างการเก็บรักษา ทั้งนี้การแช่แข็งและการแช่แข็งที่เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.5 มีปริมาณความชื้นไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 49 วัน



ภาพที่ 5 ปริมาณความชื้นของกาละแมที่บรรจุในถุงไนลอนในสภาวะสุญญากาศร่วมกับการใช้สารดูดซับออกซิเจนระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 49 วัน (Con: ชุดควบคุม, P0; กาละแมวิธีที่ 1 ไม่เติมแซนแทนกัม, P0.25; กาละแมวิธีที่ 1 เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.25, กาละแมวิธีที่ 1 เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.50, กาละแมวิธีที่ 2 เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.25, กาละแมวิธีที่ 2 เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.50)

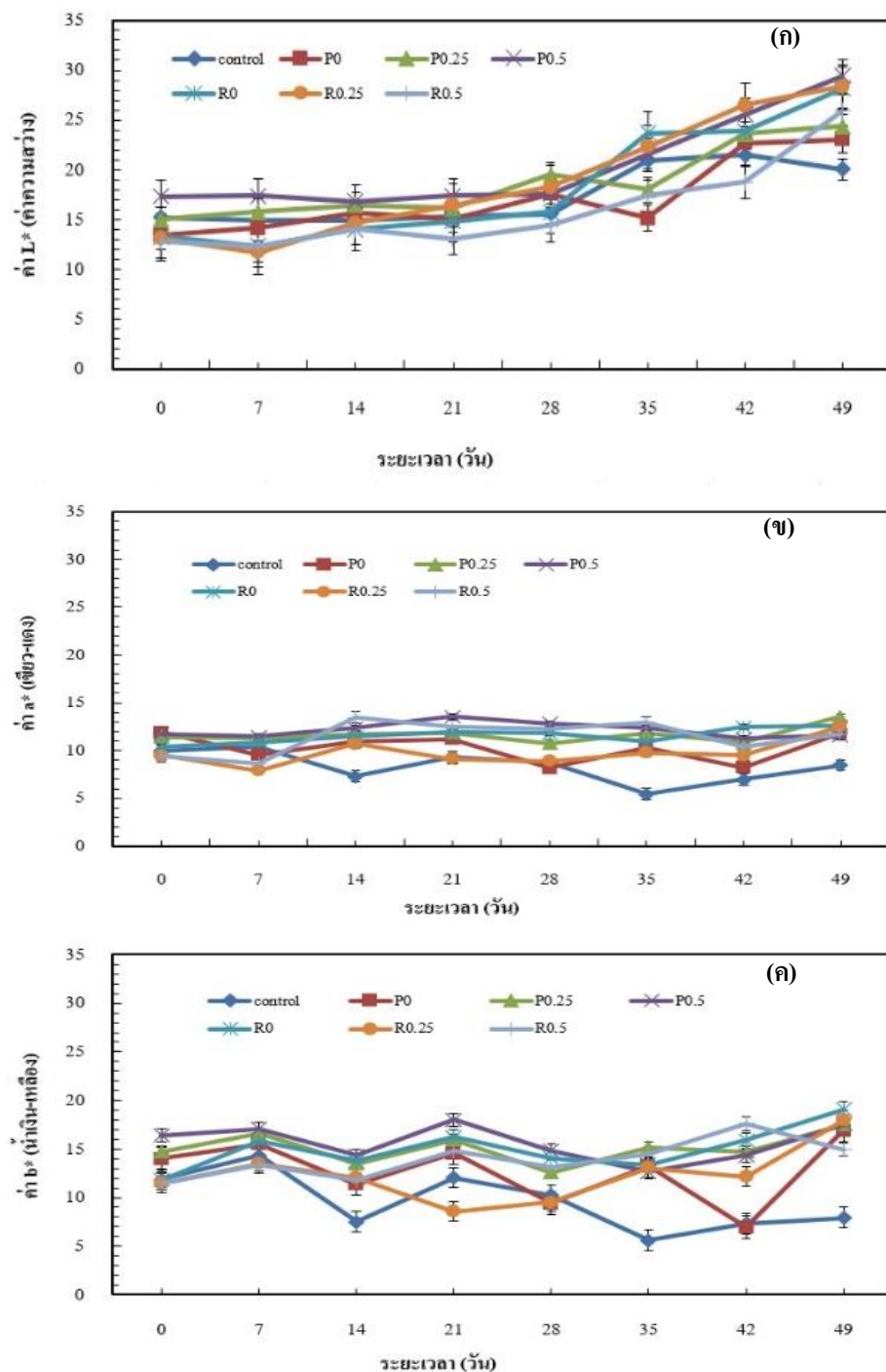
จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสีของกาละแมในระหว่างการเก็บรักษา พบว่ากาละแมวิธีที่สองมีค่าความสว่าง (L^*) น้อยกว่ากาละแมวิธีมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากวิธีการกวนกาละแมที่แตกต่างกันทำให้วิธีที่สองใช้เวลาในการกวนกาละแมมากกว่าโดยใช้เวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ได้กาละแมที่มีลักษณะเหนียว

หนึบ ในขณะที่การกวนกาละแมวิธีมาตรฐานใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ส่งผลให้กาละแมเกิดสีคาราเมลมากกว่า ค่า b^* ของกาละแมวิธีที่สองมีค่าต่ำสุด รองลงมาคือชุดควบคุมและวิธีมาตรฐาน ตามลำดับ โดยที่ระดับการเติมแซนแทนกัมที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่า L^* , a^* และ b^* ของกาละแมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ที่ระยะเวลา 0 วัน (ภาพที่ 6) เมื่อระยะเวลา

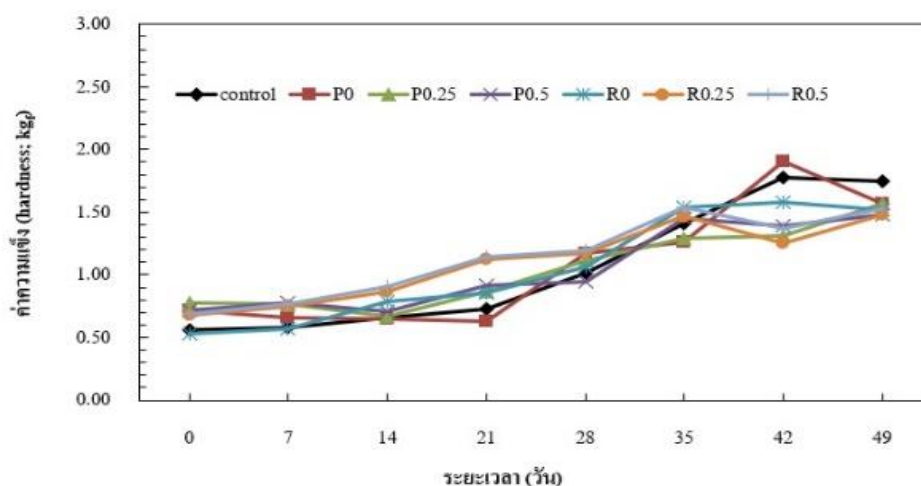
ในการเก็บรักษานานขึ้นส่งผลให้ค่าความ L^* เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการเกิดรีโทรเกรเดชันหรือการคืนตัวของแป้งส่งผลให้แป้งเกิดการจับตัวกันมีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นและมีความมันเงาลดลงเนื่องจากการสูญเสียของน้ำ ส่วนค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (L^*) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะเนื้อสัมผัสโดยการวิเคราะห์ค่าความแข็งของกาละแม (ภาพที่ 7) ที่ระยะเวลาเริ่มต้น เมื่อพิจารณาความแข็งของกาละแมที่ไม่เติมแซนแทนกัมพบว่ากาละแมวิธีที่สองมีค่าความแข็งน้อยกว่าวิธีมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของวิธีการกวนกาละแมที่แตกต่างกันดังกล่าวข้างต้นซึ่งพบว่าวิธีการกวนกาละแมโดยการต้มน้ำกะทิก่อนแล้วนำมาผสมกับส่วนผสมน้ำตาลทรายจะทำให้ไขมันแตกตัวทำให้โปรตีนที่มีอยู่ในกะทิเกิดการตกตะกอนและทำให้ไขมันอยู่ในรูปที่สามารถจับกับโมเลกุลของอะไมโลสได้ดีทำให้ลดการเกิดการคืนตัวของแป้งและการเกิดการคืนตัวของแป้งจะลดลงหากไขมันที่เดิมมีกรดไขมันขนาดเล็ก โดยทั้งวิธีมาตรฐานและวิธีที่สองที่เติมแซนแทนกัมมีค่าความแข็งมากกว่ากาละแมที่ไม่เติมแซนแทนกัมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์เกิดการจับกันกับโครงสร้างอะไมโลสและอะไมโลเพคตินของโมเลกุลแป้งทำให้เกิดโครงข่ายที่แข็งแรง ในขณะที่เดียวกันก็จะไปขัดขวางการจับกันเองของอะไมโลสได้ในช่วงการเก็บรักษา (Sriroth and Piyachomkwan, 2007) โดยกาละแมที่เติมแซนแทนกัมที่ทั้งสองระดับมีค่า

ความแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) และเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นค่าความแข็งของกาละแมชุดควบคุมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงสุดใกล้เคียงกับกาละแมชุดควบคุมที่บรรจุในสถานะปกติและไม่เติมสารดูดซับออกซิเจน ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของการทำเตาความชื้นในระหว่างการเก็บรักษาทำให้กาละแมเกิดการสูญเสียความชื้นและมีลักษณะที่แห้งแข็ง ประกอบกับการคืนตัวของแป้งในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งแป้งจะเกิดการจัดเรียงตัวของอะไมโลสเกิดเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง และขับน้ำออกจากโครงสร้าง (Sriroth and Piyachomkwan, 2007) ทำให้กาละแมมีลักษณะเนื้อสัมผัสแห้งและแข็งเมื่อเวลาการเก็บเพิ่มขึ้น ในขณะที่กาละแมที่เติมแซนแทนกัมมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งน้อยกว่าชุดการทดลองที่ไม่เติมแซนแทนกัม เนื่องจากอิทธิพลของไฮโดรคอลลอยด์ที่มีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้นประกอบกับการบรรจุกาละแมในสถานะสุญญากาศร่วมกับสารดูดซับออกซิเจนส่งผลให้ลดอัตราการถ่ายเทความชื้นออกจากชิ้นกาละแมได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์กาละแมที่เติมไฮโดรคอลลอยด์มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 49 วัน สอดคล้องกับการศึกษาสถานะการบรรจุข้าวหลามในระหว่างการเก็บรักษาพบว่าการบรรจุข้าวหลามในสถานะสุญญากาศมีผลทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความแข็งเกิดขึ้นน้อยกว่าการบรรจุแบบดั้งเดิมที่บรรจุภัณฑ์ปิดไม่สนิทเนื่องจากการบรรจุแบบสุญญากาศทำให้เกิดการสูญเสียน้ำได้ช้ากว่าจึงทำให้เกิดความแข็งช้ากว่า (Changso, 2020)



ภาพที่ 6 ค่าสี L* (ก), a* (ข) และ b* (ค) ของกอละแมที่บรรจุในถุงไนลอนในสภาวะสุญญากาศร่วมกับการใช้สารดูดซับออกซิเจนระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 49 วัน (Con: ชุดควบคุม, P0; กอละแมวิธีที่ 1 ไม่เติมแซนแทนกัม, P0.25; กอละแมวิธีที่ 1 เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.25, กอละแมวิธีที่ 1 เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.50, กอละแมวิธีที่ 2 เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.25, กอละแมวิธีที่ 2 เติมแซนแทนกัมร้อยละ 0.50)



ภาพที่ 7 ค่าความแข็งของกอละแมที่บรรจุในถุงไนลอนในสภาวะสุญญากาศร่วมกับการใช้สารดูดซับออกซิเจน ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 49 วัน (Con: ชุดควบคุม, P0; กอละแมวิธีที่ 1 ไม่เติม แชนแทนกัม, P0.25; กอละแมวิธีที่ 1 เติมแชนแทนกัมร้อยละ 0.25, กอละแมวิธีที่ 1 เติมแชนแทนกัม ร้อยละ 0.50, กอละแมวิธีที่ 2 เติมแชนแทนกัมร้อยละ 0.25, กอละแมวิธีที่ 2 เติมแชนแทนกัมร้อยละ 0.50)

จากการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของกอละแมในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 49 วัน โดยการให้คะแนนความชอบแบบ 9 คะแนน ต่อคุณลักษณะทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส (กลิ่นหืน) ความนุ่ม เหนียว และความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์กอละแม (ตารางที่ 4) พบว่าคะแนนความชอบทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส (กลิ่นหืน) ความนุ่ม ความเหนียวและความชอบโดยรวมมีแนวโน้มลดลงในระหว่างการเก็บรักษาโดยคะแนนความชอบด้าน กลิ่น กลิ่นรส ความนุ่มเหนียว และความชอบโดยรวมของกอละแมชุดควบคุม (สูตรแม่ประคองที่บรรจุในถุงโพลีเอทิลีน) และกอละแมที่ไม่เติมแชนแทนกัม (P0) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตั้งแต่

วันที่ 14 ซึ่งให้ลักษณะของกอละแมที่แข็งและมีกลิ่นหืน ส่วนกอละแมวิธีมาตรฐานที่เติมแชนแทนกัมทั้งสองระดับและบรรจุในสภาวะสุญญากาศร่วมกับสารดูดซับออกซิเจนมีคะแนนความชอบด้านความนุ่ม เหนียว กลิ่นรสและความชอบโดยรวมลดลงในวันที่ 21 และกอละแมวิธีที่สองที่เติมแชนแทนกัมที่ระดับร้อยละ 0.50 มีคะแนนความชอบโดยรวมลดลงในวันที่ 28 ทั้งนี้สอดคล้องกับค่าความแข็งที่ศึกษาก่อนหน้านี้ ซึ่งพบว่าค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ประกอบกับมีกลิ่นรสเปลี่ยนแปลงจากกลิ่นรสเดิมของกอละแมซึ่งพบว่ามีกลิ่นหอมลดลงจึงส่งผลให้คะแนนความชอบลดลง ทั้งนี้ไม่มีการทดสอบชิมผลิตภัณฑ์กอละแมที่เก็บรักษาเป็นเวลา 49 วัน เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีลักษณะแข็งมาก

ตารางที่ 4 คะแนนทดสอบคุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสของกอลอะแมที่บรรจุในถุงไนลอนในสภาวะ
สุญญากาศร่วมกับการใช้สารดูดซับออกซิเจนระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 42 วัน

ระยะเวลา	คะแนนความชอบ					
	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น	กลิ่นรส	ความนุ่มเหนียว	ความชอบรวม
0 วัน						
Con.	7.50±0.63 ^a	7.50±0.57 ^a	7.57±0.73 ^{ab}	7.50±0.68 ^{ab}	7.33±0.61 ^b	7.50±0.73 ^{bc}
P0	7.70±0.65 ^a	7.57±0.63 ^a	7.80±0.61 ^a	7.67±0.71 ^a	7.67±0.66 ^{ab}	8.03±0.72 ^a
P0.25	7.77±0.73 ^a	7.57±0.50 ^a	7.50±0.63 ^{ab}	7.53±0.63 ^{ab}	7.40±0.72 ^{ab}	7.67±0.61 ^{bc}
P0.5	7.67±0.71 ^a	7.67±0.61 ^a	7.43±0.57 ^b	7.53±0.57 ^{ab}	7.70±0.60 ^a	7.57±0.63 ^{bc}
R0	7.60±0.62 ^a	7.60±0.57 ^a	7.30±0.53 ^b	7.50±0.57 ^{ab}	7.47±0.57 ^{ab}	7.33±0.48 ^c
R0.25	7.70±0.65 ^a	7.57±0.50 ^a	7.53±0.57 ^{ab}	7.40±0.56 ^b	7.70±0.70 ^a	7.77±0.68 ^{ab}
R0.5	7.60±0.56 ^a	7.73±0.45 ^a	7.57±0.57 ^{ab}	7.47±0.51 ^{ab}	7.43±0.57 ^{ab}	7.57±0.63 ^{bc}
7 วัน						
Con.	7.30±0.53 ^d	7.67±0.48 ^a	7.33±0.61 ^{ab}	7.13±0.63 ^c	7.47±0.82 ^{abc}	7.37±0.76 ^c
P0	7.50±0.57 ^{bcd}	7.67±0.48 ^a	7.20±0.55 ^b	7.30±0.79 ^{bc}	7.16±0.79 ^c	7.37±0.81 ^c
P0.25	7.70±0.60 ^{ab}	7.77±0.57 ^a	7.67±0.66 ^a	7.63±0.56 ^a	7.83±0.75 ^a	7.87±0.68 ^a
P0.5	7.53±0.51 ^{abc}	7.73±0.69 ^a	7.40±0.62 ^{ab}	7.77±0.57 ^a	7.57±0.63 ^{abc}	7.43±0.68 ^c
R0	7.40±0.56 ^{cd}	7.70±0.65 ^a	7.60±0.86 ^a	7.50±0.63 ^{ab}	7.37±0.93 ^{bc}	7.50±0.82 ^{ab}
R0.25	7.67±0.66 ^{abc}	7.70±0.65 ^a	7.37±0.85 ^{ab}	7.63±0.61 ^a	7.60±0.81 ^{abc}	7.60±0.81 ^{ab}
R0.5	7.80±0.61 ^a	7.80±0.71 ^a	7.60±0.77 ^a	7.53±0.68 ^{ab}	7.73±0.78 ^{ab}	7.43±0.68 ^c
14 วัน						
Con.	7.40±0.67 ^c	7.60±0.77 ^c	7.10±0.80 ^b	6.77±0.98 ^a	7.06±0.94 ^{bc}	7.17±0.95 ^{ab}
P0	7.37±0.76 ^{bc}	7.60±0.77 ^c	7.03±0.76 ^b	7.03±0.89 ^{bc}	7.00±0.59 ^a	7.00±0.95 ^b
P0.25	7.63±0.61 ^{abc}	7.80±0.61 ^{ab}	7.53±0.68 ^a	7.23±0.90 ^{ab}	7.43±0.82 ^{abc}	7.70±0.84 ^a
P0.5	7.63±0.61 ^{abc}	7.93±0.52 ^a	7.57±0.57 ^a	7.30±0.84 ^{ab}	7.40±0.86 ^{abc}	7.40±0.86 ^{ab}
R0	7.63±0.61 ^{abc}	7.80±0.66 ^{ab}	7.63±0.76 ^a	7.57±0.68 ^a	7.57±0.88 ^a	7.70±0.79 ^a
R0.25	7.70±0.65 ^a	7.77±0.63 ^{ab}	7.50±0.78 ^a	7.23±0.94 ^{ab}	7.47±0.90 ^{ab}	7.33±0.52 ^{ab}
R0.5	7.67±0.66 ^{ab}	7.70±0.70 ^{ab}	7.73±0.78 ^a	7.33±0.92 ^{ab}	7.53±0.86 ^a	7.30±0.73 ^{ab}
21 วัน						
Con.	7.10±0.76 ^a	6.97±0.72 ^b	6.77±0.94 ^c	6.63±0.86 ^c	6.95±0.86 ^d	6.80±0.76 ^c
P0	7.63±0.56 ^a	7.30±0.60 ^{ab}	7.23±0.63 ^{ab}	7.10±0.61 ^{ab}	6.90±0.89 ^{bc}	7.13±0.57 ^{bc}
P0.25	7.30±0.75 ^{ab}	7.37±0.67 ^a	7.06±0.64 ^{bc}	7.50±0.71 ^{bc}	6.00±0.83 ^{cd}	7.24±0.90 ^c
P0.5	7.63±0.72 ^a	7.30±0.70 ^{ab}	7.30±0.60 ^{ab}	7.23±0.57 ^{ab}	7.55±0.67 ^{ab}	7.30±0.70 ^b

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ระยะเวลา	คะแนนความชอบ					
	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น	กลิ่นรส	ความนุ่มเหนียว	ความชอบรวม
R0	7.40±0.67 ^{ab}	7.30±0.60 ^{ab}	7.03±0.72 ^{bc}	7.10±0.66 ^{ab}	7.23±0.68 ^{ab}	7.33±0.61 ^b
R0.25	7.33±0.61 ^{ab}	7.33±0.55 ^a	7.06±0.52 ^{bc}	7.00±0.69 ^b	7.30±0.47 ^{ab}	7.10±0.55 ^{bc}
R0.5	7.63±0.61 ^a	7.53±0.73 ^a	7.53±0.82 ^a	7.43±0.63 ^a	7.50±0.43 ^a	7.77±0.90 ^a
28 วัน						
Con.	6.43±0.63 ^b	7.03±0.76 ^{ab}	7.03±0.67 ^a	6.60±0.57 ^b	6.03±0.89 ^d	6.23±0.97 ^c
P0	6.63±0.56 ^b	7.00±0.64 ^b	7.06±0.74 ^a	7.10±0.71 ^{ab}	5.53±0.97 ^c	5.77±0.85 ^d
P0.25	6.70±0.75 ^b	7.10±0.84 ^{ab}	7.13±0.68 ^a	7.13±0.51 ^a	6.06±0.94 ^{bc}	6.73±0.75 ^{ab}
P0.5	7.13±0.86 ^a	7.20±0.76 ^{ab}	7.06±0.64 ^a	7.17±0.65 ^a	7.03±0.86 ^{ab}	6.73±0.78 ^{ab}
R0	7.03±0.85 ^a	7.16±0.79 ^{ab}	7.06±0.64 ^a	7.10±0.76 ^{ab}	6.37±0.84 ^{abc}	6.80±0.89 ^{ab}
R0.25	7.06±0.69 ^a	7.33±0.80 ^a	7.10±0.76 ^a	7.13±0.63 ^a	6.43±0.79 ^{abc}	6.66±0.73 ^b
R0.5	7.06±0.78 ^a	7.10±0.84 ^{ab}	7.13±0.68 ^a	7.17±0.79 ^a	7.05±0.86 ^a	7.6±0.77 ^a
35 วัน						
Con.	7.17±0.75 ^b	7.13±0.78 ^{bc}	6.10±0.76 ^d	5.83±0.87 ^d	6.50±0.82 ^d	6.27±0.78 ^b
P0	7.33±0.71 ^{ab}	7.43±0.63 ^a	7.03±0.93 ^{ab}	5.93±0.96 ^{ab}	6.33±0.99 ^c	6.70±1.12 ^b
P0.25	7.33±0.71 ^{ab}	7.23±0.77 ^{ab}	6.80±0.98 ^{bc}	6.27±0.94 ^{bc}	6.40±1.40 ^{bc}	7.00±1.11 ^b
P0.5	6.97±0.93 ^c	6.97±0.96 ^c	6.63±1.13 ^c	6.73±0.94 ^c	6.95±0.61 ^a	7.70±1.02 ^{ab}
R0	7.33±0.76 ^{ab}	7.33±0.84 ^{ab}	6.73±1.08 ^{bc}	6.57±1.33 ^{bc}	6.47±1.01 ^{ab}	6.83±1.09 ^b
R0.25	7.20±0.71 ^b	7.13±0.78 ^{bc}	6.70±1.12 ^c	6.67±0.88 ^c	6.53±1.14 ^{ab}	7.03±0.72 ^b
42 วัน						
Con.	6.67±0.61 ^c	6.47±0.63 ^c	5.40±1.40 ^c	4.60±1.50 ^d	5.97±0.85 ^e	5.83±0.75 ^d
P0	7.27±0.74 ^b	7.47±0.63 ^a	6.80±0.76 ^b	6.93±0.78 ^{bc}	6.70±0.70 ^d	6.70±0.79 ^c
P0.25	7.33±0.76 ^{ab}	7.23±0.82 ^b	6.90±1.03 ^b	7.07±0.78 ^{bc}	6.03±1.00 ^{bc}	7.27±0.91 ^b
P0.5	7.17±0.79 ^b	7.23±0.73 ^b	6.97±1.00 ^b	7.13±0.63 ^{ab}	6.13±0.43 ^{ab}	6.80±0.61 ^c
R0	7.27±0.69 ^b	7.33±0.84 ^{ab}	6.87±0.94 ^b	6.77±0.94 ^c	6.53±0.86 ^d	6.63±0.56 ^c
R0.25	7.20±0.66 ^b	7.13±0.73 ^b	6.93±0.91 ^b	6.80±0.96 ^{bc}	6.77±0.77 ^{cd}	6.70±0.65 ^c
R0.5	7.50±0.51 ^a	7.47±0.61 ^{ab}	7.37±0.56 ^a	7.43±0.57 ^a	6.50±0.67 ^a	7.77±0.43 ^a

หมายเหตุ: Con: ชุดควบคุม, P0; กาละแม่วิธีที่ 1 ไม่เติมแซนแทนแทนกัม, P0.25; กาละแม่วิธีที่ 1 เติมแซนแทนแทนกัม ร้อยละ 0.25, กาละแม่วิธีที่ 1 เติมแซนแทนแทนกัม ร้อยละ 0.50, กาละแม่วิธีที่ 2 เติมแซนแทนแทนกัม ร้อยละ 0.25, กาละแม่วิธีที่ 2 เติมแซนแทนแทนกัม ร้อยละ 0.50

สรุป

ผลการศึกษาการยืดอายุการเก็บรักษา กาละแมเพื่อป้องกันการเกิดรีโทรเกรเดชัน และกลิ่นหืนของกาละแมโดยใช้กระบวนการผลิต วิธีที่ 1 กวนโดยเติมส่วนผสมที่ละส่วนและไม่ต้มกะทิ (วิธีมาตรฐาน) และวิธีที่ 2 กวนโดยเติมส่วนผสมที่ละส่วนและใช้กะทิต้มกับน้ำตาลก่อนเติมในส่วนผสม และเติมแซนแทนกัมที่ระดับร้อยละ 0, 0.25 และ 0.5 แล้วเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 49 วัน พบว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบกาละแมที่เติมแซนแทนกัมระดับร้อยละ 0.5 ของวิธีที่สองมากที่สุดโดยให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส ความนุ่มเหนียว และความชอบโดยรวมที่ 7.13, 7.20, 7.07, 7.17, 6.53, 6.73 ตามลำดับ สามารถยืดอายุการเก็บรักษากาละแมจาก 2 สัปดาห์ เป็น 28 วัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ผลิตกาละแม แม่ประคอง จ.พัทลุง ที่ให้ข้อมูลการผลิตกาละแม ตัวอย่างกาละแม และบรรจุภัณฑ์ห่อกาละแมเพื่อการศึกษาในครั้งนี้ และขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาที่อนุเคราะห์สถานที่ในการปฏิบัติงาน พร้อมเครื่องจักร และอุปกรณ์ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 17th ed. Maryland, USA.
- Attabhanyo, R., Potisate, Y., Katsri, K. and Sangsuwan, J. 2017. Processing development to extend shelf life of Kalamae. **Thai Science and Technology Journal** 25(1): 56-65. (in Thai)
- Changso, S. 2020. Development of production process and shelf-life extension of cooked sticky rice bamboo shoot cut (Kao Lam) in Amphur Muang, Nakhon Pathom Province. **VRU Research and Development Journal Science and Technology** 14(2): 120-132. (in Thai)
- Dechprarom, P. 2018. Kalamae Mae-Prakong Phatthalung. Interview. January 15, 2018. (in Thai)
- Limsangouan, N., Prasert, W., Charunuch, C., Butsuwan, P. and Srichayet, P. 2018. Effect of storage conditions on retrogradation, physical and chemical properties changing of extruded rice and soy snack. **Science and Technology Journal** 26(4): 575-587. (in Thai)
- Phuphechr, P., Suwonsichon, S. and Limanond, B. 2009. Chemical and physical characteristics of Sinin rice flour and qualities of Sinin rice flour substituted bread dough, pp. 20-27. *In Kasetsart University Annual Conference (47th ed)*. Kasetsart, Bangkok. (in Thai)
- Pongsawatmanit, R., Chantaro, P. and Nishinari, K. 2013. Thermal and rheological properties of tapioca starch gels with and without xanthan gum under cold storage. **Journal of Food Engineering** 117(3): 333-341.
- Ratithammatorn, T. 2016. Effects of heating and cooling on structural change and digestion of starch. **Burapha Science Journal** 21(2): 246-259. (in Thai)
- Seeta, W., Supavititpatana, T. and Supavititpatana, P. 2016. The reducing of starch retrogradation for wide strip rice noodle production under cold storage. **Rajabhat Agriculture Journal** 15(1): 27-36. (in Thai)

- Sobolewska-Zielinska, J. and Fortuna, T. 2010. Retrogradation of starches and maltodextrin of origin various. **Acta Scientiarum Polonorum., Technologia Alimentaria** 9(1): 71-81.
- Sriroth, K. and Piyachomkwan, K. 2007. **Technology of Starch**. 4th ed. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Wang, S., Li, C., Copeland, L., Niu, Q. and Wang, S. 2015. Starch Retrogradation: A Comprehensive Review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety** 14: 568-585.
- Whistler, R.L., Be Miller, J.N. and Paschall, E.F. 1984. **Starch Chemistry and Technology**. 2nd ed. Academic Press, London.
- Zhou, Y., Wang, D., Zhang, L., Du, X. and Zhou, X. 2008. Effect of polysaccharides on gelatinization and retrogradation of wheat starch. **Food Hydrocolloids** 22(4): 505-512.

การศึกษาความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาและความกลัวการหกล้มของ ผู้สูงอายุในจังหวัดนครราชสีมา

Study of Leg Muscle Strength and Fear of Falling of Elderly People in Nakhon Ratchasima Province

สุภารัตน์ ค้างสันเทียะ* และ พรศิริ จงกล

Suparat Khangsanthia* and Pornsiri Jongkol

Received: 4 February 2021, Revised: 11 July 2021, Accepted: 22 July 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาและศึกษาภาวะความกลัวการหกล้มของผู้สูงอายุ การศึกษาครั้งนี้แบ่งเป็นการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey Research) และการวิจัยแบบการทดลอง (Experimental Research) โดยการเก็บข้อมูลส่วนบุคคลและความกลัวการล้มด้วยแบบสอบถาม การวัดสัดส่วนร่างกายด้วยเครื่องวัดสัดส่วนร่างกาย (Anthropometer) การวัดความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงของกล้ามเนื้อ (Strength Evaluation System) การวัดความเสี่ยงต่อการล้มใช้การทดสอบการลุกนั่ง 5 ครั้ง (Five Time Sit to Stand Test) ผู้ถูกทดสอบคือ ผู้สูงอายุในช่วงอายุ 60 - 82 ปีจำนวน 45 คน เพศชาย 18 คน (ร้อยละ 40) เพศหญิง 27 คน (ร้อยละ 60) ผลการวิจัยพบว่า ในการทดสอบความกลัวการหกล้มมีผู้ที่กลัวล้มระดับมาก 7 คน (ร้อยละ 15.6) กลัวล้มระดับปานกลาง 14 คน (ร้อยละ 31.1) และเก้าอี้ที่ไม่มีที่วางแขนทำให้มีความยากลำบากในการลุกขึ้นยืน ผลการวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้งพบว่า ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้งของเพศชายเท่ากับ 14.16 ± 5.57 วินาที ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้งของเพศหญิงเท่ากับ 16.27 ± 3.73 วินาที ผลการทดสอบความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาพบว่า เพศชายมีค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาเท่ากับ 36.38 กิโลกรัม เพศหญิงมีค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาเท่ากับ 20.98 กิโลกรัม การวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้สถิติการถดถอยโลจิสติกส์เชิงลำดับ (Ordinal Logistic Regression) โดยมีตัวแปรตามคือ ระดับความกลัวการหกล้ม ส่วนตัวแปรอิสระคือ อายุ ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาและความเสี่ยงต่อการล้ม พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อระดับความกลัวการหกล้มได้แก่ อายุและความเสี่ยงต่อการล้ม ผลการศึกษานี้เสนอแนะให้ผู้สูงอายุออกกำลังกายเพื่อให้กล้ามเนื้อขาแข็งแรงซึ่งจะทำให้ลุกนั่งได้สะดวกและลดความเสี่ยงต่อการหกล้ม

คำสำคัญ: ผู้สูงอายุ, ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขา, ความกลัวการหกล้ม, ความเสี่ยงต่อการล้ม

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา 30000

Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): KangsanthiaBT@hotmail.com Tel: 08 5764 1716

ABSTRACT

The objectives of this research are to measure leg muscle strength and to study fear of falling in elderly people. This study was divided into survey research and experimental research. Personal data and fear of falling are collected using a set of questionnaires. Body dimensions are measured by anthropometer. Leg muscle strength is evaluated by strength evaluation system. Risk for falls is assessed by Five Time Sit to Stand Test (FTSST). The subjects were 45 elderly people. The age ranges 60-82 years old with 18 males (40%) and 27 females (60%). The results show that seven elderly people (15.6%) have high level of fear of falling, and fourteen senior citizens (31.1%) have moderate level of fear of falling. Chair without armrest leads to difficulty in rising up. From the analysis of FTSST, male elderly people complete FTSST in 14.16 ± 5.57 s. on average, and female elderly people complete FTSST in 16.27 ± 3.73 s. on average. The average male leg strength is 36.38 kg and the average female leg strength is 20.98 kg. Ordinal Logistic Regression is used to investigate relationship between fear of falling and age, leg muscle strength, and risk for falls. It is found that age and risk for falls have a significant effect on fear of falling. This study suggests that the elderly should exercise to strengthen their leg muscles for comfortable sit-ups and reduction in the risk of falling.

Key words: elderly, leg muscle strength, fear of falling, risk for fall

บทนำ

การเข้าสู่วัยผู้สูงอายุทำให้สุขภาพร่างกายเสื่อมสภาพลงและพบความยากลำบากในการใช้ชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น เช่น การลุกนั่ง การเคลื่อนไหว ทำทาง การยืนหรือการขึ้นบันได เป็นต้น อีกทั้งเกิดภาวะความเสี่ยงในการหกล้ม ซึ่งอาจมีอันตรายถึงขั้นเสียชีวิต (Kim *et al.*, 2004; Whitney *et al.*, 2005) ความยากลำบากในการลุกนั่งเกิดจากสาเหตุหลายประการ สาเหตุประการหนึ่งคือความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาลดลงซึ่งส่งผลให้ผู้สูงอายุมีความสามารถในการทรงตัวน้อยลง ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาจึงมีความสำคัญต่อการเคลื่อนไหวและใช้ทำทางของผู้สูงอายุ หากผู้สูงอายุหกล้มอาจจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพและความสามารถในการใช้ชีวิตประจำวันแบบปกติลดลง (Campbell *et al.*, 1981) นอกจากนี้การพักผ่อนตัวของผู้สูงอายุใช้เวลานานกว่าคนวัยหนุ่ม

สาวและยังส่งผลกระทบต่อบุตรหลานหรือญาติที่เป็นผู้ดูแล ผู้สูงอายุที่เคยหกล้มแล้วและกลัวการหกล้มมากกว่าปกติมักจะขาดความมั่นใจในการทำกิจกรรมในชีวิตประจำวันและอยู่ในภาวะความกลัวการหกล้ม (Fear of Falling) (Campbell *et al.*, 1981; Lipsitz *et al.*, 1991; Scheffer *et al.*, 2008)

จังหวัดนครราชสีมาเป็นจังหวัดที่มีจำนวนผู้สูงอายุมากเป็นอันดับ 2 ของประเทศ โดยมีผู้สูงอายุจำนวน 453,388 คนในปี พ.ศ. 2562 (Nakhon Ratchasima Provincial Statistical Office, 2019) ผู้สูงอายุที่ทำงานมีจำนวน 142,762 คนเป็นเพศชายจำนวน 94,061 คน (ร้อยละ 65.89) เพศหญิงจำนวน 48,701 คน (ร้อยละ 34.11) ในจำนวนผู้สูงอายุที่ทำงานนั้นเป็นผู้ปฏิบัติงานที่มีฝีมือด้านการเกษตรและประมงจำนวน 91,482 คน คิดเป็นร้อยละ 64.1 ซึ่งผู้สูงอายุกลุ่มนี้มีการเคลื่อนไหวและสามารถดำเนินชีวิตได้ด้วยตนเอง ในขณะที่

ผู้สูงอายุจำนวนร้อยละ 68.51 ของจำนวนผู้สูงอายุในจังหวัดนครศรีธรรมราชที่ไม่ได้ประกอบอาชีพ มีรายได้จากการรับเบี้ยยังชีพหรือบางส่วนเป็นผู้ป่วยติดเตียง ซึ่งผู้สูงอายุส่วนนี้อาจประสบปัญหาความแข็งแรงของกล้ามเนื้อ การเคลื่อนไหวร่างกายและการดำเนินกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวัน ซึ่งอาจมีผลต่อความแข็งแรงของกล้ามเนื้อและความมั่นใจในการดำเนินชีวิตประจำวันโดยปราศจากการพึ่งพิงและมีภาวะการกลืนลำบาก นอกจากนี้งานวิจัยของ Tongma *et al.* (2021) ได้บ่งชี้ว่าภาวะมวลกล้ามเนื้อน้อยในผู้สูงอายุที่บ้านมีความเสี่ยงต่อการพลัดตกหกล้มหรือความเสี่ยงต่อการเกิดโรคเรื้อรัง จึงจำเป็นต้องส่งเสริมการทำกิจกรรมทางกายและภาวะโภชนาการเพื่อคงไว้ซึ่งการทำหน้าที่ของร่างกายให้มากที่สุด ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาผลกระทบของช่วงอายุ เพศ และการประกอบอาชีพที่อาจส่งผลกระทบต่อความกลืนของผู้สูงอายุอันเป็นอุปสรรคต่อการทำกิจกรรมทางกายและส่งผลต่อความเสื่อมของร่างกายในที่สุด วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้มีดังนี้คือ 1. เพื่อวัดและวิเคราะห์ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาของผู้สูงอายุโดยจำแนกตามเพศ ช่วงอายุและการประกอบอาชีพ 2. เพื่อศึกษาภาวะความกลืนของผู้สูงอายุ โดยผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการดูแลผู้สูงอายุ เช่น การจัดเตรียมสิ่งอำนวยความสะดวกภายในบ้านและภายนอกบ้านเพื่อป้องกันการหกล้มของผู้สูงอายุได้อย่างเหมาะสม

วิธีดำเนินการวิจัย

ผู้ถูกทดสอบในงานวิจัยนี้คือผู้สูงอายุที่อยู่ในช่วงอายุ 60 - 82 ปี เป็นผู้สูงอายุที่มีสภาพร่างกายแข็งแรงสุขภาพดีไม่เป็นผู้พิการ สามารถดำเนินกิจกรรมประจำวันได้ด้วยตนเองไม่มีปัญหาทางด้านเข้าจำนวน 45 คนในจังหวัดนครศรีธรรมราช ขนาดของกลุ่มตัวอย่างจำนวน 45 คนนี้คำนวณโดยใช้หลักการ

คำนวณการใช้การวิเคราะห์กำลังการทดสอบ (Power Analysis) โดยกำหนดค่าขนาดอิทธิพล (Effect Size) เท่ากับ 0.35 (Buchner, 2010; Cohen, 1977) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2563 การศึกษาครั้งนี้เป็นทั้งการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey Research) และการวิจัยโดยการทดลอง (Experimental Research) แบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 การศึกษาข้อมูลส่วนบุคคล ได้แก่ เพศ อายุ โรคประจำตัว การประกอบอาชีพ กิจกรรมการเคลื่อนไหวภายในบ้านและระดับความกลืนการกลืน โดยมีระดับความกลืน 4 ระดับ คือ 1 = กลืนน้อยมาก 2 = กลืนน้อย 3 = กลืนปานกลาง และ 4 = กลืนมาก

ส่วนที่ 2 การวัดสัดส่วนร่างกายในท่ายืนและท่านั่ง ได้แก่ ความสูง ความสูงระดับปุ่มไหล่ ความสูงระดับเอว ความสูงระดับข้อศอก ความสูงระดับเข่า ความกว้างอก ความกว้างสะโพก ความกว้างต้นขา รอบอก และรอบเอว เป็นต้น (Krityakierne, 1998; Intaranon, 2005) เพื่อให้ทราบภาพรวมของขนาดร่างกายของผู้ถูกทดสอบซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรมต่อไป นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลความสูงและน้ำหนักไปคำนวณหาค่าดัชนีมวลกาย (Body Mass Index, BMI)

ส่วนที่ 3 การทดสอบความเสี่ยงต่อการล้มโดยใช้การทดสอบลุกนั่ง 5 ครั้ง (Five Time Sit to Stand Test, FTSST) แล้วจับเวลาที่ใช้ในการลุกนั่งทั้ง 5 ครั้ง

ส่วนที่ 4 การวัดความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขา โดยใช้เครื่องมือวัดความแข็งแรงของกล้ามเนื้อ

1. วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. การวัดสัดส่วนร่างกายใช้เครื่องมือ ดังนี้ คือ เครื่องมือวัดสัดส่วนร่างกาย (Anthropometer) (ภาพที่ 1) เครื่องมือวัดความยาว

ความหนา (Caliper) (ภาพที่ 2) สายวัด (ภาพที่ 3) และ
เครื่องชั่งน้ำหนัก (ภาพที่ 4)

เบาะนั่งเท่ากับ 43 เซนติเมตรและนาฬิกาจับเวลา
(ภาพที่ 5)

2. เครื่องมือที่ใช้วัดความเสี่ยงต่อการล้ม คือ
เก้าอี้แบบไม่มีที่วางแขน โดยมีความสูงจากพื้นถึง



ภาพที่ 1 เครื่องมือวัดสัดส่วนร่างกาย



ภาพที่ 2 Caliper



ภาพที่ 3 สายวัด



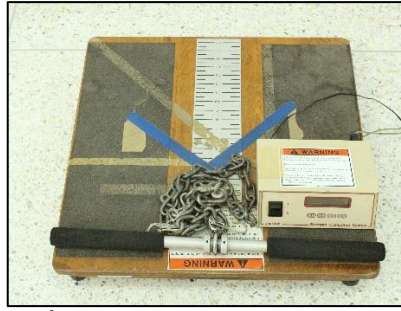
ภาพที่ 4 เครื่องชั่งน้ำหนัก



ภาพที่ 5 เก้าอี้และนาฬิกาจับเวลา

3. เครื่องมือที่ใช้วัดความแข็งแรงของ
กล้ามเนื้อขา คือ เครื่องวัดความแข็งแรงของกล้ามเนื้อ
(Strength Evaluation System) ของ Lafayette รุ่น
Jackson Model 32628 (ภาพที่ 6) ประกอบไปด้วย 1)
ฐานสี่เหลี่ยมที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์การใช้แรงดึง

เปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (Load Cell) ยึดติดอยู่
2) มือจับ 3) โซ่ยึดระหว่างมือจับและฐานสี่เหลี่ยมที่มี
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์การใช้แรงดึงเปลี่ยนเป็น
สัญญาณทางไฟฟ้า (Load Cell)



ภาพที่ 6 เครื่องวัดความแข็งแรงกล้ามเนื้อ

2. วิธีการประเมินความเสี่ยงต่อการล้มและวิธีการวัดความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขา

1. การทดสอบการลุกนั่ง 5 ครั้ง (FTSST)
ขั้นตอนในการทดสอบของงานวิจัยนี้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Lord *et al.* (2002) และ Whitney *et al.* (2005)

1. ผู้ถูกทดสอบนั่งอยู่บนเก้าอี้ที่มีความสูง 43 เซนติเมตร ลำตัวตรงมือทั้ง 2 ข้างวางบนขาท่อนบน เท้าทั้ง 2 ข้างวางราบกับพื้น (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 ท่าทางการนั่งในการทดสอบ FTSST

3. ผู้ถูกทดสอบนั่งพักเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการทดสอบซ้ำในรอบที่ 2 ตามข้อ 1 - 2 จากนั้นบันทึกค่าเวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้งลงในตารางบันทึกผล และหาค่าเฉลี่ยของเวลาดังกล่าว (Poncumbhak *et al.*, 2014)

2. การทดสอบค่าความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขา วิธีการทดสอบเป็นดังนี้

2. จากนั้นผู้ถูกทดสอบรอรับสัญญาณการลุกจากที่นั่ง เมื่อได้ยินคำว่า “เริ่ม” ผู้ถูกทดสอบลุกขึ้นแล้วยืนลำตัวตรง (ภาพที่ 8) เมื่อยืนลำตัวตรงเรียบร้อยแล้วผู้ถูกทดสอบนั่งลงบนเก้าอี้เช่นเดิม จากนั้นลุกขึ้นยืนตรงและนั่งลงบนเก้าอี้ต่อไปจนครบ 5 ครั้งจึงได้รับสัญญาณให้ “หยุด” ทั้งนี้มีการบันทึกเวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้งของผู้ถูกทดสอบไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป



