

วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

คณะกรรมการที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.อุทัยรัตน์ ณ นคร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง จักรใจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.เผด็จศักดิ์ จารยะพันธุ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัย (Peer review)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑาทิพย์ โพธิ์อุบล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑามาศ ร่มแก้ว

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิจิตรา แก้วสอน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ ดุลย์จินดาชบาพร

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธิ ว่างเอียด

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รองศาสตราจารย์ ดร.วรางคณา เรียนสุทธิ

มหาวิทยาลัยทักษิณ

รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ มั่งคั่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.ขวัญเนตร สมบัติสมภพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีเวียง ฤทธิศักดิ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนกร กฤษณชาญติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

ดร.นัจกัศ สุขสวัสดิ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

ดร.รัตติกาล เสนน้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

ดร.สุพรรณา ชินวรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วชิระ แสงรัมย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ แหวมงาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ดร.ชริยา นนทกาญจน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริยา ฉลาด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐานวิทย์ แนนไส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันท์ชัย ชูศิลป์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ บุญนุ่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิญา วณิชพันธุ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุนันทา ข้องสาย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ดร.สหพงศ์ สมวงศ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พรรณ อำพันธ์ทอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณะพงศ์ พันธุ์ศรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ดร.สุกัญญา คำหล้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภารัตน์ ขวัญอ่อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารักษ์ ชีรอำพน
รองศาสตราจารย์ ดร.บุรฉัตร จิตร์วีระ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เขียวมั่ง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุภัทร เมฆพ่ายพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันสุกัร เสนานาญ
ดร.ประสงค์ กิตติดำรงสุข
รองศาสตราจารย์ ดร.นิวุฒิ หวังชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำพร ปัญญาใหญ่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุริวรรณ แจ้งจิตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤมล ศักดิ์ปกรณกานต์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ แซ่หลี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณพัธูร บัวฉุน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชนียะ สะมาลา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ธาราวดี
รองศาสตราจารย์ ดร.นวล เพ็ชรวัฒนา
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนศ รัตนวิไล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมทิพย์ ค่านธีรวิชย์
ดร.กฤษฎา พวงสุวรรณ
ดร.จินดา สวัสดิ์ทวี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ ศรีตโยภาส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี
มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี
มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทความทุกเรื่องก่อนลงตีพิมพ์ในวารสารฯ ได้ผ่านการพิจารณาลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ 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

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

รองศาสตราจารย์ณัฐวรรณ์ ปภาวสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิ่น จันจุฬา

คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาตรี หอมเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริโรตม์ เกตุแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

รองศาสตราจารย์ ดร.พูนสุข อุดม

คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์เกษ ภูหา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ประพจน์ พรหมสมบูรณ์

คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

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

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิกรม ฉันทรางกูร

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ดร.ทรงสิน ชีระกุลพิศุทธิ์

คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ดร.ทัศนีย์ ขาวเนียม

คณะคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ดร.กิตติมา ตันติหาชัย

คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ดร.สหพงศ์ สมวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

นางสาวคุณิกา ฐานะเสวตร

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

ผลของสีผู้เลี้ยงต่อการเจริญเติบโตและสีผิวหนังของปลากะตังนางฟ้า.....	259-268
ชลันดา กำเหนิดดี ภูษณ แก้วคง และ สมหมาย เชื้อวารีสังจะ	
ประสิทธิภาพของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในการบำบัดน้ำเสีย.....	269-284
จากอาคารที่พักอาศัย	
นฤมล ทองมาก ชันวานี จิใจ วารุณี หะยิมะสาและ ไชชนะ มูเล็ง	
และ พรทิพย์ ศรีแดง	
การคัดแยกแบคทีเรียกรดแลกติกผลิตแบคทีเรียโอซินที่สามารถยับยั้ง.....	285-301
การเจริญของแบคทีเรียสาเหตุโรคเต้านมอักเสบในโคนม	
ญาณิกา วัชรเทวินทร์กุล และ จิรนนท์ สวนชูโต	
การศึกษาเปรียบเทียบปริมาณขดเชยด้วยอุปกรณ์ปรับสภาพกำลังไฟฟ้าของระบบ.....	302-314
จ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟและตัวขดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์	
ในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ใช้หม้อแปลงแบบวี	
กฤษดา มงคลดี และ ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์	
การประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับฟาร์มอัจฉริยะ.....	315-329
ชนนิกานต์ รอดมรรณ มธุรส ผ่านเมือง และ วีรศักดิ์ จงเลขา	
การปรับแก้วิธีเคเนียร์เรสเนเบอร์โดยใช้ค่าเฉลี่ยเฉลี่ย.....	330-342
ในการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย	
พัชณา สุวรรณแสน ภัทราวดี มากมี และ อาฟีฟี ลาเต๊ะ	
ผลของปุ๋ยมูลไส้เดือนดินร่วมกับแทนนินต่อการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊ค.....	343-356
พิชญ์ ตั้งสมบัติวิจิตร ปวีณา สุขสะอาด อุทาน บุรณศักดิ์ศรี	
และ กิตติ บุญเลิศนิรันดร์	
สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล.....	357-368
กับพอลิแลกติกแอซิดที่เติมเถ้าเปลือกทุเรียน	
พีรวัส คงสง ศิริวรรณ หอกกิ่ง อนุสรณ์ วิวาสุข	
และ มาหามะสุไฮมี มะแซ	

ผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาการหน่วงสำหรับการบ่มต่อกำลังอัด.....	369-381
ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินบด	
นิติธร สีเมือง สำเริง รักซ้อน และ ปริญญญา จินดาประเสริฐ	
ระบบตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ราคาประหยัดด้วยเทคนิค.....	382-392
การประมาณค่าจากเซนเซอร์วัดความสว่าง	
นภณัฐ รัตนกร และ ชลธิ์ โพธิ์ทอง	
การไพร่เมล็ดด้วย <i>Bacillus subtilis</i> ต่อความงอกและการเจริญเติบโต.....	393-407
ของต้นกล้าผักกาดหอม	
จักรพงษ์ กางโสภา เพชรรัตน์ จีเพชร และ สุริมาศ จันทะอินทร์	
การวิเคราะห์สารพิษเคมีเบื้องต้น ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและการเตรียมโลชั่น.....	408-421
ผสมสารสกัดพอลิเอสจากฝัองชันโรง	
อิมรอน มีชัย ครุณี ยื่อแร และ อิศมะแอ เจ๊ะหลง	
การออกแบบและทดลองผลิตเก้าอี้พักผ่อนจากวัสดุผสมมูลช้าง.....	422-438
ตระกูลพันธ์ พัทธเมธา	
ผลของการเปลี่ยนน้ำมันหอมระเหยไทมอลต่อการรักษาคุณภาพ.....	439-453
เนื้อกุ้งขาวต้มสุก	
สวามินี ชีระวุฒิ และ ปญญทัช ขวัญอ่อน	
Model Analysis of Air Pollution in Bangkok by Grey's Theory	454-466
Pimpan Ampanthong	
การศึกษาการกระตุ้นเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้า.....	467-483
ร่วมกับน้ำผสมไอโซน	
ชิดชนก มากจันทร์	
การฟื้นฟูระบบนิเวศชุมชนบ้านแม่จันทุก ตำบลบ้านทับ อำเภอแม่แจ่ม.....	484-500
จังหวัดเชียงใหม่ ด้วยแนวคิดพีซีให้สีและกระบวนการย้อมสีธรรมชาติ	
ผ้าทอลวดลายด้วยมือสำหรับยกระดับสิ่งทอพื้นถิ่น	
อรนุตฤกษ์ สุธาคำ และ ญาณิศา โกมลศิริโชค	

ระดับความแปรปรวนทางพันธุกรรมประชากรปลาเลียหินในลำน้ำอย่าง..... 501-513

(ลำน้ำสาขาแม่น้ำน่าน) กรณีศึกษาน้ำตกศิลาเพชร จ.น่าน

เชาวลีย์ ใจสุข พัทธา นิธิโรจน์ภักดี อมรชัย ล้อทองคำ

และ เจนจิรา ลานแก้ว

ความเสื่อมสภาพและปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อแม่น้ำลี้ จังหวัดลำพูน..... 514-525

จากการใช้ประโยชน์เพื่อการเกษตรของเกษตรกร

สามารถ ใจเดียว

การสร้างต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนสำหรับการไล่ความชื้นในอัฐดิบ..... 526-540

ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการเผาด้วยพลังงานชีวมวล

ศุภฤกษ์ การธรรมณี รัศมี แสงศิริมงคลยิ่ง นัฐพงศ์ ส่องเนียม

และ กฤษดา เสือเอี่ยม

ผลของสีตู้เลี้ยงต่อการเจริญเติบโตและสีผิวหนังของปลากระดี่นางฟ้า

Effects of Aquarium Color on Growth and Skin Color of

Blue Gourami (*Trichogaster trichopterus*)

ชลันดา กำเหนิดดี ภูษณ แก้วคง และ สมหมาย เขียววาริสัจจะ *

Chalanda Kamnerddee, Poosana Keawkong and Sommai Chiayvareesajja *

Received: 18 November 2020, Revised: 16 March 2020, Accepted: 19 March 2020

บทคัดย่อ

สีของปลาสวยงามมีบทบาทสำคัญต่อการยอมรับของผู้ซื้อ เพื่อศึกษาผลของสีตู้เลี้ยงต่อการเจริญเติบโตและสีผิวหนังของปลากระดี่นางฟ้า จึงดำเนินการทดลองโดยใช้ปลาที่มีน้ำหนักตัวเริ่มต้นเฉลี่ย 1.78 กรัม เลี้ยงในตู้กระจกที่มีสีต่างกัน 4 สี (ชุดควบคุมเป็นตู้กระจกธรรมดา ส่วนตู้อื่นใช้ฟิวเจอร์บอร์ดสีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงินปิดรอบข้างตู้) แต่ละสีมี 3 ซ้ำ ปลาเริ่มต้นซ้าละ 5 ตัว เลี้ยงปลาด้วยอาหารปลาสวยงามที่ขายตามท้องตลาด วันละ 2 มื้อเป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่าปลาที่เลี้ยงในตู้สีแดงมีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงที่สุด (97.08% และ 0.41% ต่อวัน ตามลำดับ) แต่ไม่มีความแตกต่างกับปลาที่เลี้ยงในตู้สีอื่นๆ ($p > 0.05$) ปลาที่เลี้ยงในตู้ชุดควบคุมมีอัตราการรอดตายสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ (86.67%) นอกจากนี้พบว่า ความสว่างของสีผิวปลาขึ้นอยู่กับสีของตู้ที่เลี้ยง โดยสีผิวปลาเริ่มตั้งแต่สีขาวสว่างมากในตู้สีเหลือง ไปจนถึงสีเข้มในตู้สีน้ำเงิน และการใช้ตู้สีน้ำเงินทำให้ปลา มีสีสันทึบคล้ายคลึงกับธรรมชาติมากที่สุด ดังนั้นการใช้ตู้สีน้ำเงินจึงเหมาะสมที่สุดในการเพาะเลี้ยงปลากระดี่นางฟ้า

คำสำคัญ: คุณภาพน้ำ, น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น, อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ, อัตราการรอดตาย, สีผิวหนัง

ABSTRACT

The color of the ornamental fish plays an important role in the acceptance of the buyer. This study examined the effect of aquarium color on growth and skin color of blue gourami. An experiment was undertaken using fish with an average initial body weight of 1.78 grams. Experimental fish were reared in 4 groups of aquariums with 4 different colors (a control group was glass aquarium with no color and the others were glass aquariums covered with red, yellow and blue corrugated plastic boards) in triplications with 5 fish each. Fish were fed on commercial ornamental fish twice a day, for 8 weeks. The fish with the highest average weight gain (97.08%) and specific growth rate (0.41 %/day) was found in the red aquarium but not significantly different ($p > 0.05$) from the fish in the other aquariums. Moreover, the fish in the control group had the highest average survival rate (86.67%). The paleness of fish skin varied with aquarium color - very pale skin was found in the yellow aquarium and dark skin was found in the blue aquarium. In addition, the skin color of the fish in the blue aquarium had the greatest similarity to natural fish. Therefore, use of the blue aquarium is the most appropriate for blue gourami culture.

Key words: water quality, weight gain, specific growth rate, survival rate, skin color

บทนำ

ปลากระดี่นางฟ้า (*Trichogaster trichopterus*) มีชื่อสามัญว่า Blue gourami อยู่ในวงศ์ Osphronemidae เป็นปลาสวยงามของไทยที่พบได้ในแหล่งน้ำนิ่งทุกภาคของประเทศ (Nukwan and Rodloy, 2009) มีหลายพันธุ์และหลากหลายสี เป็นที่นิยมมากสำหรับนักเลี้ยงปลามือใหม่เพราะมันแข็งแรงและง่ายต่อการดูแล (Encyclo Fish, 2018)

สีของปลามีความสัมพันธ์กับเพศของปลา การเกิดสีและลวดลายของสีในปลาสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ (1) ปลาเพศผู้และปลาเพศเมียมีสีแตกต่างกัน (Dichromatism) ซึ่งยังแบ่งย่อยเป็นพวกที่ปลาเพศผู้และปลาเพศเมียมีสีแตกต่างกันโดยถาวร (Permanent dichromatism) เช่น กลุ่มปลาพยาบาล (Wrasses) กลุ่มปลาตักแคนหิน (Blennies) กลุ่มปลานกแก้ว (Parrot fishes) และกลุ่มปลาหมอสี (Cichlids) ในทะเลสาบของทวีปแอฟริกา โดยปลา

เพศผู้มักมีสีสดใสกว่าเพศเมีย ความแตกต่างของสีระหว่างเพศพัฒนาขึ้นเมื่อถึงระยะสมบูรณ์เพศและคงอยู่ตลอดชีวิต สีที่แตกต่างกันระหว่างเพศนี้อาจมีบทบาทสำคัญที่ปลาเพศผู้ใช้ดึงดูดปลาเพศเมีย รวมทั้งใช้ข่มขู่คุกคามเพื่อขับไล่ฝ่ายตรงข้ามที่เผชิญหน้า และปลาอีกพวกหนึ่งที่ปลาเพศผู้และเพศเมียมีสีแตกต่างกันเฉพาะฤดูกาล (Seasonal dichromatism) คือฤดูขยายพันธุ์ โดยปลาเพศผู้มีสีสดใสกว่าปลาเพศเมีย สีของปลาเพศผู้ที่พัฒนาขึ้นนี้แสดงให้เห็นปลาเพศเมียเห็นถึงความสามารถของปลาเพศผู้ที่จะสร้างและปกป้องอาณาเขตและวัสดุที่จำเป็นต่อการวางไข่ของปลาเพศเมีย (2) ปลาที่เพศผู้และเพศเมียมีสีเหมือนกัน (Monochromatism) ตามปกติปลาเพศผู้ที่พร้อมผสมพันธุ์เท่านั้นจะพัฒนาให้มีสีสดใสกว่าเพศเมียเพื่อดึงดูดความสนใจของเพศเมียเมื่อถึงฤดูขยายพันธุ์ การเปลี่ยนสีของปลาในกลุ่ม

นี้จะเกิดขึ้นชั่วคราว ซึ่งใช้จำแนกเพศปลาได้ (Kodric-Brown, 1998)

เซลล์ที่ทำให้เกิดสีในตัวปลามี 2 กลุ่ม คือ เซลล์ที่ทำให้เกิดสีอย่างแท้จริง (Chromatophore) มีลักษณะเป็นถุงเล็กๆ ผنงยาวและมีกิ่งก้านสาขา มากมายอยู่ในผิวหนังชั้นใน (Dermis) และอยู่ตาม อวัยวะต่างๆ เช่น อยู่บนหรือใต้เกล็ด เชื้ออยู่ในช่อง ท้อง สมอ และไขสันหลัง ภายในเซลล์จะมีเม็ดสี หรือเซลล์สร้างสี (Pigment granule หรือ Pigment cell หรือ Color cell) ซึ่งทำให้เกิดสีต่างๆ ขึ้น เช่น สี แดง ส้ม เหลือง และดำ โดยเม็ดสีเหล่านี้จะเคลื่อนตัว ไปมาภายในเซลล์ อาจจะรวมตัวอยู่ตรงกลางเซลล์ หรือแผ่กระจายไปทั่วเซลล์ก็ได้ ทำให้มองเห็นสี เปลี่ยนแปลงไปด้วย เม็ดสีที่กระจายทั่วเซลล์จะทำให้ สีเข้ม และถ้าอยู่ตรงกลางเซลล์จะทำให้สีจางลง และ เซลล์ที่ทำให้เกิดการสะท้อนแสง (Iridocyte) เป็นสี สะท้อนคล้ายกับสีกระจกสะท้อนแสง สารที่ทำให้ เกิดการสะท้อนแสงคือ กัวนิน (Guanin) ซึ่งจะมีสีเงิน หรือสีขาวและเหลือบแสง (Narongpong, 2012)

สีของปลามีบทบาทสำคัญต่อการยอมรับ ของผู้ซื้อ การกินอาหารที่มีสารสี เช่น แคโรทีนอยด์ (Carotenoids) ในอาหารตามธรรมชาติหรืออาหาร สำเร็จรูปที่เสริมสารสีสามารถทำให้ปลามีสีส้ม เพิ่มขึ้นได้ (Sermwatanakul and Bumrungthum, 2000) นอกจากนี้ สีของอุปกรณ์ที่ใช้เลี้ยงปลาก็เป็น ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญซึ่งอาจมีผลต่อ ประสิทธิภาพการทำงานของระบบต่างๆ ในร่างกาย ของปลาที่เพาะเลี้ยง โดยสีของถังเลี้ยงที่ไม่เหมาะสม สามารถทำให้ปลาเกิดความเครียดได้ พบว่าปลาสด ที่เลี้ยงในถังสีดามีปริมาณกลูโคสในเลือด (Plasma glucose) มากกว่าปลาที่เลี้ยงในถังสีขาว ถังสีแดง ถัง สีเขียว และถังสีน้ำเงินอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แสดงว่าปลาสดที่เลี้ยงในถังสีดามีความเครียด มากกว่าปลาที่เลี้ยงในถังสีอื่น (Ninwichian *et al.*,

2018) ปลาอุกแอฟริกันที่เลี้ยงในถังที่มีสีอ่อน (สีขาว สีฟ้า และสีเขียว) มีปริมาณกลูโคสในเลือดมากกว่า ปลาที่เลี้ยงในถังสีเข้ม (สีแดงและสีดำ) ซึ่งแสดงว่ามี ความเครียดมากกว่า (Okomoda *et al.*, 2017) ส่วน ปลาไทเมน (*Hucho taimen*) ที่เลี้ยงในถังสีเหลืองมีค่า Plasma cortisol น้อยกว่าปลาที่เลี้ยงในถังสีแดง ถังสี ดำ ถังสีน้ำเงิน และถังสีขาว แสดงว่าปลาที่เลี้ยงในถัง สีเหลืองมีความเครียดน้อยกว่าปลาที่เลี้ยงในถังสีอื่น (Wang *et al.*, 2016) อีกทั้งปลาอาจเปลี่ยนสีผิวของ พวกมันอย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองต่อความเครียด (Ninwichian *et al.*, 2018) นอกจากนี้สีของถังเลี้ยง ส่งผลต่อความอยากกินอาหาร ประสิทธิภาพการใช้ อาหาร และการเจริญเติบโตของปลาอีกด้วย โดยลูก ปลาเทราท์ที่เลี้ยงในถังสีน้ำตาลอ่อนมีการกินอาหาร (Feed consumption) และอัตราการเจริญเติบโต จำเพาะ (Specific growth rate) มากที่สุด และอัตรา การเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (Feed conversion ratio; FCR) ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับปลาที่เลี้ยงในถังสี เขียวอ่อน ถังสีเขียวเข้ม และถังสีเทา (Ustundag and Rad, 2015) ปลาอุกแอฟริกัน (*Clarias gariepinus*) ที่ เลี้ยงในถังสีดากินอาหารและเจริญเติบโตมากกว่า ปลาที่เลี้ยงในถังสีขาว สีเขียว สีน้ำเงิน และสีแดง อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ส่วนปลาอุกที่เลี้ยงในถังสี น้ำเงินและถังสีเขียวมีการเจริญเติบโตน้อยที่สุด (Okomoda *et al.*, 2017) เช่นเดียวกับปลาอุก (*Heterobranchus bidorsalis*) ที่เลี้ยงในถังสีดามีการ เจริญเติบโตมากที่สุด ถัดมาเป็นปลาที่เลี้ยงในถังสีน้ำ เงินและถังสีเขียว (Solomon and Ezigbo, 2018) ส่วน ปลาสดที่เลี้ยงในถังสีน้ำเงินมีอัตราการเจริญเติบโต สูงที่สุดและมีค่า FCR ต่ำที่สุด และปลาสดที่เลี้ยง ในถังสีดามีอัตราการเจริญเติบโตต่ำที่สุดและมีค่า FCR สูงที่สุด (Ninwichian *et al.*, 2018) การเลือกสี ถังเลี้ยงให้เหมาะสมกับชนิดของปลาจึงอาจส่งผลดี ต่อเกษตรกรผู้เลี้ยงปลานั้น

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสีตู้เลี้ยงต่อการเจริญเติบโต และการเปลี่ยนแปลงสีผิวของปลากะตังนางฟ้า ซึ่งอาจนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ในการเพิ่มการเจริญเติบโตและทำสีตัวปลากะตังนางฟ้าให้มีสีส้มที่สวยงามเพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ปลา และอาจช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้อสารเร่งสีมาเสริมในอาหาร

วิธีดำเนินการวิจัย

ทดลองเลี้ยงปลากะตังนางฟ้าที่ศูนย์วิจัยสุขภาพสัตว์น้ำเพื่อการอนุรักษ์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design) เลี้ยงปลากะตังนางฟ้าในตู้กระจกขนาดกว้าง 20 ซม. ยาว 30 ซม. และลึก 30 ซม. ที่มีสีต่างกัน 4 สี คือ (1) ตู้กระจกที่ไม่ติดฟิวเจอร์บอร์ด (ชุดควบคุม) (2) ตู้เลี้ยงสีแดง (3) ตู้เลี้ยงสีเหลือง และ (4) ตู้เลี้ยงสีน้ำเงิน โดยติดฟิวเจอร์บอร์ดสีที่ต้องการทุกด้านของตู้เลี้ยง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ในแต่ละซ้ำมีปลา 5 ตัว

เมื่อติดฟิวเจอร์บอร์ดครบทุกด้านของตู้เลี้ยง จึงเติมน้ำประปาที่ปลอดคลอรีนลงไปประมาณ 3/4 ของตู้เลี้ยง แล้วใส่หัวทรายที่เชื่อมต่อกับเครื่องเติมอากาศ (Air pump) ลงไปในตู้เลี้ยง นำปลากะตังนางฟ้าขนาดตัวยาวจากปากถึงโคนหางประมาณ 5.0-6.5 ซม. ที่ซื้อจากร้านขายปลามาพักไว้ประมาณ 1

สัปดาห์ ก่อนนำปลาใส่ลงไปในตู้เลี้ยง ชั่งน้ำหนัก วัดความยาว และวัดค่าสีก่อนเริ่มการทดลอง แล้วให้อาหารปลาสวยงามยี่ห้อซากูระ (สำหรับปลาทองและปลาสวยงามทั่วไป) เมื่ออาหารขนาด 1 มม. มีโปรตีน 35% ไขมัน 4% คาร์โบไฮเดรต 5% เกลือ 12% และความชื้น 10%) วันละ 2 ครั้ง ในช่วงเวลา 10.00 น. และ 17.00 น. ให้ปลากินจนอิ่ม และเปลี่ยนถ่ายน้ำทุก 3 วัน วัดคุณภาพน้ำสัปดาห์ละครั้ง เพื่อควบคุมคุณภาพน้ำให้เหมาะสมตลอดการทดลอง โดยวัดค่า pH ด้วย pH meter วัดอุณหภูมิด้วย Thermometer วัดปริมาณแอมโมเนียรวมและไนไตรท์ ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Boyd and Tucker, 1992) แล้วใช้ค่า pH และอุณหภูมิประกอบการแปลงค่าปริมาณแอมโมเนียรวมเป็นปริมาณแอมโมเนียอิสระ (Alleman, 1998) และวัดค่าสีผิวบริเวณกลางลำตัวปลาด้วยเครื่องวัดสี Hunterlab รุ่น MiniScan EZ ตามระบบ CIE ซึ่งเป็นระบบที่ Commission International de l'Eclairage (CIE) ได้พัฒนาขึ้นมา โดยวัดสีออกมาเป็นตัวเลข ไม่ขึ้นกับการมองเห็นของแต่ละบุคคล (Nitayaphat, 2015) ทำการทดลองเป็นระยะเวลานาน 8 สัปดาห์

เมื่อสิ้นสุดการทดลองชั่งน้ำหนักปลาทุกตัว จากนั้นประเมินค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (Weight gain) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate) (Ninwichian *et al.*, 2018) รวมทั้งอัตราการรอดตาย โดยคำนวณจากสมการดังนี้

$$\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย} - \text{น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น}) \times 100}{\text{น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น}}$$

$$\text{อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (\%/วัน)} = \frac{[\ln(\text{น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย}) - \ln(\text{น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น})] \times 100}{\text{จำนวนวันที่เลี้ยง}}$$

$$\text{อัตราการรอดตาย (\%)} = \frac{\text{จำนวนปลาที่เหลือทั้งหมด} \times 100}{\text{จำนวนปลาเริ่มต้น}}$$

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way Analysis of Variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดทดลองด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยโปรแกรม SPSS

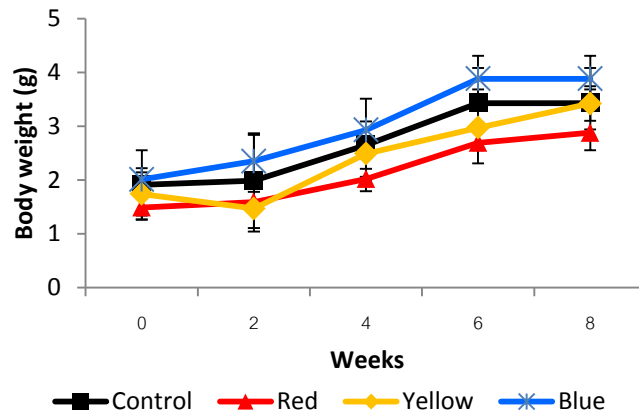
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

คุณภาพน้ำในตู้เลี้ยงที่มีสีแตกต่างกัน ตลอดระยะเวลาทดลอง 8 สัปดาห์ มีค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 6.84-7.79 อุณหภูมิอยู่ในช่วง 26-28 °C ซึ่งเหมาะสมแก่การเลี้ยงปลากระดี่นางฟ้า สอดคล้องกับ Sharpe (2019) ที่รายงานว่าช่วง pH ระหว่าง 6-8 อุณหภูมิ 23-28 °C และปริมาณแอมโมเนียอิสระ (0-0.004 มก./ล.) เป็นช่วงที่เหมาะสมแก่การเพาะเลี้ยงปลากระดี่นางฟ้า ส่วนไนไตรท์ (0-0.372 มก./ล.) บางครั้งมีปริมาณที่ไม่เหมาะสมแก่การเลี้ยงปลากระดี่นางฟ้าซึ่งสมาคมผู้ค้าปลาสวยงาม (Ornamental Aquatic Trade Association (OATA)) ในสหราชอาณาจักรแนะนำว่าปริมาณแอมโมเนียอิสระและไนไตรท์ ไม่ควรมีปริมาณสูงกว่า 0.02 และ 0.2 มก./ล. ตามลำดับ (OATA, 2008)

ผลของสีตู้เลี้ยงต่อการเจริญเติบโตของปลากระดี่นางฟ้า

น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้นของปลาในทุกชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยปลาที่เลี้ยงในตู้สีน้ำเงินมีน้ำหนักเฉลี่ยมากกว่าปลาที่เลี้ยงในตู้สีอื่นๆ ตลอดการทดลอง (ภาพที่ 1) และพบว่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของปลาที่เลี้ยงในตู้สีแดงมีค่าสูงที่สุด (97.08% และ

0.41%ต่อวัน ตามลำดับ) แต่ไม่แตกต่างกับปลาในตู้สีอื่นๆ ($p > 0.05$) และอัตราการรอดตายของปลาที่เลี้ยงในตู้ชุดควบคุม (86.67%) มีค่าสูงที่สุด ($p < 0.05$) ส่วนปลาในตู้สีเหลืองมีอัตราการรอดตายต่ำที่สุด (66.67%) (ตารางที่ 1) ซึ่งผลการทดลองไม่สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Okomoda *et al.* (2017) ที่พบว่าปลาฉลามแอฟริกัน (*Clarias gariepinus*) ที่เลี้ยงในถังสีดำเจริญเติบโตมากกว่าปลาที่เลี้ยงในถังสีขาว สีเขียว สีน้ำเงิน และสีแดงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เช่นเดียวกับปลาฉลาม (*Heterobranchus bidorsalis*) ที่เลี้ยงในถังสีดำมีการเจริญเติบโตมากที่สุด และปลาฉลามที่เลี้ยงในถังสีโทนสว่าง (สีขาว สีเหลือง และสีเขียว) มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะต่ำที่สุด และมีอัตราการรอดตายต่ำ (Solomon and Ezigbo, 2018) ส่วน Ninwichean *et al.* (2018) รายงานว่าปลาชนิดที่เลี้ยงในถังสีน้ำเงินมีอัตราการเจริญเติบโตสูงที่สุด และ Ullmann *et al.* (2011) พบว่าปลากะพงขาวในตู้เลี้ยงสีแดงมีน้ำหนักเฉลี่ยสูงที่สุด แสดงว่าผลของสีของสิ่งแวดล้อม เช่น ถังหรือตู้กระจกที่เลี้ยงปลาอาจมีผลต่อการเจริญเติบโตของปลา โดยขึ้นอยู่กับชนิดของปลาด้วย นอกจากนี้สีของตู้หรือถังเลี้ยงยังมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้อาหารในการเพาะเลี้ยงปลา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ปลาด้วย (El-Sayed and El-Ghobashy, 2011; Eslamlou *et al.*, 2015; Kesbiç *et al.*, 2016; Ninwichean *et al.*, 2018) โดยลูกปลาเทราท์ที่เลี้ยงในถังสีน้ำตาลอ่อนมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) ดีที่สุด (Ustundag and Rad, 2015) และปลาชนิดที่เลี้ยงในถังสีดำมีค่า FCR สูงที่สุด (Ninwichean *et al.*, 2018)



ภาพที่ 1 น้ำหนักตัวของปลากระดี่นางฟ้าที่เลี้ยงในตู้ที่มีสีต่างกัน เป็นเวลา 8 สัปดาห์ (ค่าเฉลี่ย±SD)

ตารางที่ 1 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตราการรอดตายของปลากระดี่นางฟ้าที่เลี้ยงในตู้ที่มีสีต่างกัน เป็นเวลา 8 สัปดาห์ (ค่าเฉลี่ย±SD)*

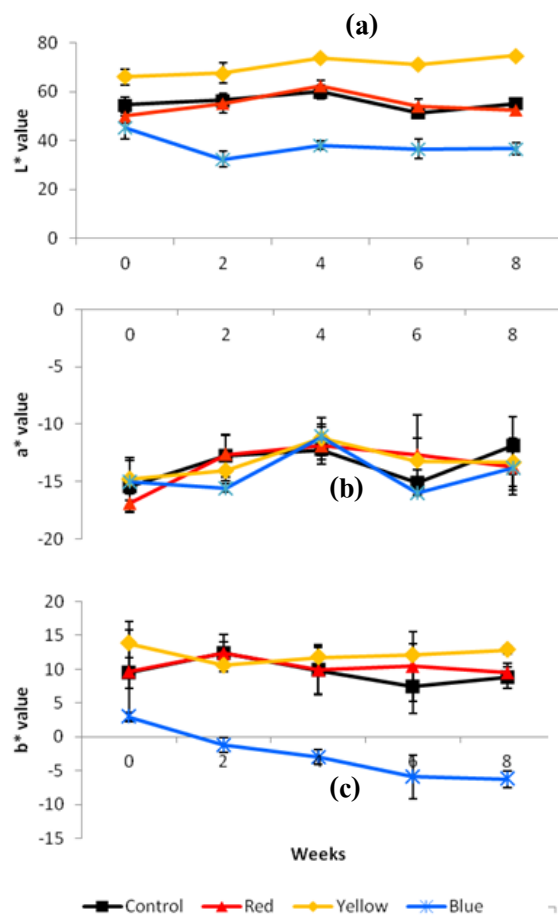
พารามิเตอร์	สีตู้กระจก			
	ชุดควบคุม	สีแดง	สีเหลือง	สีน้ำเงิน
น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (%)	82.76±8.94 ^a	97.08±17.44 ^a	75.76±9.19 ^a	95.15±14.81 ^a
อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (%/วัน)	0.19±0.28 ^a	0.41±0.26 ^a	0.19±0.35 ^a	0.20±0.20 ^a
อัตราการรอดตาย (%)	86.67±6.67 ^b	80.00±0.00 ^{ab}	66.67±6.67 ^a	80.00±0.00 ^{ab}

* ในแนวนอนเดียวกัน ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรเหมือนกันกำกับ ไม่แตกต่างกันในทางสถิติ ($p > 0.05$)

ผลของสีตู้เลี้ยงต่อสีผิวหนัง

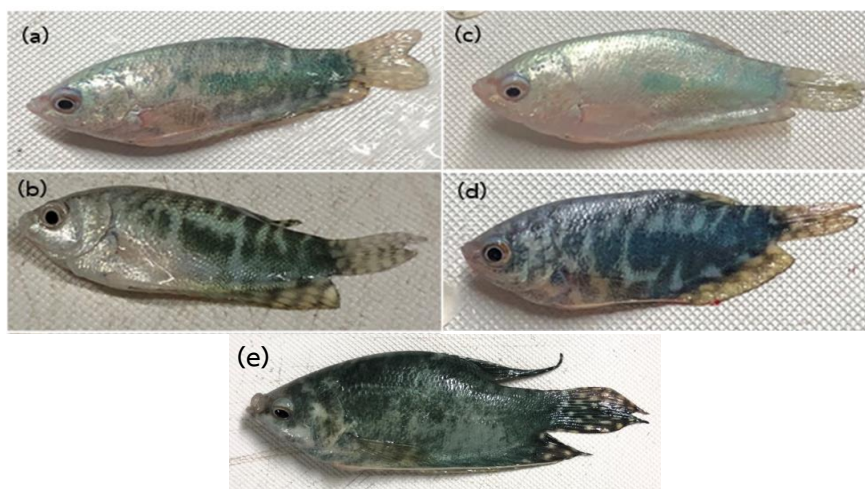
การวัดค่าสีตามระบบ CIE ค่า L* แสดงถึงความสว่างของสี มีค่าระหว่าง 0-100 (สีดำถึงสีขาว) ค่า a* แสดงถึงค่า สีแดง (+) และสีเขียว (-) ส่วนค่า b* แสดงถึงค่าสีเหลือง (+) และสีน้ำเงิน (-) พบว่าตลอดระยะเวลา 8 สัปดาห์ ปลากระดี่นางฟ้าที่เลี้ยงในตู้สีเหลืองมีค่าความสว่างของสีผิวสูงกว่าปลาที่เลี้ยงในตู้สีอื่น และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนปลาที่เลี้ยงในตู้สีน้ำเงินมีค่าความสว่างของสีผิวน้อยกว่า

ปลาที่เลี้ยงในตู้สีอื่น (ภาพที่ 2a) ค่า a* แสดงให้เห็นว่าปลาที่เลี้ยงในทุกตู้ทดลองมีผิวสีเขียวใกล้เคียงกัน และมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงการทดลอง (ภาพที่ 2b) ส่วนค่า b* แสดงให้เห็นว่าปลาที่เลี้ยงในตู้สีน้ำเงินเท่านั้นที่มีผิวสีน้ำเงิน ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 2 เป็นต้นไปและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป (ภาพที่ 2c) แสดงให้เห็นว่าสีผิวของปลากระดี่นางฟ้ามีการปรับตัวตอบสนองต่อสีตู้ที่เลี้ยง



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์สีผิวของปลากะดังนางฟ้าที่เลี้ยงในตู้ที่มีสีแตกต่างกัน เป็นเวลา 8 สัปดาห์ (ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD)

หมายเหตุ ค่า L* แสดงถึงความสว่างของสี มีค่าระหว่าง 0-100 (สีดำถึงสีขาว) ค่า a* แสดงถึงค่าสีแดง (+) และสีเขียว (-) ส่วนค่า b* แสดงถึงค่าสีเหลือง (+) และสีน้ำเงิน (-)



ภาพที่ 3 สีผิวปลากะดังนางฟ้าที่เลี้ยงในตู้เลี้ยงที่สีต่างกัน: ตู้เลี้ยงชุดควบคุม (a) ตู้เลี้ยงสีแดง (b) ตู้เลี้ยงสีเหลือง (c) และตู้เลี้ยงสีน้ำเงิน (d) เปรียบเทียบกับสีผิวปลากะดังนางฟ้าที่ขายในท้องตลาด (e)

โดยภาพรวมปลากระดี่นางฟ้าที่เลี้ยงในตู้สีน้ำเงินมีสีผิวที่คล้ายคลึงกับสีผิวตามธรรมชาติและที่ขายในท้องตลาดมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ninwichian *et al.* (2018) ซึ่งรายงานว่าผิวปลาสลิดที่เลี้ยงในถังสีขาวยังมีค่าความสว่างของสีสูงที่สุด และในถังเลี้ยงสีน้ำเงินทำให้ปลาสลิดมีสีผิวคล้ายคลึงกับธรรมชาติมากที่สุด ผลการศึกษาก่อนหน้านี้ (Crook, 1997; Sugimoto *et al.*, 2005; Ninwichian *et al.*, 2018) และผลการทดลองครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสีตู้เลี้ยงเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดความเข้มหรือรูปแบบสีผิวของปลา

ปลากระดี่นางฟ้ามีสีผิวขาวซีดที่เกิดจากการเลี้ยงในตู้ชุดควบคุมอาจทำให้การตัดสินใจของผู้บริโภคและมูลค่าตลาดของปลาลดลง อย่างไรก็ตามจากการสังเกตพบว่าการที่ปลากระดี่นางฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงสีอย่างกะทันหันเมื่อปลาถูกย้ายไปใส่ในตู้เลี้ยงสีน้ำเงิน ใช้เวลาสั้นๆ ประมาณ 2-3 นาที ปลาจะมีสีผิวที่เข้มขึ้น วิธีนี้อาจแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับปลาที่มีสีซีด และทำให้ปลามีมูลค่าที่สูงขึ้นหากใช้สีตู้เลี้ยงที่เหมาะสม

สรุป

สีของตู้เลี้ยงไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของปลากระดี่นางฟ้า แต่มีผลต่ออัตราการรอดตาย โดยปลาที่เลี้ยงในตู้ชุดควบคุมมีอัตราการรอดตายสูงที่สุด ($p < 0.05$) แต่ไม่มีความแตกต่างกับปลาที่เลี้ยงในตู้สีน้ำเงิน และตู้สีแดง นอกจากนี้สีของตู้เลี้ยงยังมีผลต่อความเข้มสีผิวของปลา โดยปลาที่เลี้ยงในตู้สีเหลืองมีค่าความสว่างของผิวสูงกว่าปลาที่เลี้ยงในตู้สีอื่น และปลาที่เลี้ยงในตู้สีแดงมีความสว่างของผิวน้ำมากที่สุด ($p < 0.05$) ส่วนปลาในตู้สีน้ำเงินมีสีผิวน้ำมากที่สุด ($p < 0.05$) และปลายังสามารถงสีผิวไว้ให้ใกล้เคียงธรรมชาติมากที่สุดเมื่ออยู่ในตู้สีน้ำเงิน จึงแนะนำให้

ใช้ตู้สีน้ำเงินในการเลี้ยงปลากระดี่นางฟ้าเพื่อเพิ่มความเข้มของสีผิว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.การุณ ทองประจักษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องตรวจวัดค่าสี และคุณสุกัญญาเทียนชัย แซ่โล้ว ที่ได้แนะนำวิธีการใช้เครื่องวัดค่าสี

เอกสารอ้างอิง

- Alleman, J.E. 1998. **Free Ammonia-Nitrogen Calculator & Information.** Available Source: <http://home.eng.iastate.edu/~jea/w3-research/free-ammonia/nh3.html>, March 13, 2020.
- Boyd, C.E. and Tucker, C.S. 1992. **Water Quality and Pond Soil Analyses for Aquaculture.** Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University, Alabama.
- Crook, A.C. 1997. Colour patterns in a coral reef fish is background complexity important?. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology** 217(2): 237-252.
- El-Sayed, A. and El-Ghobashy, A. 2011. Effects of tank colour and feed colour on growth and feed utilization of thin lip mullet (*Liza ramada*) larvae. **Aquaculture Research** 42(8): 1163-1169.
- Encyclo Fish. 2018. **Blue Gourami (*Trichogaster trichopterus*).** Available Source: <https://www.encyclo-fish.com/EN/fresh-water/fishe>

- s/trichogaster-trichopterus.php, April 24, 2019.
- Eslamlou, K., Akhavan, S.R., Eslamifar, A. and Henry, M.A. 2015. Effects of background colour on growth performance, skin pigmentation, physiological condition and innate immune responses of goldfish, *Carassius auratus*. **Aquaculture Research** 46(1): 202-215.
- Kesbiç, O.S., Yiğit, M. and Acar, Ü. 2016. Effects of tank color on growth performance and nitrogen excretion of European seabass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. **Proceedings of the National Academy of Sciences** 86(1): 205-210.
- Kodric-Brown, A. 1998. Sexual dichromatism and temporary color changes in the reproduction of fishes. **American Zoologist** 38: 70-81.
- Narongpong, P. 2012. **Ichthyology**. Chulalongkorn University Press. Bangkok. (in Thai)
- Ninwichian, P., Phuwan, N., Jakpim, K. and Sae-Lim, P. 2018. Effects of tank color on the growth, stress responses, and skin color of snakeskin gourami (*Trichogaster pectoralis*). **Aquaculture International** 26: 659-672.
- Nitayaphat, W. 2015. The science of colour. **Home Economics SWU Journal** 13(1): 3-11. (in Thai)
- Nukwan, S. and Rodloy, A. 2009. **100 Species of Thai Ornamental Fish**. Aquatic Plants and Ornamental Fish Research Institute, Inland Fisheries Research and Development Bureau, Department of Fisheries, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)
- Okomoda, V.T., Tiamiyu, L.O. and Wase, G. 2017. Effects of tank background colour on growth performance and feed utilization of African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) fingerlings. **Croatian Journal of Fisheries** 75: 5-11.
- Ornamental Aquatic Trade Association (OATA). 2008. **Water Quality Criteria**. Available Source: <https://ornamentalfish.org/wp-content/uploads/2012/08/Water-Quality-Criteria.pdf>, November 8, 2019.
- Sermwatanakul, A. and Bumrunghum, B. 2000. **Ornamental Fish Feed**. Ornamental Fish Research Institute and Aquarium, Department of Fisheries, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)
- Sharpe, S. 2019. **Blue Gourami**. Available Source: <https://www.thesprucepets.com/blue-gourami-1381023>, April 24, 2019.
- Solomon, J.R. and Ezigbo, M.N. 2018. Effects of background tank colour on the growth and survival of juvenile *Heterobranchus bidorsalis* fed with coppens commercial floating pellets and *Cyperus esculentus* meal. **Journal of Public Health and Environmental Technology** 3(1): 17-33.
- Sugimoto, M., Yuki, M., Miyakoshi, T. and Maruko, K. 2005. The influence of long-term chromatic adaptation on pigment cells and striped pigment patterns in the skin of the zebrafish, *Danio rerio*. **Journal of Experimental Zoology Part A Comparative Experimental Biology** 303(6): 430-440.

- Ullmann, J., Gallagher, T., Hart, N., Barnes, A., Smullen, R., Collin, S. and Temple, S. 2011. Tank color increases growth, and alters color preference and spectral sensitivity, in barramundi (*Lates calcarifer*). **Aquaculture** 322-323: 235-240.
- Ustundag, M. and Rad, F. 2015. Effect of different tank colors on growth performance of rainbow trout juvenile (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum, 1792). **Journal of Agricultural Sciences** 21: 144-151.
- Wang, C.A., Li, J.N., Wang, L.S., Zhao, Z.G., Luo, L., Du, X., Yin, J.S. and Xu, Q.Y. 2016. Effects of tank colour on feeding, growth and stress responses of young taimen *Hucho taimen* (Pallas, 1773). **Journal of Applied Ichthyology** 32: 339-342.

ประสิทธิภาพของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในการบำบัดน้ำเสีย จากอาคารที่พักอาศัย

Efficiency of Palm Oil Mill Fly Ash for Residential Building Wastewater Treatment

นฤมล ทองมาก^{1*}, ชันวานี จิใจ¹, วารุณี หะยิมะสาและ¹, ไชนะ มูเล็ง¹ และ พรทิพย์ ศรีแดง²

Narumol Thongmak^{1*}, Sunwanee Jijai¹, Warunee Hajimasalae¹, Saina Muleng¹ and Porntip Sridang²

Received: 13 March 2020, Revised: 21 May 2020, Accepted: 2 June 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในการบำบัดน้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา pH ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสม รวมทั้งประสิทธิภาพการกำจัด โดยทำการทดลองแบบแบตช์ (batch test) ผลการทดลองพบว่า ค่า pH ที่เหมาะสมคือ 6 มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ประมาณ $60.00 \pm 8.94\%$ ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลองคือ 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ประมาณ $62.96 \pm 9.07\%$ สำหรับปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่า ปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ 2 g ต่อน้ำเสีย 100 mL มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงที่สุดคือ $84.62 \pm 9.73\%$ สำหรับปริมาณความขุ่นพบว่าแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และจากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ พบว่า การดูดซับ COD ด้วยเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

คำสำคัญ: เถ้าลอย, น้ำเสีย, การดูดซับ, ไอโซเทอร์ม

¹ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ตำบลสะเตง อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000

¹ Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Sateng, Muang, Yala 95000, Thailand.

² ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ตำบลสนามจันทร์ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

² Department of Environmental Science, Faculty of Science, Silpakorn University, Sanamchandra, Muang, Nakhon Pathom, 73000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): narumol.t@yru.ac.th

ABSTRACT

This research investigated the efficiency of palm oil mill fly ash for residential building wastewater treatment. The objective was to study the effects of pH value, contact time and optimum dosage of palm oil mill fly ash, including removal efficiency. The experiments were carried out in the batch test. Results showed that the optimum pH value was 6 with COD removal efficiency of $60.00 \pm 8.94\%$. The optimum contact time was 60 minutes with COD removal efficiency of $62.96 \pm 9.07\%$. The influence of palm oil mill fly ash dosage on adsorption efficiency was 2 g of palm oil mill fly ash per 100 mL of wastewater, allowing the highest COD removal efficiency of $84.62 \pm 9.73\%$. The turbidity was varied according to palm oil mill fly ash dosage. The study of adsorption isotherm revealed that COD adsorption with palm oil mill fly ash corresponded to Langmuir isotherm.

Key words: fly ash, wastewater, adsorption, isotherm

บทนำ

กิจกรรมของมนุษย์เป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการปนเปื้อนของมลสารต่างๆ จนส่งผลกระทบต่อความสมดุลของระบบนิเวศในแหล่งน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงเสื่อมคุณภาพลงเกิดความน่าเสียของแหล่งน้ำ และมีแนวโน้มทวีความรุนแรง รวมทั้งขยายพื้นที่ขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการขาดการจัดการน้ำเสียที่เหมาะสมและการควบคุมมลพิษทางน้ำที่มีประสิทธิภาพ (Pollution control department, 2018a) ซึ่งโดยทั่วไปหากปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณไม่มากเมื่อระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ แหล่งน้ำจะสามารถฟื้นตัวหรือฟอกตัวตามธรรมชาติ (self-purification) ได้ แต่เมื่อน้ำเสียมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของชุมชนและการพัฒนาอุตสาหกรรมจนถึงจุดที่ธรรมชาติไม่สามารถฟื้นตัวหรือฟอกตัวตามธรรมชาติได้ทัน แหล่งน้ำจึงเกิดการเน่าเสียและเสื่อมโทรม จนส่งผลกระทบต่อการใช้งานประโยชน์ (Department of Industrial Works, 2011) น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์

จากบ้านเรือนที่พักอาศัยมีความแตกต่างกันขึ้นกับกิจกรรมการใช้น้ำ ซึ่งส่วนใหญ่ลักษณะน้ำเสียชุมชนที่เกิดขึ้นนั้นมักปนเปื้อนสิ่งสกปรกจำพวกสารอินทรีย์ที่สามารถเกิดการเน่าเหม็นได้ง่าย (Department of Environmental Quality Promotion, 2005) โดยมีค่า BOD_5 (biochemical oxygen demand) และ COD (chemical oxygen demand) ประมาณ 110-400 mg/L และ 190-700 mg/L ตามลำดับ (Udomsinrot, 2007)

ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียชุมชนที่เกิดขึ้นให้มีคุณภาพที่ดีก่อนระบายออกสู่ท่อระบายน้ำสาธารณะจึงเป็นสิ่งสำคัญ การดูดซับเป็นหนึ่งในกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีที่อาศัยตัวดูดซับในการดูดซับหรือแยกสารปนเปื้อนในน้ำเสีย ซึ่งเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ตลอดจนสีและกลิ่นออกจากน้ำเสีย (Sirianuntapiboon, 2006) ปัจจุบันมีการทดลองใช้วัสดุดูดซับหรือตัวดูดซับ (adsorbent) ชนิดต่างๆ รวมถึงวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหลายชนิดในการบำบัดน้ำเสีย เช่น ถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วพีแคน (Bansode *et al.*, 2004) ถั่วลอยถ่านหิน (Lakdawala and Lakdawala, 2012) และถั่วลอยขาน

อ้อย (Chingono *et al.*, 2018) เป็นต้น เนื่องจาก้วยเถา ลอยมีศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับเพื่อดูดซับมลสารต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสีย เช่น เถาแกลบมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียสูงถึง 89% (Mor *et al.*, 2016) และเถาลอยขานอ้อยมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงถึง 72% ในการบำบัดน้ำกากส่าที่เกิดขึ้นจากการผลิตเอทานอล (Chingono *et al.*, 2018) จากงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่าเถาลอยมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีในด้านของพื้นที่ผิว การกระจายตัวของขนาดอนุภาค และความพรุน อีกทั้งเป็นวัสดุดูดซับที่มีต้นทุนต่ำ เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้ง (Visa *et al.*, 2012)

ด้วยปาล์มน้ำมันเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจของไทยที่มีการปลูกกันมากโดยเฉพาะพื้นที่ภาคใต้ของประเทศ จากข้อมูลการผลิตปาล์มน้ำมันในปี พ.ศ. 2562 พบว่า ประเทศไทยมีผลผลิตรวมทั้งประเทศเท่ากับ 16.80 ล้านตัน (Office of Agricultural Economics, 2020) โดยผลผลิตประมาณ 1 ตัน มีกากของผลปาล์มน้ำมัน (ทะลายปาล์มเปล่า เส้นใยปาล์ม และเศษกะลา) เกิดขึ้นประมาณ 0.52 ตัน โดยทั่วไปมักนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ ซึ่งหลังจากการเผาไหม้กากของผลปาล์มน้ำมันประมาณ 1 ตัน จะมีเถ้าเกิดขึ้นประมาณ 0.05 ตัน โดยเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้มีการนำไปใช้ประโยชน์ไม่กว้างขวางมากนักเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้น (Jaturapitakkul, 2012; Tunsathien, 2013) ด้วยเหตุนี้เถาลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจึงเป็นเถาลอยทางเลือกสำหรับใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัย ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การทดสอบหาค่า pH ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณของเถาลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เหมาะสมในการดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับมลสารหรือสิ่งสกปรกในน้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัยก่อน

ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เนื่องจากการนำเถาลอยจากแต่ละแหล่งมาใช้เป็นตัวดูดซับนั้นยังมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. อุปกรณ์

1) อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์หาสารประกอบออกไซด์ใช้เครื่อง X-ray fluorescence spectrometer (XRF) ยี่ห้อ PANalytical รุ่น ZETIUM (วิธีการทดสอบอ้างอิง WI-RES-XRF Zetium-001 เทคนิคการทดสอบ X-ray fluorescence spectrometry) สันฐานและลักษณะพื้นผิวใช้เครื่อง Field emission scanning electron microscope (SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Apreo (เทคนิคการทดสอบ Electron Micrograph) พื้นผิว-รูพรุนใช้เครื่อง Surface area and porosity analyzer (BET) ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP2060 (วิธีการทดสอบอ้างอิง WI-RES-BET 6P-001 เทคนิคการทดสอบ Static volumetric N₂ gas adsorption method) และขนาดอนุภาคใช้เครื่อง Laser particle size analyzer (LPSA) ยี่ห้อ FRITSCH รุ่น ANALYSETTE 22 NanoTec (วิธีการทดสอบอ้างอิง WI-RES-LPSA2-001 เทคนิคการทดสอบ Laser light scatter particle size analyzer)

2) อุปกรณ์ในการทดลองใช้เครื่องจาร์เทสต์ (jar test) ยี่ห้อ M-LAB รุ่น JR6D เตาให้ความร้อน (COD reactor) ยี่ห้อ M-LAB รุ่น DB-1602 เครื่องวัดความขุ่น ยี่ห้อ HACH รุ่น TL3200c และ pH meter ยี่ห้อ Sartorius รุ่น Docu-pH+

2. วิธีการทดลอง

การศึกษาเป็นการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) ในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาค่า pH ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณเถาลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำ

เสียจากอาคารที่พักอาศัย โดยมีวิธีการดำเนินการวิจัย ดังนี้

1) เก็บตัวอย่างเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มจาก บริษัท ปาล์มพัฒนาชายแดนใต้ จำกัด อำเภอหนองจิก จังหวัดปัตตานี ให้เพียงพอสำหรับการใช้ตลอดการทดลอง และดำเนินการเตรียมตัวอย่างเถ้าลอยก่อนใช้งานโดยล้างด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 g ของเถ้าลอย ต่อ 10 mL ของน้ำกลั่น และกวนผสมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที จากนั้นทำการกรองและอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105-115 °C (Visa *et al.*, 2015)

2) วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ได้แก่ สารประกอบออกไซด์ สัณฐานและลักษณะพื้นผิว พื้นที่ผิว-รูพรุน และขนาดอนุภาค

3) เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อพักน้ำเสียบริเวณหอชาย 5 ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จำนวน 3 รอบตามสถานะการทดลองที่ทดสอบ และวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียผ่านพารามิเตอร์ซ้ำ 3 ครั้ง ได้แก่ พีเอช (pH) ความขุ่น (turbidity) บีโอดี (biochemical oxygen demand: BOD₅) และซีโอดี (chemical oxygen demand: COD) ดังตารางที่ 1

4) ศึกษาสถานะที่มีผลต่อการดูดซับซ้ำ 2 ครั้ง ได้แก่ ค่า pH ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัย ดังนี้

4.1) ทดสอบผลของ pH โดยในการทดลองกำหนดปริมาณของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในปริมาณ 1 g ของเถ้าลอย ต่อ น้ำเสีย 100 mL และปรับค่า pH เป็น 5 6 7 และ 8 ด้วยกรดซัลฟิวริก หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที และใช้ระยะเวลาในการตกตะกอน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ดังตารางที่ 1

4.2) ทดสอบผลของระยะเวลาสัมผัส โดยในการทดลองกำหนดปริมาณของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในปริมาณ 1 g ของเถ้าลอย ต่อ น้ำเสีย 100 mL และปรับค่า pH ตามค่าที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนที่ 4.1) แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน คือ 30 60 120 180 และ 240 นาที และใช้ระยะเวลาในการตกตะกอน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ดังตารางที่ 1

4.3) ทดสอบปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อการดูดซับ โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยในปริมาณที่ต่างกัน คือ 0.3 0.5 1 และ 2 g ต่อ น้ำเสีย 100 mL และปรับค่า pH ตามค่าที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนที่ 4.1) แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลองในขั้นตอนที่ 4.2) และใช้ระยะเวลาในการตกตะกอน 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

Parameter	Method	Influent	Effluent
pH	Electrometric	✓	✓
Turbidity	Nephelometric	✓	✓
BOD ₅	Azide Modification	✓	-
COD	Closed Reflux	✓	✓

5) ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) ในการดูดซับ COD ด้วยเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ และสมการการดูดซับของแลงเมียร์

สามารถแสดงในรูปของปัจจัยการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter, R_L) ได้ดังสมการที่ (3) เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) (Srikun, 2007; Sun *et al.*, 2010; Chansuvarn, 2016)

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \left(\frac{1}{K_L q_m} \right) \frac{1}{C_e} \quad (1)$$

โดย q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของวัสดุดูดซับหรือค่าการดูดซับที่สมดุล (mg/g)

q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุดที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (mg/g)

K_L คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (L/mg)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/L)

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (2)$$

โดย q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของวัสดุดูดซับหรือค่าการดูดซับที่สมดุล (mg/g)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/L)

K_F คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (3)$$

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

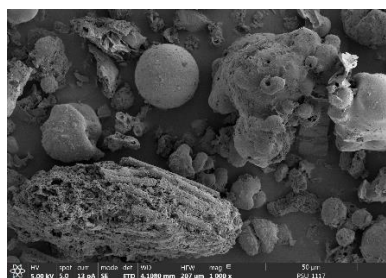
1. คุณสมบัติของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ภาพที่ 1 แสดงลักษณะของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลอง โดยเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีลักษณะเป็นผงฝุ่นสีดำ น้ำหนักเบา มีหลายลักษณะรูปทรง เช่น กลมมน

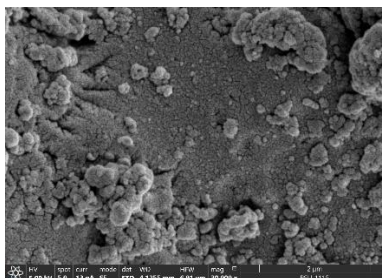
ท่อน และรูปทรงไม่แน่นอน กระจายปะปนกัน (ภาพที่ 2 (ก)) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย $53.50\ \mu\text{m}$ มีพื้นที่ผิวขรุขระ มีรูพรุน และบางส่วนเชื่อมต่อนี้อยู่กันเป็นโพรง (ภาพที่ 2 (ข) และ (ค)) มีพื้นที่ผิว $72.05\ \text{m}^2/\text{g}$ มีรูพรุน $0.0025\ \mu\text{m}$ ทั้งนี้พบเถ้าลอยขนาดเล็กกว่า $1\ \mu\text{m}$ เรียงตัวปะปนบนเถ้าลอยขนาดใหญ่กว่า



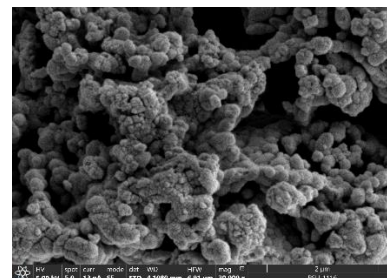
ภาพที่ 1 เถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม



(ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า



(ข) กำลังขยาย 30,000 เท่า



(ค) กำลังขยาย 30,000 เท่า

ภาพที่ 2 ลักษณะและลักษณะพื้นผิวของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่พบมากที่สุด ได้แก่ SiO_2 , CaO , K_2O , P_2O_5 และ MgO ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 และเมื่อพิจารณาสัดส่วนของออกไซด์ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

พบว่ามีความเท่ากับ 70.67 ซึ่งแสดงว่าเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีคุณสมบัติในการดูดซับที่ดี เนื่องจากมีสัดส่วนของออกไซด์ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ มากกว่า 2.40 (Visa *et al.*, 2012)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีที่ละลายจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

Compound	Concentration (%)
F	0.176
Na ₂ O	0.087
MgO	3.649
Al ₂ O ₃	0.421
SiO ₂	29.754
P ₂ O ₅	4.405
SO ₃	0.811
Cl	0.425
K ₂ O	4.747
CaO	8.951
TiO ₂	0.043
MnO	0.111
Fe ₂ O ₃	0.750
CuO	0.066
ZnO	0.025
Rb ₂ O	0.035
SrO	0.033

2. ลักษณะของน้ำเสีย

ลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัยภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา มีค่า pH ความขุ่น และซีโอดี สรุปไว้ในตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัยบริเวณหอชาย 5 ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา พบว่ามีค่า pH ความขุ่น BOD₅ และ COD เท่ากับ 7.16±0.27 40.63±12.18 NTU 58.25±22.60 mg/L และ 188.24±68.61 mg/L ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์

BOD₅ และ COD ซึ่งให้น้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัยบริเวณหอชาย 5 ภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลาจัดอยู่ในประเภทของลักษณะน้ำเสียชุมชนที่มีความเข้มข้นน้อย (Pollution control department, 2018b) ซึ่งลักษณะน้ำเสียชุมชนที่เกิดขึ้นนั้นมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับกิจกรรมในการใช้น้ำที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งมาจากการอุปโภคบริโภค การชำระล้างร่างกาย การขับถ่าย การซักล้าง ตลอดจนการประกอบอาหาร

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสีย

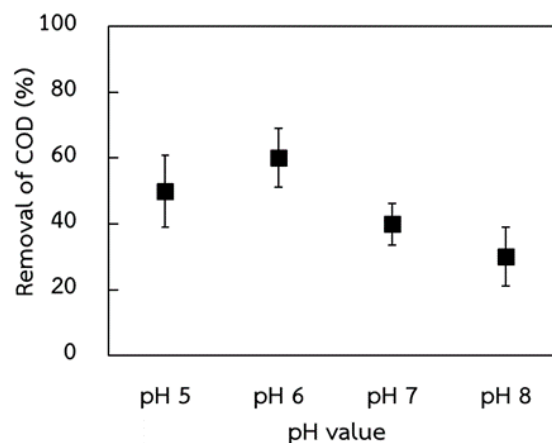
Parameter	Average $\pm$ SD	Range
pH	7.16 $\pm$ 0.27	0.53
Turbidity (NTU)	40.63 $\pm$ 12.18	27.30
BOD ₅ (mg/L)	58.25 $\pm$ 22.60	54.00
COD (mg/L)	188.24 $\pm$ 68.61	171.45

3. ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

3.1 ผลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับ

จากการศึกษาผลของค่า pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เมื่อปรับค่า pH ที่ค่าต่างๆ กัน คือ 5 6 7 และ 8 โดยใช้ปริมาณแกลลยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม 1 g ต่อน้ำเสีย 100 mL ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที และตั้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่า แกลลยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ประมาณ 50.00 $\pm$ 10.95% 60.00 $\pm$ 8.94% 40.00 $\pm$ 6.32% และ 30.00 $\pm$ 8.94% ตามลำดับ เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า pH ของสารละลายมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูด

ซับ คือ การกำจัด COD เพิ่มขึ้น เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึง 6 จากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัด COD ลดลง เมื่อค่า pH ของน้ำเสียเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 3 ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ค่อยๆ ลดลงจาก 60.00 $\pm$ 8.94% จนกระทั่ง 30.00 $\pm$ 8.94% เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 6 เป็น 8 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kulkarni *et al.* (2011) ที่พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD เพิ่มขึ้นตามค่า pH ที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่า pH 6 และหลังจากนั้นประสิทธิภาพลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า pH ทั้งนี้อาจเกิดจากที่ค่า pH ต่ำ ประจุบวกถูกสร้างขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ และทำให้เกิดการดึงดูดไฟฟ้าสถิตสูงระหว่างพื้นผิวประจุบวกของวัสดุดูดซับและสารประกอบอินทรีย์ (Nayl *et al.*, 2017)



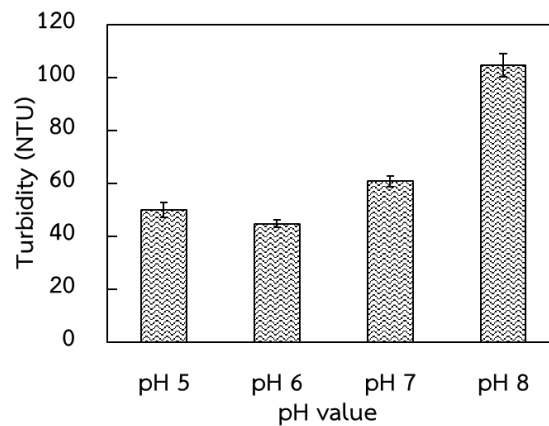
ภาพที่ 3 อิทธิพลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD

เมื่อพิจารณาค่าความขุ่นที่เหลืออยู่ในน้ำ ตัวอย่างเมื่อตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4

พบว่า ที่ค่า pH 5 และ 6 มีค่าความขุ่นเท่ากับ 49.93 $\pm$ 2.72 และ 44.67 $\pm$ 1.37 NTU โดยความขุ่นที่

เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่างทั้งนี้ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจาก
 ถั่วลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่แขวนลอยค้าง
 อยู่ซึ่งไม่สามารถตกตะกอนได้ภายใน 1 ชั่วโมง
 เนื่องจากการทดลองใช้ถั่วลอยจากโรงงานสกัด

น้ำมันปาล์มขนาดรวม (ไม่ได้มีการคัดแยกขนาดของ
 ถั่วลอย) แต่เมื่อวางทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า
 ค่าความขุ่นในน้ำตัวอย่างลดลงเหลือประมาณ
 4.96 ± 0.17 และ 4.84 ± 0.02 NTU



ภาพที่ 4 ปริมาณความขุ่นที่ระดับ pH แตกต่างกัน

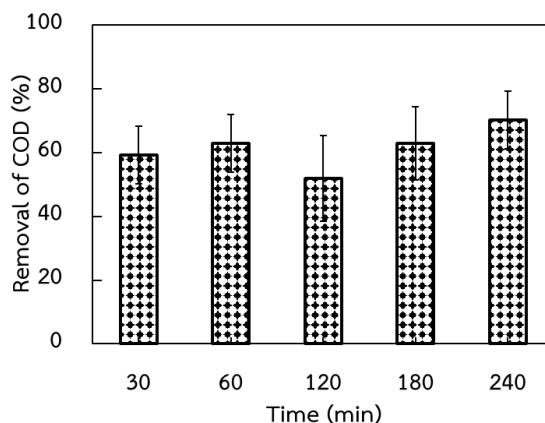
จากผลการทดลองอิทธิพลของค่า pH ต่อ
 ประสิทธิภาพการดูดซับ เมื่อทำการทดลองปรับค่า
 pH ที่ค่าต่าง ๆ กัน คือ 5 6 7 และ 8 ดังข้างต้น พบว่า
 ที่ค่า pH 6 เป็นค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ
 เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ที่สูง
 และไม่มีปัญหาความเป็นกรดของน้ำที่ผ่านการ
 ปรับปรุงคุณภาพ ดังนั้นจึงเลือกค่า pH 6 เพื่อนำไปใช้
 ในการทดลองถัดไป

3.2 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดซับ

การทดสอบผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อ
 ประสิทธิภาพการดูดซับ เมื่อดำเนินการทดลองที่
 ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน คือ 30 60 120 180 และ 240
 นาที ที่ปริมาณถั่วลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม 1 g
 ค่อน้ำเสีย 100 mL ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที และ
 ปรับค่า pH เท่ากับ 6 (ผลที่ได้จากหัวข้อ 3.1) และใช้
 ระยะเวลาในการตกตะกอน 1 ชั่วโมง

ผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการ
 กำจัด COD ดังภาพที่ 5 มีค่าประมาณ $62.96 \pm 9.07\%$
 ในช่วง 60 นาทีแรก และประสิทธิภาพในการกำจัด

COD มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อระยะเวลาสัมผัส
 เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในช่วงแรกของการดูด
 ซับพื้นผิวของวัสดุดูดซับยังคงมีที่ว่างมาก แม้ว่า
 ประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาสัมผัส
 เพิ่มขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มคงที่
 และเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาดูดซับผ่านไปช่วงเวลา
 หนึ่ง (Hawari *et al.*, 2009) และพบว่าที่ระยะเวลา
 สัมผัสที่ 120 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัด COD
 ลดต่ำลง เนื่องจากกลไกการดูดซับอาจเกิดลักษณะ
 ผันกลับได้ (การดูดซับทางกายภาพ) ในบางพื้นที่บน
 ผิวถั่วลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และเมื่อ
 พิจารณาผลของระยะเวลาสัมผัสต่อค่าความขุ่น
 พบว่าอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสไม่ส่งผลต่อค่า
 ความขุ่น โดยค่าความขุ่นที่ระยะเวลาสัมผัสแตกต่าง
 กันมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 26 ถึง 36 NTU ซึ่งเป็นค่า
 ใกล้เคียงกับค่าความขุ่นของน้ำเสียเริ่มต้น ดังนั้น
 ระยะเวลาสัมผัสที่นำไปใช้ในการทดลองถัดไปจึง
 เลือกใช้ระยะเวลาสัมผัส เท่ากับ 60 นาที

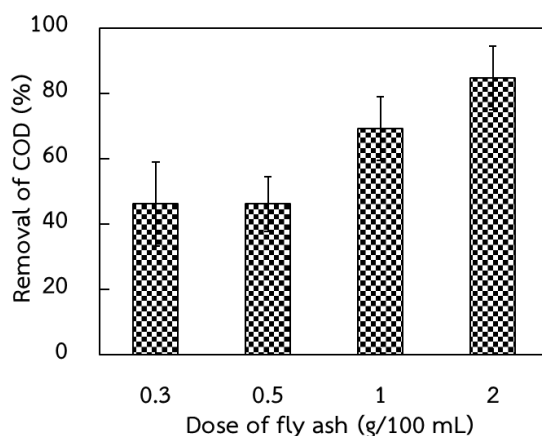


ภาพที่ 5 อิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD

3.3 ผลของปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อการดูดซับ

จากการทดสอบอิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ทดลองที่ปริมาณของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เท่ากับ 0.3 0.5 1 และ 2 g ต่อน้ำเสีย 100 mL และปรับค่า pH เท่ากับ 6 ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที (ผลที่ได้จากหัวข้อ 3.1 และ 3.2) และใช้ระยะเวลาในการตกตะกอน 1 ชั่วโมง

ผลการทดลองจากการใช้เถ้าลอยที่มีสัดส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ สูงกว่า เถ้าลอยขานอ้อย และเถ้าลอยแกลบ (ตารางที่ 4) มีพื้นผิวขรุขระ มีรูพรุน ($0.0025 \mu\text{m}$) มีบางส่วนเชื่อมต่อนั่นกันเป็นโพรง และมีเถ้าลอยขนาดเล็กกว่า $1 \mu\text{m}$ เรียงตัวปะปนบนเถ้าลอยขนาดใหญ่กว่า (อนุภาคเฉลี่ย $53.50 \mu\text{m}$) ส่งผลต่อการดูดซับสารอินทรีย์ในรูป COD โดยพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD (ภาพที่ 6) เพิ่มขึ้นจาก $46.15 \pm 12.87\%$ เป็น $84.62 \pm 9.73\%$ เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นจาก 0.3 เป็น 2 g ต่อน้ำเสีย 100 mL



ภาพที่ 6 ผลของปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ศึกษาวัสดุดูดซับประเภทต่างๆ (ตารางที่ 4)

พบว่า เถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าลอยขานอ้อย

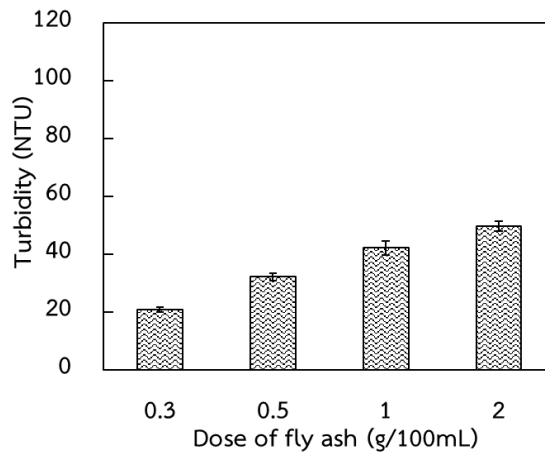
และเถ้าลอยแกลบ เป็นต้น ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัด COD เพิ่มขึ้นตามพื้นที่ผิว (surface Area) และจำนวนตำแหน่งของการดูดซับ (Adsorption Sites) ที่เพิ่มขึ้น (Chingono *et al.*, 2018) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohan and Gandhimathi (2009) ที่ศึกษาการกำจัดไออนอนโลหะหนักออกจากน้ำชะขยะชุมชนโดยใช้เถ้าลอยถ่านหินเป็นตัวดูดซับ และพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยถ่านหินเพิ่มขึ้นจาก 0.5 g/L เป็น 2 g/L

การประยุกต์ใช้เถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเพื่อการบำบัดน้ำเสียจากอาคารที่พัก

อาศัยจากงานวิจัยนี้ พบว่า เถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีศักยภาพเป็นตัวดูดซับและกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD ดังนั้นจึงเป็นวัสดุดูดซับที่มีต้นทุนต่ำ ซึ่งที่ผ่านเถ้าลอยเกิดขึ้นประมาณ 436,800-578,998 ตันต่อปี มักถูกทิ้งในพื้นที่โรงงาน หรือใช้ถมที่ และมีการศึกษาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุผสมในการผลิตคอนกรีตปูพื้นทางเท้า รวมถึงศึกษาใช้เป็นวัสดุสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ ตามลำดับ (Jaturapitakkul, 2012; Piyang *et al.*, 2018; Waijarean and Asavapisit, 2019)

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการดูดซับและคุณสมบัติของเถ้าลอย

Type	Physical and chemical characteristics	Removal efficiency	References
palm oil mill fly ash (เถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม)	70.67 of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 72.05 m^2/g of surface area 0.0025 μm of pore size 53.5 μm of average particle size	84.62% of COD	This study
coal fly ash (เถ้าลอยถ่านหิน)	<20 μm of particle size >63-90 μm of particle size	99.00% of uranium 95.80% of uranium	Police <i>et al.</i> , 2020
bagasse fly ash (เถ้าลอยขานอ้อย)	2.75 of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 90-125 μm of particle sizes	72.00% of COD	Chingono <i>et al.</i> , 2018
palm oil fuel ash (เถ้ากากปาล์มน้ำมัน)	90-100 μm of particle sizes	99.60% of Hg(II) ion	Syafiqah and Yussof, 2018
activated rice husk ash (เถ้าแกลบที่ผ่านการกระตุ้น)	14.68 of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ <710 μm of particle size	89% of phosphate	Mor <i>et al.</i> , 2016



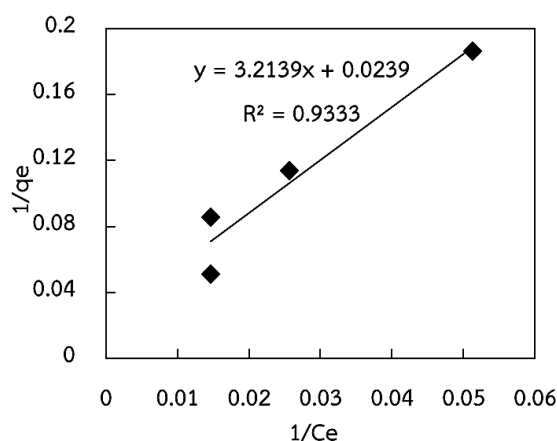
ภาพที่ 7 ค่าความขุ่นที่ปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแตกต่างกัน ที่ระยะเวลาดกตะกอน 1 ชั่วโมง

สำหรับค่าความขุ่นที่พบเมื่อใช้ปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่า ค่าความขุ่นที่เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่างหลังจากตั้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอยดังภาพที่ 7 ซึ่งหากมีการใช้ปริมาณเถ้าลอยในการดูดซับมาก ก็จะมีส่วนของเถ้าลอยแขวนลอยค้างอยู่เพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีบางส่วนของเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ไม่สามารถตกตะกอนได้ภายในเวลา 1 ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตามจากข้อมูลผลการทดลองในหัวข้อ 3.1 พบว่า เมื่อมี

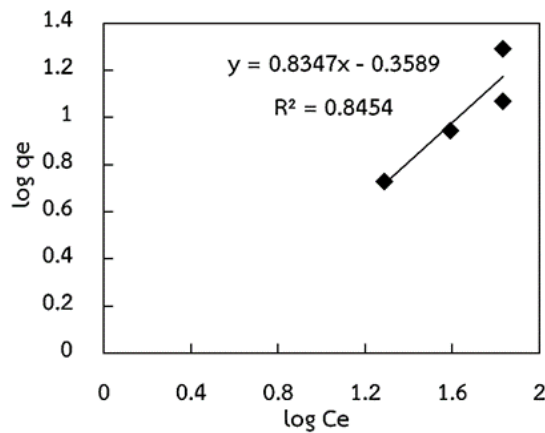
การเพิ่มระยะเวลาดกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม 1 g) ค่าความขุ่นในน้ำตัวอย่างสามารถลดลงได้มากกว่า 85 %

3.4 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

จากข้อมูลการทดลองผลของปริมาณเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มต่อการกำจัด COD มาพิจารณาความสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และ ฟรุนดิช (Freundlich isotherm) (Al-Zboon *et al.*, 2011) (ภาพที่ 8 และ 9)



ภาพที่ 8 ไอโซเทอร์มการดูดซับ COD ด้วยเถ้าลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้สมการการดูดซับของแลงเมียร์



ภาพที่ 9 ไอโซเทอร์มการดูดซับ COD ด้วยถ่านลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้สมการการดูดซับของฟรุนดิช

ผลการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ภาพที่ 8) และฟรุนดิช (ภาพที่ 9) มีค่าเท่ากับ 0.9333 และ 0.8454 ตามลำดับ ซึ่งจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) นี้ให้เห็นว่าข้อมูลจากการทดลองสอดคล้องและสัมพันธ์กับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ได้ดีกว่าแบบฟรุนดิช โดยมีค่า q_m (ปริมาณของสารถูกดูดซับมากที่สุดที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว) เท่ากับ 41.84 mg/g มีค่า K_L (ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ) เท่ากับ 0.007 L/mg และมีค่า R_L (ปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สถานะสมดุล) เท่ากับ 0.51 ซึ่งหมายถึงมีการดูดซับที่ดี คือ มีค่า R_L อยู่ในช่วง $0 < R_L < 1$ (Pandey *et al.*, 2010) รูปแบบการดูดซับแบบแลงเมียร์นั้นการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว โมเลกุลจะถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ โดยมีโมเลกุลเดียวไม่เกิดการซ้อนทับกันในแต่ละตำแหน่งบนพื้นผิวตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียว และมีจำนวนที่แน่นอนของพื้นผิวบนตัวดูดซับ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับกลไกการดูดซับทางเคมี (Tungkananuruk and Tungkananuruk, 2012; Painmanakul, 2014)

สรุป

จากผลศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยทดสอบค่า pH ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณถ่านลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอาคารที่พักอาศัย ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และควบคุมความเร็วรอบในการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ผลการศึกษาดังกล่าวของ pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า pH ที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่า pH 6 และหลังจากนั้นประสิทธิภาพลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่า pH ซึ่งค่า pH ที่เหมาะสมจากการทดลอง คือ 6 เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงที่สุด คือ ประมาณ $60.00 \pm 8.94\%$ และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด COD มีค่าประมาณ $62.96 \pm 9.07\%$ ในช่วง 60 นาทีแรก และประสิทธิภาพในการกำจัด COD มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาสัมผัสแตกต่างกันไม่ส่งผลต่อค่าความขุ่น ดังนั้นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจากการทดลอง คือ 60 นาที สำหรับผลของปริมาณถ่านลอยจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD

เพิ่มขึ้นตามปริมาณแกลบที่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณแกลบจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ 2 g ต่อน้ำเสีย 100 mL มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงที่สุด คือ $84.62 \pm 9.73\%$ และพบว่า ปริมาณความขุ่นแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณแกลบจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และจากการศึกษาไอโซเทอร์ม พบว่าการดูดซับ COD ด้วยแกลบจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยมีค่า R^2 ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ เท่ากับ 0.9333 ค่า q_m เท่ากับ 41.84 mg/g มีค่า K_L เท่ากับ 0.007 L/mg และมีค่า R_L เท่ากับ 0.51 โดยค่า R_L อยู่ในช่วง $0 < R_L < 1$ ซึ่งถือได้ว่าแกลบจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีความสามารถในการดูดซับที่ดี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนวิจัยจากงบประมาณประจำปีงบประมาณ 2562 บริษัท ปาล์มพัฒนาชายแดนใต้ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แกลบ และขอขอบคุณคณะผู้ร่วมวิจัย และทุกท่านที่สนับสนุนการทำวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Al-Zboon, K., Al-Harashsheh, M.S. and Hani, F.B. 2011. Fly ash-based geopolymer for Pb removal from aqueous solution. **Journal of Hazardous Materials** 188(1-3): 414-421.
- Bansode, R.R., Losso, J.N., Marshall, W.E., Rao, R.M. and Portier, R.J. 2004. Pecan shell-based granular activated carbon for treatment of chemical oxygen demand (COD) in municipal wastewater. **Bioresource Technology** 94: 129-135.
- Chansuvarn, W. 2016. **Research Report no Modification of adsorbent surface for removal of lead(II) ion from aqueous solution.** Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. (in Thai)
- Chingono, K.E., Sanganyado, E., Bere, E. and Yalala B. 2018. Adsorption of sugarcane vinasse effluent on bagasse fly ash: A parametric and kinetic study. **Journal of Environmental Management** 224: 182-190.
- Department of Environmental Quality Promotion. 2005. **Guidebook for Community Wastewater Management.** 4th ed. Thammasat Printing house, Bangkok. (in Thai)
- Department of Industrial Works. 2011. **Water Pollution Treatment Systems Textbook.** 7th ed. Department of Industrial Works, Ministry of industry, Bangkok. (in Thai)
- Hawari, A., Rawajfih, Z. and Nsour, N. 2009. Equilibrium and thermodynamic analysis of zinc ions adsorption by olive oil mill solid residues. **Journal of Hazardous Materials** 168: 1284-1289.
- Jaturapitakkul, C. 2012. Biomass ash from industrial: Problems, limitations and utilization. **Concrete Journal** 17: 1-10. (in Thai)
- Kulkarni, S.J., Patil, S.V. and Bhalerao, Y.P. 2011. Fly ash adsorption studies for organic matter removal accompanying increase in

- dissolved oxygen. **International Journal of Chemical Engineering and Applications** 2(6): 434-438.
- Lakdawala, M.M. and Lakdawala, J.M. 2012. Adsorption study of BOD content from sugar industry wastewater by low cost material fly ash. **Der Chemica Sinica** 3(2): 497-502.
- Mohan, S. and Gandhimathi, R. 2009. Removal of heavy metal ions from municipal solid waste leachate using coal fly ash as an adsorbent. **Journal of Hazardous Materials** 169: 351-359.
- Mor, S., Chhoden, K. and Ravindra, K. 2016. Application of agro-waste rice husk ash for the removal of phosphate from the wastewater. **Journal of Cleaner Production** 129: 673-680.
- Nayl, A.E.A., Elkhatab, R.A., Malah, T.E., Yakout, S.M., El-Khateeb, M.A., Ali, M.M.S. and Ali, H.M. 2017. Adsorption studies on the removal of COD and BOD from treated sewage using activated carbon prepared from date palm waste. **Environmental Science and Pollution Research** 24: 22284-22293.
- Office of Agricultural Economics. 2020. **Palm Oil**. Available Source: <http://mis-app.oae.go.th/product/ปาล์มน้ำมัน>, May 5, 2020. (in Thai)
- Painmanakul, P. 2014. **Unit Processes for Environmental Engineering**. 1st ed. Chulalongkorn University Press, Bangkok. (in Thai)
- Pandey, P.K., Sharma, S.K. and Sambi, S.S. 2010. Kinetics and equilibrium study of chromium adsorption on zeoliteNaX. **International Journal of Environmental Science and Technology** 7(2): 395-404.
- Piyang, T., Sagulsawasdiapan, K. and Sawain, A. 2018. A study of palm oil fuel ash in manufacturing in production footpaths concrete slabs. **Wichcha Journal** 37(1): 81-94. (in Thai)
- Police, S., Maity, S., Chaudhary, D.K., Dusane, C.K., Sahu, S.K. and Kumar, A.V. 2020. Effect of coal fly ash's particle size on U adsorption in water samples and thermodynamic study on adsorption. **Environmental Chemistry and Ecotoxicology** 2: 32-38.
- Pollution control department. 2018a. **Water Pollution**. Available Source: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_polwater.html, September 25, 2018. (in Thai)
- Pollution control department. 2018b. **Domestic Wastewater**. Available Source: http://www.pcd.go.th/info_serv/water_wt.html, September 29, 2018. (in Thai)
- Sun, D., Zhang, X., Wu, Y. and Liu, X. 2010. Adsorption of anionic dyes from aqueous solution on fly ash. **Journal of Hazardous Materials** 181: 335-342.
- Srikun, S. 2007. The Study of adsorption of dye and lead ion with activated carbon prepared from durian peels. Master Thesis of Engineering in Chemical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. (in Thai)

- Sirianuntapiboon, S. 2006. **Wastewater Treatment System**. Top, Bangkok. (in Thai)
- Syafiqah, M.S.I. and Yussof, H.W. 2018. Adsorption of mercury from aqueous solutions using palm oil fuel ash as an adsorbent - batch studies. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** 334: 1-5.
- Tungkananuruk, N. and Tungkananuruk, K. 2012. **Principle of Chemical Water Quality Analysis**. 2nd ed. Kasetsart University Press, Bangkok. (in Thai)
- Tunsathien, P. 2013. A study of properties of palm oil fuel from various sources for use in concrete. Master Thesis of Engineering in Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi. (in Thai)
- Udomsinrot, K. 2007. **Wastewater Engineering**. 4th ed. Siam Stationery Supply, Bangkok. (in Thai)
- Visa, M., Andronic, L. and Duta, A. 2015. Fly ash-TiO₂ nanocomposite material for multi-pollutants wastewater treatment. **Journal of Environmental Management** 150: 336-343.
- Visa, M., Isac, L. and Duta, A. 2012. Fly ash adsorbents for multi-cation wastewater treatment. **Applied Surface Science** 258: 6345-6352.
- Waijarean, N. and Asavapisit, S. 2019. Synthesis of geopolymer from water treatment residue and palm oil fuel ash. **The Journal of Industrial Technology** 15(2): 70-86. (in Thai)

การคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกผลิตแบคทีเรียโอซินที่สามารถยับยั้ง

การเจริญของแบคทีเรียสาเหตุโรคเต้านมอักเสบในโคนม

Screening of Lactic Acid Bacteria Producing Bacteriocin Capable to Inhibit the Growth of Bovine Mastitis Pathogens

ณัฏฐิกา วชรเทวินทร์กุล* และ จีรนนท์ สวนชูโต

Yanika Wacharatewinkul* and Jeeranan Suanchuto

Received: 9 December 2019, Revised: 10 March 2020, Accepted: 12 March 2020

บทคัดย่อ

การรักษาโรคเต้านมอักเสบในโคนมโดยการใช้ยาปฏิชีวนะอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำนมดิบ เนื่องจากการเกิดการตกค้างในน้ำนม แบคทีเรียโอซินเป็นเปปไทด์หรือโปรตีนที่สังเคราะห์จากแบคทีเรียสามารถใช้เป็นสารถนอมอาหารที่มีความปลอดภัย และใช้ในการรักษาโรคเต้านมอักเสบได้ งานวิจัยนี้คัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกที่ผลิตแบคทีเรียโอซินจากหอยคอง แหนม มุลสุกร และมุลโค ด้วยวิธี Agar spot test และทดสอบการยับยั้งเชื้อก่อโรคเต้านมอักเสบ ได้แก่ *Streptococcus agalactiae* และ *Streptococcus uberis* จากการคัดแยกพบว่าแบคทีเรียกรดแลคติกทั้งหมด 57 ไอโซเลท เป็นชนิดแกรมบวก รูปร่างท่อน ไม่สร้างสปอร์ ไม่เคลื่อนที่ มีทั้งชนิดที่สร้างและไม่สร้างแก๊สจากการหมักน้ำตาลกลูโคส และให้ผลลบในการทดสอบกะตะเลส โดยมีแบคทีเรีย 36 และ 32 ไอโซเลท ที่สามารถยับยั้งเชื้อ *S. agalactiae* และ *S. uberis* ตามลำดับ เมื่อนำมาทดสอบ Cell-free neutralized supernatant (CFNS) กับเอนไซม์ย่อยโปรตีน (protease) พบว่าฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อของแบคทีเรียไอโซเลท LAB 21, LAB 31 และ LAB 34 มีค่าลดลงหรือหมดไป ซึ่งแสดงว่าสารออกฤทธิ์ดังกล่าวเป็นสารเปปไทด์ จากการทดสอบประสิทธิภาพของแบคทีเรียโอซินด้วยวิธี Agar well diffusion พบว่าแบคทีเรียไอโซเลท LAB 21, LAB 31 และ LAB 34 สามารถยับยั้งเชื้อ *S. agalactiae* โดยทำให้เกิดวงใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 14.50, 12.15 และ 14.00 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในขณะที่สามารถยับยั้งเชื้อ *S. uberis* โดยทำให้เกิดวงใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยต่ำกว่าคือ 10.75, 10.50 และ 11.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งขนาดของวงใสที่เกิดการยับยั้งเชื้อ *S. agalactiae* ของแบคทีเรียไอโซเลท LAB 21 และ LAB 34 ไม่แตกต่างกันทางสถิติจากการใช้ยาปฏิชีวนะอะม็อกซิซิลลินในช่วงความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)

สาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม 73000

Program of Microbiology, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Muang, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): yanika@webmail.npru.ac.th

คำสำคัญ: แบคทีเรียกรดแลคติก, แบคทีเรียโอซิน, โรคเต้านมอักเสบในโคนม, *Streptococcus agalactiae*, *Streptococcus uberis*

ABSTRACT

Bovine mastitis treatment with antibiotics may cause an impact on the quality of raw milk due to the occurrence of milk residues. Bacteriocin is a peptide or protein synthesized by bacteria. It can be used as a safe food preservative and used for mastitis treatment. This research aimed to isolate bacteriocin-producing lactic acid bacteria from pickled cockle, sour pork (Nham), pig and cow dungs using agar spot test. Antibacterial capacity against mastitis pathogens: *Streptococcus agalactiae* and *Streptococcus uberis* were determined. It was found that 57 isolated lactic acid bacteria were gram positive, rod shaped, non-spore forming, non-motile, gas-producing or non gas-producing, and catalase negative. There were 36 and 32 isolated bacteria that could inhibit *S. agalactiae* and *S. uberis*, respectively. The inhibitory activities of bacterial isolates LAB 21, LAB 31, and LAB 34 were decreased or disappeared when tested their Cell-free neutralized supernatant (CFNS) with protease. The results revealed that CFNS were peptide. The efficacy of bacteriocins tested by agar well diffusion showed that bacterial isolates LAB 21, LAB 31 and LAB 34 had clear zones of 14.50, 12.50 and 14.00 mm against *S. agalactiae* respectively, whereas they had lower clear zones of 10.75, 10.50 and 11.50 mm against *S. uberis*, respectively. There were no significant differences between clear zones of LAB 21, LAB 34 and amoxicillin on *S. agalactiae* at 95% confidence interval ($p \leq 0.05$).

Key words: lactic acid bacteria, bacteriocin, bovine mastitis, *Streptococcus agalactiae*, *Streptococcus uberis*

บทนำ

โรคเต้านมอักเสบ (mastitis) เป็นปัญหาที่สำคัญในอุตสาหกรรมการเลี้ยงโคนมทั้งในระดับประเทศและระดับโลก เนื่องจากทำให้คุณภาพและปริมาณน้ำนมจากแม่โคลดลง รวมถึงทำให้ต้นทุนในการเลี้ยงโคสูงขึ้นส่งผลกระทบต่อรายได้ของเกษตรกรและการสูญเสียทางเศรษฐกิจ (Kim *et al.*, 2004; Kalińska *et al.*, 2017; Panneum *et al.*, 2007; Kajaysri *et al.*, 2014) โรคเต้านมอักเสบแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ โรคเต้านมอักเสบแบบแสดงอาการ (Clinical mastitis) และโรคเต้านมอักเสบแบบไม่แสดงอาการ (sub-clinical mastitis) (Lakshmi, 2016)

ซึ่งสาเหตุสำคัญของโรคเต้านมอักเสบในโคนมคือการติดเชื้อจากจุลินทรีย์ก่อโรค 4 กลุ่ม ได้แก่ 1) จุลินทรีย์ที่ติดต่อจากเต้านมสู่เต้านม (Contagious microorganism) เช่น *Staphylococcus aureus* และ *Streptococcus agalactiae* 2) จุลินทรีย์ที่อยู่ตามสิ่งแวดล้อม (Environmental microorganism) ได้แก่ แบคทีเรีย *Streptococcus dysgalactiae*, *Streptococcus uberis*, *Streptococcus bavis*, *Enterococcus faecium*, *Enterococcus faecalis*, *Escherichia coli* และ *Klebsiella pneumonia* 3) จุลินทรีย์ฉวยโอกาส ได้แก่ *Staphylococcus epidermidis*, *Staphylococcus saprophyticus*, *Staphylococcus chromogenes* และ

Staphylococcus simulans 4) จุลินทรีย์ที่พบได้ไม่น้อย ได้แก่ *Corynebacterium bovis* และ *Mycoplasma bovis* ซึ่งคิดเชื้อจากเต้านมผู้เต้านม *Pseudomonas aeruginosa*, *Nocardia asteroides*, *Bacillus cereus* รวมถึงจุลินทรีย์ที่ก่อโรคในคน ได้แก่ *Streptococcus pyogenes* และ *Streptococcus pneumonia* (Pieterse and Todorov, 2010; Kajaysri *et al.*, 2014) มีรายงานการตรวจพบเชื้อก่อโรคเต้านมอักเสบในตัวอ่อนนํ้านมที่ได้จากแม่โคป่วยในเขตจังหวัดกาญจนบุรี นครปฐม และราชบุรี ซึ่งพบว่าเชื้อก่อโรคที่พบมาก 3 ลำดับแรก คือ เชื้อก่อโรค จากสิ่งแวดล้อม ได้แก่ โคลิฟอร์ม แบคทีเรีย *Staphylococci* spp. และ *Streptococci* spp. ซึ่งมีความไวต่อยาปฏิชีวนะอะม็อกซิซิลลิน-คลาวูลานิก (amoxicillin-clavulanic acid) และ เอนโรฟล็อกซาซิน (enrofloxacin) (Panneum *et al.*, 2007) โดยแบคทีเรียก่อโรคจะทำลายเนื้อเยื่อภายในเต้านมทำให้เกิดการติดเชื้อ และเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเต้านม ทำให้นํ้านมที่ผลิตได้มีคุณภาพต่ำ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของนํ้านมดิบ รวมถึงมีการปนเปื้อนของเม็ดเลือดขาวมากกว่าปกติ (Butprom, 2013) นํ้านมที่ได้จากแม่โคที่มีสุขภาพดีจะมีปริมาณโซมาติกเซลล์ (somatic cells count, SCC) น้อยกว่า 200,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (Kalińska *et al.*, 2017) ซึ่งแม่โคที่เป็นโรค เต้านมอักเสบจะมีปริมาณโซมาติกเซลล์ในนํ้านมมากกว่าที่พบจากแม่โคที่ไม่เป็นโรคอย่างมีนัยสำคัญ และมีปริมาณแลคโตสลดลงในขณะที่มีค่า pH สูงขึ้น (Luangwilai, 2017) การปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียในนํ้านมจากแม่โคที่ติดเชื้อเต้านมอักเสบส่งผลต่อสุขภาพของผู้บริโภคและก่อให้เกิดปัญหาการติดเชื้อจากสัตว์สู่คน (zoonotic) อีกด้วย (León-Galván *et al.*, 2015) ปัจจุบันการรักษาโรคเต้านมอักเสบทำได้โดยใช้สารปฏิชีวนะ (antibiotics) ซึ่งสามารถตกค้างได้ในนํ้านม และ

ก่อให้เกิดปัญหาการไม่ยอมรับของตลาด (National Institute of Animal Health, 2006) โดยยาปฏิชีวนะส่วนใหญ่เป็นยาที่มีฤทธิ์ต้านเชื้อในวงกว้าง (broad spectrum antibiotics) ครอบคลุมทั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ เช่น เพนิซิลลิน (penicillin) แอมพิซิลลิน (ampicillin) คลอกซาซิลลิน (cloxacillin) อะม็อกซิซิลลิน (amoxicillin) นาฟซิลลิน (nafcillin) เมธิซิลลิน (methicillin) เซฟาเลกซิน (cephalexin) เซฟูโรซิม (cefuroxime) เซฟาพิริน (cephapirin) และกรดคลาวูลานิก (clavulanic acid) เป็นต้น (Pieterse and Todorov, 2010) การให้ยาปฏิชีวนะ เช่น ยาทราย (dry) โดยการสอดเข้าเต้านมแม่โคในระยะหยุดพักรีดนมสามารถช่วยลดความเสี่ยงในการปนเปื้อนของยาปฏิชีวนะในนํ้านม (Chanlun, 2011)

แบคทีเรียกรดแลคติก (lactic acid bacteria) เป็นแบคทีเรียแกรมบวก รูปร่างกลม (cocci) หรือแท่ง (rods) ไม่สร้างสปอร์ และเอนไซม์คะตะเลส (catalase) ทนทานต่อสภาวะที่มีความเป็นกรด จึงนิยมใช้ในการผลิตอาหารหมัก แบคทีเรียกรดแลคติกที่พบในอาหารหมักสามารถสร้างสารเมแทบอไลต์ (metabolites) ที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ เช่น กรดแลคติก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแบคเทอรีโอซินซึ่งเป็นสารประกอบ เพปไทด์ (peptide) (Mokoena, 2017) แบคเทอรีโอซินสามารถนำมาใช้ในการถนอมอาหารซึ่งได้รับการรับรองว่ามีความปลอดภัย และยังนำมาใช้ในการรักษาโรคเต้านมอักเสบที่เกิดจากเชื้อ *S. aureus*, *S. agalactiae* และ *S. dysgalactiae* อีกด้วย (Pieterse *et al.*, 2010) ปัจจุบันมีการผลิตแบคเทอรีโอซินทางการค้า เช่น นิสิน (nisin) และแลคติซิน 3147 (lacticin 3147) จากแบคทีเรีย *Lactococcus lactis* โดยมีการใช้แลคติซิน 3147 เป็นส่วนประกอบของครีมสอดรูหัวนม (teat seal) เพื่อรักษาโรคเต้านมอักเสบในแม่โคแห้งนม

(dry cow) (Pieterse and Todorov, 2010; Carson *et al.*, 2017) แบคทีเรียกลุ่ม *Lactobacillus* spp. เช่น *L. acidophilus* และ *L. bulgaricus* เป็นแบคทีเรียกรดแลคติก รูปร่างแท่ง มีคุณสมบัติเป็นโพรไบโอติกส์ (probiotics) สามารถสร้างแบคทีเรียโอซิน (Kim *et al.*, 2004; Ahmed *et al.*, 2010) *L. sakei* และ *L. curvatus* สามารถผลิตแบคทีเรียโอซินซาคาซิน (sakacin) และเคอร์วาซิน (curvacin) ตามลำดับ (Costa *et al.*, 2019) งานวิจัยนี้จึงทำการคัดเลือกแบคทีเรียกรดแลคติกที่สามารถสร้างสารแบคทีเรียโอซินยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียสาเหตุโรคได้นามอีกเสบในโคนม จากอาหารหมักดองและมูลสัตว์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกจากอาหารหมักดองและมูลสัตว์

คัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกตามวิธีของ Rueangyotchanthana (2013) จากตัวอย่างอาหารหมักดองและมูลสัตว์ ได้แก่ หอยดอง แหนม มูลสุกร และมูลโค โดยเจือจางตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.85 เปอร์เซ็นต์ เจือจางให้ได้ความเข้มข้น 10^{-4} - 10^{-6} จากนั้นดูดสารละลายเจือจางปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร มาเกลี่ยลงบนผิวหน้าอาหาร De Man, Rogosa and Sharpe (MRS) agar (HiMedia) ที่เติม Bromocresol purple เข้มข้น 0.004 เปอร์เซ็นต์ บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง ในโถปราศจากออกซิเจน จากนั้นเลือกโคโลนีเดี่ยวที่มีบริเวณสีเหลืองโดยรอบ มาฉีดไขว้บนอาหาร MRS agar ที่มี Bromocresol purple เข้มข้น 0.004 เปอร์เซ็นต์ นำไปบ่มในโถปราศจากออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เลือกโคโลนีที่มีบริเวณสีเหลืองโดยรอบ และทำซ้ำขั้นตอนเดิมเพื่อให้ได้สายพันธุ์บริสุทธิ์ เก็บเชื้อ

บริสุทธิ์ในสารละลายกลีเซอรอลเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส

2. การศึกษาพื้นฐานวิทยาและการทดสอบทางชีวเคมี

นำเชื้อบริสุทธิ์ที่คัดแยกได้ไปย้อมสีแบบแกรมเพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างและการติดสีแกรม โดยคัดเลือกเชื้อที่ติดสีแกรมบวก ไม่สร้างสปอร์และเอนไซม์คะตะเลส (catalase test) โดยแตะเชื้อทดสอบลงบนกระจกสไลด์ที่มีหยดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแบคทีเรียกรดแลคติกไม่สร้างเอนไซม์คะตะเลส จะให้ผลการทดสอบเป็นลบ โดยไม่ทำให้เกิดฟองแก๊สบนกระจกสไลด์ จากนั้นนำไปทดสอบการเคลื่อนที่ (motility test) โดยแทงเข็มเขี่ยเชื้อที่มีแบคทีเรียลงในอาหาร Motility test medium ในแนวตั้ง (HiMedia) และทดสอบการหมักน้ำตาลกลูโคสในอาหารเหลว (HiMedia) ที่เติม Bromocresol purple เพื่อบ่งชี้ความเป็นกรดต่าง

3. การคัดเลือกแบคทีเรียกรดแลคติกที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ *Streptococcus agalactiae* และ *S. uberis* ด้วยวิธี Agar spot test

เตรียมเชื้อทดสอบ *S. agalactiae* และ *S. uberis* ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากโรงพยาบาลสัตว์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หนองโพ โดยนำเชื้อมาฉีดลงบนอาหาร Blood agar (HiMedia) นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำโคโลนีเดี่ยวมาทดสอบด้วยวิธี Agar spot test (ดัดแปลงจาก Rueangyotchanthana, 2013) โดยเลี้ยงเชื้อในอาหารเหลว Tryptic Soy Broth (TSB, HiMedia) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เจือจางให้ได้ปริมาณเชื้อ 10^6 CFU/ml แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถ่ายแบคทีเรียกรดแลคติกที่ได้ลงในอาหารเหลว MRS (HiMedia) โดยบ่มในโถปราศจากออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วหยดซัสเพนชัน

ของแบคทีเรียกรดแลกติก ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ลงบนอาหารแข็ง MRS จำนวน 8 จุด นำไปบ่มที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ในโถปราศจากออกซิเจน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนพบการเจริญของแบคทีเรีย กรดแลกติกทั้ง 8 จุด จากนั้นนำเชื้อทดสอบปริมาตร 1 มิลลิตร ผสมลงในอาหารแข็ง Tryptic Soy Agar (TSA, HiMedia) (ที่เติมผงวุ้น 0.5 เปอร์เซ็นต์) ปริมาตร 9 มิลลิตร ซึ่งผสมเลือดวัว 5 เปอร์เซ็นต์ แล้วเททับลงบนอาหารแข็ง MRS ที่มีแบคทีเรียกรด แลกติก รอให้แห้ง แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สังเกตโซนใสรอบรอย หยดทั้ง 8 จุด ของแบคทีเรียกรดแลกติก ซึ่งบ่งชี้ ความความสามารถในการผลิตสารยับยั้งการเจริญ ของจุลินทรีย์ที่ทดสอบ วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของวงใส โดยคัดเลือกแบคทีเรียกรดแลกติกที่ทำให้ เกิดวงใสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยมากกว่า 15 มิลลิเมตร มาทดสอบแบคทีเรียโอซิน

4. การทดสอบแบคทีเรียโอซิน

การทดสอบแบคทีเรียโอซิน (ดัดแปลงจาก วิธีของ Siripoke *et al.*, 2007) เพื่อยืนยันว่าเป็นสาร ประเภทโปรตีนหรือไม่ ทำโดยเลี้ยงแบคทีเรียกรดแล คติกในอาหารเหลว MRS เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง นำมาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 rpm ที่ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แยก เซลล์ออกจากอาหารเลี้ยงเชื้อ แล้วนำส่วนใส (supernatant) มาปรับค่า pH ให้เท่ากับ 7.0 ด้วย สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือโซเดียมไฮ ดรอกไซด์ (NaOH)เข้มข้น 1 M จะได้ส่วนใสที่มี สภาพ pH เป็นกลาง (cell-free neutralized supernatant: CFNS) กรอง CFNS ที่ได้ผ่านกระดาษ กรองขนาด 0.2 ไมโครเมตร แล้วเติมเอนไซม์ย่อย โปรตีน (Protease, Sigma Aldrich) (specific activity ≥ 500 U/g) ปริมาตร 15 ไมโครลิตร นำไปบ่มที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อน

นำไปทดสอบกิจกรรมการยับยั้งแบคทีเรีย โดย เปรียบเทียบกับชุดควบคุมซึ่งเติมน้ำกลั่นปริมาตร 15 ไมโครลิตร แทนเอนไซม์

5. การทดสอบประสิทธิภาพของแบคทีเรียโอซินใน การยับยั้งเชื้อ *Streptococcus agalactiae* และ *S. uberis* ด้วยวิธี Agar well diffusion

เพาะเลี้ยงแบคทีเรียกรดแลกติกที่สร้างสาร แบคทีเรียโอซินในอาหารเหลว MRS เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง เตรียม CFNS ตามวิธีการข้างต้น จากนั้นหยด CFNS ปริมาตร 90 ไมโครลิตร ลงในหลุมอาหาร TSA ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ซึ่งผ่าน การกลีด้วยเชื้อทดสอบ *S. agalactiae* หรือ *S. uberis* บนผิวหน้าอาหาร จากนั้นนำไปบ่มที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตรวจสอบประสิทธิภาพของ CFNS ในการยับยั้ง การเจริญของเชื้อทดสอบ โดยวัดขนาดโซนใสที่ เกิดขึ้นบนผิวหน้าอาหาร

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการคัดแยกแบคทีเรียกรดแลกติกจากอาหาร หมักคองและมูลสัตว์

งานวิจัยนี้สามารถคัดแยกแบคทีเรียกรดแล คติกจากอาหารหมักคองและมูลสัตว์ได้ทั้งหมด 57 ไอโซเลท (ตารางที่ 1) โดยคัดแยกได้จากหอยคอง 15 ไอโซเลท แหนม 19 ไอโซเลท มูลสุกร 11 ไอโซเลท และมูลโค 12 ไอโซเลท ซึ่งไอโซเลททั้งหมดสามารถ เจริญบนอาหารแข็ง MRS ที่เติม Bromocresol purple ทำให้อาหารเลี้ยงเชื้อเปลี่ยนเป็นสีเหลือง เนื่องจาก กรดแลกติกที่แบคทีเรียสร้างขึ้น (Sobrun *et al.*, 2012) จากการคัดแยกแบคทีเรียพบว่า แบคทีเรียไอ โซเลทที่คัดแยกได้จากแหนมมากที่สุด รองลงมาคือ หอยคอง มูลโค และมูลสุกร ตามลำดับ ทั้งนี้อาจ เนื่องมาจากตัวอย่างอาหารหมักมีค่า pH ต่ำ ส่งผลให้ กลุ่มแบคทีเรียกรดแลกติกที่คัดแยกได้มีความ

หลากหลายมากกว่าการคัดแยกจากตัวอย่างแหล่งอื่นๆ Tangwacharin *et al.* (2017) รายงานว่าแบคทีเรียกรดแลคติกที่คัดแยกได้จากผลิตภัณฑ์อาหารที่มีกิจกรรมการหมักสูง (pH 4.1-4.7) มีจำนวนแบคทีเรียไอโซเลทมากกว่าการคัดแยกจากผลิตภัณฑ์อาหารหมักที่มีกิจกรรมการหมักต่ำกว่า (pH 4.5-4.9) ซึ่งแบคทีเรียกรดแลคติกพบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม โดยส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์