ภาพที่ 8 ทำยืนตรง

1. ผู้ถูกทดสอบยืนบนฐานของเครื่องมือวัดความแข็งแรงกล้ามเนื้อขา ใช้มือทั้งสองข้างจับมือจับในท่าคว่ำมือ โดยมีการปรับตำแหน่งความยาวของโซ่ที่ยึดอยู่กับฐานสี่เหลี่ยมที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์การใช้แรงดึงเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (Load Cell) ให้มีความตึงพอดีและอยู่ในแนวตั้ง (ภาพที่ 9)

2. ผู้ถูกทดสอบย่อเข่าและแยกขา
ออก หลังและเข่าตรง เข่งประมาณ 90 องศา มอง
ตรง เมื่อผู้ถูกทดสอบได้ยินสัญญาณคำว่า “เริ่ม” ให้



ภาพที่ 9 ทำยืนเพื่อวัดความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขา

ออกแรงดึงด้วยแรงสูงสุดแล้วค้างไว้ 3 วินาที โดยไม่
แอ่นหลัง ลำตัวตรง จากนั้นอ่านค่าที่ได้แล้วบันทึกผล
(ภาพที่ 10)



ภาพที่ 10 ทำท่าทางในการออกแรงดึง

3. ผู้ถูกทดสอบมีเวลาในการพักคั่น
3 นาทีหรือจนกระทั่งหายเหนื่อย โดยวัดค่าความ
แข็งแรงของกล้ามเนื้อขาจำนวน 2 ครั้งแล้วจึงเลือกใช้
ค่าที่มากที่สุด (Lemmink *et al.*, 2001)

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

1. การวิเคราะห์ข้อมูลส่วนบุคคลและ
สัดส่วนร่างกายใช้วิธีการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา
ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ผลการวิเคราะห์

ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าความถี่ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและ
ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์

2. การวิเคราะห์ข้อมูลผลการประเมินความ
เสี่ยงต่อการล้ม (FTSST) และข้อมูลความแข็งแรง
ของกล้ามเนื้อขาเป็นการวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิง
พรรณนาโดยจำแนกตามเพศ ช่วงอายุและการ
ประกอบอาชีพ

3. การวิเคราะห์ข้อมูลดัชนีมวลกาย (Body
Mass Index, BMI) ซึ่งสูตรการคำนวณ BMI เป็นดังนี้

$$BMI = \frac{\text{น้ำหนักตัว (กิโลกรัม)}}{\text{ส่วนสูง}^2 \text{ (เมตร)}}$$

จากนั้นจึงวิเคราะห์ค่า BMI ด้วยสถิติเชิงพรรณนา
โดยจำแนกตามเกณฑ์น้ำหนักตัว

4. การวิเคราะห์สมการถดถอยโลจิสติกส์เชิง
อันดับ (Ordinal Logistic Regression Model) ด้วย
โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ โดยหาความสัมพันธ์
ระหว่างตัวแปรตามคือ ระดับความกลัวการหกล้มซึ่ง
มีอยู่ 4 ระดับ (ความกลัวระดับน้อยมาก น้อย ปาน

กลางและมาก) กับตัวแปรอิสระคือ อายุ ความ
แข็งแรงของกล้ามเนื้อขาและความเสี่ยงต่อการหกล้ม

การวิเคราะห์สมการถดถอยโลจิสติกส์เชิง
อันดับมีสมมติฐานดังนี้

โดย H0 : อายุ ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อ
ขา และความเสี่ยงต่อการหกล้มไม่มีผลต่อความกลัว
การหกล้ม

H1 : อายุ ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อ และความเสี่ยงต่อการหกล้มมีผลต่อความกลัวการหกล้ม

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สถิติการถดถอยโลจิสติกส์เชิงอันดับในการวิเคราะห์เพื่อป้องกันตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อระดับความกลัวหกล้ม นอกจากนี้ยังสามารถบอกขนาดของอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อระดับความกลัวเป็นลำดับขั้นจากระดับน้อยมากไประดับน้อย ระดับปานกลาง จนถึงระดับมาก

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ทดสอบ

1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ทดสอบจำนวน 45 คน โดยแบ่งเป็นเพศชาย 18 คน (ร้อยละ 40) และเพศหญิง 27 คน (ร้อยละ 60) พบว่า

กลุ่มผู้ถูกทดสอบส่วนใหญ่อายุระหว่าง 60 - 69 ปี โดยกลุ่มนี้มีจำนวน 27 คน (ร้อยละ 60) และมีผู้ถูกทดสอบอายุระหว่าง 70 - 79 ปีจำนวน 17 คน (ร้อยละ 37.8) และอายุ 80 - 82 ปีจำนวน 1 คน (ร้อยละ 2.2) ผลการวิเคราะห์ดัชนีมวลกายของผู้ถูกทดสอบพบว่า ผู้ถูกทดสอบส่วนใหญ่มีน้ำหนักตัวปกติ 28 คน (ร้อยละ 62.2) รองลงมาคือน้ำหนักตัวเกิน 12 คน (ร้อยละ 26.7) โรคอ้วนขั้นที่ 1 จำนวน 1 คน (ร้อยละ 2.2) โรคอ้วนขั้นที่ 3 คน (ร้อยละ 2.2) นอกจากนี้ยังพบว่า ผู้ถูกทดสอบมีสถานภาพสมรส 29 คน (ร้อยละ 64.4) หม้ายหรือหย่าร้าง 10 คน (ร้อยละ 22.2) โสด 6 คน (ร้อยละ 13.3) จากการวิเคราะห์ด้านการประกอบอาชีพพบว่า ผู้ถูกทดสอบส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเป็นเกษตรกร 17 คน (ร้อยละ 37.8) ประกอบอาชีพรับจ้างทั่วไป 14 คน (ร้อยละ 31.1) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำนวนและค่าร้อยละของผู้ทดสอบจำแนกตามช่วงอายุ BMI สถานภาพสมรสและอาชีพ

ข้อมูลทั่วไป		จำนวน	ร้อยละ
อายุ	60 - 69 ปี	27	60.0
	70 - 79 ปี	17	37.8
	82 ปี	1	2.2
	รวม	45	100.0
BMI	น้ำหนักต่ำกว่าเกณฑ์	3	6.7
	น้ำหนักตัวปกติ	28	62.2
	น้ำหนักตัวเกิน	12	26.7
	โรคอ้วนขั้นที่ 1	1	2.2
	โรคอ้วนขั้นที่ 3	1	2.2
	รวม	45	100.0
สถานภาพสมรส	โสด	6	13.3
	สมรส	29	64.4
	หม้ายหรือหย่าร้าง	10	22.2
	รวม	45	100.0

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ข้อมูลทั่วไป		จำนวน	ร้อยละ
อาชีพ	ข้าราชการบำนาญ	3	6.7
	ค้าขาย/ธุรกิจส่วนตัว	1	2.2
	รับจ้างทั่วไป	14	31.1
	เกษตรกร	17	37.8
	ไม่ได้ประกอบอาชีพ	10	22.2
รวม		45	100.0

2. ผลการวัดสัดส่วนร่างกายของผู้ถูกทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 สัดส่วนร่างกายรายการที่ 1 - 10 เป็นสัดส่วนร่างกายที่วัดในท่ายืน ส่วนรายการที่ 11 - 15 เป็นสัดส่วนร่างกายที่วัดในท่านั่งผลพบว่า ผู้ถูกทดสอบมีส่วนสูงเฉลี่ย 157.05 เซนติเมตรและมีน้ำหนักเฉลี่ย 56.77 กิโลกรัม นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยของความสูงระดับเข่าในท่ายืนเท่ากับ 42.42 เซนติเมตร

ความสูงปุ่มไหล่ท่ายืน 129.02 เซนติเมตร ความหนาหน้าท้อง (ขณะนั่ง) 23.81 เซนติเมตร ความสูงจากพื้นถึงข้อพับขา 39.97 เซนติเมตร สัดส่วนร่างกายบางรายการ เช่น รอบอก รอบเอว ความสูง และความสูงระดับเอวมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูงเนื่องจากกลุ่มผู้ถูกทดสอบมีความสูงและขนาดของลำตัวที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2 สัดส่วนร่างกายท่ายืนและท่านั่งของผู้ถูกทดสอบทั้งหมด 45 คน (หน่วยเป็นเซนติเมตร)

ลำดับ	รายการ	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	ส่วน	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
				เบี่ยงเบนมาตรฐาน		
1	รอบอก	45	89.77	8.28	69.45	106.35
2	รอบเอว	45	84.53	9.48	67.85	107.00
3	ความกว้างอก	45	26.99	2.41	22.85	34.55
4	ความกว้างสะโพก	45	31.61	2.21	27.35	37.05
5	ความกว้างต้นขา	45	11.47	1.42	8.80	15.35
6	ความสูง	45	157.05	8.26	143.05	175.00
7	ความสูงระดับปุ่มไหล่	45	129.02	7.15	116.55	146.00
8	ความสูงระดับเอว	45	99.67	6.68	87.40	117.40
9	ความสูงระดับข้อศอก(ขณะงอ)	45	94.94	5.34	85.05	106.80
10	ความสูงระดับเข่า	45	42.42	3.70	35.85	49.85
11	ความสูงจากที่นั่ง - ข้อศอก (ขณะนั่ง)	45	18.22	2.72	10.55	24.60
12	ความสูงจากพื้น - ข้อพับขา (ขณะนั่ง)	45	39.97	2.05	35.15	48.90
13	ความกว้างสะโพก (ขณะนั่ง)	45	33.06	3.54	25.00	39.85

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ลำดับ	รายการ	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
				ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	
14	ความหนาหน้าท้อง (ขณะนั่ง)	45	23.81	3.44	17.65	30.55
15	ระยะห่างจากก้น - หัวเข่า (ขณะนั่ง)	45	44.26	2.50	40.35	50.80
16	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	45	56.77	10.01	38.70	79.50

2. ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

2.1 ผลการวิเคราะห์ความกลัวการหกล้ม

ผลการวิเคราะห์ความกลัวการหกล้มจำแนกตามเพศพบว่า มีผู้ถูกทดสอบชายจำนวน 18 คนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.11 ± 0.963 คะแนนและผู้ถูกทดสอบหญิง 27 คนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.48 ± 1.122 คะแนน ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างเพศชายและเพศหญิงในด้านความกลัวการหกล้มโดย T-Test พบว่า เพศไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (ค่า $p > 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเพศชายหรือเพศหญิงไม่แตกต่างกัน

ในด้านความกลัวการหกล้ม นอกจากนี้ยังพบว่า ผู้ถูกทดสอบส่วนใหญ่จำนวน 14 คน (ร้อยละ 31.1) มีความกลัวการหกล้มในระดับกลัวปานกลาง รองลงมาคือผู้ถูกทดสอบจำนวน 13 คน (ร้อยละ 28.9) มีความกลัวการหกล้มในระดับกลัวน้อยมาก ผู้ถูกทดสอบจำนวน 11 คน (ร้อยละ 24.4) มีความกลัวการหกล้มในระดับกลัวน้อยและผู้ถูกทดสอบจำนวน 7 คน (ร้อยละ 15.6) มีความกลัวการหกล้มในระดับกลัวมากตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 จำนวนและร้อยละของความกลัวการหกล้มจำแนกตามเพศ

ระดับความกลัว	เพศ		จำนวน	ร้อยละ
	ชาย (คน)	หญิง (คน)		
กลัวน้อยมาก	6	7	13	28.9
กลัวน้อย	5	6	11	24.4
กลัวปานกลาง	6	8	14	31.1
กลัวมาก	1	8	7	15.6
รวม	18	27	45	100
ค่าเฉลี่ย	2.11	2.48	2.33	
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.963	1.122	1.066	

2.2 ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อการล้มและความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขา

ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อการล้มโดยพิจารณาจากเวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้งพบว่า

ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้งของเพศชายเท่ากับ 14.16 ± 5.57 วินาที ส่วนของเพศหญิงเท่ากับ 16.27 ± 3.73 วินาที ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขา

พบว่า ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงกล้ามเนื้อขาของเพศชายมากกว่าของเพศหญิง โดยค่าเฉลี่ยของเพศชายเท่ากับ 36.38 กิโลกรัม ส่วนของเพศหญิงเท่ากับ 20.98 กิโลกรัม ดังตารางที่ 4 ผลการทดสอบพบว่า เพศชายและหญิงมีความแตกต่างกันในด้านความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งมีสาเหตุจากผู้สูงอายุเพศหญิงมีภาวะมวลกล้ามเนื้อน้อยกว่าเพศชาย (Patel

et al., 2013) นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาของเพศชายเท่ากับ 26.86 ซึ่งสูงกว่าค่าของเพศหญิง แสดงให้เห็นว่าในกลุ่มของผู้ถูกทดสอบเพศชายมีคนที่แข็งแรงมาก และคนที่แข็งแรงน้อยทำให้ค่าความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขามีความแตกต่างกันมากในกลุ่มเดียวกัน

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้งและค่าแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาจำแนกตามเพศ

	เพศ	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้ง (วินาที)	ชาย	18	14.16	5.57
	หญิง	27	16.27	3.73
ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขา (กิโลกรัม)	ชาย	18	36.38	26.86
	หญิง	27	20.98	8.88

ผลการวิเคราะห์ความเกี่ยวข้องการล้มโดยใช้ค่าเวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้งของผู้ถูกทดสอบจำแนกตามช่วงอายุแต่ละช่วงอายุพบว่า ค่าเฉลี่ยของช่วงอายุ 60 - 69 ปีเท่ากับ 16.30 ± 5.14 วินาที ค่าเฉลี่ยของช่วงอายุ 70 - 79 ปีเท่ากับ 14.19 ± 3.48 วินาที และอายุ 80 ปีขึ้นไปใช้เวลาเฉลี่ยเท่ากับ 16.41 วินาที ทั้งนี้ผู้ถูกทดสอบที่ใช้เวลามากในการลุกนั่งมีความเสี่ยงต่อการล้มมากกว่าผู้ถูกทดสอบที่ใช้เวลาน้อย (Poncumhak *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2020) นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาของผู้ถูกทดสอบช่วงอายุ 60 - 69 ปีเท่ากับ 31.44 ± 22.97 กิโลกรัม ผู้ถูกทดสอบช่วงอายุ 70 - 79 ปีมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาเท่ากับ 21.18 ± 10.71 กิโลกรัมและผู้ถูกทดสอบช่วงอายุ 80 ปีขึ้นไปมี

ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาน้อยที่สุดเท่ากับ 15.30 กิโลกรัม ดังตารางที่ 5 ผลของค่าเวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้งและความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาของแต่ละช่วงอายุที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าอายุไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการลุกขึ้นยืน ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Promklang *et al.* (2018) เมื่อเปรียบเทียบผลงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Vander Linden *et al.* (1994) ในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่า ผู้ถูกทดสอบช่วงอายุ 60 - 69 ปีและ 70-79 ปีในงานวิจัยนี้ใช้เวลาลุกนั่ง 5 ครั้งเท่ากับ 16.30 และ 14.19 วินาทีตามลำดับ ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าผู้ถูกทดสอบในช่วงอายุ 61-77 ปี ในงานวิจัยของ Vander Linden *et al.* (1994) ซึ่งใช้เวลาเท่ากับ 19.80 วินาที

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้งและค่าแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาจำแนกตามช่วงอายุ

	ช่วงอายุ	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้ง (วินาที)	60 - 69 ปี	27	16.30	5.14
	70 - 79 ปี	17	14.19	3.48
	80 ปีขึ้นไป	1	16.41	0.00
ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขา (กิโลกรัม)	60 - 69 ปี	27	31.44	22.97
	70 - 79 ปี	17	21.18	10.71
	80 ปีขึ้นไป	1	15.30	0.00

เมื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อการล้มโดยใช้ค่าเวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้งจำแนกตามอาชีพพบว่า ผู้ถูกทดสอบที่ประกอบอาชีพค้าขาย/ธุรกิจส่วนตัวใช้เวลาในการลุกนั่ง 5 ครั้งเท่ากับ 11.76 วินาทีใช้เวลาลุกนั้มน้อยที่สุด ในขณะที่ผู้ถูกทดสอบที่ประกอบอาชีพข้าราชการบำนาญใช้เวลาในการลุกนั่ง 5 ครั้งมากที่สุดคือ 18.93 วินาทีโดยเฉลี่ย ส่วนผู้ถูกทดสอบ

ที่ประกอบอาชีพเกษตรกรซึ่งมีจำนวน 17 รายใช้เวลาในการลุกนั่ง 5 ครั้งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 15.00 ± 4.40 วินาที ส่วนผู้ถูกทดสอบที่ประกอบอาชีพรับจ้างทั่วไปมีจำนวน 14 รายใช้เวลาในการลุกนั่ง 5 ครั้งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 15.71 ± 4.47 วินาที ในขณะที่ผู้ถูกทดสอบที่เป็นข้าราชการบำนาญใช้เวลาในการลุกนั่ง 5 ครั้งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 18.93 วินาที ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้งและค่าความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาจำแนกตามอาชีพ

	อาชีพ	จำนวน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เวลาที่ใช้ในการลุกนั่ง 5 ครั้ง (วินาที)	ข้าราชการบำนาญ	3	18.93	9.68
	ค้าขาย/ธุรกิจส่วนตัว	1	11.76	0.00
	รับจ้างทั่วไป	14	15.71	4.47
	เกษตรกร	17	15.00	4.40
	ไม่ได้ประกอบอาชีพ	10	15.06	3.69
ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขา (กิโลกรัม)	ข้าราชการบำนาญ	3	16.67	6.16
	ค้าขาย/ธุรกิจส่วนตัว	1	24.70	0.00
	รับจ้างทั่วไป	14	39.39	26.94
	เกษตรกร	17	23.65	15.28
	ไม่ได้ประกอบอาชีพ	10	19.29	6.40

ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาของแต่ละกลุ่มอาชีพพบว่า ผู้ถูกทดสอบที่ประกอบอาชีพรับจ้างทั่วไปมีค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขามากที่สุด (39.39 กิโลกรัม)

รองลงมาคือผู้ถูกทดสอบที่ประกอบอาชีพค้าขาย/ธุรกิจส่วนตัว (24.70 กิโลกรัม) และผู้ถูกทดสอบที่ประกอบอาชีพเกษตรกร (23.65 กิโลกรัม) ในขณะที่ผู้ถูกทดสอบที่ประกอบอาชีพข้าราชการบำนาญมี

ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาซ้ายที่น้อยที่สุด (16.67 กิโลกรัม)

ผลการศึกษาความเสี่ยงต่อการล้มของผู้ถูกทดสอบที่ประกอบอาชีพต่างๆ พบว่า ผู้ถูกทดสอบที่ประกอบอาชีพเกษตรกร รับจ้างทั่วไปและค้าขายใช้เวลาน้อยในการทดสอบการลุกนั่ง 5 ครั้งซึ่งบ่งชี้ว่ามีความเสี่ยงต่อการหกล้มน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอาชีพดังกล่าวมีการเคลื่อนไหวร่างกายมากในการทำงาน นอกจากนี้ยังพบว่า กลุ่มผู้ถูกทดสอบที่มีอาชีพข้าราชการบำนาญใช้เวลาในการลุกนั่ง 5 ครั้งมากที่สุดอาจเนื่องมาจากประเภทของอาชีพมีการเคลื่อนไหวร่างกายน้อยซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ballard *et al.* (2004) ที่ให้ผลสรุปว่า การออกกำลังกายให้กล้ามเนื้อขาที่แข็งแรงจะทำให้ทรงตัวดีขึ้นลดการหกล้มได้และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Galli *et al.* (2008) และ Whitney *et al.* (2005) ที่สรุปว่าการลุกนั่งจากเก้าอี้ต้องใช้ทักษะด้านการ

เคลื่อนไหวที่เกี่ยวข้องกับสมดุลร่างกายและความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาส่งผลต่อการลุกนั่ง

2.3 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยโลจิสติกส์

ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยโลจิสติกส์เชิงอันดับเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามคือระดับความกลัวการหกล้ม กับตัวแปรอิสระคือ อายุ ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาและความเสี่ยงต่อการล้มพบว่า ผลการวิเคราะห์สมการโลจิสติกส์เชิงอันดับมีความเหมาะสมเมื่อพิจารณาความเป็นไปได้โดย Log-Likelihood (LL) มีค่าเท่ากับ -58.275 และผลการทดสอบความเหมาะสม Goodness-of-fit โดยวิธี Pearson และ Deviance พบว่าค่า Chi-Square เท่ากับ 127.502 และ 98.026 ซึ่งไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (ค่า $p > 0.05$) จึงถือว่าสมการถดถอยโลจิสติกส์ที่ได้มีความเหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการถดถอยโลจิสติกส์ Goodness-of-Fit Tests

Method	Chi-Square	DF	P
Pearson	127.502	129	0.521
Deviance	98.026	129	0.981

ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยโลจิสติกส์เป็นดังนี้

1. อายุมีความสัมพันธ์กับระดับความกลัวการหกล้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($Z = 2.02$; $p\text{-value} = 0.043$, 95% CI = 1.00 - 1.25) และพบว่าอายุที่เพิ่มมากขึ้นมีโอกาสน่าจะเป็น (Odds Ratio) ที่เพิ่มขึ้นร้อยละตามกลุ่มอ้างอิงเป็น 1.12 เท่าของระดับความกลัวการหกล้มเพิ่มขึ้น โดยเทียบกับความกลัวระดับน้อยมาก

2. ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาไม่มีความสัมพันธ์กับระดับความกลัวการหกล้มอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($Z = -1.32$; $p\text{-value} = 0.186$, 95% CI = 0.94 - 1.01) และพบว่าความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขามีโอกาสน่าจะเป็น (Odds Ratio) ที่น้อยลงเป็น 0.98 เท่าของระดับความกลัวการหกล้มที่เพิ่มขึ้น โดยเทียบกับความกลัวระดับน้อยมาก

3. ความเสี่ยงต่อการล้มมีความสัมพันธ์กับระดับความกลัวการหกล้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($Z = 3.39$; $p\text{-value} = 0.001$, 95% CI = 1.10 - 1.42) และพบว่าความเสี่ยงต่อการล้มมีโอกาสน่าจะเป็น (Odds Ratio) ที่เพิ่มขึ้นร้อยละตามกลุ่มอ้างอิงเป็น 0.98 เท่าของระดับความกลัวการหกล้มเพิ่มขึ้น โดย

เทียบกับความกลัวระดับน้อยมากดังแสดงในตารางที่ 8 ซึ่งงานวิจัยของ Punyakunlaset *et al.* (2019) ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่เป็นลำดับขั้นเช่นเดียวกับข้อมูลในงานวิจัยนี้

สมการที่ได้จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อระดับความกลัวการหกล้มสามารถเขียนในแบบจำลองการถดถอยได้ 3 แบบจำลองได้แก่แบบจำลองที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุ

ความเสี่ยงต่อการล้มกับความกลัวการหกล้มระดับน้อย ดังสมการที่ (1) แบบจำลองที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุ ความเสี่ยงต่อการล้มต่อความกลัวการหกล้มระดับปานกลาง ดังสมการที่ (2) แบบจำลองที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุ ความเสี่ยงต่อการล้มต่อความกลัวการหกล้มระดับมาก ดังสมการที่ (3)

$$\text{ความกลัวระดับน้อย} = -9.288 + 0.114\text{อายุ} + 0.222 \text{ ความเสี่ยงต่อการล้ม} \quad (1)$$

$$\text{ความกลัวระดับปานกลาง} = -10.697 + 0.114\text{อายุ} + 0.222 \text{ ความเสี่ยงต่อการล้ม} \quad (2)$$

$$\text{ความกลัวระดับมาก} = -12.999 + 0.114\text{อายุ} + 0.222 \text{ ความเสี่ยงต่อการล้ม} \quad (3)$$

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ด้วยสมการถดถอยโลจิสติกส์เชิงอันดับ

Predictor	Coef	SE Coef	Z	P	Odds Ratio	95% CI	
						Lower	Upper
ความกลัวระดับมาก	-12.9987	4.39555	-2.96	0.003			
ความกลัวระดับปานกลาง	-10.6974	4.23002	-2.53	0.011			
ความกลัวระดับน้อย	-9.28838	4.16065	-2.23	0.026			
อายุ	0.114253	0.0565630	2.02	0.043	1.12	1.00	1.25
ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขา	-0.0232446	0.0175742	-1.32	0.186	0.98	0.94	1.01
ความเสี่ยงต่อการล้ม	0.222772	0.0657503	3.39	0.001	1.25	1.10	1.42

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการกลัวการหกล้มกับอายุ ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาและความเสี่ยงต่อการล้มพบว่า 1. อายุมีความสัมพันธ์กับระดับความกลัวการหกล้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยอายุเพิ่มมากขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงทางร่างกายและส่งผลให้ดำเนินกิจกรรมประจำวันได้ช้าลงเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Han *et al.* (2016) ที่ศึกษาผู้สูงอายุในประเทศจีนพบว่า เมื่ออายุเพิ่มมากขึ้นช่วง 50 ปีมวลของกล้ามเนื้อลดลงร้อยละ 1-2 ต่อปีและความแข็งแรงของกล้ามเนื้อลดลงมากยิ่งขึ้นเมื่ออายุเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่ออายุมากขึ้นผู้สูงอายุเกิดความ

กลัวการหกล้มมากขึ้นประกอบกับความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาลดลงรวมไปถึงปัญหาทางด้านสายตาที่อาจส่งผลต่อการประเมินระยะทางทำให้ผู้สูงอายุมีความกังวลในการดำเนินชีวิตประจำวันและการลुकนั่งยากลำบากขึ้น (Brooks, 1986; Tinetti *et al.*, 1990) 2. ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาไม่มีความสัมพันธ์กับระดับความกลัวการหกล้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและ 3. ความเสี่ยงต่อการล้มมีความสัมพันธ์กับระดับความกลัวการหกล้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผู้ถูกทดสอบที่มีความกลัวการหกล้มระดับมากเมื่อทรงตัวลุกขึ้นยืนจะมีการเกร็งตัวขณะลुकนั่งเก้าอี้

(Alexander, 1994) ทำให้ใช้เวลาในการลุกนั่งเก้าอี้มากกว่าผู้ถูกทดสอบที่มีความกลัวการหกล้มในระดับต่ำ

สรุป

การศึกษานี้สรุปได้ว่า 1) ค่าความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาของผู้ถูกทดสอบในช่วงอายุ 60 - 69 ปีมีค่าเฉลี่ย 31.44 กิโลกรัม ช่วงอายุ 70 - 79 ปีมีค่าเฉลี่ย 21.18 กิโลกรัมและอายุ 82 ปีมีค่าเฉลี่ย 15.30 กิโลกรัม เพศชายและเพศหญิงมีค่าความแข็งแรงกล้ามเนื้อขาเท่ากับ 36.38 และ 20.98 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยผู้ถูกทดสอบที่ประกอบอาชีพรับจ้างทั่วไปมีความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขามากกว่ากลุ่มอื่นๆ 2) ภาวะความกลัวการหกล้มของเพศชายและเพศหญิงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า $p > 0.05$) โดยปัจจัยที่มีผลต่อระดับความกลัวการหกล้มได้แก่ อายุและความเสี่ยงต่อการหกล้ม

งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการดูแลผู้สูงอายุได้ดังนี้คือ ผู้สูงอายุเพศชายและหญิงมีความกลัวการหกล้มเช่นเดียวกัน จึงต้องมีการจัดเตรียมความพร้อมด้านสิ่งแวดล้อมความสะดวกในบ้านและสถานที่ต่างๆ เช่น การติดตั้งราวจับในห้องน้ำ ห้องนอน และพื้นที่ต่างๆ นอกจากนี้ผู้สูงอายุที่กล้ามเนื้อขาที่มีความแข็งแรงน้อยและมีความเสี่ยงต่อการหกล้ม ซึ่งสังเกตได้จากการใช้เวลานานในการลุกมีแนวโน้มที่จะกลัวการล้ม ดังนั้นสมาชิกในครอบครัวของผู้สูงอายุควรใส่ใจในการช่วยเหลือเมื่อผู้สูงอายุจะลุกขึ้นและส่งเสริมการเคลื่อนไหวและออกกำลังกายเพื่อให้กล้ามเนื้อขาแข็งแรงและเกิดความมั่นใจในการดำเนินกิจวัตรประจำวัน ยกตัวอย่างเช่น ผู้สูงอายุกลุ่มข้าราชการบำนาญ ซึ่งใช้เวลาในการลุกนั่งมากกว่าผู้สูงอายุกลุ่มอื่นๆ จึงควรจัดสิ่งแวดล้อมความสะดวก เช่น ราวจับ หรือ ที่จับยึดใกล้กับที่นั่งโถส้วม เพื่อช่วยให้ผู้สูงอายุกลุ่มนี้

สามารถลุกขึ้นได้อย่างมั่นใจและปลอดภัย ข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยเพิ่มเติมคือ ควรมีการศึกษาปัจจัยด้านอื่นๆ เพิ่มเติมที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาและการกลัวการหกล้ม เช่น โรคประจำตัว การสูบบุหรี่ การรับประทานเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษานี้ขอขอบคุณผู้ถูกทดสอบที่สมัครใจเข้าร่วมทดสอบในงานวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้ให้ลุล่วงด้วยดี และเป็นไปตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

- Alexander, N.B. 1994. Postural control in older adults. **Journal of the American Geriatrics Society** 42: 93-108.
- Ballard, J.E., McFarland, C., Wallace, L.S., Holiday, D.B. and Roberson, G. 2004. The effect of 15 weeks of exercise on balance, leg strength, and reduction in falls in 40 women aged 65 to 89 years. **Journal of the American Medical Women's Association** 59(4): 255-261.
- Brooks, V.B. 1986. **The neural basis of motor control.** Oxford University Press, Oxford.
- Buchner, A. 2010. **G*Power: users guide-analysis by design.** Web Page of Heinrich-Heine Universität - Institut für experimentelle Psychologie. Available from: <http://www.psych.uni-duesseldorf.de/abteilungen/aap/gpower3>, March 1, 2019.

- Campbell, A.J., Reinken, J., Allen, B. and Martinez, G. 1981. Falls in old age: A study of frequency and related clinical factors. **Age and Ageing** 10: 264-270.
- Chen, L.K., Woo, J., Assantachai, P., Auyeung, T.W., Chou, M.Y., Iijima, K., Jang, H.C., Kang, L., Kim, M., Kim, S., Kojima, T., Kuzuya, M., Lee, J.S.W., Lee, S.Y., Lee, W.J., Lee, Y., Liang, C.K., Lim, J.Y., Lim, W. S., Peng, L.N., Sugimoto, K., Tanaka, T., Won, C.W., Yamada, M., Zhang, T., Akishita, M. and Arai, H. 2020. Asian working group for sarcopenia: 2019 consensus update on sarcopenia diagnosis and treatment. **Journal of the American Medical Directors Association** 21(3): 300-307.
- Cohen, J. 1977. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. 1st ed. Erlbaum L. Publisher, Academic Press, New York.
- Galli, M., Cimolin, V. and Crivellini, M. 2008. Campanini I quantitative analysis of sit to stand movement: experimental set-up definition and application to healthy and hemiplegic adults. **Gait Posture** 28(1): 80-85.
- Han, P., Kang, L., Guo, Q., Wang, J., Zhang, W., Shen, S., Wang, X., Dong, R., Ma, Y., Shi, Y., Shi, Z., Li, H., Li, C., Ma, Y., Wang, L. and Niu, K. 2016. Prevalence and factors associated with sarcopenia in suburb-dwelling older Chinese using the Asian working group for sarcopenia definition. **The Journals of Gerontology Series A, Biological Sciences and Medical Sciences** 71(4):529-535.
- Intaranon, K. 2005. **Ergonomics**. Chulalongkorn University Press, Bangkok. (in Thai)
- Kim, C.M., Eng, J.J. and Whittaker, M.W. 2004. Level walking and ambulatory capacity in persons with incomplete spinal cord injury: relationship with muscle strength. **Spinal Cord** 42(3): 156-162.
- Krityakierne, O. 1998. Design of chair for the elderly. Bachelor of Architecture (Industrial Design), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. (in Thai)
- Lemmink, K.A.P.M., Han, K., de Greef, M.H.G., Rispens, P. and Stevens, M. 2001. Reliability of the Groningen fitness test for the elderly. **Journal of Aging and Physical Activity** 9(2): 194-212.
- Lipsitz, L.A., Jonsson, P.V., Relley, M.M. and Roesner, J.S. 1991. Causes and correlates of recurrent falls in ambulatory frail elderly. **Journal of Gerontology** 46: 114-122.
- Lord, S.R., Murray, S.M., Chapman, K., Munro, B. and Tiedemann, A. 2002. Sit-to-stand performance depends on sensation, speed, balance, and psychological status in addition to strength in older people. **Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences Medical Sciences** 57(8): 539-543.
- Nakhon Ratchasima Provincial Statistical Office. 2019. **Elderly in Nakhon Ratchasima Province**. Situation of the elderly in Nakhon Ratchasima province 2019. Available Source: http://nkrat.nso.go.th/index.php?option=com_content&view=article&id=559:older62&catid=115:

- 2017-11-07-04-53-35&Itemid=590, May 20, 2020. (in Thai)
- Patel, H.P., Syddall, H.E. and Jameson, K. 2013. Prevalence of sarcopenia in community-dwelling older people in the UK using the European Working Group on Sarcopenia in Older People (EWGSOP) definition: findings from the Hertfordshire Cohort Study (HCS). **Age Ageing** 42: 378-384.
- Poncumhak, P., Insorn, T., Prasittimet, N. and Manota, P. 2014. The pilot study on the risk of fall prediction in Thai elderly using five times sit-to-stand test. **Srinagarind Medical Journal** 29(3): 237-242.
- Promklang, D., Piaseu, N., Maruo, S.J. and Tantiprasoplap, S. 2018. Factors associated with sarcopenia amongst older adults in congested communities in Bangkok. **Thai Journal of Nursing Council** 33(1): 49-60. (in Thai)
- Punyakunlaset, S., Chansatitporn, N. and Vatanasomboon, P. 2019. Factors affecting level of intention to quit smoking among police officers in the central region, Thailand. **Journal of Health Science** 28(6): 1029-1039. (in Thai)
- Scheffer, A.C., Schuurmans, M.J., Dijk, N.V., Hooft, T.V. and Rooij, S.E. 2008. Fear of falling: measurement strategy, prevalence, risk factors and consequences among older persons. **Age Ageing** 37: 19-24.
- Tinetti, M.E., Richman, D. and Powell, L. 1990. Falls efficacy as a measure of fear of falling. **Journal of Gerontology Psychological Sciences** 45(6): 239-243.
- Tongma, S., Klinputtan, N., Sawangchit, S., Bandansin, J. and Srithumsuk, W. 2021. Nurses' role in home care for older people with sarcopenia. **Journal of The Royal Thai Army Nurses** 22(1): 65-73. (in Thai)
- Vander Linden, D.W., Brunt, D. and McCulloch, M.U. 1994. Variant and invariant characteristics of the sit-to-stand task in healthy elderly adults. **Archives of Physical Medicine and Rehabilitation** 75(6): 653-660.
- Whitney, S.L., Wrisley, D.M., Marchetti, G.F., Gee, M.A., Redfern, M.S. and Furman, J.M. 2005. Clinical measurement of sit-to-stand performance in people with balance disorders: validity of data for the Five-Times-Sit-to-Stand Test. **Physical Therapy** 85(10): 1034-45.

การศึกษาประสิทธิภาพของเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบ สำหรับตัวแบบการถดถอยพหุคูณ

A Study of the Effectiveness of Model Selection Criteria for Multiple Regression Model

วารางคณา เรียนสุทธิ์*

Warangkhan Riansut*

Received: 8 March 2021, Revised: 13 May 2021, Accepted: 31 August 2021

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบสำหรับตัวแบบการถดถอยพหุคูณ 10 เกณฑ์ ได้แก่ เกณฑ์ AIC, BIC, HQIC, AICc, AICu, HQICc, KIC, KICc, KICc_{SB} และ KICc_{HM} ภายใต้การจำลองข้อมูลที่มีความแตกต่างของขนาดตัวอย่าง จำนวนพารามิเตอร์ในตัวแบบ สัมประสิทธิ์การถดถอย และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน ผลการศึกษาพบว่า กรณีตัวอย่างขนาดเล็ก ตัวแบบระบุยากถึงยากมาก เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ AIC, HQIC, AICc และ HQICc และถ้าตัวแบบระบุง่ายถึงง่ายมาก เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ AICu และ KICc กรณีตัวอย่างขนาดกลาง ตัวแบบระบุยากถึงยากมาก เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ AIC และ AICc และถ้าตัวแบบระบุง่ายถึงง่ายมาก เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ AICu และ KICc สำหรับกรณีตัวอย่างขนาดใหญ่ เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ BIC อีกทั้งยังพบว่า ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความถูกต้องของการคัดเลือกตัวแบบลดลง ดังนั้นควรตรวจสอบความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนหลังจากการสร้างตัวแบบทุกครั้ง เนื่องจากมีผลกระทบต่อเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบ สำหรับตัวอย่างขนาดเล็ก จะคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องน้อย แต่ถ้าตัวอย่างมีขนาดใหญ่ขึ้นจะคัดเลือกได้ถูกต้องเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: เกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบ, ตัวแบบการถดถอยพหุคูณ, ประสิทธิภาพ

สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง ตำบลบ้านพร้าว อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง 93210
Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science, Thaksin University, Phattalung Campus, Ban Prao, Papayom, Phattalung 93210, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): warang27@gmail.com Tel: 08 8790 8476

ABSTRACT

The study aims to compare the effectiveness of the ten model selection criteria for multiple regression model, namely, AIC, BIC, HQIC, AICc, AICu, HQICc, KIC, KIC_c, KIC_{SB}, and KIC_{HM}. The conditions for simulation were differences in sample size, number of parameters in the model, regression coefficient, and error variance. The results of a small sample case showed that if the true model is difficult to identify, the appropriate criteria are AIC, HQIC, AICc, and HQICc. If the true model is easy to identify, the appropriate criteria are AICu and KICc. In a medium sample case, if the true model is difficult to identify, the appropriate criteria are AIC and AICc. If the true model is easy to identify, the appropriate criteria are AICu and KICc. For the large sample case, an appropriate criterion is BIC. It was also found that when the error variance increased, the efficiency of all model selection criteria decreased. Therefore, the error variance should be checked after model construction because it affects the model selection criteria. For the small sample size, model selection criteria have low accuracy, but it is more accurate in a larger sample.

Key words: model selection criterion, multiple regression model, efficiency

บทนำ

ปัญหาสำคัญของการคัดเลือกตัวแบบการถดถอยที่เหมาะสมจากตัวแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพื่อใช้ในการพยากรณ์ข้อมูลในอนาคตนับเป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญ ในโลกความเป็นจริงเราไม่สามารถทราบได้เลยว่าตัวแบบที่แท้จริง (True Model) คือตัวแบบใด แต่เราคาดหวังว่าจะสามารถหาตัวแบบที่มาเป็นตัวแทนที่ถูกต้องและเหมาะสมได้ เกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบเป็นเครื่องมือหนึ่งที่มีประโยชน์ในการพิจารณาความเหมาะสมของตัวแบบ โดยการประเมินว่าตัวแบบใดที่ให้ความสมมูลที่ดีที่สุด กล่าวคือ สามารถคัดเลือกได้ว่าตัวแบบใดที่มีจำนวนตัวแปรในสมการที่เพียงพอ ถูกต้อง และเหมาะสม ไม่มากและไม่น้อยเกินไป (Goodness of Fit และ Parsimony) เกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบเกณฑ์แรกที่เป็นที่รู้จัก คือ Akaike Information Criterion (AIC) (Akaike, 1973; Akaike, 1974) เกณฑ์นี้เป็นตัวประมาณไม่เอนเอียงเชิงเส้นกำกับ (Asymptotically Unbiased

Estimator) ของความผันแปรของ Kullback's Directed Divergence ซึ่ง Directed Divergence เป็นที่รู้จักกันในนามของ Kullback-Leibler Information หรือ I-Divergence หรือ Relative Entropy เพื่อประเมินความแตกต่างระหว่างตัวแบบทางสถิติ 2 ตัวแบบ คือ ตัวแบบที่แท้จริงและตัวแบบโดยประมาณ (Fitted Model) เกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบเกณฑ์อื่นๆ ที่เป็นที่ยอมรับได้แก่ Bayesian Information Criterion (BIC) (Schwarz, 1978) Hannan และ Quinn Information Criterion (HQIC) (Hannan and Quinn, 1979) เกณฑ์การปรับแก้ของ AIC (AICc) (Hurvich and Tsai, 1989) เกณฑ์การปรับแก้ของ AICc (AICu) (McQuarrie *et al.*, 1997) เกณฑ์การปรับแก้ของ HQIC (HQICc) (McQuarrie and Tsai, 1998) Kullback Information Criterion (KIC) (Cavanaugh, 1999) เกณฑ์การปรับแก้ของ KIC โดย Cavanaugh (KIC_c) (Cavanaugh, 2004) เกณฑ์การปรับแก้ของ KIC โดย Seghouane และ Bekara (KIC_{SB}) (Seghouane and Bekara, 2004) และเกณฑ์การปรับแก้

ของ KIC โดย Hafidi และ Mkhadri ($KIC_{c_{HM}}$) (Hafidi and Mkhadri, 2006) ถึงแม้ว่าเกณฑ์ AIC ยังคงเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการคัดเลือกตัวแบบ แต่เกณฑ์ BIC, HQIC, AICc, AICu, HQICc, KIC, KIC_{c_c} , $KIC_{c_{SB}}$ และ $KIC_{c_{HM}}$ นับเป็นคู่แข่งที่ได้รับความนิยมเช่น เกณฑ์ BIC มีแนวโน้มที่จะคัดเลือกตัวแบบที่มีจำนวนตัวแปรน้อยกว่าเกณฑ์ AIC (Neath and Cavanaugh, 1997) เกณฑ์ KIC เป็นเกณฑ์ในลักษณะสมมาตร ซึ่งรวมข้อมูลข่าวสารระหว่าง Directed Divergence ทั้ง 2 รูปแบบ ดังนั้นเกณฑ์ KIC จึงเป็นมาตรวัดความแตกต่างของตัวแบบที่มีความละเอียดอ่อนกว่าเกณฑ์ AIC ซึ่งวัดเพียงองค์ประกอบเฉพาะแต่ละส่วนเท่านั้น (Cavanaugh, 1999; Cavanaugh, 2004) สำหรับในกรณีตัวอย่างขนาดเล็ก เกณฑ์ KIC_c มีแนวโน้มที่จะรับมือกับปัญหาของการประมาณค่า Kullback's Symmetric Divergence ที่ต่ำเกินไป (Cavanaugh, 2004; Seghouane and Bekara, 2004; Hafidi and Mkhadri, 2006) อย่างไรก็ตาม ทั้ง 10 เกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบที่กล่าวมายังมีข้อดีและข้อเสียในแต่ละประเด็นที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการศึกษากครั้งนี้จึงต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบสำหรับตัวแบบการถดถอยพหุคูณ ทั้ง 10 เกณฑ์ ได้แก่ เกณฑ์ AIC, BIC, HQIC, AICc, AICu, HQICc, KIC, KIC_{c_c} , $KIC_{c_{SB}}$ และ $KIC_{c_{HM}}$ เพื่อที่จะสรุปว่าควรใช้เกณฑ์ใดภายใต้สถานการณ์ใด โดยการศึกษาทั้งหมดจะกระทำภายใต้การจำลองข้อมูลในสถานการณ์ต่างๆ ได้แก่ ความแตกต่างในขนาดตัวอย่าง จำนวนตัวแปรอิสระในสมการสัมประสิทธิ์การถดถอย และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน เกณฑ์ที่จะถูกจัดให้เป็นเกณฑ์ที่ดีที่สุดเมื่อมีความน่าจะเป็นต่ำที่จะมีจำนวนตัวแปรในสมการมากหรือน้อยเกินไปและมีความน่าจะเป็นสูงที่สุดในการเลือกคัดเลือกรูปแบบได้ถูกต้อง จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า Keerativibool (2014a) ได้ศึกษาและเปรียบเทียบเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบบน

พื้นฐานของ Kullback's Symmetric Divergence ได้แก่ เกณฑ์ KIC, KIC_{c_c} , $KIC_{c_{SB}}$ และ $KIC_{c_{HM}}$ ผลการศึกษาพบว่า เกณฑ์ KIC_{c_c} ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความของตัวประมาณ Symmetric Measure มากที่สุด และมีค่าของฟังก์ชัน Penalty มากที่สุด เมื่อเงื่อนไข $(1-p/n)\exp(p/n) < 1$ เป็นจริง โดยเกณฑ์ที่มีค่าของฟังก์ชัน Penalty รองลงมาคือ เกณฑ์ $KIC_{c_{SB}}$, $KIC_{c_{HM}}$ และ KIC ตามลำดับ ซึ่งจากการมีค่าของฟังก์ชัน Penalty มากส่งผลให้เกณฑ์ KIC_{c_c} มีประสิทธิภาพสูงที่สุดถึงแม้ว่าเกณฑ์นี้อาจจะคัดเลือกได้ตัวแบบที่มีจำนวนตัวแปรน้อยเกินไป Keerativibool (2014b) ได้ศึกษาฟังก์ชัน Penalty ของเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบที่เป็นที่รู้จัก 3 เกณฑ์ ได้แก่ เกณฑ์ AIC, BIC และ KIC ซึ่งทั้ง 3 เกณฑ์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเกณฑ์ใหม่คือ $APIC\alpha = \log(\hat{\sigma}^2) + \alpha(p+1)/n$ เรียกชื่อว่า Adjusted Penalty Information Criterion บทความนี้ได้หาค่าที่เหมาะสมของ α สำหรับเกณฑ์ $APIC\alpha$ โดยค่าที่เหมาะสมของ α จะต้องสามารถลดความน่าจะเป็นที่จะมีจำนวนตัวแปรมากหรือน้อยเกินไป รวมถึงต้องสามารถแก้ปัญหาอัตราส่วน Signal-to-Noise มีค่าต่ำ ค่าของ α ถูกเลือกบนพื้นฐานของมาตรวัด 4 วิธี คือ ความน่าจะเป็นที่จะมีจำนวนตัวแปรมากหรือน้อยเกินไป อัตราส่วน Signal-to-Noise ความน่าจะเป็นที่จะคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้อง และเกณฑ์ประสิทธิภาพ L_2 ผลการศึกษาเชิงทฤษฎีพบว่า ถ้าค่าของ α มีค่าเข้าสู่อันันต์ จะทำให้ความน่าจะเป็นที่จะมีจำนวนตัวแปรมากเกินไปเข้าสู่ศูนย์และอัตราส่วน Signal-to-Noise มีแนวโน้มที่จะมีค่าสูง ผลการศึกษาจากการจำลองข้อมูลพบว่า เมื่อตัวแบบที่แท้จริงระบุได้ยาก ค่าของ α ที่ต่ำจะทำให้มีความน่าจะเป็นสูงที่จะคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้อง อย่างไรก็ตามเมื่อตัวแบบที่แท้จริงระบุได้ยากเกณฑ์ประสิทธิภาพ L_2 เป็นเกณฑ์ที่ดีกว่าเกณฑ์ความน่าจะเป็นที่จะคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้อง โดยเกณฑ์ประสิทธิภาพ L_2 แนะนำ

ว่าค่าของ α ที่สูงส่งผลให้เกณฑ์ $APIC_\alpha$ มีประสิทธิภาพสูง ยกเว้นเมื่อสามารถระบุตัวแบบที่แท้จริงได้ไม่ยากมากนักและตัวอย่างมีขนาดปานกลางถึงขนาดใหญ่ ควรใช้ค่าของ α ที่ต่ำ สำหรับกรณีตัวแบบที่แท้จริงที่สามารถระบุได้อย่างง่ายดาย ควรใช้ค่าของ α ที่สูง แต่ถ้าสัมประสิทธิ์การถดถอยมีค่าไม่มากเพียงพอ และตัวอย่างมีขนาดเล็กถึงขนาดปานกลาง ค่าของ α ควรจะอยู่ในระดับปานกลาง Keerativibool and Siripanich (2017) ได้ศึกษาและเปรียบเทียบเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบบนพื้นฐานของ Kullback-Leibler's Information ได้แก่ เกณฑ์ AIC, AICc, KIC, KICc, KICc_{SB} และ KICc_{HM} ผลการศึกษาพบว่า ภายใต้เงื่อนไขบางประการ เกณฑ์ KICc_C มีค่าของฟังก์ชัน Penalty มากที่สุด เกณฑ์ที่มีค่าของฟังก์ชัน Penalty รองลงมา คือ เกณฑ์ KICc_{SB}, KICc_{HM}, KIC และ AIC ตามลำดับ ขณะที่เกณฑ์ KIC จะมีค่าของฟังก์ชัน Penalty มากกว่าเกณฑ์ AICc เมื่อมีเงื่อนไขบางประการ แต่เกณฑ์ AICc จะมีค่าของฟังก์ชัน Penalty มากกว่าเกณฑ์ AIC เสมอ ประสิทธิภาพของทุกเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบถูกตรวจสอบโดยการจำลองข้อมูล ผลการศึกษาพบว่า เกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบที่มีค่าของฟังก์ชัน Penalty มาก จะทำให้ได้ตัวแบบที่มีจำนวนตัวแปรน้อยเกินไป และมีค่าของเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบลู่เข้าสู่ค่าจริงช้า ขณะที่เกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบที่มีค่าของฟังก์ชัน Penalty น้อย จะทำให้ได้ตัวแบบที่มีจำนวนตัวแปรมากเกินไปและไม่คงเส้นคงวา เมื่อตัวแบบที่แท้จริงระบุได้ยากและตัวอย่างมีขนาดเล็กถึงขนาดกลาง ประสิทธิภาพของเกณฑ์ AIC และ AICc จะสูงกว่าเกณฑ์อื่นๆ อย่างไรก็ตาม ทั้ง 2 เกณฑ์นี้สามารถระบุตัวแบบได้ถูกต้องน้อย และเมื่อตัวอย่างมีขนาดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของทุกเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ก็ยังคงระบุตัวแบบได้ถูกต้องน้อย ด้วยเหตุผลดังกล่าว การศึกษานี้จึงใช้เกณฑ์ประสิทธิภาพ L_2 ในการประเมินประสิทธิภาพของ

เกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบ โดยเฉลี่ยเกณฑ์ประสิทธิภาพ L_2 แนะนำว่า กรณีที่ตัวแบบที่แท้จริงระบุได้ยาก ไม่ว่าตัวอย่างจะมีขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ เกณฑ์ KICc_C เป็นเกณฑ์ที่ดีที่สุด สำหรับกรณีตัวแบบที่แท้จริงระบุได้ง่าย ตัวอย่างขนาดเล็ก และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำ ทุกเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบมีความสามารถในการคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้อง แต่ถ้าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของทุกเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบจะลดลง เมื่อตัวอย่างมีขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำ เกณฑ์ KICc เป็นเกณฑ์ที่ดีที่สุด เนื่องจากสามารถระบุตัวแบบได้ถูกต้องจำนวนมาก แต่ถ้าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าเพิ่มขึ้น และขนาดตัวอย่างไม่มากเพียงพอ ทุกเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบสามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องน้อย และ Sangthong (2019) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบการวิเคราะห์พหุระดับ 2 วิธี คือ เกณฑ์ AIC และ BIC ผลการศึกษาพบว่า เมื่อจำนวนกลุ่มมีขนาดเล็กประสิทธิภาพของเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบค่อนข้างต่ำ และเมื่อจำนวนกลุ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพการคัดเลือกตัวแบบจะสูงขึ้น ในกรณีจำนวนกลุ่มเท่ากับ 100 พบว่า โดยส่วนใหญ่ประสิทธิภาพการคัดเลือกตัวแบบด้วยเกณฑ์ BIC ดีกว่าเกณฑ์ AIC เมื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ ด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุดแบบจำกัด (Restricted Maximum Likelihood: RML)

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า ยังไม่เคยมีการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบสำหรับตัวแบบการถดถอยพหุคูณ ทั้ง 10 เกณฑ์ ได้แก่ เกณฑ์ AIC, BIC, HQIC, AICc, AICu, HQICc, KIC, KICc, KICc_{SB} และ KICc_{HM} ดังนั้น การศึกษานี้จึงต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเกณฑ์ทั้งหมดดังกล่าว เพื่อสรุปว่าควรใช้เกณฑ์

ใต้อาณาเขตการณโค สำหรับการคัดเลือกตัวแบบ การถดถอยพหุคูณที่ถูกต้อง ซึ่งจะส่งผลดีต่อค่า พยากรณ์ในอนาคตต่อไป

$$y = X_0\beta_0 + \varepsilon_0 \quad (1)$$

และตัวแบบโดยประมาณ (Fitted Approximating Model) ในรูปแบบดังนี้

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

โดยที่ y แทนเวกเตอร์เชิงสุมขนาด $n \times 1$, X_0 และ X แทนเมตริกซ์ของตัวแปรอิสระขนาด $n \times p_0$ และ $n \times p$ ตามลำดับ, β_0 และ β แทนเวกเตอร์ของ สัมประสิทธิ์การถดถอยขนาด $p_0 \times 1$ และ $p \times 1$ ตามลำดับ, ε_0 และ ε แทนเวกเตอร์ของความคลาด

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาค้นนี้จะศึกษาเฉพาะตัวแบบการ ถดถอยพหุคูณ โดยมีตัวแบบที่แท้จริง (True Model) ในรูปแบบดังนี้ (Montgomery *et al.*, 2006)

เคลื่อนที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และความแปรปรวน เท่ากับ $\sigma_0^2 I_n$ และ $\sigma^2 I_n$ ตามลำดับ ตัวประมาณภาวะ น่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimator) ของ β และ σ^2 แสดงตามลำดับดังนี้

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'y \text{ และ } \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} (y - X\hat{\beta})' (y - X\hat{\beta}) = \frac{SSE}{n} \quad (3)$$

และตัวประมาณไม่เอนเอียงของ σ^2 คือ

$$s^2 = \frac{1}{n-p} (y - X\hat{\beta})' (y - X\hat{\beta}) = \frac{SSE}{n-p} = \frac{n\hat{\sigma}^2}{n-p} \quad (4)$$

โดยที่ SSE แทนผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน สำหรับขั้นตอนการดำเนินการวิจัย แสดงดังนี้

1. จำลองข้อมูลภายใต้สถานการณ์ต่างๆ จำนวน 1,000 ชุด ได้แก่ ข้อมูลที่มีความแตกต่างของขนาดตัวอย่าง จำนวนพารามิเตอร์ในตัวแบบ สัมประสิทธิ์การถดถอย และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน ดังนี้

ตัวแบบที่ 1: $\beta_0 = 1, \beta_1 = 0.5, \beta_2 = 0.4, \beta_3 = 0.3, \beta_4 = 0.2$

ตัวแบบที่ 2: $\beta_0 = 1, \beta_1 = 0.5, \beta_2 = 0.4$

ตัวแบบที่ 3: $\beta_0 = 1, \beta_1 = 2, \beta_2 = 2$

ตัวแบบที่ 4: $\beta_0 = 1, \beta_1 = 2, \beta_2 = 2, \beta_3 = 2, \beta_4 = 2$

- ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน 3 ระดับ ได้แก่ ความแปรปรวนต่ำ ($\sigma_0^2 = 0.25$) ความแปรปรวนปานกลาง ($\sigma_0^2 = 1$) และความแปรปรวน สูง ($\sigma_0^2 = 9$)

- ขนาดตัวอย่าง 3 ระดับ ได้แก่ ตัวอย่าง ขนาดเล็ก ($n = 15$) ตัวอย่างขนาดกลาง ($n = 30$) และ ตัวอย่างขนาดใหญ่ ($n = 100$)

- จำนวนพารามิเตอร์ในตัวแบบ 2 ระดับ ได้แก่ $p_0 = 3$ และ $p_0 = 5$

- สัมประสิทธิ์การถดถอย 4 ตัวแบบ ได้แก่

2. สร้างตัวแปรอิสระทั้งหมด 6 ตัว โดยกำหนด ให้มีการแจกแจงปกติมาตรฐาน (Standard Normal Distribution) นั่นคือ $X_0 \sim N(0, I)$ ดังนั้นตัวแบบการ ถดถอยพหุคูณหรือตัวแบบที่แท้จริงที่พิจารณาใน การศึกษาค้นนี้ คือ

ตัวแบบระบุนายกมาก โดยมีตัวแปรอิสระจำนวน 4 ตัว และมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยต่ำ

$$y = 1 + 0.5X_1 + 0.4X_2 + 0.3X_3 + 0.2X_4 + \varepsilon_0$$

ตัวแบบระบุนายก โดยมีตัวแปรอิสระจำนวน 2 ตัว และมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยต่ำ

$$y = 1 + 0.5X_1 + 0.4X_2 + \varepsilon_0$$

ตัวแบบระบุน่ายมาก โดยมีตัวแปรอิสระจำนวน 2 ตัว และมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสูง

$$y = 1 + 2X_1 + 2X_2 + \varepsilon_0$$

ตัวแบบระบุน่าย โดยมีตัวแปรอิสระจำนวน 4 ตัว และมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสูง

$$y = 1 + 2X_1 + 2X_2 + 2X_3 + 2X_4 + \varepsilon_0$$

3. จากการสร้างตัวแปรอิสระทั้งหมด 6 ตัว จะพิจารณาตัวแปรอิสระเข้าตัวแบบครั้งละ 1 ตัว ในลักษณะ Sequentially Nested ทั้งหมด 6 ครั้ง กล่าวคือ ครั้งที่ 1 มีค่าคงที่ และ X_1 ($p = 2$) ครั้งที่ 2 มีค่าคงที่, X_1 และ X_2 ($p = 3$) ครั้งที่ 3 มีค่าคงที่, X_1 , X_2 และ X_3 ($p = 4$) ครั้งที่ 4 มีค่าคงที่, X_1 , X_2 , X_3 และ X_4 ($p = 5$) ครั้งที่ 5 มีค่าคงที่, X_1 , X_2 , X_3 , X_4 และ X_5 ($p = 6$) และ ครั้งที่ 6 มีค่าคงที่, X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 และ X_6 ($p = 7$) ดังนั้นสำหรับตัวแบบที่ 1 และ 4 จำนวนตัวแปรน้อยเกินไป หมายถึง ตัวแบบที่มีตัวแปรอิสระไม่ครบทุกตัว คือ มีค่าคงที่ และ X_1 หรือ มีค่าคงที่, X_1 และ X_2 หรือ มีค่าคงที่, X_1 , X_2 และ X_3 โดยไม่มีตัวแปร X_5 และ X_6 รวมอยู่ในตัวแบบ ส่วนจำนวนตัวแปรมากเกินไป หมายถึง ตัวแบบที่มีตัวแปรอิสระครบทุกตัว และมีตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องรวมอยู่ในตัวแบบ คือ X_5

และ X_6 นั่นคือ มีค่าคงที่, X_1 , X_2 , X_3 , X_4 และ X_5 หรือ มีค่าคงที่, X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 และ X_6 สำหรับตัวแบบที่ 2 และ 3 จำนวนตัวแปรน้อยเกินไป หมายถึง ตัวแบบที่มีค่าคงที่ และ X_1 ส่วนจำนวนตัวแปรมากเกินไป หมายถึง ตัวแบบที่มีตัวแปรอิสระครบทุกตัว และมีตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องรวมอยู่ในตัวแบบ คือ X_3 , X_4 , X_5 และ X_6 นั่นคือ มีค่าคงที่, X_1 , X_2 และ X_3 หรือ มีค่าคงที่, X_1 , X_2 , X_3 และ X_4 หรือ มีค่าคงที่, X_1 , X_2 , X_3 , X_4 และ X_5 หรือ มีค่าคงที่, X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 และ X_6

4. จากแต่ละครั้งที่นำตัวแปรอิสระเข้าตัวแบบ จะคำนวณค่าของเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบการถดถอยพหุคูณทั้ง 10 เกณฑ์ ได้แก่ AIC, BIC, HQIC, AICc, AICu, HQICc, KIC, KICc, KICc_{SB} และ KICc_{HM} ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบการถดถอยพหุคูณ

เกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบการถดถอยพหุคูณ	คำอธิบายเกณฑ์
$AIC = \log(\hat{\sigma}^2) + \frac{2(p+1)}{n}$ (5)	เกณฑ์ที่มีประสิทธิภาพ (Efficient Criterion) บนพื้นฐานของ Directed Divergence
$BIC = \log(\hat{\sigma}^2) + \frac{(p+1)\log(n)}{n}$ (6)	เกณฑ์ที่มีความคงเส้นคงวา (Consistent Criterion) ดังนั้นจึงสามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้นเมื่อขนาดตัวอย่างเข้าสู่สู่นันต์
$HQIC = \log(\hat{\sigma}^2) + \frac{2(p+1)\log\log(n)}{n}$ (7)	
$AICc = \log(\hat{\sigma}^2) + \frac{2(p+1)}{n-p-2}$ (8)	เกณฑ์การปรับแก้ของเกณฑ์ AIC สำหรับตัวอย่างขนาดเล็ก
$AICu = \log(s^2) + \frac{2(p+1)}{n-p-2}$ (9)	เกณฑ์การปรับแก้ของเกณฑ์ AICc สำหรับตัวอย่างขนาดเล็ก โดยใช้ตัวประมาณไม่เอนเอียง (s^2) ในสมการที่ (4) แทนตัวประมาณภาวะน่าจะเป็นสูงสุด (σ^2) ในสมการที่ (3)
$HQICc = \log(\hat{\sigma}^2) + \frac{2(p+1)\log\log(n)}{n-p-2}$ (10)	เกณฑ์การปรับแก้ของเกณฑ์ HQIC สำหรับตัวอย่างขนาดเล็ก
$KIC = \log(\hat{\sigma}^2) + \frac{3(p+1)}{n}$ (11)	เกณฑ์ที่มีประสิทธิภาพ (Efficient Criterion) บนพื้นฐานของ Symmetric Divergence

ตารางที่ 1 (ต่อ)

เกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบการถดถอยพหุคูณ	คำอธิบายเกณฑ์
$KIC_{Cc} = \log(\hat{\sigma}^2) + \log\left(\frac{n}{n-p}\right) + \frac{[(n-p)(2p+3)-2]}{(n-p-2)(n-p)} \quad (12)$	เกณฑ์การปรับแก้ของเกณฑ์ KIC สำหรับตัวอย่างขนาดเล็ก
$KIC_{c_{SB}} = \log(\hat{\sigma}^2) + \frac{(p+1)(3n-p-2)}{n(n-p-2)} + \frac{p}{n(n-p)} \quad (13)$	
$KIC_{c_{HM}} = \log(\hat{\sigma}^2) + \frac{(p+1)(3n-p-2)}{n(n-p-2)} \quad (14)$	

5. จากแต่ละเกณฑ์จะสรุปผลว่าทั้งหมด 6 ครั้งที่น่าตัวแปรอิสระเข้าตัวแบบ ครั้งใดมีค่าของเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบการถดถอยพหุคูณต่ำที่สุด จะได้ครั้งนั้นเป็นตัวแบบที่คัดเลือกไว้หรือตัวแบบโดยประมาณ เช่น เมื่อพิจารณาเกณฑ์ AIC ทั้งหมด 6 ครั้ง พบว่า ครั้งที่ 5 ให้ค่า AIC ต่ำที่สุด จะได้ตัวแบบที่คัดเลือกประกอบด้วยค่าคงที่, X_1 , X_2 , X_3 , X_4 และ X_5 ($p = 6$)

6. ดำเนินการข้อ 3 - 5 ซ้ำในแต่ละชุดข้อมูลที่จำลองขึ้น จำนวน 1,000 ชุด เพื่อสรุปผลว่าเกณฑ์ใดที่มีโอกาสการคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด นั่นคือ มีโอกาสได้ตัวแบบที่คัดเลือกไว้ในข้อ 5 ตรงกับตัวแบบที่สร้างขึ้นในข้อ 1 มากที่สุด

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากผลการจำลองข้อมูล จำนวน 1,000 ชุด ภายใต้สถานการณ์ต่างๆ ได้แก่ ตัวอย่างขนาดเล็ก ($n = 15$) ตัวอย่างขนาดกลาง ($n = 30$) และตัวอย่างขนาดใหญ่ ($n = 100$) จำนวนพารามิเตอร์ในตัวแบบ 2 ระดับ คือ $p_0 = 3$ และ $p_0 = 5$ สัมประสิทธิ์การถดถอยแตกต่างกัน 4 ตัวแบบ คือ ตัวแบบระบุมาก มีตัวแปรอิสระ 4 ตัว ตัวแบบระบุมาก มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว ตัวแบบระบุ

ง่ายมาก มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว และตัวแบบระบุง่าย มีตัวแปรอิสระ 4 ตัว และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน 3 ระดับ คือ ความแปรปรวนต่ำ ($\sigma_0^2 = 0.25$) ความแปรปรวนปานกลาง ($\sigma_0^2 = 1$) และความแปรปรวนสูง ($\sigma_0^2 = 9$) ได้ผลการวิจัยดังตารางที่ 2 - 4 โดยสามารถอ่านค่าในตารางดังตัวอย่างเช่น ตารางที่ 2 กรณีตัวอย่างขนาดเล็ก ความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนต่ำ ตัวแบบระบุมาก เกณฑ์ AIC มีโอกาสคัดเลือกตัวแบบที่มีจำนวนตัวแปรน้อยเกินไปร้อยละ 34.2 คัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องร้อยละ 30.2 และคัดเลือกตัวแบบที่มีจำนวนตัวแปรมากเกินไปร้อยละ 35.6 กล่าวคือจากการจำลองข้อมูล 1,000 ชุด สร้างตัวแบบการถดถอยพหุคูณ แล้วนำความคลาดเคลื่อน ($\hat{\sigma}^2$) มาคำนวณค่าเกณฑ์ AIC ดังสมการที่ (5) พบว่า เกณฑ์ AIC มีค่าต่ำที่สุดกับชุดที่มีจำนวนตัวแปรน้อยเกินไป (มีค่าคงที่ และ X_1 หรือ มีค่าคงที่, X_1 และ X_2 หรือ มีค่าคงที่, X_1 , X_2 และ X_3) 342 ชุด มีค่าต่ำที่สุดกับชุดที่มีจำนวนตัวแปรถูกต้อง (มีค่าคงที่, X_1 , X_2 , X_3 และ X_4) 302 ชุด และมีค่าต่ำที่สุดกับชุดที่มีจำนวนตัวแปรมากเกินไป (มีค่าคงที่, X_1 , X_2 , X_3 , X_4 และ X_5 หรือ มีค่าคงที่, X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 และ X_6) 356 ชุด

ตารางที่ 2 ร้อยละของการคัดเลือกตัวแบบ เมื่อตัวอย่างมีขนาดเล็ก ($n = 15$)

σ_0^2	ตัวแบบระบุ	จำนวนตัวแปร	AIC	BIC	HQIC	AICc	AICu	HQICc	KIC	KICc _C	KICc _{SB}	KICc _{HM}
0.25	ยากมาก	น้อยเกินไป	34.2	46.7	34.2	82.4	89.8	82.4	51.3	90.2	88.5	87.6
		ถูกต้อง	30.2	29.9	30.0	16.1	9.7	16.1	28.9	9.3	11.0	11.9
		มากเกินไป	35.6	23.4	35.8	1.5	0.5	1.5	19.8	0.5	0.5	0.5
0.25	ยาก	น้อยเกินไป	5.1	9.4	5.0	18.2	27.7	17.9	10.6	27.8	26.8	26.1
		ถูกต้อง	47.3	58.4	47.3	73.1	67.8	73.2	62.1	68.0	68.3	68.5
		มากเกินไป	47.6	32.2	47.7	8.7	4.5	8.9	27.3	4.2	4.9	5.4
0.25	ง่ายมาก	น้อยเกินไป	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		ถูกต้อง	52.0	68.2	51.9	90.9	94.2	90.9	72.6	94.4	93.8	93.4
		มากเกินไป	48.0	31.8	48.1	9.1	5.8	9.1	27.4	5.6	6.2	6.6
0.25	ง่าย	น้อยเกินไป	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		ถูกต้อง	60.9	70.0	60.8	95.1	97.6	95.1	73.4	97.8	96.7	96.5
		มากเกินไป	39.1	30.0	39.2	4.9	2.4	4.9	26.6	2.2	3.3	3.5
1	ยากมาก	น้อยเกินไป	56.5	72.0	56.3	97.1	98.8	97.1	77.1	98.9	98.7	98.6
		ถูกต้อง	14.5	10.9	14.6	2.2	1.1	2.2	9.8	1.0	1.1	1.1
		มากเกินไป	29.0	17.1	29.1	0.7	0.1	0.7	13.1	0.1	0.2	0.3
1	ยาก	น้อยเกินไป	29.5	43.1	29.4	63.6	73.5	63.5	47.6	74.0	72.9	72.2
		ถูกต้อง	29.4	31.0	29.4	31.3	24.1	31.4	31.2	23.8	24.7	25.2
		มากเกินไป	41.1	25.9	41.2	5.1	2.4	5.1	21.2	2.2	2.4	2.6
1	ง่ายมาก	น้อยเกินไป	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
		ถูกต้อง	51.1	67.1	50.9	91.3	95.2	91.1	72.4	95.8	94.8	94.4
		มากเกินไป	48.9	32.9	49.1	8.7	4.7	8.9	27.6	4.1	5.1	5.5
1	ง่าย	น้อยเกินไป	0.1	0.1	0.1	0.8	2.0	0.8	0.3	2.1	1.9	1.8
		ถูกต้อง	58.1	69.1	57.9	95.0	96.4	94.9	72.4	96.4	95.9	95.8
		มากเกินไป	41.8	30.8	42.0	4.2	1.6	4.3	27.3	1.5	2.2	2.4
9	ยากมาก	น้อยเกินไป	68.2	83.4	68.0	98.3	99.7	98.2	87.0	99.7	99.6	99.3
		ถูกต้อง	7.6	4.3	7.6	1.1	0.2	1.2	3.3	0.2	0.3	0.5
		มากเกินไป	24.2	12.3	24.4	0.6	0.1	0.6	9.7	0.1	0.1	0.2
9	ยาก	น้อยเกินไป	50.4	65.9	50.4	85.5	91.6	85.5	71.7	91.8	91.1	90.5
		ถูกต้อง	13.0	12.1	13.0	10.8	6.8	10.8	11.3	6.8	7.1	7.5
		มากเกินไป	36.6	22.0	36.6	3.7	1.6	3.7	17.0	1.4	1.8	2.0
9	ง่ายมาก	น้อยเกินไป	11.2	17.5	11.1	30.7	42.1	30.7	20.4	42.7	41.3	40.8
		ถูกต้อง	44.7	54.0	44.6	63.3	55.3	63.2	55.1	54.8	55.7	56.0
		มากเกินไป	44.1	28.5	44.3	6.0	2.6	6.1	24.5	2.5	3.0	3.2
9	ง่าย	น้อยเกินไป	16.4	24.5	16.4	61.3	75.1	61.0	29.0	76.1	73.0	71.8
		ถูกต้อง	45.6	48.1	45.4	36.7	24.0	36.9	47.8	23.0	25.9	27.1
		มากเกินไป	38.0	27.4	38.2	2.0	0.9	2.1	23.2	0.9	1.1	1.1

จากตารางที่ 2 พบว่า เมื่อตัวอย่างมีขนาดเล็ก ($n = 15$) ความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนต่ำ ($\sigma_0^2 = 0.25$) การคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมีค่าประมาณร้อยละ 30 - 98 โดยกรณีตัวแบบระบุนยากมาก เกณฑ์ AIC และ HQIC สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 30 กรณีตัวแบบระบุนยาก เกณฑ์ AICc และ HQICc สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 73 และกรณีตัวแบบระบุนง่ายถึงง่ายมาก เกณฑ์ AICu, KICc_C, KICc_{SB} และ KICc_{HM} สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 93 - 98 เมื่อความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนปานกลาง ($\sigma_0^2 = 1$) การคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมีค่าประมาณร้อยละ 15 - 96 โดยกรณีตัวแบบระบุนยากมาก เกณฑ์ AIC และ HQIC สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ

15 กรณีตัวแบบระบุนยาก เกณฑ์ AICc และ HQICc สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 31 และกรณีตัวแบบระบุนง่ายถึงง่ายมาก เกณฑ์ AICu, KICc_C, KICc_{SB} และ KICc_{HM} สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 94 - 96 และเมื่อความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนสูง ($\sigma_0^2 = 9$) การคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมีค่าประมาณร้อยละ 8 - 63 โดยกรณีตัวแบบระบุนยากถึงยากมาก เกณฑ์ AIC และ HQIC สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 8 - 13 กรณีตัวแบบระบุนง่ายมาก เกณฑ์ AICc และ HQICc สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 63 และกรณีตัวแบบระบุนง่าย เกณฑ์ BIC สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 48

ตารางที่ 3 ร้อยละของการคัดเลือกตัวแบบ เมื่อตัวอย่างมีขนาดกลาง ($n = 30$)

σ_0^2	ตัวแบบระบุน	จำนวนตัวแปร	AIC	BIC	HQIC	AICc	AICu	HQICc	KIC	KICc _C	KICc _{SB}	KICc _{HM}
0.25	ยากมาก	น้อยเกินไป	20.2	37.3	25.7	34.4	48.0	42.1	32.3	49.0	46.9	46.6
		ถูกต้อง	53.2	52.1	53.8	55.4	47.3	51.6	54.4	46.6	47.9	48.2
		มากเกินไป	26.6	10.6	20.5	10.2	4.7	6.3	13.3	4.4	5.2	5.2
0.25	ยาก	น้อยเกินไป	0.4	1.4	0.5	1.0	1.9	1.2	1.0	1.9	1.9	1.8
		ถูกต้อง	65.5	84.7	73.8	80.0	89.1	87.3	79.9	89.4	88.8	88.4
		มากเกินไป	34.1	13.9	25.7	19.0	9.0	11.5	19.1	8.7	9.3	9.8
0.25	ง่ายมาก	น้อยเกินไป	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		ถูกต้อง	66.1	87.1	74.6	83.6	91.2	88.9	83.5	91.4	91.0	90.9
		มากเกินไป	33.9	12.9	25.4	16.4	8.8	11.1	16.5	8.6	9.0	9.1
0.25	ง่าย	น้อยเกินไป	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		ถูกต้อง	70.2	87.3	76.9	88.3	94.1	93.0	84.7	94.3	93.5	93.5
		มากเกินไป	29.8	12.7	23.1	11.7	5.9	7.0	15.3	5.7	6.5	6.5
1	ยากมาก	น้อยเกินไป	56.3	80.2	66.9	76.3	88.8	84.8	75.5	89.4	88.1	87.6
		ถูกต้อง	22.4	13.7	19.2	17.1	9.5	11.9	16.1	8.9	9.9	10.3
		มากเกินไป	21.3	6.1	13.9	6.6	1.7	3.3	8.4	1.7	2.0	2.1
1	ยาก	น้อยเกินไป	19.5	36.2	23.7	27.8	40.9	35.8	30.8	41.4	39.7	39.0
		ถูกต้อง	48.4	51.0	51.2	54.6	52.2	53.9	51.6	52.0	52.3	52.9
		มากเกินไป	32.1	12.8	25.1	17.6	6.9	10.3	17.6	6.6	8.0	8.1
1	ง่ายมาก	น้อยเกินไป	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		ถูกต้อง	63.2	84.1	73.2	81.1	89.8	86.9	80.6	90.0	89.3	88.9

ตารางที่ 3 (ต่อ)

σ_0^2	ตัวแบบระบุ	จำนวนตัวแปร	AIC	BIC	HQIC	AICc	AICu	HQICc	KIC	KICc _C	KICc _{SB}	KICc _{HM}
1	ง่าย	มากเกินไป	36.8	15.9	26.8	18.9	10.2	13.1	19.4	10.0	10.7	11.1
		น้อยเกินไป	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		ถูกต้อง	69.8	86.4	76.9	87.6	93.4	91.6	82.9	93.4	92.7	92.4
		มากเกินไป	30.2	13.6	23.1	12.4	6.6	8.4	17.1	6.6	7.3	7.6
9	ยากมาก	น้อยเกินไป	80.9	95.2	87.4	93.9	98.1	96.6	93.2	98.2	97.8	97.4
		ถูกต้อง	7.0	2.8	5.5	3.6	1.3	2.2	3.4	1.3	1.5	1.8
		มากเกินไป	12.1	2.0	7.1	2.5	0.6	1.2	3.4	0.5	0.7	0.8
9	ยาก	น้อยเกินไป	58.5	80.2	68.1	73.2	84.0	79.9	76.1	84.1	83.1	82.8
		ถูกต้อง	17.1	13.5	16.4	16.6	12.1	14.5	14.5	12.0	12.4	12.5
		มากเกินไป	24.4	6.3	15.5	10.2	3.9	5.6	9.4	3.9	4.5	4.7
9	ง่ายมาก	น้อยเกินไป	2.0	4.2	2.5	2.8	5.5	3.9	3.3	5.8	5.3	5.2
		ถูกต้อง	66.8	83.9	74.5	81.8	87.5	86.3	80.9	87.3	87.4	87.3
		มากเกินไป	31.2	11.9	23.0	15.4	7.0	9.8	15.8	6.9	7.3	7.5
9	ง่าย	น้อยเกินไป	3.2	9.0	4.9	7.3	14.6	11.5	6.9	14.8	13.6	13.1
		ถูกต้อง	68.2	77.4	72.7	80.2	78.1	79.8	76.8	77.9	78.8	79.3
		มากเกินไป	28.6	13.6	22.4	12.5	7.3	8.7	16.3	7.3	7.6	7.6

จากตารางที่ 3 พบว่า เมื่อตัวอย่างมีขนาดกลาง ($n = 30$) ความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนต่ำ ($\sigma_0^2 = 0.25$) การคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมีค่าประมาณร้อยละ 55 - 94 โดยกรณีตัวแบบระบุยากมาก เกณฑ์ AICc สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 55 และกรณีตัวแบบระบุยากถึงง่ายมาก เกณฑ์ AICu, KICc_C, KICc_{SB} และ KICc_{HM} สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 88 - 94 เมื่อความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนปานกลาง ($\sigma_0^2 = 1$) การคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมีค่าประมาณร้อยละ 22 - 93 โดยกรณีตัวแบบระบุยากมาก เกณฑ์ AIC สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 22 กรณีตัวแบบระบุยาก เกณฑ์ AICc สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด

ที่สุด ประมาณร้อยละ 55 และกรณีตัวแบบระบุง่ายถึงง่ายมาก เกณฑ์ AICu, KICc_C, KICc_{SB} และ KICc_{HM} สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 89 - 93 และเมื่อความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนสูง ($\sigma_0^2 = 9$) การคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมีค่าประมาณร้อยละ 7 - 88 โดยกรณีตัวแบบระบุยากถึงยากมาก เกณฑ์ AIC สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 7 - 17 กรณีตัวแบบระบุง่ายมาก เกณฑ์ AICu, KICc_C, KICc_{SB} และ KICc_{HM} สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 87 ข 88 และกรณีตัวแบบระบุง่าย เกณฑ์ AICc สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 80

ตารางที่ 4 ร้อยละของการคัดเลือกตัวแบบ เมื่อตัวอย่างมีขนาดใหญ่ (n = 100)

σ_0^2	ตัวแบบระบุ	จำนวนตัวแปร	AIC	BIC	HQIC	AICc	AICu	HQICc	KIC	KICc _c	KICc _{sb}	KICc _{hm}
0.25	ยากมาก	น้อยเกินไป	0.8	4.0	2.2	1.0	2.6	2.6	2.0	2.6	2.6	2.6
		ถูกต้อง	78.6	91.9	88.4	82.0	90.4	90.8	88.6	90.4	90.1	90.1
		มากเกินไป	20.6	4.1	9.4	17.0	7.0	6.6	9.4	7.0	7.3	7.3
	ยาก	น้อยเกินไป	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		ถูกต้อง	73.1	95.7	87.3	78.0	89.1	89.9	86.6	89.1	88.8	88.7
		มากเกินไป	26.9	4.3	12.7	22.0	10.9	10.1	13.4	10.9	11.2	11.3
	ง่ายมาก	น้อยเกินไป	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		ถูกต้อง	74.0	97.3	89.1	78.8	91.2	91.7	88.2	91.2	90.8	90.7
		มากเกินไป	26.0	2.7	10.9	21.2	8.8	8.3	11.8	8.8	9.2	9.3
0.25	ง่าย	น้อยเกินไป	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		ถูกต้อง	74.2	93.8	86.7	79.2	89.3	90.0	86.2	89.3	89.1	89.1
		มากเกินไป	25.8	6.2	13.3	20.8	10.7	10.0	13.8	10.7	10.9	10.9
1	ยากมาก	น้อยเกินไป	25.1	60.0	40.5	29.9	43.8	44.9	39.8	43.8	43.3	43.1
		ถูกต้อง	53.6	37.1	48.3	52.6	46.9	46.7	48.6	46.9	47.0	47.1
		มากเกินไป	21.3	2.9	11.2	17.5	9.3	8.4	11.6	9.3	9.7	9.8
	ยาก	น้อยเกินไป	0.9	4.7	2.0	1.0	2.3	2.4	2.0	2.3	2.2	2.2
		ถูกต้อง	70.5	91.2	85.7	75.4	87.2	87.8	84.8	87.3	87.1	86.9
		มากเกินไป	28.6	4.1	12.3	23.6	10.5	9.8	13.2	10.4	10.7	10.9
	ง่ายมาก	น้อยเกินไป	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		ถูกต้อง	71.6	95.6	87.1	75.6	89.1	89.8	86.4	89.1	89.1	88.9
		มากเกินไป	28.4	4.4	12.9	24.4	10.9	10.2	13.6	10.9	10.9	11.1
1	ง่าย	น้อยเกินไป	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		ถูกต้อง	77.1	96.3	89.2	82.1	91.0	91.9	88.6	91.0	90.8	90.8
		มากเกินไป	22.9	3.7	10.8	17.9	9.0	8.1	11.4	9.0	9.2	9.2
9	ยากมาก	น้อยเกินไป	78.1	98.0	92.3	82.6	94.0	94.7	92.1	94.1	93.6	93.6
		ถูกต้อง	11.5	1.9	5.7	10.0	4.9	4.5	5.9	4.8	5.0	5.0
		มากเกินไป	10.4	0.1	2.0	7.4	1.1	0.8	2.0	1.1	1.4	1.4
	ยาก	น้อยเกินไป	45.7	78.8	61.4	48.4	63.4	65.0	59.8	63.6	63.2	63.1
		ถูกต้อง	35.2	19.5	31.5	36.0	30.3	29.4	32.4	30.2	30.4	30.3
		มากเกินไป	19.1	1.7	7.1	15.6	6.3	5.6	7.8	6.2	6.4	6.6
	ง่ายมาก	น้อยเกินไป	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		ถูกต้อง	73.1	96.1	87.5	77.6	89.2	90.2	87.0	89.3	89.2	89.0
		มากเกินไป	26.9	3.9	12.5	22.4	10.8	9.8	13.0	10.7	10.8	11.0
9	ง่าย	น้อยเกินไป	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		ถูกต้อง	77.5	95.9	89.2	83.0	91.5	92.5	88.7	91.8	91.0	90.9
		มากเกินไป	22.5	4.1	10.8	17.0	8.5	7.5	11.3	8.2	9.0	9.1

จากตารางที่ 4 พบว่า เมื่อตัวอย่างมีขนาดใหญ่ ($n = 100$) ความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนต่ำ ($\sigma_0^2 = 0.25$) เกณฑ์ BIC สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุดในทุกตัวแบบ ประมาณร้อยละ 92 - 97 เมื่อความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนปานกลาง ($\sigma_0^2 = 1$) การคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมีค่าประมาณร้อยละ 54 - 96 โดยกรณีตัวแบบระบุนยากมาก เกณฑ์ AIC สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 54 กรณีตัวแบบระบุนยากถึงง่ายมาก เกณฑ์ BIC สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 91 - 96 และเมื่อความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนสูง ($\sigma_0^2 = 9$) การคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมีค่าประมาณร้อยละ 12 - 96 โดยกรณีตัวแบบระบุนยากมาก เกณฑ์ AIC สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 12 กรณีตัวแบบระบุนยาก เกณฑ์ AICc สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 36 กรณีตัวแบบระบุนง่ายถึงง่ายมาก เกณฑ์ BIC สามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องมากที่สุด ประมาณร้อยละ 96

จากภาพรวมของตารางที่ 2 - 4 สรุปได้ว่า เมื่อความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น ร้อยละของการคัดเลือกตัวแบบถูกต้องจะลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Keerativibool and Siripanich (2017) ที่พบว่า ประสิทธิภาพของทุกเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบจะลดลงเมื่อความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการศึกษานี้ยังพบว่า ถ้าตัวแบบระบุนยากถึงยากมาก ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ร้อยละของการคัดเลือกตัวแบบถูกต้องจะ

ลดลงอย่างมาก และมีโอกาสมีจำนวนตัวแปรน้อยเกินไปมากกว่าที่จะมีจำนวนตัวแปรมากเกินไป เมื่อตัวอย่างมีขนาดเล็ก ร้อยละของการคัดเลือกตัวแบบถูกต้องจะต่ำ และเมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น ร้อยละของการคัดเลือกตัวแบบถูกต้องจะเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Sangthong (2019) ที่พบว่า ประสิทธิภาพของเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบค่อนข้างต่ำเมื่อจำนวนกลุ่มมีขนาดเล็ก และประสิทธิภาพการคัดเลือกตัวแบบจะสูงขึ้นเมื่อจำนวนกลุ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ให้ผลการศึกษายกเว้นกับการศึกษาของ Keerativibool (2014a) ที่พบว่า เกณฑ์ KICc มีประสิทธิภาพสูงที่สุด อาจเนื่องมาจากการศึกษานี้ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบที่หลากหลายเกณฑ์มากกว่า ซึ่งเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบที่เหมาะสมภายใต้สถานการณ์ต่างๆ สรุปได้ดังตารางที่ 5 โดยพบว่า กรณีตัวอย่างขนาดเล็ก ตัวแบบระบุนยากมาก เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ AIC และ HQIC ถ้าตัวแบบระบุนยาก เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ AICc และ HQICc และถ้าตัวแบบระบุนง่ายถึงง่ายมาก เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ AICu และ KICc กรณีตัวอย่างขนาดกลาง ตัวแบบระบุนยากถึงยากมาก เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ AIC และ AICc และถ้าตัวแบบระบุนง่ายถึงง่ายมาก เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ AICu และ KICc สำหรับกรณีตัวอย่างขนาดใหญ่ เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ BIC ซึ่งจะคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องร้อยละ 91 ขึ้นไป ยกเว้นกรณีความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าเพิ่มขึ้น ควรใช้เกณฑ์ AIC หรือ AICc แต่จะคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องเพียงร้อยละ 12 - 54

ตารางที่ 5 เกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบที่เหมาะสมภายใต้สถานการณ์ต่างๆ

n	σ_0^2	การระบุ ตัวแบบ	เกณฑ์ที่แนะนำ (ร้อยละการคัดเลือกตัวแบบถูกต้อง)	การระบุ ตัวแบบ	เกณฑ์ที่แนะนำ (ร้อยละการคัดเลือกตัวแบบถูกต้อง)
เล็ก	ต่ำ	ยากมาก	AIC, HQIC (30)	ง่ายมาก	AICu, KICc (93 - 94)
		ยาก	AICc, HQICc (73)	ง่าย	AICu, KICc (97 - 98)
	กลาง	ยากมาก	AIC, HQIC (15)	ง่ายมาก	AICu, KICc (94 - 96)
		ยาก	AICc, HQICc (31)	ง่าย	AICu, KICc (96)
	สูง	ยากมาก	AIC, HQIC (8)	ง่ายมาก	AICc, HQICc (63)
		ยาก	AIC, HQIC (13)	ง่าย	BIC (48)
กลาง	ต่ำ	ยากมาก	AICc (55)	ง่ายมาก	AICu, KICc (91)
		ยาก	AICu, KICc (88 - 89)	ง่าย	AICu, KICc (94)
	กลาง	ยากมาก	AIC (22)	ง่ายมาก	AICu, KICc (89 - 90)
		ยาก	AICc (55)	ง่าย	AICu, KICc (92 - 93)
	สูง	ยากมาก	AIC (7)	ง่ายมาก	AICu, KICc (87 - 88)
		ยาก	AIC (17)	ง่าย	AICc (80)
ใหญ่	ต่ำ	ยากมาก	BIC (92)	ง่ายมาก	BIC (97)
		ยาก	BIC (96)	ง่าย	BIC (94)
	กลาง	ยากมาก	AIC (54)	ง่ายมาก	BIC (96)
		ยาก	BIC (91)	ง่าย	BIC (96)
	สูง	ยากมาก	AIC (12)	ง่ายมาก	BIC (96)
		ยาก	AICc (36)	ง่าย	BIC (96)

สรุป

การศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบสำหรับตัวแบบการถดถอยพหุคูณทั้งหมด 10 เกณฑ์ ได้แก่ เกณฑ์ AIC, BIC, HQIC, AICc, AICu, HQICc, KIC, KICc, KICc_{SB} และ KICc_{HM} ด้วยการจำลองข้อมูล จำนวน 1,000 ชุด ภายใต้สถานการณ์ต่างๆ ได้แก่ ตัวอย่างขนาดเล็ก ($n = 15$) ตัวอย่างขนาดกลาง ($n = 30$) และตัวอย่างขนาดใหญ่ ($n = 100$) จำนวนพารามิเตอร์ในตัวแบบ 2 ระดับ คือ $p_0 = 3$ และ $p_0 = 5$ สัมประสิทธิ์การถดถอยแตกต่างกัน 4 ตัวแบบ คือ ตัวแบบระบุนยากมาก มีตัวแปรอิสระ 4 ตัว ตัวแบบระบุนยาก มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว ตัวแบบระบุนง่ายมาก มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว และตัวแบบระบุนง่าย มีตัวแปรอิสระ 4 ตัว และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน 3 ระดับ คือ ความแปรปรวนต่ำ ($\sigma_0^2 = 0.25$) ความแปรปรวนปานกลาง ($\sigma_0^2 = 1$)

และความแปรปรวนสูง ($\sigma_0^2 = 9$) ผลการศึกษาพบว่า กรณีตัวอย่างขนาดเล็ก ตัวแบบระบุนยากถึงยากมาก เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ AIC, HQIC, AICc และ HQICc โดยสามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องร้อยละ 8 - 73 และถ้าตัวแบบระบุนง่ายถึงง่ายมาก เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ AICu และ KICc โดยสามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องร้อยละ 48 - 98 กรณีตัวอย่างขนาดกลาง ตัวแบบระบุนยากถึงยากมาก เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ AIC และ AICc โดยสามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องร้อยละ 7 - 89 และถ้าตัวแบบระบุนง่ายถึงง่ายมาก เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ AICu และ KICc โดยสามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องร้อยละ 80 - 94 สำหรับกรณีตัวอย่างขนาดใหญ่ เกณฑ์ที่เหมาะสม คือ BIC โดยสามารถคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องร้อยละ 91 ขึ้นไป ยกเว้นกรณีความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าเพิ่มขึ้น ควรใช้เกณฑ์ AIC หรือ AICc แต่จะคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องลดลง

เหลือเพียงร้อยละ 12 - 54 อีกทั้งการศึกษาค้นคว้านี้ยังพบว่า เมื่อความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนเพิ่มขึ้น จะทำให้ร้อยละของการคัดเลือกตัวแบบถูกต้องลดลง โดยเฉพาะถ้าตัวแบบระบุยากถึงยากมาก ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ร้อยละของการคัดเลือกตัวแบบถูกต้องจะลดลงอย่างมาก และมีโอกาสที่จะมีจำนวนตัวแปรน้อยเกินไปมากกว่าที่จะมีจำนวนตัวแปรมากเกินไปเกณฑ์การคัดเลือกตัวแบบสำหรับตัวแบบการถดถอยทุกเกณฑ์ กรณีตัวอย่างมีขนาดเล็ก จะมีโอกาสคัดเลือกตัวแบบได้ถูกต้องน้อย และจะคัดเลือกได้ถูกต้องเพิ่มขึ้นเมื่อตัวอย่างมีขนาดใหญ่ขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาค้นคว้านี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงาน สถาบันนโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ โดยมหาวิทยาลัยทักษิณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564

เอกสารอ้างอิง

Akaike, H. 1973. Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle, pp. 267-281. In B.N. Petrov and F. Csaki, eds. **2nd International Symposium on Information Theory**. Akademiai Kiado, Budapest.