อาหารหมักจากพืชและสัตว์ เช่น ผักดอง พืชอาหารสัตว์หมัก แป้งหมัก ไข่กรอกหมักแห้ง ปลาหมัก เนยแข็ง (Ishak *et al.*, 2017) อาหารหมักพื้นบ้านของไทย (Bumrungpukdee and Leenanon, 2011; Keereewan, 2015; Imtongkhum, 2018) น้ำอ้อย (Sobrun *et al.*, 2012) และมูลสัตว์ (Rueangyotchanthana, 2013) เป็นต้น

ตารางที่ 1 สันฐานวิทยาและการทดสอบทางชีวเคมีของแบคทีเรียที่คัดแยกได้จากอาหารหมักดองและมูลสัตว์

แหล่งคัดแยก	ไอโซเลท	ชนิดแกรม	รูปร่างและ การจัดเรียงเซลล์	การทดสอบ กะตะเลส	การเคลื่อนที่	การหมักน้ำตาล
หอยดอง	LAB 1	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว หรือเรียงตัวเป็นสาย	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 2	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว หรือเป็นกลุ่ม	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 3	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว หรือเป็นกลุ่ม	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 4	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว หรือเป็นกลุ่ม	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 5	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว หรือเรียงตัวเป็นสาย	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 6	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว หรือเป็นกลุ่ม	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 7	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว หรือเป็นกลุ่ม	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 8	แกรมบวก	ท่อนสั้น ส่วนใหญ่อยู่เป็นกลุ่ม หนาแน่น	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 9	แกรมบวก	ท่อนสั้น ส่วนใหญ่อยู่เป็นกลุ่ม หนาแน่น	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 10	แกรมบวก	ท่อนสั้น ส่วนใหญ่อยู่เป็นกลุ่ม หนาแน่น	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 11	แกรมบวก	ท่อนสั้น ส่วนใหญ่อยู่เป็น เซลล์เดี่ยว	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 12	แกรมบวก	ท่อนสั้น ส่วนใหญ่อยู่เป็น เซลล์เดี่ยว	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 13	แกรมบวก	ท่อนสั้น ส่วนใหญ่อยู่เป็น เซลล์เดี่ยว	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 14	แกรมบวก	ท่อนสั้น ส่วนใหญ่อยู่เป็น เซลล์เดี่ยว	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส

ตารางที่ 1 (ต่อ)

แหล่งคัดแยก	ไอโซเลท	ชนิดแกรม	รูปร่างและ การจัดเรียงเซลล์	การทดสอบ กะตะเลส	การเคลื่อนที่	การหมักน้ำตาล
ແຮມມ	LAB 15	แกรมบวก	ท่อนสั้น ส่วนใหญ่อยู่เป็น เซลล์เดี่ยว	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 16	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว และเป็นกลุ่มหนาแน่น	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 17	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว และเป็นกลุ่มหนาแน่น	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 18	แกรมบวก	ท่อนสั้น ส่วนใหญ่อยู่เป็น เซลล์เดี่ยว	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 19	แกรมบวก	ท่อนยาว เรียงตัวเป็นสาย	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 20	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว หรือเป็นกลุ่ม	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 21	แกรมบวก	ท่อนยาว ส่วนใหญ่อยู่เป็น กลุ่ม	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 22	แกรมบวก	ท่อนยาว ส่วนใหญ่อยู่เป็น กลุ่ม	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 23	แกรมบวก	ท่อนยาว เรียงตัวเป็นสาย	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 24	แกรมบวก	ท่อนยาว ส่วนใหญ่อยู่เป็น เซลล์เดี่ยว	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 25	แกรมบวก	ท่อนยาว อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว และเรียงตัวเป็นสายสั้น	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 26	แกรมบวก	ท่อนยาว อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว และเรียงตัวเป็นสายสั้น	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 27	แกรมบวก	ท่อนยาว อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว และเรียงตัวเป็นสายสั้น	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 28	แกรมบวก	ท่อนยาว อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว และเรียงตัวเป็นสายสั้น	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 29	แกรมบวก	ท่อนยาว เรียงตัวเป็นสาย	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 30	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว และเป็นกลุ่ม	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 31	แกรมบวก	ท่อนสั้น ส่วนใหญ่อยู่เป็น เซลล์เดี่ยว	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 32	แกรมบวก	ท่อนยาว ส่วนใหญ่เรียงตัว เป็นสาย	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 33	แกรมบวก	ท่อนยาว อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว และเรียงตัวเป็นสาย	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส

ตารางที่ 1 (ต่อ)

แหล่งคัดแยก	ไอโซเลท	ชนิดแกรม	รูปร่างและ การจัดเรียงเซลล์	การทดสอบ กะตะเลส	การเคลื่อนที่	การหมักน้ำตาล
	LAB 53	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว หรือเรียงตัวเป็นคู่	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 54	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว และเป็นกลุ่ม	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 55	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว และเป็นกลุ่ม	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส
	LAB 56	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว และเป็นกลุ่ม	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ สร้างแก๊ส
	LAB 57	แกรมบวก	ท่อนสั้น อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว และเป็นกลุ่ม	-	ไม่เคลื่อนที่	หมักน้ำตาลได้ ไม่สร้างแก๊ส

2. ผลการศึกษาฐานวิธานวิทยาและการทดสอบทาง

ชีวเคมี

แบคทีเรียกรดแลคติกที่คัดแยกได้ทั้งหมด เป็นแบคทีเรียแกรมบวก รูปร่างท่อนสั้นและท่อนยาว มีทั้งเป็นเซลล์เดี่ยว เป็นกลุ่ม และเรียงตัวเป็นสาย ไม่สร้างสปอร์ ให้ผลลบในการทดสอบการสร้าง เอนไซม์กะตะเลส ซึ่งลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับ ที่มีรายงานการคัดแยกแบคทีเรียแลคติกจาก ผลิตภัณฑ์อาหารหมัก (Sáez *et al.*, 2018) ผลิตภัณฑ์ นม (Tallapragada *et al.*, 2018) และมูลสัตว์ (Prittesh and Vrutika, 2015) จากการทดสอบการเคลื่อนที่ พบว่าแบคทีเรียไอโซเลทที่แยกได้มีการเจริญตาม แนวเข็มเข็มเชื้อเท่านั้น แสดงว่าแบคทีเรียไม่สามารถ เคลื่อนที่ได้ จากการทดสอบการหมักน้ำตาลกลูโคส พบว่ามีแบคทีเรียที่สามารถสร้างแก๊สได้ จำนวน 21 ไอโซเลท และไม่สร้างแก๊ส จำนวน 36 ไอโซเลท (ตารางที่ 1) ซึ่งการทดสอบแก๊สที่เกิดขึ้นใน กระบวนการหมักน้ำตาลกลูโคสสามารถแบ่ง แบคทีเรียกรดแลคติก ออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ Homofermentative และ Heterofermentative (Halász, 2019) โดยกลุ่ม Homofermentative จะให้ผลผลิต หลักเป็นกรดแลคติกจากการหมักน้ำตาลเฮกโซส

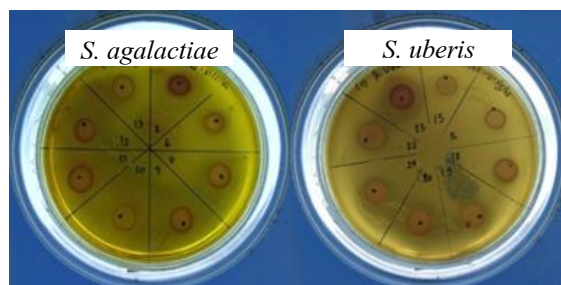
(hexose) ในขณะที่กลุ่ม Heterofermentative จะให้ กรดแลคติก แอลกอฮอล์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Basso *et al.*, 2014) จากข้อมูลของ Biological Resource Center, NITE ประเทศญี่ปุ่น (NBRC, 2019) รายงานว่าแบคทีเรียกรดแลคติก รูปร่างแท่งที่คัดแยก ได้จากผลิตภัณฑ์หมักในประเทศไทยส่วนใหญ่ เป็นแบคทีเรียในจีนัส *Weissella* spp. ซึ่งอยู่ในกลุ่ม ของ Heterofermentative และจีนัส *Lactobacillus* spp. ซึ่งมีทั้งที่อยู่ในกลุ่มของ Homofermentative และ Heterofermentative

3. ผลการคัดเลือกแบคทีเรียกรดแลคติกที่สามารถยับยั้ง การเจริญของเชื้อ *Streptococcus agalactiae* และ *S. uberis* ด้วยวิธี Agar spot test

จากการศึกษาความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *Streptococcus agalactiae* และ *S. uberis* ด้วยวิธี Agar spot test พบว่าแบคทีเรียกรดแลคติกจำนวน 36 ไอโซเลท (คัดแยกจากหอยดอง 13 ไอโซเลท แหนม 19 ไอโซเลท มูลสุกร 1 ไอโซเลท และมูลโค 3 ไอโซเลท) ยับยั้งการเจริญของเชื้อ *Streptococcus agalactiae* ในขณะที่แบคทีเรียกรดแลคติกจำนวน 32 ไอโซเลท (คัดแยกจากหอยดอง 11 ไอโซเลท แหนม 17 ไอโซเลท มูลสุกร 1 ไอโซเลท และมูลโค

3 ไอโซเลท) สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ *S. uberis* (ภาพที่ 1) การยับยั้งการเจริญของเชื้อ *S. agalactiae* และ *S. uberis* มีรายงานการศึกษาในแบคทีเรียกรดแลคติก *Lactobacillus* spp.,

Lactococcus spp. และ *Weissella confusa* คัดแยกได้จากของเหลวในกระเพาะส่วนรูเมน (ruminal fluid) ของแม่วัวที่มีอาการท้องอืด (acidosis) (Serna *et al.*, 2011) และในน้ำนมโค (Bouchard *et al.*, 2015)



ภาพที่ 1 ผลการยับยั้งการเจริญของเชื้อ *Streptococcus agalactiae* และ *S. uberis* ด้วยวิธี Agar spot test

4. ผลการทดสอบแบคทีเรียโอซิน

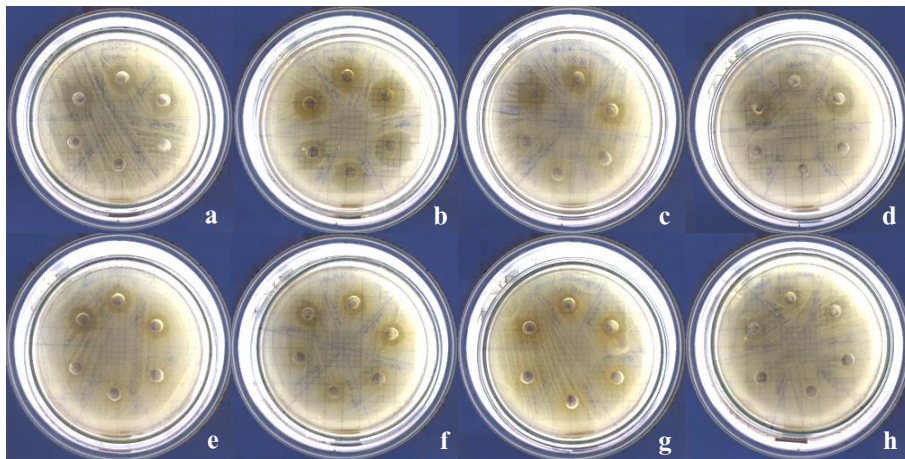
จากการทดสอบคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อทดสอบ *S. agalactiae* และ *S. uberis* พบว่า CFNS จากแบคทีเรียไอโซเลท LAB 21, LAB 31 และ LAB 34 สามารถยับยั้งเชื้อทดสอบได้ทั้ง 2 สายพันธุ์ โดยเกิดวงใสที่เด่นชัด (ภาพที่ 2) แต่อย่างไรก็ตามความสามารถในการยับยั้งเชื้อทดสอบลดลงหรือหมดไปเมื่อถูกย่อยด้วยเอนไซม์ย่อยโปรตีน ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียโอซินเป็นเปปไทด์จึงสามารถถูกย่อยสลายได้โดยเอนไซม์ย่อยโปรตีน สอดคล้องกับการศึกษาของ Kim *et al.* (2004) และ Imtongkhum (2018) ที่ทดสอบคุณสมบัติความเป็นโปรตีนของแบคทีเรียโอซินจากแบคทีเรียกรดแลคติก ด้วยวิธี Agar well diffusion พบว่าความสามารถในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียหมดไปเมื่อแบคทีเรียโอซินถูกย่อยด้วยเอนไซม์ย่อยโปรตีน (proteolytic enzyme)

CFNS ของแบคทีเรียไอโซเลท LAB 26 ยังคงแสดงกิจกรรมยับยั้งการเจริญของเชื้อ *S. agalactiae* และ *S. uberis* ได้ภายหลังจากที่เติมเอนไซม์ย่อยโปรตีน (ภาพที่ 2) แสดงให้เห็นว่าสาร

ออกฤทธิ์ที่พบในแบคทีเรียไอโซเลท LAB 26 ไม่ใช่สารเปปไทด์ เนื่องจากไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ย่อยโปรตีน ดังนั้นกิจกรรมการยับยั้งเชื้อทดสอบที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากฤทธิ์ของสารประกอบชนิดอื่นที่แบคทีเรียกรดแลคติกสร้างขึ้น ได้แก่ สารเมแทบอลิต์น้ำหนักรวมโมเลกุลต่ำ เช่น กรดอินทรีย์ ซึ่งมีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ กรดแลคติก กรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรดไขมันสายสั้น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) ไดอะซีติล (diacetyl) และรอยเทอริน (reuterin) เป็นต้น (Stoyanova *et al.*, 2012; King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2018)

5. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแบคทีเรียโอซินในการยับยั้งเชื้อ *Streptococcus agalactiae* และ *S. uberis* ด้วยวิธี Agar well diffusion

แบคทีเรียโอซินจากแบคทีเรียไอโซเลท LAB 21, LAB 31 และ LAB 34 แสดงกิจกรรมยับยั้งเชื้อ *S. agalactiae* โดยทำให้เกิดวงใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 14.50, 12.15 และ 14.00 มิลลิเมตร ตามลำดับ



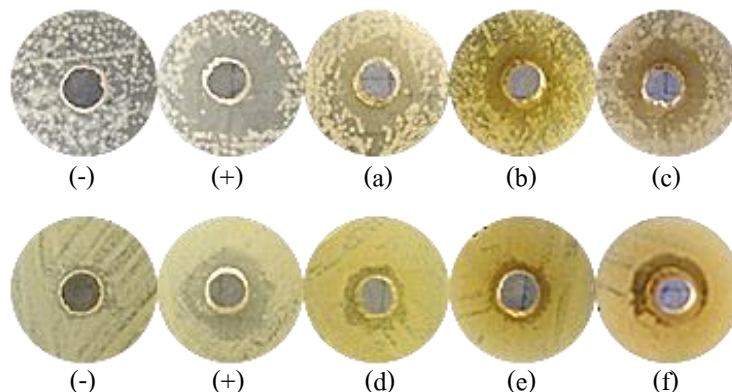
ภาพที่ 2 ผลการทดสอบด้วยเอนไซม์ย่อยโปรตีนเพื่อยืนยันคุณสมบัติสารประกอบเปปไทด์ของสารออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *S. agalactiae* (a-d) และ *S. uberis* (e-h) ของแบคทีเรียกรดแลคติก LAB 21, LAB 26, LAB 31 และ LAB 34 (จากซ้ายไปขวา)

และแสดงกิจกรรมยับยั้งเชื้อ *S. uberis* โดยทำให้เกิดวงใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 10.75, 10.50 และ 11.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ภาพที่ 3) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของวงใสที่เกิดการยับยั้งเชื้อทดสอบระหว่างที่เกิดจากยาปฏิชีวนะอะม็อกซิซิลลินและแบคทีเรียโอซิน พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวงใสที่เกิดการยับยั้งเชื้อ *S. agalactiae* โดยยาปฏิชีวนะอะม็อกซิซิลลินมีขนาด 17 มิลลิเมตร ซึ่งไม่แตกต่างจากขนาดของวงใสที่เกิดการยับยั้งจากแบคทีเรียโอซิน LAB 21 และ LAB 34 ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวงใสที่เกิดการยับยั้งเชื้อ *S. uberis* โดยยาปฏิชีวนะอะม็อกซิซิลลินมีขนาด 15.50 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าวงใสที่เกิดการยับยั้งจากแบคทีเรียโอซิน LAB 21, LAB 31 และ LAB 34 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 2) มีรายงานการศึกษาความต้านทานของเชื้อ *Streptococcus* spp. ที่เป็นสาเหตุของโรคเต้านมอักเสบต่อสารต้านจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ พบว่ามีความสัมพันธ์กับยีนต้านทาน (resistant

genes) ซึ่งเป็นผลจากการใช้ยาปฏิชีวนะ ในปริมาณมาก (Ding *et al.*, 2015; Kaczorek *et al.*, 2017; Tomazi *et al.*, 2019) อย่างไรก็ตามพบว่าแบคทีเรียโอซิน เช่น ไนซิน ยังคงมีประสิทธิภาพสูงในการยับยั้งการเจริญของเชื้อดังกล่าว (Kaczorek *et al.*, 2017) มีรายงานการวิจัยหลายเรื่องที่ศึกษาถึงมีการศึกษาที่แสดงถึงแบคทีเรียกรดแลคติก (Serna *et al.*, 2011; Bouchard *et al.*, 2015; Diepers *et al.*, 2017; Martín *et al.*, 2019; Pellegrino *et al.*, 2019) และแบคทีเรียโอซินที่สังเคราะห์โดยแบคทีเรียกรดแลคติก (Geetha *et al.*, 2015; Gaspar *et al.*, 2018; Godoy-Santos *et al.*, 2019) ในการยับยั้งการเจริญของเชื้อ *S. agalactiae* และ *S. uberis* ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคเต้านมอักเสบ ซึ่งนอกจากการสังเคราะห์แบคทีเรียโอซินเพื่อยับยั้งการเจริญของเชื้อก่อโรคแล้วแบคทีเรียกรดแลคติกยังมีกลไกอื่นๆ ในการควบคุมเชื้อก่อโรค เช่น การแข่งขันเพื่อแย่งอาหาร การกีดขวางการยึดเกาะ และการปรับระบบภูมิคุ้มกันของโฮสต์ เป็นต้น (Vieco-Saiz *et al.*, 2019) ดังนั้น การ

ใช้แบคทีเรียกรดแลคติกเพื่อควบคุมโรคเต้านม
อักเสบจึงอาจใช้ในรูปแบบของ โพรไบโอติกโดยผสมลง
ในอาหารสัตว์ หรือใช้ในรูปแบบของแบคทีเรียโอซินโดย

ใช้เป็นน้ำยาจุ่มหัวนม (teat dip) หรือยาทรายสอดเต้านม



ภาพที่ 3 ผลการยับยั้งเชื้อ *S. agalactiae* (บน) และ *S. uberis* (ล่าง) ของแบคทีเรียโอซินจากแบคทีเรีย LAB 21 (a, d), LAB 31 (b, e) และ LAB 34 (c, f) โดยใช้อาหารเหลว MRS เป็นชุดควบคุมลบ (-) และยาปฏิชีวนะอะม็อกซิซิลลินเป็นชุดควบคุมบวก (+) ทดสอบด้วยวิธี Agar well diffusion

ตารางที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวงใสที่เกิดจากการยับยั้งการเจริญของเชื้อ *S. agalactiae* และ *S. uberis* โดยแบคทีเรียโอซินจากแบคทีเรียกรดแลคติกที่คัดแยกได้เปรียบเทียบกับยาปฏิชีวนะอะม็อกซิซิลลิน ทดสอบด้วยวิธี Agar spot test

เชื้อทดสอบ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงใส (มิลลิเมตร)			
	อะม็อกซิซิลลิน	แบคทีเรียโอซิน		
		LAB 21	LAB 31	LAB 34
<i>S. agalactiae</i>	17.00 ^a ±0.14	14.50 ^{ab} ±0.07	12.15 ^b ±0.02	14.00 ^{ab} ±0.00
<i>S. uberis</i>	15.50 ^a ±0.07	10.75 ^d ±0.04	10.50 ^{cd} ±0.07	11.50 ^{bcd} ±0.07

ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในช่วงความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)

สรุป

แบคทีเรียกรดแลคติกไอโซเลท LAB 21, LAB 31 และ LAB 34 ที่คัดแยกได้จากແໜ່ມແປ່ เป็นแบคทีเรียแกรมบวก รูปร่างท่อน ไม่สร้างสปอร์ ไม่เคลื่อนที่ มีทั้งชนิดที่สร้างและไม่สร้างแก๊สจากการหมักน้ำตาลกลูโคส สามารถผลิตแบคทีเรียโอซินที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญของเชื้อก่อโรคเต้านมอักเสบในโคนม โดยแบคทีเรียโอซินที่สร้างขึ้นจาก

แบคทีเรีย LAB 21 และ LAB 34 แสดงกิจกรรมการยับยั้งเชื้อ *S. agalactiae* ได้ไม่แตกต่างจากยาปฏิชีวนะอะม็อกซิซิลลิน ในขณะที่แบคทีเรียโอซินจากแบคทีเรียทั้ง 3 ไอโซเลท มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *S. uberis* น้อยกว่ายาปฏิชีวนะอะม็อกซิซิลลิน จากผลการศึกษาในครั้งนี้จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้แบคทีเรียโอซินจากแบคทีเรียกรดแลคติกในการทดแทนการใช้ยาปฏิชีวนะในการควบคุมโรคเต้านม

นมอัสเสบ ซึ่งจะช่วยลดปัญหาในด้านคุณภาพของ
น้ำนมดิบและการดื้อยาของเชื้อก่อโรค โดยอาจใช้ใน
รูปของโพรไบโอติกผสมในอาหารหรือใช้จุ่มหัวนม
หรือสอดเต้านม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
ภายใต้โครงการวิจัยบูรณาการนักศึกษาและอาจารย์
เพื่อการพัฒนาท้องถิ่นและความเป็นเลิศทางวิชาการ

เอกสารอ้างอิง

- Ahmed, Z., Wang, Y., Cheng, Q. and Imran, M. 2010. *Lactobacillus acidophilus* bacteriocin, from production to their application: an overview. **African Journal of Biotechnology** 9(20): 2843-2850.
- Basso, T.O., Gomes, F.S., Lopes, M.L., Amorim, H.V., Eggleston, G. and Basso, L.C. 2014. Homo- and heterofermentative lactobacilli differently affect sugarcane-based fuel ethanol fermentation. **Antonie van Leeuwenhoek** 105: 169-177.
- Bouchard, D.S., Seridan, B., Saraoui, T., Rault, L., Germon, P., Gonzalez-Moreno, C., Nader-Macias, F.M., Baud, D., François, P., Chuat, V., Chain, F., Langella, P., Nicoli, J., Le Loir, Y. and Even, S. 2015. Lactic acid bacteria isolated from bovine mammary microbiota: Potential allies against bovine mastitis. **PLoS One** 10(12): 1-18.
- Bumrungpukdee, T. and Leenanon, B. 2011. Isolation and identification of lactic acid bacteria from fermented bamboo shoots to be used as mixed starter cultures for fermentation, pp. 735-741. **In The 12th Graduate Research Conference.** Khon Kaen University, Khon Kaen. (in Thai)
- Butprom, S. 2013. Effect of teat seal on mastitis prevention in dry cows. Master of Science (Animal Production Technology), Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Carson, D.A., Barkema, H.W., Naushad, S. and De Buck, J. 2017. Bacteriocins of non-*aureus* staphylococci isolated from bovine milk. **Applied and Environmental Microbiology** 83(17): 1-21.
- Chanlun, A. 2011. **The use of the dry cow therapy in the control of mastitis.** Available Source: http://vet.kku.ac.th/aran/data/clinic4_2554/04_DC2554.pdf, October 7, 2019.
- Costa, R., Voloski, F., Rafael, M., Duval, E. and Fiorentini, A. 2019. Preservation of meat products with bacteriocins produced by lactic acid bacteria isolated from meat. **Journal of Food Quality** 2019: 1-12.
- Diepers, A., Krömker, V., Zinke, C., Wente, N., Liying, P., Paulsen, K. and Paduch, J. 2017. In vitro ability of lactic acid bacteria to inhibit mastitis-causing pathogens. **Sustainable Chemistry and Pharmacy** 5: 84-92.
- Ding, Y., Zhao, J., He, X., Li, M., Guan, H., Zhang, Z. and Li, P. 2015. Antimicrobial resistance and virulence-related genes of *Streptococcus* obtained from dairy cows

- with mastitis in Inner Mongolia, China. **Pharmaceutical biology** 54(1): 1-6.
- Gaspar, C., Donders, G., Palmeira de Oliveira, R., Queiroz, J., Tomaz, C., Martinez-de-Oliveira, J. and Palmeira-de-Oliveira, A. 2018. Bacteriocin production of the probiotic *Lactobacillus acidophilus* KS400. **AMB Express** 8: 1-8.
- Geetha, R., Sathian, C.T., Prasad, V. and Gleeja, V.L. 2015. Efficacy of purified antimicrobial peptides from lactic acid bacteria against bovine mastitis pathogens. **Asian Journal of Dairy and Food Research** 34(4): 259-264.
- Godoy-Santos, F., Pinto, M.S., Barbosa, A., Brito, M. and Mantovani, H. 2019. Efficacy of a ruminal bacteriocin against pure and mixed cultures of bovine mastitis pathogens. **Indian Journal of Microbiology** 59(3): 304-312.
- Halász, A. 2019. **Lactic Acid Bacteria**. Encyclopedia of life support systems. Available Source: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C10/E5-08-06-04.pdf>, October 8, 2019.
- Imtongkhum, K. 2018. Isolation of bacteriocin producing lactic acid bacteria for extending the shelf life of food. Master of Science (Applied Biology), Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)
- Ishak, M.S., Ibrahim, M.Z., and Ishak, H.M. 2017. Screening of lactic acid bacteria from “TapaiPulut” for biosynthesis of glutamic acid. **Modern Agricultural Science and Technology** 3(5-6): 37-41.
- Kaczorek, E., Małaczewska, J., Wojcik, R., Rękawek, W. and Siwicki, A. 2017. Phenotypic and genotypic antimicrobial susceptibility pattern of *Streptococcus* spp. isolated from cases of clinical mastitis in dairy cattle in Poland. **Journal of Dairy Science** 100(8): 6442-6453.
- Kajaysri, J., Jasanchuen, A., Mitchaothai, J. and Thammakarn, C. 2014. The efficiency of Mastivac® vaccine for preventive mastitis in dairy cow. **Journal of Mahanakorn Veterinary Medicine** 9(1): 37-48. (in Thai)
- Kalińska, A., Gołębiewski, M. and Wójcik, A. 2017. Mastitis pathogens in dairy cattle - a review. **World Scientific News** 89: 22-31.
- Keereewan, P. 2015. Selection of lactic acid bacteria *Lactobacillus plantarum* from Thai fermented food for conjugated linoleic acid production. Master of Science (Biotechnology), Thammasat University. (in Thai)
- Kim, H.J., Kim, J.H., Son, J.H., Seo, H.J., Park, S.J., Paek, N.S. and Kim, S.G. 2004. Characterization of bacteriocin produced by *Lactobacillus bulgaricus*. **Journal of Microbiology and Biotechnology** 14(3): 503-508.
- King Mongkut's University of Technology North Bangkok. 2018. **Chapter 39 Information of biochemical substances (Lactic acid)**. Database enhancement project of bio-based

- industries: Final report. Available Source: http://asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20181016080519u.pdf, November 3, 2019. (in Thai)
- Lakshmi, R. 2016. Bovine mastitis and its diagnosis. **International Journal of Applied Research** 2(6): 213-216.
- León-Galván, M.F., Barboza-Corona, J.E., Lechuga-Arana, A.A., Valencia-Posadas, M., Aguayo, D.D., Cedillo-Pelaez, C., Martínez-Ortega, E.A. and Gutierrez-Chavez, A.J. 2015. Molecular detection and sensitivity to antibiotics and bacteriocins of pathogens isolated from bovine mastitis in family dairy herds of central Mexico. **BioMed Research International** 2015: 1-9.
- Luangwilai, M. 2017. Comparison of biomolecular profile of raw milk from clinical and subclinical mastitis cows using metabolomics technology. Master of Science (Food Technology), Chulalongkorn University. (in Thai)
- Martín, V., Cárdenas, N., Ocaña, S., Marin, M., Arroyo, R., Beltrán, D., Badiola, C., Fernández, L. and Rodríguez, J. 2019. Rectal and vaginal eradication of *Streptococcus agalactiae* (GBS) in pregnant women by using *Lactobacillus salivarius* CECT 9145, a target-specific probiotic strain. **Nutrients** 11: 1-22.
- Mokoena, M.P. 2017. Lactic acid bacteria and their bacteriocins: classification, biosynthesis and applications against uropathogens: a mini-review. **Molecules** 22(8): 1255-1267.
- National Institute of Animal Health. 2006. **Mastitis**. Animal Disease. Available Source: http://niah.dld.go.th/th/AnimalDisease/cow_mas.htm, December 5, 2019. (in Thai)
- NBRC. 2019. **Lactic acid bacteria isolated from fermented food in Thailand**. National Institute of Technology and Evaluation. Available Source: <https://WWW.nite.go.jp/en/nbrc/cultures/nbrc/use/thailact.html>, October 28, 2019.
- Panneum, S., Iniam, K., Choorut, P., Bumrungrit, K., Sroynum, A. and Pinyopummin, A. 2007. Identification of clinical mastitis pathogens and antibiotic sensitivity in dairy cattle during years 2004-2006 in Kanchanaburi, Nakhonpathom and Ratchaburi, pp. 532-538. In **45th Kasetsart University Annual Conference: Animals and Veterinary Medicine**. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Pellegrino, M., Frola, I., Natanael, B., Gobelli, D., Nader-Macias, F. and Bogni, C. 2019. In vitro characterization of lactic acid bacteria isolated from bovine milk as potential probiotic strains to prevent bovine mastitis. **Probiotics and Antimicrobial Proteins** 11(1): 74-84.
- Pieterse, R. and Todorov, S.D. 2010. Bacteriocins - exploring alternatives to antibiotics in mastitis treatment. **Brazilian Journal of Microbiology** 41: 542-562.
- Pieterse, R., Todorov, S.D. and Leon, M.T.D. 2010. Mode of action and In Vitro susceptibility

- of mastitis pathogens to macedocin ST91KM and preparation of a teat seal containing the bacteriocin. **Brazilian Journal of Microbiology** 41: 133-145.
- Prittesh, P. and Vrutika, L. 2015. Isolation of lactic acid bacteria from different dung samples and *In Vitro* screening for certain probiotic properties. **International Journal of Scientific Research and Reviews** 4(1): 41-49.
- Rueangyotchanthana, K. 2013. Screening of lactic acid bacteria isolated from animal feces for multistrains probiotics and their application in chickens. Master of Science (Biotechnology), Srinakharinwirot University. (in Thai)
- Sáez, G.D., Flomenbaum, L. and Zárate, G. 2018. Lactic acid bacteria from Argentinean fermented foods: Isolation and characterization for their potential use as starters for fermentation of vegetables. **Food Technology & Biotechnology** 56(3): 398-410.
- Serna, L., Valencia, L.Y. and Campos, R. 2011. Lactic acid bacteria with antimicrobial activity against pathogenic agent causing of bovine mastitis. **Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial** 9(1): 97-104.
- Siripoke, S., Aungpraphapornchai, P., Pothivejkul, K. and Pringsulaka, O. 2007. Screening and identification of bacteriocin-producing lactic acid bacteria from fermented foods and preliminary characterization of the bacteriocin. **Srinakharinwirot Science Journal** 23(2): 92-114.
- Sobrun, Y., Bhaw-Luximon, A., Jhurry, D. and Puchooa, D. 2012. Isolation of lactic acid bacteria from sugar cane juice and production of lactic acid from selected improved strains. **Advances in Bioscience and Biotechnology** 3: 398-407.
- Stoyanova, L.G., Ustyugova, E.A. and Netrusov, A.I. 2012. Antibacterial metabolites of lactic acid bacteria: Their diversity and properties. **Applied Biochemistry and Microbiology** 48: 229-243.
- Tallapragada, P., Bhargavi, R., Priyanka, P., Niranjana, N. and Pavitra, P. 2018. Screening of potential probiotic lactic acid bacteria and production of amylase and its partial purification. **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology** 16: 357-362.
- Tangwatcharin, P., Nithisanthawakupt, J. and Suksupath, K. 2017. Preliminary screening and selection of lactic acid bacteria with potential probiotic properties from fermented meat product. **King Mongkut's Agricultural Journal** 4(2): 67-76. (in Thai)
- Tomazi, T., Freu, G., Alves, B., de Souza Filho, A., Heinemann, M. and Santos, M. 2019. Genotyping and antimicrobial resistance of *Streptococcus uberis* isolated from bovine clinical mastitis. **PloS One** 14(10): 1-15.
- Vieco-Saiz, N., Belguesmia, Y., Raspoet, R., Auclair, E., Gancel, F., Kempf, I. and

Drider, D. 2019. Benefits and inputs from lactic acid bacteria and their bacteriocins as alternatives to antibiotic growth promoters during food-animal production. **Frontiers in Microbiology** 10(57): 1-17.

การศึกษาเปรียบเทียบปริมาณชดเชยด้วยอุปกรณ์ปรับสภาพกำลังไฟฟ้า ของระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟและตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ ในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ใช้หม้อแปลงแบบวี

A Comparative Study of Compensation Capacities of using Railway Power Conditioner and Steinmetz Compensator in Traction Substation with V/V Transformer

กฤษดา มงคลดี และ ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์*

Kritsada Mongkoldee and Thanatchai Kulworawanichpong*

Received: 6 March 2020, Revised: 28 June 2020, Accepted: 29 July 2020

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเปรียบเทียบพิกัดการชดเชยในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟที่ใช้หม้อแปลงขับเคลื่อนแบบวีด้วยอุปกรณ์ปรับสภาพกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ (Railway Power Conditioner: RPC) และตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์เพื่อแก้ปัญหาค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังในระบบจ่ายไฟฟ้า และนำเสนอแบบจำลองและวิธีการคำนวณหาพิกัดที่เหมาะสมที่สุดของตัวชดเชยทั้งสองชนิด ทดสอบวิธีการคำนวณที่นำเสนอโดยใช้การจำลองผลการศึกษานี้ในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่มีสถานะโหลดเลวร้ายที่สุด ผลการจำลองในคอมพิวเตอร์พบว่า การชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ใช้พิกัดชดเชยเหมาะสมที่สุดน้อยกว่าการชดเชยด้วย RPC รวมถึงสามารถรักษาระดับแรงดันที่สถานีไฟฟ้าได้ดีกว่า RPC ภายใต้เป้าหมายการชดเชยเดียวกันที่ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 2% และตัวประกอบกำลังขั้นต่ำเท่ากับ 0.95 โดยการชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ใช้พิกัดเหมาะสมที่สุดน้อยกว่าการชดเชยด้วย RPC เฉลี่ยประมาณร้อยละ 30 ดังนั้น จึงสามารถติดตั้งตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ที่มีพิกัดน้อยกว่า และอนุมานจากขนาดตัวชดเชยได้ว่าจะใช้เงินลงทุนน้อยกว่า อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาผลกระทบอื่นต่อราคาตัวชดเชยนอกเหนือจากขนาดพิกัด

คำสำคัญ: อุปกรณ์ปรับสภาพกำลังไฟฟ้า, หลักการสไตน์เมทซ์, พิกัดชดเชยเหมาะสมที่สุด, หม้อแปลงแบบวี

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง นครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111, University Avenue Road, Suranaree, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): thanatchai@gmail.com

ABSTRACT

This paper presents the comparative study of using two different compensators in a railway traction substation with a V/V transformer to alleviate voltage unbalance and low power factor in a railway power supply system: railway power conditioner (RPC) and Steinmetz compensator. The paper also introduces mathematical models and a calculation method for searching optimal rating of both compensators. One computer simulation study case under the worst case of loading condition was used to validate the proposed models and method. The simulation results showed that the Steinmetz compensator had approximately 30 percent less optimal capacity than that of RPC and had better capability of substation voltage regulation under the same compensation target, voltage unbalance factor of less than 2%, and power factor of greater or equal to 0.95. Consequently, the installation of Steinmetz compensator could result in less compensator cost, with a capacity solely taken into consideration.

Key words: railway power conditioner, steinmetz theory, optimal compensation capacity, V/V transformer

บทนำ

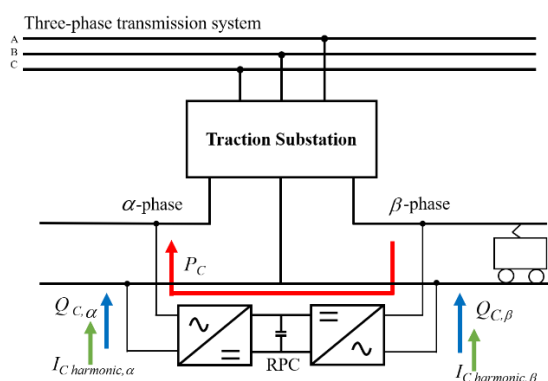
เนื่องด้วยปัญหามลพิษ มนุษย์จึงหันมาใช้วิธีการเดินทางที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด หนึ่งในนั้นคือ การเดินทางด้วยรถไฟไฟฟ้า (electrified railway) (Patra *et al.*, 2010) ประเทศพัฒนาแล้วหรือกำลังพัฒนาหลายประเทศมีแผนงานและโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้างานหลายสายในปัจจุบัน สิ่งที่ตามมาคือปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้นและคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ลดลง ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่เคยเกิดขึ้นในต่างประเทศ ได้แก่ ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากโหลดหนึ่งเฟสของรถไฟไฟฟ้า ตัวประกอบกำลังมีค่าต่ำเกินเกณฑ์ และฮาร์โมนิกส์ซึ่งเกิดจากอุปกรณ์แปลงผันทางไฟฟ้าต่างๆ ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า เช่น อินเวอร์เตอร์ขับเคลื่อน เป็นต้น (Ladoux *et al.*, 2014; Gazafrudi *et al.*, 2015; Yu-quan *et al.*, 2011; Capasso, 1998; Matta and Kumar, 2014) เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้จึงมีการคิดค้นอุปกรณ์ชดเชยอุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ในระบบจ่ายไฟฟ้าของ

รถไฟไฟฟ้า ได้แก่ ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟแบบสถิต (Static VAR Compensator: SVC) ตัวชดเชยซิงโครนัสแบบสถิต (Static Synchronous Compensator: STATCOM) อุปกรณ์ปรับสภาพกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟไฟฟ้า (Railway Power Conditioner: RPC) เป็นต้น (Singh *et al.*, 1999) จากตัวอย่างที่กล่าวมา RPC เป็นอุปกรณ์ชดเชยที่ได้รับการพัฒนาและเสนอแนวคิดโดยนักวิจัยชาวญี่ปุ่นเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2536 (Mochinaga *et al.*, 1993) และถูกพัฒนามาหลายรูปแบบและต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ซึ่งทำให้ RPC เป็นอุปกรณ์ชดเชยที่สามารถแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่กล่าวมาได้ทั้งหมดภายในอุปกรณ์ตัวเดียว นอกเหนือจากการชดเชยด้วยตัวชดเชยที่กล่าวมา หลักการชดเชยสไตน์เมทซ์ (Steinmetz) ยังถูกนำมาประยุกต์ใช้ในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟไฟฟ้าซึ่งจะกล่าวถึงในลำดับถัดไป

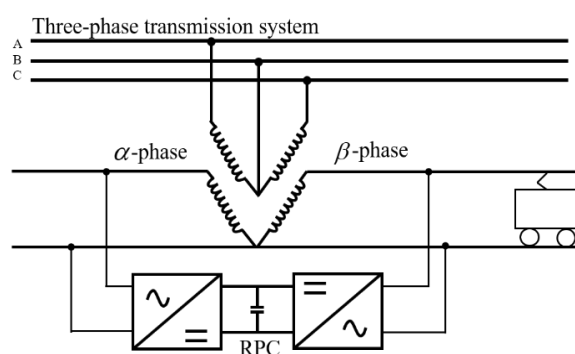
โครงสร้างของ RPC ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัว ที่เชื่อมต่อกันด้วยตัวเก็บประจุกระแสตรง คอนเวอร์เตอร์ตัวหนึ่งเชื่อมต่อกับเฟสจ่ายไฟฟ้า

หนึ่งของหม้อแปลงขับเคลื่อน ส่วนคอนเวอร์เตอร์อีกตัวหนึ่งเชื่อมต่อกับอีกเฟสหนึ่งที่เหลือของหม้อแปลงขับเคลื่อนฝั่งทุติยภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 1 RPC ทำหน้าที่ถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าระหว่างสองเฟสที่จ่ายไฟฟ้าให้รถไฟเพื่อให้ทั้งสองเฟสรับโหลดในปริมาณที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด ในขณะเดียวกัน คอนเวอร์เตอร์แต่ละตัวยังสามารถชดเชยกำลังไฟรีแอกทีฟและฮาร์โมนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จุดประสงค์หลักของการใช้ RPC คือการแก้ปัญหาแรงดันไม่สมดุลในฝั่งสามเฟสที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ดังนั้นหน้าที่หลักของ RPC คือการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจริงระหว่างเฟสที่จ่ายไฟให้รถไฟ หน้าที่รองลงมาคือการชดเชยกำลังไฟรีแอกทีฟและฮาร์โมนิกส์ตามลำดับ โดยจะใช้พิกัดที่เหลือจากการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจริงมาชดเชยกำลังไฟรีแอกทีฟและฮาร์โมนิกส์ นอกจากการทำงานดังกล่าวมาแล้ว ในประเทศญี่ปุ่น RPC ยังสามารถทำหน้าที่ชดเชยกำลังไฟรีแอกทีฟเพียงอย่างเดียว หรือรักษาแรงดันจ่ายไฟฟ้าให้คงที่ได้ เช่นเดียวกับ SVC เรียกการทำงานแบบนี้ว่าโหมด SVC (Ohmi and Yoshii, 2010) จะเห็นได้ว่า RPC มีบทบาทสำคัญอย่างมากในการแก้ปัญหาคุณภาพ

กำลังไฟฟ้าในระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟ โดยเฉพาะประเทศญี่ปุ่นที่มีการเปลี่ยนจากการใช้ SVC มาใช้ RPC แทนในจำนวนมากขึ้นในระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้ายันคันเซนสายโทไกโด (Moriyama *et al.*, 2019) เนื่องจากต้นทุนในการผลิตและติดตั้ง RPC ค่อนข้างสูงมาก จึงมีการคิดค้นวิธีการต่างๆ เพื่อลดขนาดของ RPC หรือตัวชดเชยอื่นๆ วิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การนำหลักการวางจอร์สไคน์เมทซ์มาใช้ชดเชยในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ (Abrahamsson *et al.*, 2017) ยกตัวอย่างงานวิจัยที่ได้ศึกษาการชดเชยร่วมกันของ RPC ในสถานีไฟฟ้าหลายสถานีที่อยู่ติดกันโดยใช้หลักการสไคน์เมทซ์ วิธีการดังกล่าวสามารถลดขนาดของตัวชดเชยได้ถึง 83.33% เมื่อเทียบกับการชดเชยที่ใช้ RPC แบบทั่วไป (Jafarikaleybar *et al.*, 2015) อย่างไรก็ตาม วิธีการชดเชยนี้ทำได้ยากในสถานการณ์จริง เนื่องจากต้องอาศัยสถานีไฟฟ้าหลายสถานีชดเชยร่วมกันรวมถึงต้องมีระบบควบคุมและสื่อสารระหว่างสถานีไฟฟ้า จึงไม่เหมาะสมกับระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟระยะสั้นหรือระบบจ่ายไฟฟ้าที่ใช้สถานีไฟฟ้าไม่มาก



ภาพที่ 1 การเชื่อมต่อและการชดเชย RPC ในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน



ภาพที่ 2 การเชื่อมต่อ RPC กับหม้อแปลงแบบวี

บทความนี้จึงนำเสนอการเปรียบเทียบระหว่างการชดเชยโดยใช้ RPC และการชดเชยโดยใช้หลักการสไลด์เมทซ์ในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนหนึ่งสถานีที่ใช้หม้อแปลงขับเคลื่อนแบบวี (V/V transformer) เพื่อศึกษาความแตกต่างของปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ชดเชย และหาปริมาณกำลังไฟฟ้าชดเชยที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ภายใต้เงื่อนไขคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่กำหนด กล่าวคือตัวชดเชยไม่จำเป็นต้องแก้ปัญหาค่าความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังได้อย่างสมบูรณ์ แต่ชดเชยเพื่อให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและใช้ปริมาณชดเชยน้อยที่สุด (partial compensation) ข้อแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างการชดเชยสองวิธี คือ การชดเชยด้วย RPC ใช้คอนเวอร์เตอร์สองตัว ส่วนการชดเชยด้วยหลักการ สไลด์เมทซ์ต้องใช้คอนเวอร์เตอร์สามตัว สมมติฐานของการศึกษาคือว่า ขนาดพิกัดโดยรวมของตัวชดเชยด้วยหลักการสไลด์เมทซ์จะมีค่าน้อยกว่าพิกัดโดยรวมของ RPC

การชดเชยในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้า

การชดเชยในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ามีหลายรูปแบบ ทั้งการชดเชยในฝั่งปฐมภูมิของสถานีไฟฟ้าและการชดเชยในฝั่งทุติยภูมิ บทความนี้มุ่งประเด็นไปที่การชดเชยในฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงแบบวี 2 แบบ ได้แก่ การชดเชยโดยใช้ RPC และการชดเชยโดยอาศัยหลักการสไลด์เมทซ์ดังต่อไปนี้

1. การชดเชยด้วย RPC

$$P_C = \frac{P_{L\alpha} - P_{L\beta}}{2}$$

$$Q_{Ca} = Q_{La} - (P_{La} - P_C) \tan(\pi/6)$$

$$Q_{Cb} = Q_{Lb} + (P_{Lb} + P_C) \tan(\pi/6)$$

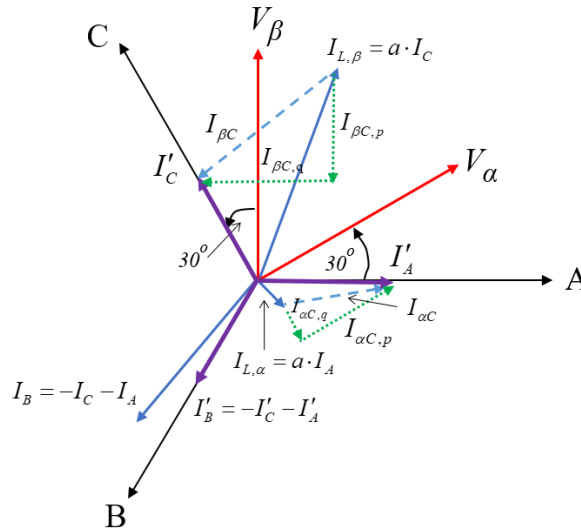
เมื่อ P_C คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ถ่ายโอนระหว่างเฟส α และ β

ลักษณะการติดตั้ง RPC ในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ใช้หม้อแปลงแบบวี แสดงดังภาพที่ 2 สถานีไฟฟ้าหนึ่งสถานีทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้รถไฟฟ้าทั้งสองทิศทางโดยใช้ไฟฟ้าต่างเฟสกัน จึงกำหนดให้เฟสหนึ่งเรียกว่าเฟส α และอีกเฟสหนึ่งเรียกว่าเฟส β หลักการพื้นฐานของการชดเชยด้วย RPC ประกอบด้วย (1) การปรับสมดุลโหลดกำลังไฟฟ้าจริงโดยการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจริงระหว่างเฟส α และ β (2) การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟซึ่งสามารถใช้คอนเวอร์เตอร์แต่ละเฟสแยกกันชดเชยได้อย่างอิสระ (3) การชดเชยฮาร์โมนิกส์ซึ่งสามารถแยกชดเชยในแต่ละเฟสได้เช่นกัน เนื่องจากหม้อแปลงแบบวีไม่ใช่หม้อแปลงชนิดสมดุล (balancing transformer) โดยธรรมชาติ เพียงแค่การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจริงระหว่างเฟสจ่ายไฟฟ้าให้รถไฟฟ้าและการชดเชยโหลดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจึงไม่เพียงพอต่อการสร้างความสมดุลแรงดันไฟฟ้าสามเฟส หรือกล่าวได้ว่ามุมเฟสของเฟสจ่ายไฟฟ้าให้รถไฟฟ้าไม่ตรงกับมุมเฟสของแรงดันต่อเฟสในฝั่งสามเฟสอย่างสมบูรณ์ ดังนั้น จึงต้องมีการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพิ่มเติม ดูแผนภาพเฟสประกอบในภาพที่ 3 และปริมาณการชดเชยทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟทั้งสองเฟสแสดงดังสมการที่ (1) (2) และ (3) ตามลำดับ (Joseph and Thomas, 2014) ปริมาณการชดเชยในสมการดังกล่าวเป็นปริมาณชดเชยเต็มพิกัด (full compensation capacity) ซึ่งใช้เพื่อชดเชยให้ตัวประกอบกำลังเท่ากับหนึ่งและความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์

$Q_{C\alpha}, Q_{C\beta}$ คือ กำลังไฟฟัรืแอกทีฟชดเชยสำหรับเฟส α และ β

$P_{L\alpha}, P_{L\beta}$ คือ โหลดกำลังไฟฟ้าจริงเฟส α และ β

$Q_{L\alpha}, Q_{L\beta}$ คือ โหลดกำลังไฟฟัรืแอกทีฟเฟส α และ β



ภาพที่ 3 แผนภาพเฟสของการชดเชยด้วย RPC

2. การชดเชยด้วยหลักการสไต้นเมทซ์

หลักการชดเชยด้วยวงจรสไต้นเมทซ์ในระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงแบบวีอาสัการชดเชยครบทั้งสามเฟสในฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงแบบวี ซึ่งแตกต่างกับการชดเชยด้วย RPC ที่ชดเชยเฉพาะสองเฟสที่จ่ายไฟฟ้าให้รถไฟฟ้าและอาศัยการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจริงระหว่างสองเฟสนั้น การชดเชยแบบสไต้นเมทซ์อาศัยเฉพาะกำลังไฟฟัรืแอกทีฟในการชดเชยทั้งสามเฟส ภาพที่ 4 และ 5 แสดงแผนภาพอย่างง่ายของการชดเชยกรณี

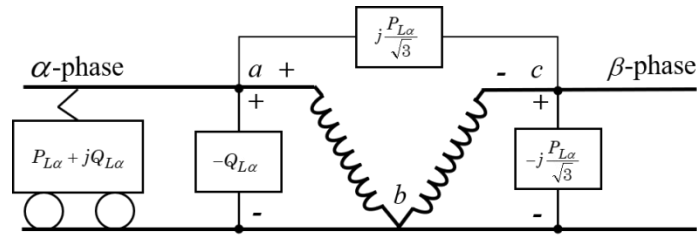
โหลดรถไฟฟ้าอยู่เฉพาะในเฟส α และ β ตามลำดับจากแผนภาพนี้ สามารถคำนวณหาปริมาณการชดเชยของแต่ละเฟสได้ดังสมการที่ (4) - (6) (Abrahamsson *et al.*, 2017) เครื่องหมายลบในสมการหมายถึงกำลังไฟฟัรืแอกทีฟเชิงเก็บประจุ (capacitive reactive power) ในการศึกษาี้ไม่ได้กำหนดชนิดของตัวชดเชยที่ติดตั้งในแต่ละเฟส ตัวชดเชยอาจจะเป็นได้ทั้งอุปกรณ์แบบแอกทีฟและพาสซีฟ แต่จะให้ความสนใจเพียงปริมาณการชดเชยที่จำเป็นต้องใช้เพื่อแก้ปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าเท่านั้น

$$Q_{S,C\alpha} = -Q_{L\alpha} + \frac{P_{L\beta}}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

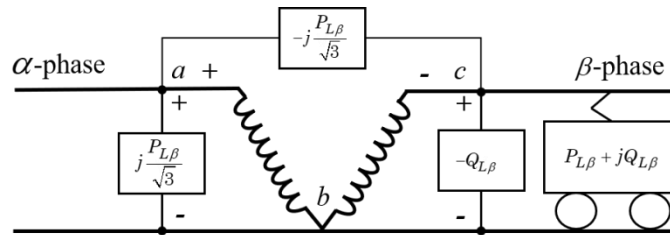
$$Q_{S,C\beta} = -Q_{L\beta} - \frac{P_{L\alpha}}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

$$Q_{S,Cac} = \frac{P_{L\alpha} - P_{L\beta}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

เมื่อ $Q_{S,C\alpha}, Q_{S,C\beta}, Q_{S,Cac}$ คือ กำลังไฟฟัรืแอกทีฟชดเชยในเฟส α เฟส β และเฟส ac ตามลำดับ



ภาพที่ 4 การชดเชยแบบสไตน์เมทซ์ของโหลดเฟส α



ภาพที่ 5 การชดเชยแบบสไตน์เมทซ์ของโหลดเฟส β

วิธีดำเนินการวิจัย

1. แบบจำลองและวิธีการคำนวณ

องค์ประกอบของระบบจ่ายไฟฟ้าในการศึกษานี้ประกอบด้วยหม้อแปลงขับเคลื่อนซึ่งในที่นี้คือหม้อแปลงแบบวี อุปกรณ์ชดเชย และโหลดรถไฟฟ้า แผนภาพแบบจำลองของระบบแสดงดังภาพที่ 6 หม้อแปลงแบบวีใช้แบบจำลองอย่างง่ายของหม้อแปลงหนึ่งเฟสที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันและอิมพีแดนซ์รั่วไหล (leakage impedance: Z_r) ทั้งเฟส α และ β การชดเชยของตัวชดเชยทั้ง RPC และตัวชดเชยที่ใช้หลักการสไตน์เมทซ์แทนด้วยการไหลของกำลังไฟฟ้าหรือแบบจำลองกำลังไฟฟ้าคงที่ ในส่วนโหลดรถไฟฟ้าใช้แบบจำลองกำลังไฟฟ้าคงที่เช่นเดียวกัน โดยโหลดรถไฟฟ้าและตัวชดเชยเชื่อมต่อโดยตรงกับหม้อแปลงแบบวี แบบจำลองในส่วนจุดเชื่อมต่อรับไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟฟ้าสามเฟสใช้อิมพีแดนซ์แทนพิกัดกำลังไฟฟ้าลัดวงจรของระบบไฟฟ้าสามเฟส (grid's short-circuit impedance:

Z_{sc}) จากการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าพื้นฐาน จะได้สมการที่ใช้คำนวณแบบจำลองที่กล่าวมาดังสมการต่อไปนี สมการที่ (7) แสดงการคำนวณแรงดันเฟส ณ จุดเชื่อมต่อ (Point of Common Coupling: PCC) สมการที่ (8) แสดงการคำนวณกระแสโหลดและกระแสชดเชยเฟส ac ของตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ สมการที่ (9) แสดงการคำนวณแรงดันระหว่างเฟสฝั่งปฐมภูมิที่ได้จากวงจรสมมูลหม้อแปลง สมการที่ (10) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฝั่งปฐมภูมิและทุติยภูมิ และสมการที่ (11) แสดงความสัมพันธ์ของกระแส ณ จุดเชื่อมต่อระหว่างหม้อแปลง โหลด และตัวชดเชย วิธีการคำนวณนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับทั้งการชดเชยด้วย RPC และการชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ สำหรับการชดเชยด้วย RPC สามารถกำหนดให้กำลังไฟฟ้าชดเชยของเฟส ac ในฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงแบบวีเป็นศูนย์

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{sc} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{sc} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$I_{L\alpha} = \left(\frac{S_{L\alpha}}{V_{L\alpha}} \right)^*, I_{L\beta} = \left(\frac{S_{L\beta}}{V_{L\beta}} \right)^*, I_{ac} = \left(\frac{S_{ac}}{V_{ac}} \right)^* \quad (8)$$

$$v_{AB} = a(V_{L\alpha} + I_{s\alpha}Z_T), v_{CB} = a(V_{L\beta} + I_{s\beta}Z_T) \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{a} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$I_{s\alpha} = I_{L\alpha} + I_{ac}, I_{s\beta} = I_{L\beta} - I_{ac} \quad (11)$$

เนื่องจากระบบสมการของแบบจำลองที่นำเสนอไม่เป็นแบบเชิงเส้น จึงใช้การคำนวณแบบวนรอบ (iterative calculation) ซึ่งแสดงขั้นตอนกระบวนการคำนวณในภาพที่ 7 ประเด็นหลักของการคำนวณแบบวนรอบ คือ การปรับปรุงค่าแรงดันสั่งป้อนภูมิโดยการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างเฟสสั่งป้อนภูมิของหม้อแปลง 2 ค่าที่คำนวณจากแบบจำลองของหม้อแปลงสั่งป้อนภูมิ (สมการที่ (9)) และคำนวณจากระบบจ่ายไฟฟ้าสามเฟส (สมการที่ (7)) เมื่อแรงดันทั้งสองค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันตามเกณฑ์ที่กำหนด แสดงว่าการคำนวณจากชุดสมการที่กล่าวมาทั้งหมดให้ผลลัพธ์ที่ตรงกัน จึงได้ผลเฉลยของการคำนวณ ผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้จากการคำนวณประกอบด้วยตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้า (Voltage Unbalance Factor: VUF) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างขนาดของแรงดันลำดับลบต่อขนาดแรงดันลำดับบวกในเฟสสามเฟส ($|V_-|/|V_+|$) ตัวประกอบกำลังของแต่ละเฟส โหลดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงทั้งสั่งป้อนภูมิและทุติยภูมิ รวมถึงแรงดันและกระแสโหลดรถไฟฟ้

2. การจำลองผลของกรณีศึกษา

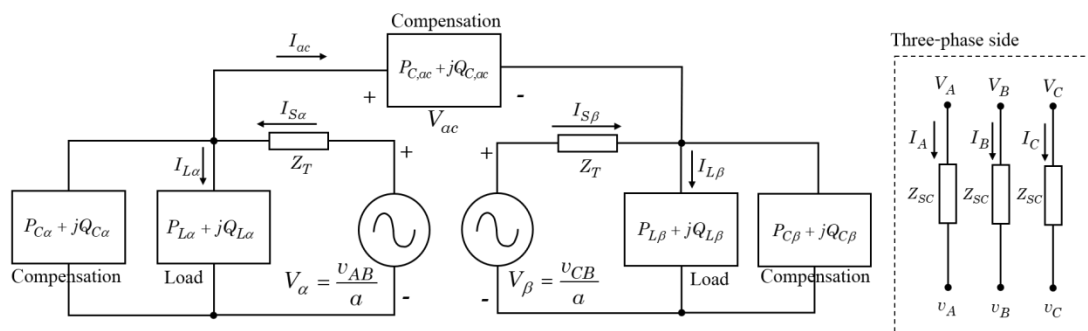
การจำลองผลในบทความนี้แบ่งออกเป็น 2 ระบบ ได้แก่ ระบบที่ชดเชยด้วย RPC และระบบที่ชดเชยด้วยหลักการสโตนเมทซ์ แต่ละระบบจะได้รับการทดสอบภายใต้สภาพโหลดที่ก่อให้เกิดความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้ามากที่สุดและต้องการปริมาณการชดเชยมากที่สุดเช่นกัน โดยกำหนดให้ โหลด

กำลังไฟฟ้าจริงของเฟส β เท่ากับ 15 MW โดยอ้างอิงจากการกระจายโหลดในสถานีไฟฟ้าของงานวิจัยในอดีต (Hu *et al.*, 2017) ในขณะที่เฟส α ไม่มีโหลด และตัวประกอบกำลังของโหลดเฟส β แบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ 0.80 0.85 และ 0.90 ซึ่งกำหนดจากระบบจ่ายไฟฟ้าที่มีตัวประกอบกำลังของโหลดรถไฟฟ้ต่ำ โดยเฉพาะการใช้ตัวจรแบบ AC-DC (Hu *et al.*, 2017) พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟฟ้าและหม้อแปลงแบบวีแสดงในตารางที่ 1 เนื่องจากประเทศไทยยังไม่มีกำหนดมาตรฐานคุณภาพกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้ในปัจจุบัน จึงกำหนดเป้าหมายของการชดเชยในการศึกษานี้ให้ VUF มีค่าไม่เกิน 2% และตัวประกอบกำลังที่ PCC มีค่าไม่ต่ำกว่า 0.90 ตามมาตรฐานประจำชาติสาธารณรัฐประชาชนจีน GB/T15543-2008 ในส่วนเป้าหมายการชดเชยตัวประกอบกำลัง (targeted power factor: PF*) เลือกตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.95 เพื่อให้ได้คุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ดีขึ้นและเพื่อกรณีฉุกเฉินที่ค่าตัวประกอบกำลังอาจลดลงต่ำกว่า 0.90 นอกจากนี้ ถ้าเลือกเป้าหมายตัวประกอบกำลังมากกว่า 0.95 จะส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณการชดเชยมากขึ้นเกินความจำเป็น (Hu *et al.*, 2017)

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดถูกนำมาใช้หาปริมาณชดเชยน้อยที่สุดที่เป็นไปได้เพื่อให้ได้เป้าหมายคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่กำหนด ในบทความนี้เลือกใช้วิธีกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm

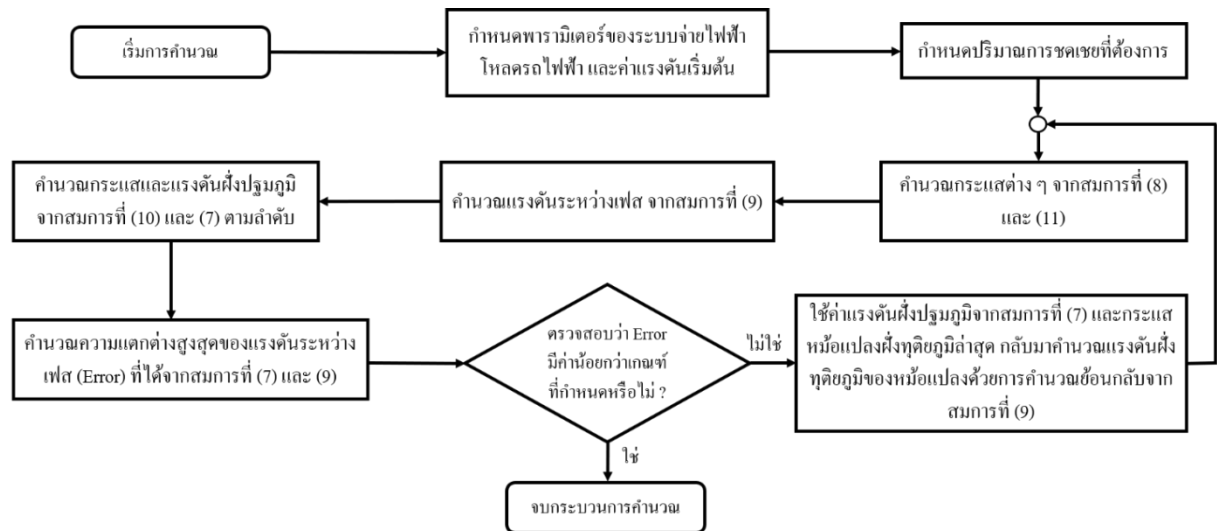
Optimisation: PSO) ซึ่งใช้ฟังก์ชันการคำนวณในโปรแกรมแมตแล็บ (MATLAB) ด้วยเหตุที่วิธีดังกล่าวสามารถหาจุดต่ำสุดของฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นและไม่ต่อเนื่องได้ดี ฟังก์ชันที่ใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด คือ กระบวนการคำนวณในภาพที่ 7 ที่มีอินพุตเป็นปริมาณชดเชยซึ่งคิดเป็นร้อยละเทียบกับปริมาณชดเชยแบบสมบูรณ์ และมีเอาต์พุตหรือค่าของฟังก์ชัน (function value) เป็นปริมาณการชดเชยที่คำนวณได้รวมกับค่าโทษ (penalty factor) ในกรณีเป้าหมายไม่เป็นไปตามที่กำหนด ดังแสดงในสมการที่ (12) เมื่อ $S_{com,0}$ คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้าชดเชยก่อนปรับเพิ่มค่าโทษ PF_A , PF_B และ PF_C คือ ตัวประกอบกำลังแต่ละเฟส γ_1 คือ ตัวประกอบที่ใช้ปรับค่าโทษของตัวประกอบกำลัง และ γ_2 คือ ตัวประกอบที่ใช้ปรับค่าโทษของ VUF ($\gamma_1 = \gamma_2 = 10^6$ ในการศึกษานี้)

$$Function\ value = S_{com,0} + \gamma_1 \left[(PF_A - PF^*)^2 + (PF_B - PF^*)^2 + (PF_C - PF^*)^2 \right] + \gamma_2 (VUF - VUF^*)^2 \quad (12)$$



ภาพที่ 6 แบบจำลองการคำนวณการชดเชยของสถานีไฟฟ้าที่ใช้หม้อแปลงแบบวี

ค่าโทษมีทั้งหมด 4 พจน์ คือ ค่าโทษของตัวประกอบกำลังสามค่าและค่าโทษของ VUF ค่าโทษแต่ละพจน์จะปรากฏก็ต่อเมื่อการชดเชยไม่เป็นไปตามเป้าหมายเท่านั้น ($PF < PF^*$ และ $VUF > 2\%$) เพื่อปรับให้ค่าของฟังก์ชันสูงขึ้นและทำให้การคำนวณนั้นไม่เป็นคำตอบของการหาค่าเหมาะสมที่สุด ในส่วนการคำนวณพิกัดโดยรวมของตัวชดเชย พิกัดของ RPC จะถูกกำหนดด้วยขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่ชดเชยมากที่สุด กล่าวคือพิกัดของคอนเวอร์เตอร์ทั้งสองตัวของ RPC ต้องมีขนาดเท่ากัน ดังนั้น ขนาดรวมของ RPC จะเท่ากับ $2 \times \max(S_{converter1}, S_{converter2})$ สำหรับตัวชดเชยด้วยหลักการสโตนเมทซ์ พิกัดโดยรวมเท่ากับผลรวมพิกัดของแต่ละคอนเวอร์เตอร์ซึ่งมีค่าไม่เท่ากันได้



ภาพที่ 7 แผนภาพลำดับการทำงานของการคำนวณแบบวนรอบ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ระบบไฟฟ้า (Hu *et al.*, 2017)

ระดับแรงดันระบบไฟฟ้าสามเฟส	110 kV
พิกัดกำลังหม้อแปลงแบบวี	20 MVA (10 MVA ต่อเฟส)
พิกัดลัดวงจรของระบบจ่ายไฟฟ้า	486 MVA
อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง (Z_T)	10% (ต่อเฟส)
อัตราส่วนหม้อแปลง (a)	110 kV: 27.5 kV

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการจำลองที่ได้ประกอบด้วยปริมาณการชดเชยของ RPC และตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ที่คิดเป็นร้อยละเทียบกับปริมาณชดเชยแบบสมบูรณ์ (full compensation) ดังแสดงในตารางที่ 2 พิกัดรวมของ RPC และตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ ดังแสดงในตารางที่ 3 ตัวประกอบความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังก่อนและหลังชดเชย ดังแสดงในตารางที่ 4 - 6 คุณภาพกำลังไฟฟ้าก่อนการชดเชยต่ำกว่ามาตรฐาน GB/T15543-2008 (Hu *et al.*, 2017) อย่างชัดเจน ค่า VUF เกิน 2% ตัวประกอบกำลังเฟส C มีค่าต่ำถึง 0.127 ในกรณีที่ 1 ส่วนของเฟส A มีค่าใกล้เคียง

เนื่องจากไม่มีโหลดในเฟสนี้ นอกจากนี้แรงดันตกในเฟสที่มีโหลด (V_β) มีค่ามากถึง 25.4% ในกรณีที่ 1

ผลการจำลองพบว่า หลังจากการชดเชย VUF มีค่าน้อยกว่า 2% ทุกกรณี อย่างไรก็ตามความไม่สมดุลไม่ลดลงทั้งหมดเนื่องจากการใช้การชดเชยบางส่วน (partial compensation) ตัวประกอบกำลังเฟส C ได้รับการชดเชยจนมีค่าตามเป้าหมาย 0.95 ในทุกกรณีของทั้ง RPC และตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ แรงดันที่สถานีไฟฟ้าก็ได้รับการปรับปรุงจากการชดเชยเช่นเดียวกัน แรงดันเฟส β มีค่าเพิ่มขึ้นจากค่านอมิแนล (nominal voltage: 27.5 kV) เฉลี่ยประมาณ 2% ในแต่ละกรณี ส่วนแรงดันเฟส α สำหรับการชดเชยด้วย RPC มีค่าต่ำลงจากค่านอมิแนลประมาณ 3% เนื่องจาก RPC ต้องถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจริงจากเฟส α ไปยังเฟส β ซึ่งเทียบเท่า

กับการจ่ายโหลดในปริมาณหนึ่ง จึงส่งผลให้เกิดแรงดันตกในเฟสนี้ ถึงกระนั้นก็ตามเฟส α ไม่มีการจ่ายโหลด จึงถือว่าไม่ใช่ปัญหาในกรณีนี้ ดังนั้น การชดเชยแบบสไตน์เมทซ์สามารถรักษาแรงดันที่หม้อแปลงได้ดีกว่าการชดเชยด้วย RPC ปริมาณร้อยละการชดเชยในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า กระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดสามารถหาปริมาณการชดเชยที่จำเป็นและน้อยที่สุดตามเงื่อนไขคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่กำหนดได้ ตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ใช้ปริมาณชดเชยของเฟส α เฟส β และเฟส ac เท่ากับร้อยละ 41.76 100 และ 68.06 เทียบกับปริมาณชดเชยแบบสมบูรณ์เท่ากันทั้งสามกรณี ตามลำดับ และให้ผลลัพธ์ VUF หลังการชดเชยเท่ากับ 1.311% และตัวประกอบกำลังหลังการชดเชยเท่ากับ $-0.95 (PF_A)$ - $0.966 (PF_B)$ $0.95 (PF_C)$ เท่ากันทั้งสามกรณีเช่นกัน ในส่วนของ RPC ปริมาณชดเชยในเฟส β คิดเป็นประมาณร้อยละ 80 - 85 ของปริมาณชดเชยแบบสมบูรณ์ ซึ่งเป็นปริมาณชดเชยที่ทำให้ตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับค่าเป้าหมายพอดี ค่าร้อยละของปริมาณกำลังไฟฟ้าจริงที่ถ่ายโอนระหว่างเฟส (P_C) ลดลงเมื่อตัวประกอบกำลังโหลดมีค่ามากขึ้น ในทำนองเดียวกัน ค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ทำให้พิกัดรวมของ RPC น้อยที่สุดเพื่อให้ได้คุณภาพกำลังไฟฟ้าตามเป้าหมาย ค่า VUF จากการชดเชยด้วย RPC อยู่ในช่วง 0.66% - 1.15% และตัวประกอบกำลังหลังการชดเชยเท่ากับ $0.99 (PF_A) \pm 0.99 (PF_B)$ $0.95 (PF_C)$ พิกัดรวมของตัวชดเชยทั้งสองจากการชดเชยด้วยปริมาณชดเชยที่เหมาะสมที่สุดมีค่าน้อยกว่าค่าจากการชดเชยแบบสมบูรณ์อย่างชัดเจน ยิ่งไปกว่านั้นจะเห็นว่าพิกัดเหมาะสมที่สุดของตัวชดเชยด้วยหลักการส

ไตน์เมทซ์มีค่าน้อยกว่าพิกัดเหมาะสมที่สุดของ RPC 32% 30.15% และ 27.68% ตามลำดับกรณี เมื่อเทียบกับขนาดของ RPC ที่ชดเชยร่วมกันในสถานีไฟฟ้าหลายสถานีที่สามารถลดขนาดตัวชดเชยได้มากถึง 83.33% (Jafarikaleybar *et al.*, 2015) ยิ่งถือว่าลดลงได้น้อยกว่า เพราะว่าการชดเชยที่นำเสนอในบทความนี้เป็นการชดเชยในสถานีไฟฟ้าเพียงหนึ่งสถานีซึ่งจะไม่สามารถอาศัยประโยชน์จากตัวชดเชยจากสถานีอื่นได้ ดังนั้น การชดเชยแบบสไตน์เมทซ์ที่นำเสนอจึงเหมาะกับระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้าที่ต้องการการชดเชยแยกเป็นรายสถานี หรือระบบจ่ายไฟฟ้าที่รับไฟฟ้าสามเฟสมาจากคนละแหล่งกัน

จากการจำลองผลได้ผลสรุปชัดเจนว่า การติดตั้งตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ใช้พิกัดที่เหมาะสมที่สุดน้อยกว่าการติดตั้ง RPC และรักษาระดับแรงดันที่สถานีไฟฟ้าได้ดีกว่า จึงอนุมานจากพิกัดได้ว่าใช้เงินลงทุนน้อยกว่า โดยจากงานวิจัยในอดีตพบว่า ราคาคอนเวอร์เตอร์ของ RPC เริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 60 ดอลลาร์สหรัฐ ต่อกิโลวัตต์แอมแปร์ (Ghassemi *et al.*, 2014) อย่างไรก็ตามตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ใช้คอนเวอร์เตอร์มากกว่า RPC หนึ่งคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งหมายความว่าอาจใช้พื้นที่ติดตั้งมากกว่าและมีระบบควบคุมที่ซับซ้อนมากกว่า บทความนี้ไม่ได้ศึกษาผลกระทบดังกล่าวต่อราคาของตัวชดเชย อีกหนึ่งสาเหตุที่พิกัดของ RPC มากกว่า คือ การเลือกพิกัด RPC ถูกกำหนดด้วยคอนเวอร์เตอร์ที่มีพิกัดมากกว่า ในขณะที่พิกัดของแต่ละคอนเวอร์เตอร์ของตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ ไม่จำเป็นต้องมีขนาดเท่ากันได้

ตารางที่ 2 ปริมาณร้อยละการชดเชยเทียบกับปริมาณการชดเชยแบบสมบูรณ์

ตัวประกอบกำลังโหลด	ปริมาณชดเชยของ RPC			ปริมาณชดเชยด้วยหลักการสไต้นเมทซ์		
	P_C (%)	$Q_{C\alpha}$ (%)	$Q_{C\beta}$ (%)	$Q_{S,C\alpha}$ (%)	$Q_{S,C\beta}$ (%)	$Q_{S,Cac}$ (%)
0.80 (กรณีที่ 1)	77.79	100*	85.28	41.76	100	68.06
0.85 (กรณีที่ 2)	70.17	100*	83.07	41.76	100	68.06
0.90 (กรณีที่ 3)	61.75	100*	80.24	41.76	100	68.06

หมายเหตุ *ปริมาณชดเชยเป็นศูนย์เนื่องจากไม่มีโหลดในเฟส α

ตารางที่ 3 พิกัดของ RPC และตัวชดเชยด้วยหลักการสไต้นเมทซ์

กรณี	พิกัดของ RPC (MVA)		พิกัดของตัวชดเชยด้วยหลักการสไต้นเมทซ์ (MVA)	
	Full compensation	Optimal compensation	Full compensation	Optimal compensation
1	34.583	30.532	28.570	20.761
2	31.108	26.928	26.617	18.808
3	27.618	23.196	24.585	16.776

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์อื่นๆ ก่อนการชดเชย

กรณี	VUF (%)	PF_A	PF_B	PF_C	V_α (kV)	V_β (kV)
1	5.392	0.985	0.948	0.127	27.700	20.516
2	4.690	0.997	0.975	0.241	27.804	22.012
3	4.154	-0.999	0.994	0.361	27.895	23.299

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์อื่นๆ หลังการชดเชยด้วย RPC

กรณี	VUF (%)	PF_A	PF_B	PF_C	V_α (kV)	V_β (kV)
1	0.668	0.998	-0.999	0.950	26.580	27.971
2	0.892	0.998	0.994	0.950	26.741	28.071
3	1.155	0.998	-0.977	0.950	26.946	28.183

ตารางที่ 6 ผลลัพธ์อื่นๆ หลังการชดเชยด้วยหลักการสไต้นเมทซ์

กรณี	VUF (%)	PF_A	PF_B	PF_C	V_α (kV)	V_β (kV)
1	1.311	-0.950	-0.966	0.950	27.641	28.123
2	1.311	-0.950	-0.966	0.950	27.641	28.123
3	1.311	-0.950	-0.966	0.950	27.641	28.123

สรุป

บทความนี้ศึกษาการเปรียบเทียบการชดเชยด้วย RPC และด้วยตัวชดเชยที่ใช้หลักการสไตน์เมทซ์ในสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนสำหรับรถไฟที่ใช้หม้อแปลงแบบวี และนำเสนอแบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้า วิธีการคำนวณพิกัดที่เหมาะสมที่สุดของตัวชดเชยผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า วิธีการคำนวณที่นำเสนอสามารถนำมาใช้หาพิกัดรวมที่เหมาะสมที่สุดหรือน้อยที่สุดของ RPC และตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ได้ ผลลัพธ์ คือ การชดเชยทั้งสองแบบสามารถแก้ไขปัญหาคอนเวอร์เตอร์กำลังไฟฟ้าได้ตามเป้าหมาย กล่าวคือ ความไม่สมดุลแรงดันไฟฟ้าหลังการชดเชยมีค่าอยู่ในช่วง 0.6% - 1.3% และตัวประกอบกำลังแต่ละเฟสมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.95 ตามกำหนด พิกัดรวมที่เหมาะสมที่สุดของตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์น้อยกว่าพิกัดรวมของ RPC โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 30 ดังนั้น การชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์ใช้พิกัดชดเชยน้อยกว่าการชดเชยด้วย RPC รวมถึงสามารถรักษาระดับแรงดันที่สถานีไฟฟ้าได้ดีกว่า RPC ภายใต้อำนาจการชดเชยเดียวกัน จึงประเมินในเบื้องต้นจากขนาดพิกัดได้ว่าการใช้งานตัวชดเชยด้วยหลักการสไตน์เมทซ์จะใช้เงินลงทุนน้อยกว่า อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ยังไม่ได้พิจารณาถึงผลของจำนวนคอนเวอร์เตอร์ในตัวชดเชยพื้นที่การติดตั้ง การซ่อมบำรุง และระบบควบคุมต่อราคาตัวชดเชย บทความนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้หรือศึกษาเพิ่มเติม โดยพิจารณาโหลดรถไฟตลอดช่วงการให้บริการเพื่อนำมาหาพิกัดติดตั้งที่เหมาะสมของตัวชดเชยที่ครอบคลุมโหลดตามสภาพจริง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) รุ่นที่ 18 (รอบที่ 1)

ประจำปีงบประมาณ 2559 สัญญาเลขที่ PHD/0028/2558

เอกสารอ้างอิง

- Abrahamsson, L., Belea, R., Klerfors, B., Schutte, T. and Warner, B. 2017. Modern methods for balancing of single phase loads when feeding a.c. electrified railways. **eb - Elektrische Bahnen** 115(6-7): 378-384.
- Capasso, A. 1998. The power quality concern in railway electrification studies, pp. 647-652. **In 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power.** IEEE, Athens.
- Gazafrudi, S.M.M., Langerudy, A.T., Fuchs, E.F. and Al-Haddad, K. 2015. Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective. **IEEE Transactions on Industrial Electronics** 62(5): 3081-3090.
- Ghassemi, A., Fazel, S.S., Maghsoud, I. and Farshad, S. 2014. Comprehensive study on the power rating of a railway power conditioner using thyristor switched capacitor. **IET Electrical Systems in Transportation** 4(4): 97-106.
- Hu, S., Xie, B., Li, Y., Gao, X., Zhang, Z., Luo, L., Krause, O. and Cao, Y. 2017. A Power Factor-Oriented Railway Power Flow Controller for Power Quality Improvement in Electrical Railway Power System. **IEEE Transactions on Industrial Electronics** 64(2): 1167-1177.

- Jafarikaleybar, H., Kazemzadeh, R. and Farshad, S. 2015. Power Rating Reduction of Railway Power Quality Compensator Using Steinmetz Theory, pp. 442-447. *In 6th International Power Electronics Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC2015)*. IEEE, Tehran.
- Joseph, V.P. and Thomas, J. 2014. Power quality improvement of AC railway traction using railway static power conditioner a comparative study, *In International Conference on Power Signals Control and Computations (EPSCICON)*. IEEE, Thrissur.
- Ladoux, P., Fabre, J. and Caron, H. 2014. Power Quality Improvement in ac Railway Substations: The concept of chopper-controlled impedance. *IEEE Electrification Magazine* 2(3): 6-15.
- Matta, V. and Kumar, G. 2014. Unbalance and voltage fluctuation study on AC traction system, pp. 315-320. *In International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*. IEEE, Chennai.
- Mochinaga, Y., Hisamizu, Y., Takeda, M., Miyashita, T. and Hasuike, K. 1993. Static power conditioner using GTP converters for AC electric railway, pp. 641-646. *In Power Conversion Conference*. IEEE, Yokohama.
- Moriyama, H., Shimizu, T., Kai, M. and Kunomura, K. 2019. Integrating the system of the electric power compensators for the Tokaido Shinkansen, pp. 1-6. *In World Congress on Railway Research (WCRR2019)*. IEEE, Tokyo.
- Ohmi, M. and Yoshii, Y. 2010. Validation of Railway Static Power Conditioner in Tohoku Shinkansen on actual operation, pp. 2160-2164. *In International Power Electronics Conference (ECCE ASIA)*. IEEE, Sapporo.
- Patra, A.P., Kumar, U. and Larsson Kraik, P.O. 2010. Availability target of the railway infrastructure: an analysis. *In Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE, San Jose.
- Singh, B., Al-Haddad, K. and Chandra, A. 1999. A Review of Active Filters for Power Quality Improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 46(5): 960-971.
- Yu-quan, L., Guo-pei, W., Huang-sheng, H. and Li, W. 2011. Research for the effects of high-speed electrified railway traction load on power quality, pp. 569-573. *In 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*. IEEE, Weihai.

การประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับฟาร์มอัจฉริยะ

Application with the Wireless Sensor Network in Smart Farms

ชนิกานต์ รอดมรณ์¹ มธุรส ผ่านเมือง^{2*} และ วีรศักดิ์ จงเลขา³

Chonnikarn Rodmorn¹, Mathuros Panmuang^{2*} and Weerasak Jonglakha³

Received: 9 March 2020, Revised: 8 May 2020, Accepted: 20 May 2020

บทคัดย่อ

การปลูกผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คโดยควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตจะต้องอาศัยการดูแลอย่างสม่ำเสมอ เช่น การรดน้ำจะต้องให้ชุ่มแต่ไม่แฉะ ดังนั้นเกษตรกรจะต้องคอยตรวจสอบความชื้นในดินเป็นประจำ ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยได้เห็นว่า การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (Internet of Things: IoT) จะสามารถช่วยควบคุมปัจจัยดังกล่าวได้ การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเซนเซอร์ในการตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และความชื้นในดิน มาช่วยลดภาระของเกษตรกร โดยแบ่งวิธีการวิจัยออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ การวางแผน การวิเคราะห์ การออกแบบ และการนำไปใช้ ผลที่ได้จากการวิจัยพบว่า เซนเซอร์สามารถตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ ความชื้นในดิน และส่งข้อมูลจากการตรวจวัดผ่าน MQTT โปรโตคอลไปยังโหนดที่เป็นแม่ข่าย (Server Node) ในทุกนาที เพื่อประมวลผล หากพบว่าค่าที่วัดได้ต่ำกว่าที่กำหนดไว้ โหนดแม่ข่ายจะส่งการให้ปั๊มน้ำทำงานโดยการรดน้ำในแปลงผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค ซึ่งระบบตรวจวัดดังกล่าวจะช่วยตรวจสอบแปลงเพาะปลูก และช่วยรดน้ำอัตโนมัติ ทำให้เกษตรกรประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย จากเดิมเกษตรกรใช้เวลารดน้ำประมาณ 7-10 นาที เมื่อมีระบบจะทำให้ลดเวลาลงได้เหลือเพียง 1 นาทีเท่านั้น และปริมาณการใช้น้ำลดลงจาก 3-4 ลิตรต่ออนาที่ เหลือ 2-3 ลิตรต่ออนาที่

คำสำคัญ: อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, ฟาร์มอัจฉริยะ, เซนเซอร์ไร้สาย, เทคโนโลยีสารสนเทศ

¹ ภาควิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

¹ Department of Applied Statistics, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand.

² สาขาวิชาวิศวกรรมการเรียนรู้และเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

² Program in Learning Innovation and Information Technology, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Khlong Luang, Pathum Thani 12110, Thailand.

³ สาขาวิชาการจัดการ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี เขตทวีวัฒนา กรุงเทพมหานคร 10170

³ Program in Management, Faculty of Business Administration, Bangkok Thonburi University, Thawiwatthana, Bangkok 10170, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): mathuros_p@rmutt.ac.th Tel: 06 4915 6653

ABSTRACT

Growing green oak lettuce by controlling the factors affecting growth requires continual attention to develop the lettuce plant. For instance, watering must be consistently moist rather than soaking wet. Therefore, farmers have to inspect humidity in the soil regularly and apply enough irrigation to keep soil moist. For this reason, the Internet of Things (IoT) was applied to resolve the mentioned problem. The proposed technology aims to use the sensing system to measure the degree of temperature, humidity, and soil moisture in order to reduce the burden of farmers by dividing the research methodology into 4 steps: planning, analyzing, designing and implementing. The findings showed that the sensor could detect the degree of temperature, air humidity, and soil moisture as well as transfer the data from measurement via MQTT protocol to the server node for processing every minute. If the detected degree of soil humidity is lower than the set value, then the server node will start the water pumping system in the green oak lettuce farm. The soil detection system will check the farming plots automatically and save farmers' time and expenses. The proposed system requires less amount of watering time (1 minute) than the traditional method (7-10 minutes) and decreases water consumption from 3-4 liters to 2-3 liters per minute.

Key words: IoT, smart farms, wireless sensors, information technology

บทนำ

เมื่อเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีจึงเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ด้วยเหตุนี้องค์กรต่างๆ จึงนิยมใช้เทคโนโลยีในการบริหารจัดการองค์กรเพื่อให้เกิดความสะดวก รวดเร็ว และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน โดยเฉพาะการเลือกใช้เทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ (Panmuang and Porrawatpreyakorn, 2016) ไม่เว้นแม้แต่อาชีพเกษตรกร ซึ่งจัดเป็นอาชีพหลักของประเทศไทย แต่งานวิจัยด้านเทคโนโลยีสารสนเทศส่วนใหญ่กลับไม่ได้เกี่ยวพันต่ออาชีพเกษตรกร ซึ่งเป็นอาชีพหลักของคนไทยมากนัก อาชีพเกษตรกรยังคงเป็นอาชีพที่ต้องใช้การจัดการแบบในอดีต กล่าวคือ ต้องเดินตรวจตราภายในสวน ใส่ปุ๋ยตามเวลาที่กำหนด โดยไม่ได้คำนึงถึงธาตุอาหารที่มีอยู่ในดินก่อนแล้ว นอกจากนี้

ยังมีการจัดการโรคจากแมลง เมื่อเจอปัญหาการระบาดของจะใช้สารเคมีเกินอัตราความจำเป็น ทำให้ประสบปัญหาด้านราคาผลผลิตตกต่ำ ในขณะที่ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น ดังนั้น ปัญหาด้านกระบวนการจัดการ การดูแลรักษา การจัดการโรคจากแมลง การเก็บเกี่ยวและการจัดจำหน่ายผลผลิตล้วนแล้วแต่เป็นปัญหาสำคัญของการทำการเกษตรทั้งสิ้น รวมถึงการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างไม่มีประสิทธิภาพ เช่น ดิน น้ำ แสงแดด อากาศ เป็นต้น (Manwicha, 2016) นอกจากนั้น เกษตรกรไม่มีความรู้เพียงพอด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ รวมทั้งความรู้ในการผลิตสินค้าเกษตรคุณภาพสูงที่มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แนวคิดฟาร์มอัจฉริยะ (Smart Farm) จึงเป็นกลไกสำคัญในการตอบโจทย์การพัฒนาและคาดว่าอาจสามารถพลิกโฉมการเกษตรในอนาคต (Tummers *et al.*, 2019)

แนวคิดการทำฟาร์มอัจฉริยะ คือ การทำการเกษตรแม่นยำสูง (Precision Agriculture หรือ Precision Farming) เป็นการทำการเกษตรที่อาศัยความสอดคล้องให้เข้ากับสภาพพื้นที่ โดยเน้นพื้นที่ที่ไม่ใช่พื้นที่เกษตรขนาดใหญ่ เน้นประสิทธิภาพในการเพาะปลูก ตั้งแต่การคัดเลือกเมล็ดพันธุ์จนถึงกระบวนการปลูกที่นำเอาเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการตรวจวัดทั้งเรื่องของสภาพดิน ความชื้นในดิน แร่ธาตุในดิน ความเป็นกรดด่าง (ดินเค็มหรือดินเปรี้ยว) สภาพปริมาณแสงธรรมชาติ รวมถึงเรื่องศัตรูพืชต่างๆ บางประเทศมีการควบคุมสิ่งแวดล้อมผ่านการปลูกในโรงเรือน เพื่อป้องกันศัตรูพืชและสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ได้อย่างเข้มงวดและมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Musat *et al.*, 2018) ในการทำฟาร์มอัจฉริยะจะอาศัยกลไกและแนวคิดพื้นฐานมาจากอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (Internet of Things: IoT) โดยการนำเซนเซอร์มาติดตั้งไว้ในแปลงเกษตรเพื่อทำการตรวจวัดสภาพแวดล้อมต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นซึ่งเซนเซอร์เหล่านี้จะต้องอาศัยการทำงานของระบบอินเทอร์เน็ตในการรับ-ส่งข้อมูล ไปยังเซิร์ฟเวอร์เพื่อทำการประมวลผลและแสดงผลออกมาในรูปแบบของแอปพลิเคชัน ดังนั้นในการทำฟาร์มอัจฉริยะจึงเป็นการบูรณาการร่วมกันทั้งด้านสภาพแวดล้อม เทคโนโลยี และเกษตรกร เพื่อให้สามารถทำการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเทคโนโลยีที่นำมาใช้นั้น จะช่วยให้เกษตรกรเกิดการบริหารเวลาดลดความเสี่ยง เพิ่มผลผลิต และสามารถวิเคราะห์สภาพแวดล้อมได้อย่างแม่นยำและเหมาะสม อีกทั้งยังสามารถนำข้อมูลที่ได้จัดเก็บเอาไว้มาพยากรณ์และทำให้เกิดกระบวนการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) จนทำให้สามารถทำนายและคาดการณ์ล่วงหน้าในการดูแลแปลงเกษตรได้อย่างสมบูรณ์แบบ (TongKe, 2013; Yoon *et al.*, 2018) ในขณะที่ประเทศไทยได้ให้ความสำคัญกับการทำฟาร์ม

อัจฉริยะโดยสนับสนุนให้เกษตรกรไทยก้าวเข้าสู่ยุค Thailand 4.0 คือ การไม่ทำร้ายธรรมชาติ ใช้ทรัพยากรเท่าที่จำเป็น เช่น การมีพื้นที่เล็กๆ แต่สามารถออกแบบให้เพาะปลูกแบบผสมผสานและเกื้อกูลกันและต้องใช้เทคโนโลยีให้เหมาะสม ซึ่งการทำฟาร์มอัจฉริยะต้องเข้าใจตั้งแต่กระบวนการผลิการบริหารจัดการ เข้าใจธรรมชาติ และเข้าใจเทคโนโลยี (Fongnguen *et al.*, 2018) นอกจากนั้นรัฐบาลยังสนับสนุนโครงการเกษตรกรรุ่นใหม่ (Young Smart Farmer) โดยให้บุคคลที่มีความภูมิโในการเป็นเกษตรกร ไม่จำกัดเพศ อายุระหว่าง 17-45 ปี มีความรอบรู้ในระบบการผลิตด้านการเกษตรแต่ละสาขา มีความสามารถในการวิเคราะห์ เชื่อมโยงและบริหารจัดการการผลิตและการตลาด โดยใช้ข้อมูลประกอบการตัดสินใจ คำนึงถึงคุณภาพและความปลอดภัยของผู้บริโภค สังคม และสิ่งแวดล้อม (Sajjasophon *et al.*, 2019) เพื่อพัฒนาให้กลายเป็นฟาร์มอัจฉริยะในอนาคตแบบยั่งยืน

จากความสำคัญของการทำเกษตรยุคใหม่ที่ใช้เทคโนโลยี IoT เข้ามาช่วยในการตรวจวัดองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร รวมทั้งแรงผลักดันจากรัฐบาลที่ต้องการให้เกษตรกรไทยเข้าสู่ยุค Thailand 4.0 และจากการเก็บรวบรวมจากเกษตรกรในพื้นที่อำเภอนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่า ปัจจุบันเกษตรกรดูแลฟาร์มผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค โดยไม่ใช้ยาฆ่าแมลง ปุ๋ย สารเคมีเร่งโตหรือสารเคมีอื่นๆ ดังนั้นจึงต้องรักษาสมดุลขององค์รวมตามธรรมชาติไว้ให้ได้มากที่สุด และต้องหมั่นตรวจวัดความชื้นในดิน และอุณหภูมิในอากาศให้สมดุลและเหมาะสม หากตรวจสอบว่าความชื้นในดินมีไม่เพียงพอ จะทำการรดน้ำทันที ดังนั้นสิ่งที่เกษตรกรต้องการคือ การมีระบบหรืออุปกรณ์ที่สามารถควบคุมองค์ประกอบต่างๆ ของการเพาะปลูกให้สามารถตรวจสอบหรือแจ้งเตือนได้ ด้วยเหตุนี้การ

วิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำแนวคิด IoT มาประยุกต์ใช้ โดยการนำเซนเซอร์ที่สามารถตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และความชื้นในดิน มาช่วยลดภาระของเกษตรกร โดยเซนเซอร์จะทำการตรวจวัดค่าต่างๆ และส่งข้อมูลที่ไประบบคลาวด์แม่ข่ายเพื่อส่งการให้ปั๊มน้ำทำงานโดยการรดน้ำในแปลงผักกาดหอมพันธุ์ กรีนโอ๊ค ผลที่ได้จากการวิจัยจะทำให้เกษตรกรประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาการทำฟาร์มอัจฉริยะให้กับเกษตรกรรายอื่นๆ ในการปลูกพืชที่ต้องอาศัยการควบคุมอุณหภูมิหรือความชื้น และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำแนวทางดังกล่าวไปส่งเสริมและสนับสนุนให้เกษตรกรได้เห็นถึงความสำคัญของเทคโนโลยีในการประยุกต์ใช้เพื่อการเกษตรต่อไปได้

วิธีดำเนินการวิจัย

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยโดยอาศัยขั้นตอนที่ประยุกต์จากการวิเคราะห์และออกแบบระบบตามแนวทางของ Dennis *et al.* (2012) ที่แบ่งขั้นตอนออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. ส่วนที่ 1 การวางแผน (Planning) โดยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1.1 การวิเคราะห์ความต้องการ ในขั้นตอนนี้ได้เก็บรวบรวมความต้องการจากเกษตรกรที่ทำฟาร์มแปลงผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค จากการสอบถามเกษตรกรในพื้นที่อำเภอนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่า ปัจจุบันเกษตรกรดูแลฟาร์มโดยไม่ใช้เข้ามาแมลง ปุ๋ย สารเคมีเร่งโต หรือสารเคมีอื่นๆ ดังนั้นจึงต้องรักษาสมดุลขององค์รวมตามธรรมชาติไว้ให้ได้มากที่สุด และคอยตรวจสอบดินเพื่อให้เกิดความเหมาะสมต่อการเพาะปลูก เช่น จุลินทรีย์ในดิน พืช ปุ๋ยสัตว์ และผู้คน ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวสร้างความไม่คล่องตัวให้กับเกษตรกร เนื่องจากเกษตรกร

ต้องหมั่นดูแลแปลงผักอย่างสม่ำเสมอ และต้องหมั่นตรวจวัดความชื้นในดิน และอุณหภูมิในอากาศให้สมดุลและเหมาะสม หากตรวจสอบว่าความชื้นในดินมีไม่เพียงพอ จะทำการรดน้ำทันที ดังนั้นสิ่งที่เกษตรกรต้องการคือ การมีระบบหรืออุปกรณ์ต่างๆ ที่สามารถควบคุมองค์ประกอบต่างๆ ของการเพาะปลูกให้สามารถตรวจสอบหรือแจ้งเตือนได้ ทั้งนี้เพื่อลดเวลา และสร้างมาตรฐาน การเพาะปลูกที่มีคุณภาพ

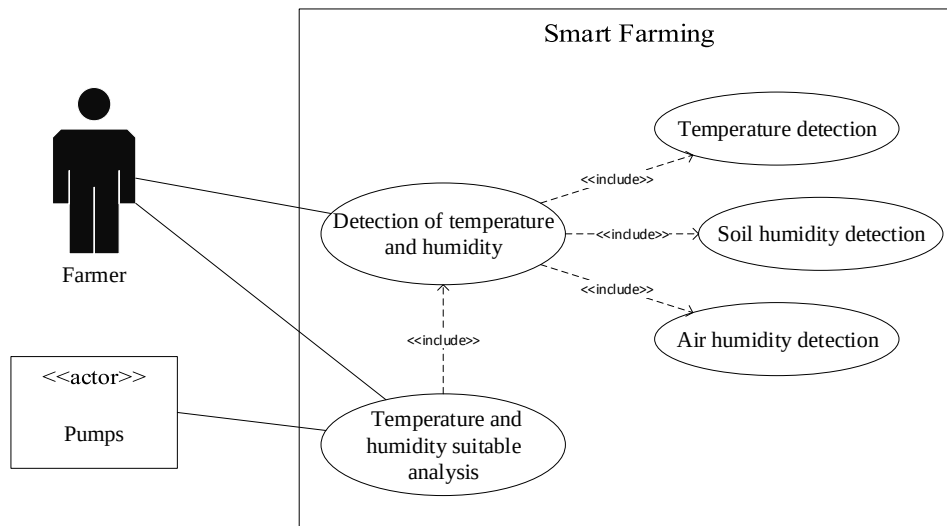
1.2 การศึกษาความเป็นไปได้ จากความต้องการดังกล่าวของเกษตรกร คณะผู้วิจัยได้นำมาศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาระบบเพื่อควบคุมองค์ประกอบต่างๆ ของการเพาะปลูก และจากการศึกษา พบว่าปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้แนวคิด IoT ในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่ง IoT คือ การที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ สามารถเชื่อมโยงหรือส่งข้อมูลถึงกันได้ด้วยสัญญาณอินเทอร์เน็ต โดยผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องป้อนข้อมูล (Nord *et al.*, 2019) ดังนั้นจึงได้ศึกษาถึงความสามารถของอุปกรณ์ที่จะใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และความชื้นในดิน ซึ่งพบว่าการใช้เซนเซอร์ไร้สายสามารถนำมาใช้ในการตรวจวัด และส่งค่าการวัดมายังโหนดที่เป็นแม่ข่าย (Server Node) เพื่อทำการวิเคราะห์ระดับอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และความชื้นในดิน หากพบว่าค่าที่วัดได้ไม่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด จะส่งการให้ปั๊มน้ำทำงานโดยการรดน้ำให้กับแปลงผักโดยอัตโนมัติ

1.3 การวางแผน คณะผู้วิจัยได้วางแผนการดำเนินงานโดยจะใช้เวลาในการดำเนินการทั้งหมด 12 เดือน แบ่งเป็น การเก็บรวบรวมข้อมูลจากเกษตรกรเกี่ยวกับการปลูกผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค ตั้งแต่วันที่ 15 มกราคม - 25 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2562 และการเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆ ที่จะนำมาตรวจวัด พร้อมทั้งวางแผนในการพัฒนาระบบและ

กระบวนการที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ตั้งแต่เดือนมกราคม
- ธันวาคม พ.ศ. 2562

แผนภาพ Use Case Diagram เพื่ออธิบายการทำงานของระบบ ดังภาพที่ 1

2. ส่วนที่ 2 การวิเคราะห์ (Analysis) ใน
ขั้นตอนนี้ คณะผู้วิจัยได้วิเคราะห์ระบบโดยใช้



ภาพที่ 1 Use case diagram ของระบบฟาร์มแปลงผักกาดหอมพันธุ์กรีน โอ๊คอัจฉริยะ

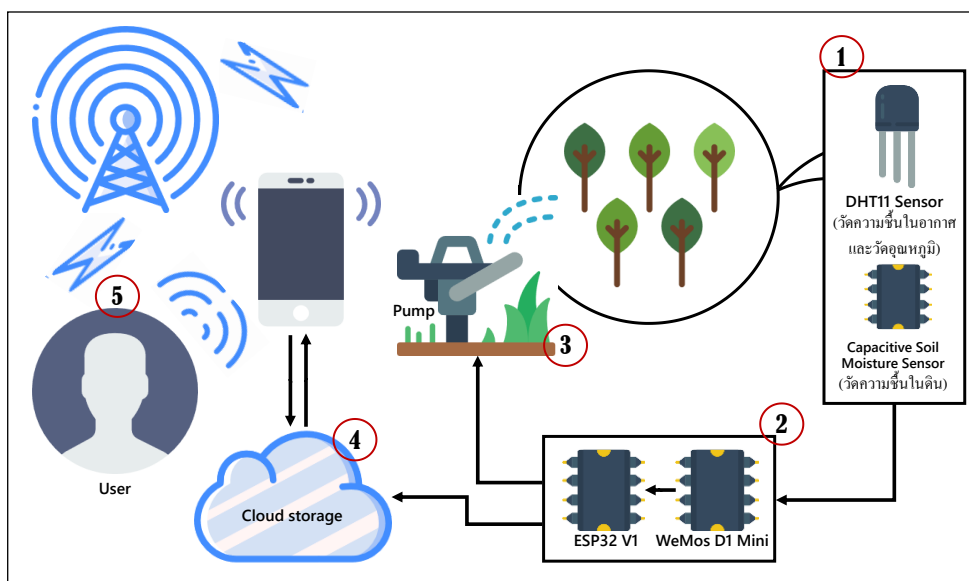
จากภาพที่ 1 ในส่วนของปั้มน้ำจะทำหน้าที่ในการรดน้ำให้กับแปลงผักโดยอัตโนมัติ หากพบว่าความชื้นและอุณหภูมิไม่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ นอกจากนั้นเกษตรกรสามารถตรวจสอบค่าต่างๆ ได้โดยเรียกดูผ่าน แอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือหรือเว็บไซต์

3. ส่วนที่ 3 การออกแบบ (Design) คณะผู้วิจัยได้ออกแบบระบบจากการวิเคราะห์ระบบ และนำมาพัฒนาเป็นรูปแบบทางกายภาพ (Physical Model) โดยเริ่มจากการออกแบบงานทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ทั้งในส่วนนำข้อมูลเข้า (Input) ส่วนประมวลผล (Process) ส่วนแสดงผลลัพธ์ (Output) ส่วนจัดเก็บข้อมูล (Storage) การออกแบบจำลองข้อมูล การออกแบบรายงานและการออกแบบหน้าจอในการติดต่อกับผู้ใช้งาน ซึ่งจะต้องมุ่งเน้นการวิเคราะห์ว่าช่วยแก้ปัญหาอะไร (What) และการออกแบบช่วยแก้ปัญหาอย่างไร (How) (Valacich et

al., 2014) นอกจากนั้นยังได้กำหนดตัวแปรที่นำมาใช้ในการออกแบบ ประกอบด้วย อุณหภูมิ ซึ่งได้กำหนดความเหมาะสมไว้ที่ 25-28 องศาเซลเซียส ความชื้นในอากาศไม่เกิน 60% และความชื้นในดินระหว่าง 40-70% สำหรับขนาดของแปลงผัก (พื้นที่ทดลอง) ได้กำหนดขนาดไว้ความกว้าง 5 เมตร ความยาว 26 เมตร ความสูง 2.5 เมตร จำนวน 4 แปลง การให้น้ำเป็นการปล่อยผ่านหัวมินิสปริงเกอร์ ที่มีรัศมี 1 หัวอยู่ประมาณ 1-2 เมตร ปริมาณน้ำไหล 120-180 ลิตร/ชั่วโมง ดังนั้นในแปลงผัก 1 แปลงจะติดตั้งเซนเซอร์ 3 ชุด (DHT11 Sensor Node ซึ่งทำหน้าที่ในการวัดความชื้นในอากาศและวัดอุณหภูมิ และ Capacitive Soil Moisture Sensor ที่ทำหน้าที่ในการวัดความชื้นในดิน) คือ ส่วนหัวแปลง กลางแปลง และท้ายแปลง แล้วนำค่าที่ได้จากเซนเซอร์ทั้ง 3 ตัวมาหาค่าเฉลี่ย โดยสามารถแสดงการออกแบบ

ภาพรวมการทำงานของระบบ กลุ่มของการไหลของ

ข้อมูล และ เครื่องมือที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้



ภาพที่ 2 การออกแบบระบบฟาร์มอัจฉริยะ

จากภาพที่ 2 เป็นการอธิบายการทำงานของระบบในภาพรวม โดยระบบจะเริ่มดำเนินงานจาก

จุดที่ 1: เซนเซอร์จะทำการตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และความชื้นในดินโดยใช้ DHT11 Sensor Node ในการวัดความชื้นในอากาศและวัดอุณหภูมิ และใช้ Capacitive Soil Moisture Sensor ในการวัดความชื้นในดิน การเลือกใช้อุปกรณ์ทั้งสองตัวนี้ เนื่องจากมีราคาไม่สูงและใช้พลังงานไม่มาก รวมทั้งมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา หลังจากทีเซนเซอร์วัดค่าต่างๆ ได้แล้วจะส่งข้อมูลไปยังบอร์ด WeMos D1 Mini Node

จุดที่ 2: เมื่อบอร์ด WeMos D1 Mini Node (ซึ่งเป็นบอร์ดที่วางชิปลงบนบอร์ดโดยตรงทำให้น้ำหนักเบาเพียง 2.5 กรัม และมีเสาอากาศบนบอร์ดเป็นเสาเซรามิก ทำให้สามารถต่อเสาอากาศภายนอกได้อย่างสะดวก) ได้รับข้อมูลจากจุดที่ 1 จะทำการอ่านค่าอุณหภูมิและความชื้นเพื่อส่งข้อมูลไปยังโหนดที่เป็นแม่ข่าย (ESP32 Development Board v.1) โดยโหนดแม่ข่าย จะทำหน้าที่เป็นเกตเวย์ในการ

เชื่อมต่อเครือข่ายและควบคุมการทำงานของกระแสไฟฟ้าแบบ 4 Channel Relay Module เมื่อพบว่าค่าอุณหภูมิและความชื้นไม่เกินไปตามเกณฑ์ที่กำหนดในข้างต้น จะสั่งการให้ปั๊มน้ำทำงาน

จุดที่ 3: ปั๊มน้ำจะทำงานเมื่อได้รับการสั่งการจากโหนดแม่ข่าย (Server Node) โดยจะรดน้ำในแปลงผัก และหยุดทำงานเมื่อโหนดแม่ข่ายได้รับข้อมูลจากเซนเซอร์ว่าอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศและความชื้นในดินเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดในข้างต้น

จุดที่ 4: ในการเก็บข้อมูลที่ไดจากการวัดอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และความชื้นในดิน จะจัดเก็บในรูปแบบของ JSON (JavaScript Object Notation) เช่น {"nodeType": "GardenSensor", "nodeId": 2013523182, "temperature": 32, "humidity": 15, "soil": 100} เป็นต้น โดยข้อมูลจะถูกจัดเก็บแบบออนไลน์ผ่านระบบคลาวด์บนเซิร์ฟเวอร์ (Cloud Storage)

จุดที่ 5: นอกจากการการรดน้ำโดยอัตโนมัติแล้ว (จุดที่ 2 และ 3) ผู้ใช้งานหรือเกษตรกรสามารถเรียกดูข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ ความชื้นในดิน เวลาในการรดน้ำ โดยเรียกดูผ่าน

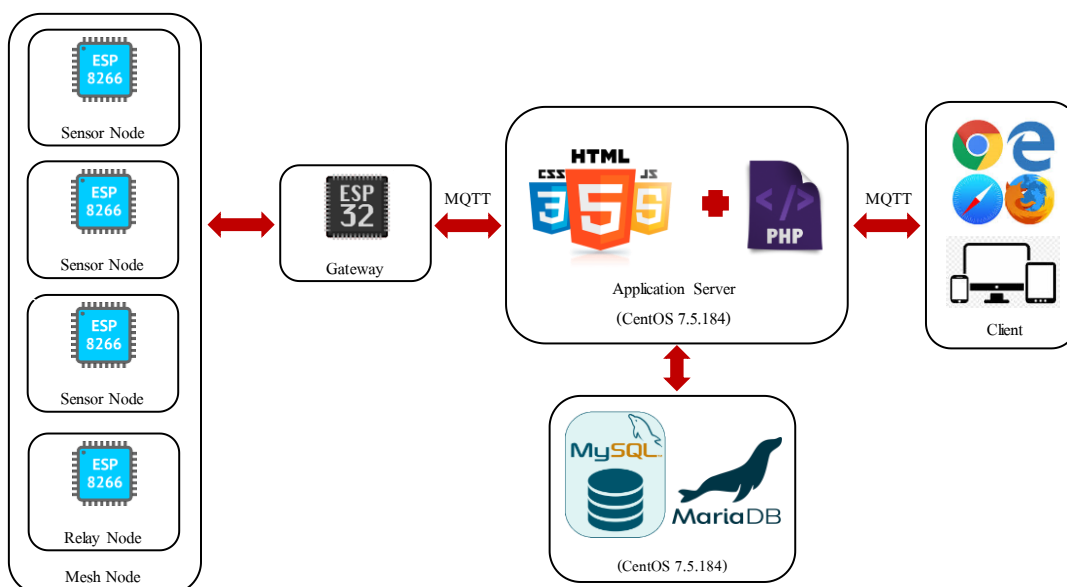
แอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือหรือเว็บไซต์ และสามารถสั่งให้ปั๊มน้ำทำงานผ่านเว็บไซต์ที่คณะผู้วิจัยได้พัฒนาไว้ได้

Tools:	
Hardware:	Software:
● DHT11 Sensor Node ● Capacitive Soil Moisture Sensor Node ● WeMos D1 Mini Node ● ESP32 Development Board v.1 (Controller Gateway) ● Intel Xeon E5 Ram 64 Gb (MQTT Server, Application Server and Database Server)	● Operating System: CentOS 7.5.184 ● Development Software: Visual Studio Code, Arduino IDE ● Web Server: Nginx ● Front-end: Html5, CSS, Java Script ● Back-end: PHP 7 ● Database: MySQL, MariaDB
Techniques: Mesh Network, MQTT, Web Socket	

ภาพที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับฟาร์มอัจฉริยะ

จากภาพที่ 3 เครื่องมือต่างๆ ทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับฟาร์มอัจฉริยะ

สามารถนำมาสรุปภาพรวมของการเชื่อมต่อในแต่ละส่วน และตัวอย่าง Coding ที่พัฒนาขึ้นมาจากการรับค่าข้อมูลจากเซนเซอร์ ได้ดังนี้



ภาพที่ 4 ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อและส่งผ่านข้อมูล

```

1 void mqttCallback(char* topic, uint8_t* payload, unsigned int length) {
2     char* cleanPayload = (char*)malloc(length+1);
3     payload[length] = '\0';
4     memcpy(cleanPayload, payload, length+1);
5     String msg = String(cleanPayload);
6     free(cleanPayload);
7     String targetStr = String(topic).substring(16);
8
9     if(targetStr == "broadcast") //resive message from node
10    {
11        DynamicJsonBuffer jsonBuffer;
12        JsonObject& root = jsonBuffer.parseObject(msg);
13        if (root.containsKey("cmd")) {
14            if(root["cmd"] == "onoff") { //ON - Off relay manual
15                if(root["ch"] != NULL) {
16                    int sw = root["ch"];
17                    sw=sw-1;
18                    if(digitalRead(relay[sw]) == LOW){
19                        digitalWrite(relay[sw],HIGH);
20                        wsSendData(relayStatus());
21                        //Serial.println("ON Chanel");
22                        String serv_topic = "painlessMesh/from/"+String(mesh.getNodeId());
23                        mqttClient.publish(serv_topic.c_str(),relayStatus().c_str());
24                    }
25                    else {
26                        digitalWrite(relay[sw],LOW);
27                        wsSendData(relayStatus());
28                        //Serial.println("OFF Chanel");
29                        String serv_topic = "painlessMesh/from/"+String(mesh.getNodeId());
30                        mqttClient.publish(serv_topic.c_str(),relayStatus().c_str());
31                    }
32                }
33            }
34            //end if cmd
35            else if(dataGet("auto")=="ON") { //ON - Off relay auto
36                if(root.containsKey("nodeType")){
37                    if(root["nodeType"]=="GardenSensor") {
38                        int Relay_ch = dataGet(root["nodeId"]);
39                        String allNode = dataGet("AllNode_"+Relay_ch);
40                        int countCutOff_soil = 0;
41                        int countCutOff_temp = 0;
42                        int countCutOff_humid = 0;
43                        if(root["soil"] < dataGet("cutOff_soil")) { //check cutoff point from soil sensor
44                            dataSet("on_soil_"+root["nodeId"],"on");
45                        }
46                        else {
47                            dataSet("on_soil_"+root["nodeId"],"off");
48                        }
49                        if(root["temperature"] > dataGet("cutOff_temperature")) { //check cutoff point from temperature sensor
50                            dataSet("on_temp_"+root["nodeId"],"on");
51                        }
52                        else {
53                            dataSet("on_temp_"+root["nodeId"],"off");
54                        }
55                        if(root["humidity"] < dataGet("cutOff_humidity")) { //check cutoff point from humidity sensor
56                            dataSet("on_humid_"+root["nodeId"],"on");
57                        }
58                        else {
59                            dataSet("on_humid_"+root["nodeId"],"off");
60                        }
61                        DynamicJsonBuffer jsonBuffer;
62                        JsonObject& nodeID = jsonBuffer.parseObject(allNode);
63                        //check all node in relay control less then cutoff point -----//
64                        for(int i=1;i<=sizeof(nodeID);i++) {
65                            if(dataGet("on_soil_"+nodeID)=="on") {
66                                countCutOff_soil++;
67                            }
68                            if(dataGet("on_temp_"+nodeID)=="on") {
69                                countCutOff_temp++;
70                            }
71                            if(dataGet("on_humid_"+nodeID)=="on") {
72                                countCutOff_humid++;
73                            }
74                        }
75                        if(countCutOff_soil >= sizeof(nodeID) || countCutOff_temp >= sizeof(nodeID) || countCutOff_humid >= sizeof(nodeID)) {
76                            digitalWrite(relay[Relay_ch],HIGH); //switch on
77                            //----- sent switch status to server -----//
78                            wsSendData(relayStatus());
79                            String serv_topic = "painlessMesh/from/"+String(mesh.getNodeId());
80                            mqttClient.publish(serv_topic.c_str(),relayStatus().c_str());
81                        }
82                        else {
83                            digitalWrite(relay[Relay_ch],LOW); //switch off
84                            //----- sent switch status to server -----//
85                            wsSendData(relayStatus());
86                            String serv_topic = "painlessMesh/from/"+String(mesh.getNodeId());
87                            mqttClient.publish(serv_topic.c_str(),relayStatus().c_str());
88                        }
89                        //----- end MQTT -----//
90                    }
91                }
92            }
93            mesh.sendBroadcast(msg);
94        }
95        else
96        {
97            uint32_t target = strtoul(targetStr.c_str(), NULL, 10);
98            if(mesh.isConnected(target))
99            {
100                mesh.sendSingle(target, msg);
101            }
102            else
103            {
104                mqttClient.publish("painlessMesh/from/gateway", "Client not connected!");
105            }
106        }
107    }
108    //----- end MQTT -----//

```

ภาพที่ 5 ตัวอย่างชุดคำสั่งการรับค่าข้อมูลจากเซนเซอร์

4. ส่วนที่ 4 การนำไปใช้ (Implementation) ในขั้นตอนนี้คณะผู้วิจัยนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบระบบมาจัดทำระบบให้เป็นระบบที่ใช้งานได้จริง ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนของการพัฒนาระบบและส่วนของการติดตั้งระบบ ซึ่งในการพัฒนาระบบได้ใช้โปรแกรม Visual Studio Code และ Arduino IDE สำหรับใช้ในการเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ต่างๆ เมื่อพัฒนาระบบแล้วเสร็จในแต่ละส่วน จะดำเนินการทดสอบระบบไปพร้อม ๆ กัน เพื่อให้มั่นใจว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมานั้นจะไม่เกิดข้อผิดพลาด สำหรับในส่วนของการขั้นตอนการติดตั้งระบบนั้น จะติดตั้งในลักษณะเริ่มใช้งานระบบใหม่ในทันทีที่พัฒนาเสร็จ (Direct Changeover) เนื่องจากแปลงผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คที่ทำมาใช้ทดสอบนั้น ไม่เคยมีระบบใดๆ ใช้งานมาก่อน จึงสามารถติดตั้งได้ทันที

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการออกแบบและพัฒนาระบบโดยการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายสำหรับการรดน้ำแปลงผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค คณะผู้วิจัยได้แบ่งผลการพัฒนาระบบออกเป็น 2 ส่วนประกอบด้วยการทำงานของอุปกรณ์ (Hardware) ที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และความชื้นในดิน และส่วนติดต่อของผู้ใช้ (User Interface) ซึ่งในแต่ละส่วนมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. การทำงานของอุปกรณ์ (Hardware)

โดยติดตั้งเซนเซอร์ในการตรวจวัดกระจายไปในแต่ละจุดให้ทั่วทั้งแปลงผัก ที่ระยะทางไม่เกิน 10 เมตรจากโหนดแม่ข่าย และเนื่องจากแปลงผักมีระยะทาง 26 เมตร จึงต้องเพิ่มโหนดแม่ข่าย ให้เพียงพอ เนื่องจากโหนดแม่ข่ายจะรองรับจำนวนเซนเซอร์โหนดได้ไม่เกิน 5 ตัว พร้อมทั้งได้สร้างอุปกรณ์ในการจัดเก็บโหนดแม่ข่าย (Server Node) โดยนำ ESP32 (Gateway) ติดตั้งไว้ภายใน ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การนำอุปกรณ์ไร้สายไปทดสอบกับแปลงผักปลอดสารพิษในสภาพพื้นดินและอากาศจริง

จากการทดลองให้เซนเซอร์แต่ละตัวเชื่อมโยงข้อมูลหาแบบกระจาย (Mesh Network) และให้จุดเชื่อมต่อ (Gateway Node) ทำการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์โดยใช้ MQTT Protocol (Message

Queuing Telemetry Transport) เพื่อเก็บข้อมูลลงฐานข้อมูล ซึ่งกระบวนการทำงานดังกล่าวสามารถส่งข้อมูลระหว่างโหนดได้ (ดังภาพที่ 7) รวมถึงส่งคำสั่งไปควบคุมการเปิด-ปิดปั๊มน้ำได้ด้วย ในส่วนของ

พลังงานที่ใช้นั้นจะใช้กำลังไฟ 5 โวลต์สำหรับจ่ายไฟ 12 โวลต์สำหรับรีเลย์
แบบ DC ให้เซนเซอร์ โหนดแต่ละตัว และใช้กำลังไฟ

log_id รหัส log	log_user_key username เจ้าของข้อมูล	log_data ข้อมูลที่เก็บ	log_date วันที่เก็บข้อมูล	log_time เวลาที่เก็บ
1	VGrSqv826Abg1jfRyI0wMZE7	{"nodeType": "GardenSensor", "nodeId": 2013523182, "te...	2019-06-15	23:14:14
2	VGrSqv826Abg1jfRyI0wMZE7	{"nodeType": "GardenSensor", "nodeId": 2013491360, "te...	2019-06-15	23:15:10
3	VGrSqv826Abg1jfRyI0wMZE7	{"nodeType": "GardenSensor", "nodeId": 2013523182, "te...	2019-06-15	23:15:47
4	VGrSqv826Abg1jfRyI0wMZE7	{"nodeType": "GardenSensor", "nodeId": 2013491360, "te...	2019-06-15	23:16:42
5	VGrSqv826Abg1jfRyI0wMZE7	{"nodeType": "GardenSensor", "nodeId": 2013523182, "te...	2019-06-15	23:17:19
6	VGrSqv826Abg1jfRyI0wMZE7	{"nodeType": "GardenSensor", "nodeId": 2013491360, "te...	2019-06-15	23:18:14
7	VGrSqv826Abg1jfRyI0wMZE7	{"nodeType": "GardenSensor", "nodeId": 2013523182, "te...	2019-06-15	23:19:10
8	VGrSqv826Abg1jfRyI0wMZE7	{"nodeType": "GardenSensor", "nodeId": 2013491360, "te...	2019-06-15	23:20:05
9	VGrSqv826Abg1jfRyI0wMZE7	{"nodeType": "GardenSensor", "nodeId": 2013523182, "te...	2019-06-15	23:20:42
10	VGrSqv826Abg1jfRyI0wMZE7	{"nodeType": "GardenSensor", "nodeId": 2013491360, "te...	2019-06-15	23:21:38
11	VGrSqv826Abg1jfRyI0wMZE7	{"nodeType": "GardenSensor", "nodeId": 2013523182, "te...	2019-06-15	23:22:15
12	VGrSqv826Abg1jfRyI0wMZE7	{"nodeType": "GardenSensor", "nodeId": 2013491360, "te...	2019-06-15	23:23:29

ภาพที่ 7 ตัวอย่างการส่งข้อมูล

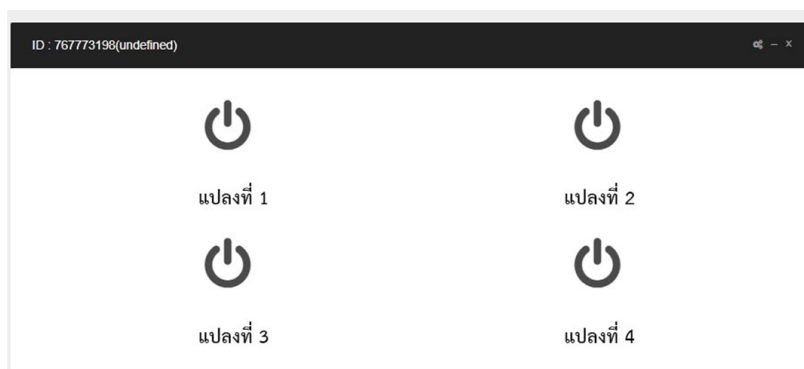
2. ส่วนติดต่อของผู้ใช้ (User Interface)

ในส่วนนี้ผู้ใช้งานระบบหรือเกษตรกรสามารถติดต่อกับอุปกรณ์เซนเซอร์ต่างๆ ผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือหรือเว็บไซต์ได้ โดยสามารถตรวจวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และ

ความชื้นในดินได้จากการเลือกแปลงผักแต่ละแปลง (ดังภาพที่ 8) และหากต้องการควบคุมการทำงานของปั้มน้ำด้วยตนเอง สามารถสั่งเปิด-ปิดปั้มน้ำได้เช่นกัน โดยมีปุ่มควบคุมจำนวน 4 ปุ่ม เพื่อควบคุมแปลงผักแต่ละแปลง (ดังภาพที่ 9)



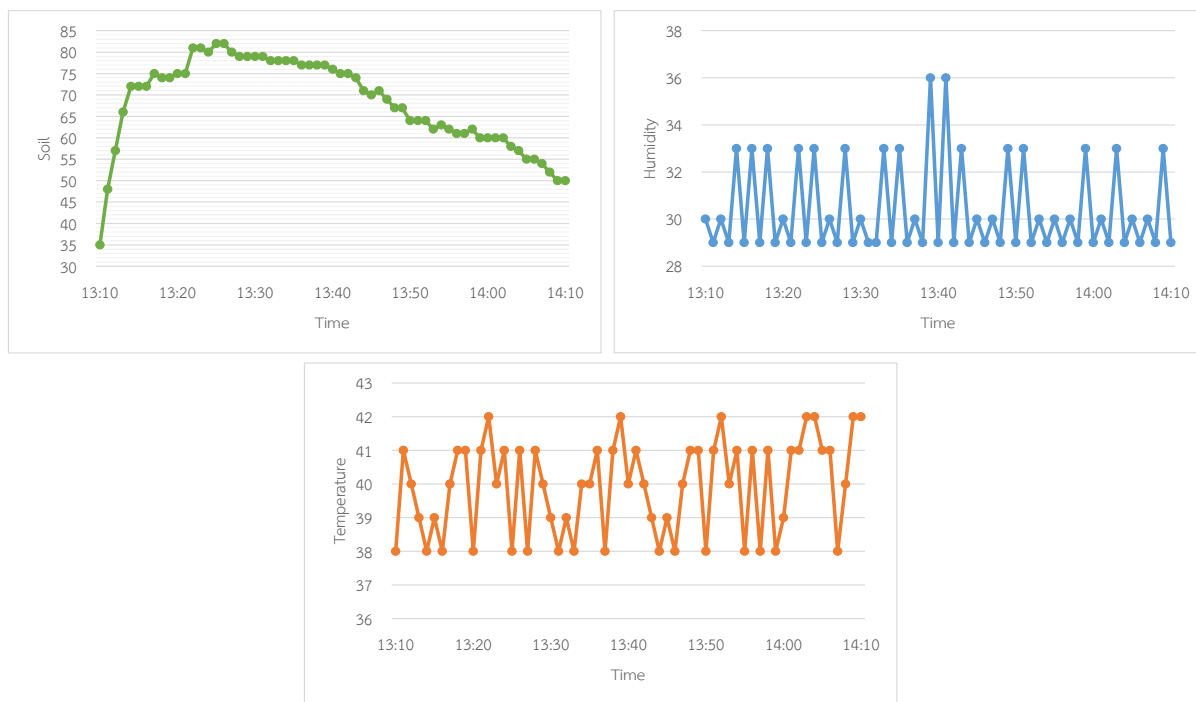
ภาพที่ 8 แสดงค่าอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และความชื้นในดิน



ภาพที่ 9 การควบคุมเปิด-ปิดปั้มน้ำ

ข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และ ความชื้นในดิน จะถูกจัดเก็บจัดเก็บแบบออนไลน์ผ่านระบบคลาวด์บนเซิร์ฟเวอร์ (Cloud Storage) ในทุกๆ นาที ตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง และสามารถแสดงข้อมูลย้อนหลังได้ในรูปแบบตารางและกราฟ (ดังภาพที่ 10) ทำให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มหรือช่วงเวลาที่ปั้มน้ำทำงานเป็นประจำ เช่น หากพิจารณาจากภาพที่ 10 พบว่า ความชื้นในดินมีค่าต่ำในช่วงเวลาบ่ายๆ ซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่สูงขึ้น จากกราฟแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในช่วงเวลาบ่ายสูงถึง 42 องศาเซลเซียส ในขณะที่ความชื้นในอากาศได้ลดลงในช่วงเวลาดังกล่าวเช่นกัน ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากกราฟจะช่วยพยากรณ์ช่วงเวลาที่สภาพดินและสภาพอากาศมีความแปรปรวน เป็นต้น นอกจากนั้น

จากระดับความเหมาะสมของความชื้นในดินที่อยู่ระหว่าง 40-70% นั้น หากตรวจพบว่าความชื้นในดินมีค่าต่ำกว่า 40% จะสั่งการให้ปั้มน้ำทำงาน และปั้มน้ำจะหยุดทำงานเมื่อค่าความชื้นในดินสูงกว่า 70% ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้มีความชื้นในดินมากเกินไป ส่วนค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศจะทำให้สามารถป้องกันความร้อนที่มีมากเกินไปในแปลงผัก ซึ่งสามารถนำค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศมาวิเคราะห์ช่วงเวลาที่มียูณหภูมิสูงๆ เพื่อจัดหาแสงกัน นำมาใช้ปิดกันบริเวณแปลงผักได้ และในอนาคต คณะผู้วิจัยจะพัฒนาแสงกันความร้อนอัตโนมัติ เพื่อใช้รักษาอุณหภูมิให้มีความเหมาะสมอย่างสม่ำเสมอ



ภาพที่ 10 กราฟรายงานข้อมูลความชื้นในดิน ความชื้นในอากาศ และอุณหภูมิ

อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากการวิจัยพบว่า จากเดิมเกษตรกรใช้เวลารดน้ำประมาณ 7-10 นาทีต่อแปลงผัก 1 แปลง (ขนาด 5×6 เมตร) เมื่อมีระบบจะทำให้ลดเวลาลงได้เหลือเพียง 1 นาทีเท่านั้น ขณะที่ปริมาณการใช้น้ำลดลงจาก 3-4 ลิตรต่อนาที เหลือ 2-3 ลิตรต่อนาที

จากการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายเพื่อนำมาควบคุมดูแลความเหมาะสมของแปลงผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คแบบอัตโนมัติหรือที่เรียกว่าการทำฟาร์มอัจฉริยะ พบว่า ระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นมา สามารถนำมาใช้กับแปลงผักได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถควบคุมการทำงานของปั๊มน้ำได้โดยอัตโนมัติ กล่าวคือ ปั๊มน้ำจะถูกควบคุมการเปิด-ปิด จากโหนดที่เป็นแม่ข่าย (Server Node) ซึ่งโหนดที่เป็นแม่ข่ายจะได้รับข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และความชื้นในดินจากเซนเซอร์แต่ละตัว และทำการประมวลผลถึงความเหมาะสมของค่าที่วัดได้ หากตรวจพบว่าค่าความชื้นในดิน ความชื้นในอากาศ และอุณหภูมิ มีความไม่สมดุลจะสั่งการให้ปั๊

มน้ำรดน้ำในบริเวณแปลงผักทันที นอกจากนั้นผู้ใช้งานหรือเกษตรกรยังสามารถควบคุมปั๊มน้ำจากแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือหรือเว็บไซต์ ที่ได้พัฒนาไว้ได้ และตรวจสอบค่าอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และความชื้นในดิน ได้ตลอดเวลา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Doshi *et al.* (2019) ที่ได้นำหลักการของ IoT เข้ามาใช้ในการทำฟาร์ม และได้ใช้เซนเซอร์ ESP32s NodeMCU, Breadboard, DHT11 ในการวัดอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และความชื้นในดิน พร้อมทั้งใช้เซนเซอร์ SII145 Digital UV Index/IR ในการตรวจสอบค่ายูวี (UV) ในพื้นที่เพาะปลูก ผลจากการวิจัยทำให้เกษตรกรลดค่าใช้จ่ายและลดการสูญเสียพืช ช่วยให้การเพาะปลูกมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ในขณะที่ Yoon *et al.* (2018) ได้ประยุกต์ใช้ IoT ในการทำฟาร์มอัจฉริยะเช่นกัน และได้ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างเซนเซอร์แต่ละตัวด้วยเทคนิค MQTT Protocol ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการส่งข้อมูลระหว่างเซนเซอร์แต่ละตัวในลักษณะแบบ M2M (Machine-to-Machine) ผลจากการพัฒนา

ระบบพบว่า ฟาร์มต้นแบบสามารถลดการใช้พลังงานและลดค่าใช้จ่ายต่างๆ ได้ และยังทำให้การควบคุมการทำงานต่างๆ ของฟาร์มได้อย่างอัตโนมัติ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fongngen *et al.* (2018) ที่ได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT ควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้า โดยได้ออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสำหรับโรงเรือนเพาะเห็ดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นชุดเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและเซนเซอร์วัดความชื้นในอากาศ หรือที่เรียกว่า Node MCU ที่ทำหน้าที่เป็นควบคุมการทำงานและประมวลผลค่าที่ได้รับมาจากเซนเซอร์ ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบในส่วนของระบบควบคุม และการทดสอบผลผลิตของดอกเห็ดในโรงเรือนที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น จากผลการทดสอบพบว่า เห็ดที่เก็บจากโรงเรือนที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น มีปริมาณเห็ดที่มากกว่าโรงเรือนแบบทั่วไป ซึ่งหมายความว่า การใช้ IoT ในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นทำให้ได้ผลผลิตที่มากขึ้น และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rattananimit *et al.* (2019) ที่ได้ทำการติดตั้งเซิร์ฟเวอร์สำหรับตรวจสอบข้อมูลผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ โดยใช้เครือข่ายไร้สายไวไฟ (Wi-Fi) และใช้ Blynk Server เป็นระบบการเก็บข้อมูลและรายงานผล ซึ่งระบบที่ออกแบบ ได้ใช้อุปกรณ์เซนเซอร์ทั้งหมดเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ Node MCU เพื่อรับข้อมูลจากเซนเซอร์ในการวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นในดิน โดยสามารถดูข้อมูลทั้งหมดได้จากโทรศัพท์มือถือด้วยการใช้เทคโนโลยี IoT

สรุป

การวิจัยในครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT เข้ามาช่วยในการเพาะปลูกผักกาดหอมพันธุ์

กรีนโอ๊ค โดยใช้ DHT11 Sensor Node ในการวัดความชื้นในอากาศและวัดอุณหภูมิ และใช้ Capacitive Soil Moisture Sensor ในการวัดความชื้นในดิน เมื่อวัดค่าต่างๆ ได้แล้วจะส่งข้อมูลไปยังบอร์ด WeMos D1 Mini Node และบอร์ด ESP32 (Controller Gateway) โดยข้อมูลที่รับ-ส่งจะใช้ MQTT Protocol เพื่อเก็บข้อมูลลงฐานข้อมูลในรูปแบบ JSON ไฟล์ รวมถึงส่งคำสั่งไปควบคุมการเปิด-ปิดปั๊มน้ำด้วย เมื่อบอร์ด WeMos D1 และ ESP32 ได้รับข้อมูลจากเซนเซอร์ และพบว่าค่าไม่สอดคล้องตามที่ได้กำหนดไว้ จะสั่งการให้ปั๊มน้ำทำงานโดยการรดน้ำในแปลงผักโดยอัตโนมัติและจะหยุดรดน้ำเมื่อพบว่า ความชื้นในดินมีค่าระหว่าง 40-70% นอกจากนี้ผู้ใช้งานหรือเกษตรกรยังสามารถควบคุมการทำงานของปั๊มน้ำผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือหรือเว็บไซต์ได้อีกด้วย ผลที่ได้จากการวิจัยพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมาช่วยลดเวลาในการรดน้ำในแปลงผัก โดยปกติการตรวจสอบแปลงผัก 1 แปลง จะใช้เวลาประมาณ 5 นาที และหากตรวจพบว่ามีความชื้นไม่เหมาะสมจะต้องรดน้ำแปลงผักโดยใช้เวลาประมาณ 7-10 นาที ต่อแปลง เมื่อมีการประยุกต์ใช้เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายในการควบคุมการทำงานดังกล่าวจะทำให้ใช้เวลาเพียง 1 นาทีเท่านั้น และปริมาณการใช้น้ำลดลงจาก 3-4 ลิตรต่อนาที เหลือ 2-3 ลิตรต่อนาที

อย่างไรก็ตามหากจะนำแนวคิดจากการวิจัยครั้งนี้ไปควบคุมการเพาะปลูกผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คหรือพืชที่เพาะปลูกในโรงเรือนลักษณะเดียวกัน เช่น ผักสลัด ผักปลอดสารพิษ เป็นต้น สามารถดำเนินการได้ แต่ทั้งนี้จะต้องคำนวณความยาวของแปลงเพาะปลูก เนื่องจากระยะทางในการส่งข้อมูลระหว่างเซนเซอร์ไม่สามารถส่งได้ไกลเกินกว่า 10 เมตร นอกจากนี้หากเป็นแปลงเพาะปลูกที่ไม่ใช่

פקקาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คจะต้องกำหนดค่าความชื้นในดินให้เหมาะสมกับพืชชนิดนั้นๆ ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- Dennis, A., Wizom, B.H. and Roth, R.M. 2012. **System Analysis and Design**. 5th ed. John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Doshi, J., Patel, T. and Bharti, S.K. 2019. Smart farming using IoT, a solution for optimally monitoring farming conditions, pp. 746-751. *In The 3rd International workshop on Recent advances on Internet of Things: Technology and Application Approaches (IoT-T&A 2019), November 4-7, 2019*. Coimbra, Portugal.
- Fongngen, W., Petharn, S. and Yajor, S. 2018. Application with the Internet of Things technology control in smart farms mushroom. **Journal of Information Technology Management and Innovation (ITMI)** 5(10): 172-182. (in Thai)
- Manwicha, J. 2016. Smart farms technology. **Hatyai Academic Journal** 14(2): 201-210. (in Thai)
- Musat, G.A., Colezea, M., Pop, F., Negru, C., Mocanu, M., Esposito, C. and Castiglione, A. 2018. Advanced services for efficient management of smart farms. **Journal of Parallel and Distributed Computing** 116(2): 3-17.
- Nord, J.H., Koohang, A. and Paliszkievich, J. 2019. The Internet of Things: Review and theoretical framework. **Expert Systems with Applications** 133(1): 97-108.
- Panmuang, M. and Porrawatpreyakorn, N. 2016. Factors influencing acceptance of and benefit realization from information systems in Thai State Enterprises, pp. 343-347. *In 16th European Conference on e-Government, 16-17 June 2016*. Faculty of Administration, University of Ljubljana, Slovenia.
- Rattananimit, W., Kespanich, V. and Choonprawat, S. 2019. Installation of smart farm server for data monitoring via mobile application. **Journal of Energy and Environment Technology** 6(1): 37-42. (in Thai)
- Sajjasophon, R., Yamtim, V., Numniam, S. and Thawornratana, C. 2019. Knowledge and attention to receive knowledge about young smart farmer of agricultural and environmental education students, Faculty of education and development science, Kasetsart University. **Journal of Education and Human Development Sciences** 3(1): 45-57. (in Thai)
- TongKe, F. 2013. Smart agriculture based on cloud computing and IoT. **Journal of Convergence Information Technology (JCIT)** 8(2): 1-7.
- Tummers, J., Kassahun, A. and Tekinerdogan, B. 2019. Obstacles and features of farm management information systems: A systematic literature review. **Computers and Electronics in Agriculture** 157(1): 189-204.

- Valacich, J., George, J. and Hoffer, J. 2014. **Essentials of Systems Analysis and Design.** 6th. Prentice Hall Press Upper Saddle River, NJ, USA.
- Yoon, C., Huh, M., Kang, S.G., Park, J. and Lee, C. 2018. Implement smart farm with IoT technology, pp. 749-752. *In* **20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 11-14 Feb. 2018.** Chuncheon-si Gangwon-do, Korea (South).

การปรับแก้วิธีเคเนียร์เรสเนเบอร์โดยใช้ค่าเฉลี่ยเดไซล์

ในการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย

Adjusted K Nearest Neighbor Method Based on Decile Mean in Missing Data Imputation

พัชณา สุวรรณแสน^{1*} กัทราวดี มากมี¹ และ อาฟีฟิ ลาเต๊ะ²

Patchana Suwannasaen^{1*}, Patrawadee Makmee¹ and Afifi Latch²

Received: 19 November 2019, Revised: 3 February 2020, Accepted: 13 February 2020

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ Decile Mean K-Nearest Neighbor Bhattacharyya Imputation (DKNN-BH) ที่เกิดจากวิธีการประมาณค่าสูญหายด้วยวิธี K-Nearest Neighbor Imputation (KNN) ปรับแก้ด้วยการใช้ค่าเฉลี่ยเดไซล์และการหาระยะทางแบบ Bhattacharyya เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ DKNN-BH กับวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายค่าเฉลี่ยเลขคณิต วิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย K-Nearest Neighbor Imputation (KNN) และวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย Decile Mean K-Nearest Neighbor Imputation (DKNN) ภายใต้การจำลองสถานการณ์ 300 สถานการณ์ จาก 4 เงื่อนไข คือ ขนาดตัวอย่าง ระดับการสูญหายของข้อมูล ขนาดของค่านอกเกณฑ์ และค่าคงที่ k สำหรับการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ DKNN-BH วิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย KNN และวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย DKNN โดยใช้การจำลองสถานการณ์ วิธีมอนติคาร์โล ทำการทดลองซ้ำจำนวน 500 ครั้ง ผลการศึกษา ปรากฏว่า การพัฒนาวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ DKNN-BH เกิดจากการปรับแก้วิธีการประมาณค่าสูญหายวิธี KNN ด้วยการ ใช้ค่าเฉลี่ยเดไซล์และการหาระยะทางแบบ Bhattacharyya ซึ่งเป็นการปรับแก้ขั้นตอนในการประมาณค่าสูญหายของวิธี KNN ใน 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการคำนวณระยะทาง โดยใช้การหาระยะทางแบบ Bhattacharyya และขั้นตอน การประมาณค่าข้อมูลสูญหายด้วยวิธีการใช้ค่าเฉลี่ยเดไซล์ และเมื่อ

¹ วิทยาลัยวิทยาการวิจัยและวิทยาการปัญญา มหาวิทยาลัยบูรพา 169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมืองชลบุรี จังหวัดชลบุรี 20131

¹ College of Research Methodology and Cognitive Science, Burapha University, 169 Longhaad Bangsaen Road, Saensook, Mueang, ChonBuri 20131, Thailand.

² คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี 181 ถนนเจริญประดิษฐ์ ตำบลรูสะมิแล อำเภอเมือง จังหวัดปัตตานี 94000

² Faculty of Education, Prince of Songkla University, Pattani Campus, 181 Charoen Pradit Road, Rusamilae, Mueang, Pattani 94000, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): patchana.s@nrru.ac.th Tel: 08 9917 1320

พิจารณาผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ DKNN-BH ในการจำลองสถานการณ์ วิธี DKNN-BH ให้ผลดีกว่าการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบเดิมในทุกกรณี จากการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยที่ให้ค่าต่ำที่สุด เมื่อข้อมูลมีร้อยละการสูญหาย เท่ากับ ร้อยละ 5 10 20 30 และ 40 มีร้อยละค่านอกเกณฑ์ เท่ากับ ร้อยละ 0 5 10 และ 20 และค่า k เท่ากับ 11 13 15 17 และ 19 โดยค่า MSE จะยังมีค่าลดลงเมื่อร้อยละค่านอกเกณฑ์และค่า k ลดลง

คำสำคัญ: การประมาณค่าข้อมูลสูญหาย, ข้อมูลสูญหาย, การปรับแก้วิธีเคเนียร์เรสเนเบอร์

ABSTRACT

The objective of this research was to develop a new method for missing data estimation by using Decile Mean K-Nearest Neighbor Bhattacharyya Imputation (DKNN-BH). This method evaluated the missing data by K-Nearest Neighbor Imputation (KNN) from fine-tuning of the decile mean and Bhattacharyya distance to compare the effectiveness of the new missing data estimation with Mean Imputation (MI), K-Nearest Neighbor Imputation (KNN) and Decile Mean K-Nearest Neighbor Imputation (DKNN) methods. The Monte Carlo simulation was implemented for 300 cases with 4 options : sample size, level of missing data, size of outliers, and k constants for new missing data DKNN-BH, KNN and DKNN methods. Each situation was replicated 500 times. The results showed that the new developed missing data estimation method, DKNN-BH derived from the fine tuning of KNN using Decile Mean and Bhattacharyya distance. There were 2 steps of DKNN-BH: calculation of Bhattacharyya distance and estimation of missing data using Decile Mean method. After comparing the efficacy of both data missing estimation methods from simulation results, the new method (DKNN-BH) was better than the old one in all cases by using the lowest mean square error. The simulation results also revealed that when the percentage of missing data were 5, 10, 20, 30 and 40, the percentage of outliers were 0, 5, 10, 20 and k constant values were 11, 13, 15, 17, and 19 respectively, the lowest mean square error will decrease as the percentage of outliers and k constants decrease.

Key words: missing data imputation, missing data, adjusted K Nearest Neighbor method

บทนำ

ข้อมูลที่มีความถูกต้องสมบูรณ์ เป็นสิ่งที่นักวิจัย นักวิเคราะห์ข้อมูล หรือนักจัดการข้อมูลปรารถนา นำไปสู่การใช้ข้อมูลในการคาดคะเนทำนายหรือพยากรณ์สิ่งที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เพื่อให้เกิดประโยชน์ในการวางแผนล่วงหน้าได้อย่าง

ใกล้เคียงความเป็นจริง ข้อมูลสูญหาย (Missing data) เป็นปัญหาที่นักวิจัยพบในการนำข้อมูลไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากที่ข้อมูลจากการเก็บรวบรวมจะมีความสมบูรณ์ถูกต้อง อาจเนื่องมาจากขั้นตอนในการเก็บข้อมูลไม่รัดกุม ผู้ให้ข้อมูลไม่ใส่ใจในรายละเอียดของการตอบ หรือ

เกิดเหตุการณ์ที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ตามแผน เหตุการณ์ข้างต้นจึงทำให้เกิดข้อมูลสูญหายซึ่งปัญหาเหล่านี้ อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ข้อมูล

ปัญหาข้อมูลสูญหายอาจไม่ใช่ปัญหาที่รุนแรง ถ้าการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นการวิเคราะห์ตัวแปรเดียว (Univariate Data) เช่น การหาค่าเฉลี่ย ร้อยละ หรือสถิติพรรณนาอื่นๆ แต่ถ้าข้อมูลจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์ตัวแปรพหุ (Multivariate Data) เช่น การวิเคราะห์ถดถอยพหุ การวิเคราะห์ปัจจัย การวิเคราะห์กลุ่ม การวิเคราะห์จำแนก เป็นต้น ในกรณีนี้การสูญหายของข้อมูลจะส่งผลกระทบต่อรุนแรง เพราะถ้าหน่วยวิเคราะห์ใดมีตัวแปรขาดหายไปเพียงหนึ่งตัวแปรก็จะตัดหน่วยวิเคราะห์นั้นทิ้งทั้งหน่วยโดยไม่สนใจว่าตัวแปรอื่นมีข้อมูลครบถ้วนหรือไม่ ซึ่งการตัดข้อมูลทิ้ง Kim and Curry (1977) ได้ทำการศึกษาโดยวิธีทดลองพบว่า ถ้าตัวแปรแต่ละตัวหายไปโดยสุ่มเพียงร้อยละ 10 จะมีผลทำให้ต้องตัดหน่วยวิเคราะห์ทิ้งถึงร้อยละ 59 ซึ่งเป็นการสูญเสียข้อมูลที่มีอัตราสูงมาก และข้อมูลที่เหลือหลังจากการตัดค่าสังเกตที่ไม่สมบูรณ์ทิ้งจะทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลเกิดความเอนเอียงและไม่ถูกต้อง (Robins and Wang, 2000) ดังนั้นควรพิจารณาหาวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายด้วยวิธีที่เหมาะสมก่อนการวิเคราะห์ข้อมูล

วิธีการจัดการข้อมูลสูญหาย แบ่งเป็น 2 ประเภทหลักคือ การตัดกลุ่มข้อมูลที่สูญหายทิ้งไป (Ignoring And Discarding Data) และการประมาณค่าข้อมูลสูญหายด้วยค่าสูญหายจากการคำนวณ (Imputation) โดยมีผู้ศึกษาและวิจัยเพื่อพัฒนาวิธีการจัดการค่าสูญหายด้วยวิธีการต่างๆ ที่มีประสิทธิภาพที่สุดมาใช้ในการประมาณค่าสูญหายของข้อมูลให้เหมาะสมกับประเภทของข้อมูลที่เกิดการสูญหาย เริ่มตั้งแต่วิธีพื้นฐาน ได้แก่ วิธีประมาณค่าสูญหายค่าเฉลี่ยเลขคณิต หรือ Mean Imputation: MI ซึ่งเป็น

วิธีที่ง่ายในการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย แต่วิธีการนี้อาจจะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของข้อมูลและเหมาะสมกับข้อมูลบางประเภทเท่านั้น ไปจนถึงวิธีที่มีความยุ่งยากซับซ้อนมากๆ เช่น Expectation Maximization หรือ Maximum Likelihood Estimation เป็นต้น การประมาณค่าข้อมูลสูญหายโดยใช้เทคนิคทางเหมืองข้อมูล เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ได้รับคามสนใจเนื่องจากไม่ยึดติดกับเทคนิคทางสถิติ ตัวอย่างการประมาณค่าข้อมูลสูญหายโดยเทคนิคทางเหมืองข้อมูล เช่น วิธีโครงข่ายประสาทเทียม หรือ Artificial Neural Networks (Bishop, 1995; Schioler and Hartmann, 1992) วิธี Singular Value Decomposition: SVD (Troyanskaya *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2004) แต่ทั้งสองวิธีนี้เป็นวิธีการประมาณค่าที่มีความซับซ้อน เข้าใจยาก อีกวิธีการหนึ่งในการประมาณค่าด้วยเทคนิคเหมืองข้อมูลที่ได้รับคามนิยม คือ วิธีเคเนียร์เรสเนเบอร์ หรือ K Nearest Neighbor: KNN (Troyanskaya *et al.*, 2001) ซึ่งเป็นวิธีที่มีความยืดหยุ่นสูง ง่ายต่อการใช้งาน และมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีจุดด้อยในการถูกโจมตีโดยค่านอกเกณฑ์ (Hengpraprom and Meesad, 2008) ขั้นตอนของการประมาณค่าซึ่งใช้การประมาณค่าด้วยค่าเฉลี่ย k จำนวนของข้อมูลที่มีการสูญหายจากงานวิจัยของ Rana *et al.* (2012) ได้ศึกษาการวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางแบบใหม่ที่มีความแกร่งโดยการใช้ค่าเฉลี่ยเดไซล์ (Decile Mean) ซึ่งสามารถมีความแกร่งกับค่านอกเกณฑ์ได้ และในขั้นตอนของการหาระยะทางซึ่งเดิมใช้การหาระยะทาง Euclidian แต่จากการศึกษาพบว่า การหาระยะทาง Bhattacharyya มีความไวต่อค่านอกเกณฑ์ (Pasunon and Nilakorn, 2007) เช่นกัน ดังนั้นในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยจึงสนใจจะพัฒนาวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายโดยการปรับแก้ การประมาณค่าสูญหายด้วยวิธีเคเนียร์เรสเนเบอร์ ซึ่งมีความน่าสนใจ

โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเดซิส์และการหาระยะทางแบบ Bhattacharyya (Bhattacharyya, 1943) มาช่วยในการปรับแก้ เพื่อให้ได้วิธีการประมาณค่าสูญหายที่มีประสิทธิภาพในการประมาณค่ามากยิ่งขึ้น เรียกว่าวิธีการประมาณค่าสูญหาย Decile Mean K Nearest Neighbor-Bhattacharyya หรือ DKNN-BH เพื่อแก้ปัญหาค่านอกเกณฑ์ของข้อมูลในการประมาณค่าสูญหาย ที่มีประสิทธิภาพ ถูกต้องและใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ DKNN-BH ที่เกิดจากการปรับแก้วิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายจากวิธีเคเนียร์เรสเนเบอร์ ด้วยค่าเฉลี่ยเดซิส์และการหาระยะทาง Bhattacharyya และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ DKNN-BH กับวิธีเดิม คือวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายค่าเฉลี่ยเลขคณิต วิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย KNN และวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย DKNN ภายใต้การจำลองสถานการณ์

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เพื่อพัฒนาวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ ที่เกิดจากการปรับแก้วิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายจากวิธีเคเนียร์เรสเนเบอร์ ด้วยค่าเฉลี่ยเดซิส์และการหาระยะทางแบบ Bhattacharyya (DKNN-BH) ให้มีประสิทธิภาพในการประมาณค่าสูญหายที่ดี ซึ่งมีวิธีการดำเนินการตามขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย MI KNN และ DKNN รวบรวมแนวคิดและวิธีการของการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย KNN รวมถึงแนวทางแก้ปัญหา

2. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางของข้อมูลโดยใช้ค่าเฉลี่ยเดซิส์

3. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการหาระยะทางแบบ Bhattacharyya

4. เสนอกรอบแนวคิดวิธีประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ DKNN-BH ที่เกิดจากการปรับแก้ KNN และ DKNN

5. การจำลองข้อมูลจากการแจกแจงแบบปกติหลายตัวแปร (Multivariate Normal Distribution) ซึ่งใช้หลักของการจำลองด้วยเลขสุ่ม (Random Numbers) สุ่มจากประชากรด้วยวิธีการสุ่มอย่างง่าย (Simple Random Sampling) เพื่อให้ได้ขนาดตัวอย่างตามที่กำหนด

6. สร้างข้อมูลให้มีค่านอกเกณฑ์ในตัวแปรตามลักษณะของข้อมูลจริง

7. สร้างข้อมูลสูญหาย ในขั้นตอนนี้จะทำการสร้างข้อมูลสูญหายแบบสุ่มสมบูรณ์ (MCAR) โดยมีร้อยละของข้อมูลสูญหายตามที่กำหนดและข้อมูลที่ถูกต้องออกไปนั้นจะเก็บไว้เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าใหม่ที่จะประมาณขึ้นมาทั้ง 4 วิธี

8. ดำเนินการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย ด้วยวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ DKNN-BH กับวิธีเดิม คือ วิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายค่าเฉลี่ยเลขคณิต วิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย KNN และวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย DKNN ภายใต้การจำลองสถานการณ์ 300 สถานการณ์ จำนวน 4 เงื่อนไข คือ

8.1 ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม คือ จำนวนตัวอย่าง 100 300 และ 500 ตัวอย่าง

8.2 ระดับการสูญหายของข้อมูล 5 ระดับ คือ ร้อยละ 5 10 20 30 และ 40

8.3 ขนาดของค่านอกเกณฑ์ 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 5 10 และ 15

8.4 ค่าคงที่ k 5 ระดับ คือ 11 13 15 17 และ 19 ซึ่งเป็นค่าคงที่ในวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ DKNN-BH และวิธีที่เกี่ยวข้องคือ

วิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย KNN และวิธีการ
ประมาณค่าข้อมูลสูญหาย DKNN

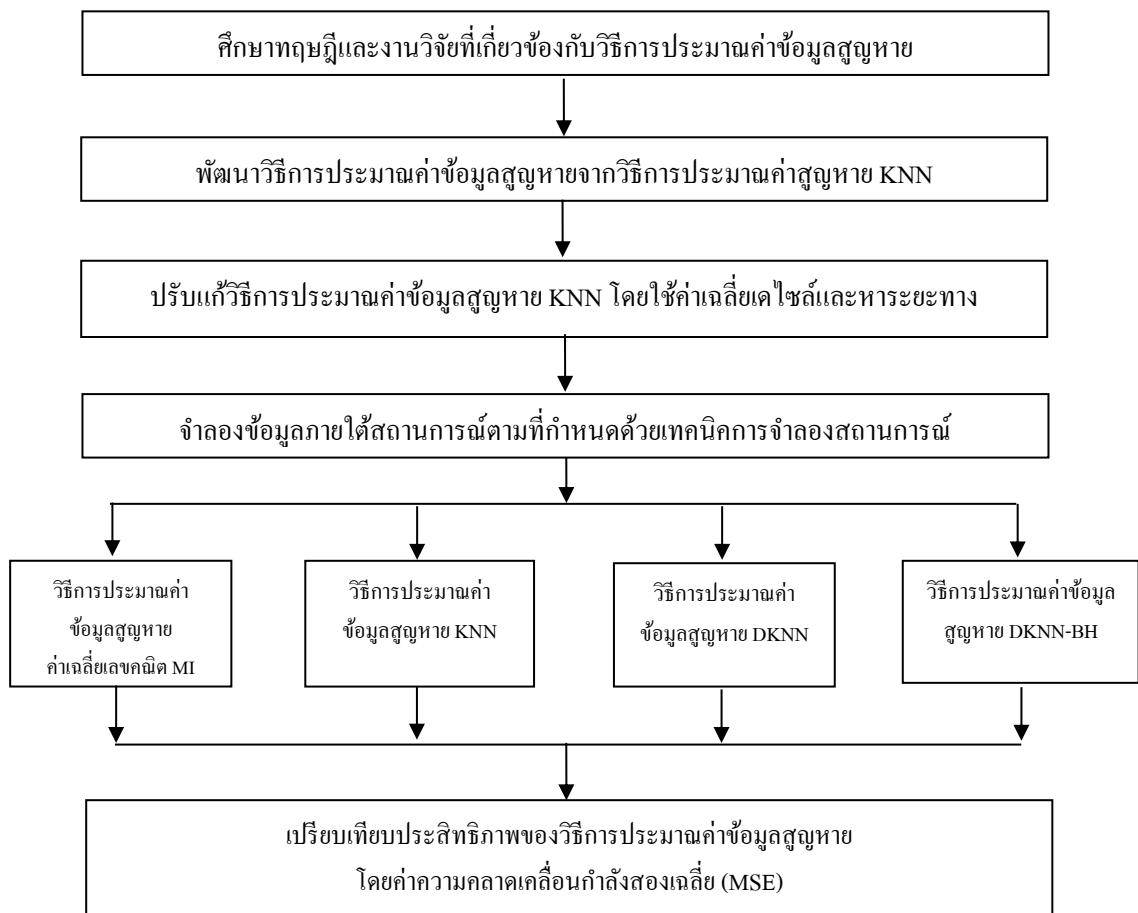
9. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการ
ประมาณค่าข้อมูลสูญหายพิจารณาจาก ค่า
คลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error:

MSE) ของวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแต่ละวิธี
ซึ่งมีสูตรในการคำนวณดังนี้

ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean
Square Error: MSE) โดยมีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

เมื่อ y_i คือ ค่าจริงของข้อมูล
 $\hat{y}_i$ คือ ค่าทดแทนของข้อมูลที่มีการสูญหาย
 n คือ จำนวนค่าที่สูญหาย



ภาพที่ 1 กรอบแนวทางการวิจัยในภาพรวม

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การประมาณค่าข้อมูลสูญหายด้วยวิธีใหม่ เกิดจากการปรับแก้วิธีการประมาณค่าสูญหายวิธี K-Nearest Neighbor Imputation (KNN) ด้วยการใส่ค่าเฉลี่ยเดโชล์และการหาระยะทางแบบ Bhattacharyya เพื่อประมาณค่าข้อมูลที่สูญหาย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพของการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย และเพื่อลดผลกระทบจากค่านอกเกณฑ์ (Outlier) เรียกวิธีการนี้ว่า “การประมาณค่าข้อมูลสูญหายวิธี Decile Mean K-Nearest กำหนดให้

y เป็นตัวแปรตามที่ยื่นอยู่กับตัวแปร (ลักษณะ) $x_1, x_2, \dots, x_m$ โดยที่

$$y = \begin{cases} y_j, j=1, \dots, r & \text{เป็นข้อมูลสมบูรณ์} \\ y_j, j=r+1, \dots, n & \text{เป็นข้อมูลสูญหาย} \end{cases}$$

x_{ij} ; $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$ เป็นค่าของตัวแปรอิสระที่เก็บรวบรวมข้อมูลได้แบบสมบูรณ์ (ไม่มีการสูญหาย)

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ใช้ในตัวอย่าง

หน่วยที่	y	x_1	x_2	x_3	...	x_m
1	y_1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	...	x_{1m}
2	y_2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	...	x_{2m}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
r	y_r	$x_{(r)1}$	$x_{(r)2}$	$x_{(r)3}$	...	$x_{(r)m}$
$r+1$		$x_{(r+1)1}$	$x_{(r+1)2}$	$x_{(r+1)3}$	...	$x_{(r+1)m}$
$\vdots$	Missing	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
n		x_{n1}	x_{n2}	x_{n3}	...	x_{nm}

การประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่เกิดจากการปรับแก้วิธีการประมาณค่าสูญหายวิธี K-Nearest Neighbor Imputation (KNN) โดยการใส่ค่าเฉลี่ยเดโชล์และการหาระยะทางแบบ Bhattacharyya เพื่อประมาณค่าข้อมูลที่สูญหาย มี

Neighbor Imputation (DKNN)” และเมื่อนำการหาระยะทางแบบ Bhattacharyya มาช่วยในการปรับแก้เรียกวิธีการนี้ว่า “การประมาณค่าข้อมูลสูญหายวิธี Decile Mean K-Nearest Neighbor Bhattacharyya Imputation (DKNN-BH) กำหนดให้ P เป็นประชากรที่มีขนาดเท่ากับ N หน่วยและ S เป็นตัวอย่างที่ได้มาจากการสุ่มแบบไม่ใส่คืนจากประชากร P ขนาดเท่ากับ n หน่วย โดยในแต่ละหน่วย (x_i, y_i) เป็นค่าที่สังเกตได้ โดยที่ $i = 1, 2, \dots, n$ และ ตัวแปร $x_1, x_2, \dots, x_n$ เป็นตัวแปรอิสระ

ขั้นตอนวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ DKNN-BH ดังนี้

ส่วนที่ 1 คำนวณระยะทาง

ขั้นที่ 1 กำหนดจำนวน k โดยค่า k ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 20 (Cartwright *et*

al., 2003; Ladha and Deepa, 2011) ซึ่งใช้ค่า k ที่ 11
13 15 17 และ 19

ขั้นที่ 2 กำหนดระยะห่างระหว่างตัวอย่างที่
ประกอบด้วยข้อมูลสูญหายกับตัวอย่างทั้งหมดด้วย

สมการ (1) โดยกำหนดให้ y_j เป็นข้อมูลสูญหาย เมื่อ
 $i = 1, 2, \dots, r$ $j = 1, 2, \dots, m$ และ d_i เป็นค่าระยะห่าง

$$d_i = \text{Bhattacharyya}(y_{i,j}, y_{ij}) = -\log \sum \left(\frac{\sqrt{y_{i,j} y_{ij}}}{\sqrt{\sum y_{i,j} \sum y_{ij}}} \right) \quad (1)$$

ขั้นที่ 3 เรียงระยะห่างที่คำนวณได้
ทั้งหมดจากน้อยไปหามากและเลือกค่าที่มีระยะห่าง
กับค่าสูญหายน้อยที่สุด k ตัว

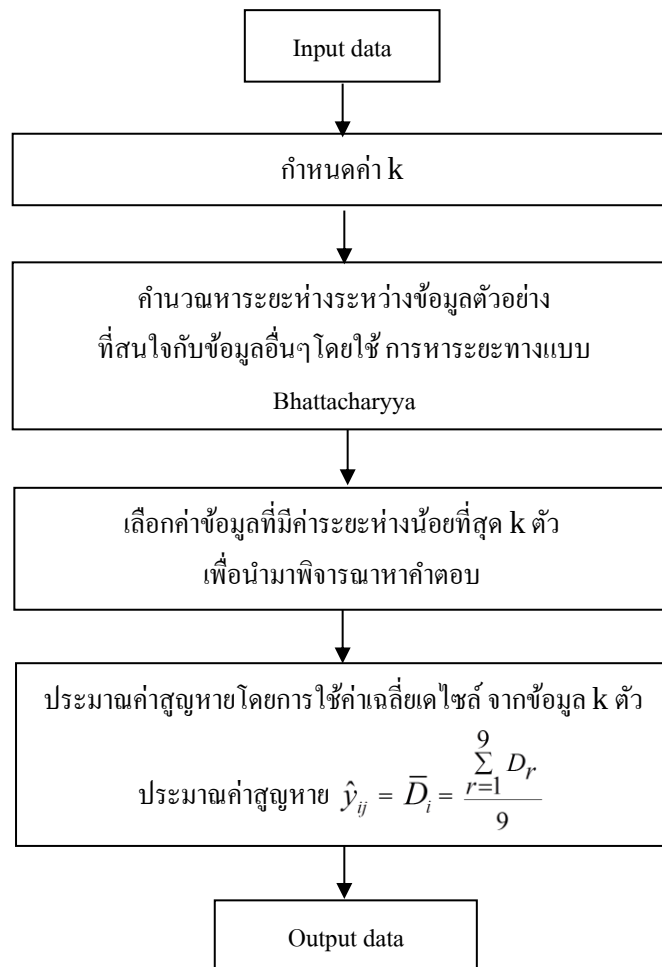
ส่วนที่ 2 การประมาณค่าสูญหาย
ขั้นที่ 4 กำหนดหาค่าเฉลี่ยในทุก
ตำแหน่ง จากข้อมูล k ตัว

$$\text{ค่าสูญหาย} = \hat{y}_{ij} = \frac{\sum_{r=1}^9 D_r}{9} \quad (2)$$

เมื่อ D_r คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล ในตำแหน่งที่ r
 r คือ ตำแหน่งเฉลี่ยของข้อมูล มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, ..., 9

ขั้นที่ 5 ประมาณค่าสูญหายโดยนำค่าจากขั้นตอนที่ 4
มาหาค่าเฉลี่ยเฉลี่ย และทำการประมาณค่าข้อมูลสูญ

หาย ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนวิธีการประมาณค่าสูญ
หายแบบใหม่ DKNN-BH ดังนี้



ภาพที่ 2 ขั้นตอนวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ DKNN-BH

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายที่พัฒนาขึ้นใหม่หรือวิธี DKNN-BH กับวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายอีก 3 วิธี คือ วิธีประมาณค่าด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตวิธี KNN และวิธี DKNN โดยทำการจำลองข้อมูลด้วยวิธีมอนติคาร์โลทั้งหมด 300 สถานการณ์ และทดลองซ้ำ 500 รอบในแต่ละสถานการณ์ ด้วยโปรแกรม R ในการจำลองข้อมูล ซึ่งมีการแจกแจงปกติ ภายใต้อัน 4 เงื่อนไข คือ ขนาดตัวอย่าง 3 สถานการณ์ คือ ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 100 300 และ 500 ระดับการสูญหายของข้อมูล 5 ระดับ คือ ร้อยละ 5 10 20 30 และ 40 ขนาดของค่านอกเกณฑ์ 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 5 10 และ 20 และค่า k 5 ระดับ คือ 11 13 15 17 และ 19 ของวิธีการประมาณค่าสูญหายวิธี KNN DKNN และ

DKNN-BH โดยใช้เกณฑ์ในการพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error: MSE) เพื่อสรุปว่าวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายวิธีการใดเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละสถานการณ์ โดยวิธีที่ให้ค่า MSE ต่ำกว่า จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากกว่าผลการวิจัยพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้ข้อมูลที่ให้ค่า MSE ต่ำที่สุด ซึ่งพบว่าการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นคือวิธี DKNN-BH ที่มีการใช้ค่าเฉลี่ยเฉลี่ยและระยะทาง Bhattacharyya ให้ผลดีที่สุดในทุกกรณี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rana *et al.* (2012) ที่ใช้การวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางโดยวิธีค่าเฉลี่ยเฉลี่ยมีผลที่ดีกว่าวิธีอื่นๆ เมื่อมีหรือไม่มีค่านอกเกณฑ์ (Outlier) ส่วนค่า k ที่มี

ค่าเหมาะสมให้ผลคืออยู่ในช่วงระหว่าง 10 - 20 ที่อ้างอิงมาและค่า k ที่ให้ผลต่ำที่สุด คือ 11 ใกล้เคียงกับงานของ Troyanskaya *et al.* (2001) ที่ได้ผลค่า k ที่เหมาะสมอยู่ที่ 10 และวิธีการประมาณค่าสูญหายด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตมีประสิทธิภาพน้อยที่สุดในทุกกรณี

เช่นกันซึ่งสอดคล้องกับงานของ Liao *et al.* (2014) โดยในขนาดตัวอย่าง 100 300 และ 500 ให้ค่า MSE ต่ำสุดที่ระดับการสูญหายร้อยละ 5 ในทุกขนาดตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดของผลการวิจัยในแต่ละกรณีแสดงในตารางที่ 2 ถึง 4 ดังนี้

ตารางที่ 2 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของตัวประมาณ โดยมีขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 100 และระดับการสูญหายร้อยละ 5

ค่า k	ร้อยละ ค่านอกเกณฑ์	ค่า MSE ของวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย			
		MI	KNN	DKNN	DKNN-BH
11	0	9.67009	9.49846	9.52091	<u>3.76940</u>
	5	9.38047	9.58167	9.59992	<u>3.98445</u>
	10	9.42661	9.19019	9.20404	<u>4.24735</u>
	20	9.58879	9.57781	9.59711	<u>5.06736</u>
13	0	9.67009	9.44458	9.48287	<u>4.18064</u>
	5	9.38047	9.47143	9.49620	<u>4.39178</u>
	10	9.42661	9.21391	9.22958	<u>4.72262</u>
	20	9.58879	9.50967	9.53348	<u>5.59584</u>
15	0	9.67009	9.44153	9.47593	<u>4.58823</u>
	5	9.38047	9.39680	9.42646	<u>4.84497</u>
	10	9.42661	9.22930	9.24258	<u>5.13972</u>
	20	9.58879	9.46702	9.50424	<u>5.97769</u>
17	0	9.67009	9.43029	9.47519	<u>5.01785</u>
	5	9.38047	9.38400	9.42264	<u>5.21839</u>
	10	9.42661	9.26433	9.28139	<u>5.56073</u>
	20	9.58879	9.44313	9.48288	<u>6.33587</u>
19	0	9.67009	9.40654	9.45684	<u>5.41135</u>
	5	9.38047	9.36255	9.41186	<u>5.56356</u>
	10	9.42661	9.25756	9.27788	<u>5.91706</u>
	20	9.58879	9.39747	9.41762	<u>6.65511</u>

จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย โดยมีขนาดตัวอย่างเท่ากับ 100 และ ระดับการสูญหาย ร้อยละ 5 ผลการศึกษาพบว่า วิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย

แบบ DKNN-BH มีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุดหรือมีความแม่นยำสูงสุดในทุกกรณี เมื่อข้อมูลมีร้อยละค่านอกเกณฑ์ เท่ากับ ร้อยละ 0 5 10 และ 20 และค่า k เท่ากับ 11 13 15 17 และ 19 โดยค่า

MSE จะยังมีค่าลดลงเมื่อร้อยละค่านอกเกณฑ์และ ค่า k ลดลง

ตารางที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของตัวประมาณ โดยมีขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 300 และ ระดับการสูญเสียร้อยละ 5

ค่า k	ร้อยละ ค่านอกเกณฑ์	ค่า MSE ของวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญเสีย			
		MI	KNN	DKNN	DKNN-BH
11	0	9.48177	9.09297	9.11853	<u>1.52732</u>
	5	9.31272	9.14603	9.16918	<u>2.00627</u>
	10	9.64039	9.15053	9.17719	<u>1.98381</u>
	20	9.47758	9.01873	9.04038	<u>1.71055</u>
13	0	9.48177	8.97301	9.01283	<u>1.67474</u>
	5	9.31272	9.06219	9.10113	<u>2.14105</u>
	10	9.64039	9.04523	9.07977	<u>2.20404</u>
	20	9.47758	8.94787	8.97702	<u>1.91148</u>
15	0	9.48177	8.93509	8.97979	<u>1.80241</u>
	5	9.31272	9.00616	9.04925	<u>2.24997</u>
	10	9.64039	8.96807	9.00945	<u>2.37498</u>
	20	9.47758	8.85502	8.88264	<u>2.13324</u>
17	0	9.48177	8.89182	8.93768	<u>1.92956</u>
	5	9.31272	8.93321	8.98151	<u>2.36595</u>
	10	9.64039	8.93768	8.97003	<u>2.54518</u>
	20	9.47758	8.77235	8.80487	<u>2.34580</u>
19	0	9.48177	8.85982	8.92021	<u>2.05710</u>
	5	9.31272	8.84753	8.89201	<u>2.48599</u>
	10	9.64039	8.94173	8.99940	<u>2.70735</u>
	20	9.47758	8.75574	8.77698	<u>2.57905</u>

จากตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย โดยมีขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 300 และระดับการสูญเสีย ร้อยละ 5 ผลการศึกษาพบว่า วิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบ DKNN-BH มีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง

เฉลี่ยต่ำที่สุดหรือมีความแม่นยำสูงสุดในทุกกรณี เมื่อข้อมูลมีร้อยละค่านอกเกณฑ์ เท่ากับ ร้อยละ 0 5 10 และ 20 และค่า k เท่ากับ 11 13 15 17 และ 19 โดยค่า MSE จะยังมีค่าลดลงเมื่อร้อยละค่านอกเกณฑ์และค่า k ลดลง

ตารางที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของตัวประมาณ โดยมีขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 500 และ ระดับการสูญหายร้อยละ 5

ค่า k	ร้อยละ ค่านอกเกณฑ์	วิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย			
		MI	KNN	DKNN	DKNN-BH
11	0	9.42080	9.18170	9.20606	<u>1.17536</u>
	5	9.36161	8.89337	8.91668	<u>1.43501</u>
	10	9.63915	8.94670	8.96942	<u>1.28910</u>
	20	9.44205	8.83913	8.85792	<u>1.21232</u>
13	0	9.42080	9.10045	9.14724	<u>1.22853</u>
	5	9.36161	8.80469	8.84509	<u>1.52332</u>
	10	9.63915	8.84344	8.88588	<u>1.41543</u>
	20	9.44205	8.78714	8.82435	<u>1.31018</u>
15	0	9.42080	8.99480	9.05247	<u>1.30165</u>
	5	9.36161	8.73206	8.78689	<u>1.62614</u>
	10	9.63915	8.79732	8.85262	<u>1.55660</u>
	20	9.44205	8.72956	8.76819	<u>1.41809</u>
17	0	9.42080	8.93054	8.98601	<u>1.37796</u>
	5	9.36161	8.69288	8.74414	<u>1.72289</u>
	10	9.63915	8.77810	8.82378	<u>1.70418</u>
	20	9.44205	8.67631	8.71967	<u>1.54313</u>
19	0	9.42080	8.88151	8.94994	<u>1.46314</u>
	5	9.36161	8.65568	8.71809	<u>1.81886</u>
	10	9.63915	8.75386	8.80036	<u>1.83927</u>
	20	9.44205	8.66389	8.71890	<u>1.67561</u>

จากตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย โดยมีขนาดตัวอย่าง เท่ากับ 500 และระดับการสูญหาย ร้อยละ 5 ผลการศึกษาพบว่า วิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบ DKNN-BH มีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุดหรือมีความแม่นยำสูงสุดในทุกกรณี เมื่อข้อมูลมีร้อยละค่านอกเกณฑ์ เท่ากับ ร้อยละ 0 5 10 และ 20 และค่า k เท่ากับ 11 13 15 17 และ 19 โดยค่า MSE จะยังมีค่าลดลงเมื่อร้อยละค่านอกเกณฑ์และค่า k ลดลง

สรุป

1. ผลการพัฒนาวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ DKNN-BH

การพัฒนาวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายด้วยวิธีใหม่เกิดจากการปรับแก้วิธีการประมาณค่าสูญหายวิธี K-Nearest Neighbor Imputation (KNN) ด้วยการใช้ค่าเฉลี่ยเฉลี่ยและการหาระยะทางแบบ Bhattacharyya เพื่อประมาณค่าข้อมูลที่สูญหาย เรียกวิธีการนี้ว่า “การประมาณค่าข้อมูลสูญหายวิธี Decile

Mean K-Nearest Neighbor Bhattacharyya Imputation (DKNN-BH) ซึ่งเป็นการปรับแก้ขั้นตอนในการประมาณค่าสูญหายของวิธี KNN ในขั้นตอนการคำนวณระยะทาง โดยใช้การหาระยะทางแบบ Bhattacharyya และขั้นตอนการประมาณค่าข้อมูลสูญหายด้วยวิธีการใช้ค่าเฉลี่ยเดโชล์

2. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีประมาณค่าข้อมูลสูญหายแบบใหม่ DKNN-BH กับวิธีแบบเดิม

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายที่พัฒนาขึ้นใหม่หรือวิธี DKNN-BH กับวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายอีก 3 วิธี คือ วิธีประมาณค่าด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิต วิธี KNN และวิธี DKNN โดยทำการจำลองข้อมูลด้วยวิธีมอนติคาร์โลทั้งหมด 300 สถานการณ์ และกระทำซ้ำ 500 รอบในแต่ละสถานการณ์ จำนวน 4 เงื่อนไข คือ ขนาดตัวอย่าง 3 กลุ่ม คือ 100 300 และ 500 ระดับการสูญหายของข้อมูล 5 ระดับ คือ ร้อยละ 5 10 20 30 และ 40 ของขนาดข้อมูล ขนาดของค่านอกเกณฑ์ 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 5 10 และ 15 และค่าคงที่ k 5 ระดับ คือ 11 13 15 17 และ 19 ของวิธีการประมาณค่าสูญหาย KNN DKNN และ DKNN-BH โดยใช้เกณฑ์ในการพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error: MSE) เพื่อสรุปว่าวิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหายวิธีการใดเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละสถานการณ์ โดยวิธีใดที่ให้ค่า MSE ต่ำกว่าจะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากกว่า ผลการศึกษาพบว่า วิธีการประมาณค่าข้อมูลสูญหาย DKNN-BH มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุดหรือมีความแม่นยำสูงสุดในทุกกรณี เมื่อข้อมูลมีร้อยละค่านอกเกณฑ์ เท่ากับ ร้อยละ 0 5 10 และ 20 และค่า k เท่ากับ 11 13 15 17 และ 19 โดยค่า MSE จะยังมีค่าลดลงเมื่อร้อยละค่านอกเกณฑ์และค่า k ลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ที่สนับสนุนทุนการศึกษา และขอขอบคุณสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและกรมอุตุนิยมวิทยา ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกสำหรับข้อมูลที่สำคัญและเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Bhattacharyya, A. 1943. On a measure of divergence between two statistical populations defined by their probability distributions. **Bulletin of the Calcutta Mathematical Society** 35: 99-109.
- Bishop, C.M. 1995. **Neural networks for pattern recognition**. Oxford university press, UK.
- Cartwright, M.H., Shepperd, M.J. and Song, Q. 2003. Dealing with missing software project data, pp. 154-165. *In Proceedings of the 9th IEEE International Software Metrics Symposium (METRICS'03)*. IEEE Computer Society, Sydney.
- Hengpraprom, K. and Meesad, P. 2008. Feature selection of K-Nearest Neighbor for missing value imputation using K-Nearest Neighbor. **Information Technology Journal** 4(7): 55-61. (in Thai)
- Kim, J.O. and Curry, J. 1977. The treatment of missing data in multivariate analysis. **Sociological Methods & Research** 6(2): 215-240.

- Kim, K.Y., Kim, B.J. and Yi, G.S. 2004. Reuse of imputed data in microarray analysis increases imputation efficiency. **BMC Bioinformatics** 5(1): 160.
- Ladha, L. and Deepa, T. 2011. Feature selection methods and algorithms. **International journal on computer science and engineering** 3(5): 1787-1797.
- Liao, S.G., Lin, Y., Kang, D.D., Chandra, D., Bon, J., Kaminski, N. and Tseng, G.C. 2014. Missing value imputation in high-dimensional phenomic data: imputable or not, and how?. **BMC Bioinformatics** 15(1): 346.
- Pasunon, P. and Nilakorn, P. 2007. Outliers detection in regression analysis by Bhattacharyya Statistics, pp. 11-18. *In The Proceeding of 45th Kasetsart University Annual Conference*. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Rana, S., Siraj-Ud-Doulah, M., Midi, H. and Imon, A.H.M.R. 2012. Decile mean: A new robust measure of central tendency. **Chiang Mai journal of science** 39(3): 478-485.
- Robins, J.M. and Wang, N. 2000. Inference for imputation estimators. **Biometrika** 87: 113-124.
- Schioler, H. and Hartmann, U. 1992. Mapping neural network derived from the Parzen window estimator. **Neural Networks** 5(6): 903-909.
- Troyanskaya, O., Cantor, M., Sherlock, G., Brown, P., Hastie, T., Tibshirani, R. and Altman, R.B. 2001. Missing value estimation methods for DNA microarrays. **Bioinformatics** 17(6): 520-525.
- Vongprasert, J. 2019. Jackknife and Regression Approaches to Missing Data Imputation. **Journal of Applied Statistics and Information Technology** 3(1): 52-61.

ผลของปุ๋ยมูลไส้เดือนดินร่วมกับແແແแຕต่อการเจริญเติบโต ของผักสลัดกรีนโอ๊ค

Effects of Vermicompost and Water Fern (*Azolla pinnata*) on Growth of Green Oak Lettuce (*Lactuca sativa*)

พิชญ์ ตั้งสมบัติวิจิตร^{1*} ปวีณา สุขสอาด¹ อุทาน บุณณศักดิ์ศรี² และ กิตติ บุญเลิศนรินทร์³

Pitchya Tangsombatvichit^{1*}, Paweena Suksaard¹, Utharn Buranasaksee² and Kitti Boonlerthirun³

Received: 20 February 2020, Revised: 24 March 2020, Accepted: 2 April 2020

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเกษตรกรยุคใหม่ใส่ใจการปลูกผักปลอดภัย ในขณะที่ผู้บริโภคได้ให้ความสำคัญต่อคุณภาพผลผลิตมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊คในดินที่ใส่ปุ๋ยแตกต่างกัน โดยสิ่งทดลองทั้งหมดมี 7 สิ่งทดลอง คือ 1) ปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน 2) แหะแะแ 3) ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินร่วมกับแหะแะแ 4) น้ำหมักปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน 5) ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินร่วมกับน้ำหมักปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน 6) ปุ๋ยเคมี และ 7) ไม่ใส่ปุ๋ย (ชุดควบคุม) ผลการทดลองพบว่า ผักสลัดปลูกในดินที่ใส่ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินร่วมกับแหะแะแ มีการเจริญเติบโตดีที่สุด มีการสะสมของไนเตรทน้อยที่สุดเท่ากับ 0.68 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ยังพบการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* น้อยกว่า 100 CFU ต่อกรัม นอกจากนี้ ในปุ๋ยมูลไส้เดือนดินยังพบว่ามีแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติตรึงไนโตรเจนในอากาศ คือ แบคทีเรีย ME02 แสดงผลค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของแอมโมเนียมากที่สุด

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ (จุลชีววิทยา) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

¹ Department of Science (Microbiology), Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, PhraNakhon Si Ayutthaya 13000, Thailand.

² สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ (เทคโนโลยีสารสนเทศ) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จังหวัดสุพรรณบุรี 7213

² Department of Computer Science (Information Technology), Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Supanburi 72130, Thailand.

³ สาขาวิชาพืชศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

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

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): pitchya.t@rmutsb.ac.th Tel: 08 0459 2479

ที่ OD₅₆₀ เท่ากับ 1.0±0.0 เมื่อเทียบกับแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนในอากาศ *Azotobacter vinelandii* (แบคทีเรียควบคุม) เมื่อนำมาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา สรีรวิทยาและคุณสมบัติทางชีวเคมีบางประการแล้ว มีความเป็นไปได้สูงว่าแบคทีเรีย ME02 จัดอยู่ในสกุล *Azotobacter* ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชใบ ดังนั้นการปลูกผักสลัดกรีนโอ๊คที่ใช้ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินและเหานแดง ไม่เพียงแต่จะได้ผักสลัดที่มีคุณภาพดี ยังลดการปนเปื้อนเชื้อแบคทีเรียก่อโรคทางเดินอาหารน้อยลง และการสะสมของไนเตรตต่ำ ดังนั้นปุ๋ยมูลไส้เดือนดินผสมเหานแดงจึงเหมาะสมส่งเสริมให้เกษตรกรใช้ในการปลูกผักสลัดและผักชนิดอื่นแบบใช้ดิน

คำสำคัญ: ปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน, เหานแดง, ผักสลัดกรีนโอ๊ค, การปลูกพืชแบบใช้ดิน

ABSTRACT

Recently, smart farmers focus on safety vegetable production and consumers give more priority to product quality. Then, the aim of this research is to study and compare the growth of green oak lettuce (*Lactuca sativa*) on soil with different fertilizers which included 7 treatments: 1) vermicompost, 2) water fern, 3) vermicompost with water fern, 4) vermicompost water extracts, 5) vermicompost with vermicompost water extracts, 6) chemical fertilizer and 7) without fertilizer (control). The results showed that the soil with vermicompost and water fern added had the highest growth rate of green oak lettuce. This treatment had the least nitrate accumulation level of 0.68 mg/g of dry weight. Also, the rate of contamination of bacterial gastrointestinal pathogens, *Escherichia coli*, was less than 100 CFU/g. In addition, nitrogen fixing bacteria, isolate ME02, in the vermicompost showed higher ammonia concentration at OD₅₆₀ of 1.0±0.0, compared to well-known nitrogen fixing bacteria, *Azotobacter vinelandii* (controlled bacteria). Based on morphological and physiological characteristics and biochemical taxonomy, there was a high possibility that isolate ME02 was classified as a member of the genus *Azotobacter* which was plant growth-promoting bacteria. Therefore, green oak growing in soil with vermicompost and water fern not only produces good quality of salad vegetable but also reduce bacteria contamination that caused gastrointestinal infection and reduce low level of nitrate accumulation. In conclusion, it is recommended to use vermicompost mixed with water fern to grow salad vegetable and others of soil-based crops.

Key words: vermicompost fertilizer, water fern, green oak lettuce, soil culture

บทนำ

การดูแลสุขภาพมีบทบาทต่อการใช้ชีวิตของคนในยุคปัจจุบัน ผู้บริโภคให้ความสำคัญในการคัดเลือกประเภทของอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ

สูง สะอาด และปลอดภัย ผักสลัดเป็นอาหารประเภทหนึ่งที่มีวิตามิน แร่ธาตุ เส้นใย และสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งมีความจำเป็นต่อความแข็งแรงของร่างกาย ลดอัตราการเกิดโรคและการอักเสบที่เกิดขึ้นจาก

อนุมูลอิสระภายในร่างกาย และยังช่วยรักษาสมดุลภายในร่างกายให้ระบบการทำงานต่างๆ ดำเนินไปได้ด้วยความเหมาะสม (Dias, 2012) ผักสลัด จึงเป็นที่นิยมรับประทานมากขึ้น จัดว่าเป็นพืชผักชนิดหนึ่งที่มีมูลค่าสูง ส่งผลให้มีเกษตรกรสนใจปลูกผักสลัดเพิ่มขึ้น ผักสลัดจัดเป็นผักกินใบ ดังนั้นปุ๋ยที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตที่สำคัญ คือ ปุ๋ยเคมี หรือปุ๋ยหมัก ที่ให้ธาตุไนโตรเจน (N) และແແແแ่งที่มีจุลินทรีย์ช่วยในการตรึงไนโตรเจนในอากาศ แแแแ่ง (*Azolla* sp.) เป็นวัสดูอินทรีย์อีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการปลูกพืชผัก มีประโยชน์ต่อการเพิ่มไนโตรเจนสำหรับพืชกินใบ เช่น ผักสลัด เป็นต้น ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช และยังช่วยแก้ปัญหาดินขาดธาตุไนโตรเจน รวมทั้งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แแแแ่งมีสารห้ำยสีเขียวแแแ่งน้ำเงินเป็นแบคทีเรียที่มีชื่อว่า *Anabaena azollae* มีคุณสมบัติในการตรึงไนโตรเจนในอากาศได้ดี ทำให้แแแแ่งมีธาตุไนโตรเจนอยู่สูง 4-5% น้ำหนักแแแ่ง และยังมีธาตุอาหารพืชอื่นๆ อีกด้วย คือ ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ที่ช่วยให้พืชแข็งแรงต้านทานต่อโรคและแมลง (Nam and Yoon, 2008) การปลูกผักสลัดในยุคแรกจะปลูกลงดิน แต่ปัญหาของการปลูกพืชในดินร่วมกับการใช้ปุ๋ยเคมี คือ 1) เมื่อปลูกผักไปหลายรอบการปลูก ปริมาณธาตุอาหารพืชจะลดน้อยลง โดยเฉพาะธาตุไนโตรเจน ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของผักกินใบและผักสลัด 2) ค่าความเป็นกรด-ด่างเปลี่ยนแปลงไปทำให้การละลายของธาตุอาหารพืชไม่ดีเท่าที่ควร พืชดูดซึมธาตุอาหารได้น้อยลง 3) ปริมาณเกลือสูงขึ้น โครงสร้างทางกายภาพของดินไม่เอื้ออำนวยต่อการไหลของน้ำ ดินอัดตัวกันแน่น ไม่มีช่องว่างของอากาศ 4) ปริมาณจุลินทรีย์ที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชลดลง แต่เพิ่มจุลินทรีย์ที่อาจก่อโรคกับพืชและสะสมในเนื้อเยื่อพืชมากขึ้น (Gruda et al., 2013)

จากปัญหาดังกล่าว จึงมีการพัฒนาระบบการปลูกพืชไร้ดิน (hydroponics) หรือการปลูกพืชใช้น้ำในโรงเรือน การปลูกผักสลัดด้วยวิธีนี้ มีข้อดีคือไม่ใช้ดิน ใช้เพียงสารละลายปุ๋ยน้ำ และอยู่ในการควบคุมปัจจัยต่างๆ ในการเจริญเติบโตของพืช ภายในโรงเรือน สามารถกำหนดขนาดพื้นที่ปลูกได้ และใช้พื้นที่น้อยกว่าการปลูกพืชใช้ดิน แต่ปัญหาที่พบคือ 1) ต้องมีงบประมาณลงทุนสูงในการสร้างโรงเรือนควบคุมปัจจัยต่างๆ 2) ต้องมีงบประมาณลงทุนสร้างรางปลูกผัก สร้างระบบท่อน้ำ 3) ปุ๋ยน้ำที่ใช้เป็นสารละลายปุ๋ยเคมี ซึ่งมีโอกาสสูงต่อการตกค้างในเนื้อเยื่อของผัก โดยเฉพาะไนเตรท (NO_3^-) 4) มีโอกาสสูงที่จะปนเปื้อนเชื้อแบคทีเรียก่อโรครทางเดินอาหาร คือ *Escherichia coli* ที่ปนเปื้อนมากับน้ำที่ใช้ในระบบท่อน้ำ 5) มีข้อจำกัดเมื่อขยายขนาดเป็นการปลูกระดับการค้า หากมีการปนเปื้อนของเชื้อก่อโรคมกั้กับน้ำ ผักที่ปลูกรอบนั้นทั้งหมดจะเสียคุณภาพต่อการบริหารจัดการในภาพรวม (Hussain et al., 2014) หากผู้บริโภครับประทานพืชผักที่มีปริมาณไนเตรทสะสมอยู่มากและเข้าสู่ร่างกาย จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพผู้บริโภค โดยเฉพาะเด็กและสตรีมีครรภ์

กระบวนการการปลูกพืชปลอดภัย คือ มีการนำวัสดุที่เป็นอินทรีย์หรือ วัสดุจากธรรมชาติมาใช้ในขั้นตอนการปลูกให้มากที่สุด และใช้สารเคมีเท่าที่จำเป็น ในปัจจุบันการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ที่มีคุณภาพสูงคือการนำเทคโนโลยีการผลิตปุ๋ยมูลไส้เดือนดินมาใช้ในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ประเภทนี้ เป็นการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ที่มีพื้นฐานมาจากการผลิตปุ๋ยหมัก ร่วมกับการทำงานของไส้เดือนดินสายพันธุ์ต่างๆ เช่น African night crawler (*Eudrilus eugeniae*) เป็นต้น ไส้เดือนดินชนิดนี้มีคุณสมบัติทนต่ออุณหภูมิสูงได้ถึง 35 องศาเซลเซียส ย่อยวัสดูอินทรีย์ได้หลายชนิด และเจริญเติบโตไว ไส้เดือนดินจึงเป็นผู้ช่วยที่ดีในการย่อยสลายขยะอินทรีย์ วัชพืช และวัสดูเหลือทิ้งทาง

การเกษตร รวมทั้งวัสดุอินทรีย์ตามครัวเรือนและแหล่งชุมชน เพื่อผลิตเป็นปุ๋ยในการปลูกพืช (Domínguez *et al.*, 2001) ข้อดีของปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน ช่วยปรับสภาพดินให้ดีขึ้น ดินมีความร่วนซุย เพิ่มช่องว่างในดิน ช่วยกักเก็บน้ำในดิน ทำให้จุลินทรีย์ดินบริเวณรากพืชทำงานได้ดี (Sinha *et al.*, 2010) มีงานวิจัยที่นำไส้เดือนดินชนิด *E. eugeniae* มาช่วยย่อยเศษวัสดุเหลือทิ้งจากแปลงปลูกมะเขือเทศ เพื่อผลิตปุ๋ยมูลไส้เดือน ผลการทดลองพบว่า ปุ๋ยที่ผลิตได้เมื่อนำไปวิเคราะห์ ให้ค่าธาตุอาหารหลัก N, P และ K สูงกว่าค่าที่กำหนดของปุ๋ยอินทรีย์มาตรฐานและสามารถใช้ปลูกผักกาดขาวจีนและบวบขึ้นได้คุณภาพดีกว่าการใช้ปุ๋ยเคมี (Klangkongsub and Sohsalam, 2013) เช่นเดียวกันกับ งานวิจัยที่ผลิตปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน จากเศษวัสดุอินทรีย์เหลือทิ้งทางการเกษตร วัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะเห็ด และเศษผักผลไม้ เปลือกผลไม้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตนมเปรี้ยว ด้วยการทำงานของไส้เดือนดินสายพันธุ์ *E. eugeniae* ผลการทดลองพบว่า ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินที่ผลิตได้มีคุณภาพดี มีค่าธาตุอาหารหลัก N, P และ K มากกว่าค่าที่กำหนดของปุ๋ยอินทรีย์มาตรฐาน และยังส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นทานตะวันได้ดีเทียบเท่าการใช้ปุ๋ยเคมี (Tangsombatvichit *et al.*, 2016) ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินที่มีส่วนผสมของถ่านแท่งเหลือทิ้งและหัวมันเทศคั่วทั้ง ที่ผ่านกระบวนการย่อยด้วยไส้เดือนดินสายพันธุ์ *E. eugeniae* พบว่า มีธาตุอาหารพืช N, P และ K มากกว่าค่าที่กำหนดของปุ๋ยอินทรีย์มาตรฐาน โดยเฉพาะธาตุ K ที่สูงมากที่สุด ปุ๋ยนี้ยังมีคุณสมบัติของความเป็นปุ๋ยอินทรีย์ตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด รวมทั้งมีจุลินทรีย์เฉลี่ยทั้งหมดในปุ๋ยอยู่ถึง 2.83×10^6 CFU/g (Tangsombatvichit and Ketrot, 2018)

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้จึงสนใจการศึกษาและเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของผักสลัดในดินโดยใช้ปุ๋ยสูตรที่แตกต่างกัน คือ 1)

ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินอย่างเดียว 2) แหนแดงอย่างเดียว 3) ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินร่วมกับแหนแดง 4) น้ำหมักปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน 5) ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินร่วมกับน้ำหมักปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน 6) ปุ๋ยเคมี และ 7) ไม่ใส่ปุ๋ย ต่อการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊ค โดยควบคุมการปลูกภายในโรงเรือน ทำการตรวจสอบการปนเปื้อนของไนเตรทในผักสลัด ตรวจสอบแบคทีเรียก่อโรคทางเดินอาหารที่อาจปนเปื้อนมากับน้ำ คือ *E. coli* ในผักสลัด รวมทั้งตรวจวิเคราะห์จุลินทรีย์ตรึงไนโตรเจนในอากาศในปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน เพื่อใช้เป็นแนวทางการปลูกผักปลอดภัย ลดอัตราการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียก่อโรคทางเดินอาหาร ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภค รวมทั้งลดปัญหาที่อาจเกิดจากการผลิตผักสลัดแบบไม่ใช้ดิน (hydroponic culture)

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมดิน ปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน และกล้าผักสลัดกรีนโอ๊ค

ดินปลูกที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นดินเหนียวจากแปลงปลูกพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มทร.สุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา หันตรา ผสมขุยมะพร้าว กาบมะพร้าวสับ ขี้เถ้าแกลบ อัตราส่วน 2:1:1:1 ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินที่ใช้ในการทดลองนี้ได้รับการวิเคราะห์คุณภาพของปุ๋ยอินทรีย์ตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตร (มีคุณสมบัติการเป็นปุ๋ยอินทรีย์ดังนี้ คือ 1) ความชื้น 23.33% 2) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 7.21 3) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) 1.26 dS/m 4) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ 27.4% 5) คาร์บอนต่อไนโตรเจน 11:1 6) ธาตุไนโตรเจน 1.51% 7) ธาตุฟอสฟอรัส 0.81% และ 8) ธาตุโพแทสเซียม 1.87% (Tangsombatvichit and Ketrot, 2018)) การเตรียมกล้าผักสลัดกรีนโอ๊ค โดยใส่พีทมอสลงในถาดหลุมจากนั้นใส่เมล็ด 1

เมล็ด ต่อหลุมในวัสดุพีทมอส รดน้ำทุกวัน เป็นเวลา 14 วัน เพื่อย้ายปลูกในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

2. การศึกษาการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊ค

ทำการวางแผนการทดลองแบบ randomized complete block design (RCBD) จัดวางกระถางขนาด 8 นิ้ว บรรจุน้ำปลูกเท่ากันทุกกระถาง ทำการทดลองในโรงเรือน กำหนดสิ่งทดลอง ดังนี้คือ 1) ดินที่ไม่ใส่ปุ๋ย 2) ดิน + ปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน 50 กรัมต่อกระถาง 3) ดิน + น้ำหมักปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน อัตราส่วน 20 มิลลิลิตรต่อน้ำ 20 ลิตร 4) ดิน + ปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน 50 กรัมต่อกระถาง + แหนแดงสด 50 กรัมต่อกระถาง 5) ดิน + แหนแดงสด 50 กรัมต่อกระถาง 6) ดิน + ปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน 50 กรัมต่อกระถาง + น้ำหมักปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน อัตราส่วน 20 มิลลิลิตรต่อน้ำ 20 ลิตร และ 7) ดิน + ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 50 กรัมต่อกระถาง ใส่ปุ๋ยครั้งเดียวกับสิ่งทดลอง จากนั้น คัดเลือกต้นกล้าผักสลัดกรีนโอ๊คที่อายุ 14 วัน ต้นสมบูรณ์ มีจำนวนใบเฉลี่ย 2-3 ใบ ใบมีสีเขียวทุกใบ และความสูงของต้นใกล้เคียงกัน ย้ายปลูกในกระถาง กระถางละ 1 ต้น แต่ละสิ่งทดลองมี 4 ซ้ำ แบ่งเป็น บล็อกจำนวน 5 บล็อก วัดการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊ค ทุก 7 วัน หลังย้ายปลูกต้นกล้า เป็นเวลา 21 วัน คือ วัดความสูง (เซนติเมตร) จำนวนใบ (ใบ) ความเขียวของใบ วัดด้วยเครื่องคลอโรฟิลล์มิเตอร์ (SPAD) ส่วนการวัดปริมาณคลอโรฟิลล์รวม (chlorophyll a และ b) น้ำหนักสดทั้งต้น (ลำต้นใบและราก) (กรัม) และน้ำหนักแห้งทั้งต้น (ลำต้นใบและราก) (กรัม) ทำการวัดที่ 21 วันหลังย้ายปลูก วิเคราะห์ผลการทดลองแต่ละสิ่งทดลองทางสถิติ ด้วยโปรแกรม SPSS 23 วิธี one-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

3. การตรวจสอบแบคทีเรีย *Escherichia coli* ในผักสลัดกรีนโอ๊ค

นำใบผักสลัดกรีนโอ๊ค ที่มีอายุ 21 วัน ของแต่ละสิ่งทดลอง มาล้างด้วยน้ำสะอาด 2 ครั้ง หั่นให้มีขนาดเล็ก แล้วชั่งน้ำหนัก 10 กรัม ใส่ในถุงสะอาดที่มีสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.85% 90 มิลลิลิตร เข้าเครื่องตีบด จากนั้น ทำการเจือจาง 10 เท่า ที่ระดับความเข้มข้น 10^{-2} 10^{-3} และ 10^{-4} จุดสารละลายปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่บนอาหารเฉพาะ EMB agar ทำการเกลี่ยสารละลายให้ทั่วผิวหน้าอาหาร แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ทุกสิ่งทดลอง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

4. การตรวจสอบการสะสมของไนเตรทในผักสลัดกรีนโอ๊ค

ชั่งน้ำหนักแห้งของผักสลัด (ลำต้นใบและราก) แต่ละสิ่งทดลอง 0.1 กรัม เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน 24 ชั่วโมง ทำการแยกสารละลายออก นำมากรองด้วยกระดาษกรอง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ค่าไนเตรท ด้วยวิธี colorimetric ด้วยสาร salicylic acid คัดแปลงจาก Cataldo *et al.* (1975) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 nm ด้วยเครื่อง สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

5. การตรวจวิเคราะห์แบคทีเรียที่เจริญในโตรเจนในอากาศจากปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน

นำปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน 10 กรัม ใส่ลงในสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.85% 90 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเจือจางสารละลายปุ๋ยครั้งละ 10 เท่า (10^{-2} 10^{-3} และ 10^{-4}) ตามลำดับ เลือกลำดับความเข้มข้นที่ 10^{-2} 10^{-3} และ 10^{-4} มาตรวจสอบแบคทีเรียบนอาหารเฉพาะ Burk's N-free agar บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-7 วัน (คัดแปลงจาก Tangsombatvichit and Ketrot, 2018) คัดเลือกโคโลนีแบคทีเรียบริสุทธิ์ จำนวนไม่น้อยกว่า 30 โคโลนี มาทดสอบความสามารถในการตรึงไนโตรเจนด้วยการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของแอมโมเนียด้วยสาร

ทดสอบ Nessler's reagent โดยเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียให้
ได้ความเข้มข้น 0.6 แล้วนำสารละลายเชื้อบริสุทธิ์ 5
มิลลิลิตร ต่อน้ำยาทดสอบ Nessler's reagent 100
ไมโครลิตรผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที นำไปวัด
ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร
พิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงสี จากสีเหลืองอ่อน (ไม่
มีการตรึงไนโตรเจน) จนถึงสีเหลืองเข้ม (มีการตรึง
ไนโตรเจนสูง) (Cappuccino and Sherman, 1992) ทำ
การทดลอง 3 ซ้ำ แล้วคัดเลือกโคโลนีที่มี
ความสามารถในการตรึงไนโตรเจนดีที่สุด 1 โคโลนี
มาศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา สรีรวิทยา และ
คุณสมบัติทางชีวเคมีบางประการ คือ การเคลื่อนที่
เอนไซม์อะเลส (catalase test) เอนไซม์ออกซิเดส
(oxidase test) ปฏิกริยา IMViC test ได้แก่ indole test,
methyl red test, Voges-Proskauer test และ
citrate test เปรียบเทียบกับ แบคทีเรีย *Azotobacter*
vinelandii (แบคทีเรียควบคุม) ดัดแปลงจาก Bisen
et al. (2012) และ Holt *et al.* (2000)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊ค

ผักสลัดกรีนโอ๊ค พืชเศรษฐกิจที่เป็นที่นิยม
รับประทานของผู้บริโภคในปัจจุบัน ถูกนำมา
ทดสอบการเจริญเติบโตด้วยสิ่งทดลองที่แตกต่างกัน
คือ การใช้ปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน น้ำหมักปุ๋ยมูลไส้เดือน
ดิน แหนแดง ปุ๋ยเคมี หรือ ไม่ใส่ปุ๋ย (ดินปลูกอย่าง
เดียว) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ผักสลัดกรีน
โอ๊ค ที่ได้รับปุ๋ยมูลไส้เดือนดินและแหนแดง มี
แนวโน้มการเจริญเติบโตดี เมื่อวัดความสูงของต้น
และจำนวนใบ พบว่ามีค่าเฉลี่ยความสูงของต้น และ
จำนวนใบ สูงที่สุด เช่นเดียวกันกับ ผักสลัดที่ได้รับ

ปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน หรือ ได้รับปุ๋ยมูลไส้เดือนดินและ
น้ำหมักปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน (Table 1 และ Table 2)
ในขณะที่ ผักสลัดที่ได้รับปุ๋ยเคมี มีค่าเฉลี่ยความสูง
ของต้น และจำนวนใบ น้อยกว่า ผักสลัดที่ได้รับปุ๋ย
มูลไส้เดือนดินและแหนแดง อย่างมีนัยสำคัญทาง
สถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Table 1 และ Table
2) ผักสลัดที่ได้รับปุ๋ยมูลไส้เดือนดินและแหนแดง มี
ค่าเฉลี่ยความเขียวใบสูงที่สุด (Figure 1) รองลงมาคือ
ผักสลัดที่ได้รับปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน หรือ ได้รับปุ๋ยมูล
ไส้เดือนดินและน้ำหมักปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน ตามลำดับ
(Figure 1) ในขณะที่ ผักสลัดที่ได้รับปุ๋ยเคมี มีค่าเฉลี่ย
ความเขียวของใบผักสลัดกรีนโอ๊คน้อยกว่า การได้รับ
ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินและแหนแดง (Figure 1) ผักสลัดที่
ได้รับปุ๋ยมูลไส้เดือนดินและแหนแดง มีค่าเฉลี่ย
คลอโรฟิลล์สูงที่สุด (Figure 2) ในขณะที่ ผักสลัดที่
ได้รับปุ๋ยเคมี มีค่าเฉลี่ยคลอโรฟิลล์น้อยกว่า ส่วนผัก
สลัดที่ได้รับเฉพาะน้ำหมักปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน มี
ค่าเฉลี่ยคลอโรฟิลล์น้อยที่สุด เช่นเดียวกันกับ การไม่
ใส่ปุ๋ย (ดินอย่างเดียว) (Figure 2) มีงานวิจัยพบว่า การ
ใส่แหนแดงลงไปดินปลูกข้าวไม่เพียงแต่เพิ่มธาตุ
ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และอินทรีย์วัตถุให้ดิน ยัง
ส่งเสริมการเจริญเติบโตของความสูงต้น จำนวนกอที่
แตก น้ำหนักแห้ง ได้ดีกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีไนโตรเจน
(Bhuvaneshwari and Singh, 2015) เช่นเดียวกันกับ
การทดลองการใช้ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินผลิตจากวัสดุ
เหลือทิ้งทางการเกษตรและส่วนเหลือทิ้งอินทรีย์จาก
โรงงานอุตสาหกรรมนมเปรี้ยว ต่อการเจริญเติบโต
ของพืช ที่พบว่าปุ๋ยมูลไส้เดือนดินสนับสนุนการ
เจริญเติบโตที่ดีของต้นทานตะวันใกล้เคียงกับใช้
ปุ๋ยเคมี (Tangsombatvichit *et al.*, 2016)

Table 1 The average of number leaves per plant of green oak on 7, 14 and 21 days under different treatments

Treatment	Number leaves per plant		
	Day 7	Day 14	Day 21
1. Soil (control)	5.13 ^b ±0.26	6.55 ^b ±0.34	7.53 ^d ±0.40
2. Soil+vermicompost	7.25 ^a ±0.47	9.25 ^a ±0.57	13.60 ^b ±0.65
3. Soil+vermicompost water	5.15 ^b ±0.11	6.58 ^b ±0.50	7.75 ^d ±0.42
4. Soil+vermicompost+ <i>Azolla</i>	7.68 ^a ±0.24	9.70 ^a ±0.53	15.30 ^a ±0.64
5. Soil+ <i>Azolla</i>	5.35 ^b ±0.38	6.90 ^b ±0.17	9.43 ^c ±0.43
6. Soil+vermicompost+vermicompost water	7.28 ^a ±0.29	9.13 ^a ±0.54	13.00 ^b ±0.56
7. Soil+chemical fertilizer	5.70 ^b ±0.54	6.65 ^b ±0.36	9.05 ^c ±0.32

Mean value of 4 replicate measurements ± standard deviation

^{abcd} different letters in a column are significantly different level ($p<0.05$) according to Duncan's multiple range test**Table 2** The average of height (cm.) of green oak on 7, 14 and 21 days under different treatments

Treatment	Height (cm.)		
	Day 7	Day 14	Day 21
1. Soil (control)	4.29 ^c ±0.30	7.03 ^b ±0.31	7.50 ^c ±0.52
2. Soil+vermicompost	5.08 ^a ±0.29	8.96 ^a ±0.21	10.04 ^a ±0.43
3. Soil+vermicompost water	4.35 ^{bc} ±0.11	7.23 ^b ±0.44	7.78 ^c ±0.30
4. Soil+vermicompost+ <i>Azolla</i>	4.78 ^{abc} ±0.35	9.44 ^a ±0.60	10.53 ^a ±0.65
5. Soil+ <i>Azolla</i>	4.43 ^{bc} ±0.39	7.70 ^b ±0.55	8.73 ^b ±0.57
6. Soil+vermicompost+vermicompost water	4.90 ^{ab} ±0.35	9.05 ^a ±0.66	10.15 ^a ±0.32
7. Soil+chemical fertilizer	4.63 ^{abc} ±0.20	7.85 ^b ±0.67	8.93 ^b ±0.44

Mean value of 4 replicate measurements ± standard deviation

^{abcd} different letters in a column are significantly different level ($p<0.05$) according to Duncan's multiple range test

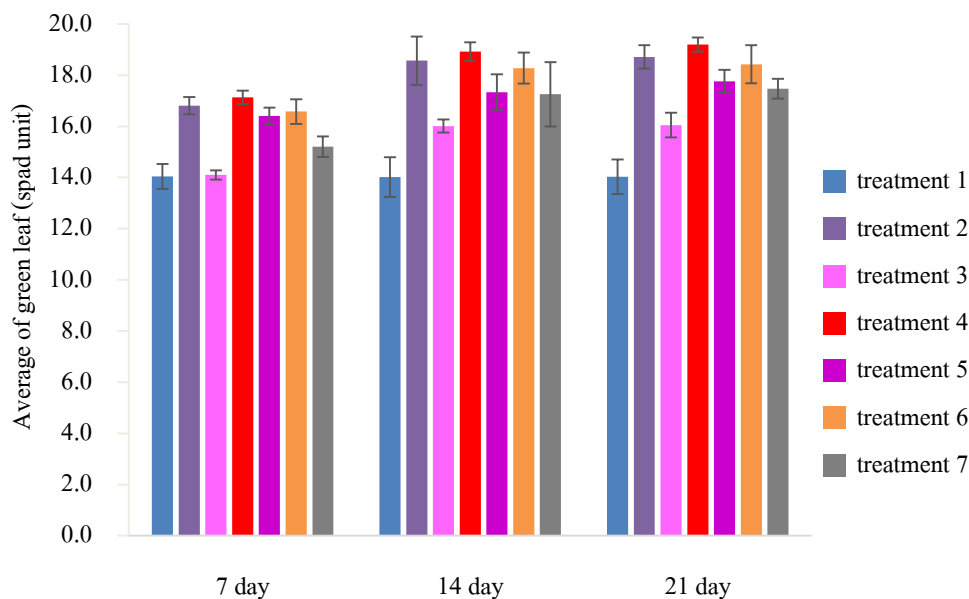


Figure 1 The average of green leaf of green oak on 7, 14 and 21 days under different treatments, 4 replicates

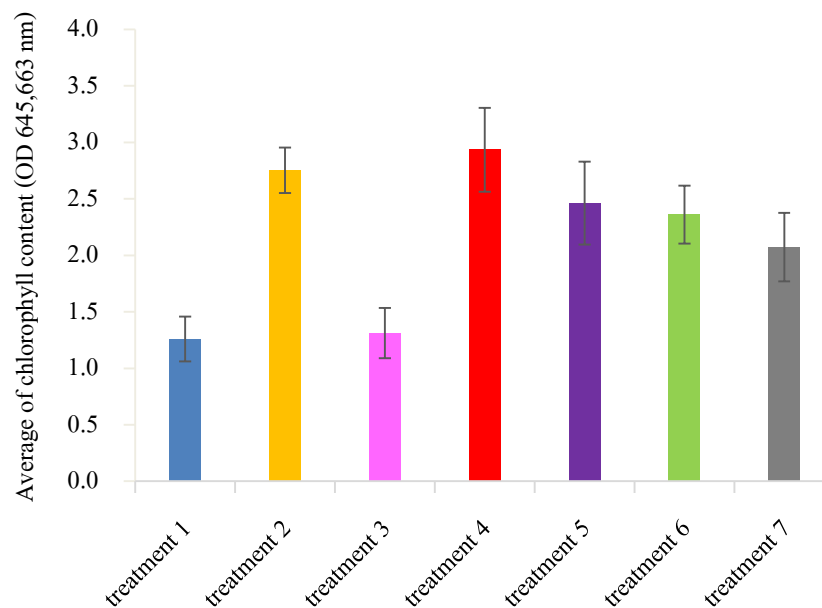


Figure 2 The average of total chlorophyll content of green oak on 21 days under different treatments, 4 replicates

ผักสลัดที่ได้รับปุ๋ยมูลไส้เดือนดินและแทนแดง มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดต่อต้น และน้ำหนักแห้งต่อต้นสูงที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 3) รองลงมาคือ ผักสลัดที่ได้รับปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน ได้รับปุ๋ยเคมี หรือ ได้รับปุ๋ยมูลไส้เดือนดินและน้ำหมักปุ๋ย

มูลไส้เดือนดิน (Table 3) ในขณะที่ ผักสลัดที่ได้รับแทนแดงอย่างเดียว มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดต่อต้น และน้ำหนักแห้งต่อต้น น้อยกว่า การได้รับปุ๋ยมูลไส้เดือนดินและแทนแดง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% รวมทั้งผักสลัดที่ได้รับน้ำหมักปุ๋ย

มูลไส้เดือนดินอย่างเดียว ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กับ ผักสลัดที่ไม่ใส่ปุ๋ย (ดินอย่างเดียว) (Table 3) จะเห็นได้ว่า ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินผสมแหนแดงมีผลทำให้ผักสลัดเจริญเติบโตดีที่สุดเนื่องจากปุ๋ยมูลไส้เดือนดินมีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช N, P และ K รวมทั้งมีคุณสมบัติของปุ๋ยอินทรีย์ตามมาตรฐานกรมวิชาการเกษตรกำหนด และมีจุลินทรีย์ในปุ๋ยอยู่ถึง 2.83×10^6

CFU/g (Tangsombatvichit and Ketrot, 2018) แหนแดงมีสารห้ำยสีเขียวแกมน้ำเงินเป็นแบคทีเรีย *A. azollae* ที่มีคุณสมบัติในการตรึงไนโตรเจนในอากาศได้ดี ทำให้แหนแดงมีธาตุไนโตรเจนอยู่สูงและยังมีธาตุอาหารพืชอื่นๆ คือ ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชและความแข็งแรงต้านทานต่อโรคและแมลง (Nam and Yoon, 2008)

Table 3 The average of fresh weight and average of dry weight in green oak on 21 days under different treatments

Treatment	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
1. Soil (control)	24.00 ^d ±2.74	0.50 ^c ±0.07
2. Soil+vermicompost	45.25 ^b ±4.38	1.83 ^b ±0.23
3. Soil+vermicompost water	25.50 ^d ±3.64	0.63 ^c ±0.15
4. Soil+vermicompost+Azolla	53.50 ^a ±2.50	2.33 ^a ±0.26
5. Soil+Azolla	36.00 ^c ±3.61	1.75 ^b ±0.18
6. Soil+vermicompost+vermicompost water	41.75 ^b ±2.05	1.75 ^b ±0.25
7. Soil+chemical fertilizer	45.75 ^b ±3.49	1.63 ^b ±0.19

Mean value of 4 replicate measurements ± standard deviation

^{abcd} different letters in a column are significantly different level ($p < 0.05$) according to Duncan's multiple range test

2. การปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* และการสะสมไนเตรทในผักสลัดกรีนโอ๊ค

เมื่อนำผักสลัดกรีนโอ๊คในแต่ละสิ่งทดลองมาตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียก่อโรคทางเดินอาหาร *E. coli* พบว่า ผักสลัดที่ได้รับปุ๋ยมูลไส้เดือนดินและแหนแดง และได้รับปุ๋ยมูลไส้เดือนดินอย่างเดียว มีการปนเปื้อนของแบคทีเรียชนิดนี้ น้อยกว่า 100 CFU ต่อกรัม (Table 4) ซึ่งมีโอกาสปนเปื้อนมากับดิน หรือน้ำที่ใส่รดต้นไม้ (Gruda *et al.*, 2013; Hussain *et al.*, 2014) แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด (Department of Medical Sciences, Ministry of Public Health, 2017) เป็นไป

ได้ว่า ในปุ๋ยมูลไส้เดือนดินมีปริมาณจุลินทรีย์ดี มีประโยชน์ในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียก่อโรค *E. coli* ได้ (Pathma and Sakthivel, 2012) ในขณะที่ผักสลัดที่ได้รับปุ๋ยมูลไส้เดือนดินร่วมกับน้ำหมักปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน ได้รับแหนแดงอย่างเดียว ได้รับน้ำหมักปุ๋ยมูลไส้เดือนดินอย่างเดียว และได้รับปุ๋ยเคมี มีแนวโน้มการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียชนิดนี้เพิ่มขึ้น (Table 4) ในขณะที่ ผักสลัดที่ไม่ใส่ปุ๋ย (ดินอย่างเดียว) มีการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียมากที่สุด (Table 4) ในขณะที่ผลการตรวจสอบการสะสมไนเตรทตกค้างในผักสลัดกรีนโอ๊คแต่ละสิ่งทดลอง พบว่า ผักสลัดที่ได้รับปุ๋ยมูลไส้เดือนดินและแหนแดง มีการ

สะสมของไนเตรทน้อยที่สุด เท่ากับ 0.68 มิลลิกรัม ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (Table 4) ในขณะที่ ผักสลัดที่ได้รับน้ำหมักปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน มีการสะสมของ

ไนเตรทมากที่สุด แต่ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด (European Commission, 2011)

Table 4 The average of *Escherichia coli* bacteria determined and average of levels of nitrate in green oak on 21 days under different treatments (3 replicates)

Treatment	<i>E. coli</i> bacteria determined (CFU/g)	Levels of nitrate (mg/g of dry weight)
1. Soil (control)	1.47×10^4	1.30
2. Soil+vermicompost	$<1 \times 10^2$	0.86
3. Soil+vermicompost water	6.3×10^3	1.77
4. Soil+vermicompost+Azolla	$<1 \times 10^2$	0.68
5. Soil+Azolla	1.75×10^3	1.09
6. Soil+vermicompost+vermicompost water	4.2×10^2	1.42
7. Soil+chemical fertilizer	1.66×10^3	1.23

3. แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนในอากาศคัดแยกจากปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน

เมื่อนำปุ๋ยมูลไส้เดือนดิน มาตรวจวิเคราะห์จำนวนแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนในอากาศ บนอาหารเฉพาะ Burk's N-free agar พบว่ามีแบคทีเรียเจริญได้ และหาค่าเฉลี่ยจำนวนแบคทีเรียทั้งหมด เท่ากับ 3.2×10^4 CFU/กรัม ทำการคัดเลือกโคโลนีแบคทีเรียบริสุทธิ์บนอาหารเฉพาะ Burk's N-free agar จำนวน 32 โคโลนี แบคทีเรียบริสุทธิ์สามารถจัดกลุ่มตามลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยาได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 โคโลนีสีขาว รูปร่างโคโลนีกลมมีลักษณะเป็นเมือก ขอบโคโลนีเรียบ ผิวหน้าของโคโลนีเรียบ การยกตัวของโคโลนีแบนราบไปตามผิวหน้าอาหาร โคโลนีทึบแสง (Figure 3A) และลักษณะเซลล์แบคทีเรียมีรูปร่างเซลล์เป็นวงรี ดิคส์แกรมลบ (Figure 3C) กลุ่มที่ 2 โคโลนีใส รูปร่างโคโลนีกลมมีลักษณะเป็นเมือก ขอบโคโลนีเรียบ ผิวหน้าของโคโลนีเรียบ การยกตัวของโคโลนีเจริญ

นูนสูงขึ้นจากผิวหน้าอาหารเล็กน้อย โคโลนีโปร่งแสง (Figure 3B) และลักษณะเซลล์แบคทีเรียมีรูปร่างเซลล์เป็นท่อน ดิคส์แกรมลบ (Figure 3D) จากนั้นนำแบคทีเรียบริสุทธิ์มาทดสอบความสามารถในการตรึงไนโตรเจนในอากาศด้วยการวัดความเข้มข้นของแอมโมเนีย ผลการทดลอง พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของแอมโมเนีย อยู่ระหว่าง 0.030 ± 0.01 ถึง 1.003 ± 0.00 ในขณะที่แบคทีเรีย *Azotobacter vinelandii* มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของแอมโมเนีย เท่ากับ 0.397 ± 0.02 ผลการทดลองที่น่าสนใจคือแบคทีเรียที่คัดแยกได้มีความสามารถตรึงไนโตรเจนในอากาศได้ดีที่สุด อยู่ในกลุ่มที่ 1 (ME02) มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของแอมโมเนียมากที่สุด เท่ากับ 1.003 ± 0.00 มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาระดับการตรึงไนโตรเจนของแบคทีเรียบางกลุ่มด้วยการวัดการเกิดแอมโมเนียได้ ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีเปลี่ยนเป็นไนโตรเจน (Cappuccino and Sherman, 1992)

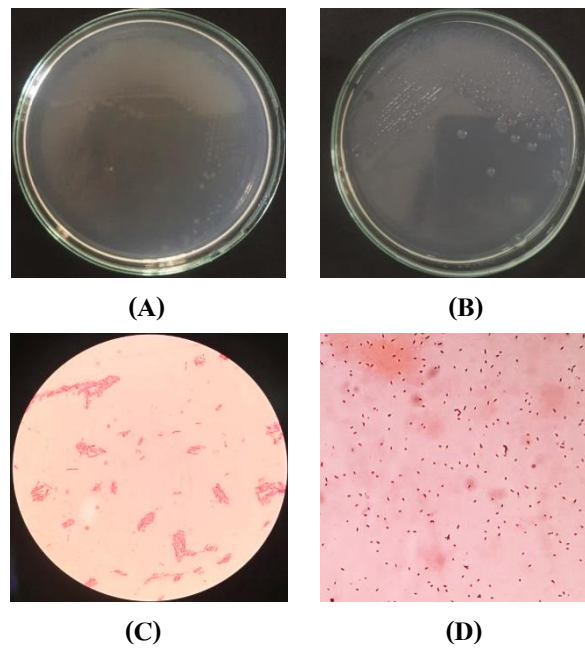


Figure 3 Isolated nitrogen fixing bacteria were grown on Burk's N-free agar group 1 (A) group 2 (B) selected from vermicomposting fertilizer, incubated at temperature of 30 degree celcius on 7 days. The gram staining isolated bacteria group 1 (C) and group 2 (D) appeared under light microscope at 1000X magnification

Table 5 Biochemical test of characteristics of isolated nitrogen fixing bacteria (ME02) from vermicompost biofertilizer compared to *Azotobacter vinelandii* (control), 3 replicates

Biochemical tests	Isolated bacteria ME02	<i>A. vinelandii</i>
Motility	+	+
Catalase	+	+
Oxidase	+	+
Citrate	+	+
Methyl red	-	-
Voges-Proskauer	-	-
Indole	-	-

+ positive

- negative

เมื่อนำแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนในอากาศ ME02 ซึ่งมีลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสรีรวิทยา จัดอยู่ในกลุ่มที่ 1 มาศึกษาคุณสมบัติทางชีวเคมีบางประการที่แสดงถึงคุณสมบัติเฉพาะของแบคทีเรียตรึง

ไนโตรเจนในอากาศ เปรียบเทียบกับแบคทีเรีย *Azotobacter vinelandii* (แบคทีเรียควบคุม) ผลการทดลองพบว่า แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนในอากาศที่คัดแยกได้ ME02 สามารถเคลื่อนที่ได้ มีคุณสมบัติทาง

ชีวเคมี เอนไซม์ และ ปฏิกริยา IMViC test เหมือนกัน กับ *A. vinelandii* (Table 5) จึงมีความเป็นไปได้สูงว่า แบคทีเรียที่คัดแยกได้ ME02 จะอยู่ในสกุล *Azotobacter* sp. และมีคุณสมบัติเป็นแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนในอากาศ (Bisen *et al.*, 2012; Holt *et al.*, 2000). งานวิจัยของ Bhosale *et al.* (2013) พบว่า *Azotobacter* sp. ที่คัดแยกได้จากดินมีคุณสมบัติเป็น plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) นอกจากจะส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชโดยการเพิ่มธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และฮอร์โมนพืชแล้วยังมีคุณสมบัติยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียก่อโรคพืช *Fusarium oxysporum* และผลิตสารต้านทานราได้ด้วย

สรุป

จากผลการทดลองทั้งหมด ทำให้ทราบว่า ผลของการใช้ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินและແແແແ มีคุณสมบัติที่มีประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกในดิน ส่งผลให้ผักสลัดกรีนโอ๊คมีการเจริญเติบโตดีที่สุด มีความสูงต้นมากที่สุด จำนวนใบมากที่สุด ความเขียวของใบสูงที่สุด คลอโรฟิลล์รวมสูงที่สุด น้ำหนักสดต่อต้นมากที่สุด และน้ำหนักแห้งต่อต้นมากที่สุด นอกจากนั้น การใช้ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินและແແແແ ลดการปนเปื้อนของแบคทีเรียก่อโรคทางเดินอาหาร *E. coli* และการสะสมของไนเตรทในผักสลัดกรีนโอ๊คน้อยที่สุด รวมทั้งปุ๋ยมูลไส้เดือนดินยังมีแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติตรึงไนโตรเจนในอากาศ อยู่ในสกุล *Azotobacter* sp. ซึ่งเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชใบ ดังนั้นการปลูกผักสลัดกรีนโอ๊คด้วยการใช้ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินและແແແແ ไม่เพียงแต่จะได้ผักสลัดที่มีคุณภาพดีซึ่งส่งผลดีต่อผู้บริโภคแล้ว ยังสามารถลดต้นทุนการผลิตได้เนื่องจาก ปุ๋ยมูลไส้เดือนดินผลิตได้ง่ายจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและพืชผัก

ผลไม้ที่เหลือทิ้งร่วมกับการทำงานของไส้เดือนดินในการหมักปุ๋ย และແແແແที่หาได้ง่าย จึงเหมาะแก่การแนะนำให้เกษตรกรนำไปใช้ในการปลูกผักสลัด และผักชนิดอื่นแบบใช้ดินต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร.ชัยบัณฑิต ลือลาภ ที่ให้ความอนุเคราะห์เชื้อแบคทีเรีย *Azotobacter vinelandii* เป็นแบคทีเรียเปรียบเทียบในการทดลองครั้งนี้ ขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย กนกวรรณ ทองศรี ศิริรัตน์ คำดี และ อมลวรรณ มีสัจย์ ที่ช่วยเก็บผลการทดลองในการทดลองครั้งนี้ ขอขอบคุณ หลักสูตรจุลชีววิทยา สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.สุวรรณภูมิ ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มทร.สุวรรณภูมิ ที่ให้ความอนุเคราะห์พื้นที่โรงเรือนแปลงเพาะปลูกควบคุม ขอขอบคุณคุณกานดาดี โนชัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำทดลองทางจุลชีววิทยา

เอกสารอ้างอิง

- Bhosale, H.J., Kadam, T.A. and Bobade, A.R. 2013. Identification and production of *Azotobacter vinelandii* and its antifungal activity against *Fusarium oxysporum*. **Journal of Environmental Biology** 34(2): 177-182.
- Bhuvaneshwari, K. and Singh, P.K. 2015. Response of nitrogen-fixing water fern *Azolla* biofertilization to rice crop. **3 Biotech** 5(4): 523-529.