Akaike, H. 1974. A New Look at the Statistical Model Identification. **IEEE Transactions on Automatic Control** 19(6): 716-723.

Cavanaugh, J.E. 1999. A Large-Sample Model Selection Criterion Based on Kullback's Symmetric Divergence. **Statistics and Probability Letters** 42(4): 333-343.

Cavanaugh, J.E. 2004. Criteria for Linear Model Selection Based on Kullback's Symmetric Divergence. **Australian and New Zealand Journal of Statistics** 46(2): 257-274.

Hafidi, B. and Mkhadri, A. 2006. A Corrected Akaike Criterion Based on Kullback's Symmetric Divergence: Applications in Time Series, Multiple and Multivariate Regression. **Computational Statistics and Data Analysis** 50(6): 1524-1550.

Hannan, E.J. and Quinn, B.G. 1979. The Determination of the Order of an Autoregression. **Journal of the Royal Statistical Society Series B** 41(2): 190-195.

Hurvich, C.M. and Tsai, C.L. 1989. Regression and Time Series Model Selection in Small Samples. **Biometrika** 76(2): 297-307.

Keerativibool, W. 2014a. Unifying the Derivations of Kullback Information Criterion and Corrected Versions. **Thailand Statistician Journal of Thai Statistical Association** 12(1): 37-53.

Keerativibool, W. 2014b. Study on the Penalty Functions of Model Selection Criteria. **Thailand Statistician Journal of Thai Statistical Association** 12(2): 161-178.

Keerativibool, W. and Siripanich, P. 2017. Comparison of the Model Selection Criteria for Multiple Regression Based on Kullback-Leibler's Information. **Chiang Mai Journal of Science** 44(2): 699-714.

McQuarrie, A.D.R. and Tsai, C.L. 1998. **Regression and Time Series Model Selection**. World Scientific, Singapore.

- McQuarrie, A.D.R., Shumway, R.H. and Tsai, C.L. 1997. The Model Selection Criterion AICu. **Statistics and Probability Letters** 34(3): 285-292.
- Montgomery, D.C., Peck, E.A. and Vining, G.G. 2006. **Introduction to Linear Regression Analysis**. 4th ed. John Wiley & Sons, New York.
- Neath, A. and Cavanaugh, J.E. 1997. Regression and Time Series Model Selection Using Variants of the Schwarz Information Criterion. **Communication in Statistic-Theory and Method** 26(3): 559-580.
- Sangthong, M. 2019. A Study of the Effectiveness of Model Selection Criteria for Multilevel Analysis. **Burapha Science Journal** 24(1): 156-169. (in Thai)
- Schwarz, G. 1978. Estimating the Dimension of a Model. **The Annals of Statistics** 6(2): 461-464.
- Seghouane, A.K. and Bekara, M. 2004. A Small Sample Model Selection Criterion Based on Kullback's Symmetric Divergence. **IEEE Transactions on Signal Processing** 52(12): 3314-3323.

การพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคา

Development of Healthy Chili Paste Products from Sacha Inchi

(*Plukenetia volubilis* L.)

ดวงทิพย์ ไช้แก้ว^{1*} อรทัย เจริญสิทธิ์² และ นัฐนันท์ ทวีรัตนธนนท์³

Doungtip Kaikaew^{1*}, Orathai Chaleansit² and Nuttanun Thawerattanont³

Received: 4 August 2021, Revised: 6 January 2022, Accepted: 18 January 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องการพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคา มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาสูตรน้ำพริกเผเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคาจากสูตรน้ำพริกเผที่มีส่วนผสมของกุ้งแห้ง โดยใช้ปริมาณถั่วดาวอินคาทดแทนปริมาณกุ้งแห้งและศึกษาอายุการเก็บของน้ำพริกเผเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคาที่ได้รับการพัฒนาแล้ว ในการพัฒนาสูตรน้ำพริกเผทำโดยการคัดเลือกสูตรน้ำพริกเผที่มีกุ้งแห้งเป็นส่วนผสมมา 4 สูตร และให้ผู้เชี่ยวชาญทางด้านอาหารจำนวน 12 ท่าน ทำการประเมินผลทางประสาทสัมผัส พบว่าสูตรน้ำพริกเผที่เหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาต่อประกอบด้วย พริก 12% หอมแดง 12% กระเทียม 12% น้ำตาล 15% น้ำปลา 10% น้ำมันมะขาม 8% น้ำเปล่า 6% น้ำมัน 15% และกุ้งแห้ง 10% โดยได้คะแนนความชอบโดยรวมเฉลี่ยที่ระดับมาก (8.70) หลังจากนั้นทำการทดแทนกุ้งแห้งด้วยถั่วดาวอินคาอบแห้งด้วยเตาไมโครเวฟแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต นาน 5 นาที ปริมาณร้อยละ 10 20 30 และ 40 ของปริมาณกุ้งแห้งในส่วนผสม ประเมินผลด้วยการทดสอบทางประสาทสัมผัสและคุณภาพของน้ำพริกเผโดยการวัดค่าสี ปริมาณน้ำอิสระ ปริมาณเปอร์ออกไซด์และคุณค่าทางโภชนาการ ผลการทดลองพบว่าสูตรน้ำพริกเผที่ใช้ถั่วดาวอินคาทดแทนกุ้งแห้งร้อยละ 10 ได้คะแนนความชอบโดยรวมเฉลี่ยที่ระดับ

¹ สาขาวิชาการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ แขวงยานนาวา เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

¹ Department of Food Product Development, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep, Yannawa, Sathorn, Bangkok 10120, Thailand.

² สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ศึกษา คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ แขวงยานนาวา เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

² Department of Home Economics, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep, Yannawa, Sathorn, Bangkok 10120, Thailand.

³ สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ แขวงยานนาวา เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

³ Department of Food and Nutrition, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep, Yannawa, Sathorn, Bangkok 10120, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): doungtip.s@mail.rmuk.ac.th Tel: 09 0197 6399

มาก (8.65) มีค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) ค่าสีเหลือง (b^*) และปริมาณน้ำอิสระ (a_w) 26.42, 2.98, 1.46 และ 0.80 ตามลำดับ ปริมาณเพอร์ออกไซด์ 8.23 มิลลิกรัมสมมูลเพอร์ออกไซด์ออกซิเจนต่อน้ำมัน 1 กิโลกรัม แต่ไม่พบปริมาณอะฟลาทอกซิน ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ปริมาณยีสต์และราพบน้อยกว่า 10 โคโลนีต่อกรัม มีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เถ้า เส้นใย เท่ากับร้อยละ 25.12, 22.04, 20.70, 37.60, 1.38, 5.11 และให้พลังงาน 398 กิโลแคลอรี ตามลำดับ เมื่อทำการศึกษาอายุการเก็บแบบเร่งด้วยอุณหภูมิ (Q_{10}) ที่ 25 และ 35 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถเก็บได้นาน 63 และ 28 วัน ตามลำดับ มีค่า Q_{10} เป็น 2.25 ซึ่งทำให้การทำนายอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 5 และ 10 องศาเซลเซียส ได้ 318 วัน และ 212 วัน

คำสำคัญ: น้ำพริกเผา, ถั่วดาวอินคา, อายุการเก็บรักษา

ABSTRACT

The purpose of the research on the development of healthy burnt water products from Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.) is to develop a healthy chili paste recipe from Sacha Inchi derived from the recipe of chili paste with dried shrimp by using Sacha Inchi to replace the amount of dried shrimp and to study the shelf life of healthy chili pastes from developed Sacha Inchi. In the development of the recipe, the chili paste is made by selecting a recipe for chili paste with dried shrimp as an through 4 recipes and 12 food experts to conduct sensory evaluations. It found that the best chili paste formula to be developed included 12% chili peppers, 12% shallots, 12% garlic, 15% sugar, 10% fish sauce, 8% tamarind juice, 6% water, 15% oil and 10% dried shrimp, with an average overall preference rating of a considerable level (8.70). Dried shrimp was replaced with dehydrated Sacha Inchi with microwave oven with a voltage of 220 volts, 50 hz for 5 minutes in volume 10, 20, 30, and 40% of the amount of dried shrimp in the mixture and evaluated by sensory tests, and quality of chili paste was measured by color, free water content, peroxide and nutritional value. The results found that the chili paste formula, which uses 10 % of Sacha Inchi to replace dried shrimp, scored a large average overall preference rating (8.65), brightness (L^*), red (a^*), yellow value (b^*) and free water content (a_w) of 26.42, 2.98, 1.46 and 0.80, respectively. Peroxide content of 8.23 mg of oxygen peroxide was equipped with 1 kg of oil and aflatoxin was not found. The total amount of microorganisms, yeast and fungus content was less than 10 colonies per gram. It contains moisture content, protein, fat, carbohydrates, ash, fiber, and energy equal to 25.12 %, 22.04%, 20.70%, 37.60%, 1.38%, 5.11%, and 398 kcal, respectively. Regarding the shelf life accelerated with temperatures (Q_{10}) at 25 and 35 °C, the storage time is 63 and 28 days, respectively. The Q_{10} value is 2.25, which makes it possible to predict the shelf life of products at 5 °C and 10 °C for 318 days and 212 days.

Key words: chili paste, sacha inchi, shelf life

บทนำ

ถั่วดาวอินคา (*Sacha inchi*) เป็นพืชที่พบทั่วไปในแถบประเทศอเมริกาใต้ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Plukenetia volubilis* L. ผลมีรูปร่างคล้ายดาว ผลอ่อนจะมีสีเขียวเมื่อแก่จะมีสีน้ำตาล มีเมล็ดคล้ายถั่ว (Maurers *et al.*, 2012) เป็นพืชที่มีสายพันธุ์ประมาณ 19 สายพันธุ์ โดย 7 สายพันธุ์อยู่ในยุโรป และอีก 12 สายพันธุ์อยู่ในทวีปอเมริกาใต้ ถั่วดาวอินคาเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการที่ดี มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 33 ปริมาณไขมันร้อยละ 49 - 53 เป็นแหล่งอาหารที่มีโปรตีน กรดไขมันไม่อิ่มตัว โอเมก้า 3 โอเมก้า 6 และโอเมก้า 9 วิตามินเอและวิตามินอี (Fermendez *et al.*, 2015) ซึ่งกรดไขมันทั้ง 3 ชนิดเป็นกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกายจึงถูกใช้เป็นอาหารต่างๆ เช่น เมล็ดถั่วใช้เป็นอาหารขบเคี้ยว ใบใช้ประกอบอาหาร เป็นต้น ถั่วดาวอินคามีสรรพคุณในการช่วยลดระดับคอเรสเตอรอล (Gonzales and Gonzales, 2014) มีวิตามินเอและวิตามินอีช่วยในเรื่องการชะลอการเกิดริ้วรอยและความชรา ช่วยควบคุมน้ำตาลในเลือด (Sethuraman *et al.*, 2020) ลดความเสี่ยงในการเกิดโรคหัวใจ มีใยอาหารสูงช่วยบรรเทาท้องผูกและมีโปรตีนสูงที่ช่วยเสริมสร้างการเจริญเติบโตของร่างกาย มีสารออกฤทธิ์เป็นยาที่สามารถช่วยลดระดับคอเรสเตอรอล และมีสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง (Chirinos *et al.*, 2013) ถั่วดาวอินคาเป็นพืชเมืองร้อนสามารถปลูกในประเทศไทยได้ ซึ่งในปี 2556 ได้มีการส่งเสริมให้เกษตรกรชุมชนบ้านหนองไธสง อำเภอนูทอง จังหวัดสุพรรณบุรี ที่มีการประกอบอาชีพทำไร่อ้อยเป็นส่วนใหญ่มาเพาะปลูกถั่วดาวอินคา โดยนำผลผลิตของถั่วดาวอินคามาจำหน่ายในรูปแบบของผลิตภัณฑ์สดและอบแห้ง ซึ่งได้ราคาค่อนข้างสูงจึงทำให้เกษตรกรหันมาปลูกถั่วดาวอินคามากขึ้น (Nong Oong Community, 2018) จึงส่งผลให้

ผลผลิตมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องและทำให้ราคาผลผลิตลดลง การนำผลผลิตมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบริหารจัดการในกรณีที่ผลิตผลสูงเกินความต้องการของตลาด โดยได้มีการประยุกต์ใช้แปรรูปถั่วดาวอินคาจากผลพลอยได้ในการสกัดน้ำมันมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พืชชนิดแห้ง บิสกิตและเครื่องดื่ม (Jagersberger, 2013; Kusarinkul *et al.*, 2015) รวมทั้งผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มน้ำมันถั่วดาวอินคาเพื่อสุขภาพ และถั่วดาวอินคาสเปรดจากแป้งถั่วดาวอินคา (Chaipan, 2018) น้ำพริกเผเป็นน้ำพริกที่มีส่วนผสมหลักเป็นสมุนไพรที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ ได้แก่ พริกแห้ง หัวหอม และกระเทียม โดยนำมาเผา คั่ว อบ หรือทอด แล้วบดผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันปรุงรสด้วยเครื่องปรุงรส (Thai Industrial Standards Institute, 2013) ซึ่งปัจจุบันคนไทยทุกเพศทุกวัยได้บริโภคน้ำพริกเผกันหลากหลายรูปแบบและยังใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารคาวหวาน เนื่องจากมีความเผ็ดน้อยและให้รสชาติที่ดีหรือเป็นตัวเสริมรสชาติให้กับอาหาร เช่น คัมยำ ผัดผัก ข้าวเกรียบ ขนมปัง เกรป เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการเสริมวัตถุดิบต่างๆ เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับน้ำพริกเผ เช่น ถั่วเหลือง ข้าวกล้อง เห็ด ปลา เป็นต้น อีกทั้งคนไทยส่วนใหญ่มีความสนใจและใส่ใจในเรื่องของอาหารการกินเพื่อสุขภาพกันมากขึ้น และนิยมบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพที่เน้นในเรื่องของคุณค่าทางอาหารที่สำคัญทางโภชนาการ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจในการพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคาโดยใช้ถั่วดาวอินคาอบแห้งทดแทนกุ้งแห้งในส่วนผสมลดการเกิดภูมิแพ้ในกุ้งแห้งสำหรับผู้บริโภคที่เป็นโรคภูมิแพ้ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพที่ผู้บริโภคยอมรับที่มีคุณค่าทางโภชนาการที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพร่างกาย

อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์และผลิตภัณฑ์ให้กับชุมชน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาดำเนินการมาตรฐานของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผา

ศึกษาดำเนินการมาตรฐานของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาโดยการคัดเลือกผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไปที่มีปริมาณกึ่งแห้งต่างกันจำนวน 4 คำรับ ทดสอบความชอบด้วยการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ใช้แบบสอบถามเพื่อประเมินความชอบที่มีการให้คะแนนแบบ 9 point Hedonic scale โดย 1 คะแนน หมายถึง ชอบน้อยที่สุด และ 9 คะแนน หมายถึง ชอบมากที่สุด กับผู้เชี่ยวชาญทางด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารจำนวน 12 คน วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ภายในบล็อก (Randomized Completely Block Design : RCBD) วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติด้วย ANOVA และหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี DMRT (Duncan's New Multiple Range Test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับวิเคราะห์ทางสถิติ แล้วคัดเลือกมา 1 คำรับ ที่มีคะแนนเฉลี่ยสูงทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม เพื่อใช้เป็นมาตรฐานสำหรับผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผา

2. การพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคา

นำมาตรฐานผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาที่ผู้เชี่ยวชาญให้การยอมรับในระดับความชอบมากที่สุด 1 มาพัฒนาต่อโดยการทดแทนกึ่งแห้งด้วยถั่วดาวอินคาอบแห้ง นำถั่วดาวอินคาจากชุมชนบ้านหนองไธสง อำเภอนูทอง จังหวัดสุพรรณบุรี ไปผ่านการอบด้วยคลื่นไมโครเวฟจากเตาไมโครเวฟชาร์ปที่

แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต (Sharp, รุ่น R-250) นาน 5 นาที เพื่อกำจัดกลิ่นถั่วและบดให้ละเอียด ซึ่งใช้ปริมาณร้อยละ 4 ระดับ คือ ร้อยละ 10 20 30 และ 40 ทดสอบความชอบด้วยการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวม ใช้แบบสอบถามเพื่อประเมินความชอบให้คะแนนแบบ 9 point Hedonic scale โดย 1 คะแนน หมายถึง ชอบน้อยที่สุด และ 9 คะแนน หมายถึง ชอบมากที่สุด กับผู้บริโภคทั่วไปในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่มีอายุ 20 ปีขึ้นไป โดยกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างโดยใช้ตารางสำเร็จรูปของ Taro Yamane (Yamane, 1973) ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เท่ากับ 5% ของประชากรที่มีขนาดอนันต์ (∞) มีขนาดของกลุ่มตัวอย่างเท่ากับ 400 คน แบ่งกลุ่มตัวอย่างเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มอายุตั้งแต่ 20 - 59 ปี จำนวน 300 คน และกลุ่มอายุ 60 ปีขึ้นไป จำนวน 100 คน วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ภายในบล็อก (Randomized Completely Block Design : RCBD) วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติด้วย ANOVA และหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี DMRT (Duncan's New Multiple Range Test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับวิเคราะห์ทางสถิติ

3. การศึกษาคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และทางจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพถั่วดาวอินคา

3.1 วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

3.1.1 วัดค่าสีด้วยเครื่อง Hunter Lab รุ่น

Color Quest XE

3.1.2 วัดปริมาณน้ำอิสระด้วยเครื่อง Water

Activity Meter (4TE) Aqua Lab 21)

3.2 วิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

3.2.1 วิเคราะห์ปริมาณเพอร์ออกไซด์

และปริมาณอะฟลาทอกซินโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ตามวิธีของ AOAC (2012)

3.2.2 วิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรตเยื่อใย และเถ้า โดยใช้วิธีวิเคราะห์ตามวิธีของ AOAC (2012)

3.3 วิเคราะห์คุณภาพทางจุลินทรีย์

3.3.1 วิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด โดยใช้แผ่นทดสอบทางจุลชีววิทยาแบบสำเร็จรูป petrifilm 3M plate ที่ระดับความเจือจาง 10^{-1} , 10^{-2} และ 10^{-3} บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน ตามวิธีของ AOAC (2012)

3.3.2 วิเคราะห์ปริมาณยีสต์และรา โดยใช้แผ่นทดสอบทางจุลชีววิทยาแบบสำเร็จรูป petrifilm 3M plate ที่ระดับความเจือจาง 10^{-1} , 10^{-2} และ 10^{-3} บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน ตามวิธีของ AOAC (2012)

4. การศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคา

ศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคาจากสูตรที่ผู้ประเมินทางประสาทสัมผัสให้การยอมรับในข้อ 2 โดยนำผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผามาทำการประเมินอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีทางวิทยาศาสตร์แบบเร่ง (Accelerated Shelf Life Testing) ด้วยอุณหภูมิ (Q_{10}) โดยการบรรจุผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคาลงในขวดแก้ว

พร้อมทั้งเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในสภาวะเร่งที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ปัจจัย 2 ชนิด คือปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ปริมาณเชื้อยีสต์ และรา แล้วคำนวณหาค่าอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 5 และ 10 องศาเซลเซียส ตามวิธีของ Steele (2004)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การศึกษาคำรับมาตรฐานของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผา

จากการศึกษาคำรับมาตรฐานของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาจำนวน 4 คำรับ ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า ผู้ทดสอบให้การยอมรับมากที่สุดคือ คำรับที่ 3 โดยมีคะแนนเฉลี่ยด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบ โดยรวมเท่ากับ 8.50, 8.23, 8.60, 8.77 และ 8.70 ตามลำดับ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) กับคำรับที่ 1, 2 และ 4 ซึ่งน้ำพริกเผาคำรับที่ 3 มีลักษณะสีน้ำตาลแดง มีกลิ่นหอมของพริกและกระเทียมอ่อนๆ มีรสชาติหวานเล็กน้อย มีเนื้อสัมผัสเนียนละเอียด ดังนั้นจึงเลือกคำรับดังกล่าวเป็นคำรับมาตรฐานในการพัฒนาต่อไป

ตารางที่ 1 คะแนนทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาคำรับมาตรฐาน

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	คำรับที่ 1	คำรับที่ 2	คำรับที่ 3	คำรับที่ 4
สี*	7.22±1.16 ^c	7.77±1.25 ^b	8.50±1.20 ^a	7.87±1.33 ^b
กลิ่น*	7.27±1.36 ^c	7.37±1.45 ^c	8.23±1.10 ^a	7.73±1.54 ^b
รสชาติ*	7.19±1.32 ^c	7.23±0.97 ^c	8.60±0.93 ^a	7.67±1.73 ^b
เนื้อสัมผัส*	7.30±1.24 ^c	7.27±1.43 ^c	8.77±0.82 ^a	7.63±1.65 ^b
ความชอบโดยรวม*	7.20±0.81 ^c	7.47±1.02 ^{bc}	8.70±0.79 ^a	7.75±1.57 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษร ^{a, b, c} ที่ต่างกันในแนวนอน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น

ร้อยละ 95($p \leq 0.05$)

ค่าเฉลี่ย ± S.D.

2. การพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคา

นำผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาดำรับมาตรฐานมาพัฒนาต่อโดยการทดแทนกึ่งแห้งด้วยถั่วดาวอินคาอบในปริมาณร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 และทดสอบทางประสาทสัมผัส ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบทั้ง 4 สูตร ในระดับความชอบน้อยถึงความชอบมาก โดยให้การยอมรับสูตรที่ 1 ที่มีการใส่ถั่วดาวอินคาปริมาณร้อยละ 10 ที่มีคะแนนเฉลี่ยด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมเท่ากับ 8.69, 8.79, 8.45, 7.96 และ 8.65 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) กับสูตรที่ 2, 3 และ 4 เนื่องจากน้ำพริกเผาถั่วดาวอินคามีลักษณะเป็นสีน้ำตาลแดง มีกลิ่นของถั่วดาวอินคาเล็กน้อย มีความมันจากถั่วดาวอินคา และเนื้อสัมผัสเนียนละเอียด แต่เมื่อมีการใส่ถั่วดาวอินคาในปริมาณร้อยละเพิ่มมากขึ้นทำให้คะแนนความชอบในแต่ละด้านมีแนวโน้มลดลงจากกลิ่นของถั่วดาวอินคาที่ถูกกำจัดออกไปไม่หมด โดยกลิ่นไมโครเวฟทำให้

โมเลกุลของน้ำในอาหารสัมผัสความร้อนและชนกับโมเลกุลอื่นๆ เกิดเป็นพลังงานจลน์แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ทำให้ความร้อนเกิดขึ้นภายในแล้วแพร่กระจายออกมาอย่างต่อเนื่องสู่ภายนอก (Singh and Heldman, 2001) ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟทำให้น้ำอิสระที่อยู่ภายในระเหยออกไป ส่งผลให้โครงสร้างของถั่วดาวอินคาภายในเกิดการหดตัวและจับตัวกันแน่นขึ้น อีกทั้งเป็นการได้รับความร้อนสูงจากภายในเมล็ดออกมาสู่ผิวนอกในระยะเวลาสั้นและเกิดการเผาไหม้ขึ้น ทำให้สารระเหยให้กลิ่นถูกทำลายส่งผลให้เมล็ดถั่วดาวอินคามีกลิ่นถั่วลดลงและเปลี่ยนสีจากสีขาวนวลเป็นสีเหลืองปนน้ำตาลอ่อน นอกจากนี้แล้วเมล็ดถั่วดาวอินคายังมีโปรตีนในปริมาณสูงและเป็นโปรตีนที่มีส่วนที่ชอบน้ำอยู่จึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ (Rattanapont, 2010) ดังนั้นจึงเกิดการจับตัวกับน้ำในส่วนผสมทำให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมเหลือน้อยลง ส่งผลให้น้ำพริกเผามีปริมาณน้ำอิสระลดลง เนื้อสัมผัสมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ กระจายตัวอยู่ มีกลิ่นของถั่วดาวอินคาและความมันเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 2 คะแนนทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาจากถั่วดาวอินคาทั้ง 4 สูตร

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	ปริมาณถั่วดาวอินคา(ร้อยละ)			
	10	20	30	40
สี*	8.69±1.22 ^a	8.13±1.33 ^{ab}	7.57±1.26 ^b	6.51±1.32 ^c
กลิ่น*	8.79±0.91 ^a	8.27±0.96 ^{ab}	7.68±1.07 ^b	6.53±1.13 ^c
รสชาติ*	8.45±0.96 ^a	7.89±1.04 ^{ab}	7.35±1.10 ^b	6.40±1.16 ^c
เนื้อสัมผัส*	7.96±1.49 ^a	7.60±1.27 ^{ab}	6.91±1.07 ^b	6.12±1.25 ^c
ความชอบโดยรวม*	8.65±1.07 ^a	7.53±1.00 ^b	6.98±1.06 ^{bc}	6.47±1.26 ^c

หมายเหตุ: ตัวอักษร ^{a, b, c} ที่ต่างกันในแนวนอน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น

ร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ค่าเฉลี่ย ± S.D.

3. คุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผา

จากการศึกษาคุณภาพทางกายภาพด้านค่าสีและปริมาณน้ำอิสระ ในผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผารับมาตรฐานและน้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคาที่ใช้ปริมาณร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ดังแสดงในตารางที่ 3 เมื่อวิเคราะห์ ทางด้านค่าสีพบว่าในผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคามีค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) สูงกว่าน้ำพริกเผารับมาตรฐาน เนื่องจากเมล็ดถั่วดาวอินคามีปริมาณโปรตีนสูงเมื่อได้รับความร้อนจึงเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์และกรดอะมิโนได้สารประกอบเมลานอยด์ (Melanoidins) ที่มีสีน้ำตาล ซึ่งปฏิกิริยาเมลลาร์ดจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น (Rattanapont, 2011) นอกจากนี้ในระหว่างการผัดน้ำพริกเผายังเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลระหว่างน้ำตาลกับความร้อนส่งผลให้ผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผามีค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น

สูงขึ้น ดังนั้นเมื่อใช้ถั่วดาวอินคาอบในผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพิ่มขึ้นตาม

ส่วนค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ในผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคามีค่าต่ำกว่าน้ำพริกเผารับมาตรฐาน เนื่องจากถั่วดาวอินคาอบมีปริมาณน้ำอิสระน้อยหรือมีความแห้งจึงเกิดการดูดซับปริมาณน้ำอิสระที่มีอยู่ในส่วนผสมของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผา ซึ่งเป็นลักษณะของการออสโมซิสของน้ำที่มีการกระจายปริมาณน้ำอิสระในส่วนที่มากไปหาน้อยจึงส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาลดลง ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของถั่วดาวอินคาอบที่มากขึ้นจึงทำให้ผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผามีปริมาณน้ำอิสระลดลง ซึ่งปริมาณน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคาที่วัดได้มีค่าตามเกณฑ์ที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนดไว้ต้องมีไม่เกิน 0.85 (Thai Industrial Standards Institute, 2013)

ตารางที่ 3 ค่าสีและค่าปริมาณน้ำอิสระในน้ำพริกเผารับมาตรฐานและน้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคา

	ค่าสี			ค่าปริมาณน้ำอิสระ
	L^*	a^*	b^*	(a_w)
ค่ารับมาตรฐาน	23.48±0.11 ^c	2.07±0.06 ^c	0.99±0.09 ^c	0.83±0.04 ^a
ร้อยละ 10	26.42±0.09 ^b	2.98±0.10 ^c	1.46±0.08 ^c	0.80±0.03 ^b
ร้อยละ 20	27.18±0.13 ^b	4.78±0.12 ^b	2.29±0.09 ^{bc}	0.79±0.02 ^b
ร้อยละ 30	29.11±0.08 ^a	6.44±0.14 ^a	3.59±0.12 ^b	0.78±0.03 ^{bc}
ร้อยละ 40	29.99±0.11 ^a	7.31±0.13 ^a	4.42±0.14 ^a	0.77±0.02 ^c

หมายเหตุ: ตัวอักษร ^{a, b, c} ที่ต่างกันในแนวดิ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น

ร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ค่าเฉลี่ย ± S.D.

องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคาและน้ำพริกเผารับมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 4

พบว่า ผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคามีปริมาณโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เถ้าเส้นใย และพลังงาน สูงกว่าน้ำพริกเผารับมาตรฐานที่

ไม่มีการใส่ถั่วดาวอินคา โดยมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของถั่วดาวอินคาอบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kusarinkul *et al.* (2015) ที่รายงานว่าขนมขบเคี้ยวชนิดแท่งที่ผลิตจากกากถั่วดาวอินคาซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสกัดน้ำมันมีปริมาณโปรตีน ไขมันและพลังงานสูง ซึ่งมากกว่าขนมขบเคี้ยวชนิดแท่งทางการค้าที่ไม่มีส่วนผสมของกากถั่วดาวอินคา นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Chaipan (2018) ระบุว่าการใช้แป้งถั่วดาวอินคาที่ผ่านการลดกลิ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับการอบลมร้อนมาผลิตเป็นเครื่องคิมน้ำนมถั่วดาวอินคาสูตรน้ำตาลต่ำและถั่วดาวอินคาสเปรดโดยปริมาณกากถั่วดาวอินคาที่มีผลทำให้ปริมาณโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรตและเส้นใยสูง เมื่อใช้ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผจากถั่วดาวอินคาต่ำกว่าในน้ำพริกเผตำรับมาตรฐาน ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณถั่วดาวอินคาเพิ่มขึ้น เนื่องจากถั่วดาวอินคาอบที่ใช้มีปริมาณความชื้นน้อย เมื่อไปรวมกับส่วนผสมอื่นที่มีความชื้นมาก ได้แก่

หอมแดง กระเทียม น้ำปลา น้ำมะขามเปียก จึงเกิดการดูดซับปริมาณน้ำเข้าไป อีกทั้งปริมาณน้ำในส่วนผสมยังเกิดการระเหยออกไประหว่างการผัดด้วยความร้อนจึงส่งผลให้ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผลดลง นอกจากนี้ถั่วดาวอินคายังมีปริมาณโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และเส้นใยสูง ที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chirinos *et al.* (2013); Fernandez *et al.* (2015); Sethuraman *et al.* (2020) ที่รายงานว่า ถั่วดาวอินคาเป็นแหล่งของโปรตีน วิตามินเอ วิตามินอี และมีไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย ได้แก่ กรดไขมันโอเมก้า 3, 6, 9 ลดความเสี่ยงของโรคหัวใจ มีใยอาหารสูงช่วยบรรเทาท้องผูก มีโปรตีนสูงช่วยเสริมสร้างการเจริญเติบโตของร่างกาย และมีสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง โดยองค์ประกอบทางเคมีของถั่วดาวอินคาอาจมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และสภาพภูมิศาสตร์ที่เพาะปลูก

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีในน้ำพริกเผตำรับมาตรฐานและน้ำพริกเผเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคา

	ปริมาณถั่วดาวอินคา(ร้อยละ)				
	0	10	20	30	40
ความชื้น	26.02±0.02 ^a	25.12±0.02 ^{ab}	24.32±0.01 ^b	23.52±0.01 ^b	22.72±0.03 ^c
โปรตีน	15.96±0.01 ^c	16.36±0.02 ^c	18.73±0.01 ^b	21.09±0.02 ^b	23.45±0.02 ^a
ไขมัน	20.15±0.02 ^c	22.23±0.01 ^{bc}	25.46±0.02 ^b	28.69±0.01 ^a	31.92±0.02 ^a
คาร์โบไฮเดรต	32.62±0.01 ^c	33.20±0.01 ^c	35.41±0.02 ^b	37.60±0.02 ^b	39.81±0.03 ^a
เถ้า	1.29±0.01 ^c	1.32±0.02 ^c	1.59±0.01 ^b	1.86±0.03 ^b	2.13±0.02 ^a
เส้นใย	3.96±0.02 ^c	4.94±0.01 ^{bc}	6.50±0.02 ^b	8.06±0.02 ^b	9.62±0.01 ^a
พลังงาน	376±0.03 ^c	398±0.02 ^{bc}	446±0.01 ^b	493±0.02 ^{ab}	540±0.01 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษร ^{a, b, c} ที่ต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น

ร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ค่าเฉลี่ย ± S.D.

จากการวิเคราะห์ปริมาณอะฟลาทอกซิน ปริมาณเพอร์ออกไซด์ และปริมาณจุลินทรีย์ใน น้ำพริกเผาดำรับมาตรฐานและผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผ เพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคาที่ใช้ปริมาณร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า ไม่พบ ปริมาณอะฟลาทอกซิน มีปริมาณเพอร์ออกไซด์ เท่ากับ 9.27, 8.23, 8.23, 8.24 และ 8.25 มิลลิกรัม สมมูลเพอร์ออกไซด์ออกซิเจนต่อน้ำมัน 1 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยค่าเพอร์ออกไซด์ใช้ในการวัดอัตราการ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนกับ ไขมันและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างไขมันกับน้ำ มีจุลินทรีย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นสาเหตุของการเกิด กลิ่นเหม็นหืน (Rancidity) และเป็นค่าที่บ่งบอกถึง การเสื่อมเสียของอาหารที่มีไขมันอยู่สูง ซึ่งใน ผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผมีค่าเพอร์ออกไซด์ต่ำเนื่องจาก ในขั้นตอนการผัดใช้อุณหภูมิสูงทำให้สามารถกำจัด น้ำและออกซิเจนในส่วนผสมออกไปได้และบรรจุใน ภาชนะที่ปิดสนิท จึงทำให้เกิดการเหม็นหืนได้

ค่อนข้างยาก ส่วนปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ปริมาณ ยีสต์และราที่ตรวจพบในผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผมี ปริมาณน้อยกว่า 10 โคโลนีต่อกรัม เนื่องจากในการ ผลิตผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผมีการให้ความร้อนแก่ ส่วนผสมในขั้นตอนการคั่วและขั้นตอนการผัดที่ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ซึ่ง ขั้นตอนการผลิตที่ใช้อุณหภูมิก่อนข้างสูงและเป็น วิธีการควบคุมปริมาณจุลินทรีย์ในส่วนผสม จึงทำให้ จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ไม่ทนต่อความร้อนไม่สามารถ เจริญเติบโตได้ โดยปริมาณที่ตรวจพบทั้งหมดอยู่ใน เกณฑ์ที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนดไว้ให้มี ปริมาณอะฟลาทอกซินไม่เกิน 20 ไมโครกรัมต่อ กิโลกรัม ปริมาณเพอร์ออกไซด์ไม่เกิน 30 มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่า 1×10^4 โคโลนีต่อกรัม และปริมาณยีสต์และเชื้อราน้อยกว่า 100 โคโลนีต่อกรัม (Thai Industrial Standards Institute, 2013)

ตารางที่ 5 ปริมาณอะฟลาทอกซิน ปริมาณเพอร์ออกไซด์ ปริมาณจุลินทรีย์ในน้ำพริกเผดำรับมาตรฐานและผลิตภัณฑ์ น้ำพริกเผจากถั่วดาวอินคา

	ปริมาณถั่วดาวอินคา(ร้อยละ)				
	0	10	20	30	40
อะฟลาทอกซิน ($\mu\text{g/kg}$)	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
เพอร์ออกไซด์ (mEq peroxide/kgfat)	9.27 $\pm$ 0.01 ^a	8.23 $\pm$ 0.01 ^b	8.23 $\pm$ 0.01 ^b	8.24 $\pm$ 0.01 ^b	8.25 $\pm$ 0.01 ^b
จุลินทรีย์ทั้งหมด (cfu/g)	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
ยีสต์และรา (cfu/g)	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10

หมายเหตุ: ตัวอักษร ^{a, b, c} ที่ต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)
ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.

4. อายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผา เพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคา

การศึกษาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคา จากการประเมินอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์โดยวิธีทางวิทยาศาสตร์แบบเร่ง (Accelerated Shelf Life Testing) ด้วยอุณหภูมิ (Q_{10}) ซึ่งเป็นตัววัด Sensitivity ของปฏิกิริยาการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิหนึ่งกับผลิตภัณฑ์เดียวกันที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิหนึ่งโดยมีอุณหภูมิต่างกัน 10 องศาเซลเซียส (Steele, 2004) ด้วยการบรรจุผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคาร้อยละ 10 ในบรรจุภัณฑ์ขวดแก้วที่มีฝาปิดสนิท โดยใช้ปัจจัยการวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ 2 ชนิด คือ ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดกับปริมาณยีสต์และรา ด้วยการเก็บรักษาในสภาวะเร่งที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาได้ 63 วัน และ 28 วัน โดยไม่เกิดกลิ่นเหม็นหืนและมีเชื้อจุลินทรีย์เจริญเกินมาตรฐาน จำนวนค่า Q_{10} ได้เท่ากับ 2.25 และเมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส และ 10 องศาเซลเซียส ได้ 318 วัน และ 212 วัน เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันสูงมักเกิดการเสื่อมเสียโดยการเกิดกลิ่นเหม็นหืนจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิกระหว่างไขมันกับน้ำที่มีจุลินทรีย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงใช้จุลินทรีย์เป็นปัจจัยในการวิเคราะห์ โดยในกระบวนการผลิตน้ำพริกใช้ความร้อนสูงในการผัดทำให้น้ำระเหยออกไปส่งผลให้ปริมาณน้ำในส่วนผสมลดลงและเป็นการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ให้มีปริมาณลดลง อีกทั้งเก็บรักษาไว้ในขวดแก้วที่มีฝาปิดสนิทอากาศและความชื้นไม่สามารถผ่านเข้าออกได้ เป็นผลให้จุลินทรีย์ที่ต้องการน้ำและอากาศในการเจริญไม่สามารถเจริญได้จึงเกิดการเสื่อมเสียได้ค่อนข้างยาก ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tasaudom

et al. (2009) ที่รายงานว่าผลิตภัณฑ์น้ำพริกที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยอุณหภูมิสูงจะสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงจะยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้แต่ไม่สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้ทั้งหมด หลังจากการฆ่าเชื้อแล้วจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตจะเจริญเติบโตได้และทำให้ผลิตภัณฑ์น้ำพริกเกิดการเสื่อมเสียในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งอายุเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์น้ำพริกจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมในการเก็บรักษา

สรุป

คำรับมาตรฐานของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาที่ผู้ประเมินให้การยอมรับในระดับความชอบมากคือ สูตรที่ 3 มีกุ้งแห้งเป็นส่วนผสม 10% และผู้บริโภคให้การยอมรับผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคาร้อยละ 10 ในระดับความชอบมาก โดยผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาดังกล่าวมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลแดง มีความมัน มีกลิ่นถั่วดาวอินคาเล็กน้อย และมีเนื้อสัมผัสที่ละเอียด โดยมีค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) ค่าสีเหลือง (b^*) ปริมาณน้ำอิสระ และปริมาณเพอร์ออกไซด์เท่ากับ 26.42, 2.98, 1.46, 0.77 และ 8.23 มิลลิกรัมต่อน้ำมัน 1 กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งไม่พบปริมาณอะฟลาทอกซิน ส่วนปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดกับปริมาณยีสต์และราพบน้อยกว่า 10 โคโลนีต่อกรัม

ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผา 100 กรัม ให้พลังงาน 398 กิโลแคลอรี มีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เถ้า และเส้นใย ร้อยละ 25.12, 16.36, 22.23, 33.20, 1.32 และ 4.94 ตามลำดับ เมื่อทำนายอายุการเก็บรักษาโดยวิธีทางวิทยาศาสตร์แบบเร่งด้วยอุณหภูมิ (Q_{10}) ของผลิตภัณฑ์น้ำพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคาร้อยละ 10 นั้นควรบรรจุในขวดแก้วขณะร้อนเพื่อเป็นการฆ่าเชื้อ สามารถป้องกันอากาศเข้าออกได้

และปิดฝาให้สนิท เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 35 องศาเซลเซียส

ข้อเสนอแนะ

ผลิตภัณฑ์น้ำมันพริกเผาเพื่อสุขภาพจากถั่วดาวอินคาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงจากการทดแทนกึ่งแห้งที่เป็นส่วนผสมซึ่งมีราคาสูง ชุมชนเกษตรกรที่ปลูกถั่วดาวอินคาสามารถนำไปผลิตเพื่อจัดจำหน่ายได้ เป็นการสร้างรายได้ให้ชุมชนเพิ่มขึ้นและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับถั่วดาวอินคาและผลิตภัณฑ์ในการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชุมชนที่ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำสามารถเก็บรักษาได้นานโดยไม่มีการใส่วัตถุกันเสียและมีคุณภาพตามเกณฑ์ที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนดไว้

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 2012. **Official Method of Analysis**. 17th ed. Association of Official Analytical Chemist, Washington DC, USA.
- Chaipan, P. 2018. Reduction of Beany Flavor for Sacha Inchi flour Quality Improvement and Utilization as Ingredient in Functional Food Product. Master Thesis of Science, Faculty of Science, Burapha University. (in Thai)
- Chirinos, R., Zuloeta, G., Pedreschi, R., Mignolet, E., Larondelle, Y. and Campos, D. 2013. Sacha inchi (*Plukenetia volubilis*): a seed source of polyunsaturated fatty acid, tocopherols, phenolic compounds, phytosterols and antioxidant capacity. **Journal of Food Chemistry** 141: 1732-1739.
- Fernandez, Y., Obregon, A., Medina, M., Martinez, E. and Navarro, E. 2015. Obtaining Cheese

with milk mixture and Inca Peanut. **Journal of Chem Engineering** 9: 537-553.