- Bisen, P.S., Debnath, M. and Prasad, G.B.K.S. 2012. **Microbes: Concepts and Applications**. 1st ed. Wiley-Blackwell Publishing, Malden.
- Cappuccino, J.G. and Sherman, N. 1992. **Microbiology: A Laboratory Manual**. 3rd ed. Benjamin/Cummings Pub. Co., Redwood City, CA.
- Cataldo, D.A., Haroon, M., Schrader, L.E. and Youngs, V.L. 1975. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 6(1): 71-80.
- Department of Medical Sciences, Ministry of Public Health. 2017. **Standard for microbiological quality of foods and food containers (Issue 3)**. Available Source: <http://e-library.dmsc.moph.go.th/ebooks/files/micro-ISB N60.pdf>, March 12, 2020. (in Thai)
- Dias, J.S. 2012. Nutritional quality and health benefits of vegetables: A review. **Food and Nutrition Sciences** 3: 1354-1374.
- Dominguez, J., Edwards, C.A. and Ashby, J. 2001. The biology and population dynamics of *Eudrilus eugeniae* (Kinberg) (Oligochaeta) in cattle wastes. **Pedobiologia** 45: 341-353.
- European Commission. 2011. **Commission Regulation (EU) No 1258/2011 of 2 December 2011 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels for nitrates in foodstuffs. (Online)**. Available Source: <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:320:0015:0017:EN:PDF>, May 23, 2019.
- Gruda, N., Qaryouti, M.M. and Leonardi, C. 2013. Growing media, pp. 271-302. In Baudoin, W., Nono-Womdim, R., Litaladio, N., Hodder, A., Castilla, N., Leonardi, C., De Pascale, S. and Qaryouti, M., eds. **Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops: Principles for Mediterranean Climate Areas**. Food and Agriculture Organization of The United Nations, FAO, Rome.
- Holt, J.G., Krieg, N.R., Sneath, P.H.A., Staley, J.T. and Williams, S.T. 2000. **Bergey's Manual® of Determinative Bacteriology**. 9th ed. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, PA.
- Hussain, A., Iqbal, K., Aziem, S., Mahato, P. and Negi, A.K. 2014. A review on the science of growing crops without soil (soilless culture) - A novel alternative for growing crops. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences** 7(11): 833-842.
- Klangkongsub, S. and Sohsalam, P. 2013. Vermicompost production by using tomato residue and yard waste. **Journal of Medical and Bioengineering** 2(4): 270-273.
- Nam, K.W. and Yoon, D.H. 2008. Usage of *Azolla* spp. as a biofertilizer on the environmental-friendly agriculture. **Korean Journal of Plant Research** 21(3): 230-235.
- Pathma, J. and Sakthivel, N. 2012. Microbial diversity of vermicompost bacteria that

- exhibit useful agricultural traits and waste management potential. **SpringerPlus** 1: 26. doi: 10.1186/2193-1801-1-26.
- Sinha, R.K., Agarwai, S., Chauhan, K. and Valani, D. 2010. The wonders of earthworms & its vermicompost in farm production: Charles Darwin's friends of farmers', with potential to replace destructive chemical fertilizers from agriculture. **Agricultural Sciences** 1(2): 76-94.
- Tangsombatvichit, P. and Ketrot, D. 2018. The quality of vermicompost from sweet potato crop wastes and its impact on growth promotion of *Brassica chinensis*. **RMUTSB Academic Journal (Science and Technology)** 6(2): 124-133. (in Thai)
- Tangsombatvichit, P., Chupong, S. Ketrot, D. and Boonlerthirun, K. 2016. The management of organic wastes produced vermicompost using earthworm *Eudrilus eugeniae* and effects of vermicompost on growth of *Helianthus annuus*, pp. 1-4. In **Proceedings of 5th International Conference on Food, Agricultural and Biological Sciences (ICFABS-2016)**. International Association of Chemical, Biological & Medical Sciences Researchers, Bangkok.

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กับพอลิแลคติกแอซิดที่เติมเถ้าเปลือกทุเรียน

The Mechanical Properties of Thermoplastic Starch/Poly (Lactic Acid) Blends Filled Durian Peel Ash

พีรวัส กองสง^{1*}, ศิริวรรณ หอกกิ่ง¹, อนุสร วิวาสุ¹ และ มาหามะสุไฮมี มะแซ²

Peerawas Kongsong^{1*}, Siriwan Hokking¹, Anusara Wiwasuk¹ and Mahamasuhaimi Masae²

Received: 13 April 2020, Revised: 4 May 2020, Accepted: 20 May 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมด้วยเถ้าเปลือกทุเรียนในปริมาณ 0, 1.25, 2.50 และ 5.00 ร้อยละ โดยน้ำหนักของเถ้าเปลือกทุเรียนต่อพอลิเมอร์ผสม โดยนำเถ้าเปลือกทุเรียนไปบดด้วยลูกบอลแบบแพลเนต (Planetary ball mill) ซึ่งขนาดของเถ้าเปลือกทุเรียนลดลงจาก 22.3 ± 2.0 ไมโครเมตร เป็น 9.1 ± 1.0 ไมโครเมตร หลังจากบดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราเร็ว 400 รอบต่อนาที ทำการผสมในเครื่องผสมแบบปิด แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล (การทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก) และศึกษาพื้นฐานวิทยา จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและร้อยละการยืด ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบที่เติมเถ้าเปลือกทุเรียนในปริมาณ 1.25 ร้อยละ โดยน้ำหนัก มีค่าสูงที่สุด เมื่อเติมเถ้าเปลือกทุเรียนในปริมาณที่สูงขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดลดลง ค่ายังสัมมูลและค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเถ้าเปลือกทุเรียน การตรวจสอบพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมกับเถ้าเปลือกทุเรียนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลคติกแอซิดมีการเข้ากันได้ไม่ดีและเถ้าเปลือกทุเรียนมีการกระจายตัวได้ดีในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมากกว่าพอลิแลคติกแอซิด

¹ สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

¹ Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Muang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

² สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang Songkhla, Songkhla 90000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): physics_psu@windowslive.com

คำสำคัญ: พอลิแลคติกแอซิด, เทอร์โมพลาสติกสตาซ์, เถ้าเปลือกทุเรียน, สมบัติเชิงกล

ABSTRACT

The purpose of this research was to study the mechanical properties of thermoplastic starch and poly (lactic acid) combined with durian peel ash at 0, 1.25, 2.50 and 5.00 %wt/wt of durian peel ash to polymer blend. The durian peel ash was made by dry grinding with the planetary ball mill. It was found that the particle size of the durian peel ash decreased from $29.21 \pm 2.46 \mu\text{m}$ to $11.19 \pm 0.62 \mu\text{m}$ after grinding for 1 h at 400 rpm. Thermoplastic starch and poly (lactic acid) combined with durian peel ash were prepared using an internal mixer and the test specimens were molded using a compression molding machine. Mechanical and morphological properties of thermoplastic starch and poly (lactic acid) combined with durian peel ash were studied. The highest tensile strength and elongation at break were exhibited in the specimen which had 1.25 %wt/wt of durian peel ash. Tensile strength and elongation at break decreased with an increase of durian peel ash. Young's modulus and impact strength decreased with an increase of the amount of durian peel ash. The morphology of polymer blended with durian peel ash as captured by scanning electron microscopy (SEM) showed that thermoplastic starch and poly (lactic acid) were immiscible. Additionally, durian peel ash had a better distribution in thermoplastic starch than poly (lactic acid).

Key words: poly (lactic acid), thermoplastic starch, durian peel ash, mechanical properties

บทนำ

ผลิตภัณฑ์พลาสติกถูกนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรม และในการดำรงชีวิตมาเป็นระยะเวลานาน โดยมีอัตราการผลิตและการใช้งานสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานหลายร้อยปี การทำลายโดยการเผาทิ้งก็มีโอกาสทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางดิน น้ำ และอากาศ ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกจนนำไปสู่ภาวะโลกร้อน (Pattanasupong *et al.*, 2015) โดยเฉพาะประเทศไทยถือว่าเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการเพาะชำต้นกล้าในถุงหรือกระถางพลาสติกจำนวนมาก เมื่อต้นกล้าเจริญเติบโตเต็มที่ได้มีการเคลื่อนย้ายต้นกล้าออกจาก

ถุงหรือกระถางเพาะชำเพื่อลงแปลงปลูกนั้น เป็นขั้นตอนที่อาจทำให้รากต้นไม้มได้รับความเสียหาย ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช มากไปกว่านั้นหลังการใช้งานถุงหรือกระถางพลาสติกเหล่านี้ก็กลายเป็นขยะที่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม (Kunthadong *et al.*, 2020)

แนวทางการแก้ไขปัญหามลพิษพลาสติกดังกล่าวและกระแสด้านสิ่งแวดล้อมที่ตื่นตัวต่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม พลาสติกที่ผลิตจากพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable polymer) จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เช่น พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid)) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate)) (Kunthadong *et al.*, 2020) ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีการย่อยสลายโดยอาศัยการทำงานของ

จุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย รา และ สาหร่าย เป็นต้น (Suksawat and Pathom-aree, 2012) วัสดุธรรมชาติที่นำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพมีหลายชนิดส่วนใหญ่จะได้อะมาจากแป้ง (Starch) ซึ่งแป้งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด ได้แก่ อะมิโลส (Amylose) และอะมิโลเพกทิน (Amylopectin) โดยแป้งจะมีสมบัติแบบเทอร์โมเซต (Thermoset polymer) จึงต้องมีการเปลี่ยนแป้งให้อยู่ในรูปเทอร์โมพลาสติกสตาซ์ (Thermoplastic starch) ซึ่งจะมีการเติมพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) โดยพลาสติกไซเซอร์ที่นิยมใช้กันคือกลีเซอรอล (Glycerol) ซึ่งมีราคาถูก โดยกลีเซอรอลจะเข้าไปลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งจึงทำให้แป้งสามารถหลอมขึ้นรูปได้ แต่เทอร์โมพลาสติกสตาซ์มีสมบัติเชิงกลต่ำ (Tachaphiboonsap, 2013) มีงานวิจัยจำนวนมากได้พยายามปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาซ์ โดยเทคนิคการผสมแบบเบรนด์ (Blend) ด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพตัวอื่นๆ เช่น การผสมเทอร์โมพลาสติกสตาซ์กับพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งทำให้พลาสติกผสมมีความเหนียวมากขึ้น (Akramia *et al.*, 2016) นอกจากนี้ยังมีการเสริมแรงโดยเทคนิคการผสมแบบคอมโพสิต (Composite) โดยการผสมเส้นใยหรืออนุภาคลงไปในพลาสติกชีวภาพ (Kunthadong *et al.*, 2019) จากงานวิจัยพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี ได้นำอนุภาคของกลูเตนข้าวสาลีมาผสมกับพลาสติกชีวภาพ ทำให้เกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่โปรตีนที่เกิดพันธะไดซัลไฟด์ ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น (Kaewtatip, 2013) และมีการผสมเถ้าลอยลงในเทอร์โมพลาสติกสตาซ์ พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาซ์มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น (Sunduma *et al.*, 2018) การผสมอนุภาคนาโนเคลย์เข้าไปในพอลิแลคติกแอซิด ทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทก และค่าความแข็งของพอลิแลคติกแอซิดมีแนวโน้ม

สูงขึ้น (Rattanapan, 2012) จะเห็นได้ว่าการเติมอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงไปทำให้สมบัติทางกลของพลาสติกชีวภาพมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ก็มีการศึกษาเกี่ยวกับเถ้าจากเปลือกทุเรียน พบว่า เถ้าจากเปลือกทุเรียนมีองค์ประกอบของธาตุฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมมากกว่าเถ้าชีวภาพจากวัสดุอื่นๆ (Quyen *et al.*, 2019) ดังนั้น การเติมอนุภาคที่มีขนาดเล็กจากเปลือกทุเรียนลงในพลาสติกชีวภาพ นอกจากจะเพิ่มสมบัติทางกลแล้วยังช่วยเพิ่มแร่ธาตุ ซึ่งธาตุดังกล่าวที่มีสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช และยังสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงสมบัติทางกลของพลาสติกชีวภาพระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซ์กับพอลิแลคติกแอซิด โดยการผสมเถ้าจากเปลือกทุเรียน เพื่อเป็นแนวทางการวิจัยสำหรับพัฒนาการผลิตพลาสติกชีวภาพที่ประยุกต์ใช้เป็นถุงสำหรับเพาะชำพืชหรือกระถางต้นไม้ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยกระบวนการฝังดินที่สามารถเพิ่มธาตุอาหารในดินได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมเถ้าจากเปลือกทุเรียน

1.1 นำเปลือกทุเรียนพันธุ์หมอนทองไปหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ และตากแดดเป็นเวลา 2 วัน เพื่อกำจัดความชื้นในเปลือกทุเรียนและเผาให้เป็นเถ้า

1.2 นำเถ้าที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดคาร์บอนที่เหลือจากการเผา

1.3 นำเถ้าเปลือกทุเรียนที่ได้จากการเผา ไปบดด้วยลูกบอลแบบแพลเนต (Planetary ball mill, Pulverisette 7 ยี่ห้อ Fritsch) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยความเร็ว 400 รอบต่อนาที

1.4 นำผงเถ้าก่อนบดและหลังบดไปวัดขนาดด้วยเครื่องวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค (Particle size

analyzer, รุ่น Analysette 22 Nanotec ยี่ห้อ Fritsch) และวิเคราะห์หาธาตุในอนุภาคของเถ้าโดยเทคนิคเอเนอร์จี ดิสเพอร์ซีฟ สเปกโทรสโกปี (Energy dispersive x-ray spectroscopy, EDS) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM, รุ่น JSM-7800F ยี่ห้อ Jeol)

2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมด้วยเถ้าเปลือกทุเรียนกับพอลิแลคติกแอซิด

2.1 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้มาจากแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอล (เกรด AR จากบริษัท QReC New Zealand) ที่อัตราส่วน 70 ต่อ 30 ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Ferri *et al.*, 2016) โดยเริ่มจากการนำแป้งมันสำปะหลังไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผสมแป้งกับกลีเซอรอลโดยนำส่วนผสมใส่ในถุงร้อนโพลีโพรพิลีนแล้วเขย่าให้เข้ากันทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง และนำไปผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer, รุ่น MX500-D75L90 ยี่ห้อ Chareon) ที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที จากนั้นนำเถ้าจากเปลือกทุเรียนลงไปผสมต่อ 5 นาที โดยเถ้าเปลือกทุเรียนถูกนำไปอบก่อนทำการผสมที่อุณหภูมิ 70

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบด

2.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมด้วยเถ้าเปลือกทุเรียนกับพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งเตรียมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิดที่อัตราส่วน 30 ต่อ 70 ร้อยละโดยน้ำหนัก เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมด้วยเถ้าเปลือกทุเรียนและพอลิแลคติกแอซิดถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ก่อนการผสม โดยใช้อุณหภูมิในการผสมเท่ากับ 170 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที เมื่ออุณหภูมิในการผสมคงที่แล้วเติมเถ้าเปลือกทุเรียนลงไป 0, 1.25, 2.50 และ 5.00 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ผสมจนเข้ากันเป็นเวลา 20 นาที ซึ่งแสดงส่วนผสมดังตารางที่ 1

2.3 นำพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมด้วยเถ้าเปลือกทุเรียนกับพอลิแลคติกแอซิดเทใส่แม่พิมพ์ที่มีรูปร่างเป็นชิ้นงานสำหรับการทดสอบความต้านทานแรงดึงและความต้านทานต่อแรงกระแทก โดยทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดเข้าแม่พิมพ์ โดยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding, รุ่น PR2D-W300L350 PM-PCL-HMI ยี่ห้อ Chareon) ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ความดัน 10 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมด้วยเถ้าเปลือกทุเรียน

ตัวอย่าง ที่	พอลิแลคติกแอซิด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เถ้าเปลือกทุเรียน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
1	70	30	0.00
2	70	30	1.25
3	70	30	2.50
4	70	30	5.00

3. การทดสอบสมบัติทางกลและการวิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยา

3.1 การทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine, UTM รุ่น LR 10K ยี่ห้อ LLOYD) เพื่อวัดค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength; TS) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break; EB) และค่ายังส์มอดูลัส (Young's modulus) โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ยาว 165 มิลลิเมตร ระยะห่างตัวรองรับตัวอย่าง (Gauge length) 50 มิลลิเมตร ความกว้างช่วง Gauge length 13 มิลลิเมตร ความเร็วการทดสอบ (Crosshead speed) 50 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้ตัววัดแรงดึง (Load cell) ขนาด 5 กิโลนิวตัน โดยทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึงตัวอย่างละ 5 ชิ้น

3.2 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (Impact tester, รุ่น 9050 ยี่ห้อ Instron) ทดสอบแบบไอซอด (Izod) โดยเตรียมชิ้นทดสอบขนาด $64 \times 12.7 \times 3.2$ มิลลิเมตร แล้วนำผลพลังงานที่ถูกดูดซับมาคำนวณหาค่าการต้านทานแรงกระแทกในหน่วย กิโลจูลต่อตารางเมตร โดยทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกตัวอย่างละ 5 ชิ้น

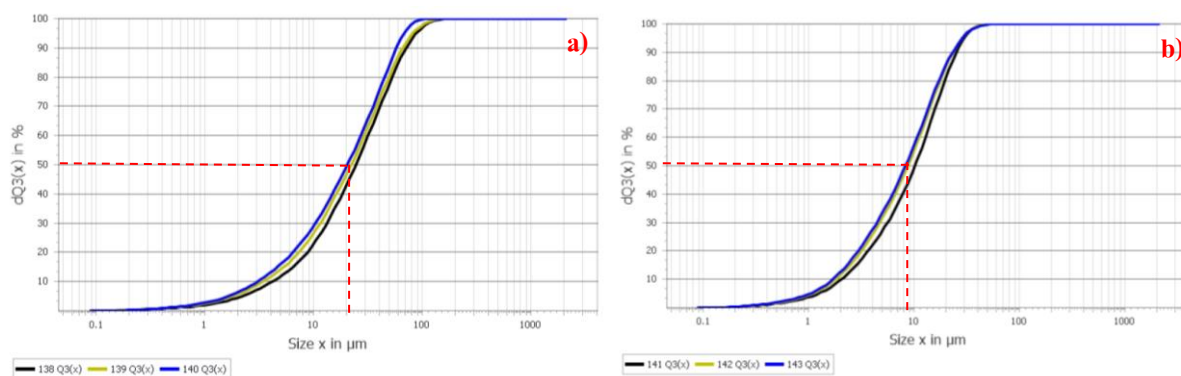
3.3 ศึกษาลักษณะพื้นผิวและพื้นผิวแตกหักของเทอร์โมพลาสติกสไตร์กับพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมด้วยถั่วเปลือกทุเรียน โดยการนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงกระแทก ตัดให้มีขนาดเหมาะสมกับสัดบด ชิ้นงานลงบนสัดบดด้วยเทปคาร์บอนนำไปเคลือบผิวด้วยทอง ด้วยเครื่องเคลือบผิวตัวอย่าง

(รุ่น MP-19020NCTR ยี่ห้อ Neo coater) ทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy (SEM), รุ่น JSM-7800F ยี่ห้อ Jeol) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ 5 กิโลโวลต์

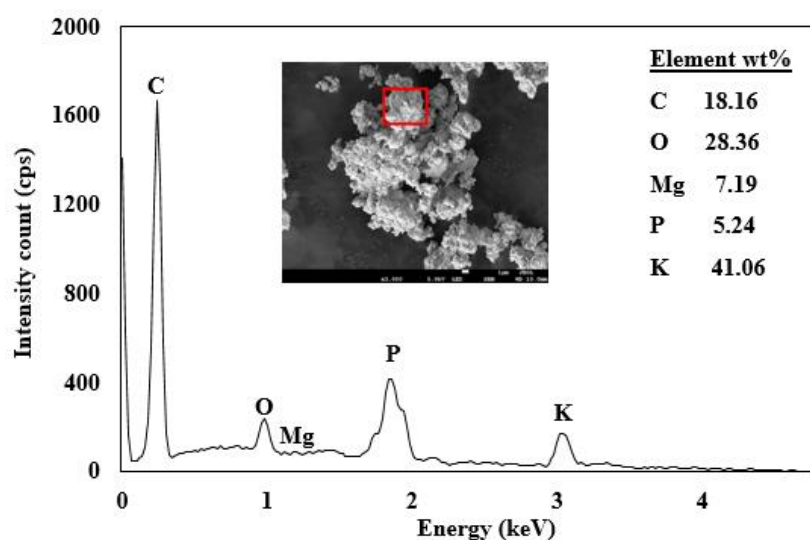
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการตรวจวัดขนาดและปริมาณธาตุของถั่วเปลือกทุเรียน

จากการตรวจวัดขนาดของถั่วเปลือกทุเรียนก่อนบดและหลังบด โดยใช้เครื่องวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค ผลการแจกแจงขนาดอนุภาคสะสมของถั่วเปลือกทุเรียนแสดงดังภาพที่ 1(a) โดยมีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคถั่วเปลือกทุเรียนก่อนบด เท่ากับ 22.3 ± 2.0 ไมโครเมตร เมื่อนำถั่วจากเปลือกทุเรียนไปบดด้วยลูกบอลแบบแพลเน็ต ที่อัตราเร็ว 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลแสดงดังภาพที่ 1(b) จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ขนาดอนุภาคถั่วเปลือกทุเรียนมีขนาดลดลง โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 9.1 ± 1.0 ไมโครเมตร เมื่อนำอนุภาคถั่วเปลือกทุเรียนไปตรวจสอบธาตุด้วยเครื่องเอเนอร์จี ดิสเพอร์ซีฟสเปกโทรสโกปี (แสดงดังภาพที่ 2) พบว่า ธาตุที่พบในองค์ประกอบของถั่วเปลือกทุเรียนมากที่สุด ได้แก่ โพแทสเซียม ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 41.06 เปอร์เซ็นต์ และยังพบออกซิเจน คาร์บอน แมกนีเซียม และฟอสฟอรัส เท่ากับ 28.36, 18.16, 7.19 และ 5.24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในถั่วเปลือกทุเรียนมีแร่ธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช



ภาพที่ 1 แสดงการแจกแจงขนาดอนุภาคสะสมของเถ้าเปลือกทุเรียนก่อนทำการบด (a) หลังทำการบด (b)



ภาพที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของเถ้าเปลือกทุเรียนด้วยเทคนิคเอเนอร์จี ดิสเพอร์ซีฟ สเปกโทรสโกปี

2. ผลการศึกษาฐานฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณพื้นผิว

ภาพที่ 3 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นทดสอบ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ลักษณะพื้นผิวจะเรียบและไม่เห็นเฟสเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดจะเคลือบไว้ และพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมเถ้าเปลือกทุเรียน มีลักษณะเป็นฟองอากาศขนาดเล็กในปริมาณมาก หลังจากผสมเถ้าเปลือกทุเรียนในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะ

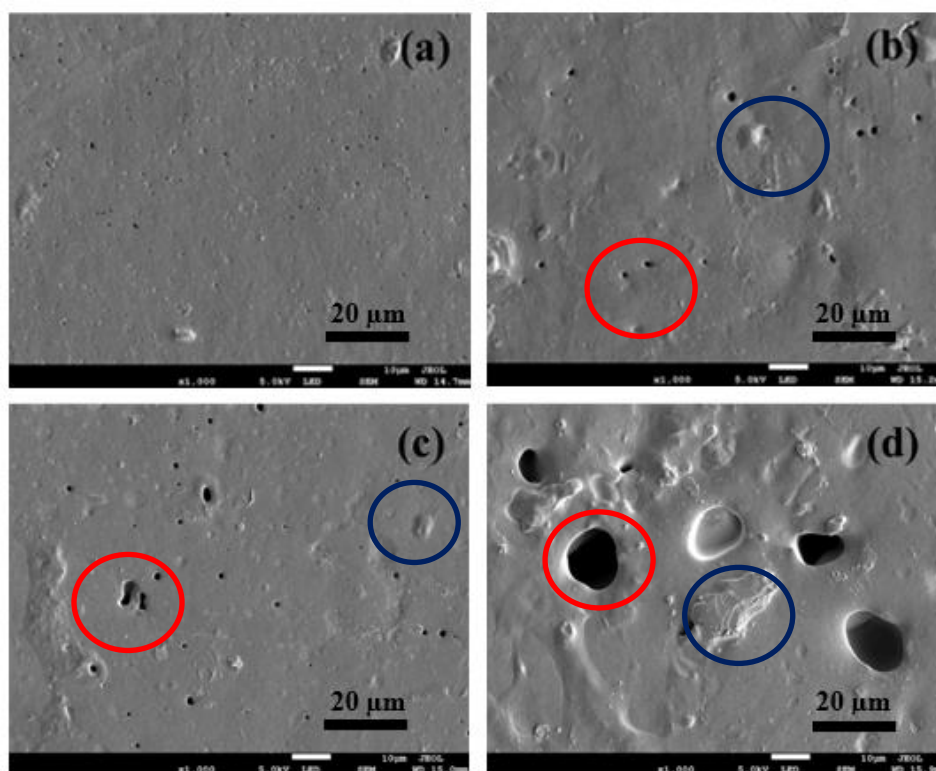
พบฟองอากาศขนาดใหญ่และมีปริมาณน้อยลง (วงสีแดงในภาพที่ 3 คือฟองอากาศที่เกิดขึ้น) อาจเป็นเพราะในเถ้าเปลือกทุเรียนมีความชื้น เมื่อเติมเถ้าเปลือกทุเรียนลงไปพอลิเมอร์ผสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ความชื้นเพิ่มขึ้น ฟองอากาศเกิดการรวมตัวกัน จึงทำให้มีฟองอากาศขนาดใหญ่ขึ้น และยังเห็นเฟสของเถ้าจากเปลือกทุเรียนที่การกระจายตัวในโครงสร้างพอลิเมอร์ผสม (วงสีน้ำเงินในภาพที่ 3)

2.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก

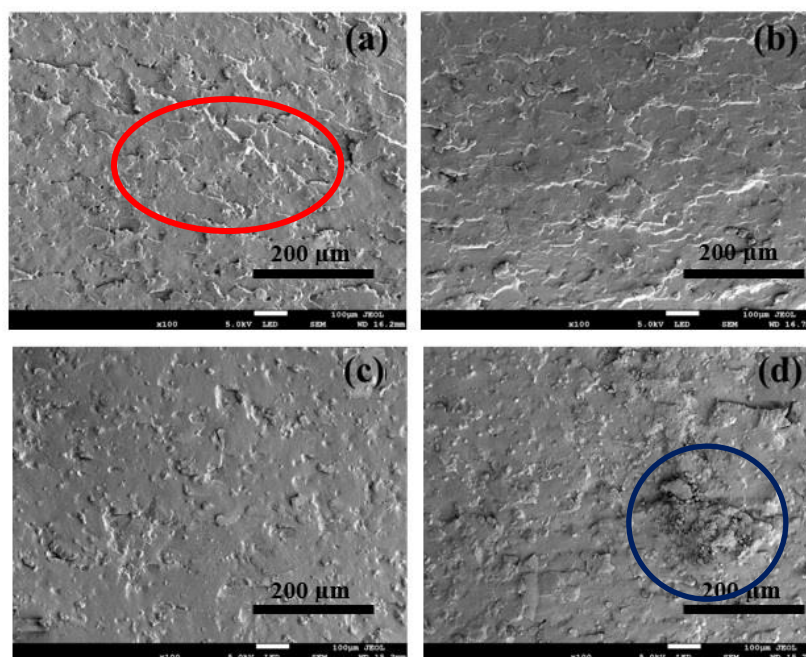
ภาพที่ 4 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่บริเวณพื้นผิวแตกหักของชิ้นทดสอบที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมเถ้าเปลือกทุเรียน ที่บริเวณพื้นผิวแตกหักจะมีลักษณะเป็นสันคลื่น (วงสีแดงในภาพที่ 4(a)) ซึ่งบ่งบอกถึงการแตกหักแบบเหนียว เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมเถ้าเปลือกทุเรียน ซึ่งมีลักษณะพื้นผิวแตกหักที่เรียบกว่า แต่ยังพบเถ้าที่เกาะกลุ่มกันขนาดเล็ก (วงสีน้ำเงินในภาพที่ 4(d)) อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ชิ้นทดสอบมีความเปราะเพิ่มขึ้น (Sunduma *et al.*, 2018)

2.3 ลักษณะความเข้ากันระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมด้วยเถ้าเปลือกทุเรียน

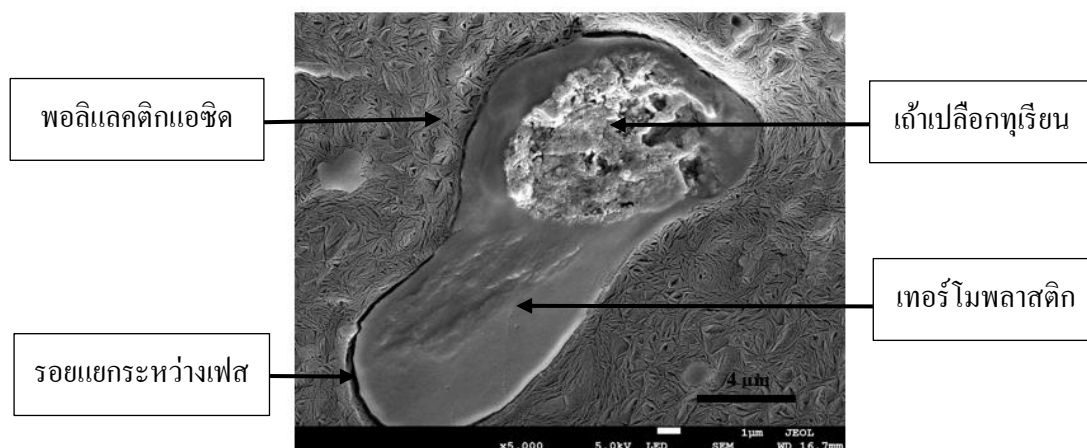
การตรวจสอบลักษณะความเข้ากันระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมด้วยเถ้าเปลือกทุเรียนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (แสดงดังภาพที่ 5) จะเห็นได้ว่าพอลิแลคติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีการแยกเฟสกันอย่างชัดเจน สังเกตได้จากรอยแยกระหว่างเฟส และยังพบเถ้าเปลือกทุเรียนในเนื้อของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีความเข้ากัน เนื่องจากไม่มีรอยแยกระหว่างเฟส ซึ่งในขั้นตอนการผสม ได้ทำการผสมเถ้าเข้ากับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลก่อน แล้วจึงนำไปผสมกับพอลิแลคติกแอซิด จึงทำให้พบเถ้าในเนื้อของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล



ภาพที่ 3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นทดสอบ ที่กำลังขยาย 1,000x
a) 0, b) 1.25, c) 2.50 และ d) 5.00 ร้อยละ โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4 การตรวจสอบลักษณะการแตกหักด้วยกล้องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100x
a) 0, b) 1.25, c) 2.50 และ d) 5.00 ร้อยละโดยน้ำหนัก



ภาพที่ 5 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000x จากชิ้นทดสอบที่เติมเถ้าเปลือกทุเรียนในปริมาณ 1.25 ร้อยละโดยน้ำหนัก

3. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

3.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง

ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และค่ายังสัมมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสไตร์กับพอลิแลคติกแอซิด และมีการผสมเถ้าเปลือกทุเรียนในปริมาณ 0, 1.25, 2.50 และ 5.00 ร้อยละโดย

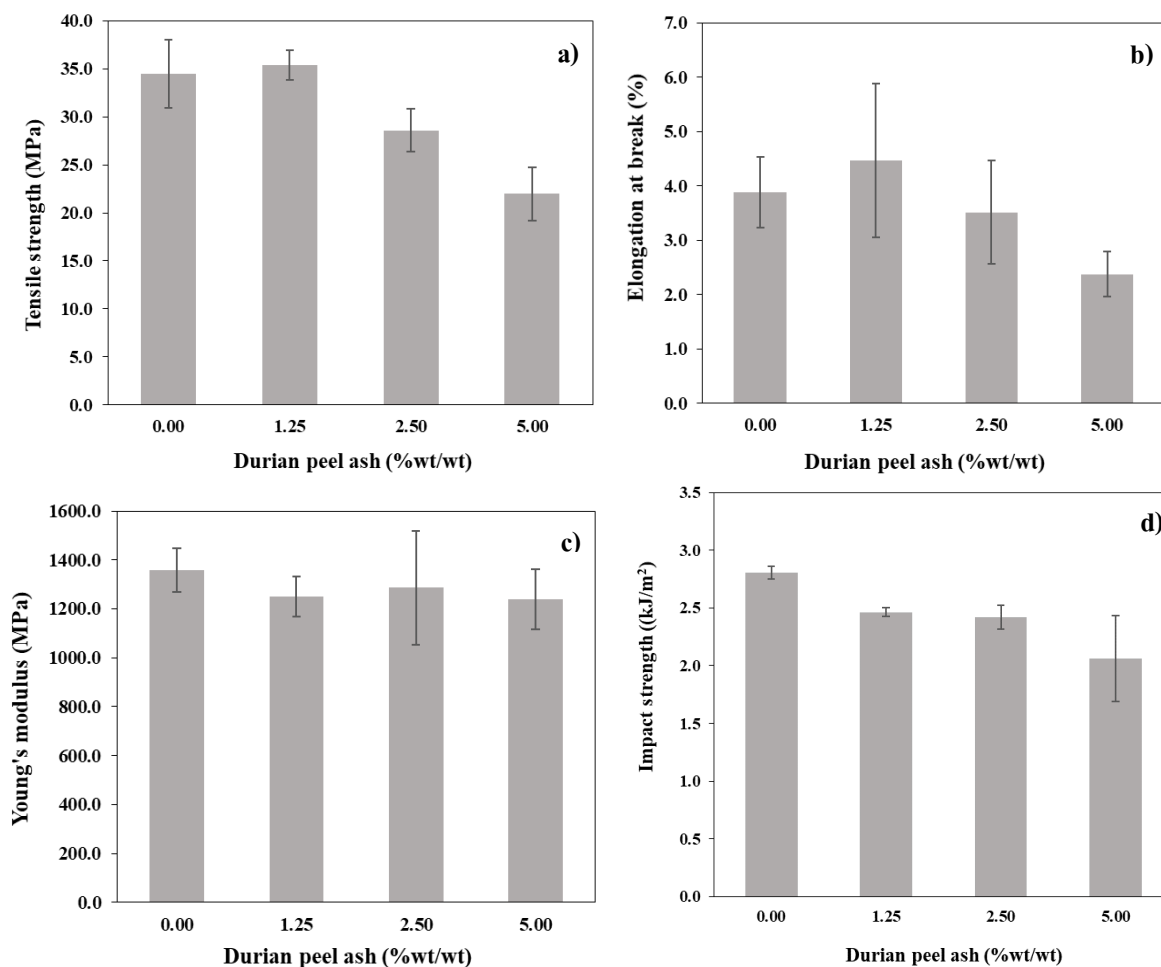
น้ำหนัก แสดงในภาพที่ 6(a), 6(b) และ 6(c) ตามลำดับ ชิ้นทดสอบพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมปริมาณเถ้าเปลือกทุเรียน 1.25 ร้อยละโดยน้ำหนัก แสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่สูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 35.40 เมกะปาสกาล และ 4.47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อาจเป็นเพราะเมื่อเติมเถ้าเข้าไปในปริมาณที่เหมาะสม

อนุภาคเถ้าเปลือกทุเรียนจะเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ผสมทำให้ช่องว่างระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ผสมลดลง ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ซึ่งค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และร้อยละการยืด ณ จุดขาดจะต่ำลงตามปริมาณการเติมเถ้าเปลือกทุเรียนที่สูงขึ้น เพราะการเติมเถ้าเปลือกทุเรียนในปริมาณที่สูงขึ้น จะทำให้อนุภาคของเถ้า เข้าไปขัดขวางสายโซ่โมเลกุล การจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลตามแนวแรงจึงถูกยับยั้ง ทำให้การจัดเรียงตัวเกิดได้ยาก ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง (Sunduma *et al.*, 2018) ค่ายังสัมมอดูลัสของขึ้นทดสอบที่ไม่มีการเติมเถ้าเปลือกทุเรียน มีค่าเท่ากับ 1358.41 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าสูงที่สุด เมื่อเติมเถ้าเปลือกทุเรียนในปริมาณต่างๆ ค่ามอดูลัสของยังมีค่าต่ำลง โดยปกติแล้วฟิลเลอร์ที่เติมลงไปจะช่วยเสริมแรงนั้น ต้องมีความเข้ากันได้หรือมีการเชื่อมต่อกันระหว่างโครงสร้างเมทริกซ์กับฟิลเลอร์ (Thammachot, 2015) ดังนั้นผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมเถ้าเปลือกทุเรียน เป็นผลมาจากลักษณะรูปร่าง ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของเถ้าเปลือกทุเรียน แล้ว

พบฟองอากาศที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นทดสอบ จึงทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ลดลง (Sunthontem, 2012)

3.2 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก

ภาพที่ 6(d) เป็นผลการทดสอบแรงกระแทกพบว่า พอลิแลคติกแอซิดที่ผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช มีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ 2.74 ± 0.17 กิโลจูลต่อตารางเมตร เมื่อมีการเติมเถ้าของเปลือกทุเรียนที่ผ่านการบดด้วยลูกบอลลแบบแพลนดที่ปริมาณ 1.25, 2.50 และ 5.00 ร้อยละโดยน้ำหนัก พบว่าการเติมเถ้าเปลือกทุเรียนนั้น ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกลดลงเหลือ 2.54 ± 0.05 , 2.34 ± 0.22 และ 1.91 ± 0.50 กิโลจูลต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ลดลง สามารถบอกได้ถึงระดับความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุ ซึ่งวัสดุนั้นจะมีลักษณะเปราะขึ้นเมื่อได้รับแรงที่มากกระทบอย่างรวดเร็ว (Hunyeck, 2019) อาจเป็นเพราะเถ้าจากเปลือกทุเรียนเกิดการเกาะกลุ่มกัน (ภาพที่ 4(d) และ ฟองอากาศบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเถ้าเปลือกทุเรียน (ภาพที่ 3(d))



ภาพที่ 6 ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (a) ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (b) ย้งสัมมอดูลัส (c) และความต้านทานต่อแรงกระแทก (d) ของพอลิเมอร์ผสมที่เติมเถ้าเปลือกทุเรียนในปริมาณต่างๆ

สรุป

ผลการศึกษาพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า บริเวณพื้นผิวชั้นทดสอบที่ไม่เติมเถ้าเปลือกทุเรียนพบฟองอากาศขนาดเล็กที่บริเวณพื้นผิวในปริมาณมาก เมื่อเติมเถ้าเปลือกทุเรียนในปริมาณต่างๆ ฟองอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่มีปริมาณลดลง ลักษณะการแตกหักของชิ้นทดสอบที่ไม่มีการเติมเถ้าเปลือกทุเรียนมีลักษณะการแตกหักแบบเหนียว เมื่อเติมเถ้าเปลือกทุเรียนทำให้ชิ้นทดสอบมีความเปราะมากขึ้น และยังพบรอยแยกระหว่างเฟสของเทอร์โมพลาสติกสตาไรซ์กับพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากัน เถ้าเปลือกทุเรียนมีความเข้ากันได้กับเทอร์โม

พลาสติกสตาไรซ์ และผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อเติมเถ้าเปลือกทุเรียนลงในพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณ 1.25 ร้อยละโดยน้ำหนัก ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อเติมเถ้าเปลือกทุเรียนในปริมาณที่สูงขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าต่ำลง ค่ายังสัมมอดูลัสของชิ้นทดสอบที่ไม่มีการเติมเถ้าเปลือกทุเรียนมีค่าสูงสุด และเมื่อเติมเถ้าเปลือกทุเรียน พบว่า ค่ายังสัมมอดูลัสมีค่าต่ำลง ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นทดสอบมีค่าลดลงเมื่อเติมเถ้าเปลือกทุเรียนเพิ่มมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สำหรับการ
สนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Akramia, M., Ghasemia, I., Azizia, H., Karrabia, M.
and Mohammad, S. 2016. A new approach
in compatibilization of the poly (lactic
acid)/thermoplastic starch (PLA/TPS)
blends. **Carbohydrate Polymers** 144:
254-262.
- Ferri, J.M., Garcia, G.D., Sánchez, N.L., Fenollar,
O. and Balart, R. 2016. The effect of
maleinized linseed oil (MLO) on mechical
performance of poly (lactic acid) thermoplastic
starch (PLA-TPS) blends. **Carbohydrate
Polymers** 147: 60-68.
- Hunyek, A. 2019. Mechanical, optical and electrical
properties of copper oxide-polypropylene
composite. **The Journal of King Mongkut's
University of Technology North Bangkok**
29(3): 527-538. (in Thai)
- Kaewtatip, K. 2013. Bioplastics from wheat gluten.
KKU Research Journal 41(2): 309-319.
(in Thai)
- Kunthadong, P., Peekoh, M. and Sindanjark, O.
2019. Biocomposite films based on
cassava starch reinforced with durian rind
cellulose fibers. **RMUTP Research
Journal** 13(1): 39-50. (in Thai)
- Kunthadong, P., Chankaew, C. and Chotichayapong, C.
2020. Soil nutrient rich thermoplastic
tapioca starch/water hyacinth bio-
composite films. **The Journal of King
Mongkut's University of Technology
North Bangkok** 30(1): 104-117. (in Thai)
- Pattanasupong, A., Kahapana, C., Sompakdee, N.,
Srasaengta, N., Tungsatitporn, S. and
Bosuwan, K. 2015. Compost quality of
poly lactic acid bio-plastic sheet
disintegration in a pilot scale test according
to ISO 16929:2013. **Songklanakarin
Journal of Plant Science** 2(3): 35-40. (in
Thai)
- Quyen, T.T.B, Toan, N.V., Nhan, T.C., Thien,
D.V.H. and Thanh, L.H.V. 2019. A
Simple and rapid preparation of activated
carbons with highly surface area from
durian shell ash. **International Journal of
Scientific Engineering and Science** 3(4):
65-68.
- Rattanapan, A. 2012. Mechanical properties and
morphology of PLA filled with nanoclay.
The Journal of Industrial Technology
8(3): 69-77. (in Thai)
- Suksawat, S. and Pathom-aree, W. 2012. The role
of bacteria on bioplastic. **Srinakharinwirot
Science Journal** 28(2): 285-304. (in Thai)
- Sunduma, T., Szécsényi, K.M. and Kaewtatip, K.
2018. Preparation and characterization of
thermoplastic starch composites with fly
ash modified by planetary ball milling.
Carbohydrate Polymers 191: 198-204.

- Sunthontem, S. 2012. Silver nano/poly (lactic acid)/poly (butylene succinate) nanocomposite: preparation, compatibility and properties. Master of Science and Engineering, Silpakorn University. (in Thai)
- starch/poly (lactic acid) blends. Master of Engineering, Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Tachaphiboonsap, S. 2013. Compatibility and toughness improvement of thermoplastic
- Thammachot, N. 2015. **Engineering Materials.** SE-Education, Bangkok. (in Thai)

ผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาการหน่วงสำหรับการบ่มต่อกำลังอัด ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินบด

Effect of Temperature and Delay Time for Curing on Compressive Strength of Geopolymer Mortar Ground Fly ash

นิติธร สีมะเมือง¹ สำเร้ง รุกซอน^{1*} และ ปริญญ์ จินดาประเสริฐ²

Nititron Simaung¹, Sumrereng Rukzon^{1*} and Prinya Chindaprasit²

Received: 12 March 2020, Revised: 3 July 2020, Accepted: 16 September 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพในการพัฒนาเถ้าถ่านหินบดเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ส่วนผสมของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้ค่าสารละลายต่อเถ้าถ่านหินบดคงที่เพื่อควบคุมการทดสอบค่าการไหลแต่ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ การบ่ม ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และการหน่วงระยะเวลาสำหรับบ่มที่มีผลต่อกำลังอัด ผลทดสอบพบว่าความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่อยู่ระหว่างร้อยละ 107-113 โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าถ่านหินบดละเอียดมีกำลังอัดที่สูงด้วยความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้เท่ากับ 15 โมลาร์ (15Molar, 15M) และอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่เหมาะสมเท่ากับ 1.50 โดยน้ำหนัก การใช้เถ้าถ่านหินบดเป็นส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ให้ค่ากำลังอัดที่ดีด้วยการนำตัวอย่างทิ้งไว้ก่อนนำเข้าตู้อบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Delay time) และอุณหภูมิการบ่มที่เหมาะสมในการบ่ม คือ 65 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาการบ่ม 1 วัน

คำสำคัญ: กำลังอัด, การหน่วงเวลาบ่ม, เถ้าถ่านหินบด, จีโอโพลิเมอร์, มอร์ตาร์, ปอชโซลาน

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 96 ถนนพุทธมณฑลสาย 5 ตำบลสาละวิน อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, 96 Phuttamonthon Sai 5 Road, Salaya, Phuttamonthon, Nakhonpatom 73170, Thailand.

² ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 123 หมู่ 16 ถนนมิตรภาพ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

² Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, 123 Moo 16 Mitraphap Road, Nai-Muang, Muang, Khonkaen 40002, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): sumrereng.ruk@rmutr.ac.th

ABSTRACT

This research examines the potential in developing ground fly ash as a geopolymer material. Geopolymer mortar ground fly ash with constant liquid to ash ratio was used for testing radiant flow value. Effect of temperature, delay time of curing, concentration of sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na_2SiO_3) to sodium hydroxide (NaOH) ratio on compressive strength were investigated. Test results showed that the workable flow of geopolymer mortar was in the range of 107-113% and was dependent on the ratio by mass of sodium silicate to NaOH and concentration of NaOH. The geopolymer mortar ground fly ash with high strength was obtained with concentration of NaOH of 15M (15Molar, 15M) with the sodium silicate to NaOH ratio by weight of 1.5. Using ground fly ash as a geopolymer mixture, the compressive strength was gained by leaving the sample for 1 h (delay time) before being put into the oven, and the optimum curing temperature was 65 °C in 1 day curing period.

Key words: compressive strength, delay time curing, ground fly ash, geopolymer, mortar, pozzolan

บทนำ

ในงานวิจัยด้านคอนกรีตและวัสดุที่ใช้ในงานคอนกรีต พบว่านักวิจัยพยายามศึกษาวิธีการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง ทั้งนี้เพื่อลดต้นทุนการผลิตโดยใช้วัสดุปอซโซลานที่เป็นของเสียจากผลพลอยได้ในโรงงานอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม มาใช้แทนปูนซีเมนต์เพื่อผลิตมอร์ตาร์และคอนกรีต (Posi *et al.*, 2019; Chindaprasirt *et al.*, 2007; Chindaprasirt *et al.*, 2008; Chindaprasirt and Rukzon, 2015; Rukzon and Chindaprasirt, 2011; Rukzon and Chindaprasirt, 2018) โดยที่ผ่านมามีการพยายามใช้วัสดุประสานที่ไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เพื่อผลิตคอนกรีตและมอร์ตาร์ วัสดุดังกล่าว คือ วัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Chindaprasirt *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2010; Rukzon and Chindaprasirt, 2014; Sukmak *et al.*, 2013; Sathonsaopark *et al.*, 2009; Rovnanik, 2010) การผลิตจีโอโพลิเมอร์ทำโดยการนำสารละลายอัลคาไลที่มีความเข้มข้นสูงมากระตุ้นสารซิลิกาออกไซด์ที่มีอยู่ในวัสดุปอซโซลาน ส่งผลให้ได้

สารประกอบชนิดใหม่ที่มีสมบัติเชื่อมประสานได้ (Chindaprasirt *et al.*, 2019a; Guo *et al.*, 2010; Davidovits and James, 1999; Chindaprasirt *et al.*, 2007)

ในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า มีการนำเถ้านหิน เถ้าก้นเตา และวัสดุปอซโซลานอื่นๆ ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ (Chindaprasirt *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2010; Rukzon and Chindaprasirt, 2014; Sukmak *et al.*, 2013; Sathonsaopark *et al.*, 2009; Rovnanik, 2010; Davidovits and James, 1999) เช่น ในงานวิจัยบางชิ้นศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอุณหภูมิการบ่มที่แตกต่างกันต่อกำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์โดยใช้วัสดุปอซโซลานคือ เถ้าขานอ้อย (Rukzon and Chindaprasirt, 2014) ที่ผ่านมามีงานวิจัยไม่มากนักที่พิจารณาถึงผลของการหน่วงเวลาการบ่ม หรือ Delay time (Chindaprasirt *et al.*, 2007) ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาเถ้านหินบดเพื่อใช้เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ในการผลิตมอร์ตาร์ โดยการศึกษาความสามารถทำงานได้ของ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ นอกจากนั้นได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ อิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่ม ผลของการหน่วงระยะเวลา (Delay time) ก่อนเข้าคูบ และนำตัวอย่างมอร์ตาร์เข้าคูบทันที ทั้งนี้เพื่อศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่าง

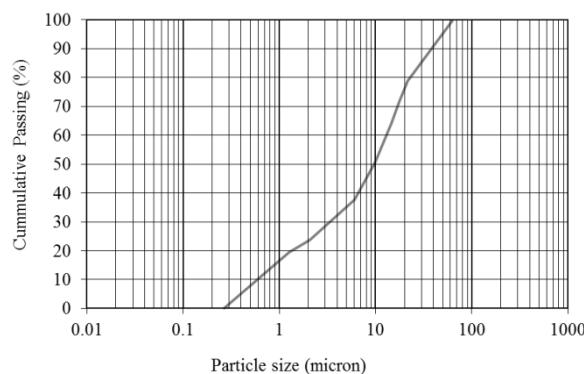
1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1.1.1 เถ้านหิน

เถ้านหินได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยการศึกษานี้ใช้เถ้านหินบดให้มีปริมาณข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 10-12 โดยน้ำหนัก และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.34 ดังแสดงในตารางที่ 1 ส่วนในภาพที่ 1 แสดงขนาดการกระจายตัวของเถ้านหิน พบว่า เถ้านหินบดมีขนาดการกระจายตัวเท่ากับ 10 ไมครอน โดยวัดค่าที่ d_{50} ในการศึกษา ใช้เถ้านหินบดที่มีความละเอียด (พื้นที่ผิวจำเพาะ) โดยวิธีของเบลนเท่ากับ 3,600 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเถ้านหิน

รายการทดสอบ	คุณสมบัติของเถ้านหิน
ปริมาณสัดส่วนร้อยละข้างบนตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 325 (%)	10-12
ความถ่วงจำเพาะ	2.96
ความละเอียดโดยวิธีของเบลน (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	3,600
ขนาดการกระจายตัว (ไมครอน)	10



ภาพที่ 1 การกระจายตัวของเถ้านหินบด

1.1.2 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียด ใช้ทรายคัดพิเศษเพื่อผลของการศึกษา ทั้งนี้อยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้งซึ่งมีอนุภาคผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 ที่มีค่าโมดูลัส

ความละเอียด (Fineness modulus; FM) เท่ากับ 2.50 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C136 (ASTM, 2005a) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.25 และค่าการดูดความชื้นเท่ากับร้อยละ 4-6

1.1.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

ในการศึกษานี้ใช้สารละลายที่ใช้ในการผสม จีโอโพลิเมอร์ และควบคุมชนิดและคุณภาพของ สารละลายดังกล่าวให้เป็นประเภทเดียวกันเพื่อผลการวิเคราะห์ สารละลายที่ใช้ในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาด้านเคมี ในที่นี้ คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต

1.1.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ในการศึกษานี้ใช้ของเหลวหรือสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้เป็นเกรดห่อหุ้มปฏิบัติการ เพื่อเป็นสารละลายในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต

1.1.5 น้ำกลั่น

การศึกษานี้ป้องกันสิ่งเจือปนของสิ่งสกปรก และสารละลายประเภทอื่นๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อ การวิเคราะห์ ดังนั้น ในการผสมจีโอโพลิเมอร์ของ งานวิจัยนี้จึงใช้เป็นน้ำกลั่น

2. การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

ส่วนผสมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้ อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อทราย เท่ากับ 1:2.75 และ อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ใช้เท่ากับ 0.62 โดยควบคุมค่าการไหลแผ่ด้วยโต๊ะมาตรฐาน ทดสอบการไหล (Flow table) เท่ากับร้อยละ 105-115 การใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ใช้ เท่ากับ 0.62 เท่ากันในทุกส่วนผสม เนื่องจากต้องการ ควบคุมความสามารถทำงานได้ตามมาตรฐาน ASTM C 230-C 230M (ASTM , 2005b) เพื่อใช้ในการ เปรียบเทียบผลการทดสอบ และเมื่อดำเนินการ ทดลองส่วนผสมด้วยอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุ จีโอโพลิเมอร์ที่ค่าต่ำกว่า 0.62 และสูงกว่า 0.62 พบว่า ไม่สามารถควบคุมค่าการไหลแผ่ให้อยู่ในช่วง ร้อย ละ 105-115 ได้ ดังนั้นจึงใช้อัตราส่วนสารละลายต่อ วัสดุจีโอโพลิเมอร์ ใช้เท่ากับ 0.62 สำหรับการ ควบคุมค่าการไหลแผ่ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาใช้ค่าการ

ไหลแผ่ควบคุมความสามารถทำงานได้ (Chindaprasirt *et al.*, 2007) การศึกษานี้ใช้สารละลาย โซเดียม ไฮดรอกไซด์ ในปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ (10M) และ 15 โมลาร์ (15M) นอกจากนั้น ในการศึกษานี้ใช้อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.50, 1.00, 1.50 ตามลำดับ การใช้สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ (10M) และ 15 โมลาร์ (15M) และ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.50, 1.00, 1.50 นั้น เนื่องจาก พบว่า งานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt *et al.*, 2007) ได้ศึกษาการใช้เถ้าถ่าน หินเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ และใช้สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 10, 15 และ 20 โมลาร์ ด้วยอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.50 และ 3.00 โดยที่อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.00 กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น ตามปริมาณความเข้มข้น ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น ขณะที่เมื่อใช้ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.50 พบว่า กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ปริมาณความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ดังนั้น งานวิจัย จึงพัฒนาการทดสอบ ด้วยการใส่สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ (10M) และ 15 โมลาร์ (15M) และเพิ่มการ ใช้อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.50, 1.00, 1.50 เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการทดสอบ ต่อไป

3. วิธีการทดสอบ

3.1 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดใช้แบบหล่อขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร หลังจากหล่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ หุ้ม ด้วยพลาสติกกันความชื้น จากนั้นดำเนินการบ่ม ตัวอย่างในตู้อบ โดยทดสอบ 2 กรณี ดังนี้

1) กรณีที่ 1 หน่วงเวลาการทดสอบ

กรณีนี้ทดสอบโดย หลังจากหล่อตัวอย่างและหุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้นแล้ว ให้พักตัวอย่างไว้ในอุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนเข้าสู่อบ (Delay time) ต่อเนื่องอีก 1 วัน เนื่องจาก ต้องการให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีระยะเวลาในการชะละลายเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถาถ่านหินบดออกมาได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การหน่วงเวลามากกว่า 1 ชั่วโมง ไม่มีผลต่อกำลังอัด (Chindaprasirt *et al.*, 2007) ดังนั้น เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานในการบ่ม จึงเลือกใช้เวลาการหน่วงเท่ากับ 1 ชั่วโมง

2) กรณีที่ 2 นำตัวอย่างเข้าสู่อบทันที

กรณีนี้ทดสอบโดย หลังจากหล่อตัวอย่างและหุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้นแล้ว นำตัวอย่างเข้าสู่อบทันทีต่อเนื่องอีก 1 วัน จากนั้น เปรียบเทียบการบ่มในกรณีที่ 1

การทดสอบทั้ง 2 กรณี บ่มในตู้อบที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน เพื่อลดพลังงานในการบ่ม จากนั้นนำออกจากตู้อบและทำการทดสอบกำลังอัด ต่อไป

3.2 สัญลักษณ์ตัวอย่าง

ในส่วนของสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2 เช่น ความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เป็นต้น

ตารางที่ 2 สัญลักษณ์ตัวอย่างที่ใช้ศึกษา

ตัวอย่างมอร์ตาร์	สัญลักษณ์
10M-0.50Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.50
10M-1.0Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.00
10M-1.5Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.50
15M-0.5Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.50
15M-1.0Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.00
15M-1.5Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.50

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ความสามารถทำงานได้ ของมอร์ตาร์

การทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ พบว่า ในทุกส่วนผสมมีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 107-113 ในการศึกษาครั้งนี้ ส่วนผสม

มอร์ตาร์ไม่ต้องการน้ำเพิ่มเติม เนื่องจากเถาถ่านหินมีขนาดอนุภาคกลมตัน คล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt *et al.*, 2007; Rukzon and Chindaprasirt, 2018; Sathonsaopark *et al.*, 2009) โดยพบว่า อัตราส่วนของสารละลายต่อเถาถ่านหินมีค่าคงที่เท่ากับ 0.62 สำหรับส่วนผสมของจีโอโพลิ

เมอร์มอร์ตาร์ ทั้งนี้ เมื่อดำเนินการทดลองส่วนผสมด้วยอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุอีโพลิเมอร์ที่ต่ำกว่า 0.62 และสูงกว่า 0.62 พบว่า ไม่สามารถควบคุมค่าการไหลแผ่ให้อยู่ในช่วง ร้อยละ 105-115

ได้ ดังนั้นจึงใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุอีโพลิเมอร์ ใช้เท่ากับ 0.62 สำหรับการควบคุมค่าการไหลแผ่ ดังกล่าว การวัดค่าการไหลแผ่ แสดงไว้ในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การวัดค่าการไหลแผ่ของอีโพลิเมอร์เข้าถ่านหินบด

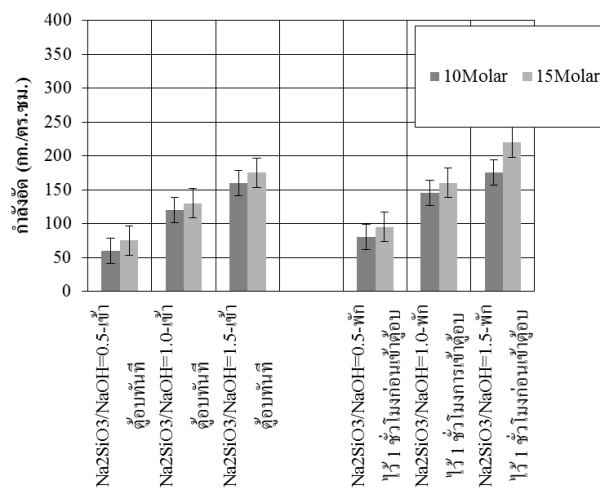
2. กำลังอัดของมอร์ตาร์

2.1 ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัด

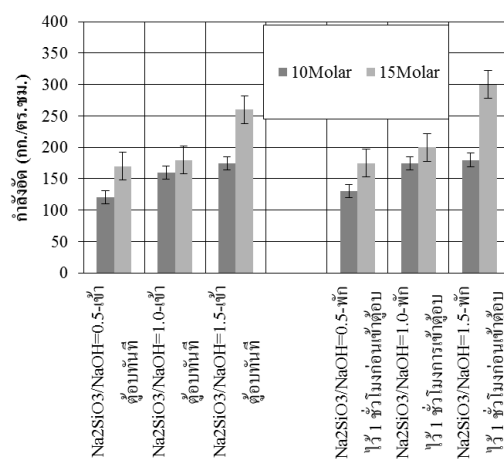
ในภาพที่ 3 (ก) (ข) และ (ค) แสดงผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดที่อุณหภูมิการบ่ม 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียสตามลำดับ

ผลการทดสอบครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างอีโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15M (15Molar) มีกำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างอีโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย

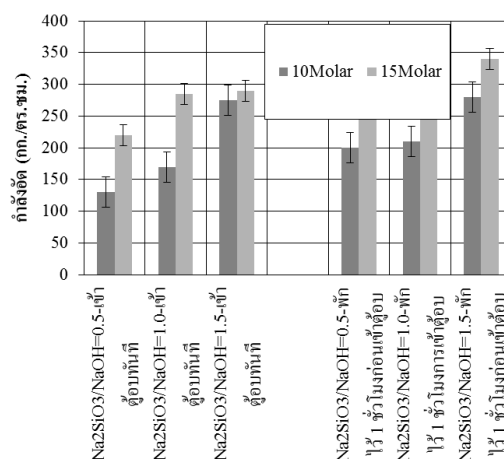
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10M (10Molar) เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงมีความสามารถในการชะละลายสารซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์จากถ่านหินบดได้มากขึ้น ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาอีโพลิเมอร์ไรเซชันได้ดีกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ (Chindapasirt *et al.*, 2007) ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindapasirt *et al.* (2019a), Chindapasirt *et al.* (2019b), Chindapasirt *et al.* (2007), Sathonsaopark *et al.* (2009) และ Davidovits and James (1999)



(ก) บ่มอุณหภูมิ 45 °C (องศาเซลเซียส)



(ข) บ่มอุณหภูมิ 55 °C (องศาเซลเซียส)



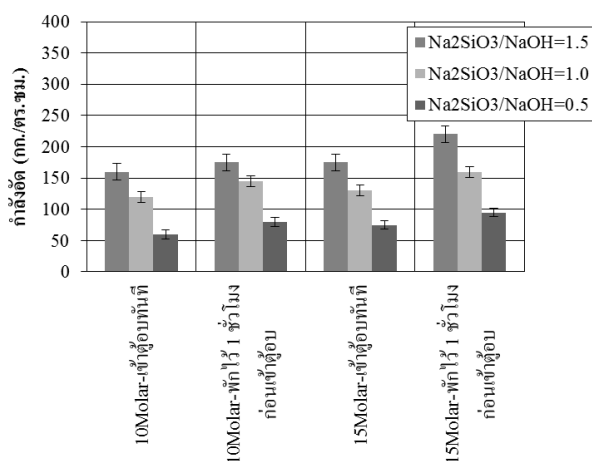
(ค) บ่มอุณหภูมิ 65 °C (องศาเซลเซียส)

ภาพที่ 3 ผลของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลัังอัดของมอร์ตาร์ ที่ 10 Molar (10M) และ 15 Molar (15M) บ่มที่อุณหภูมิ (ก) 45 °C, (ข) 55 °C และ (ค) 65 °C (องศาเซลเซียส)

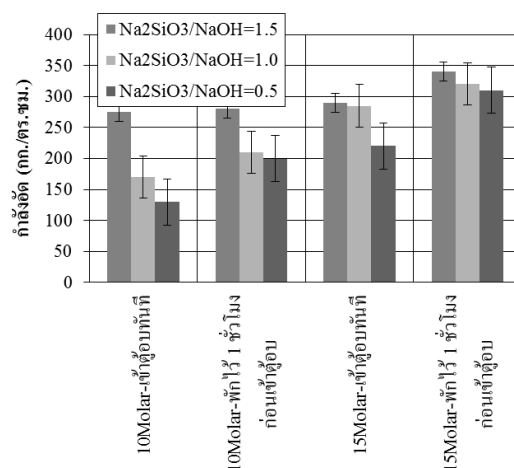
2.2 ผลของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อค่าลึงอัด

ในภาพที่ 4 (ก), (ข) และ (ค) แสดงผลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อค่าลึงอัดที่อุณหภูมิการบ่ม 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า ค่าลึงอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.50 มีค่าลึงอัดสูงกว่า 1.00 และ 0.50 เนื่องจากปริมาณ Na_2SiO_3 มีผลต่อค่าลึงอัด อัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ส่งผลให้ปริมาณ Na_2SiO_3 สูงขึ้น ทำให้ค่าลึงอัดของจีโอโพลิเมอร์สูงตามไปด้วย ผลการ

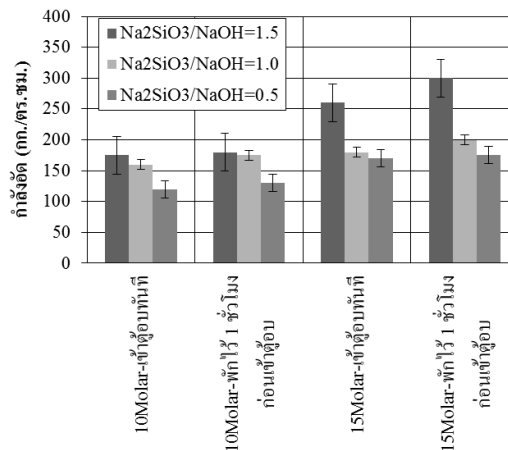
ทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt *et al.* (2019b), Chindaprasirt *et al.* (2007), Rukzon and Chindaprasirt (2018), Sathonsaopark *et al.* (2009) และ Davidovits and James (1999) ในส่วนของซิลิกาและอลูมินา ที่มีอยู่ในเต้าถ่านหินบด พบว่า เมื่อปริมาณสัดส่วนสารละลายโซเดียม ซิลิเกตที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้โครงสร้างของซิลิเกตที่ได้จากการชะละลายซิลิกาและอลูมินาด้วยสารละลาย NaOH มีการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่าลึงอัดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เพิ่มขึ้น



(ก) บ่มอุณหภูมิ 45 °C (องศาเซลเซียส)



(ข) บ่มอุณหภูมิ 55 °C (องศาเซลเซียส)



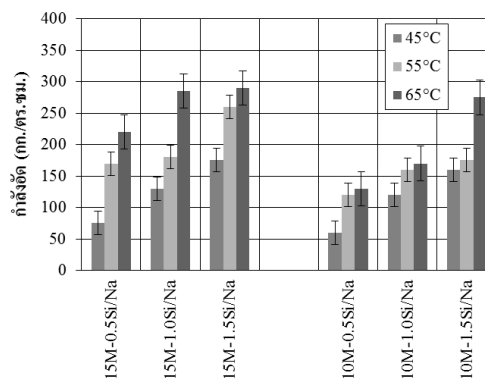
(ค) บ่มอุณหภูมิ 65 °C (องศาเซลเซียส)

ภาพที่ 4 ผลของอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่อุณหภูมิการบ่ม (ก) 45 °C, (ข) 55 °C และ (ค) 65 °C (องศาเซลเซียส) ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์

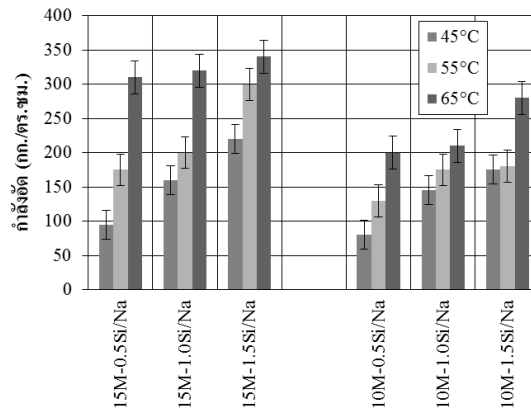
2.3 ผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัด

ภาพที่ 5 แสดงผลของอุณหภูมิการบ่มที่ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส โดยภาพที่ 5 (ก) คือการนำตัวอย่างเข้าตูบทันที และ 5 (ข) คือพักตัวอย่างทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนเข้าตูบ (Delay time) ผลการทดสอบพบว่า จีโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีการบ่มในตูบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เนื่องจาก หากอุณหภูมิต่ำส่งผลให้ตัวอย่างมีความชื้นที่อยู่ภายในมอร์ต้าร์มีค่าสูง เมื่อทำการทดสอบพบว่าเกิดการวิบัติแบบไม่สมบูรณ์ กล่าวคือเกิดการวิบัติที่ผิวภายนอกโดยที่แกนกลางยังมี

ความชื้นอยู่ซึ่งทำให้ได้กำลังต่ำสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt *et al.* (2007), Guo *et al.* (2010), Rukzon and Chindaprasirt (2014), Sathonsaopark *et al.* (2009) และ Davidovits and James (1999) งานวิจัยนี้พบว่า ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้จีโพลิเมอร์มอร์ต้าร์สามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของ Chindaprasirt *et al.* (2007) ได้ศึกษาจีโพลิเมอร์เถ่าถ่านหิน พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิการบ่มที่ 90 องศาเซลเซียส ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง



(ก) ตัวอย่างเข้าตูบทันที



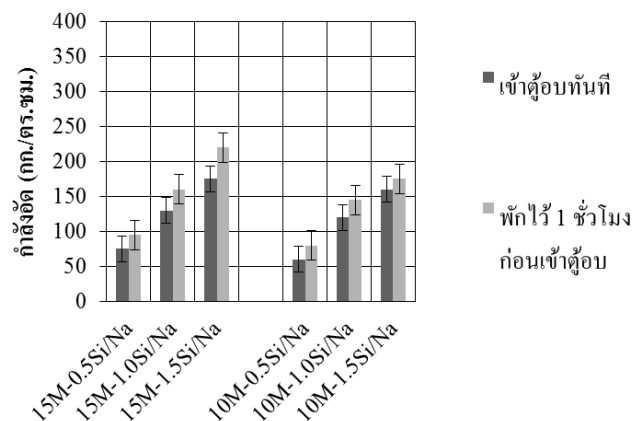
(ข) ตัวอย่างพักไว้ 1 ชั่วโมงก่อนเข้าสู่อบ

ภาพที่ 5 ผลของอุณหภูมิในการบ่ม (ก) ตัวอย่างเข้าสู่อบทันที และ (ข) ตัวอย่างพักไว้ 1 ชั่วโมงก่อนเข้าสู่อบ (Delay time) ต่อค่าลึงอัด

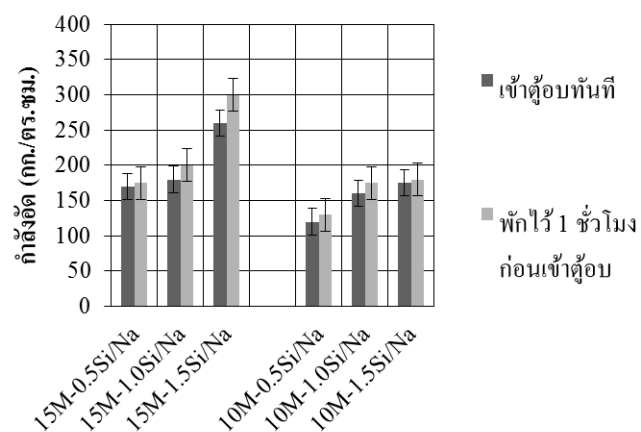
2.4 การหวั่นระยะเวลาในการเข้าสู่อบของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (Delay time)

ภาพที่ 6 (ก) (ข) และ (ค) แสดงผลการทดสอบระยะเวลาในการเข้าสู่อบของจีโอโพลิเมอร์บ่มที่อุณหภูมิเท่ากับ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งผลทดสอบพบว่า จีโอโพลิเมอร์จากเถาถ่านหินที่มีการพักไว้ 1 ชั่วโมงก่อนเข้าสู่อบ มีค่าค่าลึงอัดสูงกว่าการนำตัวอย่างเข้าสู่อบทันทีที่ผสมเสร็จ เนื่องจากการทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องทำให้ จะทำให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีระยะเวลาในการชะละลายเอา

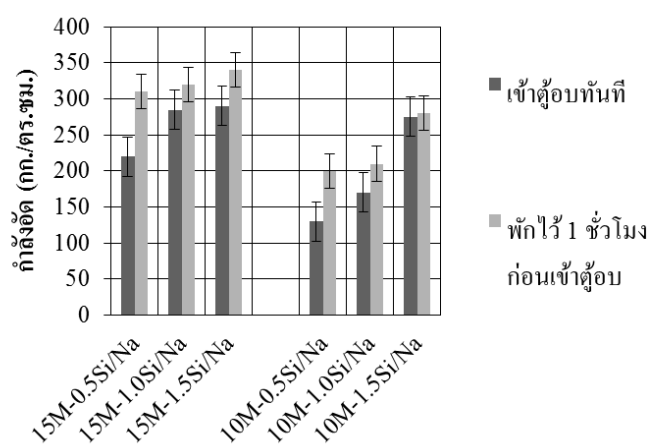
ซิลิกาและอลูมินาจากเถาถ่านหินบดออกมาได้ดีกว่าตัวอย่างที่บ่มโดยเข้าสู่อบทันที และเกิดการแข็งตัวทำให้มีการพัฒนาค่าลึงอัดได้ดีกว่าการอบด้วยความร้อนทันทีที่ผสมเสร็จ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chindaprasirt *et al.* (2007), Guo *et al.* (2010), Rukzon and Chindaprasirt (2014), Sathonsaopark *et al.* (2009) และ Davidovits and James (1999) ภาพที่ 7 แสดงตัวอย่างของมอร์ตาร์จีโอโพลิเมอร์ที่แข็งตัวแล้ว และผ่านการทดสอบค่าลึงอัด



(ก) บ่มอุณหภูมิ 45 °C (องศาเซลเซียส)



(ข) บ่มอุณหภูมิ 55 °C (องศาเซลเซียส)



(ค) บ่มอุณหภูมิ 65 °C (องศาเซลเซียส)

ภาพที่ 6 ผลการหน่วงเวลาการบ่มที่อุณหภูมิ (ก) 45 °C, (ข) 55 °C และ (ค) 65 °C (องศาเซลเซียส)
ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์



ภาพที่ 7 ตัวอย่างของมอร์ตาร์จีโอโพลิเมอร์ที่แข็งตัวแล้วและผ่านการทดสอบกำลังอัด

สรุป

ผลทดสอบที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์สำหรับใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ดี กล่าวคือ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินบด สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตได้ เนื่องจากพบว่ามอร์ตาร์ที่ค่ากำลังอัดที่สูง โดยปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัด คือ อิทธิพลในการบ่ม ซึ่งประกอบไปด้วยการบ่มที่อุณหภูมิและสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันจะให้ค่ากำลังอัดที่แตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ ส่วนผสมและกำลังอัดของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจาก สารละลายต่างต่อการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ไรซ์เซชันมีความต้องการซิลิกาและอลูมินาที่มีอยู่ในเถ้าถ่านหินบด เมื่อปริมาณสัดส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้โครงสร้างของซิลิเกตที่ได้จากการชะละลายซิลิกาและอลูมินาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีการแข็งตัวอย่างรวดเร็วและระยะเวลาในการก่อตัวเร็วขึ้นด้วย ดังนั้น ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะมีประโยชน์มากในด้านการใช้งานจริงโดยเฉพาะใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมที่มีความต้องการใช้งานอย่างเร่งด่วนและมีค่าการรับกำลังอัดได้ดี

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินงานวิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการวิจัย และ ศูนย์วิจัยโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- ASTM. 2005a. ASTM C136. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM. 2005b. ASTM C 230-C 230M. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivatnanon, V. 2007. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer mortar. **Cement and Concrete Composites** 29: 224-229.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S. and Sirivivatnanon, V. 2008. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. **Construction and Building Materials** 22(5): 932-938.
- Chindaprasirt, P. and Rukzon, S. 2015. Strength and chloride penetration of Portland cement mortar containing rice husk ash and ground river sand. **Materials and Structures** 48(11): 3771-3777.
- Chindaprasirt, P., Sujumongtokulb, P. and Posi, P. 2019a. Durability and mechanical properties of pavement concrete containing bagasse ash. **Materials Today: Proceedings** 17: 1612-1626.

- Chindaprasirt, P., Kasemsiri, P., Poomsrisa, P. and Posi, P. 2019b. Fluidized bed coalbark fly ash geopolymer with additives cured at ambient temperature. **International Journal of GEOMATE** 16(54): 29-35.
- Davidovits, J. 1999. Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology, pp. 9-39. *In* **Proceedings of the 2nd International Conference**. Geopolymer Institute, Saint-Quentin.
- Guo, X., Shi, H. and Dick, WA. 2010. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. **Cement and Concrete Composites** 32: 142-147.
- Posi, P., Kasemsiri, P., Lertnimoolchai, S. and Chindaprasirt, P. 2019. Effect of fly ash fineness on compressive, flexural and shear strengths of high strength-high volume fly ash jointing mortar. **International Journal of GEOMATE** 16(54): 36-41.
- Rovnanik, P. 2010. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials** 24: 1176-1183.
- Rukzon, S. and Chindaprasirt, P. 2011. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. **Materials and Design** 34: 45-50.
- Rukzon, S. and Chindaprasirt, P. 2018. Strength, chloride penetration and corrosion resistance of ternary blends of Portland cement self-compacting concrete containing bagasse ash and rice husk-bark ash. **Chiang Mai Journal Science** 45(4): 1863-1874.
- Rukzon, S. and Chindaprasirt, P. 2014. Strength and porosity of bagasse ash-based geopolymer mortar. **Journal of Applied Sciences** 14(6): 586-591.
- Sathonsaopark, A., Chindaprasirt, P. and Pimraksa, K. 2009. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. **Journal of Hazardous Materials** 168: 45-50.
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S., Shen, SL, Chindaprasirt, P. and Suksiripattanaponga, C. 2013. Factors influencing strength development in clay-fly ash geopolymer. **Construction and Building Materials** 47(1): 1125-1136.

ระบบตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ราคาประหยัดด้วยเทคนิคการประมาณค่า จากเซนเซอร์วัดความสว่าง

Low-cost Solar Insolation Measurement System using Estimation Technique from the Brightness Sensor

นภณัฐ รัตนกร * และ ชลธิ์ โพธิ์ทอง

Noppanat Ratanakorn * and Chonlatee Photong

Received: 30 November 2019, Revised: 9 March 2020, Accepted: 12 March 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและออกแบบระบบการวัดรังสีอาทิตย์ราคาประหยัดที่มีสมรรถนะการวัดไม่ด้อยกว่าระบบการวัดมาตรฐานเดิม ระบบประกอบด้วยเซนเซอร์วัดความสว่างด้วยค่ารังสีอัลตราไวโอเลต แสงขาว และ รังสีอินฟราเรด ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวัดนี้จะถูกบันทึกลงในแหล่งเก็บข้อมูลผ่านบอร์ดอาร์ดูโน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์โดยทำการเทียบค่ากับค่าการวัดความเข้มแสงจากเครื่องมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า ความเข้มแสงอาทิตย์ มีค่าแปรผันตามค่าความสว่างของแสงขาวมากที่สุด ที่ระดับค่าสมการถดถอย 0.98 รองลงมาเป็นรังสีอัลตราไวโอเลต และอินฟราเรด ที่ระดับ 0.97 และ 0.94 ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยจึงได้เลือกใช้ข้อมูลความสว่างของแสงขาว ในการสร้างสมการความสัมพันธ์เพื่อหาค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ซึ่งได้ค่าความสัมพันธ์ $Isolar = 246 X_{vis} + 126$ นอกจากนี้ การวิจัยยังมีการศึกษา ผลกระทบของจำนวนข้อมูลต่อค่าความถูกต้องของการวัดที่ระดับค่าต่าง ๆ ในช่วงระยะเวลาไม่เกิน 60 วินาที พบว่า ค่าความถูกต้องมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อจำนวนข้อมูลลดลงด้วยอัตราความผิดพลาดที่น้อยกว่าร้อยละ 1 ในขณะที่มีต้นทุนระบบเพียง 1,345 บาท (45 ดอลลาร์) ซึ่งลดลงประมาณ 10-15 เท่า เมื่อเทียบกับเครื่องวัดแบบเดิม

คำสำคัญ: อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มรังสีอาทิตย์, ราคาประหยัด, การประมาณค่า

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kham Rieng District, Kantarawichai, Maha Sarakham, 44150, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): noppanat.rmuti@gmail.com

ABSTRACT

This research presents study and design of low cost, high performance solar insolation measurement. The proposed measurement system consists of a brightness sensor that can measure brightness of UV, visible and infrared lights. Brightness values are then recorded into the data collection resources through the Arduino board, and these parameters are compared with the standard values. The experimental results show that visible light provided the best representative data for the standard solar insolation values with R^2 of 0.98, followed by UV and infrared with R^2 of 0.97 and 0.94, respectively. As a result, visible light was used to form the equation for determining the solar insolation, which was $I_{solar}=246X_{vis}+ 126$. The results also showed that the accuracy slightly decreased when the number of data samples decreased with the error rate less than 1%. with relatively low cost of 1,345 Baht (45 \$US), which is 10-15 times lower compared to the standard measurement system.

Key words: solar insolation detector, low cost, estimation

บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศของโลกส่งผลกระทบต่อดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตรวมทั้งมนุษย์บนโลกเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นการทราบข้อมูลเกี่ยวกับสภาพอากาศรวมทั้งปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศบนผิวโลกย่อมทำให้สามารถบริหารจัดการและคาดคะเนส่วนที่เกี่ยวข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นเทคโนโลยีด้านการวัดสภาพอากาศและการจัดเก็บข้อมูลสภาพอากาศ (Hong *et al.*, 2015) จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เทคโนโลยีการวัดและการจัดเก็บข้อมูลสภาพอากาศในปัจจุบันมีหลายวิธีการ ได้แก่ การวัดสภาพอากาศระยะไกลโดยดาวเทียม (GIS) (Suryabhagavan, 2017) และการวัดสภาพอากาศจากภาคพื้นดินโดยใช้เซนเซอร์ต่างๆ เช่น การวัดปริมาณน้ำฝน (Sa-Ngiambivool *et al.*, 2013) การวัดปริมาณความเข้มของแสงแดดหรือรังสีดวงอาทิตย์ (Luewarasirikul *et al.*, 2012) การวัดความเร็วลม ทิศทางลม และการวัดความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น (Rukkhom *et al.*, 2017)

ปัจจุบันมีสถานีวิจัยวัดรังสีอาทิตย์อยู่เพียง 21 แห่งที่ดำเนินการบริหารจัดการ จัดเก็บข้อมูลและเผยแพร่ข้อมูล เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านงบประมาณ ทั้งในส่วนการติดตั้งและดำเนินงานสถานี ทำให้การวัดและเก็บค่าสภาพรังสีอาทิตย์ในส่วนภูมิภาคหรือการศึกษาเฉพาะนั้นทำได้เพียงเป็นข้อมูลประมาณการ หรือบางสถานที่ สถานีวัดอาจไม่สามารถให้บริการข้อมูลได้ ดังนั้นหากสามารถพัฒนาสถานีวัดและจัดเก็บข้อมูลพลังงานรังสีอาทิตย์ที่มีต้นทุนต่ำ มีข้อมูลที่ต้องการ และสามารถเข้าถึงและสืบค้นข้อมูลได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว และแม่นยำ ก็จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งเพื่อนำไปใช้งานในส่วนที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะด้านการเกษตรกรรม หรืออุตสาหกรรมที่อาจต้องอาศัยข้อมูลในการกำหนดนโยบายและการวิจัยต่างๆ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามเล็งเห็นความสำคัญของสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จึงได้จัดทำโครงการวิจัยและจัดตั้งสถานีวัดสภาพอากาศขึ้นเพื่อรายงานสภาพอากาศเฉพาะที่สำหรับบริเวณโดยรอบมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

อย่างไรก็ตาม สถานีวัดรังสีอาทิตย์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามในปัจจุบันประสบปัญหาเรื่องข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องเนื่องจากอุปกรณ์มีสภาพชำรุด อุปกรณ์มีราคาสูง (ประมาณ 15 ล้านบาท) อีกทั้งจำเป็นต้องมีห้องควบคุมพิเศษซึ่งมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม ทำให้มีต้นทุนการดำเนินการสูง (Pattanasetthanon, 2005)

จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยเล็งเห็นการนำเอาเทคโนโลยีการตรวจวัดรังสีอาทิตย์ที่มีราคาไม่แพงและสามารถใช้งานได้ง่าย ทั้งนี้เพื่อสะดวกกับการใช้งานและประเมินสถานการณ์สภาพการเปลี่ยนแปลงรังสีอาทิตย์ในพื้นที่ที่สนใจ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้สามารถใช้พลังงานจากรังสีอาทิตย์สำหรับอุปกรณ์ต่างๆ ได้โดยตรงได้อีกด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

โดยทั่วไปการวัดค่ารังสีอาทิตย์จะใช้ Pyranometer CMP11 (ภาพที่ 1) ซึ่ง Pyranometer CMP11 นั้นเมื่อได้รับรังสีอาทิตย์จะทำการเปลี่ยนพลังงานรังสีอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าตั้งแต่ 0 - 20 mV ส่งผ่านสาย connector ไปให้ Data logger ซึ่ง

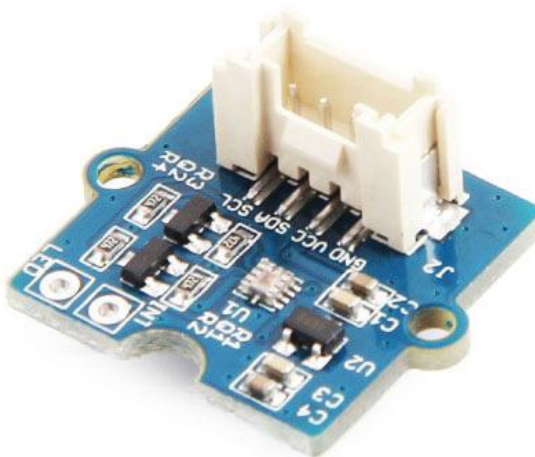
Data logger จะทำการแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ส่งมาให้เป็นค่ารังสีอาทิตย์มีหน่วยเป็น W/m^2 แต่ด้วยราคาที่สูงมาก ผู้วิจัยจึงทำการหาอุปกรณ์วัดแสงชนิดอื่นมาแทน Pyranometer CMP11 โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ Grove - Sunlight Sensor Si1145 (ภาพที่ 2) มาทดลองเพื่อหาตัวแทนที่ดีที่สุด Grove - Sunlight Sensor Si1145 เป็นเซ็นเซอร์รุ่นใหม่ที่สามารถตรวจวัดค่ารังสีอาทิตย์ได้ 3 แบบ ได้แก่ Visible Light, UV Light และ Infrared Light โดยชุดต้นแบบตามภาพที่ 3 นี้ผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรมให้เชื่อมต่อกับบอร์ด Arduino UNO มาช่วยในการรับค่าจากเซ็นเซอร์ (Shabani *et al.*, 2017)

การบันทึกค่าแสง จะบันทึกผลการทดลองโดยใช้ SD Card ขนาด 16 GB ในการบันทึกค่าแสงทุกๆ 1 วินาที โดยค่าแสงจะถูกบันทึกลงในไฟล์ Datalog.txt ตามที่ได้ตั้งค่าของการเขียน Code ใน Arduino และนำค่าที่บันทึกได้ไปแสดงในรูปแบบกราฟในโปรแกรม Microsoft Excel

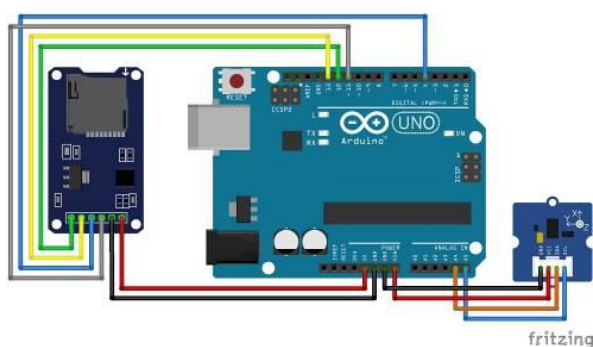
ในการทดลองนี้ผู้วิจัยวางอุปกรณ์วัดไว้อย่างกันตามภาพที่ 4 เพื่อจะสามารถเก็บค่าในบริเวณเดียวกันมากที่สุด



ภาพที่ 1 Pyranometer CMP11 ที่ต่อกับ Data logger



ภาพที่ 2 Grove - Sunlight Sensor Si1145



ภาพที่ 3 การต่อ Grove - Sunlight Sensor Si1145 เข้ากับชุดบอร์ด Arduino



ภาพที่ 4 การวางอุปกรณ์วัดแสง

เมื่อได้ผลจากการบันทึกข้อมูลแล้ว ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลอง 2 แบบด้วยกัน คือ

1. ผู้วิจัยใช้ การวิเคราะห์ถดถอย(Regression Analysis) เพื่อหาตัวแทนของ Pyranometer CMP11

ที่ใช้วัดค่ารังสีอาทิตย์ ระหว่าง Visible light, UV light และ Infrared light

สมการการถดถอยของตัวอย่างเขียนในรูปของค่าสถิติ ได้คือ

$$y = a + bx \quad (1)$$

เมื่อ y = ตัวแปรตาม
 x = ตัวแปรอิสระ
 a = ค่าคงที่
 b = ค่าสัมประสิทธิ์ของ x

โดย
$$b = \frac{n\sum xy - (\sum x \sum y)}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2)$$

เมื่อ n = จำนวนกลุ่มตัวอย่าง

และ
$$a = y' - bx' \quad (3)$$

เมื่อ y' = ค่าเฉลี่ยของ y
 x' = ค่าเฉลี่ยของ x

2. เมื่อได้ตัวแทนที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1
 นำมาหาค่าความถูกต้องแม่นยำ แม้หากลดการบันทึก
 ของข้อมูลลงไป เพื่อหาความเหมาะสมในการบันทึก
 ข้อมูล

โดยการคำนวณค่าความถูกต้อง/ความแม่นยำใช้
 สมการ

$$\%Accuracy = 100 - \%Error \quad (4)$$

โดยที่
$$Relative\ error = \left| \frac{x_{mea} - x_t}{x_t} \right| \quad (5)$$

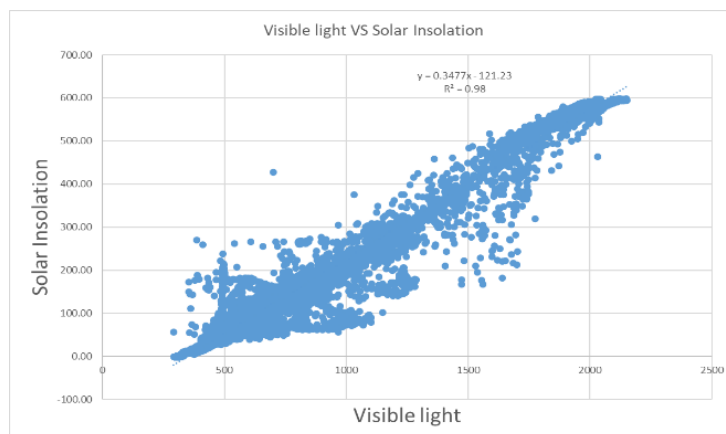
$$\%Error = Relative\ error \times 100$$

เมื่อ X_{mea} คือ ค่าที่ได้จากการลดการเก็บบันทึก
 X_t คือ ค่าจริงจากการทดลองที่ 1 (visible)

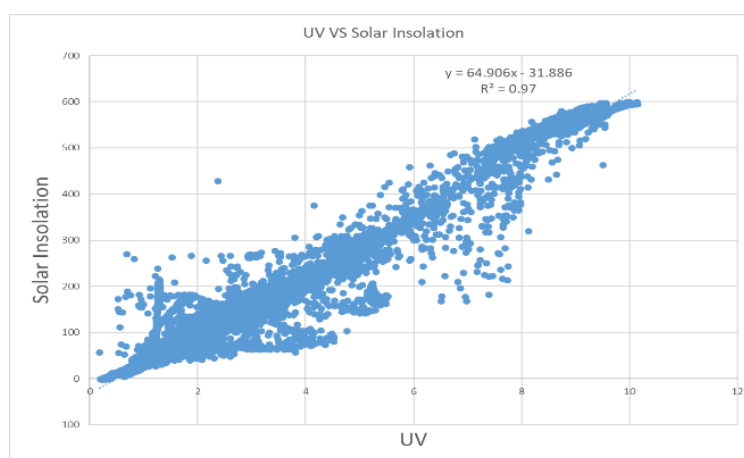
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การทดลองที่ 1 ใช้การวิเคราะห์ถดถอยหาตัวแทน
 รังสีอาทิตย์ (Hongpathong and Numthum, 2016;
 Akarachantachote and Saithanu, 2017)

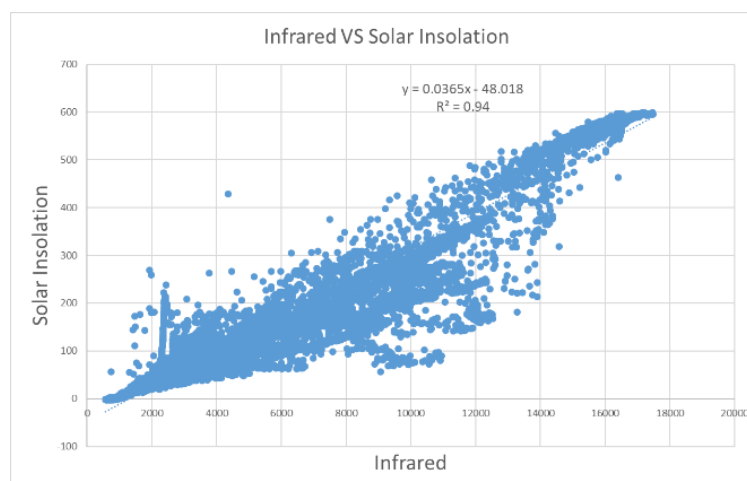
ผลจากการเก็บข้อมูลทั้งหมด 21,644 ชุด
 ผู้วิจัยได้ทำการจับคู่เพื่อหาความสัมพันธ์กันของ
 ข้อมูล ได้ดังแสดงในภาพที่ 5 - 7



ภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Visible Light กับ Solar Insolation



ภาพที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง UV กับ Solar Insolation



ภาพที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Infrared กับ Solar Insolation

จากกราฟทั้ง 3 ในภาพที่ 5-7 จะเห็นความสัมพันธ์ของกราฟเป็นความสัมพันธ์เชิงบวก (Janjai, 2014) ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำสมการถดถอยมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแสงทั้งสองประเภท พบว่า

Visible light กับ Solar Insolation

$$y = 2.8164x + 364.17$$

$$R \text{ Square} = 0.98$$

UV Light กับ Solar Insolation

$$y = 0.0151x + 0.5746$$

$$R \text{ Square} = 0.97$$

Infrared light กับ Solar Insolation

$$y = 25.775x + 1743.6$$

$$R \text{ Square} = 0.94$$

ทั้งนี้ ผู้วิจัยยังหา Correlation ความสัมพันธ์ของ Solar Insolation ต่อ Visible light, Infrared และ UV โดยใช้ฟังก์ชันในโปรแกรม Excel ได้ดังตารางที่ 1

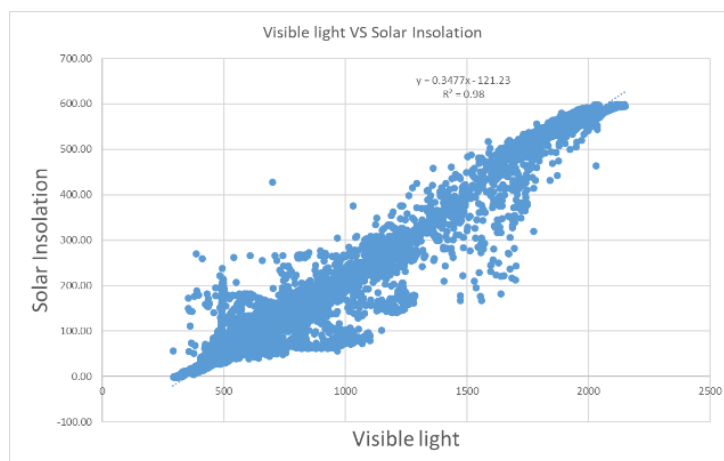
ตารางที่ 1 Correlation ความสัมพันธ์ของ Solar Insolation ต่อ Visible light, Infrared และ UV

	Solar Insolation	Visible light	Infrared	UV
Solar Insolation	1			
Visible light	0.9896530	1		
Infrared	0.9698282	0.9883934	1	
UV	0.9896515	0.9999989	0.9883928	1

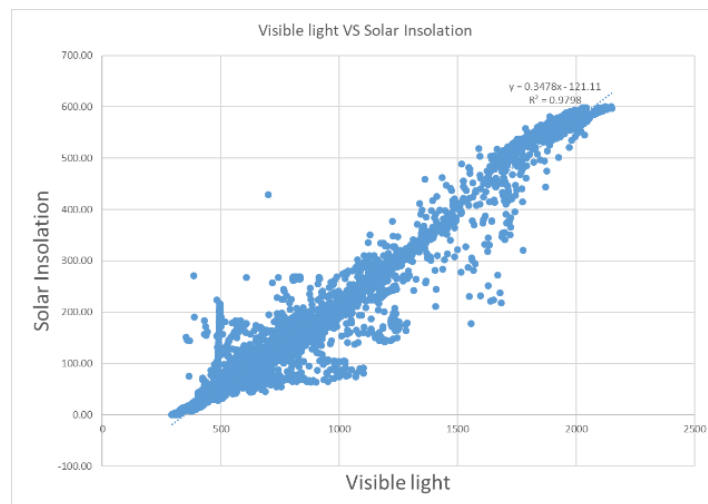
การทดลองที่ 2 หาความเหมาะสมในการบันทึกข้อมูลโดยใช้การหาค่าความถูกต้องแม่นยำ

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองที่ 2 โดยเลือก จากกราฟของ Visible Light กับ Solar Insolation มาทดสอบ โดยทำการตัดค่าที่

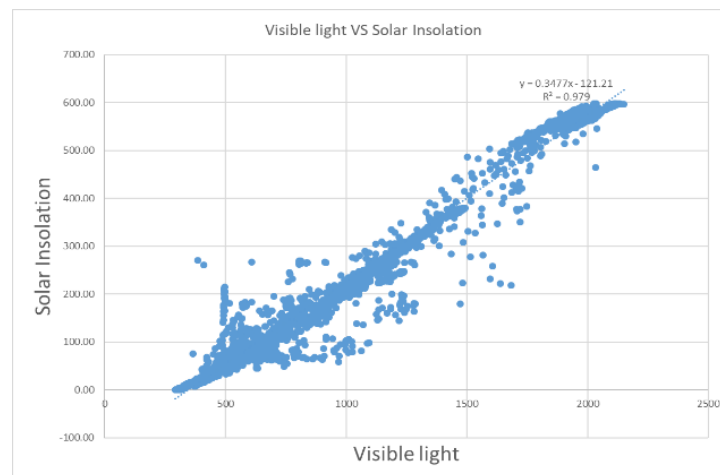
บันทึกออกให้เป็นบันทึกทั้งหมด 6 แบบ ได้แก่ 1 วินาที, 2 วินาที, 5 วินาที, 10 วินาที, 30 วินาที และ 60 วินาที ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 8, 9, 10, 11, 12 และ 13 ตามลำดับ



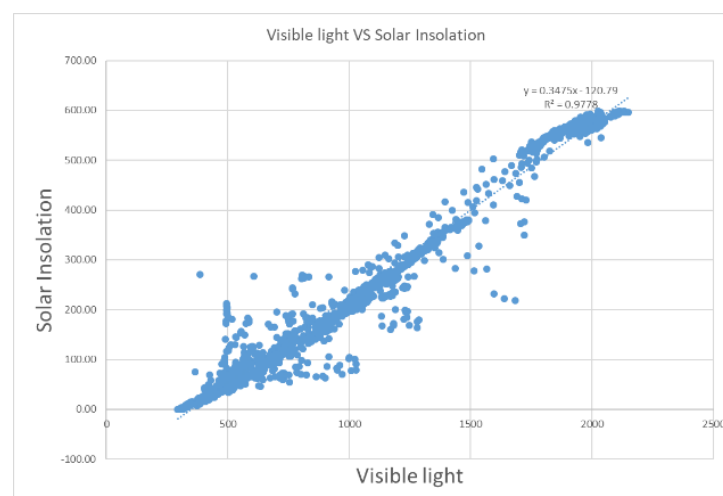
ภาพที่ 8 กราฟแบบ เก็บทุก 1 วินาที



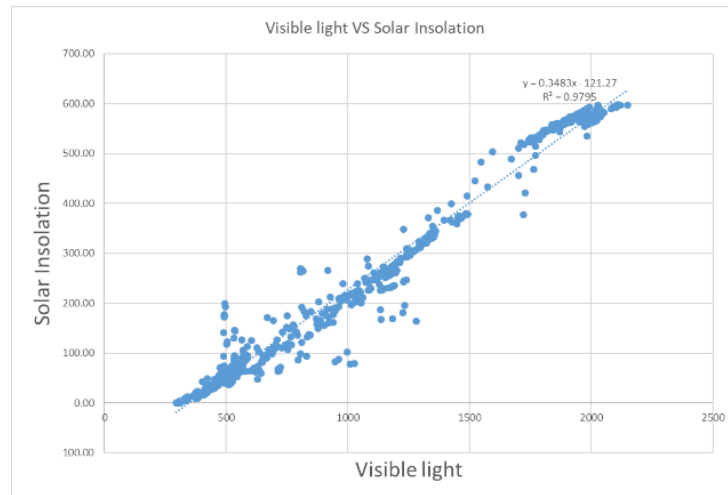
ภาพที่ 9 กราฟแบบเก็บทุก 2 วินาที



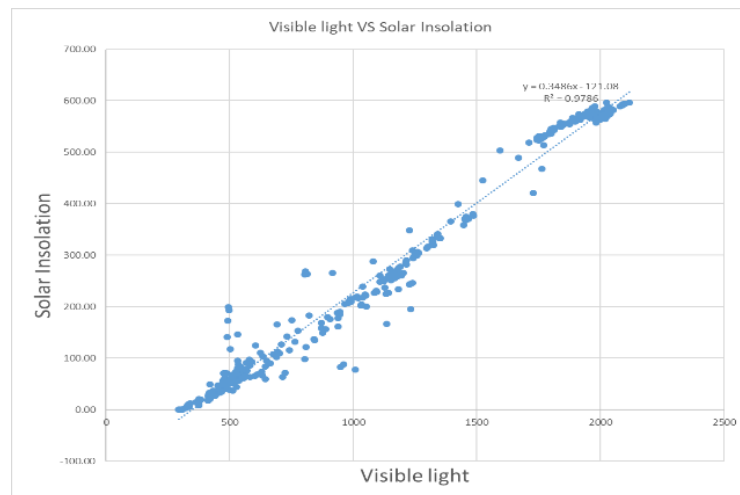
ภาพที่ 10 กราฟแบบเก็บทุก 5 วินาที



ภาพที่ 11 กราฟแบบเก็บทุก 10 วินาที



ภาพที่ 12 กราฟแบบเก็บทุก 30 วินาที



ภาพที่ 13 กราฟแบบเก็บทุก 60 วินาที

จากภาพที่ 8 - 13 จะเห็นได้ว่า แม้จะลดการบันทึกข้อมูลลงไปที่แค่แนวโน้มของกราฟก็ยังคงเป็นเชิงบวก ดังนั้น จึงนำค่า R square มาหาค่าความถูกต้องแม่นยำ ได้ดังนี้
จากข้อมูลที่เก็บทุก 1 วินาที (ค่าแท้จริง)

$$y = 0.3477x - 121.23$$

$$R \text{ Square} = 0.98$$

ข้อมูลที่เก็บทุก 2 วินาที

$$y = 0.3478x - 121.11$$

$$R \text{ Square} = 0.9798$$

หาค่าความแม่นยำได้

$$\text{Relative error} = \left| \frac{0.9798 - 0.98}{0.98} \right|$$

$$= 0.0002$$

$$\% \text{error} = 0.0002 \times 100$$

$$= 0.02\%$$

$$\% \text{Accuracy} = 100 - 0.02$$

$$= 99.98\%$$

ข้อมูลที่เก็บทุก 5 วินาที

$$y = 0.3477x - 121.11$$

$$R \text{ Square} = 0.979$$

หาค่าความแม่นยำได้

$$\text{Relative error} = \left| \frac{0.979-0.98}{0.98} \right|$$

$$= 0.001$$

$$\% \text{error} = 0.001 \times 100$$

$$= 0.1\%$$

$$\% \text{Accuracy} = 100 - 0.1$$

$$= 99.9\%$$

ข้อมูลที่เก็บทุก 60 วินาที

$$y = 0.3486x - 121.08$$

$$R \text{ Square} = 0.9786$$

หาค่าความแม่นยำได้

$$\text{Relative error} = \left| \frac{0.9786-0.98}{0.98} \right|$$

$$= 0.0014$$

$$\% \text{error} = 0.0014 \times 100$$

$$= 0.14\%$$

$$\% \text{Accuracy} = 100 - 0.14$$

$$= 99.86\%$$

ข้อมูลที่เก็บทุก 10 วินาที

$$y = 0.3475x - 120.79$$

$$R \text{ Square} = 0.9778$$

หาค่าความแม่นยำได้

$$\text{Relative error} = \left| \frac{0.9778-0.98}{0.98} \right|$$

$$= 0.002$$

$$\% \text{error} = 0.002 \times 100$$

$$= 0.2\%$$

$$\% \text{Accuracy} = 100 - 0.2$$

$$= 99.8\%$$

ข้อมูลที่เก็บทุก 30 วินาที

$$y = 0.3483x - 121.27$$

$$R \text{ Square} = 0.9795$$

หาค่าความแม่นยำได้

$$\text{Relative error} = \left| \frac{0.9795-0.98}{0.98} \right|$$

$$= 0.0005$$

$$\% \text{error} = 0.0005 \times 100$$

$$= 0.05\%$$

$$\% \text{Accuracy} = 100 - 0.05$$

$$= 99.95\%$$

สรุป

การวิจัยนี้สรุปขั้นตอนการดำเนินการได้ดังนี้

1. ระบบตรวจวัดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ด้วยการประมาณค่า ประกอบด้วยเซ็นเซอร์วัดค่า UV, Visible light และ Infrared ซึ่งข้อมูลวัดนี้จะถูกบันทึกลงในแหล่งเก็บข้อมูลผ่านบอร์ด Arduino

2. ข้อมูลตัวแปร UV, Visible light และ Infrared ได้ถูกศึกษาความสัมพันธ์โดยทำการเทียบค่ากับค่าการวัดความเข้มแสงจากเครื่องมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า ความเข้มแสงอาทิตย์ มีค่าแปรผันตามค่า Visible light มากที่สุด ที่ระดับ R square 0.98 รองลงมาเป็น UV และ Infrared ที่ระดับ 0.9794 และ 0.9406 ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยจึงได้เลือกใช้ข้อมูล Visible light ในการสร้างสมการความสัมพันธ์กับความเข้มแสงอาทิตย์ ได้ค่าความสัมพันธ์ $\text{Isolar} = 246X_{\text{vis}} + 126$

3. ผลการศึกษาผลกระทบของจำนวนข้อมูลต่อค่าความถูกต้องของการวัดที่ระดับค่าต่างๆ พบว่าจำนวนข้อมูลที่ลดลงในช่วงไม่เกิน 60 วินาที ด้วยอัตราความถูกต้องที่ลดลงไม่ถึง 1%

4. ระบบที่นำเสนอสามารถทำงานได้ไม่ด้อยกว่าระบบเดิมที่ระดับความถูกต้องข้อมูล 98% โดย

ต้นทุนการจัดสร้างสุทธิ 1,345 บาท (45 \$US) ซึ่งลดลงประมาณ 10-15 เท่า เมื่อเทียบกับเครื่องวัดแบบเดิม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร และสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำหรับอุปกรณ์ เครื่องมือและการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- Akarachantachote, N. and Saithanu, K. 2017. Using partial least square regression in the case of violations of regression model assumptions. **Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal** 3(1): 69-75. (in Thai)
- Hongpathong, J. and Numthuam, S. 2016. Method Development for Determination of Total Bacterial Amount in Raw Milk Using Near Infrared Spectroscopy, pp. 96-103. *In Thaksin University Conference* 26. Thaksin University, Songkhla. (in Thai)
- Hong, T., Wang, P. and White, L. 2015. Weather station selection for electric load forecasting. **International Journal of Forecasting** 31(2): 286-295.
- Janjai, S. 2014. **Solar Radiation**. 1st ed. Solar Energy Research Unit Department of Physics, Faculty of Science Silpakorn University, Nakhon Pathom. (in Thai)
- Luewarasirikul, N., Sansomboon, A. and Ittipongse, A. 2012. **Research Report no Study of The Intensity of Global Solar Radiation Incident in Suan Sunandha Rajabhat University**. Suan Sunandha Rajabhat University. (in Thai)
- Pattanasethanon, S. 2005. **Research Report no Conservation of electrical energy in buildings With natural light energy**. Mahasarakham University. (in Thai)
- Rukkhom, K., Khamruean, K. and Patcharaprakiti, N. 2017. A Weather Condition Data Logging and Monitoring System Via Wireless Zigbee. **Journal of Innovative Technology Research** 1(1): 55-70. (in Thai)
- Sa-Ngiamvibool, W., Angkawisittpan, N., Nuan-on, A., Photong, C. and Kangrang, A. 2013. A Rain Gauge System using a Capacitance Sensor. **International Journal of Engineering and Technology** 5: 3596-3600.
- Shabani, H., Ahmed, M.M. and Rose, A.H. 2017. Intelligent Greenhouse Monitoring and Control System Based Arduino UNO Microcontroller. **Journal of Telecommunication Electronic and Computer Engineering** 9: 3-10.
- Suryabagavan, K.V. 2017. GIS-based climate variability and drought characterization in Ethiopia over three decades. **Weather Clim. Extrem** 15(15): 11-23.