- Gonzales, G.F. and Gonzales, C. 2014. A randomized, double-blind placebo-controlled study on acceptability, safety and efficacy of oral administration of sachu inchi oil in adult human subjects. **Journal of Food and Chemical Toxicology** 65: 168-176.
- Jagersberger, J. 2013. Development of novel products on basis of Sacha Inchi - Use of press cakes and hulls. Master Thesis of Life sciences, Faculty of Life sciences, Vienna University.
- Kusarinkul, P., Luangwilai, M., Tragoonpanich, P., Hudthagosol, C. and Somboonpanyakul, P. 2015. Development of Cereal Bar from By-product of Sacha Inchi Oil Extraction Process. **Journal of Agricultural Science** 46(3)(Suppl.): 345-348. (in Thai)
- Maurers, N.M., Beatriz, H.S., Gloria, P.C. and Luis, E.R.S. 2012. Characterization and Authentication of a Novel Vegetable Source of Omega-3 Fatty Acids, Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.) Oil. **Journal of Food Chemistry** 134: 1173-1180.
- Nong Oong Community. 2018. **General Information of Nong Oong Sub-District Administrative Organization**. Published documents, U Thong, Suphan Buri. (in Thai)
- Rattanapnont, N. 2010. **Food Chemistry**. Odeon Store Publishing, Bangkok. (in Thai)
- Rattanapnont, N. 2011. **Food Analysis Principles**. O.S. Printing House Publishing, Bangkok. (in Thai)

- Sethuraman, G., Nizar, N.M., Muhamad, F.N., Gregory, P.J., Jahanshiri, E. and Ali, S.A. 2020. Nutrition Composition of Sacha Inchi (*Plukenetia Volubilis* L.). **Journal of Research and Scientific Innovation** 7: 271-277.
- Singh, R.P. and Heldman, D.R. 2001. **Microwave Heating in Introduction to Food Engineering**. 3rd ed. Academic Press, London.
- Steele, R. 2004. **Understanding and Measuring the Shelf-life of Food**. Woodhead Publishing Ltd, c/o CRC Press, Corporate Blvd., NW, Boca Raton.
- Tasaudom, U., Srapiakaburi, W. and Nipronrum, S. 2009. The Poduction Improvement for Shelf-life Extension of Chili Paste Products. **Naresaun University Journal** 17(2): 136-144. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. 2013. **Chili Paste Community Product Standards No. 4/2013**. Published documents, Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Yamane, T. 1973. **Statistics, An Introductory Analysis**. 3rd ed. Harper and Row, New York.

การหมักเอทานอลจากไฮโดรไลเซตของแป้งมันสำปะหลังโดยยีสต์ทนร้อน

Pichia kudriavzevii โดยการเพาะเลี้ยงแบบแบตช์และเฟดแบตช์

Ethanol Fermentation from Cassava Starch Hydrolysate by Thermotolerant Yeast *Pichia kudriavzevii* using Batch and Fed-batch Cultures

ชุตินา แก้วกระจาย* และ ธนิดา ขงยืน

Chutima Kaewkrajay* and Thanida Yongyuen

Received: 1 July 2021, Revised: 25 September 2021, Accepted: 14 October 2021

บทคัดย่อ

การหมักเอทานอลโดยยีสต์ทนร้อน *Pichia kudriavzevii* PBB511-1 จากแป้งมันสำปะหลังที่ถูกไฮโดรไลต์ด้วยรา *Talaromyces flavus* 21-3 ที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7.5 บ่มแบบเขย่าที่ความเร็ว 130 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30-31 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน รา *T. flavus* 21-3 ไฮโดรไลต์แป้งมันสำปะหลังได้น้ำตาลรีดิวซ์เข้มข้น 60-80 กรัมต่อลิตร เมื่อหมักเอทานอลโดยยีสต์ *P. kudriavzevii* PBB511-1 ในถังหมักขนาด 7 ลิตร ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส พบว่าในการหมักแบบแบตช์ สภาวะที่หมักเอทานอลได้ดีที่สุดคือสภาวะที่อัตราเร็วการกวนเท่ากับ 400 รอบต่อนาที ที่ปราศจากการให้อากาศ ให้เอทานอลเข้มข้น 45.44 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วในการผลิตเท่ากับ 0.87 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และให้ค่าผลผลิตทางทฤษฎีเท่ากับ 49.39 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการหมักแบบเฟด-แบตช์ ให้เอทานอลน้อยกว่าการหมักแบบแบตช์ โดยพบว่าการเติมอาหารใหม่ลงไปถังหมัก 1 ครั้ง ให้ผลการหมักเอทานอลดีกว่าการเติมอาหารใหม่ 2 และ 3 ครั้ง โดยให้เอทานอลเท่ากับ 24.85 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วในการผลิตเท่ากับ 0.69 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และให้ค่าผลผลิตทางทฤษฎีเท่ากับ 27.01 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นรา *T. flavus* 21-3 และยีสต์ *P. kudriavzevii* PBB511-1 น่าจะมีอิทธิพลต่อการผลิตเอทานอลเชื้อเพลิงมากขึ้นในอนาคต

คำสำคัญ: การหมักเอทานอล, อุณหภูมิสูง, แป้งมันสำปะหลัง, *Pichia kudriavzevii*, *Talaromyces flavus*

ABSTRACT

Ethanol fermentation of *Pichia kudriavzeii* PBB511-1 was completed after the saccharification period through the cassava starch hydrolysate by *Talaromyces flavus* 21-3 which produced 60-80 gL⁻¹ of reducing sugar with the following conditions: 30% (w/v) cassava starch, initial pH at 7.5, temperature at 30-31°C and a shaking speed of 130 rpm for 7 days. The fermentation process began by adding yeast inoculum, then allowed to ferment in a 7-L jar fermenter at 45°C in cassava starch hydrolysate media. The batch fermentation that showed the best condition was an agitation speed of 400 rpm without aeration. The ethanol concentration reached 45.44 gL⁻¹, a productivity of 0.87 gL⁻¹h⁻¹ and a yield of 49.39% of theoretical yield. A fed-batch fermentation was also performed, but it was not achieved as batch fermentation. The results showed supplementation for a 1 time of substrate was better than supplemented for 2 and 3 times. It produced 24.85 gL⁻¹ of ethanol, a productivity of 0.69 gL⁻¹h⁻¹ and a yield of 27.01% of theoretical yield. Therefore, *T. flavus* 21-3 and *P. kudriavzeii* PBB511-1 could become more influential on ethanol fuel production.

Key words: ethanol fermentation, high-temperature, cassava starch, *Pichia kudriavzeii*, *Talaromyces flavus*

INTRODUCTION

Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) is not mainly food for Thai people, but it is considered as one of the most famous industrial crops in Thailand. The roots of cassava are utilized by making dry chips, pellets and starch which were applied in the food, beverages, paper, glue and ethanol industries. The most of plantation are belonging to the Northeastern region, then followed by Central (including Eastern) and Northern region of the country, respectively. In 2020, the total area of cassava plantation in Thailand was 9,439,009 rai and calculated with the total production are approximate 29 million tons per year (Office of agriculture economic, 2021). Cassava can grow on sandy or loamy soil which had low fertilizer. Moreover, it can be tolerant for drought climate. The price of this plant is quite low (the cassava chip was 260 USD per ton in May, 2021) (Thai tapioca development institute, 2021), so the farmers who do the farming are suffered and worse living. Therefore, cassava is one suitable source to feed stock for ethanol production. It is not only help farmer to get better lives but also can prevent the crisis of fossil fuel energy.

In Thailand, the temperature of ethanol fermentation can be very high as a result of high temperatures during daytime. In order to save yeast in the ethanol fermentation, a

cooling system must be applied to cool down the fermentation temperature. In addition, using high efficiency thermotolerant yeast in the ethanol fermentation can reduce the cost of the cooling system and can minimize the risk of contamination with other microorganisms in the fermentation (Limtong *et al.*, 2007; Yuangsaard *et al.*, 2013; Kaewkrajay *et al.*, 2014; Pongcharoen *et al.*, 2021).

Nowadays, it was reported that *Pichia kudriavzeii* or better known in the anamorphic stage, as *Issatchenkia orientalis*, can be isolated naturally. The morphologically, biochemically and physiologically characteristics of this yeast species was described by Kurtzman *et al.* (2011). After 3 days at 25°C, the cells are ovoid to elongate (1.3-6×3.3-14 µm) and occur singly or in pairs. Growth is butyrous and light-cream colored. Glucose is fermented. Glucose, ethanol, glycerol, DL-lactate, succinate, citrate, D-glucosamine, N-acetyl-D-glucosamine are assimilated. Growth at 37 and 40°C is present. Therefore, this yeast species is capable to be used in a high temperature fermentation. In this year, Pongcharoen *et al.* (2021) reported that the yeast *P. kudriavzeii* strains NUPHS34 and NUPHS33 produced the highest ethanol concentration at 40 and 45°C. They produced 69.79±1.54 gL⁻¹ and 61.51±1.01 gL⁻¹ of ethanol, respectively. Kaewkrajay *et al.* (2014) proposed *Pichia kudriavzeii* which was isolated from

soil sample in Chonburi province, Thailand. This yeast produced the highest ethanol yield after 36 h with fermentation at 45°C. It produced 37 gL⁻¹ ethanol, with a productivity of 1.03 gL⁻¹h⁻¹ and a yield of 40% of the theoretical yield by shaking flask cultivation. Moreover, Dhaliwal *et al.* (2011) successfully isolated *P. kudriavzevii* from sugarcane juice and reported the success of producing ethanol at 40°C, it was found that ethanol concentration reached 71.9 gL⁻¹, a productivity of 4.0 gL⁻¹h⁻¹. In addition, by leaving alkali-treated cotton stalks and ozone-treated cotton stalks to ferment with *P. kudriavzevii* HOP-1, the results showed that ethanol concentrations were 19.82 gL⁻¹ and 10.96 gL⁻¹, respectively (Kaur *et al.*, 2012). Under the fermentation of cassava starch hydrolysate in a 2.5-L jar fermenter at 40°C with *P. kudriavzevii* DMKU 3-ET15 isolated from traditional fermented foods, ethanol concentration reached 7.86% (w/v) after 24 h of the fermentation, productivity of 3.28 gL⁻¹h⁻¹ and yield of 85.4% of theoretical yield (Yuangsaard *et al.*, 2013).

This research aims to study ethanol production at high temperature by *P. kudriavzevii* PBB511-1, which was proposed to be the efficacy to produce ethanol at 45°C by shaking flask cultivation. The optimization at the up-scale was continuously studied in the bioreactor and the cassava starches were digested with *T. flavus* 21-3, which was previously reported to efficiency produce amylases. In doing so, the separate hydrolysis and fermentation (SHF) was studied. These data will provide a base line information for the simultaneous saccharification and fermentation (SSF) strategy. Co-culture of both strains can be support the concept of reducing cost for fuel ethanol production.

MATERIALS AND METHODS

1. Preparation of medium

The cassava starches were analyzed as the moisture by following the Thai Industrial Standards TISI no. 52 number 6.4 method (Charoenrat, 2002). The percentage of starch was analyzed by the using color method (Saelee, 1993). After that the media was prepared by adding 30% of cassava starch with initial

pH at 7.5 and then sterile by autoclaving at 121°C for 15 min. The sterile media were used for cultivation thermotolerant fungi *T. flavus* 21-3 to allow digestion of cassava starch by incubation with shaking speed of 130 rpm at 30-31°C for 7 days. The fungal culture was filtrated through the filter paper (Whatman no. 4) and immediately kept at -20°C. The aliquot was analyzed reducing sugar concentration by the Nelson-Somogyi method (Nelson, 1944)

2. Ethanol fermentation in a fermenter

The starter medium contained 20 gL⁻¹ reducing sugar, 0.5 gL⁻¹ (NH₄)₂SO₄, having an initial pH of 4.5 and autoclaved at 121°C for 15 min. A loopful of *P. kudriavzeii* PBB511-1 cells was added into 100 ml inoculum media in 250 ml Erlenmeyer flask and shaking speed of 150 rpm at room temperature for 24 h.

The inoculum was transfer at the rate of 5% to the cassava starch hydrolysate which contained 180 gL⁻¹ reducing sugar, 0.5 gL⁻¹ (NH₄)₂SO₄, 0.5 gL⁻¹ KH₂PO₄, 0.5 gL⁻¹ MgSO₄. 7H₂O and 1 gL⁻¹ yeast extract, having an initial pH of 4.5. Batch and fed-batch fermentations were cultivated at 45°C in a 7-L jar fermenter with a 4-L working volume. The sample was taken every 4-12 h until 72 h to analyze growth, ethanol concentration and sugar consumption.

The conditions of batch fermentation studied are 1) an agitation speed of 300, 400 and 500 rpm without the aeration, 2) an agitation speed of 300, 400 or 500 rpm with the aeration rate of 0.2 vvm throughout the fermentation.

The fed-batch fermentations were performed following Sringiew method (Sringiew, 2005). The substrate was added into the 3 types of fed-batch fermentation by observed sugar concentration. Firstly, the substrate was supplemented for 1 time by adding 50% of total reducing sugar with an initial volume of 3-L. Second, the substrate was supplemented for 2 times by adding 33% of total reducing sugar with an initial volume of 2.5-L. Final substrate was supplemented for 3 times by adding 25% of total reducing sugar with an initial volume of 2.5-L.

3. Analytical methods

The cell growth was determined by measuring the optical density at the wavelength

of 660 nm with the spectrophotometer (Shimadzu; UV-pharmaspec 1700) after washing with 0.1 M HCl at least 3 times and was centrifuged at 3500 rpm for 5 min. The cell sediment was then resuspended with 0.1 M EDTA pH 7.

The ethanol concentration was analyzed by gas chromatography (Varian star 3600 GC apparatus) equipped with a flame ionization detector (FID) and the capillary column (0.32 mm ID, 60 m) of DB-wax coated at 70°C. The injector and detector maintained a temperature of 200°C. Nitrogen gas was used for carrier samples with a flow rate at 4 ml min⁻¹. The 4% of n-propanol was used as an internal control (Komagata and Ohmomo, 1984). The ethanol concentration was calculated from the ratio of ethanol and propanol area and was compared with the standard. The ethanol productivity and the fermentation yield have been calculated according to Morimura *et al.* (1997).

The sugar concentration was determined by measuring in accordance with the Nelson-Somogyi method (Nelson, 1944). The high sugar concentration was diluted with distilled water until the optical density was valued at the wavelength of 520 nm in the range of 0.1-1.0. The sugar concentration of the samples was compared with the glucose standard.

RESULTS AND DISCUSSION

1. Cassava starch hydrolysate

Subjected to hydrolysate of cassava starch with *T. flavus* 21-3, concentrated at 30% (w/v), initial pH at 7.5, temperature at 30-31°C and a shaking speed of 130 rpm for 7 days, it was found that *T. flavus* 21-3 had digested cassava to sugar around 60-80 gL⁻¹, which was quite much but it was still not enough to be used as source of ethanol fermentation. According to *P. kudriavzevii* PBB511-1, suitable condition for ethanol fermentation is the medium containing 180 gL⁻¹ reducing sugar, 0.5 gL⁻¹ (NH₄)₂SO₄, 0.5 gL⁻¹ KH₂PO₄, 0.5 gL⁻¹ MgSO₄·7H₂O, 1.0 gL⁻¹ yeast extract and pH at 4.5 (Kaewkrajay *et al.*, 2014). Therefore, the glucose was added into the main medium

until the initial sugar concentration reached 180 gL⁻¹.

2. Batch fermentation

Batch fermentation based on yeast *P. kudriavzevii* PBB511-1 under a temperature control of 45°C found that;

Batch fermentation I: In the first 12 h of fermentation, there was a maintained airless condition and agitated continuously at a speed of 300 rpm, the yeast growth was low, but the growth increased gradually till 24 h. The growth increased dramatically from 48 to 72 h, which presented an optical density of 5.6-6.7, by measuring at a wavelength of 660 nm. In terms of reducing sugar, the amount of sugar gradually decreased in the first 24 h and significantly dropped during 24 to 32 h from 141 gL⁻¹ to 81 gL⁻¹. The amount of sugar remained in the fermentation container at 54 gL⁻¹. In terms of ethanol base, the ethanol produced was 1.6 gL⁻¹ at 12 h and sharply increased to 12.36 gL⁻¹ at 24 h till 72 h. A concentration of ethanol gradually increased to the highest rate at 25.28 gL⁻¹, a production rate of 0.35 gL⁻¹h⁻¹, and a fermentation yield of 27.48% of theoretical yield. (Table 1, Figure 1A)

Batch fermentation II: Maintaining an agitation speed of 400 rpm and no air supplied, yeast grew very slow during the first 8 h but after 12 h, growth continuously increased. However, the growth decreased as it reached 72 h and optical density was 3.64. In terms of reducing sugar consumption, it was found that the amount of reducing sugar decreased slightly during the first 12 h but after this period the amount of reducing sugar dramatically dropped. At 72 h, the amount of reducing sugar remaining in the fermentation was 65 gL⁻¹. Subjected to this fermentation, it was found that yeast started to produce ethanol when reaching 8 h which produced 1.43 gL⁻¹ of ethanol and dramatically increased to 29.55 gL⁻¹ as it reached 34 h. After this the ethanol concentration still increased and reached the maximum at 45.44 gL⁻¹ as it reached 52 h. The fermentation provided a production rate at 0.87 gL⁻¹h⁻¹, a yield of 49.39% of theoretical yield (Table 1, Figure 1B).

Batch fermentation III: At a maintained agitation speed of 500 rpm with no air supplied, it revealed that the overall grow rate of yeast was very slow. The grow rate of the yeast started to climb up after 12 h of fermentation and continuously increased till 72 h. It was found that at 56 h the optical density measured at the wavelength of 660 nm reached the maximum rate of 2.83. The low cell biomass was seen at high agitation rate. In 2019, Santharam *et al.* (2019) reported that the yeast biomass loss when using more agitation rates than 150 rpm. They suspected that the low heat evolution rate and thereby less cumulative heat at high agitation speed may be attributed to biomass loss caused by shear stress. Shear stress had negative effects at high agitation rate. In part, the reducing sugar consumption did not provide a good performance, and there was a reducing sugar of 99 gL⁻¹ remaining in the fermenting tank as measured at the end of the fermentation. The highest ethanol concentration was 30.52 gL⁻¹ at 48 h, production rate at 0.64 gL⁻¹h⁻¹ and yield at 33.17% of the theoretical yield. As the fermentation continued, the ethanol concentration decreased and dropped to 25.95 gL⁻¹ at 72 h of fermentation (Table 1, Figure 1C).

Subjected to an agitation speed of 400 rpm without air supply, the *P. kudriavzevii* PBB511-1 could produce the highest ethanol. Regarding the test results, the agitation speed

at 400 rpm was selected for the further study with an air supply case.

Batch fermentation IV: By maintaining an agitation speed at 400 rpm with an air supply at 0.2 vvm, it was found that within the period of the first 12 h of fermentation, yeast could grow very slow. However, its growth slightly increased in the period between 24-32 h of fermentation and increased sharply as the fermentation reach 36 h. Moreover between 0-32 h of fermentation, it was found that concentration of reducing sugar decreased gradually and significantly dropped after 36 h of fermentation. The reduction of reducing sugar was related to the growth of yeast. At the end of the 72 h of fermentation, the reducing sugar in the fermentation tank remained at 84 gL⁻¹. During fermentation, it started to produce ethanol at 2.31 gL⁻¹ at 8 h of fermentation and ethanol gradually increased thereafter. Till the 36 h of fermentation, production rate of ethanol was the highest at 30.58 gL⁻¹, ethanol production rate at 0.85 gL⁻¹h⁻¹, and yield at 33.24% of theoretical yield. However, it was shown that by allowing the fermentation to continue till the 72 h, ethanol concentration was 24.23 gL⁻¹. Considering the growth of yeast between 36-72 h of fermentation, yeast growth was very low and turbidity level of yeast cells reduced after 72 h of fermentation (Table 1, Figure 1D)

Table 1 The maximum ethanol concentration, productivity and fermentation yield of yeast *Pichia kudriavzevii* PBB511-1 using batch and fed-batch cultures

Conditions	[EtOH]max (gL ⁻¹)	Time (h)	Productivity (gL ⁻¹ h ⁻¹)	Fermentation yield (% of theoretical yield)
Batch fermentation				
Batch I	25.28	72	0.35	27.48
Batch II	45.44	52	0.87	49.39
Batch III	30.52	48	0.64	33.17
Batch IV	30.58	36	0.85	33.24
Fed-batch fermentation				
Fed-batch I	24.85	36	0.69	27.01
Fed-batch II	24.08	28	0.86	26.17
Fed-batch III	21.60	24	0.90	23.48

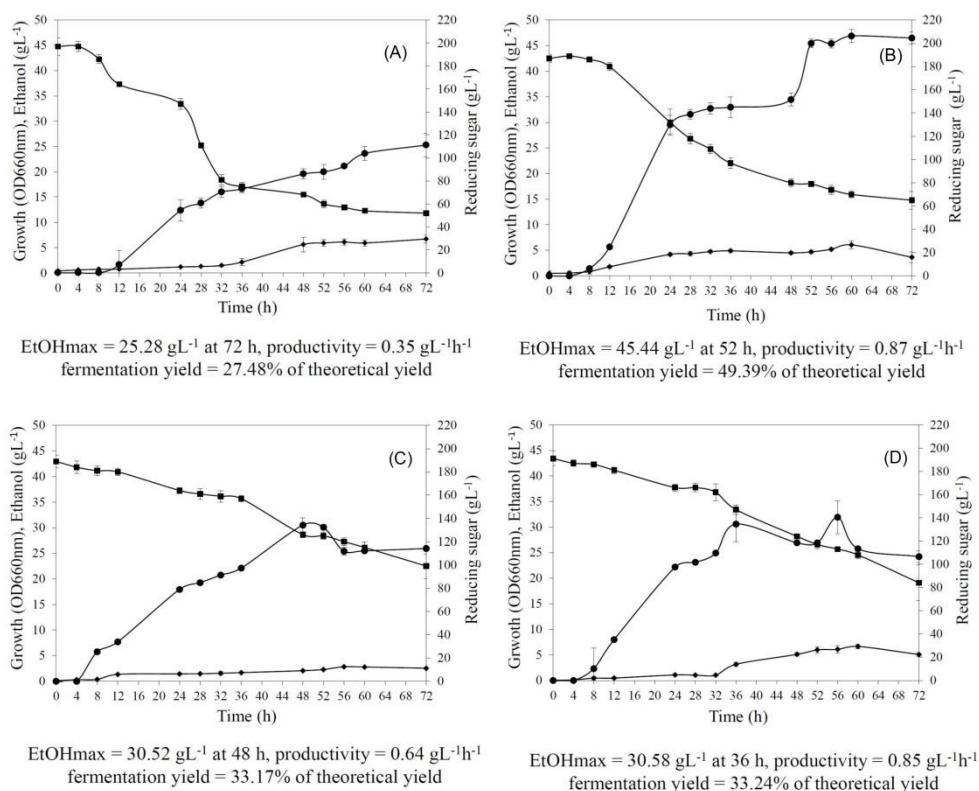


Figure 1 Growth (◆) Ethanol concentration (●) and reducing sugar concentration (■) by batch fermentation at 45°C of *P. kudriavzevii* PB511-1 (A) agitation speed of 300 rpm without aeration; (B) agitation speed of 400 rpm without aeration; (C) agitation speed of 500 rpm without aeration; (D) agitation speed of 400 rpm with aeration 0.2 vvm.

The results showed that an agitation speed of 400 rpm without aeration, the yeast *P. kudriavzevii* PB511-1 produced the highest ethanol concentration (45.44 gL⁻¹ at 52 h). Kaewkrajay *et al.* (2014) reported that this strain could produce 42.4 gL⁻¹ of ethanol after 48 h, at the rate of 0.88 gL⁻¹h⁻¹ and a yield of 46% of the theoretical yield when cultivated in fermenter with an agitation speed of 300 rpm and an aeration rate of 0.2 vvm throughout the fermentation. These results implied that both conditions were appropriately produced ethanol by this yeast strain. A recent study reported that the ethanol production from molasses by yeast *Saccharomyces cerevisiae* DMKU 3-S087 was carried out in a 5 L stirred tank fermenter. Batch fermentation was conducted without aeration, temperature and agitation were controlled at 40°C and 300 rpm, respectively. The highest ethanol concentration was 72.4 gL⁻¹, a productivity of 1.21 gL⁻¹h⁻¹ and a yield

of 0.36 gg⁻¹ at 60 h (Pattanakittivorakul *et al.*, 2019). Ethanol production from sugarcane bagasse hydrolysate in stirred-tank fermenter using *Scheffersomyces stipitis* NRRL Y-7124 and *Scheffersomyces shehatae* UFMG HM 52.2 was performed under controlled condition. Ethanol production from these two yeasts was favored by initial pH increase and agitation rate decrease. The maximum fermentation yield was attained at 100 rpm, initial pH 6.50 and under oxygen limited conditions (Dusán *et al.*, 2016). In the current year, Krajang *et al.* (2021) studied the single-step ethanol production in 5 L fermenter using combination of raw cassava starch hydrolysis and fermentation. The fermentation was performed at 30 and 40°C without temperature control. Fermenter were agitated at the speed of 200 rpm for 72 h along with the fermentation. The final ethanol concentration at a temperature of 30°C was 70.92 gL⁻¹ while maintaining a temperature of 40°C was 65.78 gL⁻¹.

It could be seen that temperature is one of the most important factors that affect ethanol production. Yuangsaard *et al.* (2013) conducted a study using *P. kudriavzevii* DMKU3-ET15 to ferment starch within a 2.5 L fermentation tank while maintaining a temperature of 40°C and an agitation speed at 300 rpm with air supply at 0.1 vvm. They found that ethanol produced was 7.39% (w/v) after 33 h, a productivity of 2.23 gL⁻¹h⁻¹ and a yield of 79.9% of the theoretical yield. Furthermore, *Kluyveromyces marxianus* DMKU 3-1042 was also used to ferment sugarcane juice under batch fermentation in a 5-L tank by maintaining temperature at 37°C and an agitation speed at 300 rpm with the air supply at 0.2 vvm. A production rate of ethanol at 6.43% (w/v), a productivity of 1.3 gL⁻¹h⁻¹ and a yield of 57.1% of theoretical yield were the results (Limtong *et al.*, 2007).

3. Fed-batch fermentation

The fed-batch fermentations were done by using an agitation speed at 400 rpm without aeration. The starter and main media were prepared the same as the batch fermentation. The main media was supplied to fermentation tank 1, 2 and 3 times as 50, 33 and 25% of total reducing sugar, respectively.

Fed batch fermentation I: with 1 time feeding. It was found that within 12 h of fermentation, yeast growth was very slow but still higher than the growth of the batch fermentation. After 12 h, yeast gradually grew and became significantly greater when the fermentation reached 48 h. Within 12 h of fermentation, yeast was gradually accustomed to a new environment, yeast slowly consumed reducing sugar. Although the fed batch fermentation with 1 time feeding could reduce an initial condensation of reducing sugar to 50% (90 gL⁻¹), this condensation was still higher than that of the starter (20 gL⁻¹). After feeding at 12 h of fermentation, yeast consumed more reducing sugar and this consumption was very high as the fermentation reached 36 h. This was clearly linked to the growth of yeast at 48 h. At the end of fermentation at 72 h, the reducing sugar still remained at a high level at 100 gL⁻¹. In the case that a fermentation period was extended more than 72 h, the

amount of remaining reducing sugar may reduce and growth of yeast increase; however, ethanol will not increase because the results showed that there was no sign of increase for ethanol after 36 h. Moreover, it appeared that yeast began to produce ethanol at 8 h rate at 10.38 gL⁻¹ which producing ethanol at 11.71 gL⁻¹. At 24 h, ethanol increased significantly and reached the highest at 36 h that ethanol was produced at 24.85 gL⁻¹, production rate was 0.69 gL⁻¹h⁻¹ and yield was 27.01% of the theoretical yield (Table 1, Figure 2A).

Fed batch fermentation II: with 2 times feeding. It was found that yeast growth was less than that for the fed batch fermentation with 1 time feeding. Considering the consumption of reducing sugar during fermentation, reducing sugar decreased very quickly after the first feeding at 6 h of fermentation. The second feeding was made at 12 h and it was found that reducing sugar sharply dropped at 72 h of fermentation leaving the reducing sugar at 72 gL⁻¹. For ethanol production, it was started at 6 h of fermentation at the rate of 10.92 gL⁻¹ and the production clearly increased after the second feeding at 24 h. The ethanol production climbed up to the highest point at 28 h with condensation at 24.08 gL⁻¹ production rate of 0.86 gL⁻¹h⁻¹ and yield at 26.17% of the theoretical yield (Table 1, Figure 2B) Subjected to the results, it could be perceived that ethanol with the fed batch fermentation with 2 times feeding produced slightly lower than that with the fed batch fermentation with 1 time feeding, on that other hand the production rate of ethanol was higher than the fed batch fermentation with 1 time.

Fed batch fermentation III: with 3 times feeding which this test, yeast grew very fast within the 24 h of fermentation and thereafter. The increase of growth was slowed down at 48 h. Considering the amount of reducing sugar within the first 6 h of the fermentation, there was few reducing sugars used. The first feed was made at 6 h and resulted in a slight decrease of reducing sugar. The reducing sugar significantly lessened after the second feed at 12 h and the reduction rate was the highest when the third feed

was made at 24 h. At 72 h, it was found that the reducing sugar remaining was 82 gL^{-1} . For ethanol production, ethanol was first produced at 12 h at 11.86 gL^{-1} , and it increased very after the second feed at 24 h. Thereafter the amount of ethanol remained constant and reached the peak at 21.60 gL^{-1} at 24 h with production rate $0.90 \text{ gL}^{-1}\text{h}^{-1}$ and yield

at 23.48% of theoretical yield (Table 1, Figure 2C). From the figure, it could be seen that ethanol production of this fed batch fermentation with 3 times feed was less than that for the 1 time and 2 times feed, but the production rate was greater than both fermentation periods.

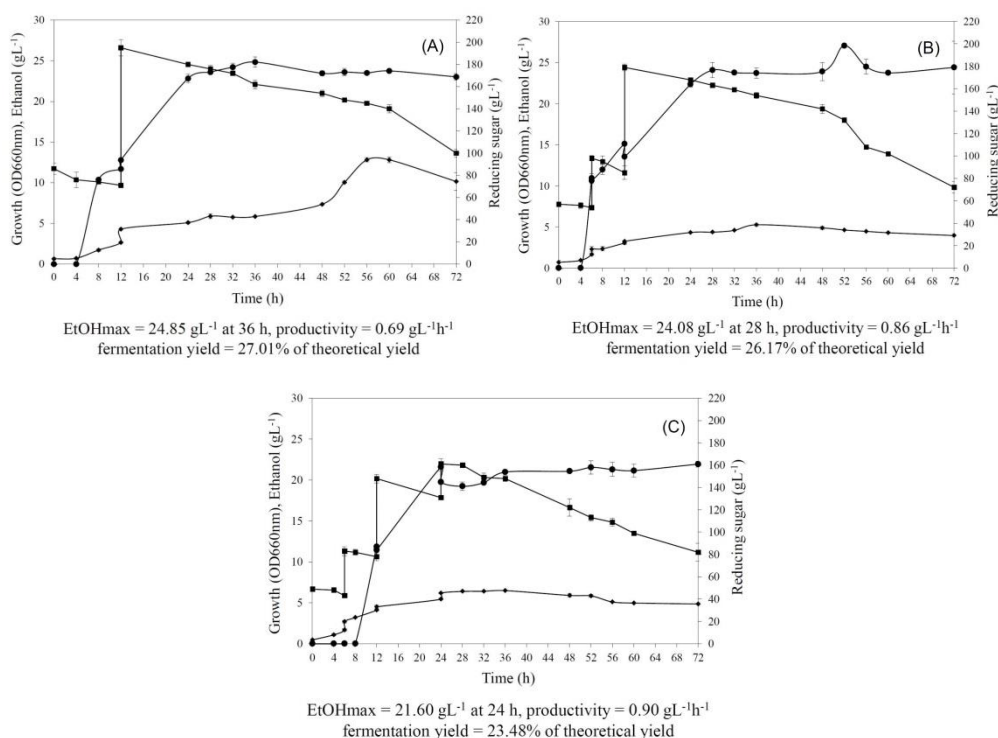


Figure 2 Growth (◆) Ethanol concentration (●) and reducing sugar concentration (■) by fed-batch fermentation at 45°C of *P. kudriavzevii* PBB511-1 (A) one time feeding; (B) two times feeding; (C) three times feeding, by agitation speed of 400 rpm and without aeration through the fermentation.

Sringiew (2005) reported that by using yeast *K. marxianus* DMKU3-1042 to ferment 22% sugarcane juice and incubated at 37°C , the results revealed that the fed batch fermentation with 2 times feed could produce more ethanol than that in the fed batch fermentation with 1 time and 3 times feed. Subjected to the results, ethanol was produced at 7.92% (v/v) and at 54 h of the fermentation. In addition, it was reported that fed batch fermentation SSF was done by using high dry matter corncob as the substrate. The fresh substrate was pretreated with diluted sulfuric acid-sodium hydroxide within a 6 L-reactor. The results showed that after test the final dry matter content

was 25% (w/v) which was set at the beginning at 19% and thereafter there were 3 additions made of 6% at 3, 6, and 12 portions during the first 24 h of the fermentation. After reaching 96 h of fermentation, it was found that every fed-batch produced ethanol more than 80 gL^{-1} , interval adding time at 4 h (label B) produced more ethanol than interval adding time 8 h (label A) and interval adding time 2 h (label C). Fermentation under label B, C and A categories produced ethanol at 84.7 gL^{-1} , 83.3 gL^{-1} and 80.2 gL^{-1} respectively (Zhang *et al.*, 2010). With the fed-batch fermentation, sugar-cane blackstrap molasses was reported as being used to ferment for producing ethanol. The

fermentation was set in 14-L tank at temperature of $32 (\pm 1) ^\circ\text{C}$ and initial volume of 3-L. During the fermentation, the sugarcane blackstrap molasses was added for 3 times at the 1, 2 and 3 h point which could be determined a time constant (K) as 0.08 or 1.6 h^{-1} . The results showed that the maximum ethanol yield was presented in the Test (n.) at 10, filling time at 3 h, time constant at 0 h^{-1} , which produced ethanol yield at 89.0% (Echegaray *et al.*, 2000). Sankh *et al.* (2013) reported that by using yeast oil, *P. kudriavzevii* MTCC 5493 extracted from rotten fruits, to produce biodiesel with the fed-batch fermentation in 26-L tank. The results showed that dry biomass yielded an oil yield of up to 33 gL^{-1} and 19% (w/w) respectively.

From the results shown above, it could be seen that the fed-batch fermentation with *P. kudriavzevii* PBB511-1 and 1 time cassava starch hydrolysate medium added produced ethanol at 24.85 gL^{-1} at 36 h which is higher than by adding for 2 and 3 times. Adding medium 2 times and 3 times produced ethanol at 24.08 gL^{-1} at 28 h and 21.6 gL^{-1} at 24 h, respectively. However, by adding the medium for 2 and 3 times, ethanol production rates were 0.86 and $0.9 \text{ gL}^{-1}\text{h}^{-1}$ which was slightly higher than that of 1 time medium added that has a production rate at $0.69 \text{ gL}^{-1}\text{h}^{-1}$. Therefore, the 1 time medium added for the fed-batch fermentation would be the appropriated for yeast strain PBB511-1.

CONCLUSIONS

Subjected to the *T. flavus* 21-3 strain, it found that fermentation of 30% cassava starch for 7 days, pH of 7.5, temperature at $30\text{-}31^\circ\text{C}$ and a shaking speed of 130 rpm produced 60-80 gL^{-1} reducing sugar. Then, *P. kudriavzevii* PBB511-1 was performed for batch and fed-batch fermentation at 45°C . It was found that with agitation speed at 400 rpm with no air supply was the most appropriate for fermentation. The results showed that ethanol produced was 45.44 gL^{-1} after 52 h of fermentation, which could determine a productivity of $0.87 \text{ gL}^{-1}\text{h}^{-1}$ and a yield of 49.39% of theoretical yield.

Subjected to the fed-batch fermentation of *P. kudriavzevii* PBB511-1, a result showed that a 1 time medium added could produce ethanol more than that of the 2 and 3 times medium added. With the 1 time medium added, ethanol was produced 24.85 gL^{-1} at 36 h which was determined a production rate of $0.69 \text{ gL}^{-1}\text{h}^{-1}$ and a yield of 27.01% of the theoretical yield.

Form the results above, *T. flavus* 21-3 and *P. kudriavzevii* PBB511-1 could become more influential on manufacturing ethanol fuel in Thailand, since the climate of Thailand is generally not suitable for yeast fermentation due to the high temperatures. Therefore, a cooling system and a germ contamination protection process is required to fulfill an ethanol fermentation under high temperatures. With these thermotolerant fungi and thermotolerant yeast, capable of high temperatures, it could be more advantageous for ethanol fuel manufacturing in Thailand.

SUGGESTIONS

The co-culture of these microorganisms should be studied in term of Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF). It might be improved and reduced cost of the ethanol fermentation process.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully thanks to The National Research Council of Thailand (NRCT) for financial support of this study and also thanks Mr. Navadet Yongsawai for English proving and editing.

REFERENCES

- Charoenrat, T. 2002. Fed-batch ethanol production from waste cassava starch by pH-dependent substrate feed. Master Thesis of Science (Biotechnology), Kasetsart University. (in Thai)
- Dhaliwal, S.S., Oberoi, H.S., Sandhu, S.K., Nanda, D., Kumar, D. and Uppal, S.K. 2011. Enhanced ethanol production from sugarcane juice by galactose adaptation of a newly isolated thermotolerant strain of *Pichia kudriavzevii*. **Bioresource Technology** 102: 5968-75.

- Dussán, K.J., Silva, D.D.V., Perez, V.H. and da Silva, S.S. 2016. Evaluation of oxygen availability on ethanol production from sugarcane bagasse hydrolysate in a batch bioreactor using two strains of xylose-fermenting yeast. **Renewable Energy** 87: 703-710.
- Echegaray, O.F., Carvalho, J.C.M., Fernandes, A.N.R., Sato, S., Aquarone, E. and Vitolo, M. 2000. Fed-batch culture of *Saccharomyces cerevisiae* in sugar-cane blackstrap molasses: invertase activity of intact cells in ethanol fermentation. **Biomass and Bioenergy** 19:39-50.
- Kaewkrajay, C., Dethoup, T. and Limtong, S. 2014. Ethanol production from cassava using a newly isolated thermotolerant yeast strain. **ScienceAsia** 40: 268-277.
- Kaur, U., Oberoi, H.S., Bhargav, V.K., Shivappa, R.S. and Dhaliwal, S.S. 2012. Ethanol production from alkali-and ozone-treated cotton stalks using thermotolerant *Pichia kudriavzevii* HOP-1. **Industrial Crops Products** 37: 219-226.
- Komagata, K. and Ohmomo, S. 1984. **Research Report on Quantitative and Qualitative Analysis of Volatile Fatty Acid Alcohol by Gas Chromatography Hitachi**. Central Laboratory and Greenhouse Complex, Kasetsart University. (in Thai)
- Krajang, M., Malairuang, K., Sukna, J., Rattanapradit, K. and Chamsart, S. 2021. Single-step ethanol production from raw cassava starch using a combination of raw starch hydrolysis and fermentation, scale-up from 5-L laboratory and 200-L pilot plant to 3000-L industrial fermenters. **Biotechnology for Biofuels** 14: 68.
- Kurtzman, C.P., Fell, J.W. and Boekhout, T. 2011. **The yeast a taxonomic study**. 5th edn. Elsevier, Amsterdam.
- Limtong, S., Sringiew, C. and Yongmanitchai, W. 2007. Production of fuel ethanol at high temperature from sugar cane juice by a newly isolated *Kluyveromyces marxianus*. **Bioresource Technology** 98: 3367-3374.
- Morimura, S., Ling Z.Y. and Kida, K. 1997. Ethanol production by repeated-batch fermentation at high temperature in a molasses medium containing a high concentration of total sugar by a thermotolerant flocculating yeast with improved salt-tolerance. **Fermentation and Bioengineering** 3: 271-274.
- Nelson, N.A. 1944. photometric adaptation of Somogyi method for the determination of glucose. **Biological Chemistry** 153: 375-380.
- Office of agriculture economic. 2021. **Cassava**. Available Source: <http://www.oae.go.th>, June 29, 2021.
- Pattanakittivorakul, S., Lertwattanasakul, N., Yamada, M. and Limtong, S. 2019. Selection of thermotolerant *Saccharomyces cerevisiae* for high temperature ethanol production from molasses and increasing ethanol production by strain improvement. **Antonie van Leeuwenhoek** 112(7): 975-990.
- Pongcharoen, P., Tawong, W. and Kucharoenpsaibul, S. 2021. Enhanced high temperature ethanol production using newly isolated thermotolerant yeast *Pichia kudriavzevii* NUPHS from Thailand. **ScienceAsia** 47: 47-56.
- Saelee, N.A. 1993. Comparative study of the starch determination methods in cassava root and flours. Master Thesis of Science (Biotechnology), Kasetsart University. (in Thai)
- Sankh, S., Thiru, M., Saran, S. and Rangaswamy, V. 2013. Biodiesel production from a newly isolated *Pichia kudriavzevii* strain. **Fuel** 106: 690-696.
- Santharam, L., Easwaran, S.N., Mohanakrishnan, A.S. and Mahadevan, S. 2019. Effect of aeration and agitation on yeast inulinase production: a biocalorimetric investigation. **Bioprocess and Biosystems Engineering** 42: 1009-1021.
- Sringiew, C. 2005. Fuel ethanol production from sugarcane juice by thermotolerant yeast. Master Thesis of Science

- (Microbiology), Kasetsart University.
(in Thai)
- Thai tapioca development institute. 2021.
Cassava trade information. Available
Source: [https://www.tapiocathai.org/
M2.html](https://www.tapiocathai.org/M2.html), June 29, 2021.
- Yuangsaard, N., Yongmanitchai, W. and
Limtong, S. 2013. Selection And
characterization of a newly isolated
thermotolerant *Pichia kudriavzevii*
strain for ethanol production at high
temperature from cassava starch
hydrollysate. **Antonie van Leeuwenhoek**
103: 577-588.
- Zhang, M., Wang, F., Su, R., Qi, W. and He,
Z. 2010. Ethanol production from
high dry matter corncob using fed-
batch simultaneous saccharification
and fermentation after combined
pretreatment. **Bioresource Technology**
101: 4949-4964.

การศึกษาชนิดและปริมาณของสารก่อเจลและสารให้ความหวาน ในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่น้ำตาลโตนดสด

The Study of Gelling Agent and Sweeteners in Jelly Gummy from Toddy Palm Sugar

สุรีย์พร กังสนันท์* ศิริพร รักย์แก้ว และ สการัตห์ กุมมะระ

Sureeporn Kangsanant*, Siriporn Rakkaew and Sakarat Kummara

Received: 3 May 2021, Revised: 12 Augst 2021, Accepted: 14 October 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของสารก่อเจล ศึกษาชนิดและปริมาณสารให้ความหวานแทนน้ำตาลซูโครสและคุณค่าทางโภชนาการในผลิตภัณฑ์เยลลี่กัมมี่น้ำตาลโตนดสด โดยศึกษาปริมาณเจลาตินคือร้อยละ 5 10 และ 15 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด ปริมาณโซเดียมอัลจินเตอร้อยละ 1 และ 2 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณเจลาตินที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็ง และค่าการบดเคี้ยวของกัมมี่เยลลี่เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลกับอัตราการคืนตัว การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9 point hedonic scale พบว่าผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่น้ำตาลโตนดสดที่มีปริมาณเจลาตินร้อยละ 10 และปริมาณโซเดียมอัลจินเตอร้อยละ 1 มากที่สุด ศึกษาการทดแทนสารให้ความหวานแทนน้ำตาลซูโครส 2 ชนิดคือ อิริทริทอลและมอลทิทอล โดยทดแทนในอัตราส่วนสารให้ความหวานต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 100:0, 50:50 และ 0:100 ตามลำดับ ผลการศึกษาการยอมรับทางประสาทสัมผัสโดยวิธี 9-point hedonic scale พบว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบกัมมี่เยลลี่ที่ใช้อัตราส่วนมอลทิทอลต่อน้ำตาลซูโครสเท่ากับ 100:0 สูงที่สุด ซึ่งสามารถใช้มอลทิทอลทดแทนน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่น้ำตาลโตนดร้อยละ 100 การใช้มอลทิทอลแทนน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่น้ำตาลโตนดสดทำให้ค่าความชื้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณเถ้า คาร์โบไฮเดรตและพลังงานทั้งหมดมีค่าลดลง แต่ไม่มีผลเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีน

คำสำคัญ: กัมมี่เยลลี่, น้ำตาลโตนด, สารก่อเจล, สารให้ความหวาน

สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ (อาหารและโภชนาการ) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ตำบลเขารูปราง อำเภอมือง จังหวัดสงขลา 90000

Program in Home Economics (Food and Nutrition), Faculty of Science and Technology, Songkhla Rajaphat University, Khoa-Roob-Chang, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): kangsanant.s@gmail.com

ABSTRACT

The objectives of this research were to study types and quantities of gelling agents, type and quantity of sugar substitute sweeteners and their nutritional value in gummy jelly products made from toddy palm sugar. The gelatin content was studied at 5, 10 and 15% and sodium alginate was studied at 1 and 2% of total amount of ingredients. The results showed that the hardness and the chewing increased with the increase of gelatin content while the amount of gelling agent had no effect on springiness. The 9-point hedonic scale sensory acceptance test showed that the participants accepted a gummy jelly containing 10% gelatin and 1% sodium alginate. Study on the substitution of sweeteners, erythritol and maltitol, by substituting sucrose and sweetener were at a ratio of 100:0, 50:50 and 0: 100, respectively. The 9-point hedonic scale sensory acceptance test showed that the participants accepted gummy jellies using a 100:0 maltitol to sucrose ratio which could substitute maltitol for sucrose for 100%. The use of maltitol instead of sucrose in jelly gummy products increased the moisture content while the amount of ash, total carbohydrates and energy were reduced but there was no change in the protein content.