การไพร้มเมล็ดด้วย *Bacillus subtilis* ต่อความงอกและการเจริญเติบโต ของต้นกล้าผักกาดหอม

Seed Priming with *Bacillus subtilis* on Germination and Seedlings Growth of Lettuce (*Lactuca sativa*)

จักรพงษ์ กางโสภา*, เพชรรัตน์ จีเพชร และ สุรีมาศ จันทะอินทร์

Jakkrapong Kangsopa*, Phetcarat Jeepet and Sureemard Chantain

Received: 16 April 2020, Revised: 14 July 2020, Accepted: 16 September 2020

บทคัดย่อ

การเพาะปลูกผักกาดหอมในระบบอุตสาหกรรม ต้องการต้นกล้าที่สม่ำเสมอ สมบูรณ์แข็งแรง ตลอดจนสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ในวันเวลาที่กำหนด จึงทำให้การผลิตพืชในระบบอุตสาหกรรมต้องการเมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมที่มีทั้งคุณภาพความงอก และความแข็งแรงสำหรับใช้เพื่อการเพาะปลูก แต่เมล็ดผักกาดหอมมักประสบปัญหาของความงอกและความแข็งแรงต่ำ ทำให้การอนุบาลต้นกล้าที่ได้มีความงอกไม่สม่ำเสมอ จึงง่ายต่อการเข้าทำลายของโรคและแมลง ทำให้เพิ่มต้นทุนการผลิตและไม่สามารถกำหนดวันเวลาได้ชัดเจน จากปัญหาดังกล่าวทำให้การเตรียมการงอกให้กับเมล็ดพันธุ์โดยวิธีการไพร้มมีร่วมกับจุลินทรีย์ชีวภาพเป็นทางเลือกหนึ่งของการยกระดับคุณภาพเมล็ดพันธุ์ผักกาดหอม โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 4 ซ้ำ โดยมีผลการทดลองดังนี้ การไพร้มเมล็ดทุกวิธีการทำให้เมล็ดมีความงอกและความเร็วในการงอกดีมากกว่าเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพร้มและแตกต่างกันทางสถิติ ยกเว้นการไพร้มด้วยน้ำที่ 12 ชั่วโมงมีความงอกไม่แตกต่างกันทางสถิติกับเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพร้ม และการไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.4 % นาน 12 ชั่วโมง ทำให้ความยาวต้นสูงที่สุดและแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ แต่การไพร้มเมล็ดทุกวิธีการไม่ทำให้เมล็ดมีความยาวรากแตกต่างกันกับเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพร้ม ส่วนการไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.4 % นาน 12 ชั่วโมง ทำให้ผลรวมต้นกล้าดีมากกว่าวิธีการอื่นๆ แต่ไม่พบความแตกต่างกับการไพร้มเมล็ดด้วยน้ำนาน 6 ชั่วโมง และการไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.6% และ 0.8 % นาน 12 ชั่วโมง ดังนั้นการไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.4 % นาน 12 ชั่วโมง ทำให้เมล็ดมีความงอกและความเร็วในการงอกดี อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของลำต้นและมีผลรวมต้นกล้าดีมากกว่าเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพร้ม

คำสำคัญ: คุณภาพเมล็ดพันธุ์, การยกระดับคุณภาพเมล็ดพันธุ์, จุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช

สาขาวิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

Division of Agronomy, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): jakkramong_ks@mju.ac.th

ABSTRACT

Growing industrial lettuce requires seedlings that grow consistently, have vigor, and can be harvested right on schedule. Therefore, in the industrial lettuce production, seedlings with both quality germination and vigor are necessary. Nevertheless, general lettuce seeds have low germination and vigor. This results in nursery grown seedlings that grow inconsistently and can be easily destroyed by diseases and insects. As a result, the production cost increases and the schedule for harvest cannot be controlled. From the aforementioned problems, seed priming with microorganisms is an alternative to enhance the improvement of lettuce seeds. The four repetitive sets of experiments were based on Completely Randomized Design (CRD). The experiment results are as follows. All methods of priming used with lettuce seeds resulted in seedlings with better germination percentage and speed of germination compared with non-primed ones. Moreover, the differences were statistically significant. However, the differences in germination of seeds primed with water for 12 hours were statistically insignificant in comparison with non-primed seeds. On the other hand, seeds primed with 0.4% of *B. subtilis* for 12 hours became seedlings with better total seedling length when compared with those primed by other seed priming methods. Contrastingly, all seed priming methods did not show the differences in the seedlings' shoot length as opposed to non-primed seeds. It was found that primed seeds with 0.4% *B. subtilis* % for 12 hours became seedlings with better total seedling length compared to primed seeds with other priming methods. Nevertheless, the differences in the total seedling length of those seeds compared with primed seeds with water for 6 hours and those with *B. subtilis* 0.6 % and 0.8 % for 12 hours were not found. In conclusion, seeds priming with *B. subtilis* 0.4% for 12 hours resulted in seedlings with better germination percentage and speed of germination. It also promoted the shoot growth and improved total seedling length in contrast with non-primed seeds.

Key words: seed quality, seed enhancement, microorganisms

บทนำ

ผักกาดหอม (*Lactuca sativa* L.) เป็นหนึ่งในผักกินใบที่นิยมเพาะปลูกกันทั่วโลก (Kim *et al.*, 2017) โดยประเทศจีนมีการเพาะปลูกผักกาดหอมมากที่สุดในโลก รองลงมาคือ สหรัฐอเมริกา และประเทศยุโรปตะวันตก ตามลำดับ (Mou, 2008) ปัจจุบันประเทศไทยมีการปลูกผลิตผักในระบบ Hydroponic มากกว่า 250 แห่งทั่วประเทศ คิดเป็นพื้นที่ปลูกมากกว่า 1,000 ไร่ โดยวิธีการปลูกผักใน

ระบบ hydroponic มีการพัฒนาวิธีการให้สารละลายแก่รากพืชที่เรียกว่า ระบบ Nutrient Film Technique (NFT) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน ทำให้ประเทศไทยสามารถผลิตผักกาดหอม (Lettuce) สายพันธุ์ชนิดต่างๆ ได้เองหลากหลายสายพันธุ์ เช่น กรีนไอค, เรดไอค, บัตเตอร์เฮด, กรีนคอส และ เรดคอรอล เป็นต้น จากวิธีการปลูกผักกาดหอมแบบ hydroponic การเพาะกล้าผักกาดหอมชนิดต่างๆ เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในการผลิต เนื่องจากเมล็ด

ผักกาดหอมเป็นเมล็ดพวก Asteraceae เป็นเมล็ดพันธุ์ขนาดเล็ก แบน เบา มีอาหารสะสมในเมล็ดน้อย มีราคาแพง จึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องอนุบาลต้นกล้าให้มีการงอกสม่ำเสมอ ต้นกล้าไม่เบียดกันจนทำให้เกิดโรคง่ายและติดต่อกันในระยะกล้า (Kangsopa and Siri, 2015) ซึ่งในการผลิตผักแบบ Hydroponic ที่เป็นระบบอุตสาหกรรม และต้องการต้นกล้าที่สม่ำเสมอ สมบูรณ์แข็งแรง ตลอดจนสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ในวันเวลาที่กำหนด จึงทำให้การผลิตพืชในระบบอุตสาหกรรมต้องการเมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมที่มีทั้งคุณภาพความงอก และความแข็งแรงสำหรับใช้เพื่อการเพาะปลูก

จากปัญหาดังกล่าวทำให้ขั้นตอนการเตรียมการงอกให้กับเมล็ดพันธุ์โดยวิธีการไพรม์มิง (Seed priming) เป็นความจำเป็นต่อระบบการเพาะปลูกพืช โดยการไพรม์เมล็ดพันธุ์เป็นวิธีการให้ความชื้นให้กับเมล็ดพันธุ์ โดยจะให้เมล็ดค่อยๆ ดูดซับน้ำ ในสภาวะที่มีการควบคุมอุณหภูมิ และระยะเวลาในการให้ความชื้น การไพรม์เมล็ดพันธุ์ช่วยเพิ่มกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ และกระบวนการทางชีววิทยาต่างๆ ภายในเมล็ดให้ดียิ่งขึ้น ส่งผลทำให้เมล็ดพันธุ์งอกได้เร็วและสม่ำเสมอมากขึ้น ต้นกล้ามีการเจริญเติบโตดีขึ้น ส่งผลให้ต้นพืชเจริญเติบโตและให้ผลผลิตที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชหรือธาตุอาหารพืชบางชนิดในขั้นตอนการแช่เมล็ดเพื่อให้ดูดซับน้ำ เพื่อเสริมประสิทธิภาพในการไพรม์เมล็ดพันธุ์ให้ดียิ่งขึ้นได้ (Taylor *et al.*, 1998; McDonald, 2000; Siri, 2015)

โดยเฉพาะการไพรม์เมล็ดพันธุ์ร่วมกับจุลินทรีย์ชีวภาพ ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์ที่มีวงชีวิตอยู่ร่วมกันกับพืช มีความสำคัญและเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งสามารถสร้างสารอาหารที่ต้นพืชต้องการเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในสกุล *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Pseudomonas* และ *Bacillus* เป็นต้น

(Kangsopa *et al.*, 2018) จุลินทรีย์เหล่านี้มีกลไกที่สำคัญคือ สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของพืช โดยสนับสนุนให้พืชหาอาหาร และการดูดซึมจากดินผ่านกลไกต่าง ๆ มากขึ้น อีกทั้งส่งเสริมกระบวนการละลายของฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ (Kundu and Gaur, 1980) การสังเคราะห์สารประกอบธาตุเหล็ก (Glick *et al.*, 2007) การผลิตกรดอินทรีย์กรดอะมิโน (IAA) ซึ่งช่วยเพิ่มการเจริญของรากและลำต้น (Oteino *et al.*, 2015) และลดการเกิดโรคในพืช โดยการผลิตไคตินเอส β -1, 3-glucanase และ pectinase เพื่อลดการสร้างผนังเซลล์ของเชื้อรา (Bloemberg and Lugtenberg, 2001; Turan *et al.*, 2005) จากความสำคัญดังกล่าวทำให้การยกระดับคุณภาพเมล็ดพันธุ์ด้วยวิธีทางชีวภาพที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีต้นทุนต่ำ และมีประสิทธิภาพสูง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนของ *B. subtilis* และระยะเวลาการไพรม์ที่เหมาะสมต่อการไพรม์ร่วมกับเมล็ดพันธุ์ผักกาดหอม และติดตามการเปลี่ยนแปลงของความงอก และการเจริญเติบโตของต้นกล้าผักกาดหอม เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกเพื่อยกระดับคุณภาพเมล็ดพันธุ์และการเพาะปลูกผักกาดหอมในระบบการปลูกพืชไร้ดินและในระบบแปลงเพาะปลูกให้มีผลผลิตและคุณภาพเพิ่มสูงขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

งานทดลองนี้ใช้เมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมลูกผสมพันธุ์ กรีน โอ๊ค ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์ สาขาวิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 4 ซ้ำ ดำเนินการทดลองระหว่างเดือน มกราคม - เมษายน 2563 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการทดลอง ดังต่อไปนี้

1. การไพร่เมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมร่วมกับ *Bacillus subtilis*

การไพร่เมล็ดพันธุ์ทำโดยแช่เมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมในสารละลาย *Bacillus subtilis* MBI 600 (Integral®, BASF) (ความเข้มข้นของจำนวนเชื้อ 2.2×10^{10} สปอร์/มิลลิลิตร) ที่ถูกเตรียมร่วมกับน้ำกลั่น โดยมีกรรมวิธีการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1

จากนั้นนำไปไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C เมื่อครบกำหนดเวลานำเมล็ดพันธุ์ออกมาล้างด้วยน้ำกลั่น โดยล้างผ่านน้ำไหลเป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นซับน้ำที่ผิวเมล็ดและนำไปลดความชื้นในสภาพอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำเมล็ดที่ผ่านการไพร่มาตรวจสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์ในสภาพห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 1 แสดงสูตรสารเคลือบเมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมร่วมกับ *Bacillus subtilis* ในอัตราและระยะเวลาที่แตกต่างกัน

สารออกฤทธิ์	สูตรการไพร่เมล็ดพันธุ์														
	6 ชั่วโมง								12 ชั่วโมง						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T1	T11	T12	T13	T14	T15
										0					
<i>B. subtilis</i>	-	-	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	-	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
น้ำ	-	100	99.9	99.8	99.6	99.4	99.2	99.0	100	99.9	99.8	99.6	99.4	99.2	99.0

B. subtilis และ น้ำ มีหน่วยเป็น มิลลิลิตร

2. การตรวจสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์

2.1 การตรวจสอบความงอกในสภาพห้องปฏิบัติการ

กลุ่มเมล็ดพันธุ์ทุกวิธีการจำนวน 4 ซ้ำ ซ้ำละ 50 เมล็ด มาทดสอบความงอกโดยวิธี Top of paper (TP) จากนั้นนำไปไว้ในตู้เพาะความงอก อุณหภูมิสลบ (8 ชั่วโมง 30 °C และ 16 ชั่วโมง 20 °C)

แล้วตรวจนับความงอกหลังการเพาะครั้งแรกที่ 4 วัน (First count) และ 7 วันหลังเพาะ (Final count) โดยนำมาประเมินผลการตรวจสอบความงอกตามวิธีของ ISTA (International Seed Testing Association) (2018)

$$\text{ความงอกของเมล็ดพันธุ์ในสภาพห้องปฏิบัติการ (\%)} = \frac{\text{จำนวนของเมล็ดที่งอกเป็นต้นกล้าปกติ} \times 100}{\text{จำนวนเมล็ดที่เพาะ}}$$

ส่วนการตรวจสอบลักษณะเมล็ดตาย ทำโดยประเมินผลจากลักษณะเมล็ดที่ไม่งอก เมล็ดอยู่ในสภาพไม่สด เน่า และ หรืออาจจะมีเชื้อราขึ้นบนเมล็ด ประเมินทั้งหมด 4 ซ้ำ แล้วจึงนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เมล็ดตาย ส่วนการตรวจสอบลักษณะเมล็ดสด ทำโดยประเมินลักษณะของเมล็ดที่มีชีวิต สามารถดูดน้ำได้แต่ไม่งอก เมล็ดอยู่ในสภาพสด และ สมบูรณ์ ทำทั้งหมดจำนวน 4 ซ้ำ แล้วจึงนำมาประเมินเปอร์เซ็นต์เมล็ดแข็ง และการตรวจสอบ

ลักษณะต้นกล้าผิดปกติ ทำโดยการประเมินต้นกล้า ที่ไม่สามารถเจริญเป็นต้นกล้าที่ปกติได้ หรือต้นกล้าที่มีรากและลำต้นไม่สมบูรณ์ ทำทั้งหมดจำนวน 4 ซ้ำ แล้วนำมาประเมินหาเปอร์เซ็นต์ต้นกล้าผิดปกติ

2.2 การตรวจสอบความเร็วในการงอกในสภาพห้องปฏิบัติการ

กลุ่มเมล็ดพันธุ์ที่ผ่านกระบวนการไพร่และไม่ไพร่จำนวน 4 ซ้ำ ซ้ำละ 50 เมล็ด นับจำนวนเมล็ดที่งอกเป็นต้นกล้าปกติ

ประเมินนับทุกวัน ตั้งแต่เริ่มนับครั้งแรก (First count) จนถึงวันสุดท้าย (Final count) แล้วนำผลการนับมา

คำนวณหาความเร็วในการงอกดังสูตร

$$\text{ความเร็วในการงอก (ต้น/วัน)} = \frac{\text{ผลรวมของ (จำนวนต้นกล้าปกติที่งอกในแต่ละวัน)}}{\text{จำนวนวันหลังเพาะ}}$$

2.3 การตรวจสอบการงอกรากในสภาพห้องปฏิบัติการ โดยสุ่มประเมินการงอกรากจากการเพาะทดสอบในสภาพห้องปฏิบัติการ ในวันที่ 1 และ 3 วันหลังเพาะ ในแต่ละกรรมวิธีทำ 4 ซ้ำ ซ้ำละ 50 เมล็ด

โดยจะเริ่มตรวจนับเมื่อเมล็ดมีการงอกของรากที่มีความยาว 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การงอกรากดังสูตร

$$\text{การงอกราก (\%)} = \frac{\text{จำนวนเมล็ดที่งอกราก} \times 100}{\text{จำนวนเมล็ดที่เพาะ}}$$

2.4 การตรวจสอบความเร็วในการงอกรากในสภาพห้องปฏิบัติการ ดำเนินการตรวจนับรากที่มีความยาว 2 มิลลิเมตร ในทุกวันตั้งแต่วันที่ 1 ถึงวันที่

3 หลังการเพาะ ทำทั้งหมด 4 ซ้ำ ซ้ำละ 50 เมล็ด ในทุกกรรมวิธีการ จากนั้นนำมาคำนวณหาความเร็วในการงอกรากของต้นกล้าผักกาดหอม ดังนี้

$$\text{ความเร็วในการงอกราก (ราก/วัน)} = \frac{\text{ผลรวมของ (จำนวนรากที่งอกในแต่ละวัน)}}{\text{จำนวนวันหลังเพาะ}}$$

2.5 การตรวจสอบความยาวต้นและความยาวราก สุ่มต้นกล้าปกติที่อายุ 7 วันหลังเพาะจากการเพาะทดสอบความงอก ทำ 4 ซ้ำ ซ้ำละ 10 ต้น ทำการตรวจวัดความยาวต้น โดยวัดตั้งแต่ส่วนรอยต่อของต้นกับรากไปจนถึงปลายสุดใบจริง (Foliage leaf) ส่วนความยาวราก วัดจากบริเวณปลายรากจนถึงบริเวณข้อต่อระหว่างส่วนรากและลำต้นของต้นกล้า (Baki and Anderson, 1973) และการประเมินความยาวต้นกล้าทั้งหมด ตรวจวัดตั้งแต่ปลายรากไปจนถึงปลายสุดใบจริง โดยใช้ไม้บรรทัดมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

เพื่อวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้วิธี Arcsine transformation และเมื่อข้อมูล มีค่าเป็น 0 มีการแปลงค่าโดยวิธี Square root $\sqrt{x+0.5}$ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) และเปรียบเทียบคุณภาพและการเจริญเติบโตของต้นกล้าผักกาดหอมโดยวิธี Orthogonal Contrast Comparison วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม SAS (Version 9.1)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การประเมินคุณภาพเมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมหลังผ่านการไพร่มเมล็ดด้วย *Bacillus subtilis*

1.1 คุณภาพเมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมหลังผ่านการไพร่มเมล็ดด้วย *Bacillus subtilis*

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูล ทำการวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพเมล็ดพันธุ์และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเมล็ดพันธุ์ตามลักษณะต่างๆ ใช้แผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) แปลงข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความงอกของเมล็ด

เมื่อพิจารณาการไพร่เมล็ดด้วย *Bacillus subtilis* ในเวลาและอัตราที่แตกต่างกันแล้วนำไปตรวจสอบในสภาพห้องปฏิบัติการพบว่า การไพร่เมล็ดทุกวิธีการไม่ทำให้การงอกรากและความเร็วในการงอกรากของเมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมมีความแตกต่างกันในทางสถิติกับเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพร่ ส่วนการตรวจสอบความงอกของเมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมพบว่า การไพร่เมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.1% เป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีความงอกมากกว่าและแตกต่างในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพร่ แต่เมื่อพิจารณาความเร็วในการงอกพบว่า การไพร่เมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.1% และ 0.8% เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และการไพร่เมล็ดด้วย *B. subtilis* 1.0% เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำให้เมล็ดมีความเร็วในการงอกดีมากกว่าและแตกต่างในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพร่ แต่ไม่พบความแตกต่างกันในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ (ตารางที่ 2) อีกทั้งจากการเปรียบเทียบแบบกลุ่มระหว่างเมล็ดไม่ไพร่และการไพร่เมล็ดทุกวิธีการพบว่า ไม่ทำให้การงอกรากและความเร็วในการงอกรากของต้นกล้าผักกาดหอมมีความแตกต่างกัน แต่ยังคงพบความแตกต่างกันของความงอก โดยการไพร่เมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.1% เป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีความงอกมากกว่าและแตกต่างในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพร่ (ตารางที่ 3)

ซึ่งเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงช่วงแรกของกระบวนการงอกของเมล็ดพันธุ์จะพบว่า การไพร่เมล็ดร่วมกับ *B. subtilis* ทุกช่วงเวลาและทุกอัตรายังไม่ส่งผลส่งเสริมทำให้เมล็ดสามารถงอกรากได้เร็วเพิ่มขึ้นในช่วง 3 วันหลังเพาะ เมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพร่ ทั้งนี้ *Bacillus* spp. ต้องใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมงในการสร้างไบโอฟิล์มสำหรับเป็นแหล่งรวมสารออกฤทธิ์ เช่น กรดมาลิก (Rudrappa *et al.*,

2008; Chen *et al.*, 2012) ซึ่งเป็นกรดที่ช่วยเพิ่มความเข้มข้นของการรับอนิออนไนต์เพื่อถูกนำไปใช้ในวัฏจักรคัลวินเพื่อเป็นแหล่งพลังงานสร้างสารอินทรีย์พวก ATP และ NADPH จึงยังคงไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วงระยะเวลาแรกของการงอกราก แต่จะพบการเปลี่ยนแปลงหลังผ่านการเพาะไปแล้ว 4-7 วัน โดยจะพบว่า การไพร่เมล็ดทุกวิธีการมีผลส่งเสริมทำให้เมล็ดมีความงอกและความเร็วในการงอกเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพร่ ทั้งนี้การไพร่เมล็ดพันธุ์เป็นการเพิ่มความชื้นให้กับเมล็ดพันธุ์ โดยวิธีการแช่เมล็ดในน้ำหรือสารละลายที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมในสภาพอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงระยะเวลาที่นานเพียงพอที่จะทำให้เมล็ดมีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการทางชีวเคมีและสรีรวิทยาต่างๆ (Bewley and Black, 1982) อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการไพร่เมล็ดพันธุ์เป็นวิธีการทำให้เมล็ดพันธุ์จะมีการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยามีพลังงานในเมล็ดพันธุ์เพิ่มขึ้นจากกระบวนการหายใจ นอกจากนี้ยังทำให้ผนังของเยื่อหุ้มเซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงในการจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบ และเกิดการซ่อมแซมเซลล์และอวัยวะย่อยต่างๆ ที่เสื่อมสภาพ (McDonald, 1999; Siri *et al.*, 2013; Krainart *et al.*, 2015) จึงมีผลทำให้เมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมที่ถูกไพร่มีการเปลี่ยนแปลงของความงอกและความเร็วในการงอกดีเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ จากกรรมวิธีการไพร่เมล็ดด้วย *B. Subtilis* ในระยะเวลาและอัตราที่แตกต่างกันยังมีผลส่งเสริมการเปลี่ยนแปลงของความงอกและความแข็งแรงของผักกาดหอมอย่างชัดเจน โดย *Bacillus subtilis* เป็นจุลินทรีย์ชีวภาพที่สามารถสังเคราะห์สารออกฤทธิ์กลุ่มของ phytohormones เช่น indoleacetic acid, abscisic acid, gibberellins และ cytokinins ซึ่งเป็นฮอร์โมนที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการการงอกและการเจริญเติบโตของพืช (Spaepen and

Vanderleyden, 2011; Glick, 2012; Rakshit *et al.*, 2015; Singh, 2016) ซึ่ง Mahmood *et al.* (2016) รายงานว่าการไพรม์เมล็ดร่วมกับจุลินทรีย์ชีวภาพเป็นหนึ่งในวิธีการที่ดีสำหรับการเตรียมความพร้อมให้กับเมล็ด โดยสามารถช่วยให้เมล็ดสามารถงอกได้ดี งามสม่ำเสมอ และต้นกล้ามีความสมบูรณ์แข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังนั้น วิธีการไพรม์เมล็ดพันธุ์ร่วมกับจุลินทรีย์จึงเป็นวิธีการทำให้เมล็ดมีการเพิ่มขึ้นของประชากรจุลินทรีย์ที่ผิวของเมล็ดผ่านการแช่ในน้ำหรือสารละลาย โดย Callan *et al.* (1990) รายงานว่า ในระหว่างการไพรม์เมล็ดพันธุ์พบจำนวนประชากรของ

แบคทีเรียเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 10,000 เท่าจากเดิม จากวิธีการดังกล่าว จึงทำให้จุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อการงอกของเมล็ดติดไปกับเมล็ดพันธุ์ โดยเฉพาะการไพรม์เมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมด้วย *B. subtilis* ที่มีคุณสมบัติสามารถผลิต 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) deaminase เพื่อควบคุมระดับเอทิลีน โดยจะเกิดการเผาผลาญ ACC แล้วเปลี่ยนไปเป็น α -ketobutyric และแอมโมเนียที่มีผลต่อการส่งเสริมการงอกของเมล็ด (Arshad *et al.*, 2007; Glick *et al.*, 2007) จึงทำให้เมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมมีการงอกและความเร็วในการงอกดีเพิ่มขึ้นจากเดิม

ตารางที่ 2 การงอกราก ความเร็วในการงอกราก ความงอก และความเร็วในการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมหลังผ่านการไพรม์เมล็ดร่วมกับ *Bacillus subtilis* ในระยะเวลาและอัตราที่แตกต่างกัน เมื่อตรวจสอบในสภาพห้องปฏิบัติการ

กรรมวิธี	สภาพห้องปฏิบัติการ			
	การงอกราก	ความเร็วในการ	ความงอก	ความเร็วในการ
	(%)	งอกราก (ราก/วัน)	(%)	งอก (ต้น/วัน)
เมล็ดไม่ไพรม์	95 ¹	45.46	89 d ²	10.89 c
ไพรม์เมล็ด + น้ำ + 6 ชม.	98	48.71	97 a-c	12.10 ab
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.1 % + 6 ชม.	100	49.75	100 a	12.44 a
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.2 % + 6 ชม.	98	48.63	98 a-c	12.19 ab
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.4 % + 6 ชม.	97	47.71	95 b-d	11.88 ab
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.6 % + 6 ชม.	99	48.92	99 ab	12.32 ab
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.8 % + 6 ชม.	99	49.21	99 ab	12.38 a
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 1.0 % + 6 ชม.	98	48.75	98 a-c	12.19 ab
ไพรม์เมล็ด + น้ำ + 12 ชม.	97	48.00	94 cd	11.75 ab
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.1 % + 12 ชม.	97	48.13	97 a-c	12.13 ab
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.2 % + 12 ชม.	100	49.38	97 a-c	12.32 ab
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.4 % + 12 ชม.	76	37.17	98 a-c	12.29 ab
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.6 % + 12 ชม.	99	48.29	98 a-c	12.19 ab
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.8 % + 12 ชม.	98	48.38	97 a-c	12.07 ab
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 1.0 % + 12 ชม.	100	49.17	99 ab	12.38 a

ตารางที่ 2 (ต่อ)

กรรมวิธี	สภาพห้องปฏิบัติการ			
	การจกราก (%)	ความเร็วในการ จกราก (ราก/วัน)	ความงอก (%)	ความเร็วในการ งอก (ต้น/วัน)
ค่าเฉลี่ย	96	47.71	97	12.10
<i>F</i> -test	ns	ns	**	**
CV.(%)	11.94	11.88	7.16	2.80

ns, **: ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ และมีความแตกต่างกันในทางสถิติที่ $p \leq 0.01$ ตามลำดับ

¹ แปลงข้อมูลการจกราก และความงอกก่อนนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยวิธี arcsin

² อักษรต่างกันมีความแตกต่างกันทางสถิติ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ $p \leq 0.05$

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบแบบกลุ่มโดยวิธี orthogonal contrast ของการจกราก, ความเร็วในการจกราก, ความงอก และความเร็วในการงอก ของเมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมหลังผ่านการไพร้มเมล็ดร่วมกับ *Bacillus subtilis* ในระยะเวลาและอัตราที่แตกต่างกัน เมื่อตรวจสอบในสภาพห้องปฏิบัติการ

กรรมวิธี ¹	การจกราก (%)	ความเร็วในการ จกราก (ราก/วัน)	ความงอก (%)	ความเร็วในการ การงอก (ต้น/วัน)
1 vs 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	ns	ns	**	**
3 vs 10	ns	ns	**	**
4 vs 11	ns	ns	**	**
5 vs 12	ns	ns	**	**
6 vs 13	ns	ns	**	**
7 vs 14	ns	ns	**	**
8 vs 15	ns	ns	**	**
CV.(%)	11.91	11.88	2.76	2.80

ns, **: ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ และมีความแตกต่างกันในทางสถิติที่ $p \leq 0.01$ ตามลำดับ

¹ T1 = เมล็ดไม่ไพร้ม, T2 = การไพร้มเมล็ดด้วย H₂O ที่ 6 ชั่วโมง, T3 = การไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.1% ที่ 6 ชั่วโมง, T4 = การไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.2% ที่ 6 ชั่วโมง, T5 = การไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.4% ที่ 6 ชั่วโมง, T6 = การไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.6% ที่ 6 ชั่วโมง, T7 = การไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.8% ที่ 6 ชั่วโมง, T8 = การไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 1.0% ที่ 6 ชั่วโมง, T9 = การไพร้มเมล็ดด้วย H₂O ที่ 12 ชั่วโมง, T10 = การไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.1% 12 ชั่วโมง, T11 = การไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.2% 12 ชั่วโมง, T12 = การไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.4% 12 ชั่วโมง, T13 = การไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.6% 12 ชั่วโมง, T14 = การไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.8% 12 ชั่วโมง, T15 = การไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* 1.0% 12 ชั่วโมง

1.2 ลักษณะของเมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมหลัง ผ่านการไพร้มเมล็ดด้วย *Bacillus subtilis*

หลังการไพร้มเมล็ดด้วย *Bacillus subtilis* ในเวลาและอัตราที่แตกต่างกันแล้วนำไปตรวจสอบในสภาพห้องปฏิบัติการพบว่า การไพร้มเมล็ดทุกวิธีการไม่ทำให้จำนวนเมล็ดตายและเมล็ดสดไม่งอกมีความแตกต่างกันในทางสถิติกับเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพร้ม จากนั้นตรวจสอบต้นกล้าผิปกติพบว่า การไพร้มเมล็ดทุกวิธีการมีต้นกล้าผิปกติน้อยกว่าและแตกต่างกันในทางสถิติกับเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพร้ม ยกเว้นการไพร้มเมล็ดด้วยน้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ยังคงทำให้มีต้นกล้าผิปกติมากกว่าการไพร้มเมล็ดทุกวิธีการ (ตารางที่ 4) จากผลของการทดลองที่ได้ศึกษาการไพร้มเมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมร่วมกับ *B. subtilis* ในระยะเวลาและอัตราที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่า การไพร้มเมล็ดทุกวิธีการไม่ทำให้จำนวนของเมล็ดตายและเมล็ดสดไม่งอกมีความแตกต่างกันกับเมล็ดที่ไม่ได้ไพร้ม อีกทั้งการไพร้มเมล็ดร่วมกับ *B. subtilis* ทุกช่วงเวลาและทุกอัตราทำให้เมล็ดมีลักษณะของต้นกล้าผิปกติน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพร้ม ทั้งนี้การไพร้มเมล็ดพันธุ์เป็นวิธีการให้ความชื้นแก่เมล็ด หรือแช่เมล็ดในน้ำในอุณหภูมิที่เหมาะสม และระยะเวลานานเพียงพอที่จะทำให้เมล็ดมีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการทางชีวเคมี และเกิดกระบวนการทาง

สรีรวิทยาต่างๆ (Bewley and Black, 1982) จากวิธีการดังกล่าวทำให้เมล็ดดูดอุ้มน้ำและมีความเกี่ยวข้องกับค่าศักย์ของน้ำ (Water potential) โดยทั่วไปตามค่าศักย์ของน้ำในการแช่เมล็ดในน้ำปริมาณมาก น้ำจะเคลื่อนที่เข้าสู่เมล็ดได้อย่างรวดเร็ว ซึ่ง Siri (2009) รายงานว่า เมื่อแช่เมล็ดพันธุ์ในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น เมล็ดพันธุ์จะมีอัตราการดูดน้ำช้าและน้อยลง เนื่องจากค่าศักย์ของน้ำได้เปลี่ยนไปมีค่าต่ำกว่าค่าปกติ จากการที่เมล็ดพันธุ์มีอัตราการดูดอุ้มน้ำช้าลง ทำให้ระยะการดูดอุ้มน้ำระยะที่ 2 ยาวนานขึ้น ซึ่งระยะดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและเซลล์ภายในเมล็ด จึงทำให้เมล็ดผักกาดหอมที่ผ่านการไพร้มในสารละลาย *B. subtilis* มีอัตราการดูดอุ้มน้ำช้าลงเช่นเดียวกัน ทำให้เมล็ดมีช่วงเวลาสำหรับการซ่อมแซมเมมเบรนที่เสื่อมคุณภาพมากขึ้น (Parera and Cantiffe, 1994) อีกทั้งเพิ่มกิจกรรมของ Isocitrate lyase และ Malate synthase กิจกรรมของเอนไซม์ใน Glyoxysome และ Anti-oxidation เพิ่มมากขึ้น ช่วยกระตุ้นการสังเคราะห์ DNA และ RNA รวมถึงช่วยให้การทำงานของเอนไซม์ภายในเมล็ดมีประสิทธิภาพดีขึ้น (Siri, 2015) จึงทำให้เมล็ดที่ผ่านการไพร้มมีมีลักษณะของเมล็ดตาย เมล็ดสด และต้นกล้าผิปกติเพียงเล็กน้อยและมีแนวโน้มการเกิดลักษณะเหล่านี้้น้อยกว่าเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพร้มมีเมล็ด

ตารางที่ 4 เมล็ดตาย เมล็ดสดไม่งอก และต้นกล้าผิปกติของเมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมหลังผ่านการไพร้มเมล็ดร่วมกับ *Bacillus subtilis* ในระยะเวลาและอัตราที่แตกต่างกัน เมื่อตรวจสอบในสภาพห้องปฏิบัติการ

กรรมวิธี	สภาพห้องปฏิบัติการ		
	เมล็ดตาย (%)	เมล็ดสด (%)	ต้นกล้าผิปกติ (%)
เมล็ดไม่ไพร้ม	3 ¹	1	7 a ²
ไพร้มเมล็ด + น้ำ + 6 ชม.	1	1	1 c
ไพร้มเมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.1 % + 6 ชม.	0	0	0 c
ไพร้มเมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.2 % + 6 ชม.	1	0	1 c

ตารางที่ 4 (ต่อ)

กรรมวิธี	สภาพห้องปฏิบัติการ		
	เมล็ดตาย (%)	เมล็ดสด (%)	ต้นกล้าผิดปกติ (%)
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.4 % + 6 ชม.	2	0	3 bc
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.6 % + 6 ชม.	0	0	1 c
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.8 % + 6 ชม.	0	0	1 c
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 1.0 % + 6 ชม.	1	0	1 c
ไพรม์เมล็ด + น้ำ + 12 ชม.	1	1	4 ab
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.1 % + 12 ชม.	0	1	2 c
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.2 % + 12 ชม.	2	0	1 c
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.4 % + 12 ชม.	1	0	1 c
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.6 % + 12 ชม.	1	0	1 c
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.8 % + 12 ชม.	1	0	2 c
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 1.0 % + 12 ชม.	0	0	1 c
ค่าเฉลี่ย	1	0	2
<i>F</i> -test	ns	ns	**
CV.(%)	49.31	36.68	40.27

ns, **: ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ และมีความแตกต่างกันในทางสถิติที่ $p \leq 0.01$ ตามลำดับ

¹ แปลงข้อมูลของเมล็ดตาย เมล็ดสด และต้นกล้าผิดปกติก่อนวิเคราะห์ข้อมูลด้วย square root $\sqrt{x+0.5}$

² อักษรต่างกันมีความแตกต่างกันทางสถิติ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ $p \leq 0.05$

2. การเปลี่ยนแปลงความยาวต้นและความยาวรากของต้นกล้าผักกาดหอมหลังผ่านการไพรม์เมล็ดด้วย *Bacillus subtilis*

หลังการพิจารณาการไพรม์เมล็ดด้วย *Bacillus subtilis* ในเวลาและอัตราที่แตกต่างกันแล้วนำไปตรวจสอบในสภาพห้องปฏิบัติการพบว่า การไพรม์เมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.6 % เป็นเวลา 12 ชั่วโมงทำให้เมล็ดมีความยาวต้นสูงที่สุดและมีความแตกต่างกันในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ ส่วนการตรวจสอบความยาวรากพบว่า การไพรม์เมล็ดทุกวิธีการไม่ทำให้ความยาวรากมีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาผลรวมต้นกล้าพบว่า การไพรม์เมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.6 % เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ทำให้มีผลรวมของต้นกล้าผักกาดหอมดีมากกว่าและแตกต่างกันในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ แต่ไม่แตกต่างกันในทางสถิติกับเมล็ดที่ผ่านการไพรม์ด้วยน้ำ 6 ชั่วโมง การไพรม์เมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.6% 12 ชั่วโมง และการไพรม์เมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.8% 12 ชั่วโมง (ตารางที่ 5)

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การไพรม์เมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.4 % นาน 12 ชั่วโมง มีแนวโน้มทำให้การเปลี่ยนแปลงของความยาวต้น และผลรวมของต้นกล้าสูงมากกว่าวิธีการอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจาก *Bacillus subtilis* สามารถสังเคราะห์ Phytohormone ในกลุ่ม Auxin, IAA, Gibberellins, Cytokinins และ Spermidines ที่มีบทบาทต่อการส่งเสริมการ

เจริญเติบโตของลำต้นและรากของต้นกล้า (Arkhipova *et al.*, 2005; Glick, 2012; Xie *et al.*, 2014; Radhakrishnan and Lee, 2016) โดยเฉพาะ Indole-3-acetic acid (IAA) (Zaidi *et al.*, 2006) ซึ่งมีบทบาทช่วยกระตุ้นการแบ่งเซลล์ของลำต้นของต้นกล้าให้ยืดขยายเซลล์เพิ่มมากขึ้นจากเดิม (Honma and Shimomura, 1978; Glick, 2014) นอกจากนี้ IAA ยังทำหน้าที่กระตุ้นการเจริญที่ปลายรากพืชทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น และเพิ่มความสามารถในการลำเลียงธาตุอาหาร (Yang *et al.*, 2009) รวมถึงการทำหน้าที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชโดยการตรึงไนโตรเจนในชั้นบรรยากาศเพื่อช่วยในการยืดขยายเซลล์มากขึ้น (Kuan *et al.*, 2016) ยกตัวอย่างการตรึงไนโตรเจนของแบคทีเรียในสายพันธุ์ *Bacillus* OSU-

142 ซึ่งสามารถเพิ่มผลผลิตของข้าวสาลีสูงค่าปีทและผักขมได้เพิ่มมากขึ้น (Cakmakci *et al.*, 2007) และพบรายงานการเพิ่มขึ้นของความยาวต้น และความยาวรากของต้นกล้าผักกาดหอม หลังการพอกเมล็ดพันธุ์ร่วมกับ *P. putida* CC-R2-4 และ *B. subtilis* CC-pg104 (Rekha *et al.*, 2007) นอกจากนี้ เมื่อเมล็ดมะเขือเทศได้รับการคลุกด้วย *Bacillus subtilis* (EPC016) พบว่าการเจริญเติบโตของต้นกล้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการคลุก (Ramyaabharathi *et al.*, 2013) ดังนั้น จากผลการทดลองจึงแสดงให้เห็นว่าการไพร้มเมล็ดด้วย *B. subtilis* เป็นวิธีการยกระดับคุณภาพเมล็ดพันธุ์ที่ดีมากกว่าเมล็ดเปล่า

ตารางที่ 5 ความยาวลำต้น ความยาวราก และความยาวต้นกล้าของเมล็ดพันธุ์ผักกาดหอมหลังผ่านการไพร้มเมล็ดร่วมกับ *Bacillus subtilis* ในระยะเวลาและอัตราที่แตกต่างกัน เมื่อตรวจสอบในสภาพห้องปฏิบัติการ

กรรมวิธี	สภาพห้องปฏิบัติการ		
	ความยาวต้น (มิลลิเมตร)	ความยาวราก (มิลลิเมตร)	ผลรวมต้นกล้า (มิลลิเมตร)
เมล็ดไม่ไพร้ม	15.61 b ¹	36.94	52.52 b
ไพร้มเมล็ด + น้ำ + 6 ชม.	17.44 b	37.10	54.56 ab
ไพร้มเมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.1 % + 6 ชม.	15.83 b	33.86	49.64 b
ไพร้มเมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.2 % + 6 ชม.	15.86 b	32.94	48.75 b
ไพร้มเมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.4 % + 6 ชม.	15.96 b	34.76	50.66 b
ไพร้มเมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.6 % + 6 ชม.	17.24 b	32.11	49.31 b
ไพร้มเมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.8 % + 6 ชม.	16.10 b	36.92	52.90 b
ไพร้มเมล็ด + <i>B. subtilis</i> 1.0 % + 6 ชม.	15.42 b	35.05	50.45 b
ไพร้มเมล็ด + น้ำ + 12 ชม.	16.57 b	34.09	50.56 b
ไพร้มเมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.1 % + 12 ชม.	15.22 b	33.84	49.01 b
ไพร้มเมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.2 % + 12 ชม.	16.86 b	36.24	53.08 b
ไพร้มเมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.4 % + 12 ชม.	24.85 a	39.26	63.90 a
ไพร้มเมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.6 % + 12 ชม.	16.34 b	39.11	55.47 ab
ไพร้มเมล็ด + <i>B. subtilis</i> 0.8 % + 12 ชม.	15.66 b	39.06	54.67 ab

ตารางที่ 5 (ต่อ)

กรรมวิธี	สภาพห้องปฏิบัติการ		
	ความยาวต้น (มิลลิเมตร)	ความยาวราก (มิลลิเมตร)	ผลรวมต้นกล้า (มิลลิเมตร)
ไพรม์เมล็ด + <i>B. subtilis</i> 1.0 % + 12 ชม.	16.02 b	36.30	52.39 b
ค่าเฉลี่ย	16.71	35.85	52.54
<i>F</i> -test	*	ns	*
CV.(%)	27.66	11.94	11.70

ns, *: ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ และมีความแตกต่างทางสถิติ $p \leq 0.05$ ตามลำดับ

¹ อักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างกันทางสถิติ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ $p \leq 0.05$

สรุป

การไพรม์เมล็ดทุกวิธีการทำให้เมล็ดมีความงอกและความเร็วในการงอกดีกว่าเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพรม์และแตกต่างกันในทางสถิติ ยกเว้นการไพรม์ด้วยน้ำที่ 12 ชั่วโมง มีความงอกไม่แตกต่างกันในทางสถิติกับเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพรม์ และการไพรม์เมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.4 % นาน 12 ชั่วโมง ทำให้ความยาวต้นสูงที่สุดและแตกต่างกันในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ ส่วนการไพรม์เมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.4 % นาน 12 ชั่วโมง ทำให้ผลรวมต้นกล้าดีมากกว่าวิธีการอื่นๆ แต่ไม่พบความแตกต่างกับการไพรม์เมล็ดด้วยน้ำนาน 6 ชั่วโมง และการไพรม์เมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.6 % และ 0.8 % นาน 12 ชั่วโมง ดังนั้นข้อสรุปคือ การไพรม์เมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.4 % นาน 12 ชั่วโมง ทำให้เมล็ดมีความงอกและความเร็วในการงอกดี อีกทั้งช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของลำต้น และมีผลรวมต้นกล้าดีมากกว่าเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการไพรม์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนนักวิจัยบุคลากรประเภทสายวิชาการ (มจ.2-63-012) ประจำปีงบประมาณ 2563 คณะผลิตกรรมการเกษตร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้งบประมาณสนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์ สาขาวิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้ให้การสนับสนุนสถานที่ดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Arkhipova, T.N., Veselov, S.U., Melentiev, A.I., Martynenko, E.V., and Kudoyarova, G.R. 2005. Ability of bacterium *Bacillus subtilis* to produce cytokinins and to influence the growth and endogenous hormone content of lettuce plants. **Plant and Soil** 272: 201-209.
- Arshad, M., Saleem, M. and Hussain, S. 2007. Perspectives of bacterial ACC deaminase in phytoremediation. **Trends in Biotechnology** 25(8): 356-362.
- Baki, A. and Anderson, J.D. 1973. Vigor determination in soybean seed by multiple criteria. **Crop Science** 13: 630-633.
- Bewley, J.D. and Black, M. 1982. **Physiology and Biochemistry of Seed in Relation to Germination**. Vol. II. Dormancy and

- Environmental Control, Springer-Verlay, New York.
- Bloemberg, G.V. and Lugtenberg, B.J.J. 2001. Molecular basis of plant growth promotion and biocontrol by rhizobacteria. **Current Opinion in Plant Biology** 4(4): 343-350.
- Cakmakci, R., Erat, M., Erdogan, U. and Donmez, M.F. 2007. The influence of plant growth-promoting rhizobacteria on growth and enzyme activities in wheat and spinach plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 170: 288-295.
- Callan, N.W., Mathre, D. and Miller, J.B. 1990. Bio-priming seed treatment for biological control of *Pythium ultimum* preemergence damping-off in sh-2 sweet corn. **Plant Disease Journal** 74: 368-372.
- Chen, Y., Cao, S.G., Chai, Y.R., Clardy, J., Kolter, R., Guo, J.H. and Losick, R. 2012. A *Bacillus subtilis* sensor kinase involved in triggering biofilm formation on the roots of tomato plants. **Molecular Microbiology** 85(3): 418-430.
- Glick, B.R. 2012. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. **Scientifica** 2012: 1-15.
- Glick, B.R. 2014. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. **Microbiological Research** 169: 30-39.
- Glick, B.R., Cheng, Z., Czarny, J. and Duan, J. 2007. Promotion of plant growth by ACC deaminase-producing soil bacteria. **European Journal of Plant Pathology** 119(3): 329-339.
- Honma, M. and Shimomura, T. 1978. Metabolism of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid. **Agricultural and Biological Chemistry** 43: 1825-1831.
- ISTA (International Seed Testing Association). 2018. **International Rules for Seed Testing, Edition 2019**. International Seed Testing Association, Bassersdorf.
- Kangsopa, J. and Siri, B. 2015. Using potential carboxymethyl cellulose and hydroxypropyl methylcellulose as binder for seed pelleting of lettuce (*Lactuca sativa* L.) seeds. **Khon Kaen Agriculture Journal** 43(Suppl. 1): 268-273. (in Thai)
- Kangsopa, J., Hynes, R.K. and Siri, B. 2018. Effects of seed treatment with plant growth promoting bacteria on germination and growth of lettuce. **Journal of Agriculture** 34(3): 385-397. (in Thai)
- Kim, M.J., Moona, Y., Toub, J.C., Mouc, B. and Waterlanda, N.L. 2017. Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Journal of Food Composition and Analysis** 49: 19-34.
- Krainart, C., Siri, B. and Vichitphan, K. 2015. Effects of accelerated aging and subsequent priming on seed quality and biochemical change of hybrid cucumber (*Cucumis sativa* Linn.) seeds. **Journal of Agricultural Technology** 11(1): 165-179.

- Kuan, K.B., Othman, R., Rahim, K.A. and Shamsuddin, Z.H. 2016. Plant growth-promoting rhizobacteria inoculation to enhance vegetative growth, nitrogen fixation and nitrogen remobilization of maize under greenhouse conditions. **PLoS ONE** 11: 1-19. e0152478.
- Kundu, B.S. and Gaur, A.C. 1980. Establishment of nitrogen-fixing and phosphate-solubilizing bacteria in rhizosphere and their effect on yield and nutrient uptake of wheat crop. **Plant and Soil** 57(2-3): 223-230.
- Mahmood, A., Turgay, O.C., Farooq, M. and Hayat, R. 2016. Seed biopriming with plant growth promoting rhizobacteria: a review. **FEMS Microbiology Ecology** 92(8): 1-14. fiw112.
- Mcdonald, M.B. 1999. Seed deterioration: Physiology, repair and assessment. **Seed Science and Technology** 27: 177-237.
- Mcdonald, M.B. 2000. Seed priming, pp. 287-326. In Black, M. and Bewley, J.D., eds. **Seed Technology and its Biology Basis**. Sheffield Academic Press, Sheffield.
- Mou, B. 2008. Lettuce, pp. 75-116. In Prohens, J. and Nuez, F., eds. **Handbook of Plant Breeding, Vol. I: Vegetables I: Asteraceae, -Brassicaceae, Chenopodiaceae, and Cucurbitaceae**. Springer, New York.
- Oteino, N., Lally, R.D., Kiwanuka, S., Lloyd, A., Ryan, D., Germaine, K.J. and Dowling, D.N. 2015. Plant growth promotion induced by phosphate solubilizing endophytic *Pseudomonas* isolates. **Frontier in Microbiology** 6: 745.
- Parera, C.A. and Cantiffe, D.J. 1994. Presowing seed priming. **Horticultural Reviews** 16: 109-141.
- Radhakrishnan, R. and Lee, I.J. 2016. Gibberellins producing *Bacillus methylotrophicus* KE2 supports plant growth and enhances nutritional metabolites and food values of lettuce. **Plant Physiology and Biochemistry** 109: 181-189.
- Rakshit, A., Sunita, K., Pal, S., Singh, A. and Singh, H.B. 2015. Bio-priming mediated nutrient use efficiency of crop species, pp. 181-191. In Rakshit, A., Singh, H.B. and Sen, A., eds. **Nutrient Use Efficiency: From Basics to Advances**. Springer, New Delhi.
- Ramyabharathi, S., Meena, B. and Raguchander, T. 2013. Induction of defense enzymes and proteins in tomato plants by *Bacillus subtilis* EPCO16 against *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici*. **Madras Agricultural Journal** 100: 126-130.
- Rekha, P.D., Lai, W., Arun, A.B. and Young, C.C. 2007. Effect of free and encapsulated *Pseudomonas putida* CC-FR2-4 and *Bacillus subtilis* CC-pg104 on plant growth under gnotobiotic conditions. **Bioresource Technology** 98: 447-451.
- Rudrappa, T., Czymbek, K.J., Pare, P.W. and Bais, H.P. 2008. Root-secreted malic acid recruits beneficial soil bacteria. **Plant Physiology** 148(3): 1547-1556.

- Singh, V., Upadhyay, R.S., Sarma, B.K. and Singh, H.B. 2016. Seed bio-priming with *Trichoderma asperellum* effectively modulate plant growth promotion in pea. **International Journal of Agriculture Environment & Biotechnology** 9: 361-365.
- Siri, B. 2009. **Seed Technology**. Teaching documents. Department of Plant science and Agricultural Resource, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University. (in Thai)
- Siri, B. 2015. **Seed Conditioning and Seed Enhancements**. Department of Plant science and Agricultural Resource, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen. (in Thai)
- Siri, B., Vichitphan, K., Kaewnareee, P., Vichitphan, S. and Klanrit, P. 2013. Improvement of quality, membrane integrity and antioxidant systems in sweet pepper (*Capsicum annuum* Linn.) seeds affected by osmopriming. **Australian Journal of Crop Science** 7(13): 2068-2073.
- Spaepen, S. and Vanderleyden, J. 2011. Auxin and plant-microbe interactions. **Cold Spring Harbor Perspectives in Biology** 3(4): 1-13. a001438.
- Taylor, A.G., Allen, P.S., Bennett, M.A., Bradford, K.J., Burris, J.S. and Misra, M.K. 1998. Seed enhancements. **Seed Science Research** 8: 245-256.
- Turan, M., Ataoglu, N. and Sahin, F. 2005. Evaluation the capacity of phosphate solubilizing bacteria and fungi on different forms of phosphorus in liquid culture. **Journal of Sustainable Agriculture** 28(3): 99-108.
- Xie, S., Wu, H.J., Zang, H., Wu, L., Zhu, Q. and Gao, X. 2014. Plant growth promotion by spermidine-producing *Bacillus subtilis* OKB105. **Molecular Plant-Microbe Interactions** 27: 655-663.
- Yang, O., Li, C., Li, H., Li, Y. and Yu, N. 2009. Degradation of synthetic reactive azo dyes and treatment of textile wastewater by a fungi consortium reactor. **Biochemical Engineering Journal** 43: 225-230.
- Zaidi, S., Usmani, S., Singh, B.R. and Musarrat, J. 2006. Significance of *Bacillus subtilis* strain SJ 101 as a bioinoculant for concurrent plant growth promotion and nickel accumulation in *Brassica juncea*. **Chemosphere** 64: 991-997.

การวิเคราะห์สารพฤกษเคมีเบื้องต้น ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและการเตรียมโลชั่น ผสมสารสกัดพรอพอลิสจากผึ้งชันโรง

Phytochemical Analysis Screening, Antioxidant Activity and Preparation of Lotion Containing Propolis Extract from Stingless Bees

อิมรอน มีชัย^{1*} ครุณี ชือแร¹ และ อิสมะแอ เจ๊ะหลง²

Imron Meechai^{1*}, Darunee Yuerai¹ and Isma-ae Chelong²

Received: 21 January 2020, Revised: 30 March 2020, Accepted: 2 April 2020

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สารพฤกษเคมีเบื้องต้น ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และการเตรียมโลชั่นผสมสารสกัดพรอพอลิสจากผึ้งชันโรงสายพันธุ์ *Geniotrigona thoracica* สารสกัดหยาบพรอพอลิสถูกสกัดด้วยวิธีรีฟลักซ์โดยใช้ตัวทำละลายเอทานอลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และสกัดหยาบส่วนเอทานอล (EE) ถูกสกัดแยกด้วยตัวทำละลายเฮกเซน และเอทิลอะซิเตตตามลำดับได้สารสกัดหยาบ 3 ส่วน ได้แก่ สารสกัดหยาบส่วนเฮกเซน (HE) สารสกัดหยาบส่วนเอทิลอะซิเตต (EAE) และสารสกัดส่วนที่ไม่ละลาย (RE) ในการทดสอบสารพฤกษเคมีเบื้องต้นพบว่าสารสกัดหยาบทั้ง 4 ชนิด ประกอบด้วยสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ คูมาริน ซาโปนิน เทอร์ปีนอยด์ สเตียรอยด์ และคาร์ดิแอกไกลโคไซด์ ในส่วนผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระพบว่าสารสกัดหยาบ EAE มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุดโดยให้ค่า IC_{50} เท่ากับ 262.43 ไมโครกรัมต่อมิลลิตร และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 60.13 มิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัมของสารสกัดพรอพอลิส ดังนั้นส่วนสกัดหยาบ EAE จึงถูกเลือกนำไปเตรียมโลชั่น โดยโลชั่นถูกเตรียมทั้งหมด 5 สูตร (F1-F5) ที่มีความเข้มข้นของสารสกัดพรอพอลิสแตกต่างกัน และทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพและความคงตัว ผลการศึกษาพบว่าโลชั่นทุกสูตรมีลักษณะอิมัลชันเป็นประเภทน้ำมันในน้ำ (O/W) และมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5.53-6.50 โดยที่โลชั่นสูตร F3 เป็นสูตรที่ดี ซึ่งมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีความ

¹ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา 133 ถนนเทศบาล 3 ตำบลสะเตง อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000

¹ Chemistry Department, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, 133 Thetsaban 3 Road, Tambol Sateng, Amphoe Mueang, Yala Province 95000, Thailand.

² สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา 133 ถนนเทศบาล 3 ตำบลสะเตง อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000

² Biology Department, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, 133 Thetsaban 3 Road, Tambol Sateng, Amphoe Mueang, Yala Province 95000, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): imron.me@yru.ac.th Tel: 08 5674 1130

คงตัวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30 ± 2 และ 4 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน 15 วัน และ 30 วัน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการยับยั้งอนุมูลอิสระนั้นลดลงเมื่อถูกเก็บไว้เป็นเวลานาน จากข้อมูลวิจัยนี้อาจใช้ในการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์โลชั่นที่มีส่วนผสมของสารสกัดจากพรอพอลิสต่อไป

คำสำคัญ: พรอพอลิส,ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ, สารประกอบฟีนอลิก, อิมัลชัน, โลชั่น

ABSTRACT

The purpose of this research was to analyze the phytochemical screening, antioxidant activity and preparation of lotion containing propolis extract from Stingless bees (*Geniotrigona thoracica*). The propolis was extracted by reflux method with ethanolic extraction for 1 hour. The ethanol extract (EE) of propolis was extracted with hexane and ethyl acetate, respectively, to obtain hexane extract (HE), ethyl acetate extract (EAE) and residue extract (RE). In the phytochemical screening analysis, chemical composition of all extracts included flavonoid, coumarin, saponin, terpenoid, steroid and cardiac glycoside. The result of antioxidant activity showed that EAE had the highest antioxidant activity with the IC_{50} value at $262.43 \mu\text{g/mL}$ and total phenolic content at $60.13 \text{ mg GAE/g extract}$. Therefore, the EAE was selected to prepare the lotion. Five formulations (F1-F5) of lotion were prepared with various concentrations of propolis extract. All of lotion formula represented the oil in water (O/W) type of emulsion and the range of pH with 6.12-6.50. The F3 lotion yielded better result than other formula which revealed homogeneity emulsion and stability temperature changes at temperature of 30 ± 2 and 4 ± 2 °C for 7, 15 and 30 days. However, the efficiency of antioxidant activity decreased after being stored for a long time. Based on this research, the data might be further used for the development of lotion formulations containing propolis extract in cosmetic industry.

Key words: propolis, antioxidant activity, phenolic compound, emulsion, lotion

บทนำ

ปัจจุบันการดูแลสุขภาพและความสวยความงามเป็นที่ได้รับความสนใจมากขึ้น โดยเฉพาะการนำสารสกัดจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ด้านสุขภาพและความงาม เนื่องจากผู้บริโภคมีความรู้สึกลดภัยต่อการใช้สารสกัดจากธรรมชาติความมากกว่าการใช้สารเคมีสังเคราะห์ นอกจากนี้สารสกัดจากธรรมชาติหลายชนิดมีการรายงานถึงฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลาย จึงถูกนำมาเป็นสารเติมแต่งและ

สารออกฤทธิ์ในผลิตภัณฑ์ความสวยความงามและผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร (Phromyothin *et al.*, 2016) โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ความงามนั้นมีบทบาทสำคัญต่อสุขภาพผิว ซึ่งผลิตภัณฑ์ความงามเพื่อการดูแลผิวที่มีส่วนผสมของสารสกัดสมุนไพรที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจะช่วยป้องกันผิวจากรังสียูวีเอและยูวีบีที่หากได้รับเป็นเวลานานเกินไปก็อาจทำให้เกิดเป็นโรคมะเร็งผิวหนังได้ (Muthukumarasamy *et al.*, 2016)

ชันโรง (Stingless bees) จัดอยู่ในวงศ์ Apidae เป็นแมลงขนาดเล็กที่มีพฤติกรรมเก็บน้ำหวานจากดอกไม้และละอองเกสร (เรณู) มาใช้เป็นอาหาร จำพวกผึ้งแต่ไม่มีเหล็กในจึงไม่สามารถต่อยได้ (Moreno *et al.*, 2000) พรอพอลิสเป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติจากผึ้งชันโรง โดยจะเก็บยางเหนียวมาจากพืชแล้วนำมาสะสมไว้ที่รังเพื่อใช้อุดรอยรั่วของรัง จากรายงานการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของพรอพอลิสนั้นพบว่าพรอพอลิสที่ได้จากบริเวณที่มีภูมิประเทศที่แตกต่างกันนั้นมักจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันด้วย อาทิเช่น สารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ (flavonoids) ได้แก่ ฟลาโวนส์ (flavones) และฟลาวาโนนส์ (flavanones) เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลให้ฤทธิ์ทางชีวภาพของพรอพอลิสแตกต่างกันออกไป พรอพอลิสมีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาที่หลากหลายและน่าสนใจ เช่น ฤทธิ์ต้านเนื้องอก ฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ฤทธิ์ต้านการอักเสบ และฤทธิ์ต้านจุลชีพ ดังนั้นพรอพอลิสจึงเป็นสมุนไพรที่ได้รับความสนใจและมีงานวิจัยออกมาอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันมีการนำพรอพอลิสมาใช้ในการประกอบของผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร เครื่องสำอาง สบู่และยาสีฟัน (Athikomkulchai, 2008)

อนุมูลอิสระเป็นสารที่ไม่เสถียรและว่องไวต่อปฏิกิริยา เนื่องจากเป็นสารที่อะตอมหรือโมเลกุลมีลักษณะแบบอิเล็กตรอนโดดเดี่ยว (unpaired electron) โดยอนุมูลอิสระจะเข้าทำลายสารชีวโมเลกุลของสิ่งมีชีวิตโดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ไม่ว่าจะเป็นเซลล์หรือองค์ประกอบของเซลล์ เช่น โปรตีน (protein) ลิพิด (lipid) และดีเอ็นเอ (DNA) เป็นต้น ซึ่งก่อให้เกิดโรคหลายชนิด (Lobo *et al.*, 2010) สารพฤกษเคมี (Phytochemicals) เป็นสารสำคัญที่พืชสร้างขึ้นจากกระบวนการชีวสังเคราะห์เพื่อความอยู่รอด เช่น การป้องกันโรคและป้องกันศัตรูพืช เป็นต้น ซึ่งสารพฤกษเคมีอาจแบ่ง

ตามโครงสร้างของโมเลกุลเป็นกลุ่มสาร เช่น สเตอรอยด์ (Steroids) แอลคาลอยด์ (Alkaloids) เทอร์พีนอยด์ (Terpenoids) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) และแทนนิน (Tannins) โดยพืชแต่ละชนิดมีการสร้างสารพฤกษเคมีที่แตกต่างกันไปเป็นผลให้ฤทธิ์ทางชีวภาพแตกต่างกัน โดยเฉพาะสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน (Boonsong and Natedungta, 2014)

ดังนั้นผู้วิจัยมีความสนใจในการนำสารสกัดจากพรอพอลิสมาใช้ในการศึกษาสารพฤกษเคมี ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและพัฒนาเป็นโลชั่นที่มีส่วนผสมของพรอพอลิสที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ดีมาเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์โลชั่นเพื่อใช้ในการบำรุงผิว และเพื่อเป็นการเพิ่มคุณค่าให้กับวัตถุดิบที่มีในประเทศไทยและเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรในพื้นที่ (Buachoon and Sunthornsart, 2015)

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่างสารสกัด

พรอพอลิส

งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างพรอพอลิสของผึ้งชันโรงสายพันธุ์ *Geniotrigono thorocica* จากตำบลปะเสะยาว อำเภอสายบุรี จังหวัดปัตตานี ซึ่งตัวอย่างพรอพอลิสถูกสกัดด้วยวิธีรีฟลักซ์ (Reflux) ตามวิธีของ Pellati *et al.* (2013) และ Moreno *et al.* (2000) โดยนำพรอพอลิส 1 กรัม เติมน้ำเอทานอล 10 มิลลิตร แล้วรีฟลักซ์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 4000 รอบ เป็นเวลา 5 นาที ดูดส่วนที่เป็นของเหลวใสเหนือตะกอนออกแล้วระเหยด้วยเครื่องระเหยแบบลดความดันที่อุณหภูมิไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส และเก็บสารสกัดหยาดตั้งต้น (EE) ไว้รอการทดสอบต่อไป

2. การสกัดแยกพอลิฟีนอลด้วยตัวทำละลายเฮกเซน (Hexane) และเอทิลอะซิเตท (Ethyl Acetate)

ซึ่งสารสกัดหยาบตั้งต้น (EE) จากข้อ 1 มา 10 กรัม แล้วนำมาสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซนและเอทิลอะซิเตท ตามลำดับ โดยใช้ตัวทำละลายปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตัวทำละลายละ 3 ครั้ง นำส่วนที่เป็นของเหลวใสเหนือตะกอนออกของแต่ละตัวทำละลายมาระเหยด้วยเครื่องระเหยแบบลดความดัน จะได้สารสกัดหยาบส่วนเฮกเซน (HE) สารสกัดหยาบส่วนเอทิลอะซิเตท (EAE) และสารสกัดหยาบส่วนที่ไม่ละลาย (RE) เก็บสารสกัดหยาบไว้รอการทดสอบต่อไป

3. ตรวจสอบสารพฤษเคมีเบื้องต้น (Phytochemicals screening)

การทดสอบสารพฤษเคมีเบื้องต้นของสารสกัดหยาบตั้งต้น (EE) สารสกัดหยาบส่วนของเฮกเซน (HE) เอทิลอะซิเตท (EAE) และส่วนที่ไม่ละลาย (RE) ที่ได้จากพอลิฟีนอลของฝักรังไร โดยแบ่งการทดสอบสารทุติยภูมิ (Secondary metabolites) เป็น 9 กลุ่ม ได้แก่ แอลคาลอยด์ ฟลาโวนอยด์ แอนทราควิโนน คูมาริน ซาโปนิน แทนนิน เทอร์ปีนอยด์ สเตียรอยด์ และคาร์ดิแอกไกลโคไซด์ โดยอาศัยปฏิกิริยาการเกิดสีหรือตะกอน ทำตามวิธีของ Ayoola *et al.* (2008)

4. การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วย DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบพอลิฟีนอลด้วยวิธี DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) โดยทำตามขั้นตอนของ Moreno *et al.* (2000) ใช้วิตามินซีเป็นสารมาตรฐาน ($y=9.3627x + 0.0098$; $R^2 = 0.9999$) ที่ความเข้มข้น 0.625, 1.25, 2.5, 5 และ 10 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ในตัวทำละลายเอทานอลและความเข้มข้นของสารสกัดหยาบพอลิฟีนอลที่นำมาทดสอบอยู่ที่ 1000, 500, 250, 125 และ 62.5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ในตัวทำละลายเอทานอล ในการทดสอบผสมสารละลายมาตรฐานหรือสารละลายตัวอย่างปริมาณ 1.5 มิลลิลิตร กับสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 2.94 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองและตั้งไว้เป็นเวลา 15 นาที ในที่มืดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี-ยูวีวิสทิเบิล สเปกโตรโฟโต-มิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 516 นาโนเมตร โดยสารละลายมาตรฐานหรือสารละลายตัวอย่างที่ถูกทดสอบจะทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ ซึ่งมีเบลนค์ (Blank) เป็นเอทานอล ส่วนชุดควบคุมทำการทดสอบเช่นเดียวกับสารมาตรฐานและสารตัวอย่างแต่เปลี่ยนเป็นเอทานอลแทน ทำการบันทึกผลแล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การต้านอนุมูลอิสระและค่าความเข้มข้นที่สารมีประสิทธิภาพในการยับยั้ง (inhibition concentration 50: IC_{50}) โดยสมการการคำนวณเปอร์เซ็นต์การต้านอนุมูลอิสระคำนวณได้จากสมการข้างล่าง

$$\% \text{ inhibition} = [(Abs_{\text{control}} - Abs_{\text{sample}}) / Abs_{\text{control}}] \times 100$$

5. การวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลิกรวม

การวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลิกรวมของสารสกัดหยาบพอลิฟีนอล โดยทำตามขั้นตอนของ Mouhoubi-Tafnine *et al.* (2016) ซึ่งใช้แกลลิกเป็นสารมาตรฐาน ($y=0.0071x + 0.0588$; $R^2 = 0.9977$) ที่

ความเข้มข้น 6.25, 12.5, 25, 50 และ 75 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ในตัวทำละลายเมทานอล และความเข้มข้นของสารสกัดหยาบที่ 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ในการทดสอบผสมสารละลายมาตรฐานหรือสารละลายตัวอย่างปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร ผสมกับ

สารละลายฟอลินซีโอคัลท์ (Folin ciocalteu reagent) ความเข้มข้น 2 นอร์มัล ปริมาณ 2.5 มิลลิลิตร และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 7.5 โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตรและตั้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 750 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องยูวี-วิสทิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยสารละลายมาตรฐานหรือสารละลายตัวอย่างที่ถูกทดสอบจะทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ ซึ่งมีเบลงค์ (Blank) เป็นเอทานอล ส่วนชุดควบคุมทำการทดสอบเช่นเดียวกับสารมาตรฐานและสารตัวอย่างแต่เปลี่ยนเป็นเอทานอล จากนั้นทำการบันทึกผลและรายงานผลให้อยู่ในรูปของมิลลิกรัม แกลลิกต์ต่อกรัมของสารสกัดพรอพอลิส

6. กระบวนการเตรียมผลิตภัณฑ์โลชั่น

กระบวนการเตรียมผลิตภัณฑ์โลชั่นเริ่มจากการนำสารสกัดหยาบพรอพอลิสที่มีประสิทธิภาพการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ดีมาทำผลิตภัณฑ์โลชั่น ทำการประเมินคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ เช่น สี กลิ่น การแยกชั้นของเนื้อโลชั่น คุณสมบัติทางเคมีบางประการโดยวัดความเป็นกรด-ด่างและความคงตัวของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

6.1 ขั้นตอนการทำผลิตภัณฑ์โลชั่นบำรุงผิว

กาย

การเตรียมโลชั่นดัดแปลงจากวิธีของ Buachoon and Sunthornsart (2015) โดยมีวิธีการดังนี้

1. ชั่งสารตามปริมาณที่กำหนดตามสูตรของโลชั่น ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมโลชั่นผสมสารสกัดพรอพอลิส

Ingredients	Percentages
Phase A	
Propolis extract	x.xx
Water	x.xx
Tween 80	4.52
Phase B	
Stearic acid	5.00
Glyceryl monostearate	5.00
White bee wax	1.00
Span 80	3.84
Isopropyl myristate	3.48
Phase C	
Microcare PHC	0.16
Fragrance	1.00

2. ใส่สารที่เป็นเฟส A ได้แก่ Tween

80 สารสกัดจากพรอพอลิส และน้ำ ลงในบีกเกอร์

3. ใส่สารที่เป็นเฟส B ได้แก่ White

bee wax, Stearic acid, Glyceryl monostearate, Span 80, Isopropyl myristate ตามลำดับ รวมกันลงในบีกเกอร์

4. นำบีกเกอร์ในข้อ 2 และ ข้อ 3

ตั้งบน Water bath แล้วทำการวัดอุณหภูมิของสารละลาย โดยให้อุณหภูมิของสารละลายในบีกเกอร์ของเฟส A มีอุณหภูมิประมาณ 75 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของสารละลายในบีกเกอร์ของเฟส B มีอุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส คนสารละลายทั้งสองเฟสละลายจนหมดจนเป็นเนื้อเดียวกัน

5. เทสารในบีกเกอร์ไว้ภาคน้ำลง

ในภาคน้ำร้อน พร้อมคนผสมให้เข้ากันอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งอุณหภูมิของสารที่ผสมลงมาเหลือประมาณ 40 องศาเซลเซียส

6. จากนั้นเติมสารที่เป็นเฟส C ลง

ไปหลังสุด ได้แก่ Microcare PHC และกลั่น ที่ไว้นั้นที่อุณหภูมิห้องจะได้เป็นผลิตภัณฑ์โลชั่น โดยดำเนินการทดสอบ 3 ซ้ำ

6.2 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของ โลชั่น

นำโลชั่นที่ได้จากการเตรียมมาทดสอบ

คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การวัดค่าพีเอช การตรวจสอบประเภทของอิมัลชัน ความเป็นเนื้อเดียวกัน ความรู้สึกหลังการใช้ ผลของการทิ้งไว้ตามวิธีการของ Muthukumarasamy *et al.* (2016)

7. การทดสอบความคงตัวของโลชั่น

การทดสอบความคงตัวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำตามวิธีของ Phromyothin *et al.* (2016) โดยการเก็บรักษาโลชั่นไว้ที่อุณหภูมิ 30 ± 2 และ 4 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน 15 วัน 30 วัน ตามลำดับ จากนั้นนำมาวัดค่าพีเอช ประเภทของอิมัลชัน และทดสอบความคงสภาพในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบพรอพอลิสที่มีอยู่ในโลชั่นที่เก็บรักษาในช่วงเวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิ 30 ± 2 และ 4 ± 2 องศาเซลเซียส

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการสกัดสารสกัดหยาบจากพรอพอลิสด้วยวิธีรีฟลักซ์ (reflux method)

การสกัดสารสกัดหยาบพรอพอลิสด้วยวิธีรีฟลักซ์ ในอัตราส่วนของตัวอย่างพรอพอลิสกับตัวทำละลายเอทานอลที่ 1:10 ได้สารสกัดหยาบที่มีลักษณะเป็นสารเหนียว สีน้ำตาลเข้ม ให้ร้อยละสารสกัดอยู่ที่ 41.14 ของน้ำหนักตัวอย่าง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลผลิตร้อยละของสารสกัดหยาบพรอพอลิส

วิธีการสกัด	น้ำหนักสาร (กรัม)	ร้อยละ
รีฟลักซ์	41.14	41.14

2. ผลการสกัดแยกสารสกัดหยาบพรอพอลิสด้วยตัวทำละลาย

การสกัดแยกพรอพอลิสด้วยตัวทำละลายเฮกเซน และเอทิลอะซิเตท พบว่าสารสกัดหยาบส่วนเอทิลอะซิเตท (EAE) มีปริมาณร้อยละสารสกัดสูงสุด

ที่ 64.5 ส่วนสารสกัดหยาบส่วนเฮกเซน (HE) ร้อยละ 31.9 และสารสกัดหยาบส่วนที่ไม่ละลาย (RE) ในตัวทำละลายทั้งสองร้อยละ 3.6 ดังตารางที่ 3 สารสกัดหยาบพรอพอลิสจะละลายได้ดีในตัวทำละลายเอทิลอะซิเตท และละลายได้บางส่วนในเฮกเซน โดย

สมบัติการละลายของสารสกัดหยาบขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของสารตามสภาพขั้วของสารและของตัวทำละลาย ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าสารส่วนใหญ่เป็นสารที่มีสภาพขั้วต่ำถึงค่อนข้างมีขั้ว (Montes

et al., 2003) อาจเนื่องจากส่วนประกอบสำคัญของพรอพอลิสได้จากยางและเรซินจากพรรณพืชหลากหลายชนิด (Athikomkulchai, 2008)

ตารางที่ 3 ผลผลิตร้อยละการสกัดแยกพรอพอลิสด้วยตัวทำละลายทั้ง 3 ชนิด

สารสกัดหยาบ	น้ำหนักสาร (กรัม)	ร้อยละ
Hexane (HE)	3.19	31.9
Ethyl acetate (EAE)	6.45	64.5
Residue extract (RE)	0.36	3.6

3. ผลการตรวจสอบสารพฤกษเคมีเบื้องต้น

(Phytochemicals screening)

การทดสอบสารพฤกษเคมีเบื้องต้นของของสารสกัดหยาบ โดยแบ่งการทดสอบสารทุติยภูมิ (Secondary metabolites) เป็น 9 กลุ่ม ได้แก่ แอลคา

ลอยด์ ฟลาโวนอยด์ แอนทราควิโนน คูมาริน ซาโปนิน แทนนิน เทอร์ปีนอยด์ สเตียรอยด์ และคาร์ดิแอกไกลโคไซด์ โดยอาศัยปฏิกิริยาการเกิดสีหรือตะกอน สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบสารพฤกษเคมีเบื้องต้น

Test	Sample			
	Ethanol Extract (EE)	Hexane Extract (HE)	Ethyl acetate Extract (EAE)	Residue Extract (RE)
Alkaloids	-	-	-	-
flavonoids	+	+	+	+
Anthraquinones	-	-	-	-
Coumarins	+	+	+	+
Saponins	+	+	+	+
Tannins	-	-	-	-
Terpenoid	+	+	+	+
Steroids	+	+	+	+
Cardiac glycoside	+	+	+	+

หมายเหตุ เครื่องหมายบวก (+) แสดงว่าพบ เครื่องหมายลบ (-) แสดงว่าไม่พบ

จากผลการทดสอบสารพฤกษเคมีเบื้องต้นของสารสกัดหยาบพรอพอลิส พบว่าในสารสกัด

หยาบทั้ง 4 ชนิด ประกอบด้วยฟลาโวนอยด์ คูมาริน ซาโปนิน เทอร์ปีนอยด์ สเตียรอยด์ และคาร์ดิแอก

คโกลโคไซด์ เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของพรอพอลิสมีส่วนใหญ่เป็นสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ ได้แก่ ฟลาโวนส์ (flavones) และ ฟลาวาโนนส์ (flavanones) เป็นต้น ซึ่งพบได้มากในพืชองค์ประกอบที่ตรวจพบเหล่านี้ ส่วนหนึ่งมาจากพืชชนิดนั้นที่มีพฤติกรรมเก็บน้ำหวานจากเกสรดอกไม้มาใช้เป็นอาหารอีกทั้งยังเก็บยางเหนียวมาจากต้นไม้เพื่อใช้อุดรูรั่วของรัง เป็นต้น (Athikomkulchai, 2008)

4. ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดพรอพอลิสของพืชชันโรงสายพันธุ์ *Geniotrigono thorocica* ด้วยวิธี DPPH ที่ได้จากสารสกัดหยาบตั้งต้น สารสกัดหยาบส่วนของเฮกเซน สารสกัดหยาบส่วนของเอทิล อะซิเตท และสารสกัดหยาบส่วนของเอทานอลจากพรอพอลิสของชันโรง โดยใช้สารละลายวิตามินซีเป็นสารละลายมาตรฐาน

ตารางที่ 5 ค่า IC_{50} ของสารสกัดหยาบพรอพอลิสต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

Samples and standard	IC_{50} ($\mu\text{g/ml}$) $\pm$ SD*
Ethanol Extract (EE)	292.95 $\pm$ 8.85 ^c
Hexane Extract (HE)	>1000
Ethyl acetate (EAE)	262.43 $\pm$ 8.54 ^b
Residue Extract (RE)	>1000
Vitamin C	5.341 $\pm$ 0.25 ^a

หมายเหตุ *ความแตกต่างของตัวอักษรภาษาอังกฤษบ่งชี้ถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p value < 0.05)

ในการทดสอบพบว่าความเข้มข้นของสารที่มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระที่ร้อยละ 50 (IC_{50}) ที่ดีที่สุดคือสารสกัดหยาบส่วนของเอทิล อะซิเตท (EAE) อยู่ที่ 262.43 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร รองลงมาคือสารสกัดหยาบตั้งต้น (EE) อยู่ที่ 292.95 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p value > 0.05) เมื่อเปรียบเทียบกับวิตามินซีพบว่าสารสกัดหยาบทั้งสองยังมีประสิทธิภาพที่น้อยกว่าส่วนสารสกัดหยาบส่วนของเฮกเซน (HE) และสารสกัดหยาบส่วนที่ไม่ละลาย (RE) มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่ต่ำโดยให้ค่า IC_{50} >1000

ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ดังตารางที่ 5 ดังนั้นสารสกัดหยาบส่วนของเอทิล อะซิเตท (EAE) จึงถูกเลือกเป็นส่วนผสมในการพัฒนาโลชั่นผสมสารสกัดพรอพอลิส

5. ผลการวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลิกรวม

การวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลิกรวม ดังตารางที่ 6 ที่ได้จากสารสกัดหยาบตั้งต้น สารสกัดหยาบส่วนของเฮกเซน สารสกัดหยาบส่วนของเอทิลอะซิเตท และสารสกัดหยาบส่วนของเอทานอลจากพรอพอลิสของชันโรง

ตารางที่ 6 ปริมาณฟีนอลิกรวมของสารสกัดพรอพอลิส

Sample	mg GAE/ g extract
Ethanol Extract (EE)	35.21±0.93 ^a
Hexane Extract (HE)	43.94±2.21 ^b
Ethyl acetate (EAE)	60.13±2.28 ^c
Residue Extract (RE)	38.22±4.85 ^a

หมายเหตุ *ความแตกต่างของตัวอักษรภาษาอังกฤษบ่งชี้ถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p value < 0.05)

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกที่ตรวจพบในตัวอย่างพรอพอลิสที่ได้จากสารสกัดหยาบตั้งต้น (EE) และจากการสกัดหยาบอีก 3 ชนิด ได้แก่สารสกัดหยาบส่วนของเฮกเซน (EH) สารสกัดหยาบส่วนของเอทิลอะซิเตท (EAE) และสารสกัดหยาบส่วนที่ไม่ละลาย (RE) จากพรอพอลิสของชันโรงพบว่าสารสกัดหยาบ EAE มีปริมาณฟีนอลิกรวมสูงที่สุดอยู่ที่ 60.13 มิลลิกรัม แกลลิกต่อกรัมของสารสกัดพรอพอลิส ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับสารสกัดตัวอื่นๆ รองลงมาคือสารสกัดหยาบ EH เท่ากับ 43.94 มิลลิกรัม แกลลิกต่อกรัมของสารสกัดพรอพอลิสและปริมาณฟีนอลิกต่ำที่สุดคือสารสกัดหยาบ RE อยู่ที่ 38.22 มิลลิกรัม แกลลิกต่อกรัมของสารสกัดหยาบ และสารสกัดหยาบ EE เท่ากับ 35.21 มิลลิกรัม แกลลิกต่อกรัมของสารสกัดพรอพอลิส ซึ่งมีค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ในงานวิจัยของ Piluzza and Bullitta (2011) ได้ระบุไว้ว่าปริมาณฟีนอลิกรวมมีผลต่อ

ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่สารสกัดหยาบส่วน EAE ให้ค่าปริมาณฟีนอลิกรวมสูงจึงให้ค่าการต้านอนุมูลอิสระที่ดี และจากผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณฟีนอลิกรวมของสารสกัดหยาบพรอพอลิสพบว่าสารสกัดหยาบส่วนด้วยเอทิลอะซิเตท (EAE) ให้ค่าความเข้มข้นที่สารมีประสิทธิภาพในการยับยั้ง (IC_{50}) และมีปริมาณฟีนอลิกรวมสูงที่สุด จึงนำมาเป็นส่วนผสมในการเตรียมผลิตภัณฑ์โลชั่น

6. ผลการเตรียมผลิตภัณฑ์โลชั่น

การเตรียมผลิตภัณฑ์โลชั่นได้เตรียมออกเป็น 5 สูตร โดยแต่ละสูตรจะเติมสารสารสกัดที่ต่างกัน คือ สูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 5 โดยเปอร์เซ็นต์ของสารสกัดหยาบพรอพอลิสในแต่ละสูตรอยู่ที่ 0.01% 0.05% 0.1% 0.15% 0.2%ตามลำดับ โลชั่นทั้ง 5 สูตรจะต้องทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ แสดงผลดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของการเตรียมโลชั่น ทั้ง 5 สูตร

สูตรที่	พารามิเตอร์				
	ค่า pH	ประเภทอิมัลชัน	ความเป็นเนื้อเดียวกัน	ความรู้สึกหลังการใช้	Loss on drying
F1	5.86	O/W	เป็นเนื้อเดียวกัน	ซึมซาบง่ายและลื่นไหลง่าย ร้อยละ 25	0.25%
F2	5.53	O/W	เป็นเนื้อเดียวกัน	ซึมซาบง่ายและลื่นไหลง่าย ร้อยละ 35	0.22%
F3	5.53	O/W	เป็นเนื้อเดียวกัน	ซึมซาบง่ายและลื่นไหลง่าย ร้อยละ 55	0.21%
F4	5.51	O/W	เป็นเนื้อเดียวกัน	ซึมซาบง่ายและลื่นไหลง่าย ร้อยละ 10	0.27%
F5	5.51	O/W	เป็นเนื้อเดียวกัน	ซึมซาบง่ายและลื่นไหลง่าย ร้อยละ 30	0.28%

หมายเหตุ ค่า pH ของโลชั่นทั้ง 5 สูตรพบว่า ค่า pH เทียบตามมาตรฐานของอุตสาหกรรมเอส 15-2561 ต้องอยู่ระหว่าง 3.5-7.5

จากการนำโลชั่น ทั้ง 5 สูตร โดยให้นักศึกษาและบุคคลทั่วไปได้ทดลองใช้ 20 คน ในจำนวนผู้ทดลองใช้ ทั้ง 20 คน ชอบสูตร F1 จำนวน 5 คน คิดเป็นร้อยละ 25 ชอบสูตร F2 จำนวน 7 คน คิดเป็นร้อยละ 35 สูตร F3 จำนวน 11 คน คิดเป็นร้อยละ 55 สูตร F4 จำนวน 2 คน คิดเป็นร้อยละ 10 และสูตร F5 จำนวน 6 คน คิดเป็นร้อยละ 30 จากการประเมินความพึงพอใจพบว่าสูตรที่ดีที่สุด คือ สูตร F3 ซึ่งเกณฑ์ที่การให้คะแนนในแต่ละสูตรจะเป็นการทดสอบทางกายภาพของโลชั่น เช่น การเป็นเนื้อเดียวกัน การซึมซาบง่าย ลื่นไหลง่าย และการล้างออก เป็นต้น

7. ผลการทดสอบความคงสภาพของโลชั่น

ผลการทดสอบความคงสภาพต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยการเก็บรักษาโลชั่นไว้ที่

อุณหภูมิ 30 ± 2 และ 4 ± 2 °C เป็นเวลา 7 วัน 15 วัน 30 วัน ตามลำดับ พบว่าอิมัลชันยังคงมีความคงตัวไม่เกิดการแยกชั้น มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ค่าพีเอชมีค่าอยู่ในช่วง 6.12-6.50 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมเอส 15-2561 (Thai Industrial Standards Institute, 2018) ซึ่งถือว่ามีความเหมาะสมกับสภาพผิว ซึ่ง Phromyothin *et al.* (2016) ได้ทำการทดสอบความคงตัวต่อการเปลี่ยนแปลง โดยเก็บรักษาโลชั่นไว้ที่อุณหภูมิ 4 ± 2 และ 25 ± 2 °C เป็นเวลา 7 วัน 15 วัน และ 30 วัน ตามลำดับ พบว่าในระยะเวลาต่างๆ อิมัลชันไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ขนาดของอนุภาคอิมัลชันทั้งก่อนและหลังทำการทดสอบมีขนาดใกล้เคียงกับก่อนทำการทดสอบไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบความคงสภาพ โลชั่นของสูตรที่ 3 ที่มีส่วนผสมสารสกัดจากพรอพอลิส 0.1 เปอร์เซ็นต์ต่อการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 30 ± 2 และ 4 ± 2 °C ในการเก็บรักษาที่ระยะเวลา 7 วัน 15 วัน และ 30 วัน

ระยะเวลา	สถานะ	ชนิดของสาร	IC ₅₀ (µg/ml) ±SD*
วันแรก	-	A	>1000
		B	507.92±0.29 ^a
7 วัน	อุณหภูมิ 30 °C	A	>1000
		B	715.76±4.13 ^c
	อุณหภูมิ 4 °C	A	>1000
		B	578.24±11.90 ^b
15 วัน	อุณหภูมิ 30 °C	A	>1000
		B	929.32±54.51 ^e
	อุณหภูมิ 4 °C	A	>1000
		B	762.55±4.39 ^d
30วัน	อุณหภูมิ 30 °C	A	>1000
		B	>1000
	อุณหภูมิ 4 °C	A	>1000
		B	929.32±54.51 ^e

หมายเหตุ สาร A = Lotion without Extract

สาร B = Lotion with Extract 0.1%

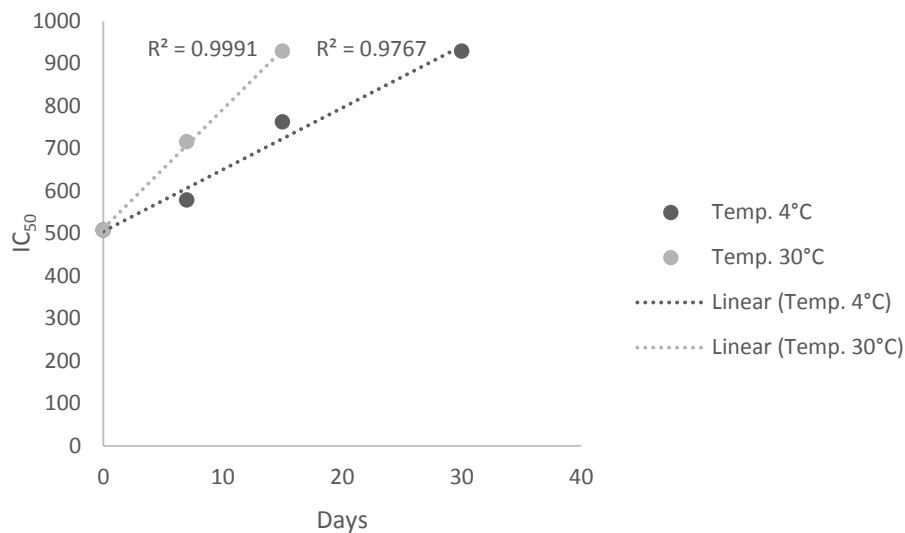
* ความแตกต่างของตัวอักษรภาษาอังกฤษบ่งชี้ถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p value < 0.05)

ผลการทดสอบความคงสภาพในการต้านอนุมูลอิสระของโลชั่นที่ปราศจากส่วนผสมสารสกัดหยาบพรอพอลิส (A) และมีส่วนผสมสารสกัดหยาบพรอพอลิส (B) พบว่าโลชั่น A ให้ค่าความเข้มข้นของสารที่มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระที่ร้อยละ 50 (IC₅₀) ที่ต่ำอยู่ที่ >1000 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม ตั้งแต่วันแรกจนครบ 30 วัน ทั้งที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 30 และ 4 °C สำหรับโลชั่น B ซึ่งผสมสารสกัดพรอพอลิส 0.1 เปอร์เซ็นต์ พบว่าวันแรกให้ค่า IC₅₀ อยู่ที่ 507.92 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม เมื่อเก็บเป็นระยะเวลา 7 และ 15 ที่อุณหภูมิ 30 °C อยู่ที่ 715.76 และ 929.32 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม ซึ่งแตกต่างอย่าง

มีนัยสำคัญ (p value > 0.05) และเมื่อเก็บเป็นระยะเวลา 30 วัน ที่อุณหภูมิดังกล่าวให้ค่า IC₅₀ >1000 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม ส่วนในการเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C ระยะเวลา 7, 15 และ 30 วัน พบว่า ค่า IC₅₀ อยู่ที่ 578.24, 762.55 และ 929.32 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการทดสอบการต้านอนุมูลอิสระของโลชั่น B ชี้ให้เห็นว่าสูตรที่มีส่วนผสมของสารสกัดเป็นปัจจัยสำคัญในการต้านอนุมูลอิสระ นอกจากนี้เมื่อเก็บรักษาโลชั่น B ที่ช่วงเวลาต่างๆ พบว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 30 ± 2 และ 4 ± 2 °C แสดงให้เห็นว่า

ประสิทธิภาพในการยับยั้งลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นโดยค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นของโลชันที่เก็บที่อุณหภูมิ 30 ± 2 และ 4 ± 2 °C มีความสัมพันธ์เชิงบวก ดังภาพที่ 1 แต่อย่างไรก็ตามหากต้องการเก็บรักษาโลชันเพื่อให้มีความคงสภาพ

ต่อประสิทธิภาพในการยับยั้งควรเก็บที่อุณหภูมิ 4 ± 2 °C เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่า IC_{50} บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการยับยั้งลดลง ดังนั้นจึงควรเก็บรักษาโลชันไว้ที่อุณหภูมิ 4 ± 2 °C หรืออาจเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30 °C ตามตารางที่ 8



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์เชิงเส้น (correlation coefficient :R) ระหว่างค่า IC_{50} ในการยับยั้งอนุมูลอิสระและระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 ± 2 และ 4 ± 2 °C

สรุป

พ ร อ พ อ ลิส ของ ชัน โร ง ส า ย พ ัน ธุ์ *Geniotrigona thoracica* สกัดด้วยวิธีฟลักซ์ในตัวทำละลายเอทานอล ได้สารสกัดหยาบพ ร อ พ อ ลิส ตั้ง ต้น คิดเป็นร้อยละ 41.142 โดยทำการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายเฮกเซนและ เอทิลอะซิเตท สารสกัดหยาบที่ทำการสกัดแยกนั้นละลายได้ดีในตัวทำละลายเอทิลอะซิเตท สามารถสกัดแยกสารได้ถึงร้อยละ 64.5

ผลการตรวจสอบสารพฤษเคมีเบื้องต้นของสารสกัดหยาบทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ สารสกัดหยาบตั้งต้น สารสกัดหยาบส่วนเฮกเซน เอทิลอะซิเตท และส่วนที่ไม่ละลาย ตรวจสอบสารพฤษเคมีเบื้องต้นพบว่าในสารสกัดหยาบพ ร อ พ อ ลิส ทั้ง 4 ชนิด จะพบ

พบฟลาโวนอยด์ คูมาริน ซาโปนิน เทอร์ปีนอยด์ สเตียรอยด์ และคาร์ดิแอกไกลโคไซด์

ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH พบว่า สารสกัดหยาบที่ทำการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายเอทิลอะซิเตท มีฤทธิ์การยับยั้งสูงสุด อยู่ที่ 262.43 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกในสารสกัดหยาบทั้ง 4 ชนิด พบว่าสารสกัดหยาบที่ผ่านการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายเอทิล อะซิเตท มีปริมาณฟีนอลิกสูงสุด อยู่ที่ 60.13 มิลลิกรัมแกลลิกต่อกรัมของสารสกัดพ ร อ พ อ ลิส รองลงมา คือ สารสกัดหยาบเฮกเซน (EAE) และปริมาณฟีนอลิกต่ำสุดคือสารสกัดหยาบส่วนไม่ละลาย (RE) และ สารสกัดหยาบตั้งต้น (EE)

ผลการเตรียมผลิตภัณฑ์โลชั่นเตรียมจากสารสกัดหยาบพรอพอลิสที่ให้ฤทธิ์การยับยั้งสูงสุด โดยเตรียมจากสารสกัดหยาบส่วนเอทิลอะซิเตท ที่ผ่านการประเมินความพึงพอใจจากผู้ทดลองใช้ทั้ง 20 ท่าน พบว่า สูตรที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ สูตรที่ 3 คิดเป็นร้อยละ 55 ค่าพีเอชอยู่ที่ 5.58 มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ลื่นไหลง่ายและ ซึมซาบง่าย อิมัลชันเป็นประเภท O/W และผลการทดสอบความคงตัวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยการเก็บรักษาโลชั่นไว้ที่อุณหภูมิ 30 ± 2 และ 4 ± 2 °C เป็นเวลา 7 วัน 15 วัน และ 30 วัน ตามลำดับ พบว่าอิมัลชันยังคงมีความคงตัวดีไม่เกิดการแยกชั้น มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ค่าพีเอชมีค่าอยู่ในช่วง 6.12-6.50 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมเอส 15-2561 (Thai Industrial Standards Institute, 2018) เหมาะกับสภาพผิว และเมื่อไปทดสอบฤทธิ์การยับยั้งในระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ พบว่า โลชั่นที่ผสมสารสกัด 0.1 เปอร์เซ็นต์ นั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 30 ± 2 และ 4 ± 2 °C แสดงให้เห็นว่าค่า IC_{50} เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาและที่อุณหภูมิทำให้ค่า IC_{50} น้อยกว่า แต่อย่างไรก็ดีหากต้องการเก็บรักษาโลชั่นเพื่อให้มีความคงสภาพต่อประสิทธิภาพในการยับยั้งควรเก็บที่อุณหภูมิ 4 ± 2 °C หรือที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30 °C และบริเวณที่พื้นแสงแดด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ที่เอื้อเฟื้อวัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ สารเคมีต่างๆ และสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Athikomkulchai, S. 2008. Propolis: A Gift from Nature. **Thai Pharmaceutical and Health Science Journal** 3(2): 286-295. (in Thai)
- Ayoola, G.A., Coker, H.A.B., Adesegun, S.A., Bello, A.A., Obaweya, K., Ezennia, E.C., and Atangbayila, T.O. 2008. Phytochemical screening and antioxidant activities of some selected medicinal plants used for malaria therapy in southwestern Nigeria. **Tropical Journal of Pharmaceutical Research** 7(3): 1019-1024.
- Boonsong, P. and Natedungta, W. 2014. Radical scavenging activity and phytochemical compositions of some tropical fruit plant leaves. **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok** 24(3): 624-633. (in Thai)
- Buachoon, N. and Sunthomsart, P. 2015. Development of lotion from *Albizia myriophylla* Benth cured extracts as antioxidant. **VRU Research and Development Journal Science and Technology** 10(2): 97-106. (in Thai)
- Lobo, V., Patil, A., Phatak, A. and Chandra, N. 2010. Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. **Pharmacognosy Reviews** 4(8): 118-126.
- Montes, I., Lai, C. and Sanabria, D. 2003. Like dissolves like: A classroom demonstration and a guided-inquiry experiment for organic chemistry. **Journal of Chemical Education** 80(4): 447-449.