Key words: gummy jelly, toddy palm sugar, gelling agent, sweetener

บทนำ

เยลลี่อ่อนหรือกัมมี่เยลลี่ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำผลไม้ ผัก ธัญชาติหรือสมุนไพรมาคั้นหรือสกัดแล้วผสมกับสารให้ความหวานและสารที่ทำให้เกิดเจล เช่น เจลาติน คาราจีแนน วุ้น เป็นต้น ในปริมาณที่เหมาะสม ผลิตภัณฑ์มีลักษณะแข็ง เหนียว (Thai community product standards, 2004) กัมมี่เยลลี่เป็นขนมที่สามารถรับประทานได้ทุกวัยมีจุดเด่นที่ลักษณะเหนียวนุ่ม มีรสชาติหวานหรือหวานอมเปรี้ยว ส่วนประกอบหลักของการทำเยลลี่คือ น้ำผลไม้ น้ำตาล กรด และสารที่ทำให้เกิดเจล สารก่อเจลเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่นิยมใช้ในอาหาร ได้แก่ เจลาติน โซเดียมอัลจิเนต เพกติน คาราจีแนน อากา (Agar) เมทิลเซลลูโลส โซเดียมคาร์บอกซี-เมทิลเซลลูโลส (Carboxy methyl cellulose; CMC) แป้งคัดแปร เป็นต้น (Douglas and Guo, 2019) สารที่ทำให้เกิดเจลแต่ละชนิดมีผลต่อโครงสร้างของเจลแตกต่างกันทั้งชนิดและปริมาณ ซึ่งมีผลต่อลักษณะเนื้อ

สัมผัสของกัมมี่เยลลี่ทำให้เกิดลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย ทั้งนี้จากรายงานการวิจัยพบว่าเจลาตินเป็นสารก่อเจลที่นิยมใช้ เนื่องจากทำให้เยลลี่กัมมี่มีเนื้อสัมผัสเหนียวนุ่ม ยืดหยุ่นและมีลักษณะใส (Dholvitayakhun *et al.*, 2017; Suwan *et al.*, 2017; Worrasarn *et al.*, 2018) นอกจากนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดนิยมใช้โซเดียมอัลจิเนตเป็นส่วนผสมของสารก่อเจล นอกจากนี้โซเดียมอัลจิเนตเป็นสารก่อเจลที่ทนความร้อน (Thermoirreversible gel) ผลิตภัณฑ์ที่มีโซเดียมอัลจิเนตเป็นสารก่อเจลจะไม่เปลี่ยนรูปเมื่อได้รับความร้อน (Pornchalermphong and Rattanapanon, 2012)

น้ำตาลโตนดสด เป็นน้ำหวานที่ได้จากช่อดอกของต้นตาลโตนดหรือที่เรียกว่า งวงตาล ต้นตาลโตนดเป็นพืชตระกูลปาล์มมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Borassus flabellifer* Linn. น้ำหวานที่ได้สามารถ

นำมาผลิตเป็นเครื่องดื่มเรียกว่ากระแช่หรือน้ำตาลเมา หรือนำไปเคี่ยวเป็นน้ำตาลปี๊บหรือน้ำตาลปึกได้ (Klin-ngarm, 2012) น้ำตาลโตนดสดเป็นน้ำหวานที่มีน้ำตาล ฟรุคโตสธรรมชาติ 100% น้ำตาลโตนดอยู่ในกลุ่มอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ (Glycemic Index, GI) คือ $GI = 35$ ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มสูงขึ้นอย่างช้าๆ หลังรับประทานร่างกายจึงไม่ต้องหลั่งอินซูลินออกมามากเพื่อกำจัดน้ำตาลออกจากกระแสเลือด (Thepphongsana, 2014)

สารให้ความหวาน เป็นสารสังเคราะห์ในกลุ่มที่ไม่ให้พลังงาน เป็นสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล ใช้ในผลิตภัณฑ์ทดแทนความหวานสำหรับผู้ที่ต้องการจำกัดพลังงาน อาหารที่มีรสชาติดหวาน สารให้ความหวานมีหลายชนิด เช่น แอสปาร์แตมปี ซูคลาโลส มอลทิทอล อิริทริทอล อะซีฟัลเฟม เป็นต้น ทั้งนี้แม้สารที่ว่าจะให้รสหวานแต่ก็ยังไม่มีการชนิดใดที่ให้รสชาติดหวานเหมือนน้ำตาลซูโครสได้ เพียงแต่ช่วยทดแทนเพื่อลดพลังงานคุณค่าทางโภชนาการเท่านั้นเพื่อผู้ที่ต้องการจำกัดพลังงาน ผู้ป่วยโรคเบาหวาน และโรคอื่นๆ ได้ (Nilsart, 2014) มอลทิทอล ให้ความหวานประมาณร้อยละ 85-95 ของน้ำตาลซูโครส ซึ่งให้รสชาติดคล้ายน้ำตาลซูโครส นอกจากนี้แบคทีเรียที่ผิวฟันยังไม่สามารถเปลี่ยนมอลทิทอลให้เป็นกรด ซึ่งเป็นสาเหตุของฟันผุได้ ร่างกายยังดูดซึมมอลทิทอลได้ช้าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำตาลซูโครส จึงไม่ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เหมาะสำหรับผู้ป่วยเบาหวาน หรือผู้ที่ใส่ใจสุขภาพทั่วไป อิริทริทอลมีความหวานประมาณร้อยละ 65 ของน้ำตาลซูโครส ให้ปริมาณแคลอรีต่ำ (ประมาณ 0.2 แคลอรีต่อกรัม) อิริทริทอลไม่เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด มีรสชาติดที่นุ่มนวลกว่าน้ำตาลซูโครสไม่ทำให้ฟันผุและไม่มีผลต่อปริมาณอินซูลินในเลือด (Choojun, 2012) เกลือส่วนใหญ่มีสารอาหารคือคาร์โบไฮเดรต และมีรสชาติดหวานที่

ได้มาจากน้ำตาลซูโครสซึ่งน้ำตาลซูโครสจะส่งผลเสียแก่ร่างกาย เช่นทำให้ฟันผุ หรือโรคเบาหวานตามมา ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าการพัฒนาเกลือให้มีคุณค่าเพิ่มขึ้นจะเป็นประโยชน์แก่ผู้บริโภคมากขึ้น การใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครสจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ผู้วิจัยสนใจศึกษา เนื่องจากปัจจุบันนี้สังคมทั่วโลกให้ความสนใจในด้านสุขภาพของตนเองมากขึ้น สิ่งหนึ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะมีสุขภาพที่ดีคือการเลือกกินอาหาร ผู้คนจึงหันมากินอาหารเพื่อสุขภาพ ลดการรับประทานอาหารที่มีรสชาติดหวานจัดหรือใช้สารให้ความหวานแทนน้ำตาล ผู้วิจัยจึงนำแนวทางนี้มาพัฒนาขนมที่มีรสชาติดหวานแต่ให้พลังงานต่ำ ก็คือเกลือที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล 2 ชนิด คือ มอลทิทอล และอิริทริทอล ซึ่งเป็นสารให้ความหวานสังเคราะห์ที่ให้พลังงานต่ำและดีต่อสุขภาพ รวมถึงการนำน้ำตาลโตนดซึ่งเป็นพืชท้องถิ่นของจังหวัดสงขลามาพัฒนาให้มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดเจลที่ใช้ในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่น้ำตาลโตนดสด

การศึกษาชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดเจลที่ใช้ในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่น้ำตาลโตนดสด โดยศึกษาเจลาติน ปริมาณร้อยละ 5 10 และ 15 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด และโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1 และ 2 ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมดในแต่ละสูตร เติร์ยมเกลือกัมมีโดยใช้สูตรพื้นฐานที่ดัดแปลงสูตรของ (Ratmanee *et al.*, 2017) มีส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 1 จากนั้นศึกษาลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางประสาทสัมผัสของกัมมีเยลลี่ ดังนี้

1.1 ลักษณะทางกายภาพ

ทดสอบลักษณะทางกายภาพโดยใช้เครื่อง Texture Analyser รุ่น TA-XTplus (Surrey, England)

ใช้ Cylinder probe diameter 40 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะกดร้อยละ 75 ของความหนาตัวอย่าง ระยะเวลาให้ตัวอย่างคืนตัว 3 วินาทีทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 25 °C ตัวอย่างขึ้นรูปเป็นรูปหัวใจมีขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร หนา 1.5 เซนติเมตรจำนวน 15 ซ้ำ รายงานค่าเป็น ค่าความแข็ง (hardness) อัตราการคืนตัว/ยืดหยุ่น (springiness) และค่าการบดเคี้ยว (chewiness)

1.2 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

ทดสอบด้านประสาทสัมผัส ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบรวมของผลิตภัณฑ์ ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9 point hedonic scale) ผู้ทดสอบชิมเป็นผู้ที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน คัดเลือกชนิดและปริมาณของเจลลีนหรือโซเดียมอัลจิเนตที่ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบสูงสุดเพื่อศึกษาในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 1 สูตรพื้นฐานของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลีนน้ำตาลโตนดสด

ส่วนผสม	กรัม
น้ำตาลโตนด	100.00
เจลลีน	5.00
น้ำตาลซูโครส	25.00
กรดซิตริก	0.10

ที่มา: (Ratmanee *et al.*, 2017)

2. ศึกษาชนิดและปริมาณสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลีนน้ำตาลสด

ผลิตเยลลีนกัมมีโดยใช้ชนิดและปริมาณของสารก่อเจลที่คัดเลือกได้จากขั้นตอนที่ 1 ศึกษาชนิดและปริมาณของสารให้ความหวาน 2 ชนิด ได้แก่ มอลทิทอลและอิริทริทอล โดยใช้อัตราส่วนน้ำตาลซูโครสต่อสารให้ความหวานทั้ง 2 ชนิดในอัตราส่วนน้ำตาลซูโครสต่อสารให้ความหวานที่ระดับ 100:0, 50:50 และ 0:100 ทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัสโดยวิธีการ 9-point hedonic Scale ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบรวมโดยผู้ทดสอบชิมเป็นผู้ที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน คัดเลือกชนิดและปริมาณของสารให้ความหวานแทนน้ำตาลซูโครสในการผลิตกัมมีเยลลีนน้ำตาลโตนดสดที่ได้รับคะแนนสูงที่สุดเพื่อศึกษาในขั้นตอนต่อไป

3. ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลีน

ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลีน ได้แก่ โปรตีน ไขมัน ความชื้น เถ้า ใยอาหาร (AOAC, 2000) คาร์โบไฮเดรต และพลังงานทั้งหมด (คำนวณ)

4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ในการวิเคราะห์คุณภาพด้านกายภาพ และวางแผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) ในการวิเคราะห์ลักษณะทางประสาทสัมผัส รายงานผลการทดลองในรูปแบบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลองด้วยวิธี one-way ANOVA ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการ Duncan's New Multiple Range

Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการศึกษาชนิดและปริมาณของสารก่อเจลในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่น้ำตาลโตนดสด

1.1 การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ

ตารางที่ 2 ลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ที่มีปริมาณเจลาตินและโซเดียมอัลจิเนตที่แตกต่างกัน

เจลาติน(G):	คุณลักษณะเนื้อสัมผัส		
โซเดียมอัลจิเนต(S)	Hardness (gram)	Springiness	Chewiness
G 5: S 1	4,354.21±957.23 ^d	0.9580±0.02 ^a	3,615.61±868.57 ^d
G 5: S 2	2,695.45±787.33 ^c	0.9210±0.13 ^a	1,798.67±701.75 ^c
G 10: S 1	12,095.60±620.01 ^c	0.9110±0.02 ^a	8,862.58±1,278.23 ^c
G 10: S 2	12,340.15±965.99 ^c	0.9340±0.04 ^a	10,004.61±1,834.22 ^b
G 15: S 1	13,040.60±636.37 ^b	0.9500±0.00 ^a	10,660.10±586.43 ^b
G 15: S 2	17,243.40±432.23 ^a	0.9410±0.01 ^a	14,447.03±376.09 ^a

หมายเหตุ - อักษร a, b, c, d, e ที่แตกต่างกันในแนวดิ่งคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p < 0.05$)

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ที่มีปริมาณเจลาตินและโซเดียมอัลจิเนตที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 2) ผลการศึกษาพบว่า กัมมีเยลลี่น้ำตาลโตนดสดที่ใช้เจลาตินปริมาณร้อยละ 5, 10, และ 15 เจลาตินร้อยละ 15 มีค่าความแข็ง (Hardness) อัตราการคืนตัว/ยืดหยุ่น (Springiness) และค่าการบดเคี้ยว (Chewiness) มากที่สุด ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการใช้เจลาตินในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เจลาตินโครงสร้างและเนื้อสัมผัสที่แข็งแรงขึ้น ทำให้ใช้แรงในการบดเคี้ยวเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับสูตรอื่นซึ่งใช้เจลาตินในปริมาณที่น้อยกว่าส่งผลให้เจลาตินโครงสร้างและเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มกว่าตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของอัลจิเนตในปริมาณร้อยละ 1 และ 2 ไม่มีผลต่ออัตราการคืนตัว/ยืดหยุ่น (Springiness) ของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่น้ำตาลโตนดสด เนื่องจากโซเดียมอัลจิเนตมีคุณสมบัติเป็นสารให้ความคงตัว

ไม่มีผลต่อความยืดหยุ่น นอกจากนี้การใช้เจลาตินร่วมกับโซเดียมอัลจิเนต พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นเจลาตินร้อยละ 5 เมื่อปริมาณโซเดียมอัลจิเนตเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งและค่าการบดเคี้ยวลดลง แต่เมื่อระดับความเข้มข้นของเจลาตินเพิ่มขึ้น (ร้อยละ 10 และ 15) การเพิ่มขึ้นของโซเดียมอัลจิเนตทำให้ค่าความแข็งและค่าการบดเคี้ยวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการคุณสมบัติในการเกิดเจลของโซเดียมอัลจิเนตขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ที่ระดับความเข้มข้นต่ำทำให้การเกิดโครงสร้างเจลที่ไม่แข็งแรง นอกจากนี้การใช้สารก่อเจลที่ความเข้มข้นต่ำซึ่งเจลาตินยังเกิดโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงนั้นร่วมกันสองชนิดอาจทำให้เกิด ค่าการแตกหักของของแข็ง (rupture strength) ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งและค่าการบดเคี้ยวของกัมมีเยลลี่ลดลง แต่เมื่อสารก่อเจลทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นมีผลในการเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างเจลเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งและค่าการบดเคี้ยว

เพิ่มขึ้น (Ratthamma and Phunkasem, 2019; Aarstad *et al.*, 2017)

1.2 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

การศึกษาการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน

ด้วยวิธีการ 9 point hedonic scale ในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ที่มีปริมาณเจลาตินและโซเดียมอัลจิเนตที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ที่มีปริมาณเจลาตินและโซเดียมอัลจิเนตที่แตกต่างกัน

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	ปริมาณเจลาติน (G) และโซเดียมอัลจิเนต (S) (ร้อยละ)					
	G5 : S1	G5 : S2	G10 : S1	G10 : S2	G15 S1	G15 : S2
ลักษณะปรากฏ	6.16±1.67 ^b	4.72±1.76 ^c	7.02±1.42 ^a	7.00±1.34 ^a	6.96±1.47 ^a	7.12±1.49 ^a
สี	6.38±1.39 ^a	5.54±1.56 ^b	6.64±1.50 ^a	6.86±1.22 ^a	6.90±1.32 ^a	6.96±1.39 ^a
กลิ่น	5.72±1.82 ^a	4.86±1.69 ^b	5.96±1.73 ^a	5.82±1.87 ^a	6.00±1.60 ^a	5.64±1.94 ^a
กลิ่นรส	5.88±1.93 ^a	4.86±1.78 ^b	5.92±1.52 ^a	5.94±1.73 ^a	5.96±1.59 ^a	5.86±1.59 ^a
รสชาติ	6.18±1.75 ^a	5.04±1.98 ^b	6.14±1.53 ^a	6.22±1.48 ^a	6.38±1.56 ^a	6.14±1.76 ^a
เนื้อสัมผัส	6.42±1.52 ^a	4.52±1.77 ^b	6.40±1.48 ^a	6.58±1.56 ^a	6.64±1.43 ^a	5.98±1.75 ^a
ความชอบรวม	6.44±1.56 ^a	5.02±1.74 ^b	6.64±1.27 ^a	6.62±1.36 ^a	6.56±1.43 ^a	6.34±1.55 ^a

หมายเหตุ : - อักษร^{a,b,c} ที่แตกต่างกันในแนวตั้งคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 1 ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ สูตร A (G5:S1) สูตร B (G5:S2) สูตร C (G10:S1) สูตร D (G10:S2) สูตร E (G15:S1) และ สูตร F (G15:S2)
ตัวอักษร G = เจลาติน และ S = โซเดียมอัลจิเนต

ผลการศึกษาคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนน 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบรวม แสดงดังตารางที่ 3 และภาพแสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ (ภาพที่ 1) ในการศึกษา

กัมมี่เยลลี่น้ำตาลโดนดสดที่มีการใช้ปริมาณเจลาตินร้อยละ 5, 10, 15 และโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1 และ 2 ตามลำดับ พบว่า เมื่อปริมาณเจลาตินเพิ่มมากขึ้นคะแนนความชอบ ของผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่น้ำตาลโดนดสดไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 6 สูตร ยกเว้น

สูตรที่ 2 ที่มีปริมาณเจลาตินร้อยละ 5 และโซเดียมอัลจินตร้อยละ 2 มีคะแนนความชอบน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่นๆ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะกัมมีเยลลี่มีความอ่อนนุ่มเกินไปแต่เมื่อพิจารณาจากคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยรวมพบว่าผู้ทดสอบชิมทั้ง 50 คน ให้คะแนนการยอมรับกัมมีเยลลี่น้ำตาลโตนดสดที่มีอัตราส่วนปริมาณของเจลาตินร้อยละ 10 และปริมาณโซเดียมอัลจินตร้อยละ 1 ของส่วนผสมทั้งหมดมากที่สุด เนื่องจากผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่มีลักษณะปรากฏที่ดี มีความคงตัวดี เนื้อกัมมีเยลลี่มีความใส มีสีธรรมชาติของน้ำตาลโตนดสดคือสีเหลืองอ่อน มีกลิ่นหอมและกลิ่นรสที่ดีจากน้ำตาลโตนดสด รสชาติเนื้อสัมผัสมีความหวานหนึบตามคุณสมบัติที่ดีของเยลลี่อ่อน เมื่อเทียบกับเยลลี่สูตรอื่น ผู้วิจัยจึงคัดเลือกกัมมีเยลลี่ที่มีปริมาณเจลาตินร้อยละ 10 และปริมาณโซเดียมอัลจินตร้อยละ 1 ของส่วนผสมทั้งหมดเพื่อศึกษาในขั้นตอนต่อไปเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเจลาตินและโซเดียมอัลจินตให้ผลคะแนนความชอบไม่แตกต่างกันจึงเลือกใช้ปริมาณเจลาตินและโซเดียมอัลจินตที่ปริมาณน้อยที่สุดที่ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับ นอกจากนี้ยังพบว่า ผลการศึกษาปริมาณเจลาตินในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่น้ำตาลโตนดสดมีปริมาณใกล้เคียงกับการศึกษาปริมาณเจลาตินในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่จึงคือใช้ปริมาณเจลาตินร้อยละ 7 เป็นระดับที่ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับสูงที่สุดเนื่องจากให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดี (Ratmanee *et al.*, 2017) นอกจากนี้การศึกษปริมาณเจลาตินในผลิตภัณฑ์เยลลี่แครอทแผ่น พบว่าปริมาณเจลาตินที่ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบสูงที่สุด

คือร้อยละ 5.8 การเพิ่มขึ้นของปริมาณเจลาตินทำให้คะแนนการยอมรับด้านความเหนียวและความชอบรวมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้เยลลี่ที่ได้มีความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเจลาตินทำให้เกิดโครงสร้างเจลที่แข็งแรง (Teerawechcharoenchai *et al.*, 2008) อย่างไรก็ตามการใช้เจลาตินเป็นสารก่อเจลมักใช้เพียงชนิดเดียว หรือใช้ร่วมกับสารก่อเจลชนิดอื่นๆ เช่น คาราจีแนน ในอัตราส่วนของเจลาตินต่อคาราจีแนนที่ปริมาณร้อยละ 0, 50 และ 100 โดยพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณคาราจีแนนทดแทนเจลาตินที่ระดับเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เยลลี่ที่ได้มีค่าความแข็ง ความเหนียว และพลังการบดเคี้ยวลดลง เนื่องจากคาราจีแนนมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เป็นกลาง มีผลทำให้เนื้อเยลลี่สูญเสียความหนืดและการเกิดเจล โดยคาราจีแนนที่ปริมาณร้อยละ 50 ได้รับคะแนนความชอบสูงที่สุด (Chedoloh and Chemalee, 2019)

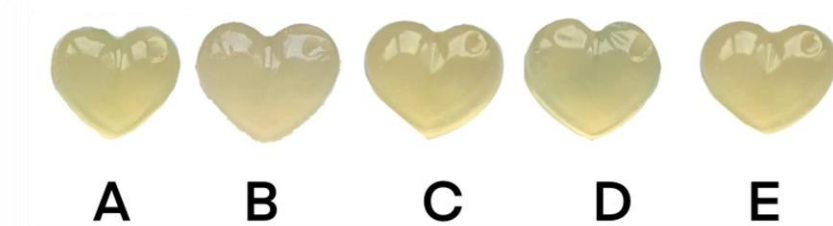
2. ผลการศึกษาชนิดและปริมาณสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่น้ำตาลโตนดสด

การศึกษการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน ด้วยวิธีการ 9 point hedonic scale ในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่น้ำตาลโตนดสดที่มีการใช้สารให้ความหวาน 2 ชนิด ได้แก่ มอลทิทอล และอิริทริทอล โดยใช้อัตราส่วนสารให้ความหวานต่อน้ำตาลซูโครสในอัตราส่วน 0:100, 50:50 และ 100:0 ผลการศึกษแสดงดังตารางที่ 4 และภาพที่ 2 แสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่

ตารางที่ 4 คะแนนความชอบของผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ที่มีการใช้มอลทิทอล (M) และอิริทริทอล(E) แทนน้ำตาลซูโครส (S) ที่ระดับต่างๆ

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	ชนิดและปริมาณของสารให้ความหวาน				
	Control	M50:S50	M100 : S0	E50 : S50	E100 :S0
ลักษณะปรากฏ	7.46±1.05 ^{ab}	7.76±1.27 ^{ab}	7.92±0.94 ^a	7.32±1.25 ^a	7.54±1.32 ^{ab}
สี	6.90±0.90 ^a	6.98±1.18 ^a	7.38±0.94 ^a	7.08±1.17 ^a	7.20±1.35 ^a
กลิ่น	6.82±1.13 ^a	6.86±1.35 ^a	7.06±1.16 ^a	6.70±1.23 ^a	6.68±1.69 ^a
กลิ่นรส	7.06±1.01 ^{ab}	7.08±1.15 ^a	7.40±1.12 ^a	6.80±1.17 ^b	7.16±1.28 ^{ab}
รสชาติ	6.86±1.39 ^{ab}	7.30±1.21 ^a	7.40±1.14 ^a	6.74±1.33 ^b	7.08±1.33 ^{ab}
เนื้อสัมผัส	7.12±1.15 ^b	7.32±1.28 ^{ab}	7.72±1.01 ^a	6.86±1.48 ^b	7.16±1.33 ^b
ความชอบรวม	7.18±1.00 ^{bc}	7.46±1.19 ^{ab}	7.74±1.02 ^a	6.92±1.14 ^c	7.16±1.37 ^{bc}

หมายเหตุ : อักษร a, b, c ที่แตกต่างกันในแนวดิ่งคือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 2 ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ทดแทนสารให้ความหวาน สูตร A (Control) สูตร B (M:S 100:0)

สูตร C (M:S 50 : 50) สูตร D (E:S 50:50) สูตร E (E:S 100:0)

ตัวอักษร M = มอลทิทอล E = อิริทริทอล และ S = ซูโครส

ผลการศึกษาคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส (9-point Hedonic scale) ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบรวมของผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่น้ำตาลโดนดสดที่มีชนิดและปริมาณของสารให้ความหวานแตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ มอลทิทอล และอิริทริทอล ผลการศึกษาพบว่า ผู้ทดสอบชิมทั้ง 50 คนให้คะแนนความชอบกัมมี่เยลลี่น้ำตาลโดนดสดที่มีการใช้อัตราส่วนปริมาณของมอลทิทอลและอิริทริทอลเป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลซูโครสที่อัตราส่วนสารให้ความหวานต่อซูโครส 50:50 และ 100:0 ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ในทุกๆ ด้านเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารให้ความหวาน 2 ชนิดคือมอลทิทอลและอิริทริทอลที่อัตราส่วนสารให้ความหวานต่อซูโครส 50:50 และ 100:0 พบว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบกัมมี่เยลลี่ที่มีการใช้มอลทิทอลเป็นสารให้ความหวานแทนซูโครสมากกว่าการใช้อิริทริทอลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งสองระดับการทดแทน โดยผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบแตกต่างกันในด้านของกลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบรวม โดยการใช้สารให้ความหวาน

สองชนิดที่ระดับแตกต่างกันไม่มีผลต่อการยอมรับด้านลักษณะปรากฏและสีของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่จากน้ำตาลโตนดสด เนื่องจากสารให้ความหวานทั้งสองชนิดไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดซึ่งให้สารสีน้ำตาลได้ จึงไม่มีผลต่อสีและลักษณะปรากฏของกัมมีเยลลี่ผลการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาของ (Rittilert and Warin, 2020) ศึกษาการใช้มอลทิทอลทดแทนซูโครสต่อคุณภาพของกัมมีเยลลี่มะม่วงหาวมะนาวโห่ ในอัตราส่วนน้ำตาลซูโครสต่อมอลทิทอล 100:0, 50:50 และ 0:100 พบว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความความชอบกัมมีเยลลี่มะม่วงหาวมะนาวโห่ที่ใช้สารให้ความหวานน้ำตาลซูโครสต่อมอลทิทอลที่ระดับ 50:50 และ 0:100 ในระดับปานกลางไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) และสามารถใช้มอลทิทอลทดแทนน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ได้ถึงร้อยละ 100 ของส่วนผสมทั้งหมด

นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลในขนมวุ้นไทย ในอัตราส่วนซอร์บิทอลร่วมกับซูคราโลสทดแทนน้ำตาลทรายที่ระดับ 25, 50, 75 และ 100 พบว่าสามารถใช้ซอร์บิทอลร่วมกับซูคราโลสทดแทนน้ำตาลในวุ้นกะทิได้สูงสุดถึง 100% ของส่วนผสมทั้งหมด (Thiensawai and Kacomanichai, 2013)

3. ผลการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่น้ำตาลโตนดสด

ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่น้ำตาลโตนดสดที่มีการใช้น้ำตาลซูโครส 100% เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่น้ำตาลโตนดสดที่มีการใช้มอลทิทอล 100% ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน ปริมาณน้ำตาล และพลังงานทั้งหมด ผลการทดลองแสดงดังตารางที่

ตารางที่ 5 คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่สูตรที่มีการใช้น้ำตาลซูโครสเปรียบเทียบกับสูตรที่ใช้มอลทิทอล

คุณค่าทางโภชนาการ	ซูโครส (ร้อยละ 100)	มอลทิทอล (ร้อยละ 100)
ความชื้น	53.75±1.13	56.90±1.42
โปรตีน	7.17±0.09	7.17±0.01
เถ้า	0.51±0.11	0.48±0.01
คาร์โบไฮเดรต	38.57 g/100g	35.45 g/100g
พลังงาน	182.96 kcal/100g	170.48 kcal/100g
ใยอาหาร	ND*	ND*
ไขมัน	ND*	ND*

หมายเหตุ: ND* = not detected

ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่น้ำตาลโตนดสด เปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการระหว่างสูตรน้ำตาลซูโครสร้อยละ 100 กับสูตรทดแทนสารให้ความหวานมอลทิทอลในปริมาณร้อยละ 100 พบว่า การทดแทน

สารให้ความหวานในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ส่งผลให้เยลลี่มีค่าพลังงานลดลง เนื่องจากมอลทิทอลเป็นสารให้ความหวานพลังงานต่ำอยู่ที่ 2.1-2.4 กิโลแคลอรีต่อกรัม มีความหวานใกล้เคียงกับน้ำตาลซูโครสร้อยละ 90 ส่วนน้ำตาลซูโครสมีค่าพลังงานอยู่ที่ 4 กิโลแคลอรี

ต่อกรัม (Srisangwan, 2012) การใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลยังส่งผลต่อค่าความชื้น ทำให้ค่าความชื้นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากมอลทิทอลเป็นสารกลุ่มโพลีออลมีโครงสร้างที่เป็นหมู่ไฮดรอกซิลรวมกับพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ทำให้โครงสร้างสามารถจับกับน้ำได้ดี จึงทำให้กัมมีเยลลี่ที่ใช้มอลทิทอลเป็นสารให้ความหวานมีความชื้นสูงกว่ากัมมีเยลลี่ที่ใช้น้ำตาลซูโครส (Norsuwan and Tantechai, 2019) ซึ่งส่งผลให้เนื้อสัมผัสของกัมมีเยลลี่น้ำตาลโดนดสดที่ใช้มอลทิทอลมีความนุ่มกว่าสูตรที่ใช้น้ำตาลซูโครส สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Rittilert and Warin, 2020) ซึ่งพบว่าการใช้มอลทิทอลทดแทนซูโครสมีผลต่อคุณภาพของกัมมีเยลลี่มะม่วงหาวมะนาวโห่ ในปริมาณน้ำตาลซูโครสต่อมอลทิทอลในอัตราส่วนร้อยละ 100:0, 50:50 และ 0:100 พบว่า การใช้มอลทิทอลทำให้กัมมีเยลลี่มีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้น้ำตาลซูโครส นอกจากนี้การศึกษายังพบว่า ปริมาณของคาร์โบไฮเดรตและเถ้าลดลง เนื่องจากปริมาณของน้ำตาลซูโครสลดลง น้ำตาลซูโครสจัดเป็นสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต ในโมเลกุลของน้ำตาลซูโครสจะมีคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนซึ่งหลังจากถูกเผาที่อุณหภูมิสูงจะกลายเป็นออกไซด์ระเหยไปหมด ซึ่งเถ้าเป็นสารอนินทรีย์ที่เหลืออยู่หลังการเผาไหม้ ดังนั้นกัมมีเยลลี่สูตรที่ใช้มอลทิทอลร้อยละ 100 จึงมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตและเถ้าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ใช้น้ำตาลซูโครสร้อยละ 100 (Chareekhot, 2016; Wongthong and Phunphonkun, 2016) ผลึกกัมมีเยลลี่น้ำตาลโดนดสดที่ใช้น้ำตาลซูโครสและมอลทิทอลเป็นสารให้ความหวานมีปริมาณ โปรตีน ไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ไม่พบปริมาณไขมัน และใยอาหารในผลึกกัมมีเยลลี่น้ำตาลโดนดสดเนื่องจากในน้ำตาลโดนดซึ่งเป็นส่วนผสมหลักของกัมมีเยลลี่ไม่มี

องค์ประกอบของไขมันและใยอาหาร (Glycemic index foundation, 2021) อย่างไรก็ตามการใช้สารให้ความหวานมอลทิทอลสามารถลดพลังงานของกัมมีเยลลี่ได้ การใช้มอลทิทอลทดแทนน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่น้ำตาลโดนดสดซึ่งมีค่าดัชนีไกลซีมิก (glycemic index) ต่ำ เหมาะสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน ไม่ก่อให้เกิดฟันผุเนื่องจากไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อแบคทีเรียในช่องปาก (Rittilert and Warin, 2020)

สรุป

การศึกษากการใช้เจลาตินและโซเดียมอัลจิเนตเป็นสารก่อเจลในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่น้ำตาลโดนดสดพบว่าปริมาณสารก่อเจลที่เหมาะสมได้แก่เจลาตินร้อยละ 10 และโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1 ผลึกกัมมีเยลลี่น้ำตาลโดนดสดสามารถใช้มอลทิทอลเป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลซูโครสได้ร้อยละ 100 นอกจากนี้ยังสามารถลดคาร์โบไฮเดรต เถ้า และพลังงานในกัมมีเยลลี่น้ำตาลโดนดสดลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ใช้น้ำตาลซูโครส

เอกสารอ้างอิง

- Aarstad, O., Heggset, E.B., Pedersen, I.S., Bjørnøy, S.H., Syverud, K. and Strand, B.L. 2017. Mechanical properties of composite hydrogels of alginate and cellulose nanofibrils. **Polymer** 378(9): 1-19.
- AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis**. 17th ed. Association of official analytical chemists, Gaithersburg, Md.
- Chareekhot, K. 2016. **Food analysis**. Published document, Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University. (in Thai)

- Chedoloh, R. and Chemalee, S. 2019. Effect of Hydrocolloids on Quality and Stability of Halal Velvet Tamarind Jelly During Storage. **RMUTT Journal, Science and Technology Issue** 12(2): 62-74. (in Thai)
- Choojun, S. 2012. **Low-calorie sweeteners: biological production, properties and application**. Chula press, Bangkok. (in Thai)
- Dholvitayakhun, A., Chompoo, S. and Piwleuang, J. 2017. Development of passion fruit jelly mixed with gac fruit. **Rajabhat Agriculture Journal** 16(1):41-47. (in Thai)
- Douglas, G.H. and Guo, Q. 2019. The role of hydrocolloids in the development of food structure, pp. 1-28. *In* Spyropoulos, F., Lazidis, A. and Norton, L, eds. **Handbook of Food Structure Development**. The Royal Society of Chemistry, Canada.
- Glycemic index foundation. 2021. **Hesed Palmyra Palm Sugar**. GI Symbol. Available source: <https://www.gisymbol.com/low-gi-products/hesed-palmyra-palm-sugar/>, August 12, 2021. (in Thai)
- Klin-ngarm, N. 2012. **The lifestyle of the people of Phet city and the culture of rice, sugar, salt**. Published document, Institute for the research and promotion of arts and cultures, Phetchaburi Rajabhat University. (in Thai)
- Nilsart, K. 2014. Improving the temporal profile of artificial sweeteners. Master Thesis of Science Program in food technology, Silpakom University. (in Thai)
- Norsuwan, T. and Tantechai, S. 2019. Effect of maltitol on physical and chemical properties of low calorie passion fruit jam, pp. 863-870. *In* **The 56th Kasetsart University Annual Conference**. Kasetsart University. (in Thai)
- Pomchalemphong, P. and Rattanapanon, N. 2012. **Alginate**. Food network solution. Available Source: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2568/alginate>, August 12, 2021. (in Thai)
- Ratmanee, P., Sihabandit, A., Homelakom, S., Lelaikam, B., Phichai, S. and Phoratsor, W. 2017. Development of Ginger Gummy Jelly Products, pp. 629-633. *In* **RMU GRC 2017: Academic conferences to present research results 2nd graduate degree**. Rajabhat Mahasarakham University. (in Thai)
- Ratthamma, P. and Phunkasem, A. 2019. Food science to innovation to reduce waste. **Journal of The Department of Science Service** 68(211): 33-35. (in Thai)
- Rittilert, P. and Warin, K. 2020. Development of Karanda (*Carissa carandas* L.) Gummy Jelly Product. **Thai Journal of Science and Technology** 9(2): 343-354. (in Thai)
- Srisangwan, N. 2012. Nutritional improvement of A-lua and Foi-thong desserts by using nonsugar sweeteners. Master Thesis of Science Food Technology Program Graduate school, Silpakorn University. (in Thai)
- Suwan, T., Pradutprom, W., Ngamroop, W., Choosuk, N. and Phungamngoen, C. 2017. Development of Babbler's Bill leaf gummy jelly. **Burapha Science Journal** 22(1): 198-201. (in Thai)
- Teerawechcharoenchai, C., Jangchad, K., Jangchud, A., Harnsilawat, T. and Chariyachotilert, S. 2008. Effect of gelatin and glucose syrup

- on qualities of carrot sheet jelly, pp 303-310.
- In Proceedings of 52nd Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry.* The Thailand Research Fund, Bangkok. (in Thai)
- Thai community product standards. 2004. **Thai community product standard (Soft Jelly).** Available Source: http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps519_47.pdf, March 15, 2020. (in Thai)
- Thepphongsana, S. 2014. **Coconut sugar, palm sugar.** Available Source: <https://www.si.mahidol.ac.th/sdc/webboard.com>, March 15, 2020. (in Thai)
- Thiensawai, A. and Kaeomanichai, A. 2013. **Non-sugar Sweeteners in Thai Jelly Dessert.** Available Source: http://herp-nru.psu.ac.th/file/U55064_41.pdf, January 30, 2020. (in Thai)
- Wongthong, O. and Phunphonkun, K. 2016. **Cooking principles.** Kasetsart University Press, Bangkok. (in Thai)
- Worrasarn, N., Jaipakdee, N. and Limpongsa, E. 2018. Preparation and evaluation of gummy jelly products containing glucomannan, pp. 932-939. *In The National and International Graduate Research Conference 2017.* Khon Kaen University. (in Thai)

ค่าโลหิตวิทยาบางประการและอัตราการรอดของปลานิลที่เลี้ยงด้วยอาหารผสม
กระเทียมหลังการกระตุ้นด้วยเชื้อ *Aeromonas hydrophila*
**Some Hematological Parameter and Survival Rate of Nile tilapia
(*Oreochromis niloticus*) Fed with Dietary Garlic Cloves
(*Allium sativum*) in Post-Challenge with *Aeromonas hydrophila***

ณัฐฐา นธิกุลวรวงศ์*

Nudtha Nithikulworawong*

Received: 6 May 2021, Revised: 23 August 2021, Accepted: 13 September 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเสริมกระเทียมในอาหารต่อค่าโลหิตวิทยาบางประการ และความต้านทานโรคต่อเชื้อ *Aeromonas hydrophila* ในปลานิล (*Oreochromis niloticus*) โดยทำการเลี้ยงปลานิลขนาด 10.00±0.05 กรัมต่อตัว ด้วยอาหารผสมกระเทียมที่ระดับความเข้มข้น 0 (ชุดควบคุม) 1 3 5 และ 7 กรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม เป็นเวลานาน 45 วัน จากนั้นทำการทดสอบความต้านทานเชื้อโดยการฉีดเชื้อ *A. hydrophila* บันทึกอัตราการตาย ผลการทดลองพบว่า ปลาที่ได้รับอาหารผสมกระเทียมในทุกะดับมีอัตราการตายต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ ผลการศึกษาค่าโลหิตวิทยาบางประการในปลาที่ได้รับอาหารผสมกระเทียมก่อนและหลังการกระตุ้นด้วยการฉีดด้วยเชื้อ *A. hydrophila* เปรียบเทียบกับปลากลุ่มควบคุม พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารผสมกระเทียมทุกะดับมีปริมาณเม็ดเลือดแดงและเม็ดเลือดขาวสูงกว่าปลากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากผลการศึกษารูปได้ว่าการให้อาหารผสมกระเทียมสามารถส่งเสริมการตอบสนองทางภูมิคุ้มกัน และความต้านทานโรคต่อเชื้อ *A. hydrophila* ในปลานิลได้

คำสำคัญ: ปลานิล, กระเทียม, *Aeromonas hydrophila*, ค่าโลหิตวิทยา

ABSTRACT

The aim of this research was to study the effect of dietary garlic (*Allium sativum*) supplementation on some hematological parameters and disease resistance against *Aeromonas hydrophila* in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). The Nile tilapia with 10.00 ± 0.05 g/fish initial body weight were fed with diet supplemented with 0, 1, 3, 5 and 7 g/ kg of feed for 45 days. After that, challenged with *A. hydrophila* was performed and mortality rate was recorded. The challenge test with *A. hydrophila* showed that fish fed diets supplemented with garlic in all levels had statistically significant lower mortality rate than the control group ($p < 0.05$). Moreover, some hematological studies in fish fed dietary garlic at pre- and post-challenged with *A. hydrophila* were compared with the control fish. The results revealed that fish fed with garlic at all levels had significantly higher red blood cell and white blood cell counts than the control group ($p < 0.05$). From the results of the study, it was concluded that the use of dietary garlic can promote immune responses and disease resistance against *A. hydrophila* in tilapia.

Key words: Nile tilapia, garlic, *Aeromonas hydrophila*, hematology

INTRODUCTION

Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*, Linn) is an important freshwater fish in Thailand with great economic value. The properties of Nile tilapia are easy to raise, fast growing, can eat a variety of foods and popular with consumers. In 2019, the total production of freshwater animals in Thailand is 427,330 tons, worth 25,977.04 million baht, tilapia has the highest production volume of 228,982 tons or 53.58% of the total output, worth 11,434.46 million baht (Department of Fisheries, 2021). The Nile tilapia aquaculture industry in Thailand has developed to more intensive practices to increase productivity that caused in the susceptibility of disease outbreak. Recently, the Nile tilapia aquaculture industry still has been facing many problems related to disease and massive mortality. *Aeromonas hydrophila* is considered as a significant pathogen causing the motile aeromonad septicemia (MAS) in several fish species, including Nile tilapia (Abu-Elala *et al.*, 2015). *A. hydrophila* has been causing outbreaks in fish farms with high mortality rates, resulting in severe economic losses to the aquaculture industry worldwide (Nielsen *et al.*, 2001). The use of antibiotics and chemotherapeutics to control the diseases have been widely reviewed for their negative impacts such as drug resistance pathogen, aquatic animal immune system suppression and residue of aquatic animals and environment

which directly impact to human and environment. Thus, an alternative approach to enhance disease resistance and other health benefits by herbal have been interested which are easy to find, economically and eco-friendly.

Garlic (*Allium sativum*) is an herb which can be stimulate feed intake, growth performance and immune system. It also has ability to resistance of bacteria, fungi, parasite and virus (Williams and Lloyd, 2012). There are many chemical compositions found in garlic; allistatin, allicin, alliin, garlicin and ajoene which are notable for inhibiting the growth of bacteria, fungi and viruses. In medical applications, herbs with high levels of allicin are good and interesting (Huchette *et al.*, 2005). Allicin content can activate non-specific immunity by increasing cytokine gene expression (Fall and Tanekhy 2015). Additionally, there was also reported that garlic can stimulate immune responses such as: synthesis of lymphocyte, release of cytokine, phagocytosis and natural killer cell activities (Kyo *et al.*, 1998). In aquaculture, garlic is used in many ways, including growth stimulation, antimicrobial ability, stimulate the immune system, stimulate the appetite and prevent stress. These benefits are very important in aquaculture (Guo *et al.*, 2012). There are studies in aquatic animals reporting properties of garlic that can stimulate growth and the immune system, such as common carp, *Cyprinus carpio* (Karimi Pashaki *et al.*,

2020) Nile tilapia, *O. niloticus* (Seden *et al.*, 2014), rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Farahi *et al.*, 2010) African catfish, *Clarias gariepinus* (Thanikachalam *et al.*, 2010), Asian sea bass, *Lates calcarifer* (Abdelwahab *et al.*, 2020) and swordtail, *Xiphophorus Helli* (Kalyankar *et al.*, 2013). Incorporating immunostimulants with feed is an effective way to improve non-specific immune systems. The use of garlic as a feed additive is beneficial for use in aquaculture to enhance the immune response, acting as an immunomodulator in tilapia. Therefore, the current study was designed to investigate the effect of garlic supplemented diet on disease resistance and responses of blood cell count at pre-and post-challenged with *Aeromonas hydrophila* in Nile tilapia.