- Moreno, M., Isla, M., Sampietro, A. and Vattuone., M. 2000. Comparison of the free radical-scavenging activity of propolis from several regions of Argentina. **Journal of Ethnopharmacology** 71(1-2): 109-114.
- Mouhoubi-Tafnine, Z., Ouchemouckh, S. and Tamendjari, A. 2016. Antioxydantactivity of some algerian honey and propolis. **Industrial Crops and Products** 88(2016): 85-90.
- Muthukumarasamy, R., Ilyana, A., Fithriyani, N., Najihah, N. A., Asyiqin, N. and Sekar, M. 2016. Formulation and evaluation of natural antioxidant cream comprising methanolic peel extract of *Dimocarpus longan*. **International Journal of Pharmaceutical and Clinical Research** 8(9): 1305-1309.
- Pellati, F., Prencipe, F.P., Bertelli, D. and Benvenuti, S. 2013. An efficient chemical analysis of phenolic acids and flavonoids in raw propolis by microwave-assisted extraction combined with high-performance liquid chromatography using the fused-core technology. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis** 81-82: 126-132.
- Piluzza, G. and Bullitta, S. 2011. Correlations between phenolic content and antioxidant properties in twenty-four plant species of traditional ethnoveterinary use in the Mediterranean area. **Pharmaceutical Biology** 49(3): 240-247.
- Thai Industrial Standards Institute (TISI). 2018. **Herbal Body Cream/Lotion Product**. THAI SMEs STANDARD 15-2018. Available Source: <https://www.tisi.go.th/assets/website/pdf/tiss/15-2561.pdf>, February 26, 2019. (in Thai)

การออกแบบและทดลองผลิตเก้าอี้พักผ่อนจากวัสดุผสมมูลช้าง

Design and Experimental Production of Easy Chair from Composite Material of Elephant Dung

ตระกูลพันธ์ พัทธเมธา *

Tragoonphan Patcharametha *

Received: 3 March 2020, Revised: 23 June 2020, Accepted: 16 September 2020

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์ เพื่อทดลองการผลิตเก้าอี้พักผ่อนจากวัสดุผสม (Composites) ระหว่างวัสดุหลัก (Matrix) กับวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) จากมูลช้าง เพื่อทดสอบความแข็งแรงของเก้าอี้จากวัสดุผสมมูลช้าง และเพื่อออกแบบเก้าอี้พักผ่อนและสร้างต้นแบบจากวัสดุผสมมูลช้าง เครื่องมือในการวิจัยประกอบด้วย 1) แบบบันทึกผลการทดลองการผลิตเก้าอี้จากวัสดุผสมมูลช้าง 2) เครื่องทดสอบความสามารถในการรับแรงกด 3) แบบประเมินผลแบบร่าง 4) แบบประเมินผลผลิตภัณฑ์ต้นแบบ การวิเคราะห์ข้อมูลใช้ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยสรุปได้ 4 ส่วน ดังนี้ 1) ผลการทดลองการผลิตเก้าอี้จากวัสดุผสมมูลช้าง พบว่า (1) ได้สูตรวัสดุผสม สัดส่วนโดยน้ำหนัก (กรัม) 2 : 2 : 1 : 5 (กาวลาเท็กซ์ : ปูนปลาสเตอร์ : เยื่อมูลช้าง : น้ำ) (2) ได้เก้าอี้ ขนาดความกว้าง 413 มม. ความยาว 406 มม. ความสูง 460 มม. (3) ต้นทุนวัสดุในการผลิตเก้าอี้ 344.70 บาท 2) ผลการทดสอบความแข็งแรงของเก้าอี้ พบว่า ได้ค่าเฉลี่ยการรับแรงกดสูงสุดจนเกิดการวิบัติของชิ้นงานเก้าอี้ 603.77 กิโลกรัม ส่วนชิ้นงานเก้าอี้พลาสติก รับแรงกดสูงสุดจนเกิดการวิบัติ 569.01 กิโลกรัม 3) ผลการประเมินแบบร่างเก้าอี้พักผ่อนจากวัสดุผสมมูลช้าง พบว่า ความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และออกแบบเครื่องเรือน ที่มีต่อแบบร่างเก้าอี้พักผ่อน มีค่าเฉลี่ยโดยรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดี ($\bar{X}=4.20$) จำแนกเป็นรายข้อมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดีทุกข้อ ผลการประเมินผลิตภัณฑ์ต้นแบบ พบว่า มีค่าเฉลี่ยโดยรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดี ($\bar{X}=4.41$) จำแนกเป็นรายข้อมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดีถึงดีมากทุกข้อ

คำสำคัญ: เก้าอี้พักผ่อน, มูลช้าง, วัสดุผสม

สาขาวิชาออกแบบอุตสาหกรรม คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เลขที่ 95 ถนนชูปเปอร์ไฮเวย์เชียงใหม่-ลำปาง ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Program in Industrial Design, Faculty of Arts and Architecture, 95 Chiangmai-Lampang Super Highway Road, Chang Phueak, Muang, Chiang Mai 50300, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): hounktp@gmail.com

ABSTRACT

The research aimed to experiment on the production of an easy chair formed by composite materials, to test the strength of the chair, to design and make a prototype. The data were collected by 1) recording of experimental results 2) compression testing machine, and 3) evaluation of design and prototype products. The data were analyzed and expressed as means and standard deviations. The results were as follows: 1) The experimental results for the chair made from composite materials showed (1) material formula mixed by weight (grams) 2 : 2 : 1 : 5 (latex adhesive: plaster: fibers of elephant dung: water), (2) composite materials chair with a width of 413 mm, a length of 406 mm, and a height 460 mm, and (3) material costs for the manufacture of chair being 344.70 baht. 2) The results of the chair's strength test showed that the average maximum load on the chair was 603.77 kg and the plastic chair 569.01 kg. 3) The design evaluation results indicated that the experts agreed highly on both the overall and individual items concerning product and furniture design ($\bar{x}=4.20$). The prototype assessment showed a good level of satisfaction in the overall item, and good to very good levels of satisfaction were found in individual items ($\bar{x}=4.41$).

Key words: easy chair, elephant dung, composite material

บทนำ

ในปัจจุบันกระแสของผลิตภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อม (Eco Product) หรือผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-Friendly Product) กำลังได้รับความสนใจจากทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสหภาพยุโรปซึ่งมีอัตราขยายตัวในช่วง 10 ปี ที่ผ่านมากินกว่า 400 เท่า เพราะผลิตภัณฑ์ดังกล่าวนอกจากจะตอบสนองความต้องการด้านการงานแล้วยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การพัฒนาตลาดผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมส่วนหนึ่งมาจากการสร้างแนวคิดใหม่ๆ ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนารูปแบบผลิตภัณฑ์ การลดการใช้สารเคมีในกระบวนการผลิต การลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในทุกขั้นตอนของธุรกิจ การลงทุนใช้เทคโนโลยีที่ช่วยประหยัดพลังงาน การหักเปอร์เซ็นต์ของรายได้เพื่อนำไปดูแลสิ่งแวดล้อม และการออกตราสัญลักษณ์ฉลากเพื่อรับรองสินค้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น

ผลิตภัณฑ์อาหาร เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน เครื่องสำอาง เฟอร์นิเจอร์และของตกแต่ง เป็นต้น (RYT9, 2020) และศูนย์วิจัยธนาคารออมสิน (GSB Research, 2020) ได้กล่าวเพิ่มเติมว่า พฤติกรรมผู้บริโภคในปัจจุบันได้ให้ความสำคัญในเรื่องสิ่งแวดล้อมมากขึ้น การออกแบบผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เฟอร์นิเจอร์จึงเป็นที่นิยมอย่างต่อเนื่อง โดยคำนึงถึงความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ผสมผสานกับดีไซน์แปลกใหม่และเน้นใช้วัสดุที่ย่อยสลายได้ นอกจากนี้ผลกระทบด้านการขาดแคลนวัตถุดิบทรัพยากรไม้ต่อผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ ซึ่ง วรรณ อุ่นจิตติชัย (Unchittichai, n.d.) กล่าวว่า สภาพปัญหาด้านทรัพยากรป่าไม้ที่จำเป็นต้องลดการใช้ไม้ธรรมชาติในประเทศเพื่อรอการฟื้นฟูพื้นที่ป่าให้เพียงพอจนเกิดความสมดุลต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน ในขณะที่ความต้องการใช้ไม้แนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามการเติบโตของปริมาณประชากรและเศรษฐกิจ การ

นำวัสดุชีวภาพที่เป็นเศษเหลือทางการเกษตรอื่นที่มีศักยภาพมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนไม้จากธรรมชาติ จึงมีบทบาทมากขึ้น

ในขณะเดียวกันพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย จังหวัดเชียงใหม่ถือเป็นแหล่งพื้นที่การท่องเที่ยวและเป็นศูนย์กลางการผลิตงานหัตถกรรมที่มีชื่อเสียงของภาคเหนือ โดยเฉพาะการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและธรรมชาติมีสภาพแวดล้อมบรรยากาศของหุบเขาและสายน้ำ โดยเฉพาะธุรกิจปางช้างได้เปิดให้บริการนักท่องเที่ยวชาวไทยและชาวต่างชาติได้มาเที่ยวชมการแสดงของช้างไทยและร่วมทำกิจกรรมของปางช้าง ซึ่งมีปางช้างที่เปิดให้บริการจำนวนมาก เช่น ปางช้างแม่แตง ปางช้างแม่แตง ปางช้างโชคชัย บ้านช้างไทย เป็นต้น คุณเสถียร ใจคำ (สัมภาษณ์วันที่ 10 มกราคม 2559) อดีตนายกองค์การบริหารส่วนตำบลกีดช้าง อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ กล่าวว่า ปัจจุบันจำนวนประชากรช้างในตำบลกีดช้างมีเกือบ 400 เชือก ใช้ในกิจกรรมต่างๆ ในปางช้าง ได้แก่ การแสดงต่างๆ ของช้าง บริการนั่งช้างให้นักท่องเที่ยว รวมถึงการมีส่วนร่วมในกิจกรรมการเลี้ยงช้าง ดูแลช้าง อาบน้ำให้ช้าง ซึ่งทางปางช้างต่างๆ จะต้องดูแลและให้อาหารช้างในแต่ละวันหลายพันกิโลกรัม ได้แก่ หญ้าเนเปียร์ ต้นข้าวโพด และมีอาหารเสริม เช่น ถั่วและอ้อย เป็นต้น ในแต่ละวันมีการขบถมูลช้างจำนวนมากเฉลี่ยต่อวันประมาณ 6,000 กิโลกรัม ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมต่อชุมชน ด้านน้ำเสีย กลิ่น และหมอกควันจากการเผามูลช้าง (Sasujit, 2013) มูลช้างเหล่านี้บางส่วนสามารถนำไปหมุนเวียนใช้ในการผลิตปุ๋ยหมัก แก๊สชีวภาพ และกระดาศมูลช้าง และ TCDCCONNECT DEBUT (2018) ได้กล่าวเพิ่มเติมว่า กระดาศจากมูลช้าง หนึ่งในวิธีการเพิ่มมูลค่าจากของเสียที่เก็บได้จากปางช้าง ในแต่ละวันช้างจะขบถของเสียเป็นจำนวน

มาก โดยใช้ทักษะการออกแบบเป็นเครื่องมือในการต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์เชิงอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมด้วยการนำมูลช้างมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เพิ่มมูลค่าให้กับของเสียและสร้างประโยชน์ให้กับชุมชน เป็นการสร้างรายได้ให้กับท้องถิ่น รวมถึงเป็นการช่วยลดของเสียและช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมอีกด้วย อย่างไรก็ตาม มูลช้างในธุรกิจการท่องเที่ยวปางช้าง ตำบลกีดช้าง อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ก็ยังมีปริมาณค่อนข้างมากและมีผลกระทบต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อม แนวคิดการนำมูลช้างกลับมาใช้ให้เกิดคุณค่าเป็นผลิตภัณฑ์ชุมชน เป็นแนวคิดการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Economic and Ecological Design) คือ กระบวนการที่ผนวกแนวคิดด้านเศรษฐกิจและด้านสิ่งแวดล้อมเข้าไปในขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์โดยพิจารณาตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในแต่ละขั้นตอนของการพัฒนาผลิตภัณฑ์และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไปพร้อมๆ กัน ทำให้ส่งผลดีต่อธุรกิจชุมชน และสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นแนวทางไปสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน (Mungcharoen, 2005) ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยเห็นประเด็นปัญหาดังกล่าว จึงควรมีการศึกษาและทดลองผลิตเก้าอี้พักผ่อนจากวัสดุผสมมูลช้างเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำวัสดุมูลช้างไปเพิ่มมูลค่าเชิงพาณิชย์ในงานอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ นอกจากนี้ยังนำองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยนำไปถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับชุมชน เพื่อสร้างอาชีพสร้างรายได้ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วิธีการวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 1) ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณและลักษณะของมูลช้างในปางช้าง 2) ศึกษาวัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิต 3) ศึกษาการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุผสมด้วยวิธีแบบอัดเย็น (Cold Molding) และนำมา

ขึ้นรูปแก้วี้อัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ยางซิลิโคนครอบด้วยไฟเบอร์กลาส 4) ทฤษฎีการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ 5) ทฤษฎีด้านปัจจัยที่มีผลต่องานออกแบบของ Boonvong (1996) 6) ศึกษาหลักการออกแบบเครื่องเรือน (แก้วี้อัดขึ้นรูป) และ 7) ศึกษาการทดสอบความแข็งแรงของแก้วี้อัดขึ้นรูป

ขั้นตอนที่ 2 1) กำหนดประชากรและกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง ได้แก่ 1.1) ตัวอย่างข้อมูลช่างจากปางช้างแม่ตะมาน 1.2) วัสดุผสม คือ วัสดุหลัก (Matrix) ได้แก่ กาวลาเท็กซ์ (ATM - A 9000) และปูนปลาสเตอร์ไทยสงะ (ตรามือ) การเลือกวัสดุที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมพิจารณาจากต้นทุนการผลิตที่ต่ำ ได้แก่ ราคา ความแข็งแรง มีน้ำหนักเบาเมื่อแห้งตัวแล้วให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิต และวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) ได้แก่ เชื่อมูลช้าง และคาน้ำพลาสติก 1.3) กระบวนการผลิตแก้วี้อัดขึ้นรูปจากวัสดุผสมมูลช้าง (การเตรียมวัสดุผสมมูลช้างและการขึ้นรูปแก้วี้อัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ยางซิลิโคนครอบด้วยไฟเบอร์กลาส) 2) สร้างเครื่องมือวิจัยที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูลแบบมีโครงสร้างที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นเอง ได้แก่ 2.1) แบบบันทึกผลการทดลองการผลิตแก้วี้อัดขึ้นรูปจากวัสดุผสมมูลช้าง 2.2) แบบประเมินผลแบบร่างแก้วี้อัดขึ้นรูปสำหรับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และการออกแบบเครื่องเรือน 2.3) แบบบันทึกผลการทดสอบความแข็งแรงของแก้วี้อัดขึ้นรูปด้วยเครื่องทดสอบแรงกด 2.4) แบบประเมินผลผลิตภัณฑ์ต้นแบบแก้วี้อัดขึ้นรูปสำหรับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และการออกแบบเครื่องเรือน

ขั้นตอนที่ 3 1) การเตรียมวัสดุผสมมูลช้างเพื่อนำมาทดลองการขึ้นรูปแก้วี้อัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ยางซิลิโคน 2) การสร้างแม่พิมพ์ยางซิลิโคนครอบด้วยไฟเบอร์กลาสจากต้นแบบแก้วี้อัดขึ้นรูปพลาสติก ของบริษัทสหชัยโปรโมชัน จำกัด เลขที่ 224, 226 ถนนเจริญนคร

แขวงคลองตันใต้ เขตคลองสาน กรุงเทพฯ เพื่อใช้ในการอัดขึ้นรูปแก้วี้อัดขึ้นรูปจากวัสดุผสมมูลช้าง 3) การทดลองนำสูตรวัสดุผสมมูลช้างอัดขึ้นรูปแก้วี้อัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ยางซิลิโคนครอบด้วยไฟเบอร์กลาส ให้มีความหนาของชิ้นงาน 2 ซม. ภายในเสริมคาน้ำพลาสติก จำนวน 3 ชั้น 4) การทดสอบความสามารถในการรับแรงกด (Compression) ของชิ้นงานจนเกิดการวิบัติ ด้วยเครื่องทดสอบ Baldwin UTM Cap:100Tf SN:200HVL-1034 Div:1kgf และใช้สมการปรับแก้แรงกด $y = 1.0428x - 67.10$ โดยนำแก้วี้อัดขึ้นรูปจากวัสดุผสมมูลช้าง ขนาดความกว้าง 413 มม. ความยาว 406 มม. ความสูง 460 มม. จำนวน 3 ตัวอย่าง นำมาทดสอบความสามารถในการรับแรงกดและหาค่าเฉลี่ย 5) การทดสอบความสามารถในการรับแรงกดของต้นแบบแก้วี้อัดขึ้นรูปพลาสติก จำนวน 1 ตัวอย่าง เพื่อใช้เปรียบเทียบค่าการรับแรงกดกับแก้วี้อัดขึ้นรูปจากวัสดุผสมมูลช้าง 6) ประมาณราคาต้นทุนวัสดุในการผลิตแก้วี้อัดขึ้นรูปจากวัสดุผสมมูลช้าง 7) วิเคราะห์ผลการเตรียมวัสดุผสมมูลช้าง การทดลองนำสูตรวัสดุผสมมูลช้างอัดขึ้นรูปแก้วี้อัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ยางซิลิโคนและการทดสอบความแข็งแรงของแก้วี้อัดขึ้นรูปจากวัสดุผสมมูลช้าง

ขั้นตอนที่ 4 1) ออกแบบแก้วี้อัดขึ้นรูปโดยใช้ทฤษฎีด้านปัจจัยภายในที่มีผลต่องานออกแบบของ นวลน้อย บุญวงษ์ ทั้ง 3 ประการ คือ ด้านวัสดุและกรรมวิธีการผลิต ด้านประโยชน์ใช้สอย และด้านรูปทรง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ 1.1) ศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุผสมมูลช้างและกรรมวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานแก้วี้อัดขึ้นรูปโดยใช้วัสดุผสมมูลช้างนำมาอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ 1.2) ศึกษาขนาดสัดส่วนทางด้านการยศาสตร์ และขนาดแก้วี้อัดขึ้นรูปที่เหมาะสมต่อการใช้งาน 1.3) ศึกษารูปทรงและท่าทางของช้าง ซึ่งเป็นสัตว์ใหญ่ในพื้นที่ถิ่นของจังหวัดเชียงใหม่อยู่ในพื้นที่การท่องเที่ยวเชิงธรรมชาติ ประกอบกับการนำวัสดุผสมมูลช้างที่มีจำนวนมาก

นำมาใช้เป็นวัสดุในการผลิต ได้แก่ ปางช้างต่างๆ ที่นำช้างมาแสดงและจัดกิจกรรมให้กับนักท่องเที่ยวทั้งชาวไทยและชาวต่างชาติ โดยการใช้รูปทรง ท่าทางของช้างมาใช้เป็นเนื้อหาประกอบการออกแบบร่าง แก้วี๊พักผ่อน 2) นำแบบประเมินผลแบบร่างแก้วี๊พักผ่อนไปให้ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และการออกแบบเรือน จำนวน 9 คน ประเมินผลแบบร่างและนำมาวิเคราะห์ผลการประเมิน

ขั้นตอนที่ 5 1) สร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบแก้วี๊พักผ่อนจากวัสดุผสมมูลช้าง 2) นำแบบประเมินผลผลิตภัณฑ์ต้นแบบไปให้ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และการออกแบบเครื่องเรือน จำนวน 9 คน ประเมินผลผลิตภัณฑ์ต้นแบบและนำมาวิเคราะห์ผลการประเมิน

2. การเก็บข้อมูล

ประกอบด้วย 1) ผู้วิจัยบันทึกผลการทดลองและบันทึกภาพระหว่างการผลิตแก้วี๊จากวัสดุผสมมูลช้างในห้องปฏิบัติงาน 2) นำชิ้นงานแก้วี๊วัสดุผสมมูลช้างที่ได้จากการทดลองและแก้วี๊พลาสติกไปทดสอบความสามารถในการรับแรงกดของชิ้นงานจนเกิดการวิบัติ ที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 3) นำแบบประเมินผลแบบร่างไปให้ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และการออกแบบเครื่องเรือนด้วยตัวเองแล้วขอคืนกลับในทันที 4) นำแบบประเมินผลผลิตภัณฑ์ต้นแบบพร้อมกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบไปให้ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์

และการออกแบบเครื่องเรือน ด้วยตัวเองแล้วขอคืนกลับในทันที

3. การวิเคราะห์ข้อมูลการวิจัย

ประกอบด้วย 1) การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองการผลิตแก้วี๊วัสดุผสมมูลช้าง 2) การทดสอบความสามารถในการรับแรงกดของแก้วี๊วัสดุผสมมูลช้างและต้นแบบแก้วี๊พลาสติก 3) การวิเคราะห์ข้อมูลแบบประเมินผลแบบร่างและแบบประเมินผลผลิตภัณฑ์ต้นแบบแก้วี๊พักผ่อนจากวัสดุผสมมูลช้าง ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป (SPSS/PC+) และสถิติที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ข้อมูลจากแบบสอบถามปลายเปิดโดยการสรุปข้อมูลที่สำคัญคลึงกันมาสรุปเป็นภาพรวมด้วยการพรรณนา

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากวัตถุประสงค์การวิจัยที่กำหนดไว้ข้างต้นสามารถสรุปผลการวิจัยได้ 4 ส่วน ดังนี้

1. การทดลองผลิตแก้วี๊จากวัสดุผสมมูลช้างระหว่างวัสดุหลัก ได้แก่ กาวลาเท็กซ์ (ATM - A 9000) และ ปูนปลาสเตอร์ไทยสงหะ (ตรามือ) กับวัสดุเสริมแรง ได้แก่ เยื่อมูลช้าง และตาข่ายพลาสติก และวัสดุอื่น ได้แก่ น้ำสะอาด นำวัสดุทั้ง 3 ส่วน ผสมตามสัดส่วนสูตรวัสดุผสมมูลช้าง 2.00 : 2.00 : 1.00 : 5.00 (กาวลาเท็กซ์ : ปูนปลาสเตอร์ : เยื่อมูลช้าง : น้ำ) ซึ่งมีผลการทดลองการผลิตตัวอย่างชิ้นงานแก้วี๊ และการประมาณราคาค้นทุนวัสดุในการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 1-4

ตารางที่ 1 แสดงลักษณะข้อมูลข้างจากปางช้างแม่ตะมาน

คำอธิบาย	ข้อมูลข้างเปียก	ข้อมูลข้างแห้ง
ลักษณะข้อมูลข้างที่จะนำไปเป็นวัสดุเสริมแรงในการผลิตวัสดุผสม		

ตารางที่ 2 แสดงสูตรส่วนผสมวัสดุหลักและวัสดุเสริมแรง ขั้นตอนการอัดวัสดุผสมลงในแม่พิมพ์เก้าอี้

สูตรวัสดุผสม	ส่วนผสมวัสดุหลัก (Matrix) และ วัสดุเสริมแรง (Reinforcement)					อัดวัสดุผสมลงในแม่พิมพ์	นำเข้าตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 75°C (ชั่วโมง)	วางตาข่ายพลาสติกลงในแม่พิมพ์	หมายเหตุ
	สัดส่วนโดยน้ำหนักวัสดุ (กรัม)				น้ำเสริมแรง	ให้มี	ความหนา 0.50 ซม.		
สูตร	สัดส่วน	2	2	1	5	ชั้นที่ 1	20	ชั้นที่ 1	ถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และนำเข้าตู้อบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อให้ชิ้นงานแห้งสนิท
	กรัม	680	680	340	1,700				
	สัดส่วน	2	2	1	5	ชั้นที่ 2	20	ชั้นที่ 2	
	กรัม	560	560	280	1,400				
	สัดส่วน	2	2	1	5	ชั้นที่ 3	20	ชั้นที่ 3	
	กรัม	400	400	200	1,000				
	สัดส่วน	2	2	1	5	ชั้นที่ 4	20	-	
	กรัม	360	360	180	900				

จากตารางที่ 2 พบว่า สูตรวัสดุผสมมูลช้างมีส่วนผสมวัสดุหลักและวัสดุเสริมแรงใช้วัสดุสัดส่วนโดยน้ำหนัก (กรัม) 2 : 2 : 1 : 5 (กาวเท็กซ์ : ปูนปลาสเตอร์ : เยื่อมูลช้าง : น้ำ) 1) อัดวัสดุผสมชั้นที่ 1 ลงในแม่พิมพ์ให้มีหนา 0.50 ซม. โดยใช้วัสดุผสมมูลช้างสัดส่วนโดยน้ำหนัก (กรัม) กาวเท็กซ์

680 กรัม : ปูนปลาสเตอร์ 680 กรัม : เยื่อมูลช้าง 340 กรัม : น้ำ 1,700 กรัม วัสดุผสมแห้งใช้เวลา 20 ชั่วโมงที่อุณหภูมิตู้อบแห้ง 75 °C วางตาข่ายพลาสติกชั้นที่ 1 ลงบนวัสดุผสม 2) อัดวัสดุผสมชั้นที่ 2 ลงในแม่พิมพ์ (ทับตาข่ายพลาสติก) ให้มีความหนา 0.50 ซม. โดยใช้วัสดุผสมมูลช้างสัดส่วนโดยน้ำหนัก (กรัม) กาว

เท็กซ์ 560 กรัม : ปูนปลาสเตอร์ 560 กรัม : เชื่อมูล
ข้าง 280 กรัม : น้ำ 1,400 กรัม วัสดุผสมแห้งใช้เวลา
20 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องแห้ง 75 °C วางตาข่าย
พลาสติกชั้นที่ 2 ลงบนวัสดุผสม 3) อัดวัสดุผสมชั้นที่
3 ลงในแม่พิมพ์ (ทับตาข่ายพลาสติก) ให้มีความหนา
0.50 ซม. โดยใช้วัสดุผสมมูลข้างสัดส่วนโดยน้ำหนัก
(กรัม) กาวลาเท็กซ์ 400 กรัม : ปูนปลาสเตอร์ 400
กรัม : เชื่อมูลข้าง 200 กรัม : น้ำ 1,000 กรัม วัสดุผสม
แห้งใช้เวลา 20 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องแห้ง 75 °C

วางตาข่ายพลาสติกชั้นที่ 3 ลงบนวัสดุผสม 4) อัด
วัสดุผสมชั้นที่ 4 ลงในแม่พิมพ์ (ทับตาข่ายพลาสติก)
ให้มีความหนา 0.50 ซม. โดยใช้วัสดุผสมมูลข้าง
สัดส่วนโดยน้ำหนัก (กรัม) กาวลาเท็กซ์ 360 กรัม :
ปูนปลาสเตอร์ 360 กรัม : เชื่อมูลข้าง 180 กรัม : น้ำ
900 กรัม วัสดุผสมแห้งใช้เวลา 20 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ
ห้องแห้ง 75 °C ถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และ
นำเข้าตู้อบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานแห้ง
สนิท

ตารางที่ 3 แสดงสูตรส่วนผสมวัสดุหลักและวัสดุเสริมแรง ขั้นตอนการอัดวัสดุผสมลงในแม่พิมพ์เก้าอี้

ส่วนผสมวัสดุหลัก (Matrix) และ วัสดุเสริมแรง						อัตราส่วนผสมและเสริมตาข่ายพลาสติกจำนวน 3 ชั้น ลงในแม่พิมพ์	นำเข้าตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 75°C (ชั่วโมง)	น้ำหนักชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมมูลข้าง (กรัม)	ลักษณะชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมและการหดตัว	
สูตรวัสดุผสม	(Reinforcement)									
	สัดส่วนโดยน้ำหนักวัสดุ (กรัม)	วัสดุหลัก			วัสดุเสริมแรง					น้ำ
		กาวลาเท็กซ์	ปูนปลาสเตอร์	เยื่อมูลช้าง						
สูตร	สัดส่วน	2	2	1	5		83	4,100	ผิวเรียบคงรูปไม่บิดงอ หดตัว 0.647 %	
	กรัม	2,000	2,000	1,000	5,000					

สูตรวัสดุผสมจากมูลข้าง 2.00 : 2.00 : 1.00 : 5.00 (กาวลาเท็กซ์ : ปูนปลาสเตอร์ : เชื่อมูลข้าง : น้ำ)

ขนาดชิ้นงาน ความกว้าง 413 มม. ความยาว 406 มม. ความสูง 460 มม.



ชิ้นงานเก้าอี้ C1



ชิ้นงานเก้าอี้ C2



ชิ้นงานเก้าอี้ C3

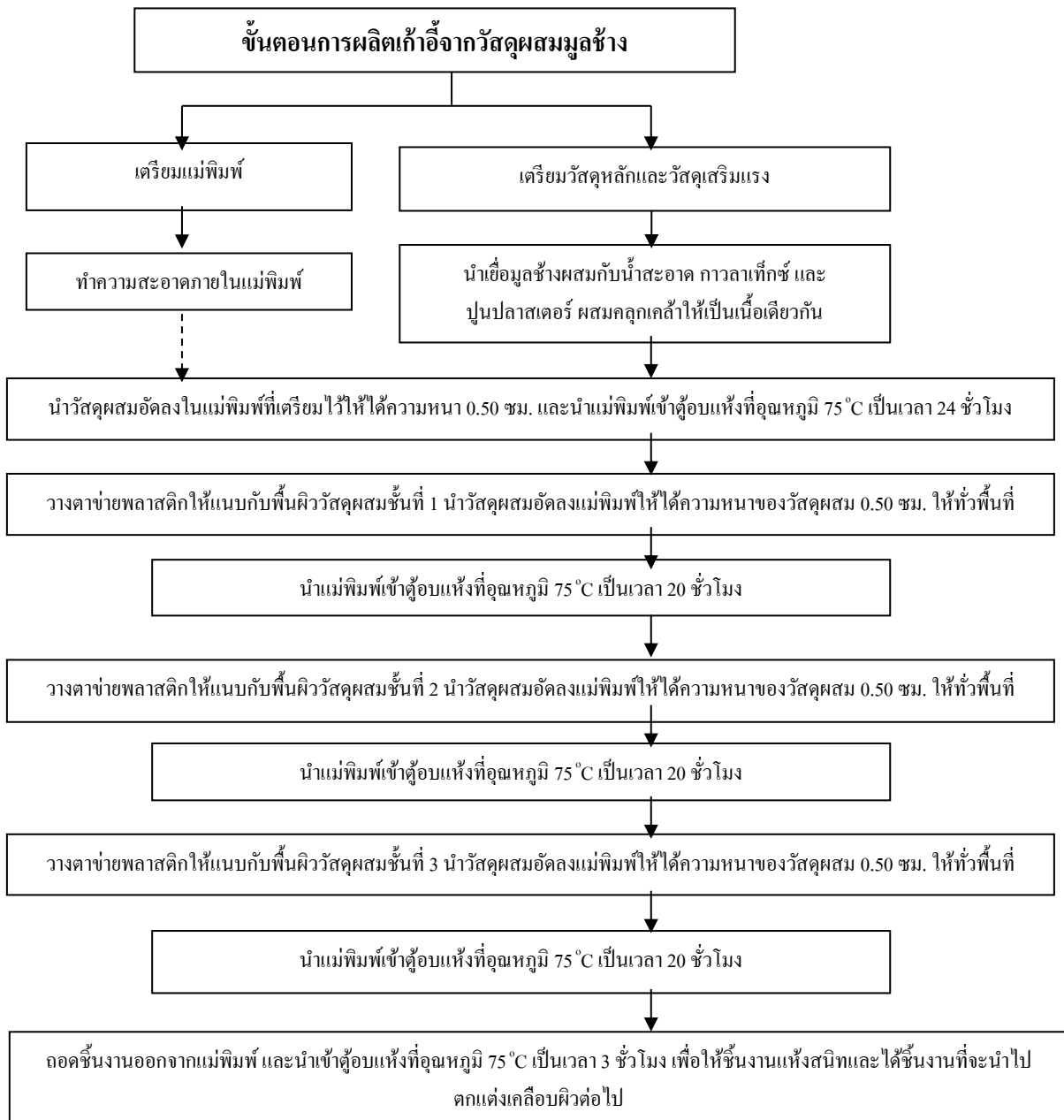
จากตารางที่ 3 พบว่า สูตรวัสดุผสมมูลช้างมีส่วนผสมวัสดุหลักและวัสดุเสริมแรงใช้วัสดุสัดส่วนโดยน้ำหนัก (กรัม) 2 : 2 : 1 : 5 (กาวลาเท็กซ์ 2,000 กรัม : ปูนปลาสเตอร์ 2,000 กรัม : เชื้อมูลช้าง 1,000 กรัม : น้ำ 5,000 กรัม) อัดวัสดุผสมและเสริมตาข่ายพลาสติก จำนวน 3 ชั้น นำเข้าตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 75

°C เป็นเวลา 80 ชั่วโมง น้ำหนักชิ้นงาน 4,100 กรัม ลักษณะชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมผิวเรียบคงรูปไม่บิดงอหดตัว 0.647 % ขนาดชิ้นงาน ความกว้าง 413 มม. ความยาว 406 มม. ความสูง 460 มม. อัดขึ้นรูปชิ้นงานเก้าอี้จำนวน 3 ตัวอย่าง C1, C2, C3 เพื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงต่อไป

ตารางที่ 4 แสดงการประมาณราคาต้นทุนวัสดุในการผลิตชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมมูลช้าง

ชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมมูลช้าง						
สูตรวัสดุผสม	ส่วนผสมวัสดุหลัก (Matrix) และ วัสดุเสริมแรง (Reinforcement)					ขนาดชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมมูลช้าง 413 × 406 × 460 (มม.)
	สัดส่วนโดยน้ำหนัก	วัสดุหลัก		วัสดุเสริมแรง	ตาข่ายพลาสติก	
	วัสดุ (กรัม)	กาวลาเท็กซ์	ปูนปลาสเตอร์	เชื้อมูลช้าง	เสริมจำนวน 3 ชั้น (ตร.ม.)	
สูตร	สัดส่วน	2	2	1	0.94	83
	กรัม	2,000	2,000	1,000		
การประมาณราคาต้นทุนวัสดุในการผลิตชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมมูลช้าง						
สูตรวัสดุผสม	เชื้อมูลช้าง	กาวลาเท็กซ์	ปูนปลาสเตอร์	ตาข่ายพลาสติก	ค่าไฟฟ้าตู้อบแห้ง (กำลังไฟฟ้า/1,000×จำนวนชม.= ค่าไฟต่อหน่วย)	ราคาต้นทุนชิ้นงานวัสดุผสม (บาท)
	1,000 กรัม	1,000 กรัม	1,000 กรัม	1 ตร.ม.		
	=	=	=	=		
	50 บาท	30 บาท	6 บาท	25 บาท		
สูตร	$50/1,000 \times 1,000 = 50$	$30/1,000 \times 2,000 = 60$	$6/1,000 \times 2,000 = 12$	$25/1 \times 0.94 = 23.50$	$800/1,000 \times 83 \times 3 = 199.20$	344.70



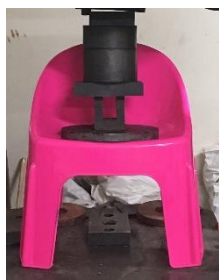


ภาพที่ 1 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการผลิตเก้าอี้จากวัสดุผสมมูลช้าง

2. ผลการทดสอบความแข็งแรงของเก้าอี้วัสดุผสมมูลช้าง นำตัวอย่างชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมมูลช้างและเก้าอี้พลาสติกไปทดสอบที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ การทดสอบความสามารถในการรับแรงกด (Compression) ของชิ้นงานจนเกิดการวิบัติ ด้วยเครื่องทดสอบ Baldwin UTM Cap:100Tf

SN:200HVL-1034 Div:1kgf ที่อุณหภูมิขณะทดสอบ 25 °C และใช้สมการปรับแก้แรงกด $y = 1.0428x - 67.10$ การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมมูลช้าง C1, C2, C3 ความกว้าง 413 มม. ความยาว 406 มม. ความสูง 460 มม. จำนวน 3 ตัวอย่าง และเก้าอี้พลาสติก C4 จำนวน 1 ตัวอย่าง ซึ่งมีผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงกด (Compression) ของชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมมูลช้าง C1, C2, C3 และเก้าอี้พลาสติก C4

ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงกด (Compression)			
ตัวอย่างชิ้นงานเก้าอี้	ค่าแรงกดสูงสุดจนเกิดการวิบัติของตัวอย่างชิ้นงาน (กิโลกรัม)		
C1 (วัสดุผสมมูลช้าง)	673.29		
C2 (วัสดุผสมมูลช้าง)	537.72		
C3 (วัสดุผสมมูลช้าง)	600.29		
ค่าแรงกดสูงสุดเฉลี่ยของเก้าอี้วัสดุผสมมูลช้าง	603.77		
C4 (วัสดุพลาสติก)	569.01		
ชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมมูลช้างและเก้าอี้พลาสติกก่อนและหลังการทดสอบความสามารถในการรับแรงกด			
เก้าอี้วัสดุผสมมูลช้าง C1	เก้าอี้วัสดุผสมมูลช้าง C2		
			
ก่อนการทดสอบ		หลังการทดสอบ	
เก้าอี้วัสดุผสมมูลช้าง C3		เก้าอี้พลาสติก C4	
			
ก่อนการทดสอบ		หลังการทดสอบ	

จากตารางที่ 5 พบว่า ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงกดของตัวอย่างชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมมูลช้าง C1 รับแรงกดสูงสุดจนเกิดการวิบัติ 673.29 กิโลกรัม C2 รับแรงกดสูงสุดจนเกิดการวิบัติ 537.72 กิโลกรัม และ C3 รับแรงกดสูงสุดจนเกิดการวิบัติ 600.29 กิโลกรัม ได้ค่าเฉลี่ยแรงกด

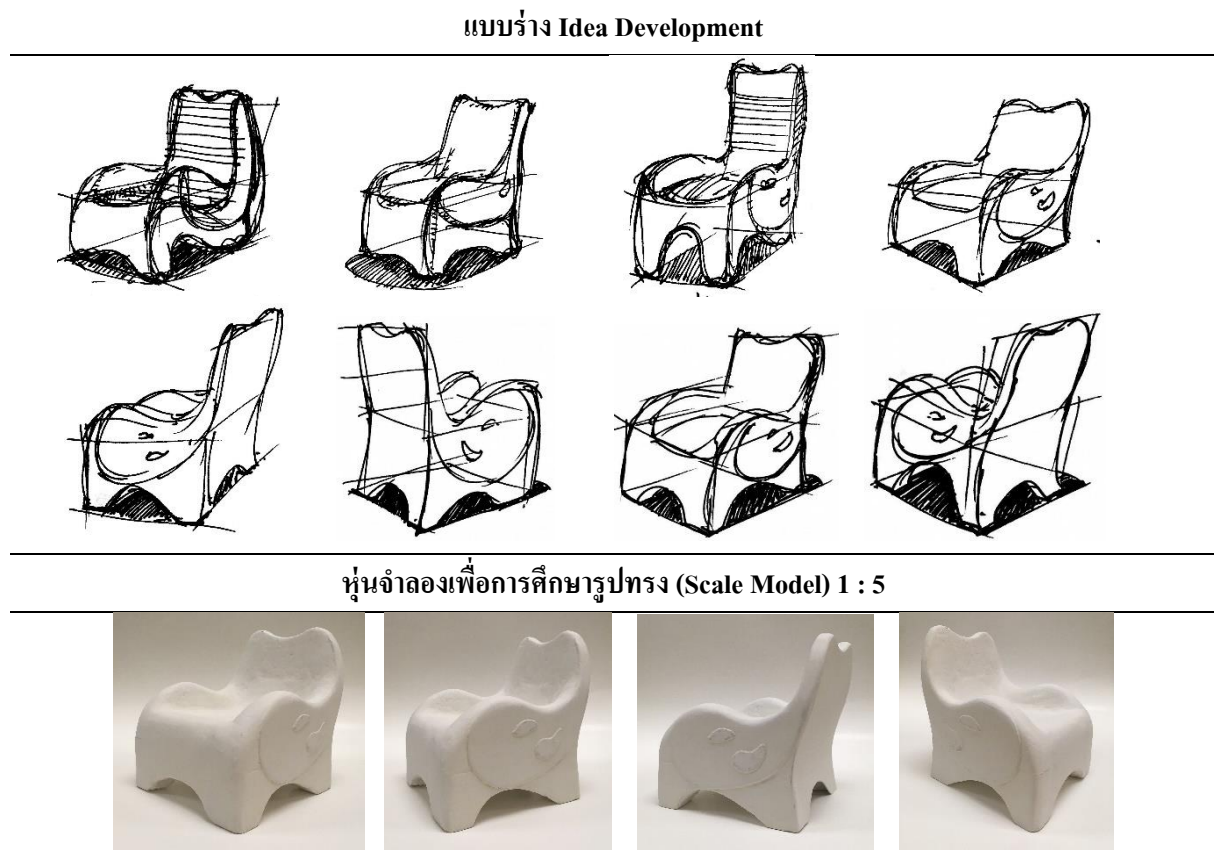
สูงสุดของตัวอย่างชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมมูลช้างทั้ง 3 ตัวอย่าง 603.77 กิโลกรัม ส่วนตัวอย่างชิ้นงานเก้าอี้พลาสติก C4 รับแรงกดสูงสุดจนเกิดการวิบัติ 569.01 กิโลกรัม จากผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงกดสูงสุดจนเกิดการวิบัติ ชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสม

มูลซึ่งสามารถรับแรงกดสูงสุดได้มากกว่าชิ้นงาน
เก้าอี้พลาสติก

3. ผลการประเมินแบบร่างเก้าอี้พักผ่อน
ผู้วิจัยได้นำแบบประเมินผลแบบร่างเก้าอี้พักผ่อน ให้
ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ และออกแบบ
เครื่องเรือน จำนวน 9 คน และนำผลการประเมินมา
วิเคราะห์นำเสนอในรูปแบบตารางประกอบความ
เรียงโดยแสดงค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
(S.D.) และ การวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถาม
ชนิดปลายเปิด โดยวิธีการสรุปข้อมูลที่คล้ายคลึงกัน

มาสรุปเป็นภาพรวมด้วยการพรรณนา โดยแบ่งเกณฑ์
ดังต่อไปนี้ 4.50-5.00 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ใน
ระดับดีมาก, 3.50-4.49 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ใน
ระดับดี, 2.50-3.49 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ในระดับ
ปานกลาง, 1.50-2.49 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ใน
ระดับพอใช้, 1.00-1.49 หมายถึง ระดับความคิดเห็น
อยู่ในระดับน้อย ผลการประเมินความพึงพอใจของ
ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และการ
ออกแบบเครื่องเรือน สามารถสรุปได้ดังแสดงใน
ตารางที่ 6-7

ตารางที่ 6 แสดงแบบร่าง Idea Development และหุ่นจำลองเพื่อการศึกษารูปทรง (Scale Model)



ตารางที่ 7 แสดงผลการประเมินความพึงพอใจแบบร่างเก้าอี้พักผ่อนของผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และการออกแบบเครื่องเรือนที่มีต่อแบบร่างเก้าอี้พักผ่อน

หัวข้อประเมินผลแบบร่าง	ความพึงพอใจ		
	$\bar{X}$	S.D.	แปลผล
1. มีลักษณะรูปแบบประยุกต์ที่สะท้อนถึงแนวคิดการออกแบบจากรูปทรงของช้าง	4.11	0.31	ดี
2. แนวคิดการออกแบบและพัฒนาแบบร่างเก้าอี้พักผ่อนที่สอดคล้องกับวัสดุและกรรมวิธีการผลิต	4.44	0.68	ดี
3. แนวคิดการออกแบบเก้าอี้พักผ่อนที่สื่อถึงความเป็นอัตลักษณ์ของท้องถิ่น	4.33	0.66	ดี
4. การออกแบบเก้าอี้พักผ่อนมีความเหมาะสมเป็นเครื่องเรือนสำหรับบ้านพักอาศัยได้	4.00	0.47	ดี
5. รูปแบบมีความสวยงาม	4.44	0.49	ดี
6. รูปแบบมีความสะดวกสบายและขนาดสัดส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งาน	3.88	0.31	ดี
7. รูปแบบมีความแข็งแรงต่อการใช้งาน	4.11	0.56	ดี
8. รูปแบบเก้าอี้พักผ่อนมีความเป็นไปได้ในการผลิต (การใช้วัสดุผสมมูลช้างอัดขึ้นรูปขึ้นงาน เก้าอี้ด้วยแม่พิมพ์)	4.33	0.66	ดี
9. โดยภาพรวมท่านพึงพอใจต่อรูปแบบเก้าอี้พักผ่อน	4.22	0.41	ดี
ค่าเฉลี่ยรวม	4.20	0.56	ดี

จากตารางที่ 7 พบว่า ความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และออกแบบเครื่องเรือน ที่มีต่อแบบร่างเก้าอี้พักผ่อนจากวัสดุผสมมูลช้าง มีค่าเฉลี่ยโดยรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดี ($\bar{X}=4.20$) จำแนกเป็นรายข้อ พบว่า มีความพึงพอใจอยู่ในระดับดีทุกข้อ ได้แก่ แนวคิดการออกแบบและพัฒนาแบบร่างเก้าอี้พักผ่อนที่สอดคล้องกับวัสดุและกรรมวิธีการผลิต และรูปแบบมีความสวยงาม ($\bar{X}=4.44$) แนวคิดการออกแบบเก้าอี้พักผ่อนที่สื่อถึงความเป็นอัตลักษณ์ของท้องถิ่น และรูปแบบเก้าอี้พักผ่อนมีความเป็นไปได้ในการผลิต (การใช้วัสดุผสมมูลช้างอัดขึ้นรูปขึ้นงานเก้าอี้ด้วยแม่พิมพ์) ($\bar{X}=4.33$) โดยภาพรวมท่านพึงพอใจต่อรูปแบบเก้าอี้

พักผ่อน ($\bar{X}=4.22$) มีลักษณะรูปแบบประยุกต์ที่สะท้อนถึงแนวคิดการออกแบบจากรูปทรงของช้าง และรูปแบบมีความแข็งแรงต่อการใช้งาน ($\bar{X}=4.11$) และการออกแบบเก้าอี้พักผ่อนมีความเหมาะสมเป็นเครื่องเรือนสำหรับบ้านพักอาศัยได้ ($\bar{X}=4.00$) ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมของผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และออกแบบเครื่องเรือน ที่มีต่อแบบร่างเก้าอี้พักผ่อนจากวัสดุผสมมูลช้าง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (1) เป็นเครื่องเรือนที่มีความน่าสนใจหากมีการออกแบบเป็นชุดจะทำให้เห็นเอกลักษณ์ที่ชัดเจนยิ่งขึ้น (2) มีการใช้ประโยชน์จากวัสดุที่มีอยู่ในท้องถิ่นได้อย่างเหมาะสม (3) รูปทรงควรมีบางจุดที่โปร่งบ้างเพื่อลดน้ำหนักและ

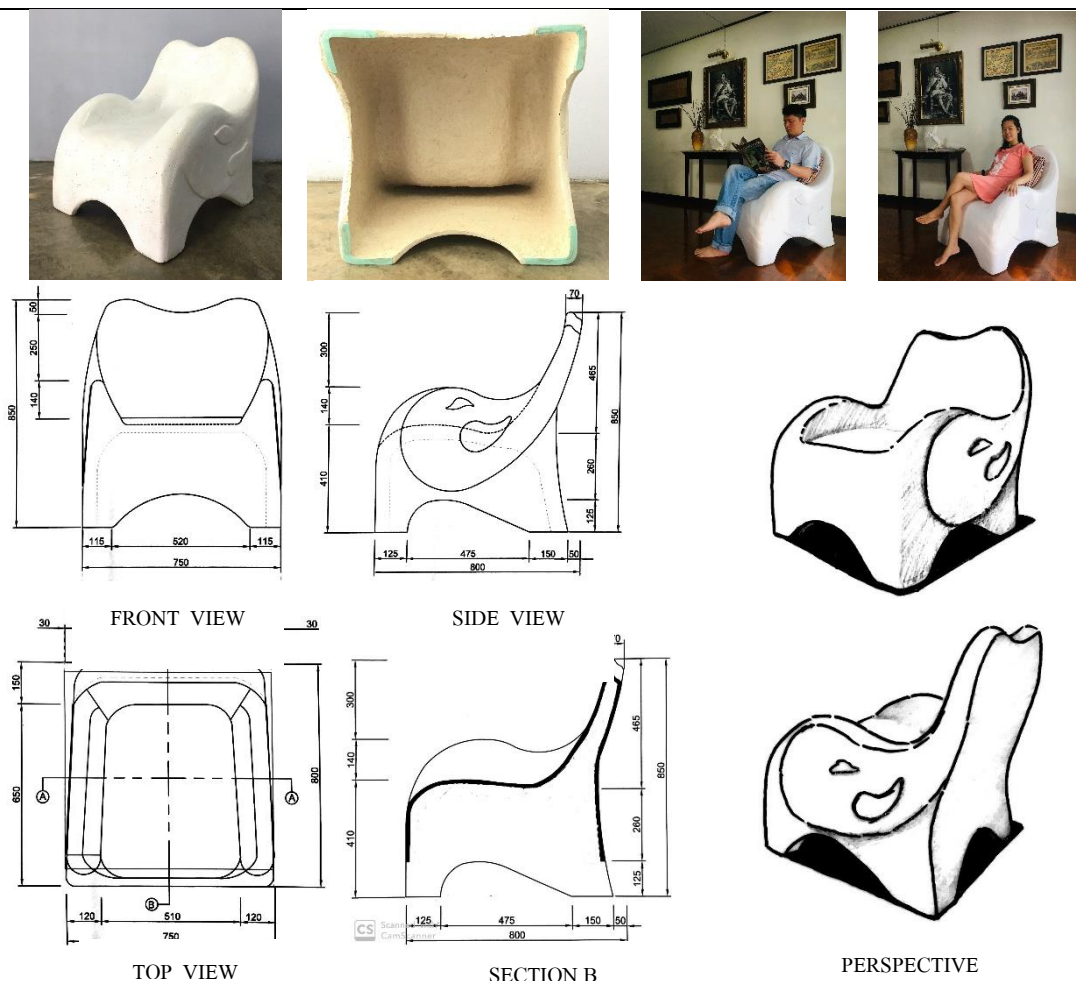
การถอดแบบที่ง่ายขึ้น พื้นที่นั่งควรมีการทำพื้นผิวที่มีคลื่น เพื่อไม่ให้เกิดการลื่นในการนั่ง (4) ปัญหาของวัสดุที่ค่อนข้างจะมีน้ำหนักมากถ้าจะทำเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับบ้านพักอาศัยจะมีข้อจำกัดของตำแหน่งที่ใช้งาน ส่วนเนื้อวัสดุที่ไม่มีโครงสร้างเกาะยึดภายในจะไม่แข็งแรงหรือรับแรงได้ดีเท่ากับการมีโครงสร้างภายใน ส่วนระบบการผลิตด้วยแม่พิมพ์จะต้องคำนึงถึงการไหลของวัสดุ

4. ผลการประเมินผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ผู้วิจัยได้นำผลิตภัณฑ์ต้นแบบและแบบประเมินผลผลิตภัณฑ์ต้นแบบเก้าอี้พักผ่อน ให้ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ และออกแบบเครื่องเรือนจำนวน 9 คน และนำผลการประเมินมาวิเคราะห์

นำเสนอในรูปแบบตารางประกอบความเรียงโดยแสดงค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถามชนิดปลายเปิด โดยวิธีการสรุปข้อมูลที่คล้ายคลึงกันมาสรุปเป็นภาพรวมด้วยการพรรณนา โดยแบ่งเกณฑ์ดังต่อไปนี้ 4.50-5.00 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ในระดับดีมาก, 3.50-4.49 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ในระดับดี, 2.50-3.49 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ในระดับปานกลาง 1.50-2.49 หมายถึง ความคิดเห็นอยู่ในระดับพอใช้, 1.00-1.49 หมายถึง ระดับความคิดเห็นอยู่ในระดับน้อย ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และการออกแบบเครื่องเรือน สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 8-9

ตารางที่ 8 แสดงผลิตภัณฑ์ต้นแบบเก้าอี้พักผ่อนจากวัสดุผสมมูลช้าง

ผลิตภัณฑ์ต้นแบบเก้าอี้พักผ่อน



ตารางที่ 8 (ต่อ)

ผลิตภัณฑ์ต้นแบบเก้าอี้พักผ่อน	
ข้อมูลผลิตภัณฑ์	แนวคิด
ประโยชน์ใช้สอย : สำหรับนั่งพักผ่อน	แรงบันดาลใจในการออกแบบเก้าอี้พักผ่อนจาก
การขึ้นรูปชิ้นงาน : อัดขึ้นรูปจากแม่พิมพ์	วัสดุผสมมูลช้าง ได้จากรูปทรงและท่าทางของช้าง
วัสดุหลัก : วัสดุผสมมูลช้าง (กาวลาเท็กซ์ : ปูนปลาสเตอร์ : เยื่อมูลช้าง : น้ำ)	ซึ่งเป็นสัตว์ใหญ่ในพื้นที่ของจังหวัดเชียงใหม่
วัสดุเสริมความแข็งแรง : ตาข่ายพลาสติก 2 ชั้น	ประกอบกับการนำวัสดุมูลช้างที่มีจำนวนมาก
การเคลือบผิว : แล็กเกอร์	นำมาใช้เป็นวัสดุในการผลิต ซึ่งได้จากปางช้าง
มิติ ก. × ย. × ส. (มม.) : 750 × 800 × 850 น้ำหนัก : 21 กิโลกรัม	ต่างๆ ที่นำช้างมาแสดงและจัดกิจกรรมการ
ความหนาขอบชิ้นงาน : 1.50 เซนติเมตร รับน้ำหนักแรงกด : 250 กิโลกรัม	ท่องเที่ยวเชิงธรรมชาติ ให้กับนักท่องเที่ยวทั้งชาว
ราคาต้นทุนวัสดุ : 990.42 บาท	ไทยและชาวต่างชาติ โดยการใช้รูปทรง ท่าทาง
	ของช้างนำมาเป็นเนื้อหาประกอบการออกแบบ
	และพัฒนาแบบร่างเก้าอี้พักผ่อน

ตารางที่ 9 แสดงผลการประเมินความพึงพอใจผลิตภัณฑ์ต้นแบบของผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และการออกแบบเครื่องเรือนที่มีต่อผลิตภัณฑ์ต้นแบบเก้าอี้พักผ่อน

หัวข้อประเมินผลผลิตภัณฑ์ต้นแบบ	ความพึงพอใจ		
	$\bar{X}$	S.D.	แปลผล
1. สามารถนำไปใช้งานได้	4.77	0.41	ดีมาก
2. ความเหมาะสมในการนำวัสดุมูลช้างมาผลิตเป็นเก้าอี้	4.44	0.49	ดี
3. การนำวัสดุเหลือใช้มาเพิ่มมูลค่าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	4.88	0.31	ดีมาก
4. มีเอกลักษณ์เฉพาะถิ่น	4.22	0.62	ดี
5. พื้นผิวมีความสวยงาม	4.00	0.47	ดี
6. สีสีนมีความสวยงาม	3.88	0.31	ดี
7. ความสวยงามของผลิตภัณฑ์ (ลวดลายและรูปทรง)	4.66	0.47	ดีมาก
8. เก้าอี้พักผ่อนสามารถรับน้ำหนักได้ 250 กิโลกรัม	4.55	0.49	ดีมาก
9. น้ำหนักของเก้าอี้พักผ่อน 21 กิโลกรัม	4.00	0.81	ดี
10. มีความเป็นไปได้ในการผลิต	4.55	0.49	ดีมาก
11. จำหน่ายได้ในท้องตลาด	4.55	0.49	ดีมาก
12. สามารถนำมาเป็นผลิตภัณฑ์ OTOP ได้	4.55	0.49	ดีมาก
13. โดยภาพรวมท่านพึงพอใจกับผลิตภัณฑ์	4.33	0.47	ดี
ค่าเฉลี่ยรวม	4.41	0.58	ดี

จากตารางที่ 8 พบว่า ความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และออกแบบเครื่องเรือน ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ต้นแบบเก้าอี้พักผ่อน มีค่าเฉลี่ยโดยรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดี ($\bar{X}=4.41$) จำแนกเป็นรายข้อ พบว่า มีความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก ได้แก่ การนำวัสดุเหลือใช้มาเพิ่มมูลค่าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ($\bar{X}=4.88$) สามารถนำไปใช้งานได้ ($\bar{X}=4.77$) ความสวยงามของผลิตภัณฑ์ (ลวดลายและรูปแบบ) ($\bar{X}=4.66$) เก้าอี้พักผ่อนสามารถรับน้ำหนักได้ 250 กิโลกรัม มีความเป็นไปได้ในการผลิต จำหน่ายได้ในท้องตลาด และสามารถนำมาเป็นผลิตภัณฑ์ OTOP ได้ ($\bar{X}=4.55$) ส่วนมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดี ได้แก่ ความเหมาะสมในการนำวัสดุมาผลิตเป็นเก้าอี้ ($\bar{X}=4.44$) โดยภาพรวมท่านพึงพอใจกับผลิตภัณฑ์ ($\bar{X}=4.33$) มีเอกลักษณ์เฉพาะถิ่น ($\bar{X}=4.22$) พื้นผิวมีความสวยงาม และน้ำหนักของเก้าอี้พักผ่อน 21 กิโลกรัม ($\bar{X}=4.00$) ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมของผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์และการออกแบบเครื่องเรือนที่มีต่อผลิตภัณฑ์ต้นแบบ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (1) งานมีความน่าสนใจและสามารถใช้ประโยชน์มูลค่าได้ มีประสิทธิภาพในการเพิ่มมูลค่าดีมาก (2) ควรใช้วัสดุและอาจมีการผสมสีจากธรรมชาติต่างๆ (3) การนำเสนอรูปแบบข้างเพียงด้านข้างด้านเดียว ควรจะมีด้านอื่นๆ ในลักษณะบริวารด้วยก็ได้ รูปทรงโดยรวมต้องให้ดูเป็นงานประติมากรรมเพื่อสร้างความสวยงามเมื่อขามตั้งอยู่เฉยๆ การนำเสนอรูปข้างในส่วนต่างๆ ควรใช้พื้นที่ในมุมมองอาจเป็นข้างหลายตัวก็ได้ ถ้าเป็นเก้าอี้ข้างควรมีท่าทางบังคับมากกว่านี้

การสร้างกรอบแนวคิดการออกแบบเก้าอี้พักผ่อน มี 3 ประเด็น คือ 1) ลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุผสมมูลค่าสูง กรรมวิธีการผลิต รูปทรงเก้าอี้

พักผ่อน ทั้งสามส่วนจะต้องมีความเหมาะสมที่จะสามารถผลิตเก้าอี้พักผ่อนตามที่ได้ออกแบบไว้ สอดคล้องกับปัจจัยภายในที่มีผลต่อการออกแบบของ Boonvong (1996) ได้กล่าวว่า ปัจจัยจากภายในงานออกแบบเป็นปัจจัยเบื้องต้นทำหน้าที่กำหนดและให้ขอบเขตแก่งานออกแบบ ไม่ว่าจะเป็นงาน 2 และ 3 มิติประเภทใดๆ ก็ตามโดยงานออกแบบนั้นเกิดขึ้นจากการนำวัสดุชนิดต่างๆ มาผ่านกรรมวิธีการขึ้นรูปที่เหมาะสมและเป็นไปได้เพื่อเกิดเป็นรูปทรงใหม่ ซึ่งสามารถสนองประโยชน์ตามหน้าที่ใช้สอยได้เป็นอย่างดี ปัจจัยจากภายในทั้ง 3 ประการ คือ วัสดุและกรรมวิธีการผลิต ประโยชน์ใช้สอย และรูปทรง 2) การใช้ขนาดสัดส่วนมนุษย์ทางด้านการยศาสตร์ เพื่อกำหนดขนาดเก้าอี้พักผ่อนที่เหมาะสมต่อการนั่งของผู้ใช้งาน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Klinpikul (2012) เรื่อง เก้าอี้การยศาสตร์ พบว่า เก้าอี้ที่ถูกออกแบบตามหลักสรีรศาสตร์ของมนุษย์มีการออกแบบที่เอื้ออำนวยและคำนึงถึงการรักษาสภาพของท่อนั่งให้เหมาะสมกับลักษณะของร่างกายที่แตกต่างกันเพื่อลดปัญหาการเมื่อยล้าของกล้ามเนื้อจากการนั่งเป็นเวลานานๆ 3) การศึกษารูปทรงและท่าทางของช้างซึ่งเป็นสัตว์พื้นถิ่นและอยู่ในธุรกิจปางช้างแหล่งท่องเที่ยวของจังหวัดเชียงใหม่ นำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบร่างเก้าอี้พักผ่อน เพื่อสื่อถึงความเป็นอัตลักษณ์ของชุมชน สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ สิงหา Prarom (2014) เรื่อง การพัฒนาเก้าอี้จากวัสดุพื้นถิ่นโดยใช้อัตลักษณ์เครื่องปั้นดินเผา ภูมิศึกษา: บ้านห้วยบง อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี พบว่า แนวทางการออกแบบเก้าอี้ให้มีอัตลักษณ์ของชุมชน โดยใช้ลวดลายเครื่องปั้นดินเผา รูปลักษณะของไหและถ้วยจากเครื่องปั้นดินเผาของชุมชน ณ ศูนย์ศิลปหัตถกรรมบ้านห้วยบง จังหวัดอุดรธานี เป็นแนวทางในการออกแบบ ความพึงพอใจที่มีต่อแบบร่างเก้าอี้พักผ่อน

จากวัสดุผสมมูลช้าง มีค่าเฉลี่ยโดยรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดี ($\bar{X}=4.20$) จำแนกเป็นรายข้อ พบว่า มีความพึงพอใจอยู่ในระดับดีทุกข้อ ได้แก่ แนวคิดการออกแบบและพัฒนาแบบร่างเก้าอี้พักผ่อนที่สอดคล้องกับวัสดุและกรรมวิธีการผลิต และรูปแบบมีความสวยงาม ($\bar{X}=4.44$) แนวคิดการออกแบบเก้าอี้พักผ่อนที่สื่อถึงความเป็นอัตลักษณ์ของท้องถิ่น ($\bar{X}=4.33$) และรูปแบบมีความสะดวกสบายและขนาดสัดส่วนที่เหมาะสมกับการใช้งาน ($\bar{X}=3.88$) สอดคล้องกับแนวคิดในการออกแบบของ Leesuwana (1993) ประกอบด้วย ลักษณะเฉพาะถิ่น ความสวยงาม ประโยชน์ใช้สอย ขนาดสัดส่วน และกรรมวิธีการผลิต ความพึงพอใจที่มีต่อผลิตภัณฑ์ต้นแบบเก้าอี้พักผ่อน มีค่าเฉลี่ยโดยรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดี ($\bar{X}=4.41$) รายข้อที่มีความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก พบว่า การนำวัสดุเหลือใช้มาเพิ่มมูลค่าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ($\bar{X}=4.88$) สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Patcharametha (2016) เรื่อง การศึกษาและทดลองวัสดุผสมจากมูลช้างเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ชุมชน พบว่า มีความพึงพอใจต่อการนำวัสดุเหลือใช้มาเพิ่มมูลค่าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอยู่ในระดับดีมากเช่นกัน และผลงานวิจัยของ Nirunnoot and Porncharoen (2016) เรื่อง กรณียศึกษาออกแบบผลิตภัณฑ์จากเศษไม้เหลือใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ เพื่อส่งเสริมงานตกแต่งทางสถาปัตยกรรม พบว่า ความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ประกอบวิชาชีพสถาปนิกและผู้บริโภคงานออกแบบตกแต่งมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก คือ การสร้างคุณค่าให้กับเศษไม้เหลือใช้

สรุป

จากผลการออกแบบและทดลองผลิตเก้าอี้จากวัสดุผสมระหว่างวัสดุหลัก ได้แก่ กาวลาเท็กซ์

ปูนปลาสเตอร์ กับ วัสดุเสริมแรง ได้แก่ เชื้อมูลช้าง และตาข่ายพลาสติก ซึ่งมีประเด็นที่จะอภิปราย คือ 1) สูตรของวัสดุผสมได้แก่วัสดุหลักและวัสดุเสริมแรงทั้งสองส่วนมีความสามารถในการรับแรงกดจากน้ำหนักของผู้ใช้งานและการเลี้ยววัสดุที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมพิจารณาจากต้นทุนการผลิตที่ต่ำ ได้แก่ ราคา ความแข็งแรง มีน้ำหนักเบาเมื่อแห้งตัวแล้วเหมาะสมกับกระบวนการผลิตและสามารถแข่งขันได้กับวัสดุที่ผลิตในท้องตลาด นอกจากนี้ยังสร้างมูลค่าของวัสดุเหลือใช้มูลช้างเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อม (Eco Product) 2) สัดส่วนของสูตรวัสดุผสมที่ใช้ในการผสมและอัดขึ้นรูปชิ้นงานในแม่พิมพ์จะต้องเหมาะสมกับระยะเวลาการแข็งตัวของวัสดุผสมกับระยะเวลาการอัดวัสดุผสมลงในแม่พิมพ์ 3) พื้นผิวของชิ้นงานเก้าอี้เมื่อถอดออกจากแม่พิมพ์พื้นผิวบางส่วนไม่เรียบสม่ำเสมอเป็นฟองอากาศ (ตามด) ต้องแก้ไขโดยการเคลือบผิวหน้าด้วยเรซินในแม่พิมพ์ก่อนที่จะทำการอัดวัสดุผสม 4) ความสามารถในการรับแรงกดของตัวอย่างชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมมูลช้างทั้ง 3 ตัวอย่าง ได้ค่าเฉลี่ยการรับแรงกดสูงสุดจนเกิดการวิบัติ 603.77 กิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างชิ้นงานเก้าอี้พลาสติกสามารถรับแรงกดสูงสุดจนเกิดการวิบัติ 569.01 กิโลกรัม ชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมมูลช้างสามารถรับแรงกดสูงสุดได้มากกว่าชิ้นงานเก้าอี้พลาสติก จากตัวอย่างชิ้นงานเก้าอี้วัสดุผสมมูลช้างที่ได้ทดสอบมีการเสริมตาข่ายพลาสติกจำนวน 3 ชั้น มีความหนาของชิ้นงาน 2 ซม. ซึ่งสามารถที่จะลดจำนวนชั้นของตาข่ายพลาสติกลงได้ให้เหมาะสมกับการใช้งานในการรับน้ำหนักของผู้ใช้ ก็จะทำให้ความหนาและน้ำหนักของชิ้นงานเก้าอี้ลดลงได้อีก 5) การออกแบบเก้าอี้พักผ่อนมีค่าเฉลี่ยโดยรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดี ($\bar{X}=4.20$) จำแนกเป็นรายข้อมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดีทุกข้อ ส่วนผลการประเมินผลิตภัณฑ์ต้นแบบมี

ค่าเฉลี่ยโดยรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดี ($\bar{X}$ =4.41) จำแนกเป็นรายข้อมีความพึงพอใจอยู่ในระดับดีถึงดีมากทุกข้อ

เอกสารอ้างอิง

- Boonvong, N. 1996. **Principles of Design.** Chulalongkorn University, Bangkok. (in Thai)
- GSB Research. 2020. **Furniture industry.** Furniture trends to watch in 2020. Available Source: https://www.gsbresearch.or.th/wp-content/uploads/2019/11/IN_furniture_10_62_detail.pdf, June 2, 2020. (in Thai)
- Klinpikul, N. 2012. Ergonomic Chair. **Art and Architecture Journal Naresuan University** 3(2): 156-165. (in Thai)
- Leesuwan, V. 1993. **Arts and Crafts.** Tonor, Bangkok. (in Thai)
- Mungcharoen, T. 2005. **LCA / EcoDesign.** Lectures, WEEE and RoHs. Century Park Hotel Bangkok, Bangkok. (in Thai)
- Nirunnoot, T. and Porncharoen, R. 2016. Case study and Design waste residues from the Wood Processing Industry to the enhancement of Architecture. **Art and Architecture Journal Naresuan University** 7(1): 1-14. (in Thai)
- Patcharametha, T. 2016. **Research Report on The Study and Experimental Composite Material of Elephant Dung for The Product Development Community.** Rajamangala University of Technology Lanna. (in Thai)
- Prarom, S. 2014. A Chair Development form Local Materials by Adapting the Characteristic Pattern of Pottery: A Study Case of Ban Huay Bong, Amphur Muang, Uttaradit Province. **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal** 7(2): 72-84. (in Thai)
- RYT9. 2020. **Opportunities of environmentally friendly products in Italy.** Trends of Eco-Friendly Product. Available Source: <https://www.ryt9.com/s/expd/1078183>, June 22, 2020. (in Thai)
- Sasujit, K. 2013. **Biogas production form elephant dung for environmental conservation in watershed area community.** Published documents, School of Renewable Energy, Maejo University. (in Thai)
- TCDCCONNECT DEBUT. 2018. **Hyperdesign Lab.** See the value of natural materials by recycling. Available Source: <https://web.tc-dc.or.th/th/Articles/Detail/hyperdesign-lab->., October 31, 2018. (in Thai)
- Unchittichai, W. n.d. **Research Report on Wood Substitute Materials from Vetiver Grass.** Forest Research and Development Bureau. (in Thai)

ผลของการเคลือบน้ำมันหอมระเหยไทมอลต่อการรักษาคุณภาพ เนื้อกุ้งขาวต้มสุก

Effect of Thymol Essential Oil Alginate-based Coating on Preserving Cooked Pacific White Shrimp Quality

สวามินี วีระวุฒิ^{1*} และ ปฏียุทธ์ ขวัญอ่อน²

Savaminee Teerawut^{1*} and Patiyut Kwanon²

Received: 9 April 2020, Revised: 10 May 2020, Accepted: 20 May 2020

บทคัดย่อ

การทดลองครั้งนี้ศึกษาการเคลือบเนื้อกุ้งขาวต้มสุกด้วยสารละลายอัลจิเนต 0.002% (AL0) สารละลายอัลจิเนต 0.002% ผสมน้ำมันหอมระเหยไทมอล 0.1% (TMC01) สารละลายอัลจิเนต 0.002% ผสมน้ำมันหอมระเหยไทมอล 0.5% (TMC05) และเนื้อกุ้งขาวต้มสุกไม่เคลือบสาร (UC0) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส นาน 20 วัน ผลการทดลองพบว่าการเคลือบเนื้อกุ้งขาวต้มสุกที่มีสัดส่วนของอัลจิเนต (AL) และน้ำมันหอมระเหยไทมอล (TMC) แตกต่างกันมีผลต่อคุณภาพของเนื้อกุ้งขาวต้มสุก คือ TMC05 มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางจุลชีววิทยา (จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด) เคมี (TVB-N, TMA-N และ pH) กายภาพ (แรงเฉือน และการสูญเสียน้ำหนัก) และประสาทสัมผัสที่น้อยที่สุด ($p<0.05$) รองลงมาคือ TMC01, AL0 และ UC0 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากความชอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค พบว่า TMC05 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการรักษาคุณภาพเนื้อกุ้งขาวต้มสุก โดยสามารถเก็บรักษามากกว่า 20 วัน ขณะที่เนื้อกุ้งขาวที่เคลือบด้วย TMC01 และ AL0 เก็บรักษาได้ 16 และ 10 วัน ตามลำดับ ส่วน UC0 มีอายุการเก็บรักษา 8 วัน (พิจารณาเพื่อความปลอดภัยในการบริโภคในกุ้งพร้อมบริโภคมีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 5 log CFU/g)

คำสำคัญ: เนื้อกุ้งขาวต้มสุก, คุณภาพทางจุลินทรีย์, คุณภาพทางเคมี, คุณภาพทางประสาทสัมผัส, น้ำมันหอมระเหยไทมอล

¹ ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

¹ Department of Aquatic Science, Faculty of Science, Burapha University, Saen sook, Muang, Chonburi 20131, Thailand.

² สาขาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ตำบลบางพระ อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110

² Department of Argo-Industry Product Development, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Bangpra, Sriracha, Chonburi 20110, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): sawamin@go.buu.ac.th

ABSTRACT

This study examines the effect of thymol essential oil alginate-based coating on quality of cooked Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during the chilled storage. The samples were treated by 0.002% alginate solution (AL0), 0.002% alginate solution containing thymol essential oil 0.1% (TMC01), 0.002% alginate solution containing thymol essential oil 0.5% (TMC05) and uncoated (UC0), then subsequently stored at 4 °C for 20 days. It was found that the quality of cooked Pacific white shrimp samples was affected by different concentration of alginate (AL) and thymol essential oil (TMC) in coating solution. Results showed that TMC05 had the lowest changes in microbiological (total viable count), chemical (TVB-N, TMA-N and pH), physical (shear force and cooking loss), and sensory qualities ($p < 0.05$). This was followed by TMC01, AL0 and UC0, respectively. Therefore, the result from consumer's sensory satisfaction revealed that TMC05 was suitable for preserving the quality of cooked Pacific white shrimp and could extend the shelf-life of such shrimp of more than 20 days. While the shelf-life of shrimp coated with TMC01 and AL0 were 16 and 10 days, respectively. Additionally, shrimp coated with UC0 had the shelf-life of 8 days (Considering safety of eating ready-to-eat shrimp to total plate count of less than 5.0 log CFU/g.).

Key words: cooked Pacific white shrimp, microbiological quality, chemical quality, sensory quality, thymol essential oil

บทนำ

กุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) เป็นสัตว์เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ในปี 2561 มีการส่งออกผลิตภัณฑ์กุ้งสด กุ้งแช่เย็น และกุ้งแช่แข็ง ปริมาณ 146,710.41 ตัน มูลค่า 46,881.10 ล้านบาท ซึ่งผลผลิตประมาณ 25% นั้นได้จากการเพาะเลี้ยงในพื้นที่ภาคตะวันออก 5 จังหวัด ได้แก่ ชลบุรี ระยอง จันทบุรี และตราด (Fisheries development policy and strategy development, 2018) กุ้งขาวมีคุณค่าทางโภชนาการและรสชาติดี ทำให้เป็นที่นิยมบริโภค ซึ่งข้อจำกัดของการจำหน่ายเพื่อบริโภคภายในประเทศหรือการเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ คือ กุ้งขาวเน่าเสียได้ง่ายจากเอนไซม์ในตัวเอง เอนไซม์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นและการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้คุณค่าทาง

โภชนาการลดลง ลักษณะทางประสาทสัมผัสไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค การลดข้อจำกัดดังกล่าวสามารถทำได้หลายวิธี โดยการดัดแปลงพันธุกรรมเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพซึ่งผู้บริโภคให้การยอมรับเนื้อกุ้งขาวดัดแปลงเนื่องจากมีอายุการเก็บรักษาได้ 8 วัน (Kusuma and Teerawut, 2014) ขณะที่กุ้งขาวดิบเก็บในน้ำแข็งได้เพียง 5 วัน (Teerawut and Pratumchart, 2014) และยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคสามารถนำไปใช้ได้สะดวก ดังนั้นหากต้องการรักษาคุณภาพของกุ้งขาวให้เก็บได้นานขึ้น การนำเทคโนโลยีการถนอมอาหารแบบผสมผสาน (hurdle technology) ด้วยการดัดและการนำน้ำมันหอมระเหยที่ปลอดภัยและปลอดภัยของเนื้อกุ้งได้ โดยสารสกัดจากธรรมชาติที่มีสารประกอบฟีนอลชนิดต่างๆ เช่น thymol และ

carvacrol ที่ช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเน่าเสีย รวมทั้งยังเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันในกุ้งได้ (Wang *et al.*, 2018; Song *et al.*, 2011) งานวิจัยหลายชิ้นได้มีการนำน้ำมันหอมระเหยไทมอลมาใช้รักษาคุณภาพสัตว์น้ำ เช่น กุ้ง *Palaemon serratus* (Mastromatteo *et al.*, 2010) ปลากระโทงดาบ (Kykkidou *et al.*, 2009) ปลากระพงขาว (Kostaki *et al.*, 2009) และปลาเรนโบว์เทราท์ (Jouki *et al.*, 2014) งานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงประสิทธิภาพของการเคลือบน้ำมันหอมระเหยไทมอลในการชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพและช่วยยืดอายุการเก็บรักษาเนื้อกุ้งขาวดัมสุก

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่าง

กุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) (ขนาดน้ำหนัก 50-60 ตัวต่อกิโลกรัม) ในช่วงเดือนพฤศจิกายน-ธันวาคม พ.ศ. 2562 จากตลาดประมงพื้นบ้านอ่างศิลา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี โดยเป็นกุ้งที่ตายแล้วและสุ่มตัวอย่างกุ้งเพื่อตรวจสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสให้เป็นไปตามคุณภาพที่ระบุในมาตรฐานกุ้งทะเล มกษ. 7019-2556 (National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, 2014) บรรจุกุ้งขาวในถุงพลาสติกโพลิเอทิลีน แล้วบรรจุลงกล่องสไตรโฟม (กุ้งขาว : น้ำแข็ง เท่ากับ 1 : 1.5) ปิด

ฝากล่อง ขนส่งด้วยรถยนต์มายังห้องปฏิบัติการภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา (ระยะเวลา 30 นาที) นำกุ้งขาวมาล้างและเปลือกเอาไส้ออกเหลือแต่เนื้อกุ้งไปต้มในน้ำเดือด จนจุดกึ่งกลางของเนื้อกุ้งมีอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบเสียบ (TBT-09H Digital Food Thermometer, Walcom Int'l Industry Ltd., China) เสียบเข้าไปในชิ้นเนื้อกุ้งเพื่อวัดอุณหภูมิ แล้วนำเนื้อกุ้งต้มมาแช่ในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 2 ± 1 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที ทิ้งให้สะเด็ดน้ำนาน 1 นาที ก่อนนำตัวอย่างไปใช้ในการทดลองในขั้นต่อไป

2. การเตรียมสารเคลือบและการเคลือบเนื้อกุ้งขาวดัมสุก

เตรียมสารเคลือบที่มีส่วนผสมของน้ำมันหอมระเหยไทมอล (Changsha Winner Bio - Tech Co. Ltd., China) และอัลจินต (AL) ดังตารางที่ 1 จากนั้นนำไปแช่ตู้เย็นเพื่อลดอุณหภูมิให้ได้ 4 ± 1 องศาเซลเซียส นำเนื้อกุ้งขาวดัมสุกแช่ในสารเคลือบแต่ละชุดการทดลอง อัตราส่วน 1: 2 (w/v ของเนื้อกุ้ง: สารเคลือบ) นาน 5 วินาที ทิ้งให้สะเด็ดสารเคลือบนาน 1 นาที แล้วเคลือบด้วย 0.002% CaCl_2 นาน 1 นาที แล้วบรรจุเนื้อกุ้งขาวดัมสุกในถุงพลาสติกโพลิโพรพิลีนขนาด 6×9 นิ้ว ถุงละ 15 ตัว (น้ำหนักเนื้อกุ้งประมาณ 100 กรัม) ปิดปากถุงด้วยความร้อนและเก็บรักษาในตู้เย็น (4 ± 1 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของสารเคลือบที่ใช้เคลือบเนื้อกุ้งขาวดัมสุกแต่ละสูตร

ชุดการทดลองที่	ความเข้มข้น (%)	
	AL	TMC
UC0	0.000	0.000
AL0	0.002	0.000
TMC01	0.002	0.100
TMC05	0.002	0.500

3. การวิเคราะห์คุณภาพ

สุ่มตัวอย่างวิเคราะห์คุณภาพทุก 2 วัน นาน 20 วัน ประกอบด้วย คุณภาพทางจุลชีววิทยา ได้แก่ จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (TPC) (AOAC, 1994a) *Escherichia coli*/ Coliform (AOAC, 1994b) (การกำหนดอายุการเก็บรักษาเนื้อกุ้งขาวสุก พิจารณาจากการพบจำนวนจุลินทรีย์ชนิดใดชนิดหนึ่งเกินค่ามาตรฐาน (Martínez-Alvarez *et al.*, 2009) คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณค่าที่ระเหยได้ทั้งหมด (Total volatile base nitrogen: TVB-N) และปริมาณไนโตรเจนอะมิโน (TMA-N) (Hasegawa, 1987) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) (AOAC, 2000) คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ การวัดค่าแรงเค้นบริเวณกึ่งกลางเนื้อกุ้งปล้องที่ 2 (ใบมีดชนิด HDP/WBV Warner Bratzler blade set ความเร็วที่ใช้ทดสอบ pre - test speed 2.00 mm/sec, test speed 2.00 mm/sec, post - test speed 2.50 mm/sec, target mode strain 100% และ trigger force 5.0 g) และการสูญเสียน้ำหนักของเนื้อ (% cooking loss) ด้วยการชั่งน้ำหนัก และคุณภาพทางประสาทสัมผัส นำเนื้อกุ้งต้มสุกมานึ่งด้วยไอน้ำร้อนนาน 3 นาที ก่อนการทดสอบชิม โดยเป็นการทดสอบแบบ 9 Point hedonic scale (9 คะแนน คือ ชอบมากที่สุด และ 1 คะแนน คือ ไม่ชอบมากที่สุด) กับผู้ทดสอบที่ได้รับการฝึกฝน 20 คน ให้คะแนนความชอบ 4 ลักษณะ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส ทั้งนี้ไม่มีการกลืนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบและตัวอย่างถูกตรวจจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดจนทราบผลว่าตัวอย่างมีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกินค่ามาตรฐาน แล้วจึงนำตัวอย่างในชุดการทดลองที่เตรียมไว้เฉพาะการทดสอบทางประสาทสัมผัสมาให้ผู้ทดสอบดำเนินการทดสอบ

4. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ออกแบบการทดลองแบบ RCRD วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่าง

ของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple's Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. คุณภาพทางจุลชีววิทยา

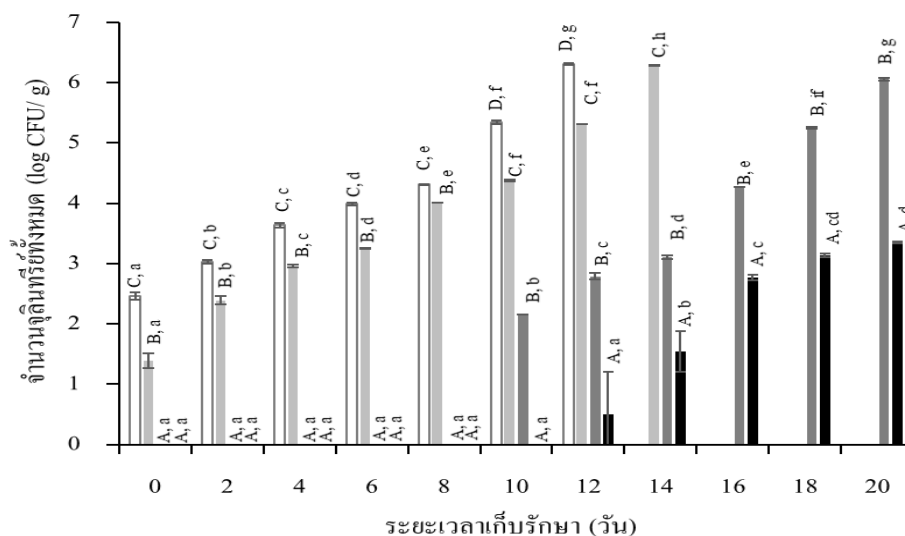
วันที่ 0 ของการเก็บรักษา เนื้อกุ้งขาวต้มสุกทุกชุดการทดลองมีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด 0.00-2.46 log CFU/g (ภาพที่ 1) และเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น เนื้อกุ้งขาวต้มสุก UC0 และ AL0 มีจำนวนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) เนื่องจากจุลินทรีย์มีการปรับตัวกับสภาพแวดล้อมและสร้างเอนไซม์เพื่อย่อยสลายสารอาหารในเนื้อกุ้งเพื่อการเจริญ (Leungsakul, 1996) จำนวนจุลินทรีย์จึงเพิ่มมากขึ้น ขณะที่ TMC01 และ TMC05 ตรวจไม่พบจำนวนจุลินทรีย์ในวันที่ 0-8 ของการเก็บรักษา และวันที่ 8-20 ของการเก็บรักษามีจำนวนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น โดยมีการเคลือบด้วยสารละลายน้ำมันหอมระเหยไทมอลที่มีสารประกอบฟีนอล ได้แก่ thymol และ carvacrol ที่มีหมู่ OH ที่ซึมผ่านชั้นไขมันของเยื่อหุ้มเซลล์จุลินทรีย์ ไปรบกวนสมดุลภายในและนอกเซลล์ ส่งผลให้เกิดการฉีกขาดของผนังเซลล์แล้วเกิดการรั่วของสารอาหารหรือของเหลวภายในเซลล์ จุลินทรีย์จึงไม่สามารถเจริญได้ (Burt, 2004) ซึ่ง Wang *et al.* (2018) พบว่าการใช้ carvacrol เคลือบกุ้งขาว (*L. vannamei*) สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้และ Mastromatteo *et al.* (2010) พบว่า กุ้ง *Palaemon serratus* ที่เคลือบน้ำมันหอมระเหยไทมอลมีจำนวนจุลินทรีย์น้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่เคลือบสารตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา หากพิจารณาจากเกณฑ์มาตรฐานของจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ไม่เกิน 5 log CFU/g สำหรับผลิตภัณฑ์กุ้งพร้อมบริโภค (Martínez-Alvarez *et al.*, 2009) ผลการวิจัยพบว่าจำนวนจุลินทรีย์ในเนื้อกุ้งขาวต้มสุก UC0, AL0 และ TMC01 มีค่ามากกว่ามาตรฐานในวันที่ 10, 12 และ

18 ของการเก็บรักษา ตามลำดับ ขณะที่ TMC05 ยังคงมีจำนวนจุลินทรีย์ไม่เกินค่ามาตรฐานในวันที่ 20 ของการเก็บรักษา แสดงให้เห็นว่าระดับความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยไทมอลที่ 0.5% ช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของจำนวนจุลินทรีย์ได้ดีที่สุด

ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาของเนื้อกุ้งขาวดัมสุกทุกชุดการทดลองไม่พบการเจริญของโคลิฟอร์มแบคทีเรีย และ *E. coli* โดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้เป็นดัชนีบ่งบอกสุขลักษณะ การตรวจไม่พบแสดงว่าในการทดลองครั้งนี้ไม่มีการปนเปื้อนจากกระบวนการผลิต เช่น การขนส่ง การเตรียมวัตถุดิบและสารเคลือบ การเคลือบ การบรรจุรวมถึงการเก็บรักษา รวมทั้งความร้อนในการต้มเนื้อกุ้งยังทำลายโคลิฟอร์มแบคทีเรีย และ *E. coli* ได้ เช่นเดียวกับ

การศึกษากุ้งตะกาด (*Parapenaeus longirostris*) นึ่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที พบว่า ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่ม Enterobacteriaceae เช่น โคลิฟอร์มแบคทีเรีย, *E. coli* และ *Salmonella* spp. ได้ (Martínez-Alvarez et al., 2009)

ทั้งนี้ในวันที่ 14 - 20 และ 16 - 20 ของการเก็บรักษาไม่ได้มีการวิเคราะห์คุณภาพทางจุลชีววิทยาเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสสำหรับการทดลอง UC0 และ AL0 ตามลำดับ เนื่องจากในวันก่อนหน้าวันดังกล่าวตัวอย่างในชุดการทดลองทั้งสองมีจำนวนจุลินทรีย์เกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานของจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ไม่เกิน 5 log CFU/g สำหรับผลิตภัณฑ์กุ้งพร้อมบริโภค (Martínez-Alvarez et al., 2009)



ภาพที่ 1 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของเนื้อกุ้งขาวดัมสุกที่เคลือบด้วยสารละลายอัลจินต 0.002% ที่มีน้ำมันหอมระเหยไทมอลผสมอยู่ในระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน □ UC0 ■ AL0 ■ TMC01 ■ TMC05 (A, B, C, ... มีความแตกต่างระหว่างชุดการทดลอง a, b, c, ... มีความแตกต่างระหว่างระยะเวลาเก็บรักษา และแถบบาร์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีขนาดเล็กกว่าสัญลักษณ์ภาพ)

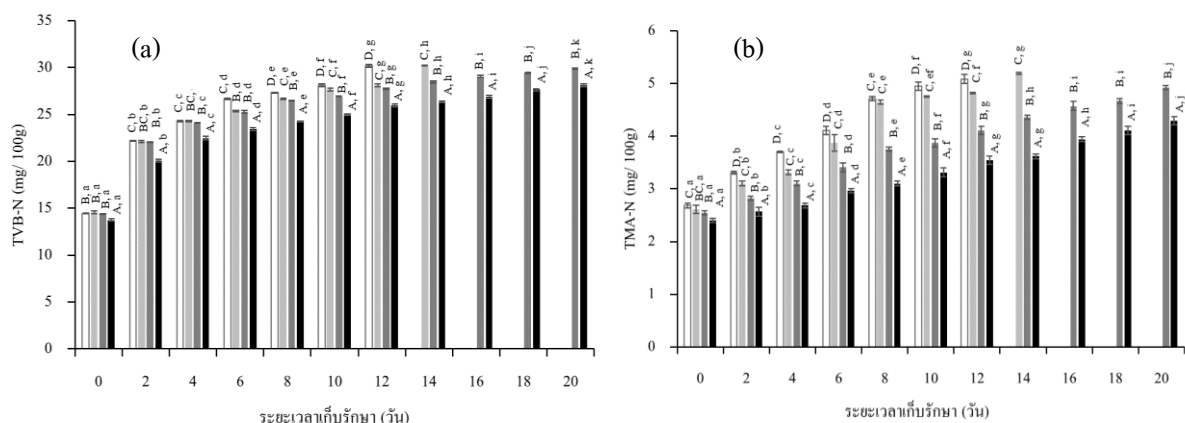
2. คุณภาพทางเคมี

ปริมาณค่าที่ระเหยได้ทั้งหมด (TVB-N) และไนโตรเจนเอมีน (TMA-N) ผลการทดลองพบว่า

ในวันที่ 0 ของการเก็บรักษา เนื้อกุ้งขาวดัมสุกมีปริมาณ TVB-N และ TMA-N 13.77 - 14.56 และ 2.40 - 2.68 มก.ไนโตรเจน/ 100 ก. ตามลำดับ และ

เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น เนื้อกุ้งขาวต้มสุกทุกชุดการทดลองมีปริมาณ TVB-N และ TMA-N มากขึ้น ($p<0.05$) (ภาพที่ 2) โดยจุลินทรีย์ในเนื้อกุ้งสร้างเอนไซม์เพื่อย่อยสลายสารอาหารต่างๆ รวมทั้งโปรตีนและสารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนในกุ้ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและสลายตัวได้เป็นสารประกอบ TVB-N และ TMA-N ปริมาณมากขึ้น (Gram and Dalgaard, 2002) ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของการทดลองในครั้งนี้ Tantasuttikul *et al.* (2011) พบว่าเนื้อหมึกกล้วย และ Kusuma and Teerawut (2014) พบว่าเนื้อกุ้งขาวต้ม มีปริมาณ TVB-N และ TMA-N เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตามเนื้อกุ้งขาวต้มที่เคลือบด้วยน้ำมันหอมระเหยไทม์มีปริมาณ TVB-N และ TMA-N น้อยกว่าการไม่

เคลือบสารและการเคลือบอัลจินตเพียงอย่างเดียว และที่ระดับความเข้มข้นมากขึ้นมีผลทำให้มีปริมาณ TVB-N และ TMA-N น้อยลง ($p<0.05$) (ภาพที่ 2) โดยประสิทธิภาพของสารประกอบฟีนอลในน้ำมันหอมระเหยในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์มีมากขึ้นตามระดับความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโปรตีนและสารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน จนเป็น TVB-N และ TMA-N ซ้ำลง เช่นเดียวกับ Teerawut and Kwan-on (2018) พบว่า กุ้งขาวที่แช่น้ำแข็งผสมน้ำมันหอมระเหยไทม์มอล Jouki *et al.* (2014) พบว่าการเคลือบเนื้อปลาเรนโบว์เทราท์ (*Oncorhynchus mykiss*) ด้วยน้ำมันหอมระเหยไทม์มอล มีปริมาณ TVB-N และ TMA-N น้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ใช้น้ำมันหอมระเหย



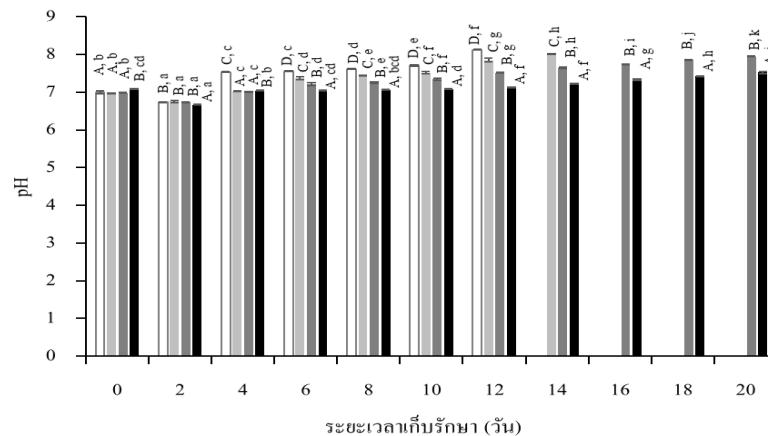
ภาพที่ 2 ปริมาณค่าที่ระเหยได้ทั้งหมด (TVB-N) (a) และปริมาณไนโตรเจนอะมิโน (TMA-N) (b) ของเนื้อกุ้งขาวต้มสุกที่เคลือบด้วยสารละลายอัลจินต 0.002% ที่มีน้ำมันหอมระเหยไทม์มอลผสมอยู่ในระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน □ UC0 ■ AL0 ■ TMC01 ■ TMC05 (A, B, C, ... มีความแตกต่างระหว่างชุดการทดลอง a, b, c, ... มีความแตกต่างระหว่างระยะเวลาเก็บรักษา และแถบบาร์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีขนาดเล็กกว่าสัญลักษณ์ภาพ)

ค่า pH: วันที่ 0-2 ของการเก็บรักษา พบว่าเนื้อกุ้งขาวต้มสุกทุกชุดการทดลองมีค่า pH ลดลง และวันที่ 2-20 ของการเก็บรักษา มีค่า pH เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 3) เกิดจากการสลายตัวของไกลโคเจนภายใต้

สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Anaerobic) อย่างต่อเนื่องได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดแลคติกสะสมทำให้ pH ของเนื้อกุ้งลดลง ต่อมาเกิดการเน่าเสียต่อเนื่องโดยมีการสลายตัวของสารประกอบไนโตรเจนที่มีสมบัติเป็น

เบส (TVB-N) ส่งผลให้ pH เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับ Li *et al.* (2012) พบว่าเนื้อปลาการ์ป (*C. auratus*) แช่เย็น มีค่า pH ลดลงในช่วงแรกของการเก็บรักษา จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ผลการทดลองยังพบว่า TMC05 และ TMC01 มี pH น้อยกว่า UC0 และ AL0 โดยเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยมากขึ้นทำให้เนื้อกุ้งขาวดัมสุกมี pH น้อยลง การเปลี่ยนแปลงค่า pH มีความสัมพันธ์กับจำนวนจุลินทรีย์ ปริมาณ TVB-N และ TMA-N ที่เพิ่มขึ้น เกิดจาก thymol และ carvacrol ในน้ำมันหอมระเหย

ไทมอลยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ทำให้จุลินทรีย์สร้างเอนไซม์ย่อยสลายโปรตีนและสารประกอบในโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนน้อยลง ดังนั้นการเกิดสารประกอบในโตรเจนที่มีคุณสมบัติเป็นด่างในปริมาณน้อยลงทำให้ชะลอการเปลี่ยนแปลงค่า pH ได้เช่นเดียวกับ Chamanara *et al.* (2012) พบว่าเนื้อปลาเรนโบว์เทราท์ (*O. mykiss*) เคลือบน้ำมันหอมระเหยไทมอลและโคโคซาน มีค่า pH น้อยกว่าการไม่เคลือบ ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 15 วัน



ภาพที่ 3 pH ของเนื้อกุ้งขาวดัมสุกที่เคลือบด้วยสารละลายอัลจินต 0.002% ที่มีน้ำมันหอมระเหยไทมอลผสมอยู่ในระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน □ UC0 ■ AL0 ■ TMC01 ■ TMC05 (A, B, C, ... มีความแตกต่างระหว่างชุดการทดลอง a, b, c, ... มีความแตกต่างระหว่างระยะเวลาเก็บรักษา และแถบบาร์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีขนาดเล็กกว่าสัญลักษณ์ภาพ)

3. คุณภาพทางกายภาพ

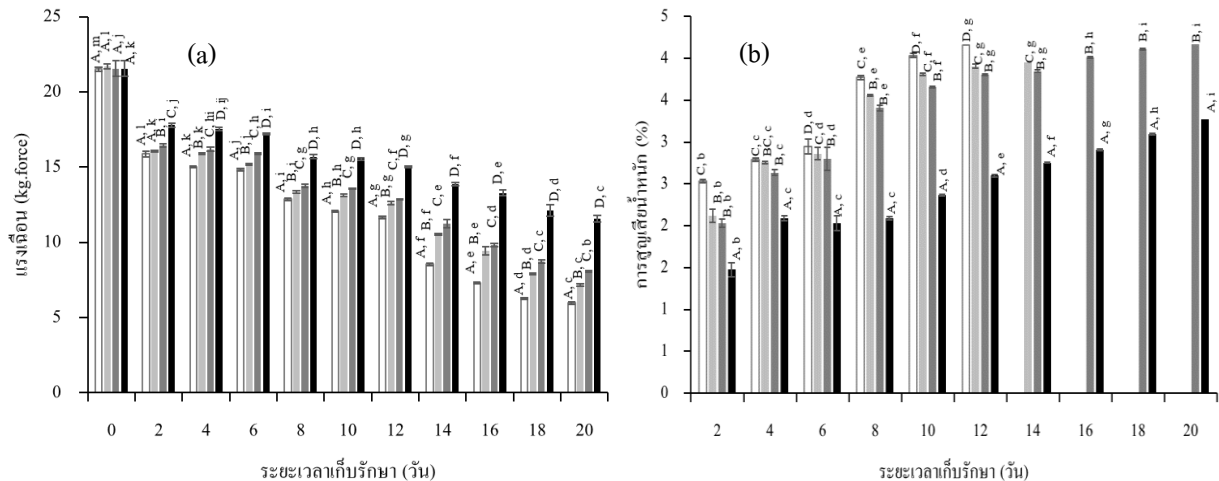
ค่าแรงเหวี่ยงสามารถใช้ติดตามการเสื่อมคุณภาพของกุ้งได้ โดยเมื่อยังไม่เกิดการเน่าเสีย โปรตีนในเนื้อกุ้งยังคงมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูง เมื่อวัดค่าแรงเหวี่ยงทำให้มีค่าสูง (Chen and Youling, 2008) สอดคล้องกับผลการทดลองครั้งนี้ที่พบว่า วันที่ 0 ของการเก็บรักษาเนื้อกุ้งขาวดัมสุกมีค่าแรงเหวี่ยง 21.51-27.70 g.force และทุกชุด

การทดลองมีค่าลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้น ($p < 0.05$, ภาพที่ 4(a)) เช่นเดียวกับ Imran *et al.* (2013) ที่ศึกษาคุณภาพของกุ้งขาว (*L. vannamei*) แช่แข็ง และ Sa-Nguansub *et al.* (2017) ที่ศึกษาเนื้อกุ้งขาว (*L. vannamei*) สุก พบว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นเนื้อกุ้งมีค่าแรงเหวี่ยงลดลง ทั้งนี้ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา TMC05 มีค่าแรงเหวี่ยงมากที่สุด รองลงมาได้แก่ TMC01, AL0 และ UC0

ตามลำดับ โดยเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยไทมอลมากที่สุดทำให้ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ของสารประกอบฟีนอลมีมากขึ้น ส่งผลให้จุลินทรีย์ตายลงจึงเป็นการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้ เมื่อจุลินทรีย์ถูกยับยั้งทำให้โปรตีนในเนื้อกุ้งขาวถูกย่อยสลายน้อยลง ความยืดหยุ่นของโปรตีนยังคงมีอยู่ส่งผลให้ค่าแรงเหวี่ยงของเนื้อกุ้งขาวมีมากกว่าชุดการทดลองอื่น เช่นเดียวกับ Kykkidou *et al.* (2009) พบว่าน้ำมันหอมระเหยไทมอลช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่มีผลต่อการลดลงของค่าเนื้อสัมผัสทำให้ปลากระโทงดาบ (*Xiphias gladius*) ที่เคลือบด้วยน้ำมันหอมระเหยไทมอลมีค่าเนื้อสัมผัสมากกว่าเนื้อปลาที่ไม่มีการเคลือบน้ำมันหอมระเหยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ส่วน Mastromatteo *et al.* (2010) พบว่าการเคลือบเนื้อกุ้ง (*Palaemon serratus*) ด้วยน้ำมันหอมระเหยไทมอลช่วยรักษาความแข็งแรงของโครงสร้างโปรตีนในกล้ามเนื้อได้ดีกว่าการไม่เคลือบ

เนื้อกุ้งขาวต้มสุกในวันที่ 2 ของการเก็บรักษามีการสูญเสียน้ำหนัก 1.48-2.53% โดยเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานานขึ้น มีการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น ($p < 0.05$) (ภาพที่ 4 (b)) ซึ่งสอดคล้องกับจำนวนจุลินทรีย์ของเนื้อกุ้งขาวต้มสุกมีเพิ่มมากขึ้นตามการ

เก็บรักษาที่นานขึ้นทั้งนี้มิใช่สาเหตุมาจากเอนไซม์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นไปย่อยสลายโครงสร้างต่างๆ ของโปรตีน ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของโปรตีนที่เรียกว่า water holding capacity ลดลง ดังนั้นน้ำรวมทั้งสารประกอบต่างๆ เช่น แร่ธาตุ และวิตามิน ที่เคยยึดจับกับโปรตีนถูกปลดปล่อยออกมาส่งผลให้น้ำหนักของตัวอย่างตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา โดย TMC05 มีการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด รองลงมาได้แก่ TMC01, AL0 และ UC0 ตามลำดับ เกิดจากสมบัติในการยับยั้งจุลินทรีย์ของน้ำมันหอมระเหยไทมอลที่มีมากขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยที่ใช้ (Burt, 2004; Jouki *et al.*, 2014) ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถสร้างเอนไซม์มาย่อยโปรตีนได้ ความสามารถในการอุ้มน้ำของโปรตีนยังมีอยู่ทำให้การสูญเสียน้ำหนักมีน้อย เช่นเดียวกับ Kykkidou *et al.* (2009) พบว่าปลากระโทงดาบ (*Xiphias gladius*) ที่เคลือบน้ำมันหอมระเหยไทมอลช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ซึ่งมีผลทำให้การสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าการไม่เคลือบน้ำมันหอมระเหยไทมอลตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา และ Attouchi and Sadok (2010) พบว่าเนื้อปลา Gilthead sea bream (*Sparus aurata*) เก็บรักษาในน้ำแข็งที่โรยด้วยผงไทมอลมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม



ภาพที่ 4 แรงกล้ามเนื้อ (a) และการสูญเสียน้ำหนัก (b) ของเนื้อกุ้งขาวตั้มสุกที่เคลือบด้วยสารละลายอัลจินต 0.002% ที่มีน้ำมันหอมระเหยไทม์ออลผสมอยู่ในระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน □ UC0 ■ AL0 ■ TMC01 ■ TMC05 (A, B, C, ... มีความแตกต่างระหว่างชุดการทดลอง a, b, c, ... มีความแตกต่างระหว่างระยะเวลาเก็บรักษา และแถบบาร์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีขนาดเล็กกว่าสัญลักษณ์ภาพ)

4. คุณภาพทางประสาทสัมผัส

คุณภาพทางประสาทสัมผัสได้แก่ ลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของเนื้อกุ้งขาวตั้มสุก UC0 และ AL0 มีคะแนนความชอบคงที่ใน 2 วันแรกของการเก็บรักษา แต่หลังจากนั้นมีความชอบลดลงเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานานขึ้น ($p < 0.05$, ภาพที่ 5) โดยเมื่อยังไม่เกิดการเน่าเสียเนื้อกุ้งตั้มสุกมีสีขาว มีจุดสีส้มชัดเจน มีรสและกลิ่นหอมหวาน รวมทั้งมีเนื้อสัมผัสยืดหยุ่นมาก แต่เมื่อเกิดการเน่าเสียโดยจุลินทรีย์สร้างเอนไซม์ย่อยโปรตีน ทำให้โปรตีนเสื่อมสภาพ ความยืดหยุ่นของโปรตีนลดลง กรดอะมิโนอิสระที่ให้แก่กลิ่นรสเฉพาะถูกทำลาย (Chen and Youling, 2008) เกิดเมือกที่เกิดจากแคปซูลของจุลินทรีย์ที่เป็น polysaccharide ที่สังเกตได้มากขึ้น (Ray and Bhunia, 2014) ประกอบกับโปรตีนและสารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนเสื่อมสภาพจากเอนไซม์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นเกิดเป็นสารประกอบต่างที่ระเหยได้ชนิดต่างๆ ทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์มากขึ้น (Gram and Dalgaard, 2002;

Kusuma and Teerawut, 2014) และเมื่อเนื้อกุ้งขาวตั้มสุกเกิดการเน่าเสียยังมีผลทำให้ไขมันในกลุ่มไตรกลีเซอไรด์ในเนื้อกุ้งขาวถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งมีโมเลกุลสั้นเกิดการระเหยได้ง่าย รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ อัลดีไฮด์และคีโตนชนิดต่างๆ ที่ก่อให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ในเนื้อกุ้งได้เช่นกัน (Okpala, 2016) ซึ่งผลการทดลองทางประสาทสัมผัสนี้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนจุลินทรีย์ การลดลงของค่าแรงเหวี่ยง การเพิ่มขึ้นของปริมาณ TVB-N และ TMA-N เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับ Teerawut and Pratumchart (2014) พบว่า กุ้งขาวที่แช่ในน้ำแข็งมีคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติและเนื้อสัมผัสลดลงเมื่อเก็บรักษานานมากขึ้น นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่า วันที่ 4-20 ของการเก็บรักษาเนื้อกุ้งขาวตั้มสุก AL0 มีคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสมากกว่า UC0 เนื่องจากการเคลือบด้วย

สารละลายอัลจินตช่วยรักษาสมบัติทางเคมีกายภาพ และทางประสาทสัมผัสของอาหาร โดยชะลอชะการเจริญของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และยังป้องกันการสูญเสียคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน ทำให้ยังคงยึดเกาะกับน้ำได้ดีลดการสูญเสียความชื้นได้ (Mohebi and Shahbazi, 2017) เช่นเดียวกับ Kusuma and Teerawut (2014) พบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติและเนื้อสัมผัสของเนื้อกุ้งขาวต้มเคลือบสารละลายอัลจินต และ Song *et al.* (2011) พบว่า ปลาตะเพียน (*Megalobrama amblycephala*) ที่เคลือบอัลจินตมีความชอบทางประสาทสัมผัสมากกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเคลือบอัลจินต เช่นกัน

ขณะที่หากพิจารณาผลการทดลองทางประสาทสัมผัสของเนื้อกุ้งขาวต้มสุก TMC01 และ TMC05 สามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงได้ 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 วันที่ 0-4 ของการเก็บรักษาผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสรวมทั้งมีคะแนนความชอบไม่แตกต่างจาก UC0 และ AL0 ส่วนคะแนนความชอบกลิ่นและรสชาติมีค่าเพิ่มขึ้นและมีคะแนนความชอบแตกต่างจาก UC0 และ AL0 เนื่องจากกลิ่นรสเฉพาะของของน้ำมันหอมระเหยไทมอลที่มีมากในช่วงแรกของการเก็บรักษา ทำให้ผู้ทดสอบรับรู้กลิ่นหอมหวาน และรสอร่อยของเนื้อ กุ้งขาวต้มสุกได้น้อย จากนั้นเมื่อกลิ่นรสของน้ำมันหอมระเหยไทมอลจางลง กลิ่นและรสชาติของเนื้อกุ้งขาวต้มสุกชัดเจนขึ้น ผู้ทดสอบจึงให้คะแนนการยอมรับมากขึ้นในวันที่ 6-20 ของการเก็บรักษา สอดคล้องกับการศึกษาของ El-Obeid *et al.* (2018) พบว่า ปลาไหลรมควันที่เคลือบด้วยน้ำมันหอมระเหยไทมอลมีคะแนนการยอมรับด้านกลิ่นและรสชาติน้อยกว่าตัวอย่างควบคุมในช่วงสัปดาห์แรกของการเก็บรักษา หลังจากนั้นจนถึงวันที่ 42 ของการเก็บรักษาคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสมาก

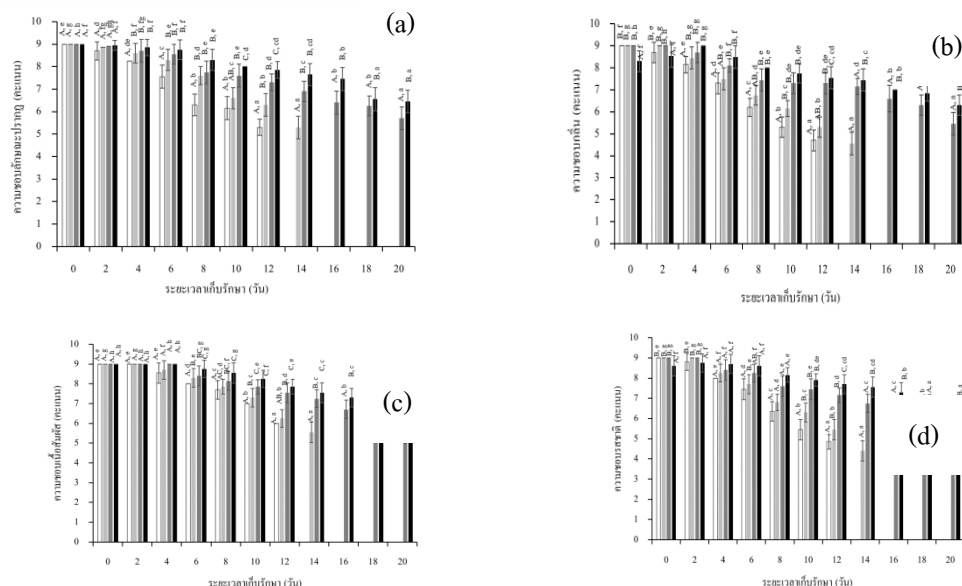
ตัวอย่างควบคุม ส่วน Shadman *et al.* (2017) พบว่า การใช้เทคนิคนาโนอิมัลชันร่วมกับน้ำมันหอมระเหยไทมอลช่วยเพิ่มคะแนนความชอบด้านกลิ่นและด้านกลิ่นรสในเนื้อปลาเรนโบว์เทราท์ (*O. mykiss*) ได้

การเปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 2 คือ วันที่ 6-20 ของการเก็บรักษานั้น ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสทุกลักษณะลดลงเมื่อเก็บรักษานานขึ้น โดยเนื้อกุ้งขาวต้มมีสีขาวอมน้ำตาลมากขึ้น มีเมือกมากขึ้น มีกลิ่นเหม็นเน่าและกลิ่นเหม็นเปรี้ยวมากขึ้น มีรสหวานน้อยลงและเนื้อนุ่มละมากขึ้น เกิดจากการเน่าเสียมากขึ้น เนื้อกุ้งขาวต้มสุกเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบแคโรทีนอยด์ในเนื้อกุ้งส่งผลให้สีของเนื้อกุ้งเปลี่ยนเป็นสีครีมหรือเทา (Potter and Hotchkis, 1995) และการที่จุลินทรีย์กลุ่มที่มีแคปซูลเป็นสาร polysaccharide ที่ทำให้เกิดเมือกมากขึ้น (Ray and Bhunia, 2014) ส่วนการย่อยสลายกรดอะมิโนอิสระและสารประกอบนิวคลีโอไทด์ที่หักกลิ่นหอมของเนื้อกุ้งต้มโดยจุลินทรีย์นั้นส่งผลให้กลิ่นกุ้งต้มจางลง ทั้งนี้การเจริญของจุลินทรีย์ตามระยะเวลาการเก็บรักษายังส่งผลต่อกลิ่นไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นคาวและกลิ่นเหม็นเปรี้ยวของเนื้อกุ้ง โดยกลิ่นคาวเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลายโปรตีนของจุลินทรีย์ได้เป็นสารประกอบต่างๆที่ระเหยได้ เช่น แอมโมเนีย, ไตรเมทิลเอมีน, ไดเมทิลเอมีน และ เมทิลเอมีน (Gram and Dalgaard, 2002) ซึ่งเป็นผลให้เนื้อกุ้งขาวต้มสุกมีกลิ่นคาวมากขึ้น รวมถึงกลิ่นเหม็นเปรี้ยวที่มีมากขึ้นเมื่อมีการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตกรดแลคติกเพิ่มขึ้น (Francoise, 2010) รวมทั้งกรดอะมิโนอิสระเช่น ไกลซีนที่ให้รสหวาน และกลูตามิกที่ให้รสอร่อยถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายทำให้เนื้อกุ้งขาวต้มสุกมีรสหวานและรสอร่อยน้อยลง (Sikorski *et al.*, 1990) ส่วนการนิ่มละของเนื้อกุ้งเกิดจากจุลินทรีย์ย่อยสลายโครงสร้างโปรตีนที่เคยจับตัวกันแน่นให้อ่อนตัวลง

โมเลกุลของน้ำที่จับกับโปรตีนถูกปลดปล่อยทำให้ความยืดหยุ่นและความแน่นน้อยลง (Pezeshk *et al.*, 2011) เช่นเดียวกับ Mohammad *et al.* (2013) พบว่า ผู้ทดสอบให้การยอมรับกลิ่นของปลาเรนโบว์เทราท์ (*Onchorynchus mykiss*) เคลือบน้ำมันหอมระเหยออริกานอลและน้ำมันหอมระเหยไทมอล และ Kusuma and Teerawut (2014) พบว่า ผู้ทดสอบให้ความชอบลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติและเนื้อสัมผัสของเนื้อกุ้งขาวต้มเคลือบน้ำมันหอมระเหยออริกานอลลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา เช่นกัน

อย่างไรก็ตามวันที่ 4-20 ของการเก็บรักษาเนื้อกุ้งขาวต้มสุกที่มีคะแนนลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสมากที่สุดคือ TMC05 รองลงมาคือ TMC01, AL0 และ UC0 ตามลำดับ ($p < 0.05$, ภาพที่ 5) เนื่องจากเมื่อใช้ความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยไทมอลมาก ปริมาณสารออกฤทธิ์ ได้แก่ carvacrol และ thymol ที่ช่วยชะลอการเจริญ

ของจุลินทรีย์มีปริมาณสูงขึ้นด้วย (Alçiçek, 2011) และในน้ำมันหอมระเหยไทมอลยังช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์เมื่อให้ไฮโดรเจนกับอนุมูลอิสระ อนุมูลของฟลาโวนอยด์ฟีนอลิกซึ่งมีความเสถียร จึงมีสมบัติในการเป็น antioxidant (Mohammad *et al.*, 2013) การเน่าเสียของเนื้อกุ้งขาวเกิดช้าลง เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Erkan (2012) ที่พบว่าการนำปลาเรนโบว์เทราท์ (*O. mykiss*) มาเคลือบด้วยน้ำมันหอมระเหยไทมอลและน้ำมันหอมระเหยกระเทียมช่วยชะลอการเน่าเสียของเนื้อปลาได้ และ Kostaki *et al.* (2009) พบว่าเนื้อปลากะพงขาว (*Dicentrarchus labrax*) ที่เคลือบด้วยน้ำมันหอมระเหยไทมอลร่วมกับการบรรจุแบบดัดแปลงบรรยากาศเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีอายุการเก็บรักษาได้นานกว่าการไม่เคลือบสาร



ภาพที่ 5 คะแนนความชอบลักษณะปรากฏ (a) กลิ่น (b) เนื้อสัมผัส (c) และรสชาติ (d) ของเนื้อกุ้งขาวต้มสุกที่เคลือบด้วยสารละลายอัลจินต 0.002% ที่มีน้ำมันหอมระเหยไทมอลผสมอยู่ในระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน □ UC0 ■ AL0 ■ TMC01 ■ TMC05 (A, B, C, ... มีความแตกต่างระหว่างชุดการทดลอง a, b, c, ... มีความแตกต่างระหว่างระยะเวลาเก็บรักษา และแถบบาร์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีขนาดเล็กกว่าสัญลักษณ์ภาพ)

สรุป

การนำเนื้อกุ้งขาวต้มมาเคลือบด้วยสารละลายน้ำมันหอมระเหยไทม์ช่วยลดการเน่าเสียของเนื้อกุ้งขาวต้มได้ดีกว่าการเคลือบสารละลายอัลจินेट และการไม่เคลือบ โดย TMC05 มีประสิทธิภาพสูงสุดในการชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางจุลชีววิทยา เคมี กายภาพ และประสาทสัมผัส การกำหนดอายุการเก็บรักษาเนื้อกุ้งขาวต้มสุก สำหรับการทดลองนี้เมื่อพิจารณาจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ไม่เกิน 5 log CFU/g เนื่องจากเกินเกณฑ์ที่กำหนดก่อนคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นที่ระดับน้อยกว่า 5 คะแนน แสดงให้เห็นว่าชุดการทดลองที่ดีที่สุดคือ TMC05 สามารถเก็บได้มากกว่า 20 วัน รองลงมาคือ TMC01, AL0 และ UC0 ที่เก็บได้ 16, 10 และ 8 วันตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เลขที่สัญญา SC14/2562

เอกสารอ้างอิง

- Alçiçek, Z. 2011. The effects of thyme (*Thymus vulgaris* L.) oil concentration on liquid-smoked vacuum-packed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum, 1792) fillets during chilled storage. **Food Chemistry** 128(3): 683-688.
- AOAC. 1994a. Official Method 990.12: Aerobic Plate Count in Foods. **Journal of AOAC International** 73: 242.
- AOAC. 1994b. Official method 991.14: Coliform and *Escherichia coli* count in foods. **Journal of AOAC International** 74: 635.
- AOAC. 2000. **Official method of analysis of Association of Official Analytical Chemists**. 17thed. Association of Official Analytical Chemists International. Gaithersburg, USA.
- Attouchi, M. and Sadok, S. 2010. The effect of powdered thyme sprinkling on quality changes of wild and farmed gilthead sea bream fillets stored in ice. **Food Chemistry** 119: 1527-1534.
- Burt, S. 2004. Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods - a review. **International Journal of Food Microbiology** 94(3): 223-253.
- Chamanara, V., Shabanpour, B., Gorgin, S. and Khomeiri, M. 2012. An investigation on characteristics of rainbow trout coated using chitosan assisted with thyme essential oil. **International Journal of Biological Macromolecules** 50: 540-544.
- Chen, G. and Youling, Y.L. 2008. Shelf-stability enhancement of precooked red claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) tails by modified CO₂/O₂/N₂ gas packaging. **LWT - Food Science and Technology** 41: 1431-1436.
- El-Obeid, T., Yehia, H.M., Sakkas, H., Lambrianidi, L., Tsiraki, M.I. and Savvaidis, I.N. 2018. Shelf-life of smoked eel fillets treated with chitosan or thyme oil. **International**

- Journal of Biological Macromolecules** 144: 578-583.
- Erkan, N. 2012. The effect of thyme and garlic oil on the preservation of vacuum - packaged hot smoked rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). **Food Bioprocess Technology** 5: 1246-1254.
- Fisheries development policy and strategy development. 2018. **Export and import value of shrimp**. Available Source: <https://www.fisheries.go.th/strategy/UserFiles/files/21-2-62.pdf>, March 1, 2020. (in Thai)
- Francoise, L. 2010. Occurrence and role of lactic acid bacteria in seafood products. **Food Microbiology** 27(6): 698-709.
- Gram, L. and Dalgaard, P. 2002. Fish spoilage bacteria- problems and solutions. **Environmental Biotechnology** 13: 262-266.
- Hasegawa, H. 1987. **Laboratory manual on analytical methods and procedures for fish and fish products**. Marine Fisheries Research Department, Southeast Asian Fisheries Development Center, Singapore.
- Imran, A., Chawalit, J. and Somrote, K. 2013. Characterization of quality degradation during chilled shrimp (*Litopenaeus vannamei*) supply chain. **International Food Research Journal** 20(4): 1833-1842.
- Jouki, M., Yazdi, F.T., Mortazavi, S.A., Koocheki, A. and Khazaei, N. 2014. Effect of quince seed mucilage edible films incorporated with oregano or thyme essential oil on shelf-life extension of refrigerated rainbow trout fillets. **International Journal of Food Microbiology** 174: 88-97.
- Kostaki, M., Giatrakou, V., Savvaiddis, I.N. and Kontominas, M.G. 2009. Combined effect of MAP and thyme essential oil on the microbiological, chemical and sensory attributes of organically aquacultured sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets. **Food Microbiology** 26: 475-482.
- Kusuma, B. and Teerawut, S. 2014. Shelf-life extension of pre-cooked shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by oregano essential oil during refrigerated storage. **Burapha Science Journal** (Special Issue): 71-77.
- Kykkidou, S., Giatrakou, V., Papavergou, A., Kontominas, M.G. and Savvaiddis, I.N. 2009. Effect of thyme essential oil and packaging treatments on fresh Mediterranean swordfish fillets during storage at 4°C. **Food Chemistry** 115: 169-175.
- Leungsakul, S. 1996. **Food microbiology**. Chaijarean Press, Bangkok. (in Thai)
- Li, T., Li, J., Hu, W., Zhang, X., Li, X. and Zhao, J. 2012. Shelf-life extension of crucian carp (*Carassius auratus*) using natural preservatives during chilled storage. **Food Chemistry** 135: 140-145.
- Martínez-Alvarez, O., López-Caballero, M., Gómez-Guillén, M. and Montero, P. 2009. The effect of several cooking treatments on subsequent chilled storage of thawed deep water pink shrimp (*Parapenaeus longirostris*) treated with different melanosis-inhibiting

- formulas. **LWT - Food Science and Technology** 42(8): 1335-1344.
- Mastromatteo, M., Danza, A., Conte, A., Muratore, G. and Nobile, M.A. 2010. Shelf-life of ready to use peeled shrimps as affected by thymol essential oil and modified atmosphere packaging. **International Journal of Food Microbiology** 144(2): 250-256.
- Mohammad, J., Farideh, T.Y., Seyed, A.M., Arash, K. and Naimeh, K. 2013. Effect of quince seed mucilage edible films incorporated with oregano or thyme essential oil on shelf-life extension of refrigerated rainbow trout fillets. **International Journal of Food Microbiology** 174: 88-97.
- Mohebi, E. and Shahbazi, Y. 2017. Application of chitosan and gelatin based active packaging films for peeled shrimp preservation: a novel functional wrapping design. **LWT - Food Science and Technology** 76: 108-116.
- National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards. 2014. **Marine shrimp standard TAS 7019-2013**. Mimeographed documents, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)
- Okpala, C.O.R. 2016. Lipid autoxidation in ozone-processed crustacean under cold storage: a treatise. **Lipid Technology** 28(5-6): 93-95.
- Pezeshk, S., Rezaei, M. and Hosseini, H. 2011. Effects of turmeric, shallot extracts, and their combination on quality characteristics of vacuum-packaged rainbow trout stored at 4 ± 1 °C. **Journal of Food Science** 76: 387-391.
- Potter, N.N. and Hotchkis, J.H. 1995. **Food Science**. Chapman & Hall, New York.
- Ray, B. and Bhunia, A. 2014. **Fundamental food microbiology**. 5th ed. CRC Press, Florida.
- Sa-Nguansub, S., Teerawut, S and Kwan-on, P. 2017. Extension of shelf-life and physical quality changes of cooked Pacific white shrimp during cold storage. **Burapha Science Journal** 21(Special Issue): 141-152. (in Thai)
- Shadman, S., Hosseini, S.E., Langroudi, H.E. and Shabani, S. 2017. Evaluation of the effect of a sunflower oil-based nanoemulsion with *Zataria multiflora* Boiss. essential oil on the physicochemical properties of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets during cold storage. **LWT - Food Science and Technology** 79: 511-517.
- Sikorski, Z.E., Kolakowska, A. and Pan, B.S. 1990. The nutritive composition of the major groups of marine food organisms, pp 29-54. In Sikorski, Z.E., ed. **Seafood: resources, nutritional composition and preservation**. CRC Press, Florida.
- Song, Y., Liu, L., Shen, H., You, J. and Luo, Y. 2011. Effect of sodium alginate-based edible coating containing different anti-oxidants on quality and shelf-life of refrigerated bream (*Megalobrama amblycephala*). **Food Control** 22(3-4): 608-615.
- Tantasuttikul, A., Kijroongrojana, K. and Benjakul, S. 2011. Quality indices of squid

- (*Photololigo duvaucelii*) and cuttlefish (*Sepia aculeata*) stored in ice. **Journal of Aquatic Food Product Technology** 20(2): 129-147.
- Teerawut, S. and Pratumchart, B. 2014. Effect of EDTA on physical and sensory properties of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during ice storage. **Thammasat International Journal of Science and Technology** 19(1): 72-82.
- Teerawut, S. and Kwan-on, P. 2018. Influence of thyme essential oil in ice to enhance chemical and physical quality of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). **Khon Kaen Agricultural Journal** 46(Special Issues): 1059-1066. (in Thai)
- Wang, Q., Lei, J., Ma, J., Yuan, G. and Sun, H. 2018. Effect of chitosan-carvacrol coating on the quality of Pacific white shrimp during iced storage as affected by caprylic acid. **International Journal of Biological Macromolecules** 106: 123-129.

ตัวแบบการวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นในกรุงเทพมหานครด้วยทฤษฎีเกรย์ Model Analysis of Air Pollution in Bangkok by Grey's Theory

พิมพ์พรรณ อัมพันธ์ทอง *

Pimpan Ampanthong *

Received: 18 December 2019, Revised: 8 March 2020, Accepted: 12 March 2020

บทคัดย่อ

ในการศึกษา ตัวแบบเกรย์ (Grey's Model (GM)) เพื่อพยากรณ์ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง (SPM10) ในกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นจังหวัดท่องเที่ยวของประเทศไทย โดยตั้งแต่ พ.ศ. 2551-2558 รวม 8 ปีและค่าฝุ่นละออง SPM10 รอบ 5, 10, และ 20 ปี ข้างหน้าซึ่งตรงกับ พ.ศ. 2570, 2575 และ 2580 ตามลำดับ พบว่าค่าปริมาณฝุ่นละออง SPM10 พยากรณ์จะมีแนวโน้ม 2 แบบ คือ 1. สถานะที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ได้แก่ ไปรษณีย์ราชบุรีบูรณะ กรมอุตุนิยมวิทยาบางนา สำนักงานการเคหะชุมชนคลองจั่น สนามกีฬาการเคหะชุมชนห้วยขวาง โรงเรียนนนทรีวิทยา โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ และโรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) 2. สถานะที่มีแนวโน้มลดลง ได้แก่ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมขนส่งทางบก สถานีการไฟฟ้าอยุธยาธนบุรี ตำรวจนครบาลโชคชัย และตรวจวัดการเคหะชุมชนดินแดง ทั้งนี้จากค่าพยากรณ์ปริมาณฝุ่นละออง SPM10 ในอนาคตแสดงถึงการบริหารการจัดการที่ดี ลดปริมาณฝุ่นละออง ก็จะสามารพัฒนาสนับสนุนการท่องเที่ยวแบบยั่งยืน เสริมสร้างภาพลักษณ์ที่ดีของประเทศได้

คำสำคัญ: ทฤษฎีเกรย์, ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก, ธรรมชาติของจังหวัดท่องเที่ยว, การพยากรณ์

สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ วิทยาเขตสุพรรณบุรี ตำบลย่านยาว อำเภอสามชูก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130

Department of Mathematics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Suphanburi Campus, Yan Yao, Samchuck, Suphanburi 72130, Thailand.

* Corresponding author, e-mail: pim_pimpan@hotmail.com Tel: 09 8998 4792

ABSTRACT

In this study, Grey's Model (GM) was used to forecast the amount of suspended particulate matter, which is smaller than 10 microns (SPM10) with 24 hour mean in Bangkok, which is a famous tourist destination in Thailand. The predictive value of a small amount of suspended particulate matter in tourism during an 8-year period (2551-2558 B.E.) and in the next 5, 10, and 20 years (2570, 2575, 2580 B.E.) showed the two results as follows: Firstly, there was increasing suspended particulate matter in some stations such as Ratchaburana Post Office Station, Department of Meteorological (Bangna Station), Housing Authority Office of Clong Chan Community Station, Stadium of Huai Kwang Housing Authority Station, Nonsiwitthaya School Station, Chulalongkorn Hospital Station, and Bodindecha School Station Sing Singhaseni. Secondly, there was decreasing suspended particulate matter in some stations such as Bansomdejchaopraya Rajabhat University Station, Ministry of Science and Technology Station, Department of Land Transport Station, MEA Substation Thonburi Station, Chokchai Metro Police Office Station, and Housing Authority Office of Din Daeng Community Station. The amount of suspended particulate matter forecast which is smaller than 10 microns (SPM10) showed that if there are good control and management of suspended particulate matter, the amount of suspended particulate matter will be decreased and it will be good for supporting sustainable tourism and strengthening the image of the country.

Key words: grey theory, suspended particulate matter, natural of travel's province, forecasting

INTRODUCTION

Tourism is one of the main incomes of Thailand. There are high competitions in tourism in Southeast Asia. However, Thailand has more advantages than other Southeast Asian countries as its culture is outstanding and unique. Also, there are various types of tourism in Thailand such as architectures, caves, waterfalls, local culture, language, minorities, folk plays, and natures. All of them are so important that the government should support both major cities and minor cities in Thailand to be attractive and impressive in order to bring a lot of tourists to spend time and money there. Bangkok, the capital city of Thailand, is still popular among tourists as it can be seen that a number of tourists entering Thailand during 2549-2554 B.E. were 36,172,138, 35,953,546, 35,110,693, 30,037,911, 38,222,903 and 43,763,002, tourists, respectively. The number of tourists in Bangkok tends to continuously increase every year and higher than those in other provinces. Additionally, the amount of increasing

population causes many environment problems such as air pollution, noise pollution, and garbage. Also, there is an increase of criminals. Air pollution is one of the big problems of the capital city. It comes from vehicles and industrial factories such as carbon dioxide gas, hydrocarbon, nitrogen oxide, suspended particulate matter, lead, and sulfur dioxide. The air pollution causes bad quality of air and health. In this study, the classified air pollution from the examination into two types. The first type is "Total Suspended Particulate: TSP", which causes irritations of respiratory and bad visuals. The second type is "Suspended Particulate Matter: SPM10", which is the particulate that is smaller than ten microns, can get into the respiratory system of human being, and is dangerous to sinus, oral cavity, larynx, trachea, and bronchus. It causes irritation, cough, sneeze and illness as well as economics and social lost. The chemical substance from industrial factories was released into the air and the amount is above the level of air quality control. In

Bangkok, the suspended particulate matter is smaller than 10 microns (SPM10) and there is suspended particulate matter that is smaller than 2.5 microns (SPM2.5), which is above the controlling standard level and dangerous to health. If the air pollution is under control, it can be used as basic information which is useful for preventing and solving air pollution problems.

Grey theory is a model finding trend of forecast value from many sources of data, such as medicine, agriculture, engineering, economics, and marketing. All the data were made in grey model (GM) by Deng (1989). Moreover, there were further studies developed, such as those from Yang and Wen (1997), Diyar and Mehmet (2007), Dend (2005), Erdal *et al.* (2010). The analysis of the GM is suitable for data with uncertain formats but GM is popular to use in accurate forecasts. The GM considers the value of beginning data to find parameter estimation and there must not be so many data to be analyzed. Therefore, the study of GM is suitable with the SPM10 data from 14 stations in Bangkok, and can be used to forecast the amount of suspended particulate matter in the future onward.

The GM is beginning data as equation (1) below,

$$x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(m)\} \quad (1)$$

Then find sum total value of primary data as the equation (2)

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

And from sum total value of data is $x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(m)\}$. It can find mid-range and derivation of sequence of data in GM is $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$. Therefore, to find derivation of function will be as below,

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b. \quad (3)$$

When a and b is parameter of the model and k is sequence of data as the equation (3)

To estimate the parameter by least sequence will be as below

MATERIALS AND METHODS

In the research, the GM was used to analyze the amount of SPM10 in Bangkok from 14 weather radar stations, such as Bansomdejchaopraya Rajabhat University Station (02T), Ratchaburana Post Office Station (03T original), Department of Meteorological (Bangna station) (05T), Housing Authority Office of Clong Chan Community Station (10T), Stadium of Huai Kwang Housing Authority Station (11T), Nonsiwitthaya School Station (12T), Ministry of Science and Technology Station (48R), Department of Land Transport Station (49), Chulalongkorn Hospital Station (50R), MEA Substation Thonburi station (52R), Chokchai Metro Police Office Station (53R), Housing Authority Office of Din Daeng Community Station (54R), The Government Public Relations Department Station (59T) and Bodindecha School Station (Sing Singhaseni) (61T), from year 2551-2558 B.E. totally eight years. Then the accuracy of the GM was compared with mean absolute percentage error: MAPE

$$[a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_m. \quad (4)$$

When $Y_m = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(m)]$ and $B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(m) & 1 \end{bmatrix}$ then calculate the new value as following

$$z^{(1)}(k+1) = \frac{1}{2} (x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k+1)), k = 1, 2, \dots, m-1. \quad (5)$$

To find forecast value of the GM is $\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a}$, it can be written as below

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = x^{(1)}(k+1) - x^{(2)}(k) = (1 - e^a) \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak}, k = 1, 2, \dots, k-1.$$

In the sequence of data $z^{(1)}(k+1)$ to find the original function for $x^{(1)}$, and

$$z^{(1)}(k+1) = \frac{1}{2} (x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k+1)). \quad (6)$$

To find $x^{(1)}(k)$ is to replace by exponential function. Mathematical estimation is an alternative to find estimation and decrease mean absolute percentage errors as the equation (7), that showed the most proper beginning value

$$z^{(1)}(k+1) = \frac{23}{54} x^{(1)}(k) + \frac{35}{54} x^{(1)}(k+1) - \frac{2}{27} x^{(1)}(k+2) \quad (7)$$

Estimation of properness is to consider the properness of forecast value of amount of the SPM10 in Bangkok by errors as below

$$\begin{aligned} \varepsilon^{(0)} &= \{\varepsilon(1), \varepsilon(2), \dots, \varepsilon(m)\} \\ &= \{x^{(0)}(1) - \hat{x}^{(0)}(1), x^{(0)}(2) - \hat{x}^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(m) - \hat{x}^{(0)}(m)\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Then find mean absolute percentage errors: MAPE as below.

$$MAPE = \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{\hat{x}(i) - x(i)}{x(i)} \right| \right), \text{ for } i = 1, 2, \dots, m.$$

RESULTS AND DISCUSSION

1. Data of the amount of the SPM10 in Bangkok: Bangkok is the capital city of Thailand and has the most population. Also, it is the center of education, transportation, bank and financial, communication, and center of all development. Bangkok has Chao Phraya River flowing through and has many important tourist destinations such as the Grand Palace, Wat Phra Si Rattana Satsadaram, Wat Arun Ratchawaram,

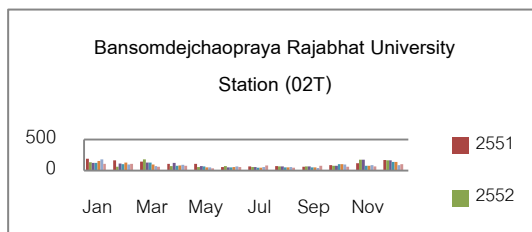
Wat Benchamabophit Dusitwanaram, the Ananta Samakhom Throne Hall, Siam Square, Madame Tussauds Bangkok, Asiatique, shopping malls, and many more tourist sites in Bangkok. The important tourist spots and the data of the SPM10 collected in Bangkok were the amount of the SPM10 in each station that tended to increase and had air quality problems in 8 years during the years 2551-2558 B.E. The 14 weather radar stations in Bangkok are shown in Table 1 and Figure 1.

Table 1 Amount of the SPM10 of 14 stations in Bangkok

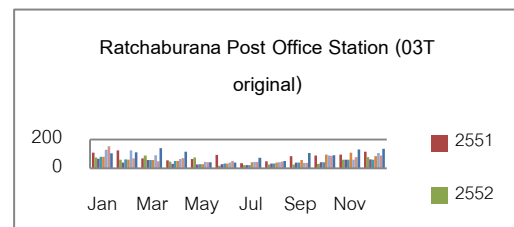
Weather radar stations	Basis information and general information
1. Bansomdejchaopraya Rajabhat University	Amount of the SPM10 was high in January, February, March, November and December.
2. Ratchaburana Post Office (Original)	Amount of the SPM10 was high in January, February, March, October, November and December. Moreover, it was found that the amount of the SPM10 during years 2556-2558 B.E. was very high.
3. Department of Meteorological (Bangna)	Amount of the SPM10 was high in January, February and December. Moreover, it was found that the amount of the SPM10 during January of years 2556-2557 B.E. and in February of year 2551 B.E. and in February of year 2555 B.E. was very high.
4. Housing Authority Office of Clong Chan Community	Amount of the SPM10 was high in January, February, March, November and December. Moreover, it was found that the amount of the SPM10 during January to March of years 2551-2553 B.E. and November to December of years 2552-2554 B.E. was very high.
5. Stadium of Huai Kwang Housing Authority	Amount of the SPM10 was high in January, February, March, November and December. Moreover, it was found that the amount of the SPM10 during January to March of year 2551 B.E. and in June of years 2554-2556 B.E. was very high.
6. Nonsiwitthaya School	Amount of the SPM10 was high in January, February, March, November and December. Moreover, it was found that the amount of the SPM10 during January to March of year 2551 B.E. and in June of years 2554-2556 B.E. was very high.
7. Ministry of Science and Technology	Amount of the SPM10 was high in January, February, March, November and December. Moreover, it was found that the amount of the SPM10 during January to March of years 2555-2557 B.E. and November to December of years 2552-2556 B.E. was very high.
8. Department of Land Transport	Amount of the SPM10 was high in January, February, March, November and December. Moreover, it was found that the amount of the SPM10 during January to March of years 2551-2553 B.E. and November to December of years 2552-2554 B.E. was very high.
9. Chulalongkorn Hospital	Amount of the SPM10 was high in January, February, March, November and December. Moreover, it was found that the amount of the SPM10 during January to March of years 2555-2556 B.E. and in December of years 2552-2556 B.E. was very high.
10. MEA Substation Thonburi	Amount of the SPM10 was high in January, February, March, November and December. Moreover, it was found that the amount of the SPM10 during January to March, and in December of year 2551 B.E. and in November of year 2556 B.E. was very high.
11. Chokchai Metro Police Office	Amount of the SPM10 was high in January, February, March, November and December. Moreover, it was found that the amount of the SPM10 during January to March of year 2551 B.E. and in June of years 2554-2556 B.E. was very high.

Table 1 (Continued)

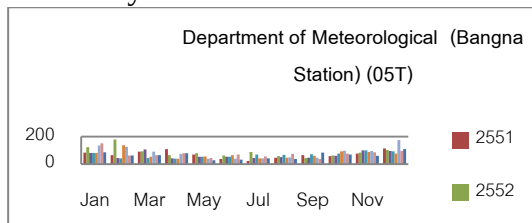
Weather radar stations	Basis information and general information
12. Housing Authority Office of Din Daeng Community	Amount of the SPM10 was high in January, February, March, November and December. Moreover, it was found that the amount of the SPM10 during January to March and October to December of years 2551-2553 B.E.
13. The Government Public Relations Department	Amount of the SPM10 was high in January, February, and March. Moreover, it was found that the amount of the SPM10 in January to February of years 2556-2558 B.E. and in March of years 2551-2553 B.E. was very high.
14. Bodindecha School (Sing Singhaseni)	Amount of the SPM10 was high in January, February, and December. Moreover, it was found that the amount of the SPM10 in January of years 2556-2558 B.E. in February of year 2551 B.E. and in December of years 2556-2558 B.E. was very high.



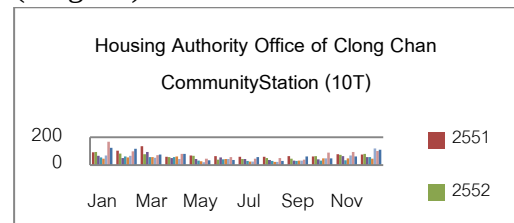
(1) Bansomdejchaopraya Rajabhat University Station



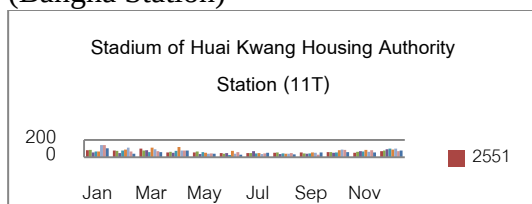
(2) Ratchaburana Post Office Station (Original)



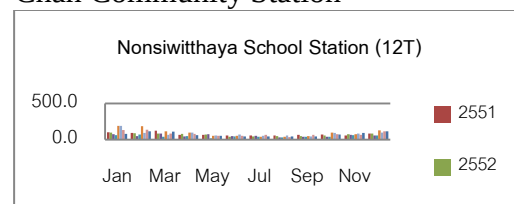
(3) Department of Meteorological (Bangna Station)



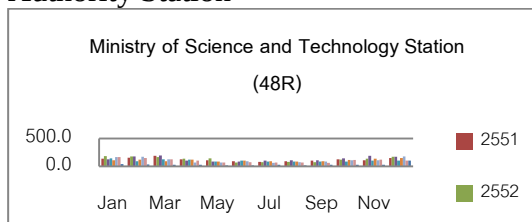
(4) Housing Authority Office of Clong Chan Community Station



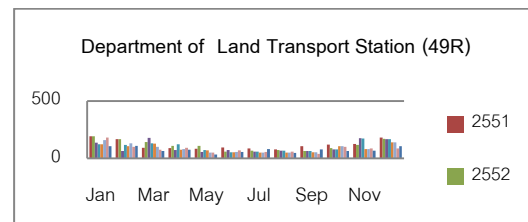
(5) Stadium of Huai Kwang Housing Authority Station



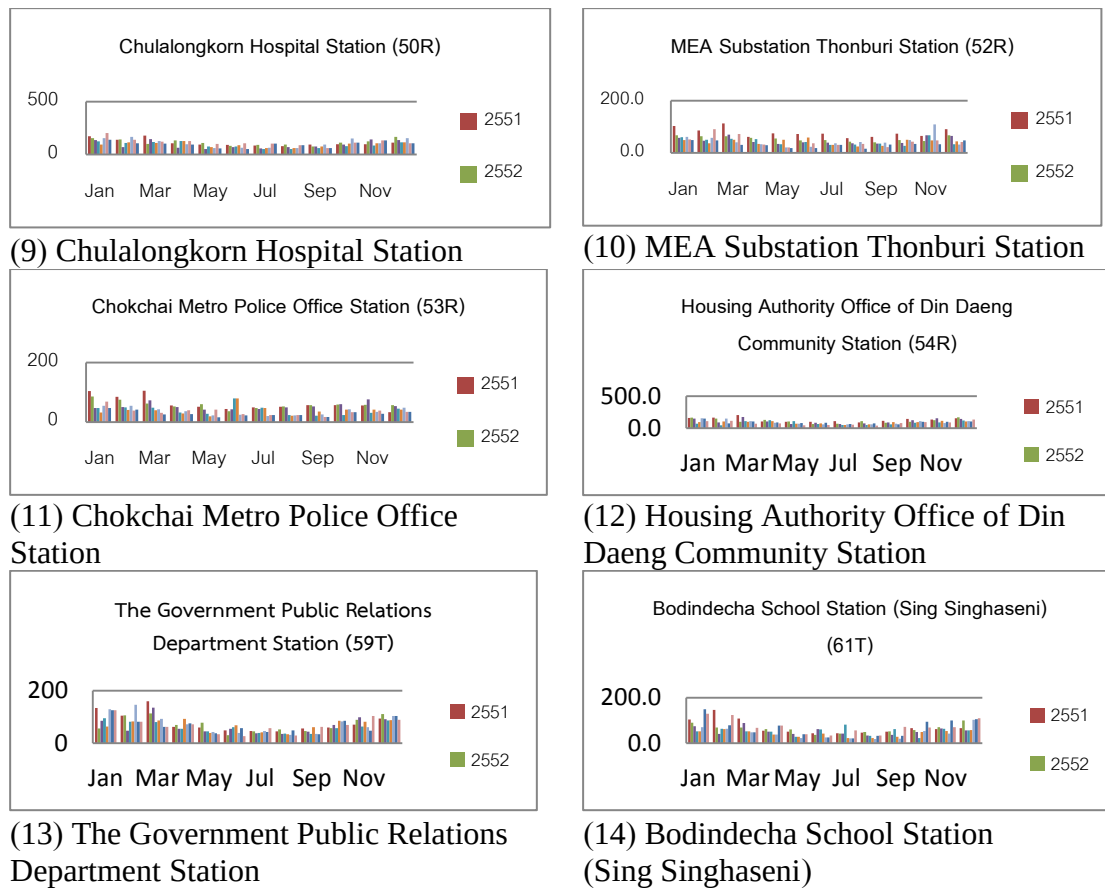
(6) Nonsiwitthaya School Station



(7) Ministry of Science and Technology Station



(8) Department of Land Transport Station



Note Air quality index.

0-25 mcg/m ³ Very good	26-37 mcg/m ³ good	38-50 mcg/m ³ moderate	51-90 mcg/m ³ Start to have an impact health	>90 mcg/m ³ Have an effect health
--------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	--	---

Figure 1 Amount of the SPM10 from 14 weather radar stations

2. Model of amount of suspended particulate matter in Bangkok: The GM was used to find parameter and mean absolute percentage error: MAPE in the model of amount of the SPM10 in Bangkok by forecast value showing trending value of the SPM10 in the future

in 5, 10, and 20 years, which are 2565, 2570 and 2580 B.E. as the following.

2.1 Data of parameter and mean absolute percentage error: MAPE of use of GM in each station are displayed in Table 2.

Table 2 Parameters and MAPE of use of GM to find the SPM10 in Bangkok

Weather radar stations	Parameters		MAPE	Errors Relation error (RE)
	a	b		
1. Bansomdejchaopraya Rajabhat University	0.0563	121.4482	14.0076	17.4197
2. Ratchaburana Post Office (Original)	-0.1250	29.5249	24.7768	51.8218
3. Department of Meteorological (Bangna)	0.0222	78.6674	23.2480	39.5555
4. Housing Authority Office of Clong Chan Community	-0.0377	45.8700	24.4011	50.3005

Table 2 (Continued)

Weather radar stations	Parameters		Errors	
	a	b	MAPE	Relation error (RE)
5. Stadium of Huai Kwang Housing Authority	-0.0020	62.4334	18.3453	54.8669
6. Nonsiwitthaya School	-0.0424	56.1027	25.2768	57.4015
7. Ministry of Science and Technology	0.1091	161.9240	34.7498	80.4171
8. Department of Land Transport	0.0563	121.4480	15.1024	18.0336
9. Chulalongkorn Hospital	-0.0033	100.93290	16.7806	19.0219
10. MEA Substation Thonburi	0.0650	58.7330	17.7784	46.4297
11. Chokchai Metro Police Office	0.1266	68.5425	20.9162	58.1631
12. Housing Authority Office of Din Daeng Community	0.0497	120.2770	15.8988	18.8925
13. The Government Public Relations Department	0.0051	69.8138	17.1696	31.4525
14. Bodindecha School (Sing Singhaseni)	-0.0173	47.7702	27.7297	64.6542

Table 2 shows that parameter “a” has opposite value such as Ratchaburana Post Office Station (Original), Housing Authority Office of Clong Chan Community Station, Stadium of Huai Kwang Housing Authority Station, Nonsiwitthaya School Station, Chulalongkorn Hospital Station and Bodindecha School Station (Sing Singhaseni). The parameter “b” presented the same direction value in every station. The MAPE showed the opposite result such as Bansomdejchaopraya Rajabhat University Station, Ministry of Science and Technology Station, Department of Land Transport Station, MEA Substation Thonburi Station, Chokchai Metro Police Office Station, Housing Authority Office of Din Daeng Community Station and found that the error relation value was in the same direction in every station. However, if the error value is considered from least to

most, it will be stated with Ministry of Science and Technology Station, Bansomdejchaopraya Rajabhat University Station, Department of Land Transport Station, Chulalongkorn Hospital Station, Housing Authority Office of Din Daeng Community Station, Stadium of Huai Kwang Housing Authority Station, the Government Public Relations Department Station, MEA Substation Thonburi Station, Department of Meteorological (Bangna Station), Housing Authority Office of Clong Chan Community Station, Chokchai Metro Police Office Station, Ratchaburana Post Office Station (Original) and Nonsiwitthaya School Station.

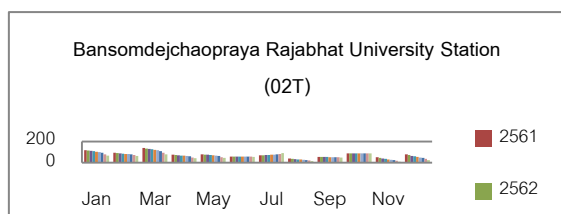
2.2 The GM indicated trending value of amount of the SPM10 in the future in 5, 10 and 20 years, which are 2565, 2570 and 2580 B.E. as reported in Table 3 and Figure 2 below.

Table 3 Forecast model of amount of the SPM10 in the future in 14 stations

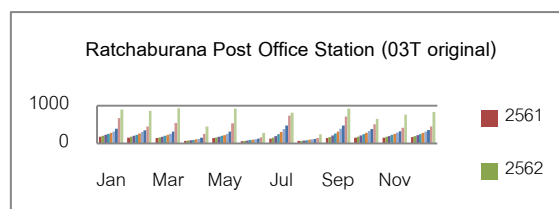
Weather radar stations	Forecast data of amount of the SPM10 in the future
1. Bansomdejchaopraya Rajabhat University	Amount of the SPM10 tends to decrease in years 2561-2566 B.E. except in June, and in September, it is constant. However, it tends to increase in July of year 2580 B.E.
2. Ratchaburana Post Office (Original)	Amount of the SPM10 tends to increase in years 2561-2566, 2570, 2575 and 2580 B.E.
3. Department of Meteorological (Bangna station)	Amount of the SPM10 tends to increase in years 2561-2566 B.E. and will be increasing more in years 2570, 2575 and 2580 B.E. However, it tends to decrease in February, April, June to August, and November.
4. Housing Authority Office of Clong Chan Community	Amount of the SPM10 tends to increase during January to May of years 2561-2566 B.E. and will be decreasing in June to August, and in November of years 2570, 2575 and 2580 B.E.
5. Stadium of Huai Kwang Housing Authority	Amount of the SPM10 is high in January, March to May, and will be increasing a lot in February, June and December of years 2570, 2575 and 2580 B.E.
6. Nonsiwitthaya School	Amount of the SPM10 is increasing from January to May of years 2561-2566 B.E. and will be increasing considerably in years 2570, 2575 and 2580 B.E. The constant trending is in February, and June to September
7. Ministry of Science and Technology	Amount of the SPM10 is decreasing from January to December of years 2561-2566 B.E. and will be decreasing substantially in years 2570, 2575 and 2580 B.E.
8. Department of Land Transport	Amount of the SPM10 is decreasing from January to May and November to December of years 2561-2566 B.E. and will be decreasing much in years 2570, 2575 and 2580 B.E. The constant trending is in June and September to October.
9. Chulalongkorn Hospital	Amount of the SPM10 is increasing from January to May, July and October to November of years 2561-2566 B.E. and will be increasing a lot in years 2570, 2575 and 2580 B.E. The constant trending is in June, August to September and December.
10. MEA Substation Thonburi	Amount of the SPM10 is decreasing from January to December of years 2561-2566 B.E. and will be decreasing significantly in years 2570, 2575 and 2580 B.E. It tends to increase in February.
11. Chokchai Metro Police Office	Amount of the SPM10 is decreasing from January to December of years 2561-2566 B.E. and will be increasing much in years 2570, 2575 and 2580 B.E. However, it tends to much decrease in September.
12. Housing Authority Office of Din Daeng Community	Amount of the SPM10 is decreasing from January to December of years 2561-2566 B.E. and will be decreasing substantially in years 2570, 2575 and 2580 B.E. However, it tends to decrease a lot in August.
13. The Government Public Relations Department	Amount of the SPM10 is increasing from January to December of years 2561-2566 B.E. and will be increasing considerably in years 2570, 2575 and 2580 B.E. The constant trending is in February and June to December.

Table 3 (Continued)

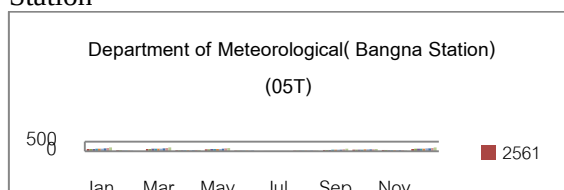
Weather radar stations	Forecast data of amount of the SPM10 in the future
14. Bodindecha School (Sing Singhaseni)	Amount of the SPM10 is increasing from January to December of years 2561-2566 B.E. and will be increasing significantly in years 2570, 2575 and 2580 B.E. The constant trending is in June to December.



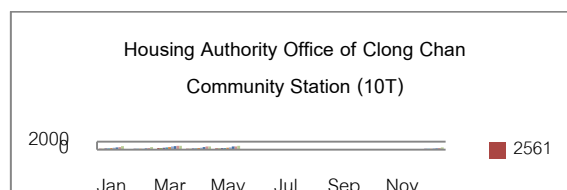
(1) Bansomdejchaopraya Rajabhat University Station



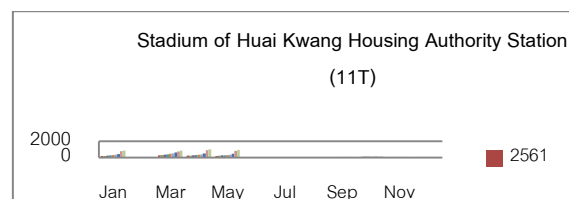
(2) Ratchaburana Post Office Station (Original)



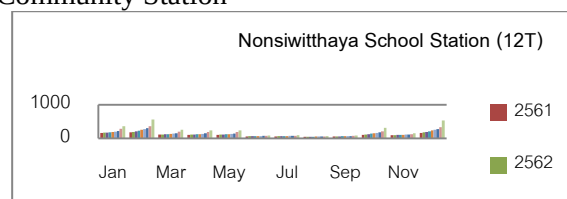
(3) Department of Meteorological (Bangna)



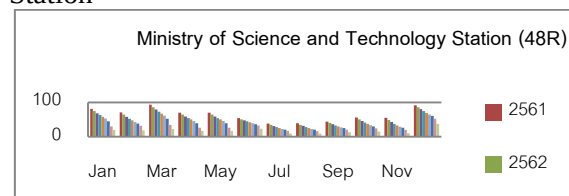
(4) Housing Authority Office of Clong Chan Community Station



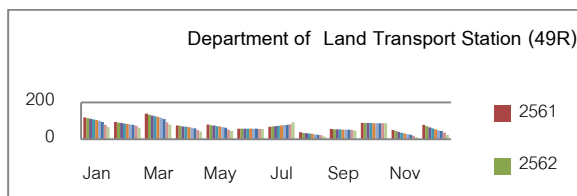
(5) Stadium of Huai Kwang Housing Authority Station



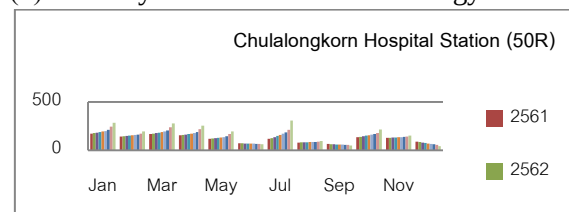
(6) Nonsiwitthaya School Station



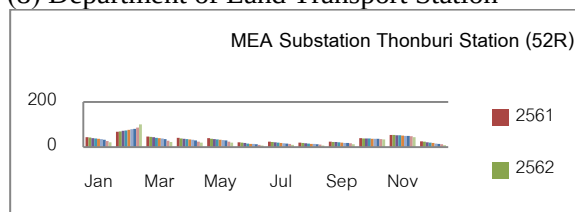
(7) Ministry of Science and Technology Station



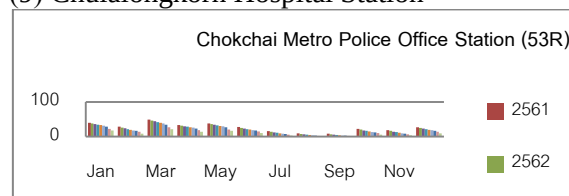
(8) Department of Land Transport Station



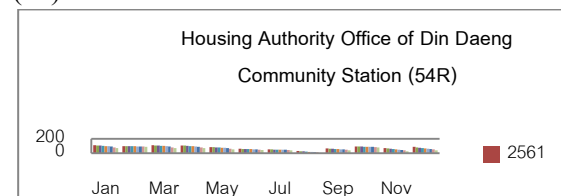
(9) Chulalongkorn Hospital Station



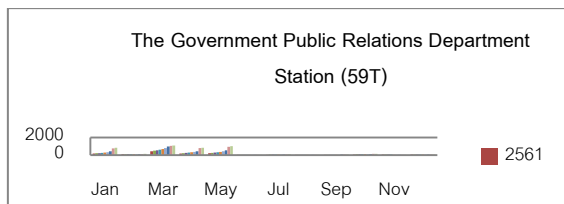
(10) MEA Substation Thonburi Station



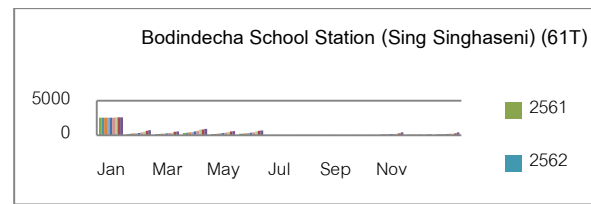
(11) Chokchai Metro Police Office Station



(12) Housing Authority Office of Din Daeng Community Station



(13) The Government Public Relations Department Station



(14) Bodindecha School (Sing Singhaseni) Station

Figure 2 Forecast the amount of the SPM10 in the future of each weather radar station

2.3 Research Result and Discussion: The GM showed that the SPM10 forecast value in Bangkok was close to the real value. The forecast value can be increased, decreased or constant. However, the forecast value of the GM can be used to find the way to support tourism, to encourage tourists to preserve the environment and keep it clean. Also, tourists can work with the community in each province to take care of the air quality, join the campaign of preserving environment by not burning garbage, campaign of planting trees along the roadside in order to let them absorb the air pollution, campaign of keeping any area clean for good scenery, and join any project involved that will decrease amount of the SPM10 in the future. Related research is as follows. Wongphan (2018) stated that the pollution control department has a mission to measure and manage air quality in Bangkok (Pollution Control Department Bangkok, 2017). Standard values affect the health of people and the image of Bangkok, because this capital city is the tourism and economic center of Southeast Asia. Phonviboon *et al.* (2014) claimed that rapid economic growth, enhanced agricultural productivity, and particulate matter of less than 2.5 microns emissions in the northern cities of Thailand have been increasing. Emissions of particulate matter have brought a series of public health concerns, particularly chronic respiratory diseases.

The forecast information amount of the SPM10 in Bangkok showed that there are three trending values that can be compared; such as increasing value,

decreasing value and constant value. Therefore, the data can be used as basic information for involved organizations in order to make advantages in economy, society and environment, especially major tourist destination provinces.

1) In Term of Economy: the statistics showed that air quality in Bangkok is still a problem because there is still over standard value every year. Therefore, the government and the private sectors should have a policy to control the amount of the tiny SPM10 to meet the standard and to be safe for health. In addition, all the SPM10 resources should be kept to decrease the SPM10, and an effective air management should be planned. Then there should be tools and air quality examination.

2) In Term of Society: air pollution problem is an important problem of tourist destination cities. The vehicles in big cities have increasing and should be controlled and the motors should be examined. Moreover, there should be a campaign of safe driving and riding in order to keep the image and quality of good life. Then, the society in the tourist destination provinces will be better and health of the population and tourists will be good. Related research is as follows. Rodthanee (2015) found that air conditioning buses had the highest ADI, followed by minibuses, public vans, MRT and BTS, respectively. These may be influenced by other factors, such as getting on and off the vehicles of passengers during the trips, traffic conditions etc. Based on the results, improvement of the vehicles ventilation systems together with cleaning up the vehicles cabins regularly

was suggested, especially in air conditioning buses.

3) In Term of Environment: the amount of suspended particulate matter in Bangkok showed that the SPM10 from the factories in the big cities has an impact on tourism. Therefore, there should be campaigns and projects to manage the environment properly in order to support tourism sustainably and make good image of the country.

CONCLUSION

Use of the GM Model to forecast the amount of suspended particulate matter (SPM10) in Bangkok from 2561-2566 B.E. and suspended particulate matter value in the future can be analyzed and compared as follows.

1. The result of the SPM10 forecast amount showed that the amount of the SPM10 are rising in the following stations; Ratchaburana Post Office Station (Original), Meteorological Department of Bangna Station, Housing Authority Office of Clong Chan Community Station, Stadium of Huai Kwang Housing Authority Station, Nonsiwitthaya School Station, Chulalongkorn Hospital Station, The Government Public Relations Department Station and Bodindecha School Station (Sing Singhaseni). The amount of the SPM10 in the above stations was growing because of the increasing vehicles, with the SPM10 coming from those vehicles. This problem has a direct impact to health. It can cause allergy, pneumonias, cancers, or respiratory diseases and has an impact on the environment.

2. The result of the SPM10 forecast amount indicated that the amount of the SPM10 are reducing in the following stations; Bansomdej chaopraya Rajabhat University Station, Ministry of Science and Technology Station, Department of Land Transport Station, MEA Substation Station, Chokchai Metro Police Office Station, and Housing Authority Office of Din Daeng Community Station. The amount of the SPM10 in the above stations

was decreasing because there is good management. For example, big factories have efficient environmental management and give advice to middle and small factories (SMEs) to have friendly manufacturing to environment and community, as well as support to have an association of suspended particulate material groups in order to solve pollution problems in the area. Air pollution values in each station in Bangkok showed that some stations had good values while some had fair values of air quality. This was consistent with the forecast model showing the increasing value.

REFERENCES

- Deng, J. 1989. Introduction to Grey System Theory. **The Journal of Grey System** 1(1): 1-24.
- Dend, J. 2005. Grey modeling resource theory and GM(1,1,bk). **The Journal of Grey System** 17(3): 201-206.
- Diyar, A. and Mehmet, A. 2007. Grey prediction with rolling mechanism for electricity demand forecasting of Turkey. **Energy** 32(9): 1670-1675.
- Erdal, K., Ulutas, B. and Kaynak, O. 2010. Grey System theory-based models in time series prediction. **Expert Systems with Applications** 37(1): 1784-1789.
- Phonviboon, T., Thikaichaisawat, I. and Rungpisuthipong, A. 2014. Disaster in the Winter of Particle Matter (PM2.5). **EAU Heritage Journal Science and Technology** 8(1): 40-46. (in Thai)
- Pollution Control Department Bangkok. 2017. Air and Noise Quality Division. **Ministry of Natural Resources and Environment**. Available Source: <http://air4thai.pcd.go.th/webV2/history/>, January, 20, 2017. (in Thai)
- Rodthanee, A. 2015. Quantities of PM2.5 inside public vehicles in Bangkok. Thesis in Environmental Science, Silpakorn University. (in Thai)

Wongphan, V. 2018. **Research Report no Study the Origin and Guidelines for the Management of Bong Dust, not more than 2.5 Microns in Bangkok and Suburb Areas.** Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment, Bangkok. Available

Source: <http://www.pcd.go.th>, August 1, 2018. (in Thai)

Yang, X. and Wen, Y.H. 1997. The application of Grey Model on the forecast of passenger of international air transportation. **Transport Planning Journal** 26(3): 522-555.

การศึกษาการกระตุ้นเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้า ร่วมกับน้ำผสมโอโซน

A Study on Activated Asparagus Seeds by Electric Field Combined with Ozone Water Technique

จิตชนก มากจันทร์*

Chidchanok Markjan *

Received: 26 December 2019, Revised: 30 March 2020, Accepted: 2 April 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระตุ้นเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้าร่วมกับโอโซน มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการงอกของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่ง และความยาวรากของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่ง เปรียบเทียบกับเมล็ดที่ไม่ถูกกระตุ้น โดยในการทดลองค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบสม่ำเสมอมีค่า 1-5 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่เวลา 20 25 และ 30 นาที ความเข้มข้นน้ำผสมโอโซนมีค่า 0.5-2.3 ส่วนต่อล้านส่วน ที่เวลา 10 20 และ 30 นาที ผลการทดลองพบว่า อัตราการงอกของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่ง และความยาวรากของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้าร่วมกับโอโซนมีผลที่ดีที่สุด โดยค่าสนามไฟฟ้าที่ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่เวลา 30 นาที ร่วมกับน้ำผสมโอโซนที่ความเข้มข้น 2 ส่วนต่อล้านส่วน ที่เวลา 20 นาที มีอัตราการงอกของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งมากที่สุดคือ ร้อยละ 98.45 และมีความยาวรากมากที่สุดคือ 1.8 เซนติเมตร และเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ถูกกระตุ้นพบว่า เมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ถูกกระตุ้นด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้าร่วมกับน้ำผสมโอโซนมีอัตราการงอกที่ดีกว่าเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ถูกกระตุ้นอยู่ร้อยละ 29.45 และมีความยาวรากที่ดีกว่าเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ถูกกระตุ้นอยู่ร้อยละ 88.88

คำสำคัญ: โอโซน, สนามไฟฟ้า, อัตราการงอก, เมล็ดหน่อไม้ฝรั่ง

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ตำบลย่านยาว อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130

Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Yan-Yao, Samchuk, Suphanburi 72130, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): chidchanok306@gmail.com

ABSTRACT

This research examines the activated of asparagus seed germination with the combination of electric field and ozonated water technique. It aims to explore the germination rate of asparagus seed and the length of the root in comparison to non-stimulated asparagus seeds. The experiment was conducted using the 1-5 kV/cm uniform electric field for a period of 20, 25, and 30 minutes and the 0.5-2.3 ppm ozonated water for a period of 10, 20, and 30 minutes, respectively. The result revealed that in terms of the germination rate of asparagus seed and the length of the root, asparagus seeds that have been activated with the combination of electric field and ozonated water technique have the best result. The combination of using the 3 kV/cm electric field for 30 minutes and the 2 ppm ozonated water for 20 minutes obtains the highest seed germination rate at 98.45 percent and the longest length of the root at 1.8 centimeters. Comparing to the nonactivated asparagus seeds, asparagus seeds that have been stimulated with the combination of electric field and ozonated water technique yield a better seed germination rate of 29.45 percent higher than non-stimulated seeds and a better length of the root ratio of 88.88 percent longer than non-stimulated ones.

Key words: ozone, electric field, germination rate, asparagus seeds

บทนำ

จากการรวบรวมข้อมูลของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศพบว่าในปี 2561 ประเทศไทยมีการส่งออกผักผลไม้สด แช่เย็น แช่แข็ง และอบแห้งมีปริมาณ 115952 ตัน คิดเป็นมูลค่ากว่า 178.15 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ซึ่งมีอัตราเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.76 โดยเมื่อจำแนกเป็นรายชนิดพบว่า หน่อไม้ฝรั่งมีการส่งออกมากเป็นอันดับต้นๆ ของประเทศไทย โดยในปี 2560 ประเทศไทยมีการส่งออกหน่อไม้ฝรั่งมีมูลค่ารวมทั้งสิ้น 4.97 ล้านดอลลาร์สหรัฐ หรือมีอัตราการขยายตัวอยู่ที่ร้อยละ 12.44 (Suteerapoj, 2019) และประเทศไทยกำลังขยายการผลิตเพื่อให้หน่อไม้ฝรั่งกลายเป็นพืชเศรษฐกิจส่งออกของประเทศไทยให้เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากหน่อไม้ฝรั่งอุดมไปด้วยคุณประโยชน์ด้านโภชนาการ และมีประโยชน์ต่อสุขภาพ เช่น มีประสิทธิภาพในการต้านมะเร็ง แก้อาการท้องอืดท้องเฟ้อ และช่วยขับ

ปัสสาวะเป็นต้น (Hasan *et al.*, 2016) แต่เนื่องจากในปัจจุบันการส่งออกของประเทศไทยยังประสบปัญหา คู่แข่งทางการค้า ปัญหามาตรการกีดกันทางการค้า และสินค้าไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐาน (Sajjanit, 2009) และนอกจากปัญหาด้านกระบวนการส่งออกแล้วนั้น หน่อไม้ฝรั่งยังประสบปัญหาด้านการเพาะปลูก ถึงแม้ว่าในประเทศไทยจะมีการปลูกหน่อไม้ฝรั่งมานานแล้วก็ตาม แต่หน่อไม้ฝรั่งยังคงเป็นพืชค่อนข้างใหม่ส่งผลให้เทคโนโลยีการผลิตหน่อไม้ฝรั่งที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยอยู่ในขั้นกำลังพัฒนา และยังไม่เป็นที่เปิดเผยมากนัก

โดยปัญหาของเกษตรกรที่เพาะปลูกหน่อไม้ฝรั่ง นอกจากเกษตรกรจะประสบปัญหาด้านเทคโนโลยีการผลิตหน่อไม้ฝรั่งแล้วนั้น เกษตรกรยังพบปัญหาเชื้อก่อโรค ศัตรูพืชของต้นหน่อไม้ฝรั่ง ปัญหาจากสภาพแวดล้อมที่ผันแปรไม่เอื้อต่อการออก และการเจริญเติบโตของหน่อไม้ฝรั่งยังเป็นอีกปัจจัย

ที่ส่งผลกระทบทางด้านระยะเวลาการผลิต โดยหน่อไม้ฝรั่งจะใช้ระยะเวลาในการปลูกค่อนข้างนาน ตั้งแต่กระบวนการเริ่มงอกจากเมล็ดจะใช้เวลาอย่างน้อย 10-15 วันโดยประมาณ รวมถึงการลงดินปลูกจะยาวนานไปถึง 4-5 เดือนต่อการเก็บเกี่ยวผลผลิต 1 ครั้ง (Watanabe *et al.*, 2014) ส่งผลให้ผลผลิตต่อไร่ต่อปีลดลง อันเป็นผลต่อเนื่องถึงเกษตรกรขาดรายได้ในการเก็บเกี่ยวผลผลิตที่ลดลง

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นส่งผลให้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในการช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโต รวมถึงการกระตุ้นการงอกของเมล็ดพันธุ์พืชด้วยกันอยู่หลายวิธี เช่น การศึกษาอิทธิพลของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าต่อคุณสมบัติการงอกของเมล็ดพริก โดยนำเมล็ดสัมผัสกับสนามแม่เหล็กที่ความเข้ม 250-1000 เกาส์เป็นเวลา 30 นาที่และสนามไฟฟ้า 100-400 นิวตันต่อลูกอมบ์ เป็นระยะเวลา 1 นาที่ และสนามแม่เหล็กร่วมสนามไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าช่วยกระตุ้นการงอกของเมล็ดพริก (Srikanth *et al.*, 2018) ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยเรื่องการศึกษาผลของสนามไฟฟ้าต่อการงอกและการเจริญเติบโตของเมล็ดพันธุ์หอมหัวใหญ่ โดยความเข้มสนามไฟฟ้าที่ใช้คือ 249 และ 14 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นเวลา 15 45 80 และ 150 วินาที ผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 9 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่เวลา 45 วินาที มีอัตราการงอกที่ดีที่สุดคือร้อยละ 80 (Molamofrada *et al.*, 2013) โดยสอดคล้องกับงานวิจัยเรื่องการศึกษาเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของรากต้นกล้วยมะเขือเทศที่ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ภายใต้สนามไฟฟ้า โดยใช้สนามไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ต่อเมตร ผลการทดลองพบว่ากล้วยมะเขือเทศที่ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้ามีความยาวรากมากที่สุดคือ 29 เซนติเมตร และมีจำนวนรากฝอยที่มากกว่า

(Tataranni *et al.*, 2013) และยังมีประเด็นที่น่าสนใจของงานวิจัยเรื่องการศึกษาผลของโอโซนในการลดการพักตัวของเมล็ดมะเขือเทศ โดยใช้ความเข้มข้น 0.001-1 กรัม ที่เวลา 10 20 และ 30 นาที่ ผลการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้นโอโซน 0.01 กรัม ที่เวลา 20 นาที่ มีการงอกของเมล็ดมะเขือเทศที่เร็วที่สุดคือร้อยละ 98 - 99 (Sudhakar *et al.*, 2011) ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยเรื่องการศึกษาการเพิ่มอัตราการงอกของเมล็ดข้าวโพดโดยการบำบัดด้วยออกซิเจนและโอโซน โดยความเข้มข้นออกซิเจนและโอโซนที่ใช้ในการทดลองคือ 20 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร วัดผลที่ 5 วัน ผลการทดลองพบว่าเมล็ดที่ได้รับออกซิเจนและโอโซนมีอัตราการงอกที่ร้อยละ 88.7 และ 92.0 (Violleau *et al.*, 2007) และยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการเร่งการงอกของเมล็ดอีกรูปแบบหนึ่งคือการศึกษาการเร่งการงอกของเมล็ดตาลโตนด โดยการเพาะเมล็ดสด เมล็ดล้างน้ำ แช่เมล็ด 20 วันและ 30วัน ผลการทดลองพบว่าวิธีแช่เมล็ด 20 วัน มีความงอกของเมล็ดตาลโตนดมากที่สุดคือร้อยละ 73 (Wongsinchuan *et al.*, 2013) เป็นต้น

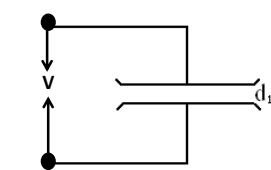
ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าสนามไฟฟ้าส่งผลต่ออัตราการงอกและความยาวรากของเมล็ดพันธุ์พืชที่ดีขึ้น และโอโซนส่งผลให้การเริ่มต้นการงอกที่เร็วขึ้นและอัตราการงอกที่ดีขึ้น แต่ยังไม่มียุทธศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับอัตราการงอกและความยาวรากของเมล็ดพันธุ์โดยใช้สนามไฟฟ้าร่วมกับการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการกระตุ้นอัตราการงอกเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้าร่วมกับการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซน เพื่อศึกษาอัตราการงอก และความยาวรากของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่ง อันเป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ทางด้านเกษตรกรรม เพื่อช่วยลดระยะเวลา

การเพาะปลูกและเก็บเกี่ยวหน่อไม้ฝรั่งให้กับเกษตรกร เพื่อให้ได้ผลผลิตที่เร็วกว่าการปลูกแบบปกติ อันเป็นการเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร และนำไปสู่การยกระดับสินค้าเกษตรส่งออกของไทยในอนาคต

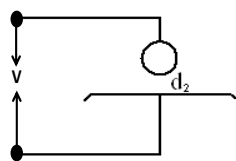
วิธีดำเนินการวิจัย

1. หลักการที่ใช้ในการออกแบบ

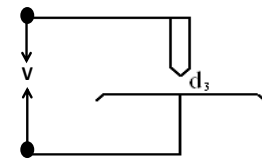
1.1 สนามไฟฟ้า



(ก) สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ



(ข) สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย



(ค) สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง

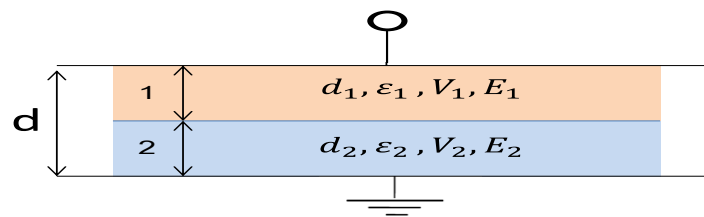
ภาพที่ 1 อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ

1.2 ฉนวนซ้อนกันสองชั้น

สนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนแต่ละชั้นมีค่าคงตัวหรือเท่ากันตลอด เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

ดังภาพที่ 2 โดยสนามไฟฟ้าและแรงดันที่กระจายในชั้นฉนวนทั้งสองอาจคำนวณหาได้ดังสมการที่ (1)

(Kuffel *et al.*, 2000)



ภาพที่ 2 ชั้นฉนวนวางซ้อนกันในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

$$E_2 = \frac{U}{d} \frac{1}{\frac{d_1}{d_2}(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1) + 1} \quad (1)$$

โดยที่ E = ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใด ๆ ระหว่างอิเล็กโทรด (โวลต์ต่อเซนติเมตร)

V = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด (โวลต์)

d_1 = ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (เซนติเมตร)

d_2 = ระยะห่างช่องอากาศ (เซนติเมตร)

ϵ_1 = เปรอริมิคิตีวี่ของฉนวนที่ 1

ε_2 = เปอร์มิตติวิตีของฉนวนที่ 2

1.3 อิเล็กโทรพอเรชัน

คือการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดช่องว่างที่เยื่อหุ้มเซลล์ เพื่อให้เซลล์สามารถยอมรับมวลสารจากภายนอกเข้าไปภายในเซลล์ได้ดีขึ้นโดยใช้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยมีหลักการคือการทำให้นสนามไฟฟ้า (Electric Field:E) ผ่านขั้วอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับเซลล์จนเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่เยื่อหุ้มเซลล์จนเกิดการสะสมประจุไฟฟ้าทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้ามีค่ามากกว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤต (E_c) ที่จะทำให้เกิดการแตกของเยื่อหุ้มเซลล์ และทำให้เกิดปรากฏการณ์ Electroporation หรือ Pore formation (Wichamanee, 2013)

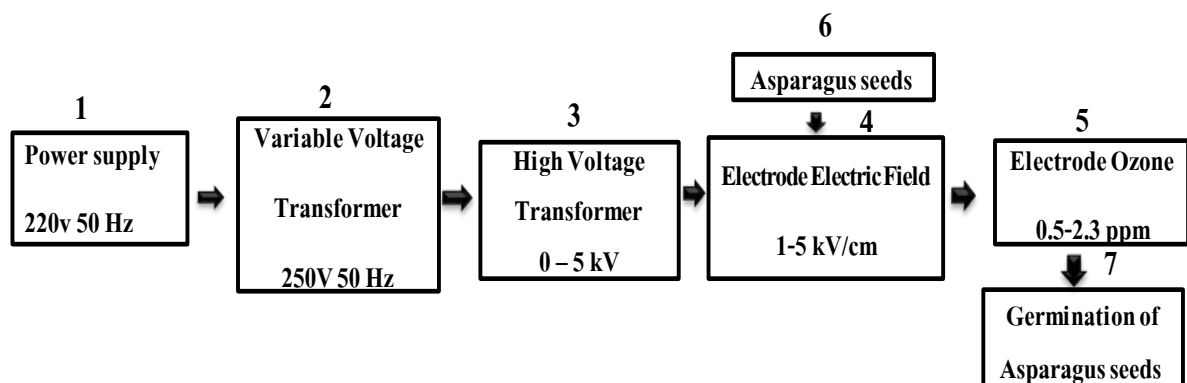
1.4 อัตราการงอก

การหาอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ สามารถคำนวณได้จากจำนวนของเมล็ดพันธุ์ที่ใช้ทดสอบที่มีการงอกหารด้วยจำนวนเมล็ดพันธุ์ทั้งหมด โดยเมล็ดพันธุ์ที่มีอัตราการงอกสูง จะส่งผลให้เมล็ดพันธุ์มีอัตราการงอกสูงตามไปด้วย ซึ่งการหาอัตราการงอกสามารถทำได้โดย การวางเมล็ดพันธุ์ที่ทดสอบลงบนวัสดุเพาะ จำนวน 100 เมล็ด วางทิ้งไว้จนครบ 7 วันจึงทำการตรวจนับจำนวนเมล็ดที่งอก และคำนวณอัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ดังสมการที่ (2) (Berton *et al.*, 2013)

$$\text{อัตราการงอกของเมล็ดพันธุ์ (ร้อยละ)} = \frac{(\text{จำนวนเมล็ดที่งอก})}{(\text{จำนวนเมล็ดที่เพาะ})} \times 100 \quad (2)$$

2. การออกแบบและการทดลอง

2.1 ไคอะแกรมการทดลอง



ภาพที่ 3 ไคอะแกรมการทดลอง

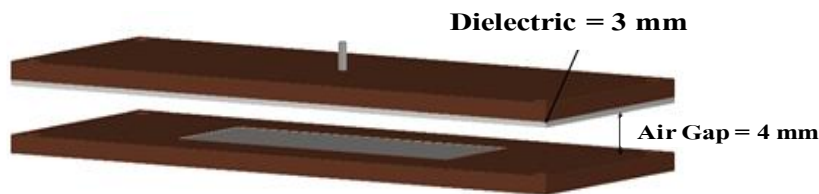
ภาพที่ 3 เป็นการอธิบายการทำงานของ การทดสอบค่าสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกระตุ้น เมล็ดหน่อไม้ฝรั่งเพื่อศึกษาอัตราการงอก โดยเริ่มจาก แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต ใน

หมายเลข 1 ซึ่งต่ออยู่กับหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า ในหมายเลข 2 เพื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้า หม้อแปลงแรงดันสูงกระแสสลับ 0-5 กิโลโวลต์ต่อ เซนติเมตร 50 เฮิร์ต ในหมายเลข 3 ทำหน้าที่จ่าย

แรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดในการสร้างสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอในหมายเลข 4 แล้วนำเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งในหมายเลข 6 มาผ่านสนามไฟฟ้าที่เวลา 20 25 และ 30 นาที ในหมายเลข 4 จากนั้นนำเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านสนามไฟฟ้ามาแช่น้ำผสมโอโซนที่ความเข้มข้น 0.5-2.3 ส่วนต่อล้านส่วน ที่

ระยะเวลา 10 20 และ 30 นาที ในหมายเลข 5 และทำการวัดผลอัตราการงอกและความยาวรากของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งในหมายเลข 7

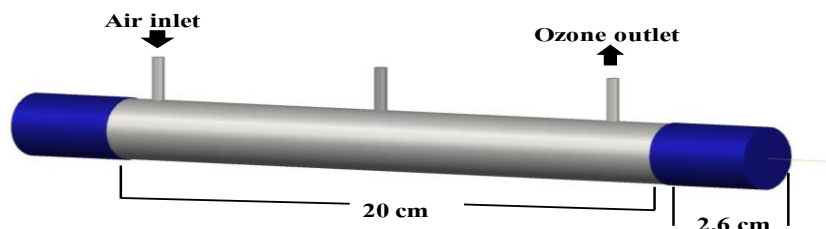
2.2 การกำหนดขนาดของชุดอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าและอิเล็กโทรดโอโซน



ภาพที่ 4 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

จากภาพที่ 4 แสดงชุดอิเล็กโทรดที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอโดยตัวนำไฟฟ้าและกราวด์เป็นแผ่นสแตนเลส เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ ส่วนถัดมาคือฉนวนชั้นที่ 1 อะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการเกิดเบรกดาวนภายใน

ช่องว่างอากาศ และฉนวนชั้นที่ 2 คือช่องว่างอากาศหนา 4 มิลลิเมตร ใช้สำหรับจัดวางเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งเพื่อให้สัมผัสกับสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอภายในชุดอิเล็กโทรดได้พอดี โดยไม่ซ้อนทับกัน



ภาพที่ 5 อิเล็กโทรดโอโซนที่ใช้ในการทดลอง

จากภาพที่ 5 แสดงชุดอิเล็กโทรดโอโซนที่ใช้ในการทดลอง อิเล็กโทรดที่ใช้ในการสร้างโอโซนเป็นอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันรวม และสร้างก๊าซโอโซนด้วยวิธีโคโรนาดีสชาร์จ โดยความ

ยาวของชุดอิเล็กโทรดเท่ากับ 20 เซนติเมตร และมีฉนวนหุ้มทางด้านหัว-ท้ายเป็นพลาสติกชนิด PVC

2.3 การวิเคราะห์ค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบแรงดันสูงกระแสสลับที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้า 1-5 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร

สนามไฟฟ้า (กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร)	แรงดันสูง (โวลต์)
1	620
2	1240
3	1860
4	2480
5	3100

จากตารางที่ 1 ค่าแรงดันสูงที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างอากาศของชุดอิเล็กโทรดคำนวณจาก สมการที่ 1 และนำมาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันผลของค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม FEM ซึ่งจากตารางที่ 1 จะเห็นว่าเมื่อค่า

แรงดันสูงที่ป้อนให้กับชุดอิเล็กโทรดมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างอากาศของชุดอิเล็กโทรดมีค่าสูงขึ้นด้วย

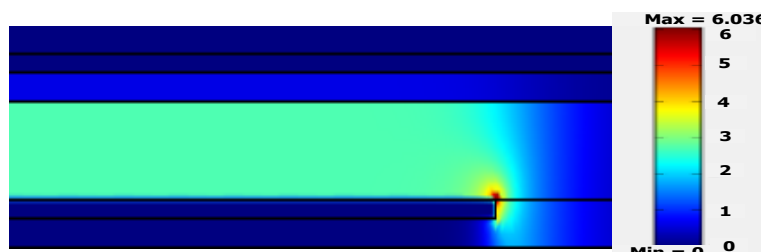
2.4 การวิเคราะห์ระยะเวลากับความเข้มข้นของโอโซน

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบระยะเวลากับความเข้มข้นโอโซนต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร

ปริมาณโอโซน (ส่วนต่อล้านส่วน)	ระยะเวลา (นาที)
0.5	2.5
1	5
1.5	7.5
2	10
2.3	12

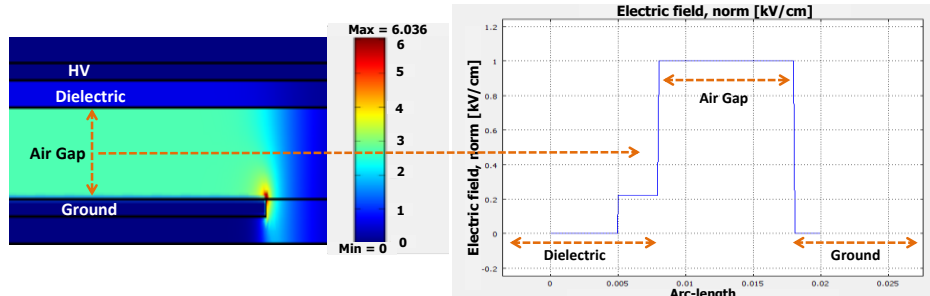
จากตารางที่ 2 เปรียบเทียบระยะเวลากับความเข้มข้นโอโซนต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร และวัดผลความเข้มข้นโอโซนในน้ำด้วยวิธีไอโอโดเมทรี จะเห็นว่า

เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเปิดเครื่องกำเนิดโอโซน ส่งผลให้ความเข้มข้นโอโซนในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 6 การจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าโดยโปรแกรม FEM

จากภาพที่ 6 แสดงตัวอย่างการกระจายสนามไฟฟ้าภายในชุดอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้โปรแกรม FEM สนามไฟฟ้าสร้างจากแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับดังตารางที่ 1 พบว่าภายในชุดอิเล็กทรอนิกส์มีความเครียดสนามไฟฟ้ามากที่สุดที่บริเวณขอบคมจึงได้มีการหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการเกิดเบรกดาวน์

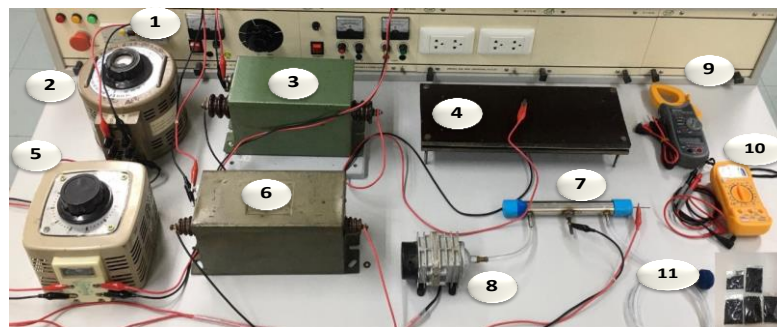


ภาพที่ 7 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในช่องว่างอากาศ 1 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่แรงดัน 620 โวลต์

จากภาพที่ 7 แสดงตัวอย่างค่าความเครียดสนามไฟฟ้าแบบสมมาตรภายในช่องว่างอากาศด้วยโปรแกรม FEM โดยเมื่อทำการป้อนค่าแรงดันสูงที่ 620 โวลต์ ดังตารางที่ 1 ส่งผลให้ค่าความเครียด

สนามไฟฟ้าภายในช่องว่างอากาศมีค่าเท่ากับ 1 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นไปตามตารางที่ 1

2.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 8 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

จากภาพที่ 8 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบค่าสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกระตุ้นเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งเพื่อศึกษาอัตราการงอก โดยเริ่มจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต ในหมายเลข 1 ไปยังหม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้าพิกัด 250 โวลต์ 50 เฮิร์ต ในหมายเลข 2 และ หมายเลข 5 เพื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้าด้านขาเข้าหม้อแปลงแรงดันสูงกระแสสลับ 0-5 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร 50 เฮิร์ต ใน

หมายเลข 3 และ หมายเลข 6 โดยหมายเลข 3 ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กทรอนิกส์ในการสร้างสนามไฟฟ้าแบบสมมาตรในหมายเลข 4 ส่วนในหมายเลข 6 ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กทรอนิกส์กำเนิดไอโซนในหมายเลข 7 แล้วจึงจ่ายอากาศด้วยปั๊มลมในหมายเลข 8 ผ่านชุดอิเล็กทรอนิกส์กำเนิดไอโซนในหมายเลข 7 แล้วนำเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งในหมายเลข 11 ผ่านสนามไฟฟ้าที่หมายเลข 4 แล้วนำเมล็ดมาแช่น้ำ

ผสมโอโซนที่ความเข้มข้น 0.5-2.3 ส่วนต่อล้านส่วน ที่มาจากชุดอิเล็กทรอนิกส์กำเนิดโอโซนในหมายเลข 7 จากนั้นคำนวณผลอัตราการงอกและวัดความยาวรากของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ส่วนในหมายเลข 9 คือ ดิจิตอลแอมมิเตอร์ DT-1000A ใช้สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าในชุดทดสอบค่าสนามไฟฟ้าและค่าโอโซน หมายเลข 10 คือ มัลติมิเตอร์ UT30A ใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าในชุดทดสอบค่าสนามไฟฟ้าและค่าโอโซน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การทดลองนี้จะทำการกระตุ้นเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ค่าสนามไฟฟ้าตั้งแต่ 1-5 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 20 25 และ 30 นาที จากนั้นนำเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งไปแช่น้ำผสมโอโซนที่ความเข้มข้น 0.5-2.3 ส่วนต่อล้านส่วน ที่ระยะเวลา 10 20 และ 30 นาที และทำการวัดผลอัตราการงอกและความยาวรากของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่ง ดัง ภาพ ที่ 9



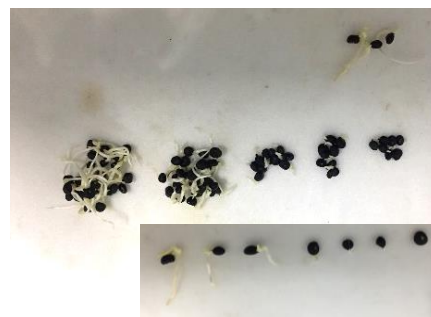
(ก) ตัวอย่างเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ผ่านสนามไฟฟ้าและไม่ผ่านการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซน



(ข) ตัวอย่างเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ได้รับการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้า



(ค) ตัวอย่างเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซน



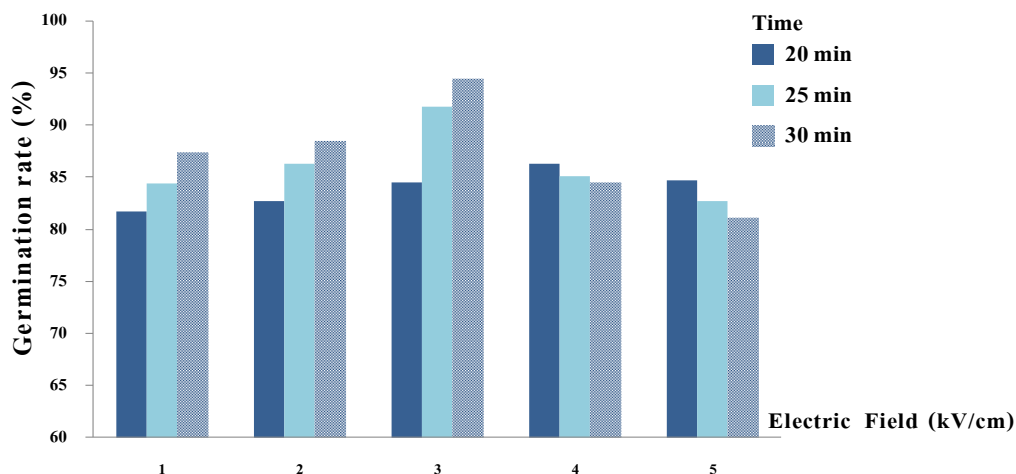
(ง) ตัวอย่างเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ได้รับการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าร่วมกับการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซน

ภาพที่ 9 ตัวอย่างเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ

1. ผลอัตราการงอกของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่ง

ตารางที่ 3 ผลของอัตราการงอกเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าที่ 1-5 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่เวลา 20 25 และ 30 นาที

สนามไฟฟ้า (กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร)	อัตราการงอกเมล็ดที่ 7 วัน (ร้อยละ)		
	20 นาที	25 นาที	30 นาที
1	81.7	84.3	87.4
2	82.7	86.3	88.5
3	84.5	91.8	94.5
4	86.3	85.1	84.5
5	84.7	82.7	81.1
เมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า			
	69		



ภาพที่ 10 ผลของอัตราการงอกเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ค่าสนามไฟฟ้า 1-5 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตรที่เวลา 20 25 และ 30 นาที

จากภาพที่ 10 ทำให้ทราบว่าที่ค่าสนามไฟฟ้า 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 30 นาที มีอัตราการงอกของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ดีที่สุดคือร้อยละ 94.5 รองลงมาคือค่าสนามไฟฟ้าที่ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร เวลา 25 นาที มีอัตราการงอกที่ร้อยละ 91.8 ส่วนเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้ามีร้อยละของอัตราการงอกต่ำที่สุดคือ ร้อยละ 69 จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้า และระยะเวลาในการสัมผัสสนามไฟฟ้าที่มากขึ้นส่งผลให้เมล็ดมี

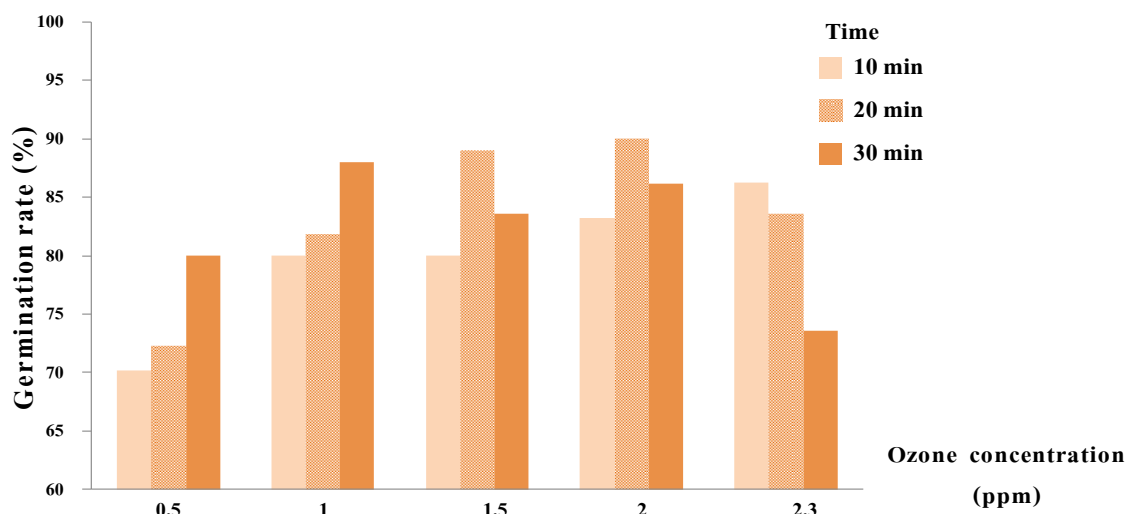
ร้อยละอัตราการงอกที่เพิ่มขึ้น จึงอาจเป็นไปได้ว่าเมื่อสนามไฟฟ้าสัมผัสเมล็ด จะส่งผลให้เกิดช่องว่างที่บริเวณพื้นผิวของผนังเซลล์ และเมื่อนำไปแช่น้ำผนังเซลล์จะสามารถยอมรับมวลสารของน้ำจากภายนอกเข้าไปภายในเซลล์ได้ดีขึ้น (Shorstkii *et al.*, 2019) โดยในส่วนของค่าสนามไฟฟ้าที่ 4 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นต้นไป มีร้อยละของอัตราการงอกที่ลดลง เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มมากเกินไปอาจส่งผลให้ผนังเซลล์เกิดความเสียหายส่งผลให้ร้อยละของอัตราการงอกของเมล็ดลดลง (Wichamane,

2013) แต่ในทุกๆ การทดลองจะสังเกตได้ว่าเมล็ด
หน่อไม้ฝรั่งที่ถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้ามีร้อยละ
ของอัตราการงอกที่ดีกว่าเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ถูก

กระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า (Molamofrada *et al.*, 2013;
Mahajan and Pandey, 2014)

ตารางที่ 4 ผลของอัตราการงอกเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซนที่ความเข้มข้น 0.5-2.3 ส่วนต่อล้าน ส่วน ที่ระยะเวลา 10 20 และ 30 นาที

โอโซน (ส่วนต่อล้านส่วน)	อัตราการงอกเมล็ดที่ 7 วัน (ร้อยละ)		
	10 นาที	20 นาที	30 นาที
0.5	70.2	72.3	80
1	80	81.8	88
1.5	80	89	83.6
2	82.2	90	86.2
2.3	86.3	83.6	73.6
เมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ผ่านการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซน			69



ภาพที่ 11 อัตราการงอกเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซนที่ความเข้มข้น 0.5-2.3 ส่วนต่อล้านส่วน ที่เวลา 10 20 และ 30 นาที

จากภาพที่ 11 ทำให้ทราบว่าที่ความเข้มข้นของ
น้ำผสมโอโซน 2 ส่วนต่อล้านส่วน ที่ระยะเวลา 20
นาที มีอัตราการงอกของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งมากที่สุด
คือ ร้อยละ 90 รองลงมาคือความเข้มข้นของน้ำผสม
โอโซน 1.5 ส่วนต่อล้านส่วน ที่ระยะเวลา 20 นาที มี
อัตราการงอกของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งร้อยละ 89 ส่วน

เมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ผ่านการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซน
มีร้อยละของอัตราการงอกต่ำที่สุดคือร้อยละ 69 จาก
ผลการทดลองทำให้ทราบว่าความเข้มข้นน้ำผสมโอโซน
ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เมล็ดมีร้อยละอัตราการงอกที่
เพิ่มขึ้น เนื่องจากการทดลองได้ทำการวัดผล
ออกซิเจนละลายน้ำในน้ำผสมโอโซนพบว่ามีความ

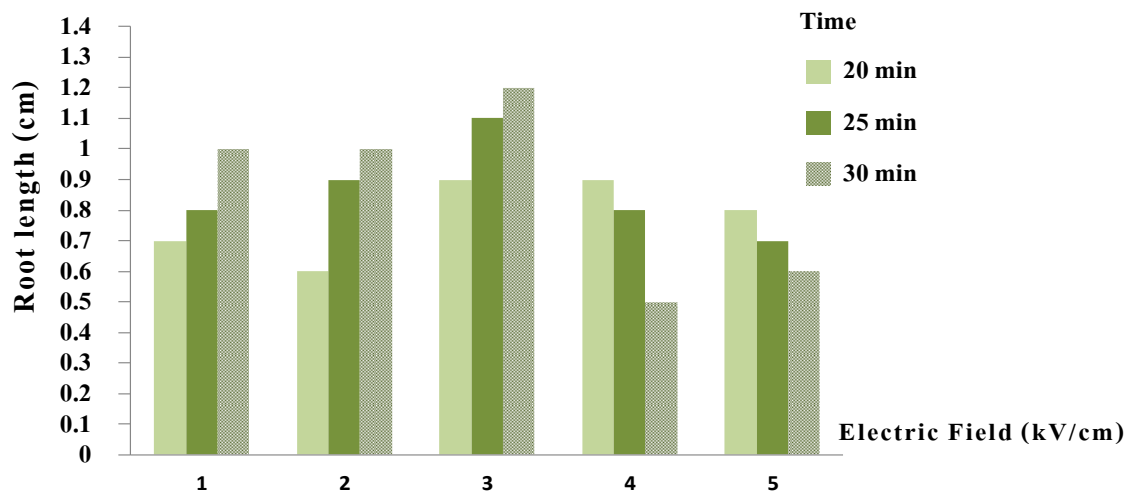
ออกซิเจนละลายน้ำที่มากกว่าน้ำธรรมดาถึงร้อยละ 14.7 ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำนี้มีผลต่ออัตราการงอกของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ดีขึ้น (Yasin and Andreasen, 2016) โดยหากออกซิเจนละลายน้ำมีปริมาณน้อยจะส่งผลให้อัตราการงอกรวมถึงความเร็วในการงอกของเมล็ดลดลงตามไปด้วย และน้ำผสมโอโซนที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมสามารถลดอัตราการพักตัวของเมล็ดได้ (Sudhakar *et al.*, 2011) แต่ในกรณีที่ความ

เข้มข้นผสมโอโซนที่มากเกินไป และระยะเวลาในการแช่เมล็ดในน้ำผสมโอโซนที่นานเกินไป อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งได้ เนื่องจากก๊าซโอโซนเป็นก๊าซออกซิไดซ์ (Violleau *et al.*, 2007)

2. ผลความยาวรากของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่ง

ตารางที่ 5 ผลความยาวรากเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่กระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า 1-5 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่เวลา 20 25 และ 30 นาที

สนามไฟฟ้า (กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร)	ความยาวรากเมล็ดที่ 7 วัน (เซนติเมตร)		
	20 นาที	25 นาที	30 นาที
1	0.6	0.8	1
2	0.7	0.9	1
3	0.9	1	1.2
4	0.9	0.8	0.5
5	0.8	0.7	0.6
เมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า	0.2		



ภาพที่ 12 ผลของความยาวรากเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ค่าสนามไฟฟ้า 1-5 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตรที่เวลา 20 25 และ 30 นาที

จากภาพที่ 12 ทำให้ทราบว่าที่ค่าสนามไฟฟ้า 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 30 นาที มีความยาวรากที่ดีที่สุดคือ 1.2 เซนติเมตร รองลงมาคือที่ค่าสนามไฟฟ้า 1 กิโลโวลต์ต่อ

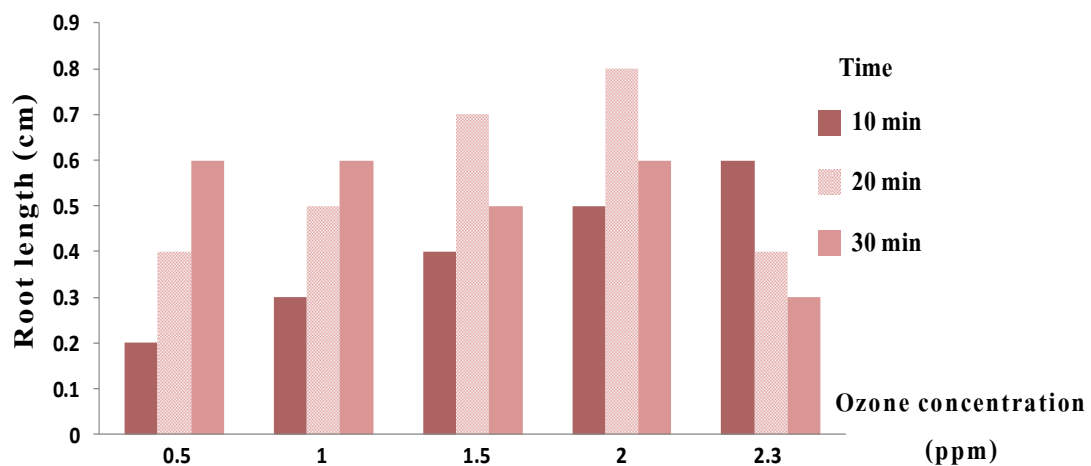
เซนติเมตร และ 2 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 30 นาที มีความยาวรากที่เท่ากันคือ 1 เซนติเมตร ในส่วนของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ถูกกระตุ้นจากสนามไฟฟ้ามีความยาวรากน้อยที่สุดคือ

0.2 เซนติเมตร จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้า และระยะเวลาในการสัมผัสสนามไฟฟ้าที่มากขึ้นส่งผลให้มีความยาวรากมากขึ้น สืบเนื่องจากการทดลองก่อนหน้านี้ โดยเมื่อมีอัตราการงอกของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเจริญเติบโตในส่วนของรากที่มากขึ้น รากจึงสามารถดูดซับน้ำในขณะเพาะเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งได้มากขึ้น จึงมีการพัฒนาการ

เจริญเติบโตในส่วนของความยาวรากที่เพิ่มขึ้น (Tataranni *et al.*, 2013) ส่วนที่ค่าสนามไฟฟ้าที่ 4 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร เป็นต้นไป ความยาวรากของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งจะเริ่มลดลง แต่ในทุกๆ การทดลองจะสังเกตได้ว่าเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้ามีความยาวรากที่มากกว่าเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า (Patwardhan and Gandhare, 2013)

ตารางที่ 6 ผลความยาวรากเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่แช่ด้วยน้ำผสมโอโซนที่ 0.5 - 2.3 ส่วนต่อล้านส่วน ที่เวลา 10 20 และ 30 นาที

โอโซน (ส่วนต่อล้านส่วน)	ความยาวรากเมล็ดที่ 7 วัน (เซนติเมตร)		
	10 นาที	20 นาที	30 นาที
0.5	0.2	0.4	0.6
1	0.3	0.5	0.6
1.5	0.4	0.7	0.5
2	0.5	0.8	0.6
2.3	0.6	0.4	0.3
เมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ผ่านการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซน		0.2	



ภาพที่ 13 ผลของความยาวรากเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ค่าโอโซน 0.5-2.3 ส่วนต่อล้านส่วน ที่เวลา 10 20 และ 30 นาที

จากภาพที่ 13 ทำให้ทราบว่าที่ความเข้มข้นโอโซน 2 ส่วนต่อล้านส่วน ที่ระยะเวลา 20 นาที มีความยาวรากมากที่สุดคือ 0.8 เซนติเมตร รองลงมาคือที่ความเข้มข้นโอโซน 1.5 ส่วนต่อล้านส่วน ที่

ระยะเวลา 20 นาที มีความยาวราก 0.7 เซนติเมตร ในส่วน of เมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ได้ผ่านการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซนมีความยาวรากน้อยที่สุดคือ 0.2 เซนติเมตร จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าความเข้ม

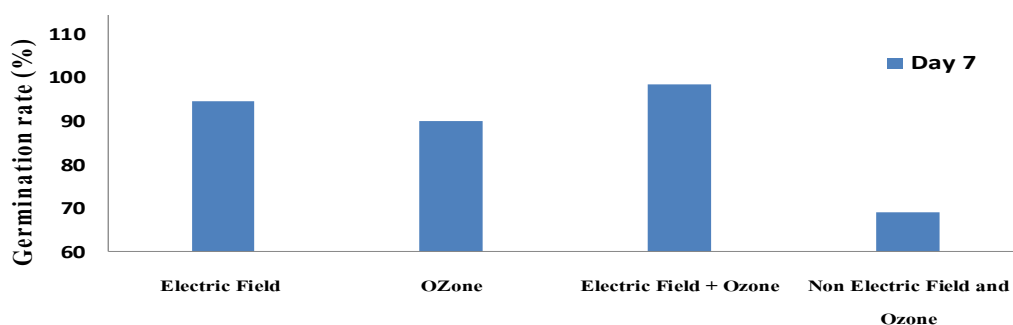
น้ำผสมโอโซนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เมล็ดมีความยาวรากที่มากขึ้น เนื่องจากผลสืบเนื่องจากการทดลองก่อนหน้านี้ โดยเมื่อเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซนจะมีอัตราการงอกที่มากขึ้น ส่งผลให้รากสามารถดูดซับน้ำในขณะเพาะเมล็ดได้มากขึ้น จึงมีการพัฒนาการเจริญเติบโตในส่วนของความยาวรากที่เพิ่มขึ้นแต่ในกรณีที่ความเข้มข้นน้ำผสมโอโซนที่มาก

เกินไป และระยะเวลาในการแช่เมล็ดในน้ำผสมโอโซนที่นานเกินไป อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งได้เนื่องจากก๊าซโอโซนเป็นก๊าซออกซิไดซ์ (Violleau *et al.*, 2007)

3. ผลเปรียบเทียบอัตราการงอกของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ใช้เทคนิคสนามไฟฟ้าร่วมกับโอโซน

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบผลของอัตราการงอกเมล็ดหน่อไม้ฝรั่ง ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย สนามไฟฟ้า โอโซน สนามไฟฟ้าร่วมกับโอโซน และไม่ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าและไม่ผ่านการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซน

กรณีของการทดสอบ	อัตราการงอก (ร้อยละ)
สนามไฟฟ้าที่ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร	94.5
น้ำผสมโอโซนที่ 2 ส่วนต่อล้านส่วน	90
สนามไฟฟ้าที่ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับน้ำผสมโอโซนที่ 2 ส่วนต่อล้านส่วน	98.45
ไม่ได้รับการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าและไม่ผ่านการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซน	69



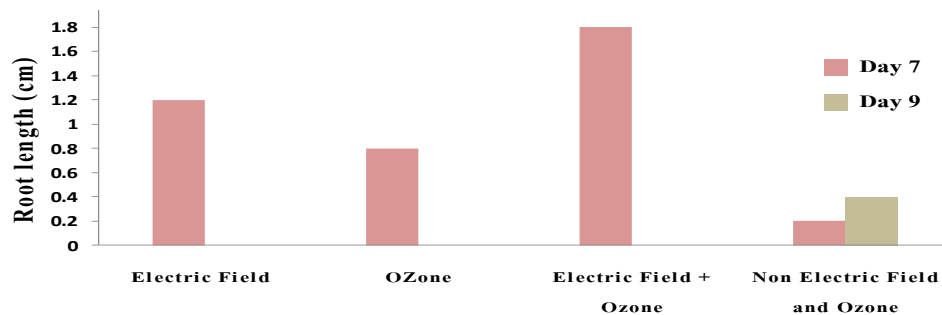
ภาพที่ 14 ผลเปรียบเทียบอัตราการงอกของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ใช้เทคนิคสนามไฟฟ้าร่วมกับโอโซน

จากภาพที่ 14 ทำให้ทราบว่าเมื่อทำการกระตุ้นเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ค่าสนามไฟฟ้า 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 30 นาที และนำไปแช่ร่วมกับน้ำผสมโอโซนที่ความเข้มข้น 2 ส่วนต่อล้านส่วน ที่ระยะเวลา 20 นาที มีผลของอัตราการงอกดีที่สุดในการทดลอง คือร้อยละ 98.45 รองลงมาคือ

เมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ได้กระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าที่ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่เวลา 30 นาที มีผลของอัตราการงอกร้อยละ 94.5 ส่วนเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ได้กระตุ้นจากสนามไฟฟ้าและไม่ผ่านการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซนมีผลอัตราการงอกที่ต่ำที่สุดคือร้อยละ 69

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบผลของความยาวรากของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่ง ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย สนามไฟฟ้า โอโซน สนามไฟฟ้าร่วมกับโอโซน และไม่ได้รับการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าและไม่ผ่านการแช่ด้วยน้ำผสม โอโซน

กรณีของการทดสอบ	ความยาวรากที่ 7 วัน (เซนติเมตร)
สนามไฟฟ้าที่ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร	1.2
น้ำผสมโอโซนที่ 2 ส่วนต่อล้านส่วน	0.8
สนามไฟฟ้าที่ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ร่วมกับน้ำผสมโอโซนที่ 2 ส่วนต่อ ล้านส่วน	1.8
ไม่ได้รับการกระตุ้นจากสนามไฟฟ้าและไม่ผ่านการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซน	0.2



ภาพที่ 15 ผลเปรียบเทียบความยาวรากของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ใช้เทคนิคสนามไฟฟ้าร่วมกับโอโซน

จากภาพที่ 15 ทำให้ทราบว่าเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านสนามไฟฟ้า 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่เวลา 30 นาที และแช่ร่วมกับน้ำผสมโอโซนที่ 2 ส่วนต่อล้านส่วน ที่เวลา 20 นาที มีความยาวรากดีที่สุดคือ 1.8 เซนติเมตร รองลงมาคือเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านสนามไฟฟ้าที่ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 30 นาที มีความยาวรากคือ 1.2 เซนติเมตร ส่วนของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ไม่ผ่านการกระตุ้นมีความยาวรากน้อยที่สุดคือ 0.2 เซนติเมตร ซึ่งยังไม่เพียงพอต่อการนำลงดินปลูก โดยเมล็ดควรมีความยาวรากอย่างน้อย 0.3 เซนติเมตร ก่อนนำลงดินปลูก (Soltani *et al.*, 2006) จึงทำการเพาะเมล็ดต่อไปจนถึงวันที่ 9 จึงทำให้มีความยาวรากเพิ่มขึ้นเป็น 0.4 เซนติเมตร ซึ่งเพียงพอต่อการนำลงดินปลูก ส่วนเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการกระตุ้นด้วย

สนามไฟฟ้าและน้ำผสมโอโซนมีความยาวรากที่เพียงพอโดยใช้ระยะเวลาเพียง 7 วัน ซึ่งใช้ระยะเวลานี้น้อยกว่า

สรุป

จากการศึกษาการกระตุ้นเมล็ดหน่อไม้ฝรั่งด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้าร่วมกับน้ำผสมโอโซน ที่ค่าสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ 1-5 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่เวลา 20 25 และ 30 นาที และความเข้มข้นน้ำผสมโอโซนมีค่า 0.5-2.3 ส่วนต่อล้านส่วน ที่เวลา 10 20 และ 30 นาที เพื่อศึกษาอัตราการงอกและความยาวรากของเมล็ดหน่อไม้ฝรั่ง ผลการทดลองสรุปได้ว่าที่ค่าสนามไฟฟ้าที่ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 30 นาที ร่วมกับการแช่ด้วยน้ำผสมโอโซนที่ความเข้มข้น 2 ส่วนต่อล้านส่วน ที่

ระยะเวลา 20 นาที มีอัตราการงอกที่ดีที่สุดคือ ร้อยละ 98.45 ซึ่งดีกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการกระตุ้นอยู่ร้อยละ 29.45 และความยาวรากที่ดีที่สุดคือ 1.8 เซนติเมตร ซึ่งดีกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการกระตุ้นอยู่ร้อยละ 88.88

ข้อเสนอแนะ

ควรวิเคราะห์ระดับการใช้พลังงานของเทคนิคสนามไฟฟ้าร่วมกับน้ำผสมโอโซนเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าในการใช้งานเชิงพาณิชย์ และควรมีการออกแบบระบบป้องกันเพื่อให้เกิดความปลอดภัย

ประเด็นวิจัยในอนาคต

1. ควรศึกษาในเมล็ดพันธุ์พืชชนิดอื่นและการปลูกในรูปแบบอื่นเพื่อให้เกิดการสร้างมูลค่าเพิ่ม

เอกสารอ้างอิง

- Berton, L., Filho, J., Siqueira, W. and Colombo, C. 2013. Seed germination and estimates of genetic parameters of promising macaw palm (*Acrocomia aculeata*) progenies for biofuel production. **Industrial Crops Products** 5(1): 258-266.
- Hasan, N., Ahmad, N., Zohrameena, Sh., Khalid, M. and Akhtar, J. 2016. *Asparagus racemosus*: for Medicinal Use & Pharmacological Actions. **International Journal of Advanced Research** 4(3): 259-267.
- Kuffel, E., Zaengl, W.S. and Kuffel, J. 2000. **High Voltage Engineering: Fundamentals**. 2nd ed. Newnes, Great Britain.
- Mahajan, T.S. and Pandey, O.P. 2014. Effect of electric field (at different temperatures) on germination of chickpea seed. **African Journal of Biotechnology** 13(1): 61-67.
- Molamofrada, F., Lotfia, M., Khazaeib, J., Reza T.A. and Amir, S.A. 2013. The effect of electric field on seed germination and growth parameters of onion seeds (*Allium cepa*). **Advanced Crop Science** 3(4): 291-298.
- Patwardhan, M.S. and Gandhare, W.Z. 2013. High voltage electric field effects on the germination rate of tomato seeds. **Acta Agrophysica** 20(2): 403-413.
- Sajjanit, C. 2009. Non-Tariff Barriers (NTBs): Key trade barriers for Thai exporters. **Sripatum Review Humanities and Social Sciences** 9(2): 125-134. (in Thai)
- Shorstkii, I.A., Zherlicin, A.G. and Li, P. 2019. Impact of pulsed electric field and pulsed microwave treatment on morphological and structural characteristics of sunflower seed. **Oilseed & Fats Crops and Lipid Journal** 26(47):1-7
- Soltani, F., Arghavani, M. and Kashi, A. 2006. Effect of magnetic field on *Asparagus officinalis* L. seed germination and seedling growth. **Seed Science and Technology Journal** 34(2):349-353.
- Srikanth, D., Kumar R.P., Khandka, S. and Jyothi, G.B.N. 2018. Influence of magnetic and electric field on germination attributes of chilli (*Capsicum annum* L.) seeds. **International Journal of Pure & Applied Bioscience** 6(3): 496-501.