MATERIALS AND METHODS

Ethics statement

All study methods and experimental procedures were conducted following the guidelines and regulations reviewed and approved by the Institutional Animal Care and Use Committee of Khon Kaen University, based on the Ethics of Animal Experimentation of the National Research Council of Thailand (Reference No. 660201.2.11/40).

Experimental design

The research was conducted by using completely randomized design, CRD with 5 treatments and 3 replications. Each treatment was used diet containing 30% of crude protein by adding different levels of garlic (Diab *et al.*, 2008) as following:

Treatment 1: Diet + garlic at 0 g/kg of feed (control)

Treatment 2: Diet + garlic at 1 g/kg of feed

Treatment 3: Diet + garlic at 3 g/kg of feed

Treatment 4: Diet + garlic at 5 g/kg of feed

Treatment 5: Diet + garlic at 7 g/kg of feed

Experimental diet

Garlic (*Allium sativum*) was procured from the local market, cleaned in water, aired and then dried in the hot air oven at 60 °C after that chopped into small piece and ground to become powder with mortar. The basal experimental diets were formulated with the commonly available ingredients (Table 1). The ingredients were grinded, milled, weighed, mixed and pelleted with meat mincer at size 3 mm. After cold pelleting, the feeds were dried in oven at 60 °C and then stored in the refrigerator at 4 °C for further uses.

Table 1 Composition of experimental diets

Ingredients	Quantity of ingredients (g)				
	0	1	3	5	7
Fish meal	300	300	300	300	300
Broken rice	140	139	137	135	133
Garlic	0	1	3	5	7
Corn meal	70	70	70	70	70
Cassava starch	130	130	130	130	130
Soy bean meal	260	260	260	260	260
Rice bran	90	90	90	90	90
Premix	1	1	1	1	1
Total	1000	1000	1000	1000	1000

Experimental fish

Nile tilapia with initial weight of 10.00±0.05 g were obtained from the hatchery of aquatic animal production technology program, Khon Kaen University, Nong Khai

Campus, Nong Khai Province. The fish were acclimatized in laboratory conditions for one week before starting the feeding trials. At the beginning of the experiment, 15 aquaria containers (0.45×0.90×0.45 m, water volume 150 liters)

were each stocked with 15 fish. Each experimental diet was fed to fish in three aquaria. The fish were fed a diet of garlic at rate of 5% of body weight twice daily at 08:00 and 16:00 for 45 days.

Bacteria preparation

Aeromonas hydrophila was isolated from Nile tilapia by streak plate technique on Tryptic Soy Agar (TSA; Himedia). The species of bacteria was identified by morphology using Gram's stain and biochemical properties using API 20E strip (Biomérieux). The bacteria strain was cultured on TSA at 37°C overnight. The isolated colonies were cultivated in Tryptic Soy Broth (TSB; Himedia) and incubated

with shaker at 34°C for 18 h. The turbidity of bacteria was adjusted to equivalent to 0.5 McFarland turbidity standards No.0.5 (1.5×10^8 CFU/ml).

Challenge test

After feeding on the test diet for 45 days, 30 fish from each treatment and control group (10 fish from each replication) were intraperitoneal injection with 0.1 ml of culture suspension of pathogenic *A. hydrophila* containing 1.5×10^8 CFU/ml. Mortality of fish was recorded every day for 10 days. The data were calculated mortality rate percentage and relative percent survival; RPS (Ellis, 1988) as following;

$$\text{Mortality rate (\%)} = \frac{\text{number of deaths in specific period}}{\text{total population during that period}} \times 100$$

$$\text{RPS} = 1 - \frac{(\text{percent mortality in treated group})}{(\text{percent mortality in control group})} \times 100$$

Hematological test

At the end of experiment, 3 fish from each replication were randomly to collect the blood sample before challenge with *A. hydrophila* (pre-challenge). Blood samples were collected from the caudal vein of fish by a sterile syringe containing EDTA as an anticoagulant. After 24 hours, these fish were intraperitoneal injection with 0.1 ml of culture suspension of pathogenic *A. hydrophila* containing 1.5×10^8 CFU/ml. After 24 hours, blood samples

were collected from these fish again (post-challenge). Blood was used for calculation of red blood cell (RBC) and white blood cell (WBC). RBC and WBC were counted with a hemocytometer, RBC (10^6 cells/ml) in 5 squares, each having 16 smallest squares (4 corners and 1 central) and WBC (10^3 cells/ml) in the four 1 squares mm corner areas and was counted. All data was calculated follow the formula;

$$\text{red blood cell (cells/ml)} = \frac{\text{red blood cell} \times \text{dilution factor}}{\text{volume (ml)}}$$

$$\text{white blood cell (cells/ml)} = \frac{\text{white blood cell} \times \text{dilution factor}}{\text{volume (ml)}}$$

Statistical analysis

Data from each treatment were subjected to one-way analyses of variance (ANOVA) using SPSS for Windows version 17.0 (SPSS Inc., Chicago, USA). Means were compared after analysis of variance by Duncan's New Multiple Range Test ($p = 0.05$). The level of significance was chosen at $p \leq 0.05$, with results presented as mean $\pm$ standard deviation.

RESULTS AND DISCUSSION

After feed trial for 45 days, fish were challenged with *A. hydrophila*. The result showed that the control group progressed to the clinical sign of disease and died 24 hours after the challenge, while fish fed garlic supplemented in diet at 1 g/kg feed and 3 g/kg feed began to die after 48 hours and fed garlic supplemented in diet at 5 g/kg feed and 7 g/kg feed began to die after 72 hours (Figure 1). The lowest mortality rate was found in fish fed garlic supplemented in diet at 7 g/kg feed,

with an average of $16.67 \pm 5.77\%$ and showed statistically significant differences between the 1 g/kg feed and 3 g/kg feed garlic-fed experimental group and the control group ($p < 0.05$). Fish fed garlic supplemented in diet at 5 g/kg feed was found the mortality rate at $23.33 \pm 5.77\%$ and no significance different ($p > 0.05$) with 7 g/kg feed group

but significance difference with control group ($p < 0.05$). Fish fed garlic supplemented in diet at 7 g/kg feed also showed the highest relative percent of survival (RPS) at 80.77 follow by 73.08, 46.15 and 34.62 in fish fed garlic supplemented in diet at 5 g/kg feed, 3 g/kg feed and 1 g/kg feed, respectively (Table 2).

Table 2 Mortality and relative percentage survival of Nile tilapia fed diets with different concentrations of garlic for 45 days after challenged with *Aeromonas hydrophila*

Gram of garlic per 1 kg of feed	Mortality (%)	Relative percentage survival (%)
0	86.67 ± 5.77^a	-
1	56.67 ± 5.77^b	34.62
3	46.67 ± 5.77^b	46.15
5	23.33 ± 5.77^c	73.08
7	16.67 ± 5.77^c	80.77
<i>p</i> -Value	0.01	-

Different superscript letters within a column indicate significant differences at $p < 0.05$

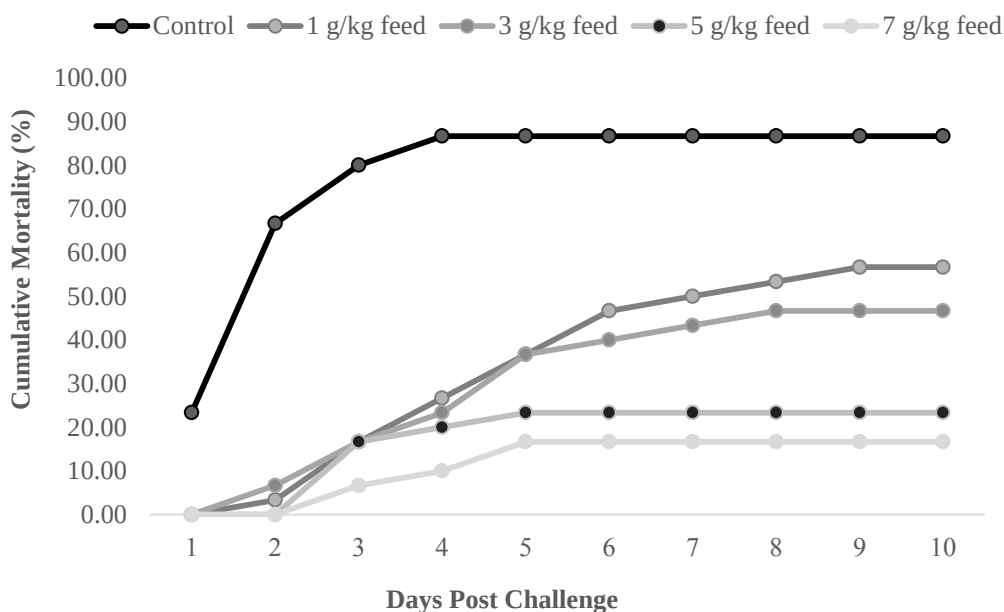


Figure 1 Cumulative percentage mortality (CPM) of Nile tilapia following intraperitoneal injection with *Aeromonas hydrophila* after feeding garlic-supplemented diet for 45 day

Hematological test

At the end of the experiment (45 days), fish were drawn blood before intraperitoneal injection with *A. hydrophila* (pre-challenge) for red blood cell (RBC) and white blood cell (WBC) counting. The results revealed that fish groups fed with diet containing 5 g of garlic/ kg of feed has had the highest RBC count of $10.63 \times 10^6 \pm 0.39 \times 10^6$ cell/ml,

with no statistically significant difference with 7 g of garlic / kg of feed group ($p > 0.05$) but statistically significant difference with control group (Figure 2). Similarly, there was no statistically significant difference between fish fed garlic with diet at 7 g/kg of feed and 5 g/kg of feed at WBC values of $19.92 \times 10^3 \pm 1.04 \times 10^3$ cell/ml and $18.33 \times 10^3 \pm 1.84 \times 10^3$ cell/ml, respectively). All treated groups also

showed statistically significant differences with control group (Figure 3).

After intraperitoneal injection with *A. hydrophila* (post-challenge), fish were also drawn blood for red blood cell (RBC) and white blood cell (WBC) counting. The results showed that both RBC and WBC values of all groups were statistically significant different among groups ($p < 0.05$). The highest RBC values was observed in fish fed garlic supplemented in diet at 7 g/kg of feed ($15.79 \times 10^6 \pm 0.75 \times 10^6$ cell/ml) follow by fish fed garlic supplemented in diet at 5 g/kg of feed, 3 g/kg of feed, 1 g/kg of feed and control group at $11.68 \times 10^6 \pm 0.48 \times 10^6$ cell/ml,

$8.93 \times 10^6 \pm 0.78 \times 10^6$ cell/ml, $6.30 \times 10^6 \pm 0.55 \times 10^6$ cell/ml and $3.75 \times 10^6 \pm 0.20 \times 10^6$ cell/ml, respectively (Figure 2). Fish fed garlic supplemented in diet at 7 g/kg of feed was also found the highest significance WBC values at $29.67 \times 10^3 \pm 0.95 \times 10^3$ cell/ml followed by 5 g/kg of feed group, 3 g/kg of feed group, 1 g/kg of feed group and control group at $22.92 \times 10^3 \pm 0.63 \times 10^3$ cell/ml, $11.67 \times 10^3 \pm 0.88 \times 10^3$ cell/ml, $15.58 \times 10^3 \pm 1.37 \times 10^3$ cell/ml and $3.42 \times 10^6 \pm 0.38 \times 10^6$ cell/ml, respectively (Figure 3). After a challenge test, there was also a significant increase in WBC count of garlic treated groups compared to the control.

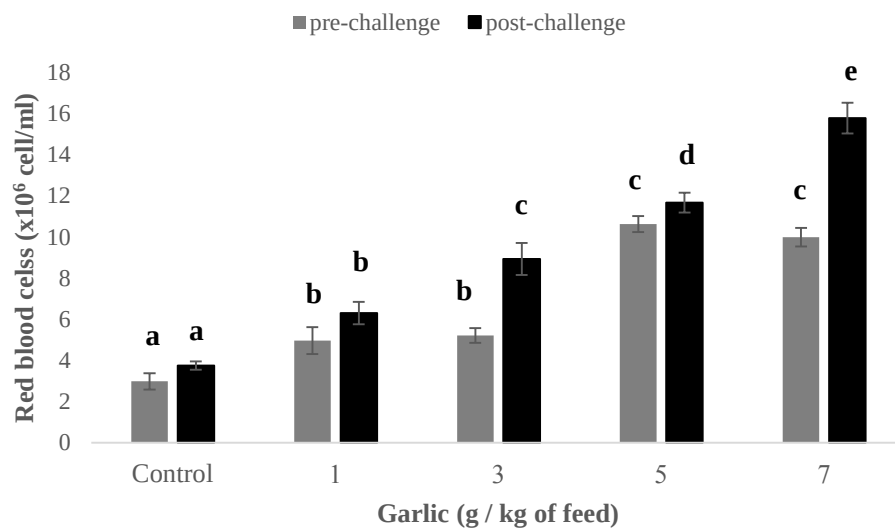


Figure 2 The number of red blood cells of Nile tilapia fed diets with different levels of garlic for 45 days at pre-challenge and post-challenge with *A. hydrophila*. Data (mean $\pm$ SD) with different letters significantly differ ($p < 0.05$) among treatment

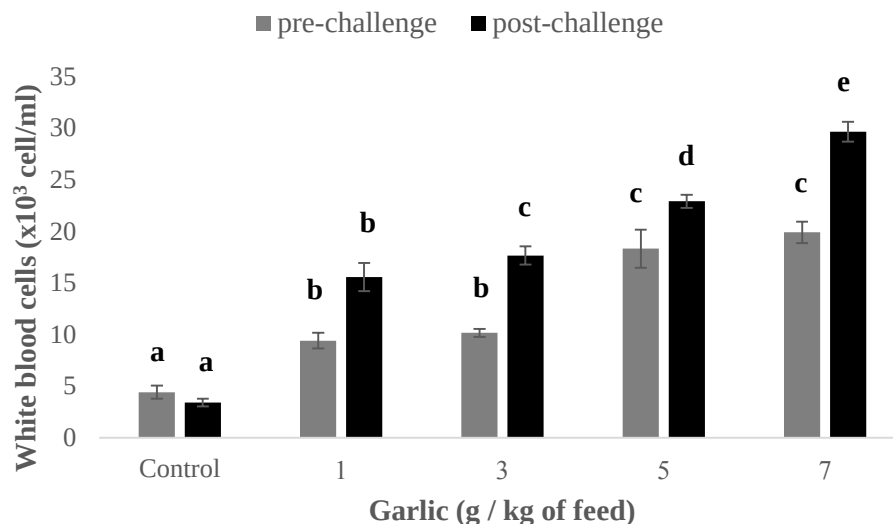


Figure 3 The number of white blood cells of Nile tilapia fed diets with different levels of garlic for 45 days at pre-challenge and post-challenge with *A. hydrophila*. Data (mean $\pm$ SD) with different letters significantly differ ($p < 0.05$) among treatments

The use of natural products in aquaculture has risen dramatically for prophylaxis and to avoid the indiscriminate use of harmful antibiotics. Herbal plants are biocompatible, biodegradable and safe for the environment and human health. Some recent studies have confirmed that feeding fish with herbal plants resulted in enhance disease resistance and survival improvement which may be attributed to an immune function improvement such as *Phyllanthus niruri* and *Aloe vera* (Ahilan *et al.*, 2010), *Ocimum sanctum* (Das *et al.*, 2015), *Morus alba* (Mapanao *et al.*, 2019), *Achyranthes aspera* (Kumar *et al.*, 2019) and *Moringa oleifera* (Abd El-Gawad *et al.*, 2020). Hence, the present study investigated the effect of garlic cloves supplemented in diet on red blood cell (RBC) and white blood cell (WBC) values and mortality rate after challenge with *A. hydrophila* in Nile tilapia.

Results of the challenge test with *A. hydrophila* showed that increased mortality rate was lowest ($16.67 \pm 5.77\%$) in the treatment containing 7 g of garlic/ kg of feed, followed by 5 g of garlic/ kg of feed ($23.33 \pm 5.77\%$ mortality), 3 g of garlic/ kg of feed ($46.67 \pm 5.77\%$ mortality) and $56.67 \pm 5.77\%$ mortality in the diet containing 1 g of garlic/ kg of feed. The fish mortality was much lower compared to

the control group. Furthermore, the relative percent of survival (RPS), as one of the most visual parameters of immune evaluation in the challenge test, was higher in all fish groups fed with diet containing garlic than in the control group. This indicates that garlic could be produced more resistance to challenge infection. This result was also explained by the increase in WBC in this study that indicated an increase in the immune status in experimental groups which correlates with fish survival increasing. Garlic has traditional applications as an anti-infective agent against many bacteria (Ress *et al.*, 1993), fungi (Adetumbi *et al.*, 1986) and viruses (Weber *et al.*, 1992). Many defense mechanisms activated by garlic counteract the challenge infection including the production of superoxide anions against the *A. hydrophila* (Aly and Mohamed, 2010). The antibacterial properties of garlic clove homogenates are attributed to allicin. Several studies have provided strong evidence that most of the biological function of garlic cloves are caused by active substance known as allicin (Li *et al.*, 2007), which is the most important organosulphide in garlic. Similar results have been reported in previous studies. Rose *et al.* (2005) reported that the positive effects of garlic supplementation may be due to its medical effects based on organic sulfur compounds, particularly allicin which is an active but volatile compound

of garlic and has been implicated in antibacterial activity against a wide range of gram-positive and gram-negative bacteria, and has antiviral, antifungal and antiprotozoal activity (Nya *et al.*, 2010). Thus, it also could be suggested that high disease resistance in the experimental groups as compared to control group could be due to the presence of allicin in garlic, which further helps to inhibit pathogens.

Additionally, the result in this study also agrees with the results of several studies. For examples; Sahu *et al.* (2007) noted the effectiveness of adding 0.5 or 1% garlic powder in fish diets for controlling *A. hydrophila* infection in Indian major carp (*Labeo rohita*). Nya and Austin (2009) reported that feeding rainbow trout with 0.5 g and 1.0 g garlic per 100 g feed for 14 days showed fish mortalities after challenged with *A. hydrophila* only 4%, RPS 95%. Moreover, in rainbow trout, the administration of garlic dosed at 0.5 g/100 g of feed for 14 days, the RPS was 86%, decreasing to 75% and 68% after 21 and 28 days of dietary garlic treatments, respectively and 14 days after stopping feeding with 1.0 g garlic /100 g of feed, the RPS was 80%, reducing to 55% after 21 days, and 46% at 28 days (Nya and Austin, 2011). Sasmal *et al.* (2005) and Diab *et al.* (2008) found that feed containing 1% garlic powder was able to improve the disease resistance of Nile tilapia, particularly against *Pseudomonas fluorescens*. Furthermore, Shalaby *et al.* (2006) and Aly and Mohamed (2010) revealed that adding 3% garlic powder at Nile tilapia diet could reduce mortality after a challenged with *A. hydrophila*. Eirna-liza *et al.* (2016) reported that after African catfish juveniles were challenged with *A. hydrophila*, the highest survival (64%) was observed for fish fed with garlic cloves at 20g/kg. Also, Thanikachalam *et al.* (2010) showed that after challenge with *A. hydrophila* in African catfish, all the garlic peel fed groups showed a significantly ($p<0.05$) reduced mortality compared to the control group with the highest survival rate (96%) was recorded in fish fed with 1.5% of garlic peel. After challenged with *A. hydrophila*, the survival rate of swordtail, *Xiphophorus helleri*, increased and reached up to 95.8%

in fish fed with the garlic diet (Kalyankar *et al.*, 2013)

Fish species, size, age, physiological status, environmental conditions, dietary regime, quality and quantity of diet were reported to affect fish hematological parameters. Normal values of these parameters relate to dietary ingredients, protein sources, vitamins and probiotics (Osuigwe *et al.*, 2005). The study of hematological values is also useful for physiological examination of changes in fish health or to determine the state of health. Complete blood cell count (CBC) is an important and effective diagnostic tool that can be used to monitor fish health status in response to changes in nutrition, water quality and disease therapy (Fazio, 2019). In this study, pre- and post-challenge with *A. hydrophila* test showed that there was significantly difference higher RBC and WBC counts in fish fed garlic cloves than control group ($p<0.05$). Especially, in post-challenge RBC and WBC counts in fish fed garlic cloves increased as the amount of garlic cloves in the diet increased. This indicated that the health of Nile tilapia improved with dietary addition of garlic cloves.

Leucocytes play an important role in nonspecific immunity and their count can be considered as an indicator of the fish health status (Harikrishnan *et al.*, 2003). In current study, WBC counts significantly increased ($p<0.05$) following post feeding garlic cloves trial for 45 days and post challenge with *A. hydrophila* which supports the anti-infection properties of garlic. As Iranloye (2002) mentioned that it is well known that when infection occurs WBC increase rapidly which as first line of defense of body. This result is also supported by other studies by Thanikachalam *et al.* (2010) reported that significantly highest WBC count was found in African catfish fingerling fed with 1.5% garlic peel incorporated diet. Nwabueze (2012) found that WBC counts of African catfish fed 0.5%, 1.0% and 3.0% garlic supplemented diet were increased significantly by weeks. Ndong and Fall (2011) reported that WBC counts increased significantly in juvenile hybrid tilapia (*O. niloticus* x *O.*

aureus) fish fed 1% and 0.5% garlic supplemented diet. Heo *et al.* (2000) reported that the only changes in fish blood profiles, observed when l-carnitine was included in diet, were increased concentrations of WBC and lymphocytes, although there is no direct evidence from the literature on the effect of l-carnitine supplementation on immune-related blood cell counts. However, many previous reports have suggested that l-carnitine supplement may influence lipid metabolism. Dietary lipid may affect a great number of immune parameters, such as lymphocyte proliferation, cytokine synthesis, natural killer cell activity and phagocytosis (De Pablo and De Cienfuegos, 2000).

RBC count was also increase significantly in garlic fed groups when compared to control groups. RBC count increased with the administration of garlic, which might indicate an immunostimulant effect. The high red blood cell counts in garlic fed fish groups are presumed to be due to garlic's antioxidant properties that can ward off free radicals. Free radicals are compounds that can damage red blood cell membranes and other cells. Garlic also contains compounds that can act as antioxidants in blood cells. This antioxidant can act as a reservoir of free radicals to protect red blood cell membranes (Setijaningsih *et al.*, 2021). The findings confirm to those by Farahi *et al.*, (2010) observed erythrocyte count and hemoglobin content increased in rainbow trout fed on diets containing 20 and 30 g garlic which were significantly different from those of control. The red blood cells are significantly higher in garlic peel fed groups than control group (Thanikachalam *et al.*, 2010). RBC counts in African catfish were observed to be significantly higher than fish fed 0.5% garlic group as compared to the control (Nwabueze, 2012). Setijaningsih *et al.* (2021) also found that the addition of 1% garlic extract to the feed had the highest value in erythrocyte and hemoglobin of Nile tilapia. Seeley *et al.* (1992) mentioned that the primary function of RBC in fish is to transport oxygen from the gills to the various tissues of the body, an action carried out by

the haemoglobin found in RBC. Garlic increases superoxide dismutase (SOD) activity in blood serum and that this phenomenon has been used in fish farming to enhance the activity of non-specific defense system in *O. niloticus* (Diab *et al.*, 2002). Also garlic has some constituents that may play a role in the immune system stimulation and in the function of organs related to blood cell formation such as thymus, spleen and bone marrow (Jeorg and Lee, 1998).

CONCLUSION

This study has highlighted the potential value of garlic to aquaculture in terms of protection against specific bacterial disease (*A. hydrophila*). The results shown that 0.7% (7 g/kg) garlic supplement in fish feeds elicited more increase in volume of RBC, WBC and survival rate of *O. niloticus*. Garlic inclusion in fish diet at 0.7% (7 g/kg) concentration is therefore beneficial for use in aquaculture to enhance the disease resistant status *O. niloticus*. This is a basic study provides a new perspective for the use of garlic cloves as a dietary supplementation to enhance the disease resistance and disease prevention of fish. Further purification of the active compounds and their evaluation may substantially improve the quality as well as their usage in aquaculture as immunomodulators.

ACKNOWLEDGEMENT

Author is grateful to Aquatic Animals Production Technology Program, Faculty of Interdisciplinary Studies, Khon Kaen University, Nong Khai Campus for financial support.

REFERENCE

- Abd El-Gawad, E.A., Asely, A.M.El., Soror, E.I., Abbass, A.A. and Austin, B. 2020. Effect of dietary *Moringa oleifera* leaf on the immune response and control of *Aeromonas hydrophila* infection in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry. **Aquaculture International** 28: 389-402.
- Abdelwahab, M.A., El-Bahr, S.M. and Al-Khamees, S. 2020. Influence of Dietary

- Garlic (*Allium sativum*) and/or Ascorbic Acid on Performance, Feed Utilization, Body Composition and Hemato-Biochemical Parameters of Juvenile Asian Sea Bass (*Lates calcarifer*). **Animals** 10: 2396. doi:10.3390/ani10122396.
- Abu-Elala, N., Abdelsalam, M., Marouf, Sh. and Setta, A. 2015. Comparative analysis of virulence genes, antibiotic resistance and gyrB-based phylogeny of motile *Aeromonas* species isolates from Nile tilapia and domestic fowl. **Letters in Apply Microbiology** 61: 429-436.
- Adetumbi, M., Javor, G.T. and Lau, B.H. 1986. *Allium sativum* Garlic: inhibits lipid synthesis by *Candida albicans*. **Antimicrobial Agents and Chemotherapy** 30: 499-501.
- Ahilan, B., Nithiyapriyatharshini, A. and Ravaneshwaran, K. 2010. Influence of certain herbal additives on the growth, survival and disease resistance of goldfish, *Carassius auratus* (Linnaeus). **Tamilnadu Journal of Veterinary and Animal Science** 6: 5-11.
- Aly, S.M. and Mohamed, M.F. 2010. *Echinacea purpurea* and *Allium sativum* as immunostimulants in fish culture using Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition** 94: e31-e39.
- Das, R., Raman, R.P., Saha, H. and Singh, R. 2015. Effect of *Ocimum sanctum* Linn. (Tulsi) extract on the immunity and survival of *Labeo rohita* (Hamilton) infected with *Aeromonas hydrophila*. **Aquaculture Research** 46: 1111-1121.
- De Pablo, M.A. and De Cienfuegos, G.A. 2000. Modulatory effects of dietary lipids on immune system functions. **Immunology and Cell Biology** 78: 31.
- Department of Fisheries. 2021. **Statistics of freshwater aquaculture production 2019**. Published documents, Ministry of Agriculture and Cooperatives. (in Thai)
- Diab, A.S., Aly, S.M., John, G., Abd El-Hady, Y. and Mohammed, M.F. 2008. Effect of garlic, black seed and Biogen as immunostimulants on the growth and survival of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* and their response to artificial infection with *Pseudomonas fluorescens*. **African Journal of Aquatic Science** 33: 63-68.
- Diab, A.S., El-Nagar, G.O. and Abd-El-Hady, Y.M. 2002. Evaluation of *Nigella sativa* L (black seeds, baraka), *Allium sativum* (garlic) and Biogen as feed additives on growth performance and immunostimulants of *Oreochromis niloticus* fingerlings. **Suez Canal Veterinary Medicine Journal** 2: 745-775.
- Eirna-liza, N., Saad, C.R., Hassim, H.A. and Murni, K. 2016. The effects of dietary inclusion of garlic on growth performance and disease resistance of African catfish (*Clarias gariepinus*) fingerlings against *Aeromonas hydrophila* infection. **Journal of Environmental Biology** 37(Special issue): 817-824.
- Ellis, A.E. 1988. General principles of fish vaccination, pp. 1-19. In Ellis. A.E. ed. **Fish vaccination**. Academic Press, London.
- Fall, J. and Tanekhy. 2015. The effect of allicin on innate immune genes of common carp (*Cyprinus carpio* L). **Journal of Applied Biotechnology** 4(1): 1-12.
- Farahi, A., Kasiri, M., Sudagar, M., Iraei, M.S. and Shahkolaei, M.D. 2010. Effect of garlic (*Allium sativum*) on growth factors, some hematological parameters and body compositions in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). **Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation** 3: 317-323.
- Fazio, F. 2019. Fish hematology analysis as an important tool of aquaculture: A review. **Aquaculture** 500: 237-242.
- Guo, J.J., Kuo, C.M., Chuang, Y.C., Hong, J.W., Chou, R.L. and Chen, T.I. 2012. The effects of garlic-supplemented diets on

- antibacterial activity against *Streptococcus iniae* and on growth in orange-spotted grouper, *Epinephelus coioides*. **Aquaculture** 364-365: 33-38.
- Harikrishnan, R., Nisha Rani, M., and Balasundaram. C. 2003. Hematological and biochemical parameters in common carp, *Cyprinus carpio*, following herbal treatment for *Aeromonas hydrophila* infection. **Aquaculture** 221: 41-50.
- Heo, K., Odle, J., Han, I.K., Cho, W., Seo, S., van Heugten, E. and Pillington, D.H. 2000. Dietary l-carnitine improves nitrogen utilization in growing pigs fed low energy, fat-containing diets. **The Journal of Nutrition** 130: 1809-1814.
- Huchette, O., Kahane, R. and Bellamy, C. 2005. Influence of environ and genetic factors on the allicin content of garlic bulbs. **Acta Horticulture** 688: 93-99.
- Iranloye, B.O. 2002. Effect of chronic garlic feeding on some haematological parameters. **African Journal of Biomedical Research** 5: 81-82.
- Jeorg, H.G. and Lee, Y.W. 1998. Protective effect of daily sulfide on Nnitrosodimethylamine-induced immunosuppression in mice. **Cancer Letters** 11: 73-79.
- Kalyankar, A.D., Gupta, R.K., Bansal, N., Sabhlok, V.P. and Singh, D. 2013. Effect of Garlic (*Allium Sativum*) Against *Aeromonas Hydrophila* and Health Management of Swordtail, *Xiphophorus Helleri*. **Journal of Environmental Science and Sustainability** 1(2): 41-48.
- Karimi Pashaki, A., Ghasemi, M., Zorriehzahra, M.J., Sharif Rohani, M. and Hosseini, S.M. 2020. Effects of dietary garlic (*Allium sativum*) extract on survival rate, blood and immune parameters changes and disease resistance of Common carp (*Cyprinus carpio carpio* Linnaeus, 1758) against Spring Viremia of Carp (SVC). **Iranian Journal of Fisheries Sciences** 19(3): 1024-1039.
- Kumar, N., Sharma, J., Singh, S.P., Singh, A., Krishna, V.H. and Chakrabart, R. 2019. Validation of growth enhancing, immunostimulatory and disease resistance properties of *Achyranthes aspera* in *Labeo rohita* fry in pond conditions. **Heliyon** 5(2): e01246. doi:10.1016/j.heliyon.2019.e01246.
- Kyo, E., Uda, N., Suzuki, A., Kakimoto, M., Ushijima, M., Kasuga, S. and Itakura, Y. 1998. Immunomodulation and antitumor activities of aged garlic extract. **Phytomedicine** 5: 259-267.
- Li, Y., Xu, S.Y. and Sun, D.W. 2007. Preparation of garlic powder with high allicin content by using combined microwave-vacuum and vacuum drying as well as microencapsulation. **Journal of Food Engineering** 83: 76-83.
- Mapanao, R., Chumate, W. and Nithikulworawong, N. 2019. Antibacterial property and potential use mulberry leaves (*Morus alba* Linn.) as dietary supplement on growth performance and disease resistance against *Aeromonas hydrophila* in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Journal of Science and Technology Ubon Ratchathani University** 21(2): 1-9. (in Thai)
- Ndong, D. and Fall, J. 2011. The effect of garlic (*Allium sativum*) on growth and immune responses of hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* x *Oreochromis aureus*). **Journal of Clinical Immunology and Immunopathology Research** 3(1): 1-9.
- Nielsen, M.E., Høi, L., Schmidt, A.S., Qian, D., Shimada, T., Shen, J.Y. and Larsen J.L. 2001. Is *Aeromonas hydrophila* the dominant motile *Aeromonas* species that causes disease outbreaks in aquaculture production in the Zhejiang Province of China?. **Disease of Aquatic Organism** 46: 23-29.
- Nwabueze, A.A. 2012. The Effect of Garlic (*Allium sativum*) on Growth and haematological parameters of *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822). **Sustainable Agriculture Research** 1: 224-226.
- Nya, E.J. and Austin, B. 2009. Use of garlic, *Allium sativum*, to control *Aeromonas hydrophila* infection in rainbow trout,

- Oncorhynchus mykiss* (Walbaum). **Journal of Fish Disease** 32(11): 963-970.
- Nya, E.J. and Austin, B. 2011. Development of immunity in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*, walbaum) to *Aeromonas hydrophila* after the dietary application of garlic. **Fish and Shellfish Immunology** 30: 845-850.
- Nya, E.J., Dawood, Z. and Austin, B. 2010. The garlic component, allicin, prevents disease caused by *Aeromonas hydrophila* in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum). **Journal of Fish Disease** 33: 293-300.
- Osuigwe, D.I., Obiekezie, A.I. and Onuoha, G.C. 2005. Some haematological changes in hybrid catfish (*Heterobranchus longifilis* x *Clarias gariepinus*) different dietary levels of raw and boiled jackbean (*Canavalia ensiformis*) seed meal. **African Journal of Biotechnology** 4: 1017-1021.
- Ress, L.P., Minney, S.F., Plummer, N.J., Slater, J.H. and Skyrme, D.A. 1993. A quantitative assessment of the antimicrobial activity of garlic *Allium sativum*. **World Journal of Microbiology and Biotechnology** 9: 303-307.
- Rose, P., Whiteman, M., Moore, P.K. and Zhu, Y.Z. 2005. Bioactive S-alk(en)yl cysteine sulfoxide metabolites in the genus *Allium*: the chemistry of potential therapeutic agents. **Natural Product Reports** 22: 351-368.
- Sahu, S., Das, B., Mishra, B.K. Pradhan, J. and Sarangi, N. 2007. Effect of *Allium sativum* on the immunity and survival of *Labeo rohita* infected with *Aeromonas hydrophila*. **Journal of Applied Ichthyology** 23: 80-86.
- Sasmal, D., Babu, S.S. and Abraham, T.J. 2005. Effect of garlic *Allium sativum* extract on the growth and disease resistance of *Carassius auratus* (Linnaeus, 1758). **Indian Journal of Fisheries** 52: 207-214.
- Seden, M.E.A., Ahmad, M.H., El-Tawil, N.E. and Amer, T.N. 2014. Influence of using garlic powder *Allium sativum* as a feed additive on growth performance and resistance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) against *Aeromonas hydrophila* infection. **Egyptian Journal of Nutrition and Feeds** 17(2): 339-347.
- Seeley, R.R., Stephens, T.D. and Tate, P. 1992. Anatomy and Physiology. **SRAC Publication** 473: 1-3.
- Setijaningsih, L. Setiadi, E., Taufik, I. and Mulyasari. 2021. The effect of garlic *Allium sativum* addition in feed to the growth performance and immune response of tilapia *Oreochromis niloticus*. In **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. doi:10.1088/1755-1315/744/1/012072.
- Shalaby, A.M., Khattab, Y.M. and Abdel Rahman, A.M. 2006. Effects of garlic *Allium sativum* and chloramphenicol on growth performance, physiological parameters and survival of Nile Tilapia *Oreochromis niloticus*. **Journal of Venomous Animals and Toxins including Tropical Diseases** 12: 172-201.
- Thanikachalam, K., Kasi, M. and Rathinam, X. 2010. Effect of garlic peel on growth, hematological parameters and disease resistance against *Aeromonas hydrophila* in African catfish *Clarias gariepinus* (Bloch) fingerlings. **Asian Pacific Journal of Tropical Medicine** 3(8): 614-618.
- Weber, D.N., Anderson, D.O., North, J.A., Murray, B.K., Lawson, L.D. and Hughes, B.G. 1992. *In vitro* virucidal effects of *Allium sativum* garlic: extract and compounds. **Planta Medica** 58: 417-423.
- Williams, C. and Lloyd, D. 2012. Composition and antimicrobial properties of sulphur containing constituents of garlic (*Allium sativum*), pp. 287-304. In Val-gimigli, L., ed. **Essential oils as natural food additives: Composition, Quality and Antimicrobial Activity**. Nova Publishers, New York.

การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ สำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ

กรณีศึกษา ผู้ผลิตเซรามิก อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา

Application of Quality Function Deployment with Kansei Engineering Technique for Design and Development of Ceramic Lamp Products: Case Study of Ceramic Manufacturer, Muang District, Songkhla Province

สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2*} ชาตรี หอมเขียว^{1,2*} พีรพงษ์ พันธะศรี³ และ ปรีชญา ชุมศรี⁴

Surasit Rawangwong^{1,2*}, Chatree Homkhiew^{1,2*}, Pheeraphong Phanthasri³ and Preechaya Chumsri⁴

Received: 14 April 2021, Revised: 22 June 2021, Accepted: 19 July 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ โดยการแปลงความต้องการของลูกค้าเข้าสู่เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ จากนั้นนำเทคนิควิศวกรรมคันเซมาใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงอารมณ์และความรู้สึกของลูกค้า ผลการวิเคราะห์หาค่าแสดงความรู้สึก และคุณลักษณะผลิตภัณฑ์สำหรับเป็นองค์ประกอบในการออกแบบผลิตภัณฑ์ พบว่าผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟแบบใหม่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปทรง โทนสี ลวดลาย และเอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับความรู้สึกและความต้องการของลูกค้า ดังนั้นสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟแบบใหม่ มีค่าคะแนนความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านรูปร่าง/รูปทรงสวยงาม และดึงดูดใจมากที่สุดเป็นอันดับแรก โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.85 และมีค่าความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านความงามเป็นอันดับสอง โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.83

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 อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

² Materials Processing Technology Research Unit, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

³ สาขาการออกแบบผลิตภัณฑ์ คณะศิลปกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

³ Department of Product Design, Faculty of Fine and Applied Arts, Songkhla Rajabhat University, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

⁴ สาขาการตลาด คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

⁴ Department of Marketing, Faculty of Business Administration, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

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

คำสำคัญ: การออกแบบผลิตภัณฑ์, การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ, บ้านคุณภาพ, วิศวกรรมคันเซ, เซรามิก

ABSTRACT

This research employed Quality Function Deployment (QFD) and Kansei Engineering (KE) to design ceramic lamp products by incorporating customers' needs into the product planning matrix of QFD analysis. Kansei Engineering was adopted to analyze the customers' emotions and feelings. The results from the analysis of Kansei words and product characteristics for using to design ceramic lamp products showed that redesigned products have changed in form, tone of color, pattern, and product identity and better corresponded to the feelings and needs of the customers. Findings of this research showed that the redesigned ceramic lamp products received the highest satisfaction on beautiful and attractive shape/form, with the very good rating of ($\bar{X} = 4.85$), followed by the satisfaction on the shining feature, rated at the very good level of ($\bar{X} = 4.83$).

Key words: product design, quality function development, house of quality, Kansei engineering, ceramic

บทนำ

พื้นที่รอบลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา เป็นดินแดนที่มีทรัพยากรด้านการท่องเที่ยวที่หลากหลาย จากข้อมูลสถิติของกระทรวงการท่องเที่ยวและกีฬา พบว่านักท่องเที่ยวทั้งชาวไทยและชาวต่างประเทศที่มาท่องเที่ยวในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา มีจำนวนมากขึ้น (Ministry of Tourism, 2019) เนื่องจากนักท่องเที่ยวมีความสนใจและมีความต้องการผลิตภัณฑ์ของฝากของที่ระลึกที่แสดงถึงเอกลักษณ์ในพื้นที่รอบลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา เช่น ผ้าทอพื้นเมือง ผลิตภัณฑ์หนังตะลุง ผลิตภัณฑ์กระจูด และผลิตภัณฑ์เซรามิก เป็นต้น อีกทั้งพบว่านักท่องเที่ยวนิยมซื้อผลิตภัณฑ์เซรามิกเป็นของฝากของที่ระลึก เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความโดดเด่นเฉพาะตัว

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเซรามิกขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ในประเทศไทยมีคู่แข่งทางการค้าในแถบทวีปเอเชียด้วยกันที่สำคัญจากประเทศ

จีนที่สามารถสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีต้นทุนราคาถูกและมีคุณภาพสูง ดังนั้นผู้ประกอบการเซรามิกในประเทศไทยจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า เพื่อให้ลูกค้ามีความพึงพอใจมากที่สุด และกลับมาซื้อผลิตภัณฑ์ใหม่

ตามที่คณะผู้วิจัยได้ลงพื้นที่สำรวจผู้ผลิตเซรามิก วิทยาลัย อําเภอมือง จังหวัดสงขลา พบว่ากลุ่มผู้ผลิตประสบปัญหาข้อร้องเรียนของลูกค้าในเรื่องคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐาน และผลิตภัณฑ์มีแบบเดิมๆ แสดงดังภาพที่ 1 ด้วยเหตุนี้ทางผู้ผลิตเซรามิกจึงมีความต้องการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกแบบใหม่ เพื่อสร้างความหลากหลายและรูปแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ อีกทั้งเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น เพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้น และสร้างความพึงพอใจของลูกค้าและการตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้



ภาพที่ 1 ผลิตภัณฑ์เซรามิก

จากการค้นคว้าผลงานวิจัยต่างๆ ในการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพและวิศวกรรมคันเซ ไม่ว่าจะเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในด้านการพัฒนารูปแบบข่าวสารเพื่อเป็นของที่ระลึก (Sinthavalai and Ruengrong, 2018) หรือด้านการพัฒนาบรรจุภัณฑ์สำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์ (Sinthavalai *et al.*, 2016) อีกทั้งการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซในด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากไม้ไผ่ (Achmad and Taufiq, 2015) หรือด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทของที่ระลึก (Ishardita *et al.*, 2015) พบว่าผลิตภัณฑ์แบบใหม่ที่ได้รับการพัฒนาโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพและวิศวกรรมคันเซสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีการศึกษาถึงความต้องการของลูกค้าแล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้ทราบความต้องการหรือคุณลักษณะของลูกค้าส่วนที่สำคัญ ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการวิจัยนี้โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคันเซ เพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์เซรามิก และสร้างความหลากหลายให้กับรูปแบบของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งเพิ่มช่องทางการตลาดสำหรับผู้ผลิตเซรามิก เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า และกลุ่มนักท่องเที่ยวในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา และพื้นที่ภาคใต้อย่างกว้างขวางขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในส่วนของบ้านคุณภาพ (HOQ) ร่วมกับเทคนิควิศวกรรมคันเซ มาสนับสนุนการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ โดยบ้านคุณภาพ ประกอบด้วย โครงสร้าง 6 ส่วน แสดงดังภาพที่ 2 ดังนั้นงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้ขั้นตอนหลักๆ 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. การเตรียมข้อมูลก่อนนำเข้าบ้านคุณภาพ

การสำรวจเพื่อเตรียมข้อมูลก่อนนำเข้าบ้านคุณภาพมีขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลดังต่อไปนี้

1) สำรวจความต้องการของลูกค้า เพื่อค้นหาเสียงของลูกค้า (Voice of Customer; VOC) เกี่ยวกับลักษณะของผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ ด้วยวิธีการสัมภาษณ์ พูดคุย และวิธีการสำรวจด้วยแบบสอบถามที่ 1 เป็นลักษณะคำถามปลายเปิด โดยการคำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่างเพื่อใช้ในการสำรวจความต้องการของลูกค้า ได้เลือกใช้ระดับความเชื่อมั่น 90% และได้เลือกใช้สมการกรณีไม่ทราบจำนวนประชากรของ W.G.Cochran ซึ่งสอดคล้องกับวิธีดำเนินการวิจัยของ Sinthavalai and Ruengrong (2018) กล่าวคือ ในการคำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่าง 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 $P = 0.30$ เพราะเป็นที่ยอมรับ)

Z คือ ระดับความมั่นใจที่กำหนดหรือระดับ

นัยสำคัญทางสถิติ (กำหนดใช้ $Z = 1.65$ เพราะได้กำหนดความเชื่อมั่น 90%)

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

แทนค่าในสูตร

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

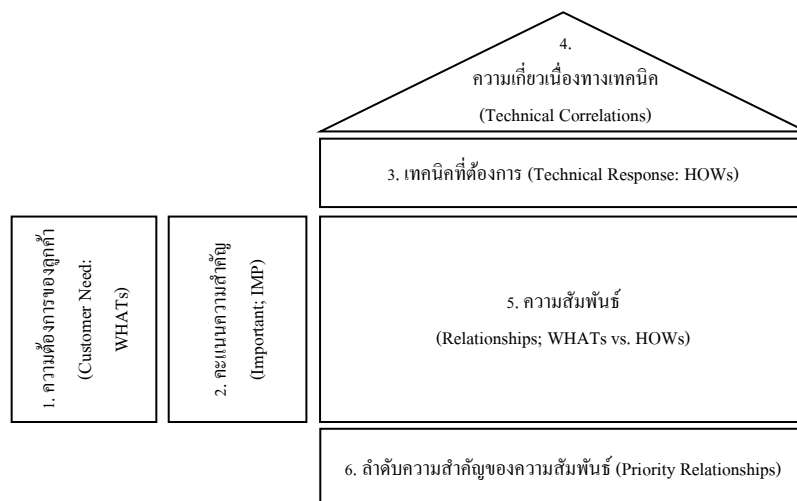
$$n = 58$$

ดังนั้นในขั้นตอนของการสำรวจความต้องการของลูกค้า พบว่ามีจำนวนขนาดของกลุ่มตัวอย่างจากการคำนวณได้ 58 ตัวอย่าง แต่เมื่อสำรวจจริงได้เพิ่มเป็น 132 ตัวอย่าง เพื่อเพิ่มระดับความมั่นใจขึ้น กลุ่มตัวอย่างในการสำรวจประกอบด้วยลูกค้าที่เป็นผู้ใช้ ผู้ที่ชื่นชอบผลิตภัณฑ์เซรามิก กลุ่มร้านค้าตัวแทนจำหน่าย ผู้ผลิตเซรามิก จังหวัดสงขลา

2) จัดเรียงถ้อยคำความต้องการ นำผลจากการสำรวจความต้องการของลูกค้ามาเรียบเรียงใหม่ด้วยแผนผังกลุ่มเชื่อมโยง (Affinity Diagram) จากนั้นใช้แผนภูมิต้นไม้ (Tree Diagram) ช่วยในการจัดการข้อมูลเพื่อไม่ให้เกิดความสับสนและชัดเจนยิ่งขึ้น เพื่อสรุปเป็นส่วนที่ 1 ของบ้านคุณภาพ แสดงดังภาพที่ 2

3) สำรวจระดับความสำคัญ โดยนำถ้อยคำความต้องการของลูกค้าที่เรียบเรียงใหม่มาพัฒนาเป็น

แบบสอบถามที่ 2 ซึ่งเป็นลักษณะคำถามแบบการวัดค่าเป็นตัวเลข 5 ระดับ โดยการคำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่าง ได้เลือกใช้สมการกรณีไม่ทราบจำนวนประชากรของ W.G.Cochran แสดงดังสมการที่ 1 เช่นเดียวกับแบบสอบถามที่ 1 ดังนั้นจำนวนกลุ่มตัวอย่างจากการคำนวณได้ 58 ตัวอย่าง แต่ในการสำรวจจริงได้เพิ่มเป็น 155 ตัวอย่าง เพื่อเพิ่มระดับความมั่นใจของข้อมูล ซึ่งกลุ่มตัวอย่างประกอบไปด้วย ลูกค้าที่เป็นผู้ใช้ ผู้ที่ชื่นชอบผลิตภัณฑ์เซรามิก กลุ่มร้านค้าตัวแทนจำหน่าย ผู้ผลิตเซรามิก จังหวัดสงขลา จากนั้นนำข้อมูลจากแบบสอบถามมาคำนวณค่าเฉลี่ยคะแนนความสำคัญ โดยผลของคะแนนความสำคัญคือส่วนที่ 2 ของบ้านคุณภาพ แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โครงสร้างบ้านคุณภาพที่ทำการวิเคราะห์ (ดัดแปลงจาก Sinthavalai *et al.*, 2016)

2. การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในส่วนของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ (Akao, 1990; Chan and Wu, 2002) มีส่วนวิเคราะห์หลักๆ 4 ส่วน ดังนี้

1) ส่วนเทคนิคที่ต้องการ หรือส่วนที่ 3 ของบ้านคุณภาพ แสดงดังภาพที่ 2 เป็นการระดมสมองของคณะผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ผลิตเซรามิก เพื่อกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิค (Design Attributes) ที่ตอบสนองต่อความต้องการของกลุ่มลูกค้าเป้าหมาย

2) ส่วนความเกี่ยวเนื่องในทางเทคนิค หรือส่วนที่ 4 ของบ้านคุณภาพ แสดงดังภาพที่ 2 เป็นการระดมสมองร่วมกันทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง เพื่อแสดงถึงความเกี่ยวเนื่องของเทคนิคที่นำมาใช้ในตัวแทนลักษณะเฉพาะทางคุณภาพ โดยใช้สัญลักษณ์แทนความสัมพันธ์ ดังนี้ ถ้ามีความสัมพันธ์ต่อกันมาก แทนด้วย “O” และถ้ามีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย แทนด้วย “X” สุดท้ายถ้าไม่มีความสัมพันธ์ต่อกันให้เว้นเป็น “ช่องว่าง”

3) ส่วนความสัมพันธ์ หรือส่วนที่ 5 ของบ้านคุณภาพ แสดงดังภาพที่ 2 เป็นการระดมสมองร่วมกันทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องในการกำหนด

ความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดทางเทคนิคกับความต้องการของลูกค้าในแต่ละคู่ โดยค่าคะแนนความสัมพันธ์นิยมใช้ตัวเลข 0, 1, 3 และ 9 แทนความสัมพันธ์ คือ ไม่มีความสัมพันธ์ มีความสัมพันธ์น้อย มีความสัมพันธ์ปานกลาง และมีความสัมพันธ์มาก ตามลำดับ

4) ส่วนลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ หรือส่วนที่ 6 ของบ้านคุณภาพ แสดงดังภาพที่ 2 เป็นการบ่งบอกถึงความสำคัญในปริมาณต่างๆ เพื่อให้กลุ่มผู้พัฒนาผลิตภัณฑ์ได้ทราบความต้องการและตัวแทนลักษณะเฉพาะทางคุณภาพที่ต้องได้รับการเอาใจใส่อย่างสูง โดยประกอบด้วย 2 ส่วนย่อยๆ คือ คำนำนัยความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ (Absolute Technical Requirement Important) เป็นการบอกลำดับความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ และ คำนำนัยความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ (Relative Technical Requirement Important) เป็นการแสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์คำนำนัยความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์

3. การประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเช

ปัจจุบันเทคนิควิศวกรรมคันเชได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์อย่าง

แพร่หลาย เพื่อครอบคลุมและแก้ไขปัญหามากมาย ด้าน ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมค้นเซสำหรับช่วยในการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้สามารถครอบคลุมความต้องการเชิงคุณลักษณะของลูกค้าให้มากขึ้น โดยแบ่งการวิจัยออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้ (Chumchor and Pimapunsri, 2013)

1) การเลือกกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพัฒนา

2) การกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึกรวบรวมคำแสดงความรู้สึกที่สอดคล้องกับรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพัฒนา เพื่อสร้างแบบสอบถามที่ 3 และประเมินแบบสอบถามโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ ผู้เชี่ยวชาญด้านการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก จำนวน 25 คน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item Objective Congruence; IOC) และดำเนินการคัดเลือกคำแสดงความรู้สึกที่มีค่า IOC มากกว่า 0.5 เพื่อแสดงว่าข้อมูลที่ได้ตรงกับนิยามของตัวแปร

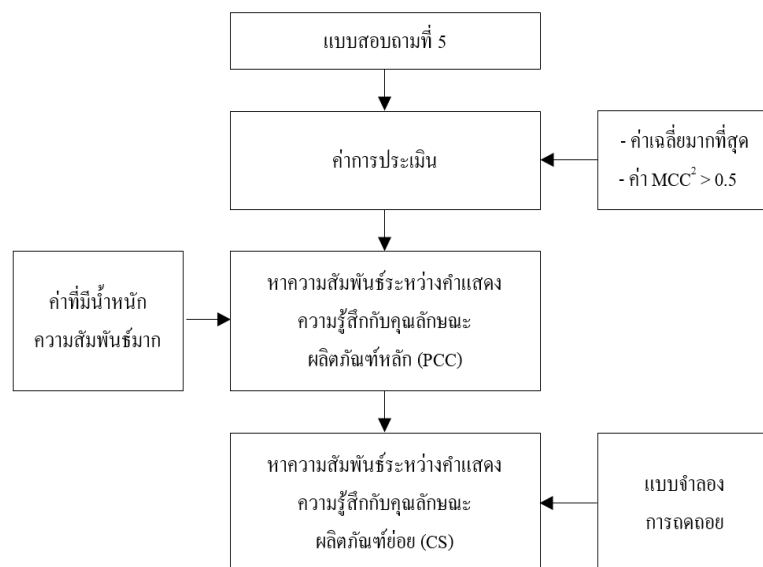
3) การกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ โดยรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพัฒนาในมิติต่างๆ เพื่อสร้างแบบสอบถามที่ 4 และประเมินแบบสอบถาม โดยกลุ่มลูกค้าที่เป็นผู้ใช้หรือผู้ที่ชื่นชอบผลิตภัณฑ์เซรามิก ศูนย์จำหน่ายผลิตภัณฑ์ชุมชน กลุ่มร้านค้าตัวแทนจำหน่าย จังหวัดสงขลา จำนวน 75 คน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย

และดำเนินการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีค่าเฉลี่ยมากกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประเมินทั้งหมด

4) การกำหนดรูปตัวแทนภาพผลิตภัณฑ์ โดยรวบรวมรูปตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย จากนั้นประยุกต์ใช้แผนภาพความสัมพันธ์ (Relationship Diagram) ในการแบ่งกลุ่มรูปผลิตภัณฑ์ออกเป็นกลุ่มตามขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นเลือกรูปผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ตรงกับขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มากที่สุดมาเป็นรูปตัวแทนผลิตภัณฑ์ เพื่อนำไปใช้เป็นองค์ประกอบในแบบสอบถามที่ 5

5) ประเมินผลการสอบถามด้วยหลักการทางสถิติและสรุปผล เป็นการสังเคราะห์ผลจากแบบสอบถามที่ 5 ที่ผ่านการประเมินโดยกลุ่มลูกค้าที่เป็นผู้ใช้หรือผู้ที่ชื่นชอบผลิตภัณฑ์เซรามิก ศูนย์จำหน่ายผลิตภัณฑ์ชุมชน กลุ่มร้านค้าตัวแทนจำหน่าย จังหวัดสงขลา จำนวน 35 คน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างคำแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

จากการศึกษางานวิจัย Pimapunsri (2011) พบว่าวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคำแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้กันมากคือ เครื่องมือทางสถิติ โดยเฉพาะทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 (Quantification Theory Type 1; QT1) แสดงดังภาพที่ 3 และสามารถสรุปรายละเอียดขั้นตอนได้ดังนี้



ภาพที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยหลักการทางสถิติ (ดัดแปลงจาก Pimapunsi, 2011; Yodwangjai, 2014)

5.1) รวบรวมผลการสำรวจกลุ่มเป้าหมาย โดยนำส่วนระดับคะแนนในแต่ละค่าแสดงความรู้สึกของรูปตัวแทนผลิตภัณฑ์แต่ละรูปมาหาค่าเฉลี่ย

5.2) วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมประยุกต์ทางสถิติ โดยวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ เพื่อหาค่า R-Square Adjust หรือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณยกกำลังสอง (Square Multiple Correlation Coefficient; MCC^2) โดยทั่วไปแล้วค่า MCC^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.00 ถึง +1.00 ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่า MCC^2 มากกว่า 0.5 จึงจะยอมรับผล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pimapunsi (2011) และ Schütte (2002) ที่มีการกำหนดค่า MCC^2 มากกว่า 0.5

5.3) หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก (Partial Correlation Coefficient; PCC) ที่มีน้ำหนักความสัมพันธ์มากและมีระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งสอดคล้องกับวิธีดำเนินการวิจัยของ Pimapunsi (2011); Yodwangjai (2014) ที่มีการกำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

5.4) วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย (Category Score; CS) ด้วยแบบจำลองการถดถอย จากนั้นพิจารณาค่า

CS ที่มีน้ำหนักความสัมพันธ์มากและมีระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ทั้งนี้มีการพิจารณาพร้อมกับค่า PCC ที่มีน้ำหนักความสัมพันธ์มาก

4. การออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

นำข้อมูลจากขั้นตอนก่อนหน้ามาสรุปเป็นข้อกำหนดเชิงเทคนิคและข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะเพื่อส่งให้กับทีมออกแบบได้ดำเนินการออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ จากนั้นดำเนินการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

5. การประเมินความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์

นำผลิตภัณฑ์แบบใหม่ไปทำการสำรวจความพึงพอใจของกลุ่มลูกค้าเป้าหมาย เพื่อศึกษาผลระดับคะแนนความพึงพอใจอยู่ในระดับคะแนนใดของแต่ละประเด็น จากนั้นดำเนินการหาค่าเฉลี่ย และการวิเคราะห์ผล

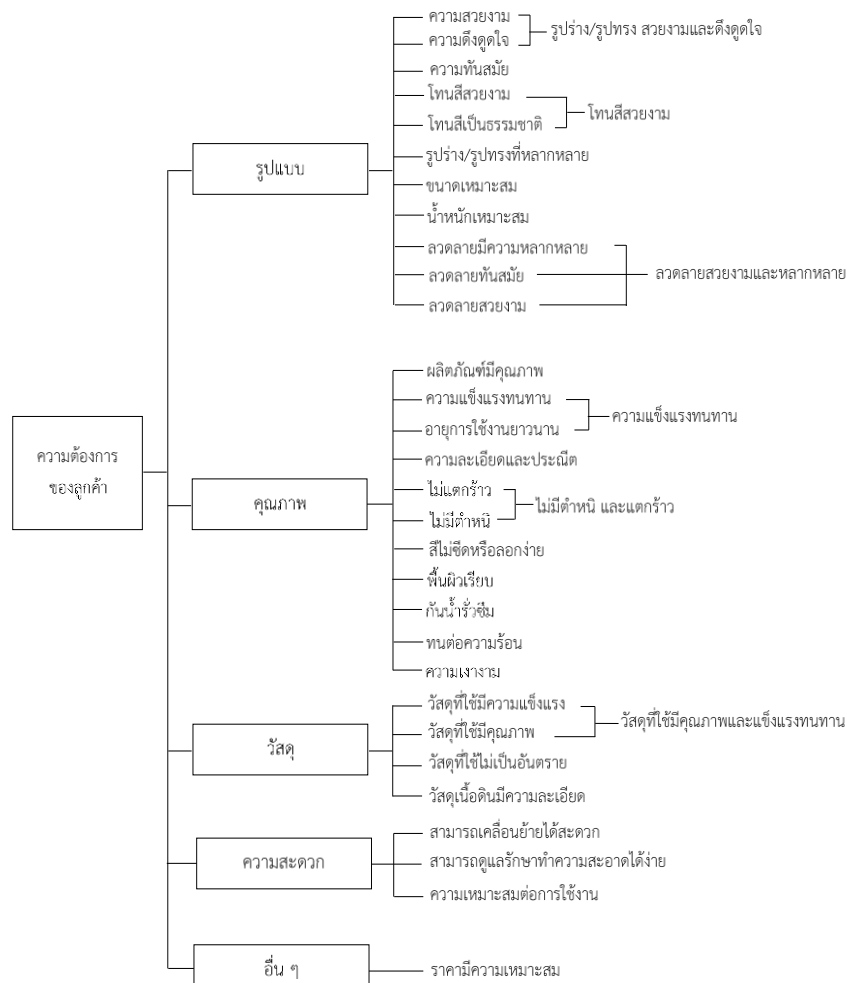
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากการศึกษารูปแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟแบบเดิมๆ พบว่าผลิตภัณฑ์แบบเดิมมีการออกแบบที่มีรูปแบบที่ธรรมดา และไม่มีการตกแต่งเพิ่มเติม อีกทั้งมีการขึ้นรูปที่ไม่ได้คุณภาพ แสดงดัง

ภาพที่ 1 ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในส่วนของบ้านคุณภาพร่วมกับเทคนิควิศวกรรมคันเซสำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟแบบใหม่ โดยมีผลการวิจัยดังต่อไปนี้

1. ผลการเตรียมข้อมูลก่อนนำเข้าบ้านคุณภาพ

จากการสำรวจความต้องการของลูกค้าด้วยแบบสอบถามที่ 1 พบว่ามีจำนวนความต้องการของลูกค้าทั้งหมด 23 ความต้องการ โดยสามารถแบ่งกลุ่มความต้องการได้ 5 กลุ่ม แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 คุณลักษณะความต้องการของลูกค้า

จากนั้นนำข้อมูลความต้องการของลูกค้าจำนวน 155 คน จากแบบสอบถามที่ 2 มาคำนวณหา

ค่าเฉลี่ยคะแนนความสำคัญ (Important; IMP) แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของระดับคะแนนความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์

ปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์			IMP	SD	ปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์			IMP	SD
รูปแบบ	รูปร่าง/รูปทรง สวยงามและดึงดูดใจ		4.50	0.50		พื้นผิวเรียบ		3.67	0.76
	ลดลายสวยงามและหลากหลาย		4.40	0.49	คุณภาพ	กันน้ำรั่วซึม		3.62	0.81
	โทนสีสวยงาม		4.30	0.70		ทนต่อความร้อน		3.55	0.76
	ขนาดเหมาะสม		4.18	0.71		ความเงางาม		3.51	0.76
	รูปร่าง/รูปทรงที่หลากหลาย		4.10	0.67		วัสดุที่ใช้ไม่เป็นอันตราย		4.16	0.71
	ความทันสมัย		4.09	0.63	วัสดุ	วัสดุที่ใช้มีคุณภาพและแข็งแรง		4.13	0.71
	น้ำหนักเหมาะสม		3.97	0.83		ทนทาน			
	ความแข็งแรงทนทาน		4.18	0.80		วัสดุเนื้อดินมีความละเอียด		4.02	0.71
	ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพ		4.12	0.81		สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก		4.13	0.77
	ไม่มีตำหนิ และแตกร้าว		4.11	0.77	ความ	สามารถดูแลรักษาทำความสะอาดได้ง่าย		4.11	0.76
คุณภาพ	ความละเอียดและประณีต		3.95	0.76		ความเหมาะสมต่อการใช้งาน		4.01	0.79
	สีไม่ซีดหรือลอกง่าย		3.86	0.77	อื่นๆ	ราคามีความเหมาะสม		4.29	0.75

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าความต้องการของลูกค้าได้ให้ความสำคัญกับปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟในด้านรูปแบบเป็นอันดับหนึ่ง คือ รูปร่าง/รูปทรงสวยงามและดึงดูดใจ โดยมีค่าคะแนนเฉลี่ย 4.50 คะแนน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rawangwong *et al.* (2019) โดยทั่วไปการออกแบบผลิตภัณฑ์ประเภทของใช้ประเด็นความสวยงาม จะมีผลต่อความต้องการของลูกค้าเป็นอันดับหนึ่ง

2. ผลการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

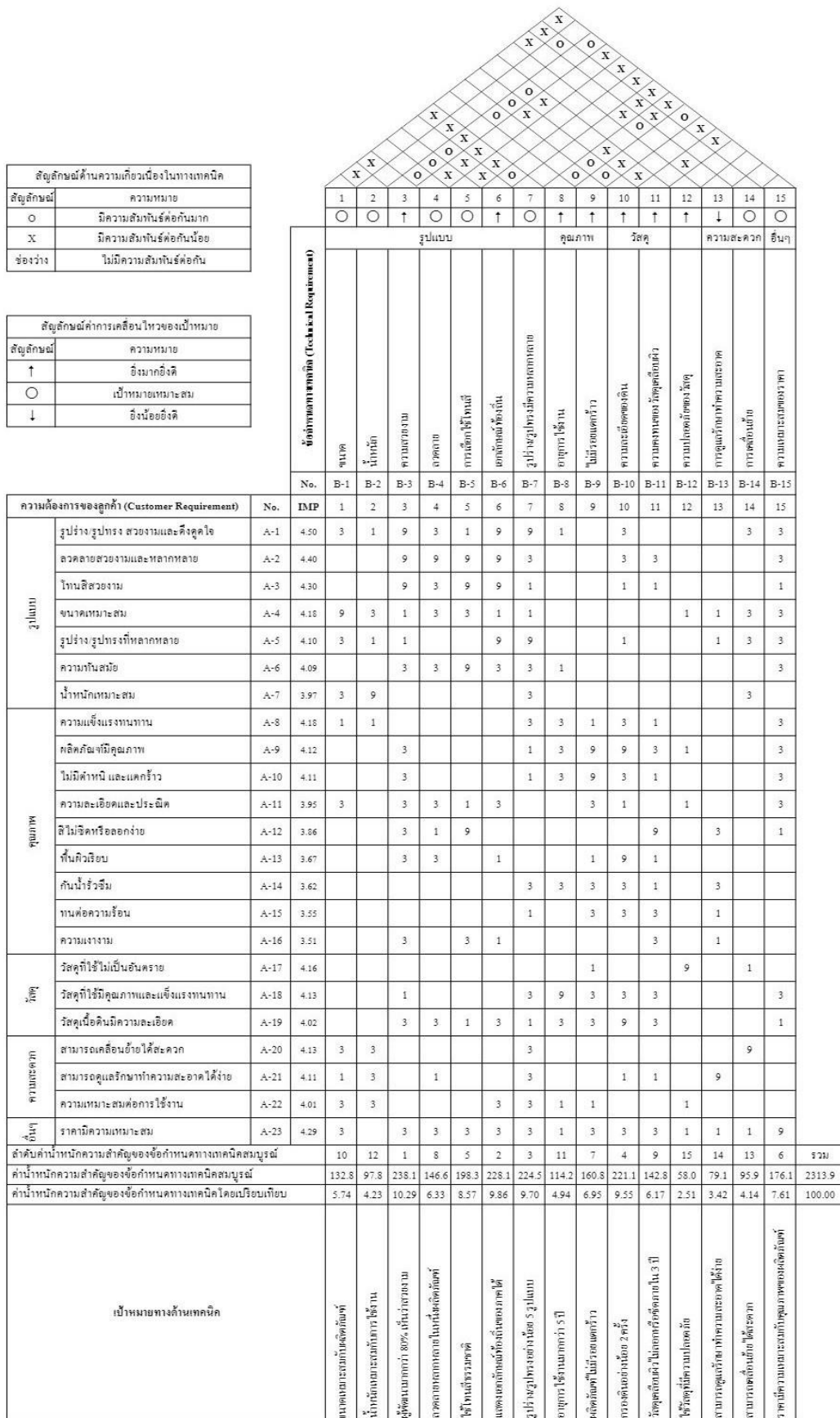
สำหรับผลการนำข้อมูลที่ได้มาเข้าสู่เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ พบว่ามีรายละเอียดของผลการดำเนินงาน 4 ส่วน ดังนี้

1) ส่วนเทคนิคที่ต้องการ เป็นการระดมสมองของผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบเซรามิกและผู้ผลิตเซรามิก เพื่อกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิคเป้าหมายทางเทคนิค และค่าการเคลื่อนไหวของเป้าหมาย

เบื้องต้น ซึ่งสามารถกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิคได้ 15 ข้อกำหนด แสดงดังภาพที่ 5 ในส่วนที่ 3 ของบ้านคุณภาพ

2) ส่วนความเกี่ยวเนื่องทางเทคนิค ซึ่งเป็นการระดมสมองของฝ่ายต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อกำหนดความสัมพันธ์ของเทคนิคต่างๆ ไปใช้เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า ดังนั้นผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์แต่ละข้อกำหนดมีความสัมพันธ์ที่แตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 5 ในส่วนที่ 4 ของบ้านคุณภาพ

3) ส่วนความสัมพันธ์ เป็นการให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างส่วนความต้องการของลูกค้าและส่วนข้อกำหนดทางเทคนิคของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ ดังนั้นผลการให้ค่าคะแนนความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ แสดงดังภาพที่ 5 ในส่วนที่ 5 ของบ้านคุณภาพ



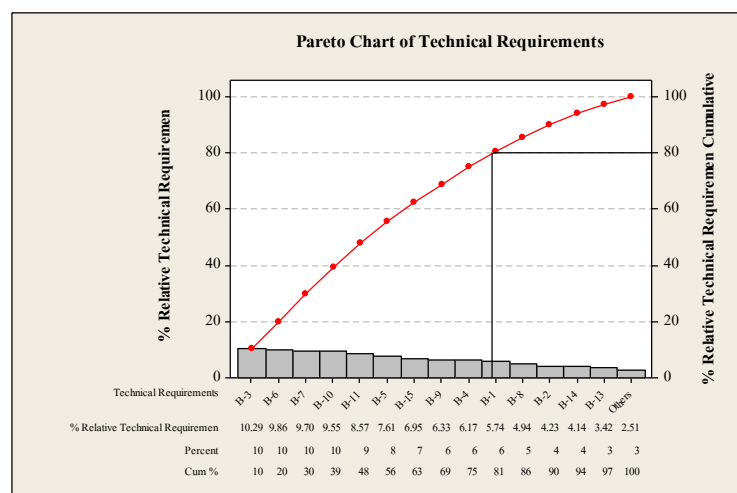
ภาพที่ 5 เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ หรือบ้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ

4) ส่วนลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์พบว่ามีการจัดเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ และโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟแสดงดังตารางที่ 3 และสามารถสรุปผลได้ว่าการจัดเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ หรือสิ่งที่ผู้ผลิตต้องให้ความสำคัญเป็นลำดับแรกๆ ตามหลักการ

แผนภาพพารेटโต (Pareto Diagram) (Sinthavalai and Ruengrong, 2018) มีจำนวนทั้งหมด 9 ข้อ คือ 1) ข้อกำหนดทางเทคนิคด้านความสวยงาม 2) เอกลักษณ์ท้องถิ่น 3) รูปร่าง/รูปทรงมีความหลากหลาย 4) ความละเอียดของดิน 5) การเลือกใช้โทนสี 6) ความเหมาะสมของราคา 7) ไม่มีรอยแตกร้าว 8) ลวดลาย และอันดับสุดท้าย 9) ความคงทนของวัสดุเคลือบผิว แสดงดังภาพที่ 6

ตารางที่ 3 การจัดเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ และโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ

Technical Requirements	Absolute	% Relative	Technical Requirements	Absolute	% Relative
	Technical Requirement	Technical Requirement		Technical Requirement	Technical Requirement
B-3 ความสวยงาม	238.1	10.29	B-4 ความคงทนของวัสดุเคลือบผิว	142.8	6.17
B-6 เอกลักษณ์ท้องถิ่น	228.1	9.86	B-1 ขนาด	132.8	5.74
B-7 รูปร่าง/รูปทรงมีความหลากหลาย	224.5	9.70	B-8 อายุการใช้งาน	114.2	4.94
B-10 ความละเอียดของดิน	221.1	9.55	B-2 น้ำหนัก	97.8	4.23
B-11 การเลือกใช้โทนสี	198.3	8.57	B-14 การเคลื่อนย้าย	95.9	4.14
B-5 ความเหมาะสมของราคา	176.1	7.61	B-13 การดูแลรักษาทำความสะอาด	79.1	3.42
B-15 ไม่มีรอยแตกร้าว	160.8	6.95	B-12 ความปลอดภัยของวัสดุ	58.0	2.51
B-9 ลวดลาย	146.6	6.33			



ภาพที่ 6 การจัดเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ

3. ผลการประยุกต์วิศวกรรมคันเซ

หลังจากได้ข้อกำหนดเชิงเทคนิคของการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) เรียบร้อยแล้ว จากนั้นดำเนินการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซ (KE) พบว่าผลของการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซสำหรับผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ มีผลการวิจัยดังต่อไปนี้

1) การเลือกกลุ่มผู้บริโภคหรือผลิตภัณฑ์ที่กำหนดกลุ่มลูกค้าที่เป็นผู้ใช้ ผู้ที่ชื่นชอบผลิตภัณฑ์เซรามิก กลุ่มร้านค้าตัวแทนจำหน่าย ผู้ผลิตเซรามิก

จังหวัดสงขลา ซึ่งเป็นกลุ่มผู้บริโภคสำคัญที่สามารถนำมาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์แบบสอบถาม อีกทั้งได้กำหนดผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ

2) ผลการกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึกพบว่าจากการสำรวจข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ 3 มีค่าแสดงความรู้สึกที่ผ่านการประเมิน ($IOC > 0.5$) และสื่อถึงความรู้สึกเกี่ยวกับของผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ จำนวน 21 คำ จากจำนวนทั้งหมด 53 คำ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึกสำหรับผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ จำนวน 21 คำ

Kansei Words	IOC	Kansei Words	IOC	Kansei Words	IOC	Kansei Words	IOC
1. สวย	0.88	7. แปลกใหม่	0.76	13. ดูดีมีภาพลักษณ์	0.64	19. คุณภาพ	0.56
2. เฉพาะตัว	0.84	8. งดงาม	0.72	14. สะดุดตา	0.64		
3. สร้างสรรค์	0.84	9. ทันสมัย	0.72	15. สบายตา	0.60	20. ร่วมสมัย	0.56
4. โดดเด่น	0.76	10. น่าสนใจ	0.68	16. มีรสนิยม	0.60		
5. ดีไซน์เก๋	0.76	11. เอกลักษ์ณ์	0.68	17. มีคุณค่า	0.60	21. ผ่อนคลาย	0.56
6. มีสไตล์	0.76	12. ดึงดูดใจ	0.64	18. ประณีต	0.60		

3) ผลการกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์พบว่าจากการสำรวจข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ 4 มีระดับค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประเมินคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 20 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักเท่ากับ 4.30

ดังนั้นคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีระดับคะแนนมากกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประเมินทั้งหมดมีจำนวน 9 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการคัดเลือก

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	ค่าเฉลี่ย
1	รูปทรงของตัวโคมไฟ	แบบกลม, แบบเหลี่ยม, รูปสัตว์	4.58
2	โทนสีของผลิตภัณฑ์	สีอ่อน, สีทึบ, สีสดใส	4.39
3	ความทนทาน	ทนทานมาก, ทนทานน้อย	4.50
4	รูปทรงตัวหมวกโคมไฟ	ครึ่งวงกลม, ทรงกระบอก, ทรงกรวย	4.46
5	ความประณีตผลิตภัณฑ์	มีความประณีตมาก, มีความประณีตน้อย	4.38

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	ค่าเฉลี่ย
6	รูปทรงฐานวางโคมไฟ	แบบทรงเรขาคณิต, แบบโค้งมน	4.36
7	ขนาดของผลิตภัณฑ์	ขนาดเล็ก, ขนาดกลาง, ขนาดใหญ่	4.42
8	ความสว่าง	สว่างมาก, สว่างปานกลาง	4.62
9	ความแข็งแรงของวัสดุ	แข็งแรงมาก, แข็งแรงน้อย	4.39

4) ผลจากการรวบรวมรูปผลิตภัณฑ์จากสื่ออินเทอร์เน็ต เว็บไซต์ จำนวน 3 เว็บไซต์ ได้แก่ Pinterest, Naibann, Exbali วารสารและนิตยสารที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีรูปผลิตภัณฑ์จำนวนทั้งหมด 97 รูป จากนั้นแบ่งกลุ่มรูปผลิตภัณฑ์ด้วยแผนภาพความสัมพันธ์ โดยแบ่งกลุ่มตามผลการกำหนด

ขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ และดำเนินการเปรียบเทียบจำนวนคุณลักษณะผลิตภัณฑ์เพื่อหารูปผลิตภัณฑ์ที่ตรงกับขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มากที่สุดมาเป็นรูปตัวแทนผลิตภัณฑ์ ดังนั้นสรุปได้ว่ามีรูปตัวแทนผลิตภัณฑ์จำนวนทั้งสิ้น 5 รูป แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ตัวแทนผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟที่ผ่านการคัดเลือก

5) ผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 หรือการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Linear Multiple Regression) ของผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ พบว่ามีค่าแสดงความรู้สึกที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดและมีค่า MCC^2 มากกว่า 0.5 อยู่จำนวน 6 ค่า ได้แก่คำว่า สวย เฉพาะตัว งดงาม เอกลักษณ์ สบายตา และประณีต

ดังนั้นนำข้อมูล 6 คำ ที่ผ่านเกณฑ์ไปวิเคราะห์หาค่า PCC และค่า CS ด้วยโปรแกรม Minitab รุ่น 16 จากนั้นดำเนินการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปเป็นข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะในการออกแบบ

โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกคือ คัดเลือกเฉพาะค่าการวิเคราะห์ของ PCC และ CS ที่มีค่าบวก และมีระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($p\text{-Value} < 0.05$) เพราะมีผลต่อความรู้สึกในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะคัดเลือกค่าการวิเคราะห์ในแต่ละคุณลักษณะผลิตภัณฑ์จากรูปตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการประกอบการพิจารณาของแต่ละค่าแสดงความรู้สึก เพื่อให้เกิดข้อสรุปของผลการวิเคราะห์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังนั้นผลการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มีจำนวน 4 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก ได้แก่ โทนสี ความประณีต รูปทรง และความสว่าง แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์คอมพิวเตอร์

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบ						ค่าแสดงความรู้สึก ที่สื่อถึงคุณลักษณะ ผลิตภัณฑ์	รูปที่เป็นแนว ทางการ ออกแบบ	MCC ²
	คุณลักษณะ ผลิตภัณฑ์หลัก	PCC	p-Value	คุณลักษณะ ผลิตภัณฑ์ย่อย	CS	p-Value			
1	โทนสีของ ผลิตภัณฑ์	2.020	0.000	ผลิตภัณฑ์มี สีอ่อน	2.084	0.000	สวย	รูปที่ 5	0.53
		1.663	0.000		1.686	0.003	งดงาม	รูปที่ 5	0.68
		2.358	0.000		2.420	0.000	เอกลักษณ์	รูปที่ 3	0.62
2	ความประณีต ผลิตภัณฑ์	1.043	0.036	มีความประณีตมาก	1.070	0.034	สวย	รูปที่ 5	0.53
		2.053	0.000		2.250	0.000	ประณีต	รูปที่ 5	0.59
3	รูปทรงของ ตัวคอมพิวเตอร์	2.386	0.000	แบบกลม	2.714	0.000	เฉพาะตัว	รูปที่ 3	0.57
				แบบเหลี่ยม	3.761	0.005			
4	ความสว่าง	1.708	0.006	สว่างปานกลางแบบ โปร่ง	2.440	0.006	สบายตา	รูปที่ 2	0.65

4. ผลการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

จากการแปลงความต้องการของลูกค้าเข้าสู่เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) พบว่าสามารถกำหนดข้อกำหนดเชิงเทคนิคได้จำนวน 9 ข้อ เนื่องจากเทคนิค QFD เป็นการมุ่งเน้นการแปลงความต้องการของลูกค้าเพื่อสร้างข้อกำหนดในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงเทคนิค โดยไม่ได้รวมอารมณ์ และความรู้สึกของลูกค้าเข้าไปในกระบวนการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงได้นำข้อกำหนดของเทคนิควิศวกรรมคันเซ (KE) มาวิเคราะห์ในการหาข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะสำหรับการออกแบบร่วมกัน เพื่อแสดงให้เห็นถึงอารมณ์และ

ความรู้สึกของลูกค้า พบว่าสามารถกำหนดข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะที่สื่อถึงความรู้สึกได้จำนวน 4 ข้อ

ดังนั้นสามารถสรุปข้อกำหนดในการออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทคอมพิวเตอร์ได้จำนวน 11 ข้อ จากจำนวนทั้งหมด 13 ข้อ เนื่องจากมีข้อกำหนด 2 ประเด็นที่คล้ายกัน แสดงดังตารางที่ 7 จากนั้นส่งข้อกำหนดเชิงเทคนิคและเชิงคุณลักษณะจำนวน 11 ข้อ ให้กับทีมออกแบบเพื่อดำเนินการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แบบใหม่ อีกทั้งทีมออกแบบได้นำแรงบันดาลใจต่างๆ มาใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์แบบใหม่ตรงตามความต้องการของลูกค้ามากที่สุด

ตารางที่ 7 ข้อกำหนดในการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทคอมพิวเตอร์

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์	รายละเอียด
1	ความสวยงาม	มีการออกแบบที่สวยงามตรงตามรสนิยมของกลุ่มลูกค้า เพื่อเป็นวิธีการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ที่ได้รับ ความนิยมและได้ผลดี เพราะความสวยงามเป็นความพึงพอใจแรกที่สัมผัสได้ก่อน
2	เอกลักษณ์ท้องถิ่น	นำทรงนกเขาชวาเป็นแรงบันดาลใจในการออกแบบ เพื่อแสดงเอกลักษณ์ท้องถิ่นของภาคใต้
3	รูปร่าง/รูปทรงมีความหลากหลาย	มีการผสมผสานรูปทรงระหว่างลักษณะรูปทรงแบบเหลี่ยมกับแบบกลมเข้าด้วยกันเพื่อความหลากหลาย โดยนำรูปทรงของกรงนกเขาชวามาตัดทอนเป็นรูปทรงของคอมพิวเตอร์ และมีผ้าหุ้มห้อยทั้งสี่ด้าน
4	ความละเอียดของดิน	ผู้ผลิตต้องมีการกรองดินอย่างน้อย 2 ครั้ง เพื่อให้ได้ดินที่ละเอียด

ตารางที่ 7 (ต่อ)

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์	รายละเอียด
5	การเลือกใช้โทนสีของผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นโทนสีอ่อน โดยใช้สีชมพูกับน้ำตาลอ่อนมาตัดกัน เพื่อสื่อถึงความสวยงาม
6	ความเหมาะสมของราคา	มีการกำหนดราคาที่เหมาะสมตามต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการผลิตและต้นทุนการตลาด
7	ไม่มีรอยแตกร้าว	ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตต้องไม่มีรอยแตกร้าว ตั้งแต่การขึ้นรูป และการเผา
8	ลวดลาย	ผลิตภัณฑ์ได้ออกแบบลวดลายมากกว่า 2 ลวดลาย
9	ความคงทนของวัสดุเคลือบผิว	ผลิตภัณฑ์มีการใช้วัสดุเคลือบผิวที่มีคุณภาพ โดยไม่ลอกหรือซีดภายในระยะเวลา 3 ปี เพื่อความสวยงามของผิวผลิตภัณฑ์
10	ความประณีต	มีความพิถีพิถันในการขึ้นรูปอย่างประณีตและสวยงาม
11	ความสว่างของผลิตภัณฑ์	ออกแบบมีระดับความสว่างปานกลาง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์โคมไฟมีแสงสว่างนุ่มนวลสบายตา

จากข้อกำหนดเชิงเทคนิคและเชิงคุณลักษณะ 11 ข้อกำหนดข้างต้น พบว่าทีมออกแบบได้นำข้อกำหนดไปทำการออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ ซึ่งในการออกแบบครั้งนี้ ทีมออกแบบได้ใช้คำแสดงความรู้สึกหรือคำค้นหามาสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ 3 คำ ได้แก่ สวยงาม สง่างาม และสบายตา เนื่องจากผู้เชี่ยวชาญและทีม

ออกแบบมองว่าเป็นคำแสดงความรู้สึกที่สื่อถึงผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟมากที่สุด อีกทั้งได้แรงบันดาลใจการออกแบบมาจากทรงนกเขาวามาเป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบ เพื่อสื่อถึงความเป็นเอกลักษณ์ท้องถิ่นจังหวัดสงขลา และพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา จากนั้นผู้ผลิตเซรามิกได้ทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบ แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ

5. ผลการประเมินความพึงพอใจ

หลังจากได้ดำเนินการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟเรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ต้นแบบไปสำรวจความพึงพอใจของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์ด้วยแบบสอบถามที่ 6 ซึ่งเป็นลักษณะคำถามแบบการวัดค่าเป็นตัวเลข 5 ระดับ และถูก

ประเมินโดยกลุ่มลูกค้าที่เป็นผู้ใช้ ผู้ที่ชื่นชอบผลิตภัณฑ์เซรามิก กลุ่มร้านค้าตัวแทนจำหน่าย ผู้ผลิตเซรามิก จังหวัดสงขลา จำนวน 100 ตัวอย่าง ผลการประเมินความพึงพอใจ พบว่ากลุ่มเป้าหมายมีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านรูปร่าง/รูปทรงที่สวยงาม และดึงดูดใจมากที่สุดเป็นอันดับแรก โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก และมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 4.85

อีกทั้งมีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านความเงางามเป็นอันดับสอง โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก และมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 4.83 ซึ่งผลการประเมินความพึงพอใจมีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Sinthavalai and Ruengrong (2018) กล่าวคือการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ พบว่าประเด็นความสวยงามดึงดูดใจ และทันสมัยจะมีผลต่อความพึงพอใจของลูกค้าเป็นอันดับแรก

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) ร่วมกับวิศวกรรมคันเซ (KE) ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ เพื่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แบบใหม่ และเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นคุณภาพของความละเอียดคืนที่นำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และความประณีตของการขึ้นรูปที่ไม่มีรอยแตกร้าว อีกทั้งเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นกับผู้ผลิต เช่น การคืนสินค้า ลดข้อร้องเรียนจากลูกค้า และการเสียลูกค้า เพื่อสร้างความพึงพอใจของลูกค้า โดยเริ่มจากการสำรวจความต้องการของลูกค้าที่มีความต้องการซื้อผลิตภัณฑ์เซรามิกเพื่อทราบถึงความต้องการของลูกค้า และนำมาสรุปเป็นข้อกำหนดเชิงเทคนิคซึ่งได้จากการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) และข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะซึ่งได้จากการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซ (KE) ดังนั้นข้อกำหนดในการออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟ คือผลิตภัณฑ์มีหลากหลาย และโทนสีอ่อนที่สวยงามตรงตามเอกลักษณ์ท้องถิ่น เพื่อตอบโจทยความต้องการของกลุ่มลูกค้า รูปร่าง/รูปทรง มีการผสมผสานระหว่างลักษณะรูปทรงแบบเหลี่ยมกับลักษณะรูปทรงแบบกลมเข้าด้วยกันเพื่อความหลากหลาย มีความคงทนของวัสดุเคลือบผิว มีความประณีตของ

การกรองดินเพื่อไม่ให้เกิดรอยแตกร้าว และมีราคาที่เหมาะสม อีกทั้งความสว่างของผลิตภัณฑ์มีระดับความสว่างปานกลาง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์โคมไฟมีแสงสว่างนุ่มนวลสบายตา ดังนั้นผลการวิจัยนี้ พบว่าผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟแบบใหม่มีค่าคะแนนความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านรูปร่าง/รูปทรงที่สวยงาม และดึงดูดใจมากที่สุดเป็นอันดับแรก โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.85 และมีค่าความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านความเงางามเป็นอันดับสอง โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.83

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม ประจำปี 2563 ขอขอบคุณผู้ผลิตเซรามิก ภูมิศึกษา ตลอดจนผู้เชี่ยวชาญ ที่มอดแบบทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนดำเนินงานสำเร็จลุล่วง และขอบคุณกลุ่มลูกค้าที่ให้ความร่วมมือในการตอบแบบสอบถาม และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Achmad, S. and Taufiq, I. 2015. Design of Innovative Alarm Clock Made from Bamboo with Kansei Engineering Approach. **Agriculture and Agricultural Science Procedia** 3: 184-188.
- 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 Aomprehensive Review of**

- its Concepts and Methods. **Journal Quality Engineering** 15(1): 23-35.
- Chumchor, V. and Pimapunsri, K. 2013. A Development of Online Questionnaire System to Support an Application of Kansei Engineering in Product Design, pp. 186-191. *In The 4th National Conference of Industrial Operations Development 2013*. Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Ishardita, P.T., Wifqi, A. and Dewi, H. 2015. Development of Customer Oriented Product Design Using Kansei Engineering and Kano model: Case study of Ceramic Souvenir. **Procedia Manufacturing** 4: 328-335.
- Ministry of Tourism. 2019. **Domestic Tourism Statistics Q1-Q4 (Classify by region and province)**. Tourism Statistics 2019. Available Source: https://www.mots.go.th/more_news_new.php?cid=618, April 13, 2020. (in Thai)
- Pimapunsri, K. 2011. New Product Development Using Kansei Engineering, pp. 331-337. *In The 2th National Conference of Industrial Operations Development 2011 (CIOD 2011)*. Bangkok, Thailand. (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)
- Schütte, S. 2002. Designing Feelings into Products: Integrating Kansei Engineering Methodology in Product Development. Ph.D. Dissertation of Department of Mechanical Engineering, Linkoping University.
- 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 KMUTNB** 26(3): 437-450. (in Thai)
- Yodwangjai, S. 2014. Product Design and Development for Dinner Chair of Kansei Engineering. **KKU Engineering Journal** 41(2): 191-200. (in Thai)