- Sudhakar, N., Nagendra, D., Mohan, N., Bradford, H., Gunasekaran, M. and Murugesan, K. 2011. Assessing influence of ozone in tomato seed dormancy alleviation. **American Journal of Plant Sciences** 2(1): 443-448.
- Suteerapoj, W. 2019. **Product of Vegetable Fresh Fruit Frozen and Dried: Basic Data of Product**. Available Source: https://www.ditp.go.th/ditp_web61/article_sub_view.php?filename=contents_attach/526062/526062.pdf&title=526062, January 20, 2019. (in Thai)
- Tataranni, G., Sofo, A., Casucci, C. and Scopa, A. 2013. Different root growth patterns of tomato seedlings grown hydroponically under an electric field. **Japan's Academic Journals** 7(1): 28-32.
- Violleau, F., Hadjeba, Kh., Albet, J., Cazalis, R. and Surel, O. 2007. Increase of corn seeds germination by oxygen and ozone treatment. **IOA Conference and Exhibition Valencia** 6(5) :1-6.
- Watanabe, S.I., Inoue, K., Emoto, S., Ishibashi, Y., Doi, K. and Furuya, Sh. 2014. Trial of green asparagus out-of-season production for establishing year-round production in Kyushu, a warm area of Japan. **Japan Agricultural Research Quarterly Journal** 48(4): 449-455.
- Wichamanee, Y. 2013. Factors influencing on dewatering by osmotic dehydration of fruits and vegetables. **Burapha Science Journal** 18(1): 226-223. (in Thai)
- Wongsinchuan, N., Buatip, S. and Hawo, T. 2013. Germination enhancement of palmyra seed (*Borassus abellifer* L.). **Thai Agricultural Research Journal** 31(3): 250-256. (in Thai)
- Yasin, M. and Andreasen, C. 2016. Effect of reduced oxygen concentration on the germination behavior of vegetable seeds. **Horticulture Environment and Biotechnology Journal** 57(5): 453-461.

การฟื้นฟูระบบนิเวศชุมชนบ้านแม่จ๋มูก ตำบลบ้านทับ อำเภอแม่แจ่ม จังหวัดเชียงใหม่ ด้วยแนวคิดพืชให้สีและกระบวนการย้อมสีธรรมชาติ ผ้าทอลวดลายด้วยมือสำหรับยกระดับสิ่งทอพื้นถิ่น

Ecological Restoration of Ban Mae Keymook Community, Tambon Ban Tub, Mae Cheam District, Chiang Mai Province with Dye Plants and Natural Dyeing for Leveraging Local Textile Products

อรนุต ฐาคำ* และ ญาณิศา โกมลศิริโชค

Oranoot Sutakom* and Yanisa Komolsirichok

Received: 24 March 2020, Revised: 9 May 2020, Accepted: 20 May 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) รวบรวมองค์ความรู้เกี่ยวกับพืชให้สีที่มีในชุมชน 2) เพื่อพัฒนากระบวนการย้อมสีธรรมชาติจากวัสดุธรรมชาติในท้องถิ่นสำหรับงานผ้าทอลวดลายด้วยมือของชุมชน 3) เพื่อศึกษาความคงทนของสีย้อมธรรมชาติต่อแสงและการซักล้าง 4) เพื่อออกแบบและพัฒนาสินค้าผ้าทอลวดลายด้วยมือจากสีธรรมชาติที่มีเอกลักษณ์เฉพาะถิ่นของชุมชน 5) เพื่อออกแบบป้ายสินค้าผ้าทอลวดลายด้วยมือจากสีธรรมชาติที่สามารถส่งเสริมการตลาดของชุมชน และ 6) เพื่อให้เกษตรกรเพาะปลูกพืชให้สีสำหรับไว้ใช้ในการย้อมผ้าด้วยสีธรรมชาติ โดยศึกษาสีย้อมที่ได้จากพืชให้สีในชุมชน บ้านแม่จ๋มูก ตำบลบ้านทับ อำเภอแม่แจ่ม จังหวัดเชียงใหม่ ใช้เทคนิคและกระบวนการย้อมเส้นด้ายสีธรรมชาติและทดสอบความคงทนของสีย้อมต่อการใช้งาน จากนั้นนำมาออกแบบเป็นผลิตภัณฑ์ และ ทดสอบตลาด ผลการวิจัย พบว่า พืชให้สีที่พบในชุมชนบ้านแม่จ๋มูก มีจำนวน 14 ชนิด เมื่อนำมาสกัดสีสามารถให้สีย้อมได้ 5 โทนสี คือ สีแดง-ชมพู สีเหลือง สีเขียว สีส้มและสีน้ำตาล และผลการทดสอบความคงทนต่อแสงและการซัก อยู่ในระดับ 4 ที่ยอมรับได้ตามค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ยกเว้นสีย้อมจากเมล็ดคำแสด ไม้ฝางและเหง้าขมิ้น จากนั้นได้นำเส้นด้ายย้อมสีธรรมชาติมาทอเป็นผืนผ้าที่มีลวดลายเอกลักษณ์ดั้งเดิมแต่จัดวางองค์ประกอบใหม่ แล้วนำผืนผ้ามาออกแบบภายใต้กรอบแนวคิด “เพิ่มมูลค่าผ้าทอจากเป็นแฟชั่นและผลิตภัณฑ์ร่วมสมัยสู่บริบทของเมือง” เป็นผลิตภัณฑ์เสื้อผ้าประยุกต์ จำนวน 6 รูปแบบ และ กระเป๋าผ้ารูปแบบร่วมสมัย จำนวน 3 รูปแบบที่เป็นไปตามความต้องการของผู้บริโภคสินค้าเชิงวัฒนธรรม และได้ป้ายสินค้า (tag) ที่ช่วย

คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อำเภอเมืองเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Faculty of Arts and Architecture, Rajamangala University of Technology Lanna, Mueang, Chiang Mai 50300, Thailand.

* ผู้ติดต่อประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): iamajoranoot@gmail.com

ให้ผู้บริโภคจดจำกลุ่มได้ง่ายและสามารถกลับมาซื้อใหม่ได้อีก นอกจากนั้นได้จัดวางผังการปลูกพืชให้สีเพิ่มขึ้นจากเดิมในชุมชนเพื่อนำมาใช้ย้อมผ้าด้วยสีธรรมชาติในอนาคต ดังนั้นถ้ากลุ่มหรือชุมชนมีการปลูกพืชให้สีอย่างต่อเนื่องและคงใช้ประโยชน์จากต้นไม้ที่ให้สีอยู่และไม่ตัดทิ้ง ระบบนิเวศภายในหมู่บ้านก็จะฟื้นคืนกลับมามีชีวิตอย่างสมบูรณ์เหมือนเดิม

คำสำคัญ: พืชให้สี, ผ้าทอจากย้อมสีธรรมชาติ, ผลิตภัณฑ์สิ่งทอเชิงวัฒนธรรม, แฟชั่นผ้าทอจาก

ABSTRACT

The objectives of this research were 1) to gather knowledge on dye plants in the community, 2) to develop natural dyeing process from local natural materials for hand-woven pattern work of the community, 3) to study the durability of natural dyes to light and for washing, 4) to design and develop hand-woven textile products from unique natural colors of the community, 5) to design the product tag that can promote community marketing, and 6) to promote planting dye plants for natural dyeing. This study investigated pigment from dyes plants in Ban Mae Kee Mook community, Ban Thap sub-district, Mae Chaem district, Chiang Mai Province Natural dyes technique was used and durability testing was employed prior to product development and marketing testing. The results of research found that 14 kinds of dyes plants were found in Ban Mae Knee Mook. They provided 5 color shades: red - pink, yellow, green, orange and brown. The color fastness to artificial light and to washing was at level 4 which was acceptable according to Community Products Standards, except dyes from Anatto, Sappan and Alum tree. The natural dyed yarns were woven with traditional pattern and arranged in new elements. Then, the products were designed under the concept "Adding value of woven fabric to make fashionable and contemporary style products to urban context". The products consisted of clothes with different six applied pattern and bags with three contemporary styles where the products met the requirement of cultural-product consumers. The product tag was designed for recall and re-purchase purposes. Moreover, planning for planting more dye plants in the community were developed for future dyeing. Therefore, if the community continues planting dye plants and stops cutting, the community's ecosystem will be completely restored.

Key words: plant coloring, natural dyeing fabric, cultural textile products, Jok woven fashion

บทนำ

บ้านแม่จู้มูก หรือ บ้านสองธาร ตำบลบ้านทับ อำเภอแม่แจ่ม จังหวัดเชียงใหม่ เป็นหนึ่งในตำบลที่มีอาชีพเกษตรกรรม ปลูกข้าวโพดและประสมปัญหาภาวะหนี้สิน กลุ่มผู้ชายทำเกษตรกรรม กลุ่ม

ผู้หญิงมีอาชีพเสริม คือการทอผ้าขึ้นดินจก ซึ่งเป็นภูมิปัญญาที่ได้รับการถ่ายทอดมาจากบรรพบุรุษ ขณะนี้ระบบนิเวศภายในหมู่บ้านกำลังได้รับการฟื้นฟู ป่าชุมชนที่บ้านแม่จู้มูก ดูแลโดยคนในชุมชน มีการรักษาพื้นที่ป่าเพื่อเป็นต้นน้ำ เป็นแหล่งอาหาร

สมุนไพร และประกอบพิธีกรรม ต้นไม้ที่อยู่ในป่าชุมชน มีหลากหลายประเภท จากการสัมภาษณ์มูลแก้ว เขียวคำ ประธานกลุ่มพบว่า กลุ่มทอผ้าขึ้นดินจกบ้านสองธาร ทอผ้าขึ้นดินจกจำหน่าย เคยย้อมเส้นด้ายสีธรรมชาติ ปัจจุบันไม่ได้ทำ ยังไม่เคยมีการรวบรวมองค์ความรู้การใช้ประโยชน์จากสีของต้นไม้หรือพืชให้สีที่อยู่ในป่าชุมชนซึ่งเป็นทุนทรัพยากรทางธรรมชาติที่ชาวบ้านสามารถนำมาใช้ย้อมสีเส้นด้าย เพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าของชุมชน ปัจจุบันซื้อเส้นด้ายสำเร็จรูปที่ย้อมเคมีสังเคราะห์ และซื้อเส้นด้ายฝ้ายย้อมสีธรรมชาติมาจากแหล่งอื่นบ้างในราคาที่แพง รวมถึงประสบปัญหานำไปซักสีตก เนื้อผ้าทอแข็ง สีไม่สม่ำเสมอ กลุ่มยังขาดความเข้าใจในเรื่องพืชให้สี กระบวนการย้อมสีจากธรรมชาติ และขาดเทคนิคการย้อมสี ในเรื่องของรูปแบบสินค้าผ้าทอจากพื้นถิ่น พบว่าสินค้ามีเอกลักษณ์เฉพาะถิ่น มีรูปแบบไม่หลากหลายผลิตภัณฑ์ของชุมชนยังขาดการออกแบบและพัฒนา มีรูปแบบเดิมๆ ไม่สามารถดึงดูดความสนใจจากผู้บริโภค การทอผ้าขึ้นดินจกแต่ละผืนใช้เวลาาน 1-2 เดือน ใช้วิธีการรับสั่งทำ ทำให้ขาดโอกาสทางการตลาดที่จะมีรายได้มาลดภาวะหนี้สินที่เกิดจากการปลูกข้าวโพด คณะผู้วิจัยจึงมองเห็นการใช้ประโยชน์จากทุนทางทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมในการพัฒนาสินค้าสิ่งทอพื้นถิ่นของชุมชน ที่จะต้องมีการศึกษาวัตถุดิบที่เป็นทุนทางธรรมชาติและพัฒนาสินค้าด้วยวิธีการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี นวัตกรรม ยกย่องผ้าทอจกบ้านแม่จู้มุกด้วยการใช้สีย้อมธรรมชาติที่มาจากพืชให้สีในชุมชนหรือบริเวณป่าใกล้เคียง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sitthinopphun *et al.* (2014) ที่ได้พัฒนาลดลายผลิตภัณฑ์ต้นแบบผ้ามัดย้อมด้วยการย้อมจากสีธรรมชาติโดยได้ทำการทดลองย้อมสีธรรมชาติจำนวน 5 เฉดสี ได้แก่ สีแดง

จากครั้ง สีเขียวจากใบหูกวาง สีน้ำเงินจากคราม สีเหลืองส้มจากเมล็ดคำแสด และสีเทาจากผลมะเกลือ โดยในการทดลองย้อมจะใช้สารช่วยติดสี (mordant) จากธรรมชาติ 3 ชนิด ได้แก่ น้ำปูนใส โคลน และน้ำจี้เถ้า ซึ่งสารช่วยติดสีแต่ละชนิดจะทำให้ได้เฉดของสีออกมาต่างๆ กันไป ในการทดสอบสมบัติการย้อมจากการเก็บตัวอย่าง 24 ตัวอย่าง เพื่อทดสอบด้านความคงทนของสีต่อการซักและความคงทนของสีต่อเหงื่อ พบว่า ด้านความคงทนของสีต่อการซัก ผ้ามัดย้อมส่วนใหญ่มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสีในที่มีระดับ 4.0 ขึ้นไป กล่าวคือ เมื่อทดสอบความคงทนของสีต่อการซักแล้วสีไม่เปลี่ยน ได้แก่ กลุ่มสีน้ำเงินจากคราม กลุ่มสีเทาจากผลมะเกลือ ใช้สารช่วยติดสี ด้วยโคลน กลุ่มสีแดงจากครั้ง ใช้สารช่วยติดสี ด้วยน้ำปูน ผ้ามัดย้อมส่วนใหญ่มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสีในที่มีระดับ 3.0 ขึ้นไป และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thuravorn *et al.* (2002) ที่ได้ศึกษาวิจัยกระบวนการพัฒนาและสืบทอดภูมิปัญญาด้านการย้อมสีด้วยวัสดุธรรมชาติของผู้หญิงกะเหรี่ยงสะกอ ตำบล แม่ยาว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย พบว่า การพัฒนากระบวนการย้อมสีธรรมชาติให้มีคุณภาพด้วยการนำเอาองค์ความรู้ที่มีอยู่เดิมมาผสมผสานกับวิทยาการใหม่ๆ อย่างเหมาะสม กลุ่มผู้หญิงกะเหรี่ยงสะกอจึงได้รับองค์ความรู้ใหม่ คือ การย้อมสีธรรมชาติที่มีคุณภาพ ต้องทำความสะอาดเส้นด้ายด้วยการฟอกเส้นด้ายก่อนย้อม ด้วยผงซักฟอกและทำความสะอาดเส้นด้ายและเกลือบด้วยน้ำข้าวข้าวเพื่อกันสีตกทุกครั้ง หลังการย้อม ที่สำคัญคือต้องควบคุมกระบวนการย้อมและสัดส่วนวัตถุดิบในถังที่และถูกต้องเสมอ ส่วนการศึกษาเอกลักษณ์และเรื่องราวของชุมชนสร้างเรื่องราวให้กับสินค้า ออกแบบและพัฒนาสินค้าสิ่งทอของชุมชน คณะผู้วิจัยจะใช้แนวคิดการออกแบบผลิตภัณฑ์วัฒนธรรม ที่เน้นเอกลักษณ์และ

คุณค่าทางวัฒนธรรม ถอดแบบลายดั้งเดิมออกมาเรียงร้อยใหม่ แต่ยังคงใช้ลวดลายเดิมที่เป็นสัญลักษณ์ทุนเดิมของสมาชิกกลุ่มทอผ้าตีนจกบ้านสองธาร ซึ่งจะช่วยทำให้สินค้ามีมูลค่าเพิ่มยกระดับสินค้า ช่วยทำให้มีรายได้เพิ่มและส่งผลให้ชาวบ้านมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น ซึ่งก็ยังคงสอดคล้องกับบทความวิเคราะห์แนวโน้มสิ่งทอและเครื่องแต่งกาย (Government Savings Bank Research Centre, 2019) ที่ชี้ให้เห็นถึงสถานการณ์ของผู้ประกอบการ สิ่งทอและเครื่องแต่งกาย ในปี 2563 ผู้ผลิตเครื่องแต่งกายที่มีคุณสมบัติพิเศษ จะมีแนวโน้มที่จะเติบโตได้ดี ดังนั้นการพัฒนาสินค้าเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มและประโยชน์ในการใช้งานที่หลากหลายให้แตกต่างจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น และคณะผู้วิจัยยังมองเห็นว่า เมื่อมีการนำพืชให้สีมาใช้ในการย้อมผ้า จะต้องมีการส่งเสริมให้ชุมชนปลูกพืชให้สีเพิ่มเติมหรือใช้ประโยชน์จากส่วนต่างๆ ของต้นไม้ให้สีที่มีอยู่ ไม่ตัดทิ้ง หากมีการปลูกพืชหรือต้นไม้ให้สีอย่างต่อเนื่อง จะเป็นการช่วยฟื้นฟูระบบนิเวศที่กำลังจะสูญเสียไปได้อีกทางหนึ่ง

ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) รวบรวมองค์ความรู้เกี่ยวกับพืชให้สีที่มีในชุมชน 2) เพื่อพัฒนากระบวนการย้อมสีธรรมชาติจากวัสดุธรรมชาติในท้องถิ่นสำหรับงานผ้าทอลวดลายด้วยมือของชุมชน 3) เพื่อศึกษาความคงทนของสีย้อมธรรมชาติต่อแสงและต่อการซักล้าง 4) เพื่อออกแบบและพัฒนาสินค้าผ้าทอลวดลายด้วยมือจากสีธรรมชาติที่มีเอกลักษณ์เฉพาะถิ่นของชุมชน 5) เพื่อออกแบบป้ายสินค้าผ้าทอลวดลายด้วยมือจากสีธรรมชาติที่สามารถส่งเสริมการตลาดของชุมชน และ 6) เพื่อให้เกษตรกรเพาะปลูกพืชให้สีสำหรับไว้ใช้ในการย้อมผ้าด้วยสีธรรมชาติ

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา พื้นที่ทำการศึกษาคือ บ้านแม่จู้มูก ตำบลบ้านทับ อำเภอแม่แจ่ม จังหวัดเชียงใหม่ กลุ่มตัวอย่างใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive sampling) เป็นกลุ่มวิสาหกิจทอผ้าตีนจกบ้านสองธาร (บ้านแม่จู้มูก) จำนวน 13 คน ผู้วิจัยมีวิธีการศึกษา ดังนี้

1. เก็บรวบรวมพืชให้สีย้อมที่มีในชุมชนบ้านแม่จู้มูกและป่าบริเวณใกล้เคียง บันทึกลงในแบบบันทึกเกี่ยวกับ ชื่อและลักษณะของพืช จากนั้นนำพืชให้สีที่พบมาทดสอบสกัดสีย้อม ในห้องปฏิบัติการสิ่งทอ ทดสอบสกัดสารสีจากพืชในน้ำย้อม โดยทำการย้อมเส้นด้ายฝ้ายแบบย้อมร้อน จากนั้นบันทึกผลการทดสอบ ซึ่งมีขั้นตอน คือ 1) เตรียมพืชให้สีแต่ละชนิด ทั้งในส่วนของดอก ฝัก เปลือกลำต้น ใบ และน้ำย้อม 2) ต้มสกัดสี และย้อมสีเส้นด้าย ทดสอบสกัดสีจากพืชที่สามารถให้สีใกล้เคียงกับสีที่เป็นเอกลักษณ์ผ้าทอจากแม่แจ่ม บันทึกข้อมูลลงในแบบบันทึกที่สร้างขึ้นและนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เชิงพรรณนา

2. ศึกษากระบวนการย้อมที่เหมาะสมกับสีย้อมที่ได้จากการสกัดสีจากพืชในข้อที่ 1 ย้อมสีเส้นด้ายฝ้ายขนาด Ne 10/1 และ 40/2 (ผ่านการ Scouring และผ่านการเพิ่มสารช่วยติด) ที่อุณหภูมิ 100°C โดยมีสารช่วยย้อมที่เป็นธรรมชาติ ได้แก่ สารส้ม น้ำบาล น้ำปูนใส น้ำด่าง เป็นเวลา 60 นาที เมื่อเตรียมน้ำย้อมเรียบร้อยแล้ว ก่อนทำการย้อมวัดค่า pH ของน้ำย้อมด้วย pH Meter บันทึกผลการวัดก่อนทำการย้อม และเมื่อทำการย้อมครบตามกำหนดระยะเวลาแล้ว นำเส้นใยฝ้ายล้างด้วยน้ำจนกระทั่งไม่มีสีตก ผึ่งให้แห้งในที่ร่ม

3. ศึกษาความคงทนของสีต่อการซักล้างและความคงทนของสีต่อแสง โดยนำเส้นด้ายที่ผ่านกระบวนการย้อมสีธรรมชาติที่เหมาะสม ทั้งอยู่ใน

สภาวะพร้อมข้อมและ สภาวะหลังการข้อม มาทดสอบความคงทนของสีต่อการใช้งาน บันทึกลงในแบบบันทึกผลการทดสอบความคงทน

การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้างบนวัสดุสิ่งทอ (Colour Fastness to Washing Test 1) ตามมาตรฐาน ISO 105-C10 : 2006 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก (Colour Fastness to Washing) ประกอบด้วยการเตรียมตัวอย่างเพื่อซักคือตัดผ้าที่จะทดสอบให้ได้ขนาดตามที่ระบุไว้ในมาตรฐานการทดสอบนั้นๆ เย็บติดตัวอย่างเพื่อซักคือตัดผ้าที่จะทดสอบให้ได้ขนาดตามที่ระบุไว้ในมาตรฐานการทดสอบเส้นใยนี้คือ ผ้าทอที่มีเส้นใยหลายชนิดซึ่งถูกทอแยกกันเป็นแถบเล็กๆ ฟอกขาวหรือทำความสะอาดแล้ว ใช้เย็บติดกับผ้าที่จะทำการทดสอบ สำหรับตรวจว่ามีสีติดเปื้อนบนเส้นใยอะไรบ้างและมากน้อยเพียงใด การทดสอบทำได้โดยนำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบและผ้าหลายเส้นใยที่เย็บติดกันไปใส่ในภาชนะบรรจุที่มีน้ำสบู่มมาตรฐานปริมาณ 50 เท่าของผ้าที่ทำการทดสอบรวมกับผ้าหลายเส้นใย ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Gyrowash ที่อุณหภูมิ 60 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที นำชิ้นทดสอบออกจากภาชนะบรรจุแล้วนำไปล้างน้ำกลั่นเกรด 3 ที่อุณหภูมิห้อง นำมาล้างผ่านน้ำที่ไหลตลอดเวลาอีก 1 ครั้ง เป็นเวลา 10 นาที ใช้มือบีบชิ้นงานทดสอบเพื่อให้เหลือปริมาณน้ำน้อยที่สุด นำชิ้นทดสอบไปแขวนตากให้แห้งที่อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส โดยให้ผ้าหลายเส้นใยอยู่ด้านบน

ประเมินผลกับ Gray Scale 2 ประเภท คือ

1. Gray scale for color change (ประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงสี) ซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม อยู่ด้วยกัน 9 ระดับ คือ 5, 4/5, 4, 3/4, 3, 2/3, 2, 1/2 และ 1 ระดับ 5 ถือว่าดีที่สุดจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี ระดับ 1 ถือว่าแย่ที่สุด คือ เกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด

2. Gray scale for color staining (ประเมินค่าการติดเปื้อนสี) ซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม อยู่ด้วยกัน 9 ระดับ คือ 5, 4/5, 4, 3/4, 3, 2/3, 2, 1/2 และ 1 ระดับ 5 ถือว่าดีที่สุดจะไม่เกิดการติดเปื้อนสี ระดับ 1 ถือว่าแย่ที่สุดเกิดการติดเปื้อนของสีมากที่สุด

**ค่าการยอมรับผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน สีธรรมชาติจะมีค่าการยอมรับการเปลี่ยนแปลงสีและการติดเปื้อนสี อยู่ที่ ระดับ 3

ส่วนการทดสอบความคงทนของสีต่อแสงแดดเทียม (แสงซีนอนอาร์ก) (Colour Fastness to Artificial Light : Xenon Arc Fading Lamp Test) ตามมาตรฐาน ISO 105-B02 : 1994 การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความคงทนของสีบนวัสดุสิ่งทอเนื่องจากการกระทำของแสงแดดเทียม ซึ่งแสงแดดเทียมนี้จะใช้แทนแสงแดดจากธรรมชาติ (Natural Daylight D₆₅) เพื่อหาความคงทนของสีเมื่อโดนแสง (Color Fastness to Light) ทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีกับผ้ามาตรฐาน (Blue Wool Reference or Blue Wool Ref.) โดยมีหลักการทดสอบโดยนำชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับแสงแดดเทียมภายใต้สภาวะที่กำหนดและมีผ้า Blue Wool Ref. ใส่เข้าไปด้วย ความคงทนของสีจะถูกประเมินโดยการเปรียบเทียบสีที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานทดสอบกับผ้า Blue Wool Ref. โดยผ้า Blue Wool Ref. มีทั้งหมด 8 ระดับ คือ ระดับ 1 ถึงระดับ 8 โดยที่ระดับ 1 ความคงทนของสีต่อแสงต่ำสุดและระดับ 8 ความคงทนของสีต่อแสงสูงสุด

**ค่าการยอมรับความคงทนของสีต่อแสงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน สีธรรมชาติค่าการยอมรับการเปลี่ยนแปลงสี จะอยู่ที่ Blue Reference ระดับ 3

4. ออกแบบและพัฒนาผ้าทอ โดยศึกษาความต้องการซื้อของผู้ซื้อสินค้าผ้าทอลวดลายด้วย

เมื่อในจังหวัดเชียงใหม่ ที่นิยมสินค้าเชิงวัฒนธรรม เครื่องมือที่ใช้เป็นแบบสอบถามที่สร้างขึ้น จำนวน 100 ชุด วิเคราะห์ข้อมูลใช้สถิติวิเคราะห์ค่าร้อยละ และค่าเฉลี่ย และศึกษาเอกลักษณ์และลวดลายที่เป็นภูมิปัญญาท้องถิ่นของกลุ่มทอผ้า ดินจกบ้านสองธาร ชุมชนบ้านแม่จ๊มูก โดยวิธีการสัมภาษณ์สมาชิกกลุ่มทอผ้าบ้านแม่จ๊มูก จำนวน 13 คน เพื่อสร้างเรื่องราวให้กับสินค้าของกลุ่ม จากนั้นนำเส้นด้ายย้อมสีธรรมชาติที่ได้จากผลการทดลองมาทอ ออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์ผ้าทอตามกรอบคิดที่กำหนดและตามความต้องการซื้อของผู้นิยมซื้อสินค้าผ้าทอ

5. ออกแบบป้ายสินค้า โดยใช้หลักการการออกแบบกราฟิกออกแบบรูปแบบป้ายสินค้า ให้สมาชิกกลุ่มเลือกรูปแบบป้าย และวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยความคิดเห็น จากนั้นจัดกิจกรรมทดสอบตลาด

6. ปลูกพืชให้สีในชุมชน โดยออกแบบผังส่งเสริมการปลูกพืชให้สีในชุมชน ประชุมกลุ่มสรุปความคิดเห็นในการจัดวางแผนปลูกพืชให้สีแต่ละชนิด ร่วมลงมือปลูกพืชให้สี เพื่อช่วยให้กลุ่มสามารถใช้ประโยชน์จากพืชที่ปลูกและช่วยให้ระบบนิเวศภายในชุมชนฟื้นฟูในอนาคต

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการรวบรวมพืชให้สีที่มีในชุมชน ตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 พบจำนวนพืชให้สีย้อมที่มีในชุมชนบ้านแม่จ๊มูก ตำบลบ้านทับ อำเภอแม่แจ่ม ที่สามารถนำมาสกัดสีย้อมได้ทั้งพืชที่เป็นไม้ยืนต้นที่ให้สี ได้แก่ ต้นราชพฤกษ์ ต้นเพกา ต้นขนุน ต้นมะม่วง ต้นสะเดา ต้นมะพร้าว ต้นहुกวาง ต้นสักต้นอ่อน (มี 3 ต้น) พบในบริเวณที่พักอาศัยและริมเส้นทางที่เป็นถนนสัญจรภายในหมู่บ้าน และ บริเวณใกล้หมู่บ้าน ยังพบ มะขามป้อม (ใช้ผล) ไม้เแง (ไม้เต็ง) ไม้ฮักหลวง ไม้ประดู่ ไม้เปา (ไม้รัง) ไม้แดง ที่เมื่อตากเปลือกดูในเบื้องต้นทิ้งไว้ให้ถูกอากาศ เปลือกลำต้นมีสีแสดงออกมาทันที ซึ่งหมายถึงสามารถนำมาย้อมเส้นด้ายได้ ภาพที่ 1 ประกอบ นอกจาก ไม้ยืนต้นให้สีแล้ว ยังพบ พืชล้มลุกให้สี ได้แก่ ต้นดอกดาวเรือง ต้นขมิ้น ต้นว่านหอมแดง (ยาอุเนะ) ห้อม (ให้สีฟ้าคราม) ต้นตองกิ้ง (ต้นไม้กวาด) ต้นดอกอัญชัญ (ให้สีม่วงแต่ไม่คงทน) ต้นกระเพรา (ให้สีเขียวอ่อน) และพบพืชที่ไม่ให้สีแต่สามารถนำมาใช้เป็นสารช่วยย้อมให้สีติด ได้แก่ ต้นกล้วย (นำไปเผาเป็นขี้เถ้า สามารถนำมาทำเป็นน้ำด่าง) ตะไคร้ มะกรูด มะนาว ดอกกระดังงา และเมื่อนำมาทดสอบสกัดสารสีจากพืชในน้ำย้อม โดยย้อมเส้นด้ายฝ้ายแบบย้อมร้อน ดังแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 1 การศึกษาพืชให้สีในชุมชนและการทดสอบสกัดสารสีจากพืชในน้ำย้อม

ตารางที่ 1 แสดงสิ่งที่ได้จากทดสอบสกัดสีของพืชให้สีย้อมในชุมชนบ้านแม่จ๋มูก

พืชให้สี	ส่วนที่ใช้ย้อม	สีที่ได้
ราชพฤกษ์	ฝัก	สีน้ำตาล
คำแสด คำไทย หรือ คำเงาะ	เมล็ด	ส้ม
เพกา (มะริดไม้)	เปลือก	เหลืองอมเขียว
หูกวาง	ใบสด	เขียว
หูกวาง	ใบแห้ง	เขียวเหลืองออกน้ำตาล
ขนุน	แก่น	เหลือง
ดอกดาวเรือง	กลีบดอก	เหลือง
ขมิ้น	หัว,ราก	เหลือง
ฮักหลวง	เปลือกคั้น	ชมพู
ไม้แฉะ	เปลือกคั้น	น้ำตาล
ไม้ปา (ไม้เต็ง)	เปลือกคั้น	น้ำตาล
ไม้แดง	เปลือกคั้น	น้ำตาลอ่อน
ตองกิง (ต้นไม้กวาด)	ใบอ่อน	เขียวอ่อน
ฝาง	แก่นลำต้น / แก่น กิ่งแก่	ชมพู
มะพร้าว	เปลือกลูกมะพร้าวอ่อน	ส้มอ่อน

ซึ่งสีที่ได้จากพืชให้สีย้อมในชุมชนบ้านแม่จ๋มูก สอดคล้องกับงานโครงการฝ้ายแกมไหม ที่ Leepayakul *et al.* (n.d.) ได้กล่าวว่า สีที่สกัดได้จากวัตถุดิบที่มาจากพืช ให้เจดสีที่หลากหลายได้แก่ โทนสีเขียว : ใบหูกวาง โทนสีแดง : แก่นฝาง โทนสีเหลือง : เปลือกขนุน เปลือกเพกา และยังสอดคล้องกับบทความของ Donchai and Wimolphusit (2008) ที่กล่าวว่า พืชสกัดที่ได้สีเหลือง สีส้ม ได้แก่ หูกวาง ขนุน คำเงาะหรือคำแสด พืชสกัดที่ได้สีเขียว ได้แก่ เพกา พืชสกัดที่ได้สีน้ำตาล ได้แก่ ไม้แดง

2. ผลการพัฒนากระบวนการย้อมสีธรรมชาติจากสีย้อมที่สกัดได้จากพืชให้สีในชุมชนและผลความคงทนต่อแสงและการซัก ตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 และ 3 พบว่าการย้อมสีธรรมชาติที่เหมาะสมกับสีย้อมที่สกัดได้จากพืชให้สีในชุมชนบ้านแม่จ๋มูก คือ การย้อมร้อนในสภาวะพร้อมย้อม และเมื่อนำสารช่วยย้อมที่เป็นธรรมชาติ ได้แก่ สารส้ม น้ำบาดาล

(น้ำยากที่ได้จากชุมชน) น้ำด่าง และ น้ำปูนใส ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม มาใช้ในการย้อมจะให้เจดสีและระดับความเข้มที่แตกต่างกัน ซึ่งสูตรที่เหมาะสมสำหรับย้อมสีธรรมชาติจากพืชของชุมชนบ้านแม่จ๋มูก มีดังนี้

1. อัตราส่วนระหว่างน้ำสีย้อม : เส้นด้าย L : R = 30 : 1 หมายถึง น้ำสีย้อม 30 ลิตร ต่อเส้นด้าย 1 กิโลกรัม

2. เติมน้ำช่วยย้อม สารส้ม ในปริมาณ 10 กรัม ต่อ น้ำสีย้อม 1 ลิตร หรือ น้ำบาดาล (น้ำสนิม) ในปริมาณ 5 กรัม ต่อ น้ำสีย้อม 1 ลิตร หรือ น้ำด่าง ในปริมาณ 10 กรัม ต่อ น้ำสีย้อม 1 ลิตร หรือ น้ำปูนใส ในปริมาณ 10 กรัม ต่อ น้ำสีย้อม 1 ลิตร

ขั้นตอนการย้อมสีธรรมชาติที่เหมาะสม มีดังนี้

1. เตรียมน้ำย้อมสี เจดสีของพืชแต่ละชนิดที่ได้จากตัวอย่างในตารางที่ 2 น้ำหนักพืช 1 กิโลกรัม

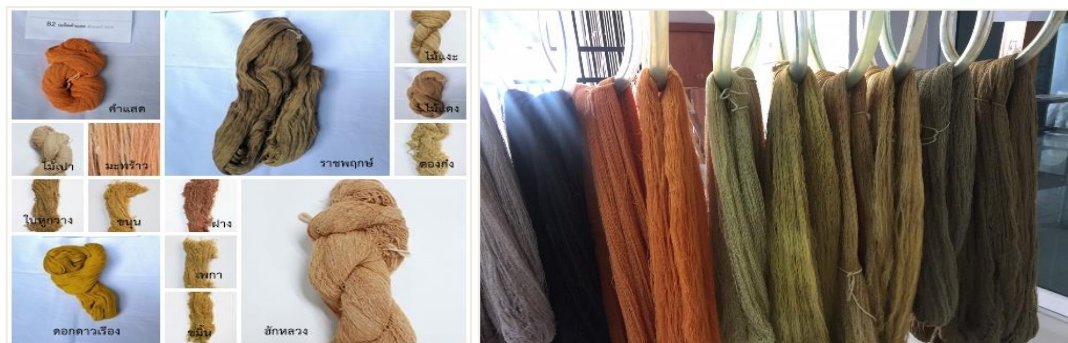
ต่อ น้ำ 5 ลิตร ต้มที่จุดเดือด 100 องศา นาน 30 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็น กรองแยกน้ำสีกับกากพืชด้วยผ้าขาวบางที่สะอาด

2. เติมน้ำช่วยย้อมตามปริมาณที่กำหนด (น้ำสีย้อม 30 ลิตร ต่อ เส้นด้าย 1 กิโลกรัม)

3. ย้อมสีเส้นด้าย นาน 45 - 60 นาที เทคนิคเพิ่มเติมคือในระหว่างการย้อมต้องคอยพลิกเส้นด้ายตลอดเวลา เพื่อให้สีย้อมเท่ากัน ไม่เป็นต่าง



ภาพที่ 2 กระบวนการย้อมสีเส้นด้ายฝ้ายที่เหมาะสมกับสีย้อมที่ได้จากพืชให้สีในชุมชนบ้านแม่จ๋มูก

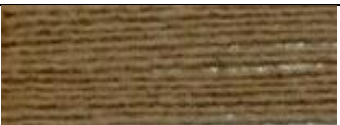
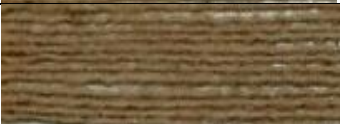


ภาพที่ 3 สีย้อมที่ได้จากพืชให้สีในชุมชนบ้านแม่จ๋มูก

ตารางที่ 2 บันทึกผลการทดลองการย้อมสีธรรมชาติจากต้นอ้อหลวงสภาวะการใช้สารช่วยย้อมพร้อมการย้อมชนิดของสีย้อมธรรมชาติ เปลือกต้นอ้อหลวง (รหัส E) สภาวะการใช้สารช่วยย้อม พร้อมการย้อม

รหัส	ชนิดของสารช่วยย้อม	ปริมาณสารช่วยย้อม (g/l)	pH น้ำย้อม	ผลการย้อม
E1	เส้นด้ายไม่เพิ่ม ประจุบวก	-	6.33	
E2	-	-	6.33	

ตารางที่ 2 (ต่อ)

รหัส	ชนิดของ สารช่วยย้อม	ปริมาณสารช่วยย้อม (g/l)	pH น้ำย้อม	ผลการย้อม
E3	สารส้ม	5	3.65	
E4	สารส้ม	10	3.52	
E5	น้ำบาดาล	10	5.84	
E6	น้ำบาดาล	20	5.94	
E7	น้ำค้าง	10	7.38	
E8	น้ำค้าง	20	7.50	
E9	น้ำปูนใส	10	11.20	
E10	น้ำปูนใส	20	11.78	

น้ำหนักเส้นด้ายฝ้าย = 5 กรัม

สารช่วยย้อม (สารส้ม = 5-10 กรัม, น้ำบาดาล = 10-20 กรัม, น้ำค้าง = 10-20 กรัม, น้ำปูนใส = 10-20 กรัม)

ปริมาณน้ำสีจาก = 200 มิลลิลิตร (L:R = 30:1)

ค่า pH ของน้ำย้อม = 6.33

จากตารางที่ 2 ผลการทดลองย้อมสีจากเปลือกชักหลวงสภาวะ พร้อมการย้อม E1 เส้นด้ายไม่เพิ่มประจุบวก E2 ไม่ใส่สารช่วยย้อม ค่า pH ของน้ำย้อม เท่ากับ 6.33 แสดงว่า มีค่าเป็นกรดอ่อน สีย้อมที่ได้จะเป็นสีน้ำตาลอ่อน เมื่อใส่สารช่วยย้อมที่เป็นสารส้ม E3 E4 ค่า pH ของน้ำย้อม เท่ากับ 3.65 และ 3.52 มีค่าเป็นกรดสูง สีย้อมที่ได้จะเป็นสีน้ำตาลออกเหลือง สำหรับสารช่วยย้อมที่เป็น น้ำบาดาล E5 E6

ค่า pH ของน้ำย้อม เท่ากับ 5.84 และ 5.94 มีค่าความเป็นกรดอ่อน สีย้อมที่ได้จะเป็นสีน้ำตาล สารช่วยย้อมที่เป็นน้ำค้าง E7 E8 ค่า pH ของน้ำย้อม เท่ากับ 7.38 และ 7.50 มีค่าความเป็นกลาง สีย้อมที่ได้จะเป็นสีน้ำตาลดำ น้ำปูนใส E9 E10 ค่า pH ของน้ำย้อม เท่ากับ 11.20 และ 11.78 มีค่าความเป็นด่างสูง สีย้อมที่ได้จะเป็นสีน้ำตาลแดง

ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้างและความคงทนของสีต่อแสง ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยข้อที่ 3 จะเป็นการทดสอบความคงทนของสี

ต่อการใช้งานในด้านความคงทนของสีต่อแสงแดดเทียมและความคงทนของสีต่อการซักล้างบนวัสดุสิ่งทอ ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 ความคงทนของสีต่อแสงและต่อการซักของเส้นด้ายฝ้ายย้อมสีธรรมชาติ : ฝักราชพฤกษ์ สภาวะพร้อมการย้อม

ที่	รายการ	ชื่อวัสดุย้อมสีที่ใช้กับเส้นด้ายฝ้าย									
1	วัสดุย้อม	ฝักราชพฤกษ์	ฝักราชพฤกษ์	ฝักราชพฤกษ์	ฝักราชพฤกษ์	ฝักราชพฤกษ์	ฝักราชพฤกษ์	ฝักราชพฤกษ์	ฝักราชพฤกษ์	ฝักราชพฤกษ์	ฝักราชพฤกษ์
2	สารย้อม	ไม่เพิ่ม	-	สารส้ม	น้ำบาดาล	น้ำค้าง	น้ำปูนใส				
	สารประจุบวก										
3	รหัสสี	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
4	ผลการวิเคราะห์ความคงทนของสีต่อการซัก	ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-C10 : 2006									
	1. สีเปลี่ยนจากเดิม (ระดับ)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	2. สีตกติดผ้าขาว (ระดับ) เปื้อนสี										
	ACETATE	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
	COTTON	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
	NYLON	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
	POLYESTER	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
	ACRYLIC	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
	WOOL	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
5	ความคงทนของสีต่อแสง	ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105 B02 : 1994									
	ระดับการเปลี่ยนของ Blue ref.	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	3	3

จากตารางที่ 3 การศึกษาความคงทนของสีต่อแสงและต่อการซักของเส้นด้ายที่ย้อมจากฝักราชพฤกษ์ พบว่า สีที่ได้จากฝักราชพฤกษ์ ใน (สภาวะพร้อมการย้อม) ที่ใช้สารช่วยย้อมที่เป็นสารส้ม น้ำบาดาล น้ำค้างและน้ำปูนใส มีค่าการตกสีและการ

เปื้อนติดสี อยู่ในระดับ 4 หมายถึง ดี สีตกเล็กน้อย เปื้อนติดสีเล็กน้อย และ มีค่าความคงทนของสีต่อแสง <4 และ 3 หมายถึง ปานกลางค่อนข้างดี และ ปานกลาง ซึ่งยอมรับได้ในค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

ตารางที่ 4 ความคงทนของสีต่อแสงและต่อการซักของเส้นด้ายฝ้ายย้อมสีธรรมชาติ : เมล็ดคำแสด สภาวะพร้อมการย้อม

ที่	รายการ	ชื่อวัสดุย้อมสีที่ใช้กับเส้นด้ายฝ้าย									
1	วัสดุย้อม	เมล็ดคำแสด	เมล็ดคำแสด	เมล็ดคำแสด	เมล็ดคำแสด	เมล็ดคำแสด	เมล็ดคำแสด	เมล็ดคำแสด	เมล็ดคำแสด	เมล็ดคำแสด	เมล็ดคำแสด
2	สารย้อม	ไม่เพิ่ม	-	สารส้ม	น้ำบาดาล	น้ำค้าง	น้ำปูนใส				
3	รหัสสี	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
4	ผลการวิเคราะห์ความคงทนของสีต่อการซัก	ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-C10 : 2006									
	1. สีเปลี่ยนจากเดิม (ระดับ)	1	1	3	3	2	2	2	2	2	2
	2. สีตกติดผ้าขาว (ระดับ)										
	เปื้อนสี										
	ACETATE	3	2	3	3	3	3	3	2	3	3
	COTTON	3	2	3	3	3	3	3	2	3	3
	NYLON	4	3	4	4	4	4	4	3	4	4
	POLYESTER	4	3	4	4	4	4	4	3	4	4
	ACRYLIC	3	2	3	3	3	3	3	2	3	3
	WOOL	3	2	3	3	3	3	3	2	3	3
5	ความคงทนของสีต่อแสง	ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105 B02 : 1994									
	ระดับการเปลี่ยนของ	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2
	Blue ref.										

จากตารางที่ 4 การศึกษาความคงทนของสีต่อแสงและต่อการซักของเส้นด้ายที่ย้อมจากเมล็ดคำแสด พบว่า สีที่ได้จากเมล็ดคำแสดใน (สภาวะพร้อมการย้อม) ที่ใช้สารช่วยย้อมที่เป็นสารส้ม น้ำบาดาล น้ำค้างและน้ำปูนใส มีค่าการตกสี อยู่ในระดับ 1-3 หมายถึง สีตกมาก ถึงปานกลาง ค่าและการเปื้อนติดสี ผ้าในลอน อยู่ที่ 4/5 คือ เปื้อนติดสีเล็กน้อย ส่วนผ้าอื่น 2-3 คือ เปื้อนติดสีค่อนข้างมาก เปื้อนติดปานกลาง และ มีค่าความคงทนของสีต่อแสง 3 เฉพาะสารย้อมที่เป็น สารส้ม หมายถึง ปาน

กลาง ซึ่งยอมรับได้ในค่ามาตรฐาน นอกนั้น ได้ค่า 2 ซึ่งหมายถึง พอใช้ เป็นค่าที่ยังใช้ไม่ได้

3. การออกแบบและพัฒนาสินค้าผ้าทอลวดลายด้วยมือจากสีธรรมชาติ ตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 4

จากการออกแบบและพัฒนาสินค้าผ้าทอลวดลายด้วยมือจากสีธรรมชาติ พบว่า สามารถนำผ้าทอจากฝ้ายลวดลายดั้งเดิมแนวใหม่ ที่เน้นการผลิตเป็นไปตามศักยภาพของกลุ่มทอผ้าตีนจกบ้านสองธาร โดยให้กลุ่มทอผ้าจกนำเส้นด้ายย้อมสีธรรมชาติที่ย้อมจากพืชให้สีในชุมชนบ้านแม่จันมูก ที่เป็นผลมาจากการวิจัย มาจกและทอลายโคม ลายนาค ลายนก

ลายกุ่ม ลายขัน ลายหางสะเปา มาจัดวางแนวใหม่ แตกต่างจากการจัดวางลวดลายโบราณบนผลิตภัณฑ์ผ้าชิ้นดินจกแบบเดิม ซึ่งเป็นการนำทุนวัฒนธรรมที่เป็นศักยภาพของกลุ่ม มาต่อยอดการผลิตเดิมของกลุ่มผลิตผ้าฝ้าย ที่มีคุณภาพเอามูลค่าไปสร้างมูลค่าเพิ่มด้วยการออกแบบผลิตเป็นเสื้อผ้าประยุกต์ร่วมสมัยและกระเป๋าผ้ารูปทรงร่วมสมัย ภายใต้กรอบแนวคิด “เพิ่มมูลค่าผ้าทอจกเป็นแฟชั่นและผลิตภัณฑ์ร่วมสมัยสู่บริบทของเมือง” โดยนำมาออกแบบเป็นเสื้อผ้าประยุกต์ ชุดลำลอง และชุดทำงาน ที่เหมาะกับวัยผู้ใหญ่ วัยทำงาน และ วัยรุ่น จำนวน 6 ชุด ผลิตภัณฑ์กระเป๋าสะพายรูปแบบร่วมสมัยเหมาะกับบริบทเมือง จำนวน 3 รูปแบบ รูปแบบเป็นไปตามความต้องการของผู้บริโภคสินค้าเชิงวัฒนธรรม ที่ส่วนใหญ่ จะเป็นเพศหญิง อายุระหว่าง 36 - 50 ปี และ 51 ปีขึ้นไป และมีพฤติกรรมในการซื้อผ้าทอลวดลายด้วยมือ เมื่อถูกใจรูปแบบ ถูกใจลวดลาย และซื้อเมื่อมีคนฝากซื้อ เหตุผลที่ซื้อ เนื่องจากซื้อเพราะถูกใจในรูปแบบและลวดลายผ้าทอ สีและอารมณ์ของสีผลิตภัณฑ์ดึงดูดใจ ซื้อเพื่อนำไปใช้ใส่เองมีผู้ฝากซื้อซื้อเพื่อนำไปเป็นของขวัญหรือของที่ระลึก และ ซื้อเพราะเป็นรูปแบบที่ต้องใส่ทำงานตามวันที่องค์กรกำหนด ในเรื่องความต้องการซื้อสินค้าผ้าทอย้อม

ธรรมชาติ ส่วนใหญ่ต้องการซื้อสินค้าผ้าทอที่มีรูปแบบร่วมสมัย ทั้งประเภทเสื้อผ้า และ กระเป๋า มีลวดลายที่แสดงถึงเอกลักษณ์เฉพาะถิ่น มีความประณีต มีเทคนิคการทอที่เป็นไปตามศักยภาพของชุมชน ราคาเหมาะสม มีป้ายสินค้าที่สื่อสารเข้าใจง่าย และช่วยในการนำกลับมาซื้อสินค้าได้อีก สำหรับการทอผ้าชิ้นดินจกลายโบราณ ก็ยังคงให้มีการรับผลิตตามคำสั่งซื้อเหมือนเดิม ซึ่งสอดคล้องตามแนวคิดของ Phitchayasontorn (2012) ในด้านคุณประโยชน์ของลาย คือสร้างลวดลายให้เกิดคุณค่าทางด้านต่างๆ เช่น คุณค่าด้านความงาม การสร้างสรรค์ใหม่ให้เกิดความสวยงามแปลกตา คุณค่าของลวดลายที่แสดงถึงความเป็นเชื้อชาติ วัฒนธรรม ยุคสมัย การสื่อความหมายที่เป็นลักษณะเฉพาะของสังคม และการใช้ลวดลายถ่ายทอดอารยธรรมทางปัญญา จากการสร้างสรรค์พื้นผ้าเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ดึงดูดความสนใจของลูกค้า โดยเน้นความประณีตในการเย็บตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (ฝีย็บที่มีความละเอียด) การยกระดับสินค้าของกลุ่มจะเป็นการสงวนรักษาอัตลักษณ์และวิถีชีวิตพื้นถิ่นบนฐานธรรมชาติและฐานวัฒนธรรมอย่างยั่งยืน แต่เพื่อให้ต้นทุนต่ำและมีรายได้เพิ่มขึ้นอย่างมาก สมาชิกกลุ่มหรือผู้สืบทอดต้องมีการศึกษาเรียนรู้ เพิ่มเติมต่อไป



ภาพที่ 4 ผลงานออกแบบและพัฒนาผ้าทอลวดลายด้วยมือจากลัทธิธรรมชาติดั้งเดิมของชุมชน

4. การออกแบบป้ายสินค้าผ้าทอลวดลายด้วยมือจากลัทธิธรรมชาติ ตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 5

จากการใช้หลักการออกแบบกราฟิกในการออกแบบป้ายสินค้าทั้งหมด 3 รูปแบบ โดยใช้ที่เป็นลวดลายเอกลักษณ์ของกลุ่มบ้านสองธาร ที่เป็น ลายโคม ลายหางสะเปา ลายหงส์ ในภาพกราฟิก จัดวางตัวอักษรชื่อกลุ่ม ที่อยู่ของกลุ่ม ซึ่งเป็นการส่งเสริมการตลาดที่ดี ที่จะสร้างความจดจำให้กับลูกค้า ทำให้ลูกค้าสามารถกลับมาซื้อสินค้าหรือสั่งซื้อสินค้าตามที

อยู่บนป้ายสินค้า จากนั้นให้สมาชิกมีส่วนร่วมในการตัดสินใจเลือกรูปแบบ tag สินค้า และสมาชิกเลือกรูปแบบที่ 1 รูปลายโคม เป็นลายเอกลักษณ์ที่เป็นแม่ลาย สื่อให้ผู้บริโภคที่นิยมสินค้าผ้า แม่แจ่ม เข้าใจง่าย และจดจำ การจัดวางตัวอักษรชื่อกลุ่มมีขนาดใหญ่พอเหมาะและเรียบง่าย อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม มีข้อมูลที่อยู่ที่ช่วยให้ผู้ซื้อติดต่อกลับมาได้ ดังแสดงการวิเคราะห์รูปแบบป้ายสินค้าของสมาชิกกลุ่มวิสาหกิจบ้านแม่จู้มูก ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์รูปแบบป้ายสินค้าของสมาชิกกลุ่มวิสาหกิจบ้านแม่จู้มูก

รายการข้อมูล	รูปแบบที่ 1			รูปแบบที่ 2			รูปแบบที่ 3		
	N=13		ระดับ	N=13		ระดับ	N=13		ระดับ
	X	S.D.		X	S.D.		X	S.D.	
1. รูปแบบป้ายสินค้ามีขนาดเหมาะสม	5.00	0.00	มากที่สุด	5.00	0.00	มากที่สุด	5.00	0.00	มากที่สุด
2. มีความคิดสร้างสรรค์	4.00	0.29	มาก	3.17	0.87	ปานกลาง	3.17	0.87	ปานกลาง
3. การจัดองค์ประกอบศิลป์	4.00	0.29	มาก	3.17	0.87	ปานกลาง	4.00	0.29	มาก

ตารางที่ 5 (ต่อ)

รายการข้อมูล	รูปแบบที่ 1			รูปแบบที่ 2			รูปแบบที่ 3		
	N=13		ระดับ	N=13		ระดับ	N=13		ระดับ
			ความเห็น			ความเห็น			ความเห็น
4. ตัวอักษร อ่านง่าย จดจำได้ ง่าย	5.00	0.00	มากที่สุด	3.17	0.87	ปานกลาง	3.17	0.87	ปานกลาง
5. มีความชัดเจนในการสื่อสาร	5.00	0.00	มากที่สุด	4.00	0.29	มาก	3.17	0.87	ปานกลาง
6. มีข้อมูลแสดงรายละเอียด ครบถ้วน	5.00	0.00	มากที่สุด	5.00	0.00	มากที่สุด	5.00	0.00	มากที่สุด
7. ลวดลายกราฟิกมีเอกลักษณ์ น่าจดจำ	5.00	0.00	มากที่สุด	5.00	0.00	มากที่สุด	5.00	0.00	มากที่สุด
8. ป้ายสินค้าสวยงาม เรียบง่าย	5.00	0.00	มากที่สุด	5.00	0.00	มากที่สุด	5.00	0.00	มากที่สุด

ผลงานออกแบบป้ายสินค้าของบ้านแม่ซึ้งหรือบ้านสองธาร ภาพที่ 5 ประกอบ ป้ายสินค้ามีขนาดมาตรฐาน กว้าง 5 cm. × 9.00 cm. พื้นสีเนื้อลายกราฟิก เส้นสีแดง เหลืองและน้ำเงิน รูปแบบลายโคมและอีกนัยหนึ่งเหมือนสองธารที่ เปรียบเสมือนลมหายใจของชุมชนที่ต่อสู้เพื่อชีวิตของตนเอง ตัวอักษรอ่านง่าย จดจำได้ง่าย มีความชัดเจนในการสื่อสาร มีข้อมูลแสดงข้อเสนอแนะในการดูแลรักษา ที่

อยู่ที่สามารถติดต่อได้ พร้อมเบอร์โทรศัพท์ มีความสวยงามเรียบง่าย ซึ่งสอดคล้องกับคำอธิบายของ Usavangkul (2007) ที่กล่าวว่า การสร้างแบรนด์หรือจุดจดจำเพื่อให้ลูกค้าจดจำ จะต้องกะทัดรัด ใช้งานง่าย รูปลักษณ์ของสื่อ จะต้องน่าจดจำ การวางตำแหน่ง แบบอักษร ภาพ และสีที่เลือกใช้ จะต้องมีความเป็นเอกภาพ ซึ่งจะช่วยให้ผู้บริโภคจดจำ



ภาพที่ 5 ป้ายสินค้า Song Tan

นอกจากนั้น ได้จัดกิจกรรมทดสอบตลาดขึ้นโดยนำผลิตภัณฑ์เสื้อผ้าประยุกต์และกระเป๋า ไปจัดแสดงในงานที่ อบต.บ้านทับจัดขึ้น และนำเสนอต่อพัฒนาชุมชน พบว่า ผลิตภัณฑ์ของกลุ่มเป็นสินค้า

ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถจำหน่ายได้ในราคา 1,000 - 2,000 บาท และมีการสั่งซื้อสินค้า

5. ผลการจัดผังการปลูกและร่วมลงมือปลูกพืชให้สีตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 6

เพื่อให้สมาชิกกลุ่มเพาะปลูกพืชให้สี
สำหรับไว้ใช้ในการย้อมผ้าด้วยสีธรรมชาติ เช่น ต้น
ราชพฤกษ์ ต้นहुกวาง และต้นฝาง ชาวบ้านแม่จ๋มูกได้
ร่วมกันปลูกตามแนวถนนที่เป็นส่วนรวม นอกจาก
จะนำมาใช้ในการย้อมสีธรรมชาติแล้ว ดอกไม้ของ
ต้นเหล่านี้ สีสวยงาม อาจจะช่วยส่งเสริมการ
ท่องเที่ยวในหมู่บ้านได้ ส่วน ดอกดาวเรือง คำแสด
ต้นขนุน ต้นเพกา และ ขมิ้น ได้ลงมือปลูกในพื้นที่
ว่าง บริเวณบ้านพักอาศัยของสมาชิกทุกคนเป็นการ
ลดต้นทุนที่เพิ่มมูลค่าให้กับผ้าทอ สำหรับต้นฮัก

หลวง ไม้แฉะ ไม้เปา ไม้แดง เป็นต้นไม้ที่กรมป่าไม้
รับผิดชอบ ซึ่งได้มีการติดต่อประสานงานในการขอ
พันธุ์ไม้มาให้ชาวบ้านแม่จ๋มูกได้ปลูกเพิ่มเติม เป็น
แนวทางการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมด้านป่าไม้ ด้วย
แนวคิดป่าให้สี และเพิ่มพื้นที่สีเขียวที่เป็นมิตรกับ
สิ่งแวดล้อม รวมทั้งส่งเสริมการบริโภคและการผลิต
ที่ยั่งยืน บทเรียนที่ได้จากกิจกรรม นี้คือ จะต้องสรร
หาและปลูกพืชให้สีสำหรับไว้ใช้ในการย้อมผ้าด้วยสี
ธรรมชาติ เพิ่มมากขึ้นทุกปีเพื่อให้เกิดความยั่งยืน
สำหรับการทอผ้าของกลุ่ม



ภาพที่ 6 การปลูกพืชให้สีและกิจกรรมร่วมลงมือปลูกพืชให้สี

สรุป

จากผลการทดลองสกัดสีย้อมจากพืชให้สีที่
รวบรวมได้ในชุมชนบ้านแม่จ๋มูก และ การทดลอง
ย้อมสีเส้นด้ายฝ้ายด้วยสีที่สกัดได้จากพืชให้สีใน
ชุมชนและการใช้สารช่วยย้อมที่เหมาะสม และการ
ทดสอบความคงทนของสีย้อมต่อแสงและต่อการซัก
สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สีย้อมที่สกัดได้จากพืชให้สีที่รวบรวมได้
ในชุมชนบ้านแม่จ๋มูก จำนวน 14 ชนิดสามารถแยก
กลุ่มสีของพืชให้สี ได้ 5 โทนสี ดังนี้

1. กลุ่มพืชให้โทนสีแดง-ชมพู มี 2
ชนิด แก่นลำต้นจากต้นฝาง เปลือกลำต้นฮักหลวง

2. กลุ่มพืชให้โทนสีเหลือง-ทอง มี
- ชนิด ดอกจากต้นดาวเรือง ราก, หัว จากต้นขมิ้น
แก่น (ลำต้นหรือกิ่ง) จากต้นขนุน

3. กลุ่มพืชให้โทนสีน้ำตาล น้ำตาล
อ่อน มี 2 ชนิด เปลือกต้นไม้แฉะ เปลือกต้นไม้เปา ฝัก
จากต้นราชพฤกษ์ และเปลือกต้นไม้แดง

4. กลุ่มพืชให้โทนสีส้ม มี 2 ชนิด
เมล็ดจากต้นคำแสด เปลือกลูกมะพร้าวอ่อนจากต้น
มะพร้าว

5. กลุ่มพืชให้โทนสีเขียว เหลือ
งอมเขียว มี 2 ชนิด ใบอ่อนจากต้นตองกิ้ง (ต้นไม้
กวาด) ใบแก่จากต้นहुกวาง เปลือกลำต้นจากต้นเพกา
(มะริดไม้)

2. ผลการทดลองย้อมสีเส้นด้ายฝ้าย Ne10/1 และ 40/2 ด้วยสีย้อมที่สกัดได้จากพืชให้สีในชุมชนบ้านแม่มูก จำนวน 14 ชนิด พบว่า สีย้อมจากพืชทุกชนิด สีดัดได้มีความเข้มไม่ชัดเจน โดยใช้วิธีย้อมร้อนในสภาวะพร้อมย้อม ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 60 นาที ซึ่งเป็นกระบวนการที่เหมาะสมที่สุด และเมื่อเพิ่มสารช่วยย้อมที่เป็นสารธรรมชาติ (สารส้ม น้ำบาดาล น้ำด่าง น้ำปูนใส) ลงในน้ำย้อม เส้นด้ายที่ย้อมจะมีสีเข้มมากขึ้นและมีเจดสีอ่อน เข้ม ตามชนิดของสารช่วยย้อม

3. ผลการทดสอบความคงทนของสีย้อมต่อแสง และต่อการซัก พบว่า เป็นที่น่าพอใจ เส้นด้ายฝ้ายที่ย้อมด้วยสีที่สกัดจากพืชให้สีในชุมชนจำนวน 11 ชนิด มีความคงทนต่อการใช้สูง มีค่าการตกสี และการเปลี่ยนสี อยู่ในระดับ 4-5 และ มีค่าความคงทนของสีต่อแสง <4-3 ซึ่งยอมรับได้ในค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน และมีเพียง 3 ชนิด ได้ค่า 2 ซึ่งหมายถึง พอใช้ เป็นค่าที่ยังใช้ไม่ได้ แสดงว่า ไม่มี ความคงทนต่อการซักและความคงทนต่อแสง

ตารางที่ 6 แสดงสรุปส่วนของพืชที่ให้สีและสารช่วยย้อมที่ทำให้การสกัดและการย้อมสีจากพืชที่ศึกษาผ่านมาตรฐาน

พืชให้สี	ส่วนที่ใช้ย้อม	สีที่ได้	สารช่วยย้อมที่เหมาะสม
ราชพฤกษ์	ฝัก	สีน้ำตาล	สารส้ม น้ำด่าง น้ำบาดาล น้ำปูนใส
คำแสด คำไทย หรือ คำเงาะ	เมล็ด	ส้ม	สารส้ม
เพกา (มะริดไม้)	เปลือก	เหลืองอมเขียว	สารส้ม น้ำด่าง น้ำบาดาล น้ำปูนใส
หูกวาง	ใบสด	เขียว	สารส้ม น้ำด่าง น้ำบาดาล น้ำปูนใส
หูกวาง	ใบแห้ง	เขียวเหลืองออกน้ำตาล	สารส้ม น้ำด่าง น้ำบาดาล น้ำปูนใส
ขนุน	แก่น	เหลือง	สารส้ม น้ำด่าง น้ำบาดาล น้ำปูนใส
ดอกดาวเรือง	กลีบดอก	เหลือง	สารส้ม น้ำด่าง น้ำบาดาล น้ำปูนใส
ขมิ้น	หัว,ราก	เหลือง	สารส้ม น้ำบาดาล
อัญหหลวง	เปลือกต้น	ชมพู	สารส้ม น้ำด่าง น้ำบาดาล น้ำปูนใส
ไม้เะ	เปลือกต้น	น้ำตาล	สารส้ม น้ำด่าง น้ำบาดาล น้ำปูนใส
ไม้เปา (ไม้เต็ง)	เปลือกต้น	น้ำตาล	สารส้ม น้ำด่าง น้ำบาดาล น้ำปูนใส
ไม้แดง	เปลือกต้น	น้ำตาลอ่อน	สารส้ม น้ำด่าง น้ำบาดาล น้ำปูนใส
ตองก้ง (ต้นไม้กวาด)	ใบอ่อน	เขียวอ่อน	สารส้ม น้ำด่าง น้ำบาดาล น้ำปูนใส
ไม้ฝาง	แก่นลำต้น /แก่น กิ่งแก่	ชมพู	สารส้ม
มะพร้าว	เปลือกลูกมะพร้าวอ่อน	ส้มอ่อน	สารส้ม น้ำด่าง น้ำบาดาล น้ำปูนใส

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่สนับสนุนทุนวิจัย ประจำปี 2562

เอกสารอ้างอิง

Donchai, T. and Wimolphusit, O. 2008. **Color Shade and Plants**. Academic document, Chiang Mai, Fai Gaem Mai Project,

- Chiang Mai University, Science and Technology Research Institute. (in Thai)
- Government Savings Bank Research Centre. 2019. **Textile and Clothing**. Available Source: http://WWW.gsb.or.th/getattachment/2a4c817b-4365-87af-18ab459bdd84/textile_61_62.aspx, December 16, 2019. (in Thai)
- Leepayakul, P., Netkrajang, S. and Yingnakorn, W. n.d. **Wisdom Color Line from Nature**. Academic document, Department of Sericulture, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)
- Phitchayasootorn, P. 2012. **Art and Basic Design**. Chulalongkorn University, Bangkok. (in Thai)
- Sitthinopphun, P., Kantubtim, P. and Panbumrung, P. 2014. The Development of Tie-Dyed Prototype with Natural Dyed. **Journal of Western Rajabhat Universities** 9(1): 81-89. (in Thai)
- Thuravorn, P., Nachaw, N. and Nachaw, W. 2002. **The Process of Developing and Inheriting the Wisdom of Thread Dyeing with Natural Materials of Karen-Sakor Women, Mae Yao Sub-District, Muang District, Chiangrai Province**. Academic document, Office of the supporting fund research (TRF). (in Thai)
- Usavangkul, C. 2007. **Design Attractive**. Within Book, Chiang Mai. (in Thai)

ระดับความแปรปรวนทางพันธุกรรมประชากรปลาเลียหินในลำน้ำย่าง (ลำน้ำสาขาแม่น้ำน่าน) กรณีศึกษาน้ำตกศิลาเพชร จ.น่าน

Genetic Variation of *Garra cambodgiensis* at Yang River (Tributary of Nan River): A Case Study of Silaphet Waterfall, Nan Province

เชาวลี ใจสุข¹ พัชรา นิธิโรจน์ภักดี^{2*} อมรชัย ล้อทองคำ¹ และ เจนจิรา ลานแก้ว¹

Chaowalee Jaisuk¹, Patchara Nithirojpkadee^{2*}, Amornchai Lothongkham¹ and Janejira Lankaew¹

Received: 17 March 2020 , Revised: 2 September 2020, Accepted: 16 September 2020

บทคัดย่อ

การศึกษาระดับความแปรปรวนทางพันธุกรรมของปลาเลียหินในลำน้ำย่างเกิดจากข้อสังเกตที่พบปลาเลียหินในน้ำตกศิลาเพชรมีขนาดเล็กกว่าลำน้ำอื่นและคาดว่าเป็นผลจากพันธุกรรมเนื่องจากประชากรที่อยู่ในพื้นที่จำกัดอาจมีประชากรขนาดเล็กส่งผลให้เกิดเลือดชิดอาจแสดงออกมาในลักษณะของการลดอัตรากายพันธุ์ซึ่งการมีขนาดตัวที่เล็กของปลาเป็นลักษณะหนึ่งที่น่าสงสัยถึงการมีเลือดชิดในประชากร การศึกษานี้จึงวิเคราะห์ความหลากหลายทางพันธุกรรมของปลาเลียหินจาก 3 จุดรวบรวมตัวอย่าง ได้แก่ น้ำตกศิลาเพชร บ้านคอนมูล และบ้านยู ซึ่งเป็นเส้นทางที่ลำน้ำย่างไหลผ่านก่อนบรรจบกับแม่น้ำน่าน โดยใช้ไมโครแซทเทลไลต์ดีเอ็นเอ 5 ตำแหน่ง ผลการศึกษพบความหลากหลายทางพันธุกรรมภายในของปลาทั้ง 3 กลุ่มไม่ต่างกัน ($p > 0.05$) ค่า Effective population size (N_e) ของทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่างมีขนาดใหญ่และไม่พบสถานะคอขวดในทุกกลุ่ม พบความแตกต่างทางพันธุกรรมของกลุ่มตัวอย่าง (ค่า Global $F_{ST} = 0.01189$; AMOVA, $p = 0.01466$) ระยะห่างทางพันธุกรรมมากที่สุดระหว่างน้ำตกศิลาเพชรกับบ้านคอนมูล มีค่าเท่ากับ 0.241 เช่นเดียวกับค่า pairwise F_{ST} พบความต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มตัวอย่างนี้ ผลการจัดกลุ่มและการถ่ายเทยีนพบสมาชิกของทั้ง 3 กลุ่มมีการปะปนในระดับพันธุกรรมและไม่แยกออกจากกัน พบความสัมพันธ์ระหว่างความต่างทางพันธุกรรมระหว่างประชากรกับระดับ

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตน่าน ตำบลฝายแก้ว อำเภอภูเพียง จังหวัดน่าน 55000

¹ Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Nan Campus, Fai Kaeo, Phu Phiang, Nan 55000, Thailand.

² คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี ตำบลพลวง อำเภอเขาชะเมา จันทบุรี 22210

² Faculty of Argo-Industrial Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi Campus, Pluang, Khao Khitchakut, Chanthaburi 22210, Thailand.

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

เครือข่ายแม่น้ำ (stream tree) $R^2 = 0.728$ แสดงถึงอิทธิพลของโครงข่ายแหล่งน้ำมีผลต่อความแปรปรวนทางพันธุกรรม

คำสำคัญ: ปลาเลียหิน, พันธุกรรม, ไมโครแซทเทลไลต์, ลำน้ำย่าง, แม่น้ำน่าน

ABSTRACT

The question of this research derived from personal observation on the distinctively smaller size of *Garra cambodgiensis* at Silaphet Waterfall compared to those in other rivers. We hypothesized that the phenotype might be caused by the genetic effects. The small population size and absence of gene flow can lead to inbreeding and reduction in genetic diversity. Small body size of fish is one sign of inbreeding. Therefore, this study aimed to assess the genetic variation of *G. cambodgiensis* from three sites: Silaphet Waterfall, Donmoon, and Yuu in the Yang River, Nan province by using five polymorphic microsatellite loci. The genetic diversity of *G. cambodgiensis* from 3 sites was not significantly different ($p > 0.05$). The Effective population size (N_e) in three samples was large and there was no evidence for recent bottleneck events in these populations. The genetic differentiation, the Analysis of Molecular variance (AMOVA) was Fixation index = 0.01189 ($p = 0.01466$). The genetic distance was the highest (0.241) between Silaphet and Donmoon. According to the pairwise F_{ST} , the Silaphet was significantly different from Donmoon. The cluster and gene flow analysis found that the admix genetic and 3 samples were not distinguished. Pattern of genetic differentiation can be explained by the contemporary stream network $R^2 = 0.728$. We discuss the results on the hydrological complexity that may imprint upon patterns of genetic variation of *G. cambodgiensis* in the Yang River.

Key words: *Garra cambodgiensis*, genetic, microsatellite, Yang River, Nan River

บทนำ

น้ำตกศิลาเพชรเป็นบริเวณที่ต่อมาจากต้นน้ำอย่างซึ่งเป็นลำน้ำสาขาหนึ่งของแม่น้ำน่านมีสภาพเป็นแก่ง น้ำไหลแรง มีโขดหินขนาดใหญ่ บริเวณโดยรอบเป็นพื้นที่ป่า บริเวณนี้จึงจัดเป็นแหล่งท่องเที่ยวที่ได้รับความนิยม นอกจากนั้นในทางนิเวศน้ำตกศิลาเพชรเป็นแหล่งอาศัยของปลาท้องถิ่นหลากหลายชนิด สำหรับการศึกษาที่มีความสนใจพันธุกรรมปลาเลียหิน (*Garra cambodgiensis*) เนื่องจากเป็นปลาที่มีการแพร่กระจายกว้างพบได้ในทุกลำน้ำสาขาของ

แม่น้ำน่าน Jaisuk *et al.* (2015) คาดว่าเป็นผลมาจากการชีววิทยาการสืบพันธุ์ของปลาเลียหินที่มีฤดูผสมพันธุ์วางไข่ในช่วงฤดูน้ำหลาก พ่อแม่พันธุ์จะถูกน้ำพัดมารวมกันในบางบริเวณที่เหมาะสมต่อการวางไข่ เช่น บริเวณลำห้วย หรือน้ำเชี่ยวและประกอบกับไข่ของปลาชนิดนี้เป็นไข่ครึ่งจมครึ่งลอยดังนั้นหลังจากที่ไข่ได้รับการปฏิสนธิแล้วไข่จึงมีโอกาที่จะถูกพัดพาไปกับกระแสน้ำ สำหรับกรณีศึกษาปลาเลียหินบริเวณน้ำตกศิลาเพชรในลำน้ำย่างสืบเนื่องมาจากการดำเนินงานเพาะพันธุ์ปลาเลียหินในปี พ.ศ. 2557

ได้นำพ่อ แม่พันธุ์ปลาเลียหินจากบริเวณน้ำตกศิลาเพชรมาเป็นพ่อ แม่พันธุ์ในการเพาะพันธุ์เพื่อปล่อยลูกพันธุ์ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ พบข้อสังเกตที่พ่อ แม่พันธุ์ปลาเลียหินในบริเวณดังกล่าวมีขนาดเล็กโดยมีความยาวเฉลี่ย 3-5 เซนติเมตร ในขณะที่พ่อ แม่พันธุ์ปลาเลียหินในลำน้ำอื่นมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 6-9 เซนติเมตร และพบลักษณะปลาที่มีลำตัวคดงอจำนวนหนึ่ง ซึ่งลักษณะตามที่กล่าวมาในเบื้องต้นเป็นลักษณะที่อาจเป็นผลมาจากระดับความหลากหลายทางพันธุกรรมเนื่องจากการที่ประชากรมีขนาดเล็กมีความเป็นไปได้ที่ความหลากหลายทางพันธุกรรมต่ำซึ่งส่งผลให้เกิดเลือดชิดในประชากรนั้นๆ ปลาในบริเวณน้ำตกศิลาเพชรถูกจำกัดพื้นที่การแพร่กระจายเนื่องจากมีสิ่งกีดขวางเป็นน้ำตกและฝายกั้นน้ำ ดังผลจากการศึกษาอื่นๆ เช่น Yamamoto *et al.* (2004) ปลา White-spotted charr (*Salvelinus leucomanus*) ในแม่น้ำบริเวณที่มีเขื่อนความสูงตั้งแต่ 2-23 เมตร กั้นระหว่างลำน้ำเป็นเวลานานอย่างน้อย 8-36 ปี พบว่าระดับความหลากหลายทางพันธุกรรมประชากรบริเวณเหนือเขื่อนมีค่าต่ำกว่าประชากรใต้เขื่อนเป็นผลมาจากประชากรเหนือเขื่อนถูกจำกัด การถ่ายเทยีน เช่นเดียวกับ Leclerc *et al.* (2008) ปลา *Perca flavescens* ใน Saint Lawrence River ประเทศแคนาดาที่พบว่าการมีเขื่อนขวางกั้นลำน้ำส่งผลต่อโครงสร้างพันธุกรรมของประชากร เช่นเดียวกับรายงานของ Jaisuk and Senanan (2018a) ที่ได้ศึกษาผลของสิ่งกีดขวางต่อความแปรปรวนทางพันธุกรรมของปลาเลียหิน (*G. cambodgiensis*) บริเวณลำน้ำปันอ.บ่อเกลือ จ.น่าน พบว่ากลุ่มตัวอย่างปลาเลียหินที่อยู่เหนือน้ำตกสะปัน ซึ่งเป็นน้ำตกที่มีความสูง 10 เมตร มีความหลากหลายทางพันธุกรรมที่ค่อนข้างต่ำและมีความแตกต่างทางพันธุกรรมจากปลา เลียหินที่อยู่ในบริเวณใต้น้ำตก ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวแสดงผลของการมีสิ่งกีดขวางจำกัดการเคลื่อนที่และโอกาสการ

แลกเปลี่ยนพันธุกรรมกับกลุ่มประชากรอื่น ส่งผลต่อระดับพันธุกรรมที่ค่อนข้างต่ำและเกิดความแตกต่างทางพันธุกรรมระหว่างปลาที่อยู่เหนือและใต้น้ำตก นอกจากนี้ Neville *et al.* (2009) พบว่าคุณภาพของแหล่งที่อยู่และขนาดของพื้นที่มีผลต่อการพบความต่างของค่าเฉลี่ยความหลากหลายของอัลลีล (allelic richness; A_p) และ gene diversity (H_e) ของปลาเทร้า ในแม่น้ำ Boise และ Payette, Idaho, ประเทศสหรัฐอเมริกา

ดังนั้นเพื่ออธิบายถึงการพบลักษณะปรากฏในปลาเลียหินบริเวณน้ำตกศิลาเพชร การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงแปรปรวนทางพันธุกรรมของประชากรปลาเลียหินในบริเวณน้ำตกและบริเวณอื่นๆ ในลำน้ำอย่าง โดยใช้เครื่องหมายพันธุกรรมไมโครแซทเทลไลต์ ซึ่งเป็นเครื่องหมายที่มีประสิทธิภาพสูงในการวิเคราะห์พันธุศาสตร์ประชากรเพื่อทราบถึงระดับพันธุกรรมและข้อมูลระดับพันธุกรรม (Jaisuk and Senanan, 2018b; Neville *et al.*, 2009; Yamamoto *et al.*, 2004) ซึ่งเป็นประโยชน์ในวางแผนการอนุรักษ์พันธุกรรมและการเพาะพันธุ์ปลาเลียหินเพื่อปล่อยลูกพันธุ์คืนสู่แหล่งน้ำโดยไม่ส่งผลกระทบต่อระดับพันธุกรรมของประชากรธรรมชาติ

วิธีดำเนินการวิจัย

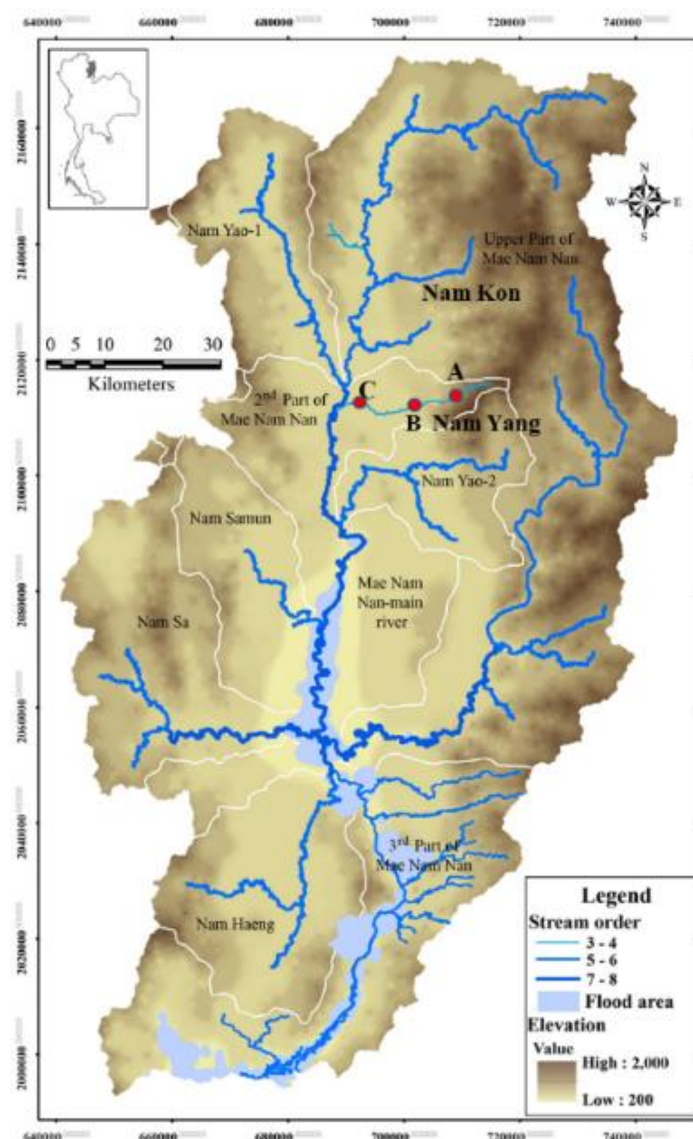
1. การเก็บตัวอย่างภาคสนาม

รวบรวมตัวอย่างปลาเลียหินบริเวณน้ำตกศิลาเพชรและตลอดลำน้ำอย่างได้แก่ น้ำตกศิลาเพชร บ้านคอนมูล บ้านผู้ รวมเป็นระยะทาง 15 กิโลเมตร (ตารางที่ 1 และภาพที่ 1) จับปลาด้วยแหและเมื่อได้ตัวอย่างปลาใช้ผ้าขนหนูชุบน้ำจับตัวปลาเพื่อไม่ให้คื่น สลับปลาด้วยน้ำมันกานพลูแล้วจึงตัดครีบบางปลาขนาด 0.5 เซนติเมตร หลังจากตัดครีบบางทาบยาไอโอดีนไอโอดีนก่อนปล่อยคืนสู่แหล่งน้ำในบริเวณ

เดิม เก็บรักษาตัวอย่างครีบน้ำในแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์ ก่อนนำมาศึกษาในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 1 จุลรวบรวมตัวอย่างปลาเลียหิน (*Garra cambodgiensis*) ในลำน้ำยาง

จุดรวบรวม ตัวอย่าง	จำนวน ตัวอย่าง (ตัว)	สภาพพื้นที่/สภาพลำน้ำ	พิกัดจุดรวบรวมตัวอย่าง (UTM)	
			X (ทางตะวันออก)	Y (ทางเหนือ)
น้ำตกศิลาเพชร (A)	42	พื้นที่ป่า/น้ำตกลักษณะเป็นแก่ง น้ำไหลเชี่ยว	705554	2112381
บ้านคอนมูล (B)	32	พื้นที่เกษตรกรรม/ลำน้ำไหลเอื่อย	702881	2111623
บ้านยู (C)	26	พื้นที่เกษตรกรรม/ลำน้ำไหลเอื่อย	693331	2111732



ภาพที่ 1 จุลรวบรวมตัวอย่างปลาเลียหิน (*Garra cambodgiensis*) ในลำน้ำยาง

น้ำตกศิลาเพชร (A) บ้านคอนมูล (B) บ้านยู (C) ระยะทางระหว่าง A-B=3 กม., A-C=15 กม., B-C=12 กม.

2. การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

สกัดดีเอ็นเอด้วยวิธี Salt extraction คัดแปลงจากวิธีของ Aljanabi and Martinez (1997) วัดปริมาณดีเอ็นเอโดยเทคนิคอิเล็กโตรโฟรีซิสบนอะกาโรสเจล 1% ด้วยเครื่องอิเล็กโตรโฟรีซิสแบบนอน (BIO-RAD SubcellGT, Italy) และผ่านกระแสไฟฟ้า 70 โวลต์เป็นเวลา 45 นาที หลังจากนั้นนำแผ่นเจลมาย้อมด้วยสีย้อมดีเอ็นเอ (FluoroVue Nucleic Acid Gel Stain, SMOBIO, Malaysia) เพิ่มจำนวนดีเอ็นเอโดยปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอร์เรส (Polymerase Chain Reaction; PCR) โดยเครื่อง Thermal cycle (BioRad, MJ Mini Cyclor, Italy) ด้วยไมโครแซทเทลไลท์ 5 ตำแหน่งที่ได้มีการติดแท็กสีฟลูออเรสเซนต์ ได้แก่ GC203 (Jaisuk *et al.*, 2014a), HOLN (Kirchner *et al.*, 2014), Gar3, Gar6 และ Gar13 (Su *et al.*, 2013) (ตารางที่ 2) สารละลายพีซีอาร์ 10 ไมโครลิตร ประกอบด้วยดีเอ็นเอต้นแบบ 1 ไมโครลิตร (ความเข้มข้น 10 นาโนกรัมต่อไมโครลิตร), ใช้สารละลายพีซีอาร์ (i-taq PCR Master mix Solution, iNtRON BIOTECHNOLOGY, Gyeonggi-do, เกาหลีใต้) 5 ไมโครลิตร ไพร์เมอร์ Forward และ Reverse อย่างละ 0.2 ไมโครโมล วัฏจักรประกอบด้วย 1. อุณหภูมิที่

ให้สายดีเอ็นเอแยกออกจากกัน (pre denaturation) 94 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที จำนวน 1 รอบ 2. อุณหภูมิที่ทำให้สายดีเอ็นเอแยกออกจากกัน (denaturation) 94 องศาเซลเซียส นาน 30 วินาที 3. อุณหภูมิที่ไพร์เมอร์มาเกาะกับสายดีเอ็นเอตั้งต้นสำหรับทุกไพร์เมอร์ (annealing temperature; T_a) 54 องศาเซลเซียส นาน 30 วินาที และ 4. อุณหภูมิที่ Taq Polymerase ซ่อมสายดีเอ็นเอให้สมบูรณ์เป็นดีเอ็นเอเส้นใหม่ (extension temperature) 72 องศาเซลเซียส นาน 30 วินาที (ข้อ 2-4 จำนวน 40 รอบ) และ 5. อุณหภูมิซ่อมสายดีเอ็นเอให้สมบูรณ์ (final extension) 72 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที จำนวน 1 รอบ ตรวจสอบผลิตภัณฑ์พีซีอาร์โดยนำสารละลายพีซีอาร์มาแยกขนาดดีเอ็นเอด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟรีซิสผ่าน polyacrylamide gel 6 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเครื่องแยกสารพันธุกรรมชนิดแนวตั้ง (Mini PROTEAN®Tetra Cell, BIO-RAD) นำส่งตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์จีโนไทป์ (First BASE Laboratories Sdn Bhd, Selangor, มาเลเซีย) หลังจากนั้นนำข้อมูลจีโนไทป์มาตรวจสอบขนาดดีเอ็นเอด้วยโปรแกรม GeneMapper software version 3.0 (Applied Biosystems, Foster City, CA, อเมริกา)

ตารางที่ 2 ลำดับนิวคลีโอไทด์ของคู่ไพร์เมอร์ และ annealing temperature (T_a) ของไมโครแซทเทลไลท์ 5 ตำแหน่ง

ชื่อตำแหน่ง	ลำดับนิวคลีโอไทด์ 5'----> 3'	T_a (°C)	อ้างอิง
GC203	F : GTTCTCCAGGTGTGGATTTCTC	54	(Jaisuk <i>et al.</i> , 2014a)
	R : AACATACACTCACAGTTTGGCCT		
HOLN	F : ACTGCGCTCGTACCCTATG	54	(Kirchner <i>et al.</i> , 2014)
	R : CAGCAGCCGGTAAATAGCTG		
Gar3	F : ATTACTGATGCTCCCG	54	(Su <i>et al.</i> , 2013)
	R : GTTGCTGCTCTTGTCC		
Gar6	F : GCTTTACCTCCATCGC	54	
	R : GTCACCTCCACCAACCC		

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ชื่อตำแหน่ง	ลำดับนิวคลีโอไทด์ 5'----> 3'	T _a (°C)	อ้างอิง
Gar13	F : ACTCACGCAGACTCGC R : GACTACAGAAATAGGGTT	54	

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

ประเมินความหลากหลายทางพันธุกรรมภายในประชากรจากค่าจำนวนอัลลีลต่อตำแหน่ง (A) ค่าเฮตเทอโรไซโกซิตี (ค่าเฮตเทอโรไซโกซิตีจากการสังเกต: H_o ค่าเฮตเทอโรไซโกซิตีจากการคาดหมาย: H_e) และค่า Fixation index (F_{is}) โดยโปรแกรม GenAEx version 6.1 (Peakall and Smouse, 2006) ค่า allelic richness (A_r) จากโปรแกรม FSTAT version 2.9.4 (Goudet, 2003) ทดสอบการเบี่ยงเบนจากสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์ก โดยการประเมินค่า exact p-value ด้วยวิธี markov chain ตามวิธีของ Guo and Thompson (1992) ด้วยโปรแกรม GENEPOP version 4 (Rousset, 2008) ปรับระดับความน่าจะเป็น (p -value) วิเคราะห์ซ้ำหลายครั้ง (multiple test) ด้วย Bonferroni correction (Rice, 1989) ใช้โปรแกรม NeEstimator version 2.01 (Do *et al.*, 2014) ประเมินจำนวน effective population size (N_e) ทดสอบสถานะคอขวดในกลุ่มตัวอย่างด้วยโปรแกรม Bottleneck version 1.2.02 (Piry *et al.*, 1999) ทดสอบความแตกต่างของระดับความหลากหลายทางพันธุกรรมโดยการทดสอบ Mann-Whitney U

ประเมินความแปรปรวนทางพันธุกรรมระหว่างประชากรเทียบกับความแปรปรวนภายในประชากร ทดสอบค่าสถิติ Φ_{ST} ระหว่างคู่ตัวอย่าง โดยโปรแกรม ARLEQUIN version 3.11 (Excoffier *et al.*, 2005) ค่าระยะห่างทางพันธุกรรม (genetic distance) โปรแกรม GenAEx version 6.1 (Peakall and Smouse, 2006) ค่า Genetic differentiation (pairwise F_{ST}) ทดสอบความแตกต่างของความถี่อัลลีล

ของแต่ละประชากร โดย Exact test ตามวิธีของ Guo and Thompson (1992) (Dememorization = 1000, Batches = 1000, Iterations per batch = 1000) จากโปรแกรม GENEPOP version 4 (Rousset, 2008) และปรับระดับความน่าจะเป็น (p -value) Bonferroni correction (Rice, 1989) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างทางพันธุกรรม (F_{ST}) กับระดับเครือข่ายแม่น้ำด้วยโปรแกรม STREAMTREE (Kalinowski *et al.*, 2008) และวิเคราะห์การจัดกลุ่มและการถ่ายเทยีนด้วยโปรแกรม Structure 2.3.4 (Pritchard *et al.*, 2000) จากนั้นหาค่าสัมประสิทธิ์การเป็นสมาชิกของแต่ละตัวอย่างในแต่ละกลุ่มโดยโปรแกรม Pophelper R version 1.0.10 (Francis, 2017)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ความหลากหลายภายในประชากรของกลุ่มตัวอย่าง

เครื่องหมายไมโครแซทเทลไลต์ทั้ง 5 ตำแหน่ง มีสถานะหลากหลายรูปแบบในทุกประชากรโดยมีค่าเฉลี่ยต่ำสุดถึงสูงสุด ดังนี้ จำนวนตัวอย่างเฉลี่ย (N) มีค่าอยู่ระหว่าง 25.20 ± 0.37 (บ้านยู) - 41.80 ± 0.20 (น้ำตกศิลาเพชร) ความหลากหลายทางพันธุกรรมมีค่าเฉลี่ยดังนี้ จำนวนอัลลีลต่อตำแหน่ง (A) มีค่าอยู่ระหว่าง 11.80 ± 1.02 (บ้านยู) - 12.60 ± 0.60 (น้ำตกศิลาเพชร) อัลลีล, ค่า effective number of alleles (A_e) มีค่าอยู่ระหว่าง 6.77 ± 0.83 (บ้านดอนมูล) - 7.63 ± 0.64 (น้ำตกศิลาเพชร) อัลลีล, ค่า allelic richness (A_r) มีค่าอยู่ระหว่าง 11.24 ± 0.95 (น้ำตกศิลาเพชร) -

11.69±2.04 (บ้านยู้ง) อัลลีล, ค่าเฮตเทอโรไซโกซิตีจากการสังเกต (H_o) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.56±0.05 (บ้านคอนมุด) - 0.70±0.03 (น้ำตกศิลาเพชร) ค่าเฮตเทอโรไซโกซิตีจากการคาดหมาย (H_e) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.84±0.02 (บ้านคอนมุด) - 0.87±0.01 (น้ำตกศิลาเพชร) กลุ่มตัวอย่างทั้ง 3 จุดเก็บตัวอย่างมีความหลากหลายทางพันธุกรรมภายในกลุ่มตัวอย่าง ไม่ต่างกัน ($p>0.05$) มีค่าเฉลี่ยความหลากหลายทางพันธุกรรมของทั้ง 3 กลุ่มมีค่าเป็น A เท่ากับ 12.33±0.57 ค่า A_c เท่ากับ 7.14±0.40 ค่า A_r เท่ากับ 10.54±3.40 ค่า H_o เท่ากับ 0.63±0.04 และค่า H_e เท่ากับ 0.85±0.01 (ตารางที่ 3)

เครื่องหมายพันธุกรรม 4 ตำแหน่งมีการเบี่ยงเบนจากสมดุลฮาร์ดี-ไวน์เบิร์กในบางกลุ่มตัวอย่าง โดยพบในกลุ่มตัวอย่างน้ำตกศิลาเพชรที่ตำแหน่ง Gar6 กลุ่มตัวอย่างบ้านคอนมุดที่ตำแหน่ง Gar6, GC203 และ HOLN และกลุ่มบ้านยู้งที่ตำแหน่ง Gar13 การออกจากสมดุลที่ทุกตำแหน่งมีค่าเฮตเทอโรไซโกซิตีจากการคาดหมาย (H_e) มากกว่าค่าเฮตเทอโรไซโกซิตีจากการสังเกต (H_o) (heterozygosity deficit) ซึ่งแสดงถึงในกลุ่มประชากรมีค่าเฮตเทอโรไซโกตน้อยกว่าที่ควรจะเป็นและจากค่า Fixation index (F_{is}) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นบวก ($F_{is}=0.26\pm0.04$) แสดงถึงมีการรวมกันของประชากรที่มีความถี่อัลลีลต่างกัน (Wahlund effect) (Hedrick, 2011) นอกจากนั้นการประเมินจำนวน effective population size (N_e) พบว่าทุกกลุ่มตัวอย่างมี N_e ขนาดใหญ่ (ค่าสูงสุดอยู่ในระดับ infinity) และไม่พบการมีสถานะคอขวดในทุกกลุ่มตัวอย่าง

การพบปลาเลียหินในบริเวณน้ำตกศิลาเพชรและบริเวณอื่นๆ ของลำน้ำยางมีความหลากหลายทางพันธุกรรมสูงอาจเป็นผลมาจากในบริเวณน้ำตกมีปลาเลียหินอาศัยชุกชุมการที่ปลามาอยู่อาศัยอย่างชุกชุมเป็นผลสืบเนื่องมาจากแหล่งที่อยู่มีคุณภาพที่ดีมีความ

อุดมสมบูรณ์ด้วยสภาพพื้นที่โดยรอบน้ำตกศิลาเพชรเป็นพื้นที่ป่ามีร่มเงาของต้นไม้ใหญ่ มีโขดหินสลับซับซ้อนเหมาะต่อการเป็นแหล่งอาศัยของปลาลำธารอย่างปลาเลียหิน ดังการศึกษาของ Neville *et al.* (2009) ที่พบว่าขนาดและคุณภาพของแหล่งที่อยู่มีผลต่อความหลากหลายทางพันธุกรรมของ ปลาเทร้า (Lahontan cutthroat trout) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยค่า A_r และ H_e เพิ่มขึ้นเมื่อขนาดแหล่งที่อยู่ใหญ่ขึ้น นอกจากนั้นอาจเป็นผลมาจากชีววิทยาของปลาเลียหินที่มีการผสมพันธุ์วางไข่ในฤดูฝนโดยเฉพาะในฤดูน้ำหลากปริมาณน้ำสูงกว่าแนวฝายกั้นลำน้ำอย่าง จึงมีโอกาที่พ่อ แม่พันธุ์ปลาเลียหินจะสามารถข้ามผ่านฝายน้ำยางไปยังบริเวณที่เหมาะสมต่อการวางไข่ เช่นพื้นที่นาข้าวหรือลำห้วยที่มีน้ำไหลรินเนื่องด้วยไข่ปลาเลียหินเป็นไข่ครึ่งจมครึ่งลอยอาจถูกกระแสน้ำพัดพาไข่หรือตัวอ่อนให้แพร่กระจายไปได้ทั่วตลอดลำน้ำ (Jaisuk *et al.*, 2014b) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Barson *et al.* (2009) ปริมาณน้ำในฤดูน้ำหลากเพิ่มโอกาสให้ปลาหางนกยูง (*Poecilia reticulata*) ถูกพัดพาหรือว่ายน้ำข้ามผ่านสิ่งกีดขวาง ส่งผลให้ปลามีการแพร่กระจายไปได้ไกล

สำหรับการเปรียบเทียบกับความหลากหลายทางพันธุกรรมของปลาเลียหินในบริเวณลำน้ำยางกับปลาเลียหินในพื้นที่อื่นๆ พบว่าระดับความหลากหลายทางพันธุกรรมที่พบมีค่าค่อนข้างสูงกว่าปลาเลียหินในบริเวณอื่นๆ ดังการศึกษาของ Jaisuk *et al.* (2014a) ปลาเลียหิน บริเวณห้วยก๊วะ อ.บ่อเกลือ จ.น่าน จาก ไมโครแซทเทลไลท์ 3 ตำแหน่ง พบปลาเลียหินมี A เท่ากับ 4-7 อัลลีล, ค่า H_o มีค่าอยู่ระหว่าง 0.750-0.893, ค่า H_e มีค่าอยู่ระหว่าง 0.715-0.827 Jaisuk *et al.* (2015) ปลาเลียหิน 5 แหล่งในพื้นที่ อ.บ่อเกลือ จ.น่าน จากไมโครแซทเทลไลท์จำนวน 5 ตำแหน่ง พบว่าปลาเลียหินมีค่าเฉลี่ย A มีค่าอยู่ระหว่าง 5.80-8.00 อัลลีล, ค่า A_c มีค่าอยู่ระหว่าง

3.60-4.65, ค่า A_r มีค่าอยู่ระหว่าง 6.70-8.16, ค่า H_o มีค่าอยู่ระหว่าง 0.622-0.720 และค่า H_e มีค่าอยู่ระหว่าง 0.694-0.773 และ Jaisuk *et al.* (2014b) ปลาเลียหินจากบริเวณลำน้ำคอน อ.เขียงกลาง จ.น่าน จากไมโครแซทเทลไลท์ 5 ตำแหน่ง พบมีค่า A มีค่าอยู่ระหว่าง 6.00-10.40, ค่า A_r มีค่าอยู่ระหว่าง 5.90-8.66, ค่า A_e มีค่าอยู่ระหว่าง 3.91-6.66, ค่า H_o มีค่าอยู่ระหว่าง 0.56-0.67, ค่า H_e มีค่าอยู่ระหว่าง 0.73-0.83

การพบความหลากหลายทางพันธุกรรม มีจำนวน N_e ขนาดใหญ่และไม่มีปรากฏการณ์คอขวด

ในกลุ่มตัวอย่างปลาเลียหินในลำน้ำย่างแต่ด้วยข้อสังเกตที่พบขนาดตัวปลาที่แม้จะเป็นตัวเต็มวัยแต่มีขนาดค่อนข้างเล็ก ดังนั้นในกรณีของการนำพ่อแม่พันธุ์ในลำน้ำย่างไปวางแผนเพาะพันธุ์เพื่อปล่อยลูกพันธุ์คืนสู่แหล่งน้ำธรรมชาตินั้นอาจต้องพิจารณาข้อมูลทางพันธุกรรมร่วมกับลักษณะทางคุณภาพและทางปริมาณที่เหมาะสมต่อการเป็นพ่อแม่พันธุ์เพื่องานฟื้นฟูประชากร

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยและค่า SD ของความหลากหลายทางพันธุกรรมของไมโครแซทเทลไลท์ 5 ตำแหน่ง ในกลุ่มตัวอย่างปลาเลียหินในลำน้ำย่าง

กลุ่มตัวอย่าง		น้ำตกศิลาเพชร	บ้านดอนมูล	บ้านยู	ค่าเฉลี่ยรวม
ค่าเฉลี่ย	N	41.80±0.20	31.20±0.37	25.20±0.37	32.73±8.41
	A	12.60±0.60	12.60±1.40	11.80±1.02	12.33±0.46
	A_e	7.63±0.64	6.77±0.83	7.03±0.69	7.14±0.44
	A_r	11.24±0.95	11.67±3.44	11.69±2.04	11.53±0.25
	H_o	0.70±0.03	0.56±0.05	0.64±0.08	0.63±0.07
	H_e	0.87±0.01	0.84±0.02	0.85±0.02	0.85±0.02
	F_{is}	0.19±0.03	0.33±0.08	0.25±0.09	0.26±0.07

หมายเหตุ จำนวนตัวอย่าง (N) จำนวนอัลลีลต่อตำแหน่ง (A) ค่า effective number of alleles (A_e) ค่า allelic richness (A_r) ค่าเฮเทอโรไซโกซิตีจากการสังเกต (H_o) ค่าเฮเทอโรไซโกซิตีจากการคาดหมาย (H_e) และค่า Fixation index (F_{is})

2. ความแตกต่างทางพันธุกรรมระหว่างประชากร

กลุ่มตัวอย่างปลาเลียหินทั้ง 3 กลุ่มมีความแตกต่างทางพันธุกรรม (ค่า Global $F_{ST} = 0.01189$; AMOVA, $p = 0.01466$) การทดสอบความแปรปรวนทางพันธุกรรม AMOVA พบว่า 1.19 เปอร์เซ็นต์ ของความแปรปรวนเกิดจากความแตกต่างระหว่างประชากร และ 98.81 เปอร์เซ็นต์ ของความแปรปรวนที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างสมาชิกในประชากร สำหรับการทดสอบระยะห่างทาง

พันธุกรรม ของกลุ่มตัวอย่างมีค่าน้อยไปมากดังนี้ 0.130 (บ้านดอนมูล:บ้านยู) 0.139 (น้ำตกศิลาเพชร:บ้านยู) และ 0.241 (น้ำตกศิลาเพชร:บ้านดอนมูล) ผลความต่างระหว่างคู่ของกลุ่มตัวอย่าง 3 แหล่งด้วย pairwise F_{ST} พบกลุ่มตัวอย่างน้ำตกศิลาเพชรมีความแตกต่างทางพันธุกรรมกับกลุ่มตัวอย่างบ้านดอนมูล แต่ไม่ต่างจากกลุ่มตัวอย่างบ้านยู กลุ่มตัวอย่างบ้านดอนมูลและบ้านยูไม่ต่างกัน (ตารางที่ 4) ผลการวิเคราะห์การจัดกลุ่มและการถ่ายเทยีนของกลุ่ม

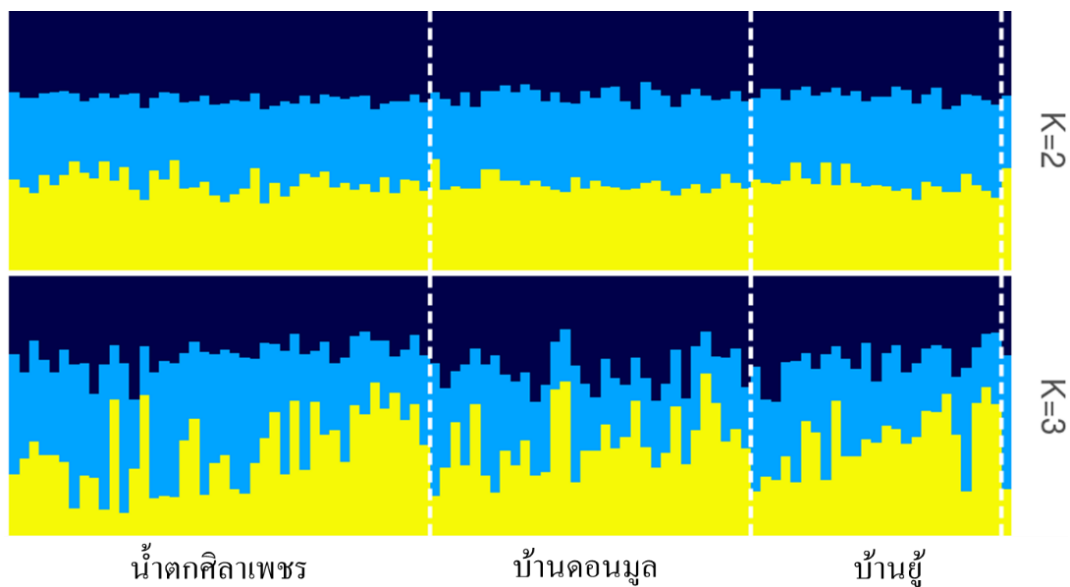
ตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่มพบว่าสมาชิกของแต่ละกลุ่มตัวอย่างมีการปะปนในระดับพันธุกรรมและไม่แยกออกจากกัน แสดงถึงมีการถ่ายยีนระหว่างทั้ง 3 กลุ่ม โดยพิจารณาจากแถบสีแนวตั้งในแต่ละตัวอย่างของแต่ละกลุ่มจะประกอบด้วยพันธุกรรมของทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่างทั้งในการทดสอบการจัดกลุ่มเป็น 2 ($K=2$)

และ 3 ($K=3$) กลุ่ม (ภาพที่ 2) สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างทางพันธุกรรมระหว่างประชากรกับระดับเครือข่ายแม่น้ำ (stream tree) ในกลุ่มตัวอย่างพบมีค่าความสัมพันธ์ $R^2 = 0.728$ แสดงถึงระดับเครือข่ายแม่น้ำมีผลต่อความต่างทางพันธุกรรมในกลุ่มตัวอย่างปลาเลียหินลำน้ำยาง

ตารางที่ 4 ค่าระยะห่างทางพันธุกรรม (ระยะทางระหว่างจุดรวบรวบตัวอย่าง) และค่า pairwise F_{ST} (อักษรตัวหนา)

	ศิลาเพชร	ดอนมูล	ยู
ศิลาเพชร	-	0.02192*	0.00431
ดอนมูล	0.241 (3 กม.)	-	0.00512
ยู	0.139 (15 กม.)	0.130 (12 กม.)	-

หมายเหตุ ค่า pairwise F_{ST} เครื่องหมาย * แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ค่า $p \leq 0.017$ ซึ่งเป็นค่าความน่าจะเป็นที่ปรับสำหรับการใช้ข้อมูลวิเคราะห์ซ้ำหลายครั้ง (multiple tests) ด้วย Bonferroni correction ($0.05/3$ โดยที่ 3 คือ จำนวนคู่เปรียบเทียบ) (Rice, 1989)



ภาพที่ 2 การจัดกลุ่มตัวอย่างและการถ่ายยีน

จากการพบกลุ่มตัวอย่างปลาเลียหินที่ศึกษา นี้มีความแปรปรวนทางพันธุกรรมระหว่างประชากรน้อยและพบการปะปนในระดับพันธุกรรม ในขณะที่ค่าความต่างทางพันธุกรรม (F_{ST}) และระยะห่างทางพันธุกรรมมีค่ามากที่สุดระหว่างกลุ่มตัวอย่างน้ำตก

ศิลาเพชรกับบ้านดอนมูลด้วยระยะทางระหว่างกลุ่มตัวอย่าง 3 กิโลเมตร แต่กลุ่มตัวอย่างน้ำตกศิลาเพชรไม่ต่างจากกลุ่มตัวอย่างบ้านยูซึ่งมีระยะทาง 15 กิโลเมตร และบ้านดอนมูลไม่ต่างจากบ้านยูด้วยระยะทาง 12 กิโลเมตร

ความแตกต่างทางพันธุกรรมระหว่างประชากรเกิดขึ้นได้ด้วยปัจจัยสำคัญ 2 กระบวนการ คือ การขาดโอกาสถ่ายเทยีนระหว่างประชากร (gene flow) และการขาดช่วงทางพันธุกรรม (genetic drift) (Frankham *et al.*, 2010) ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการพบความต่างพันธุกรรมระหว่างน้ำตกศิลาเพชรกับบ้านคอนมูลจากสภาพพื้นที่บริเวณน้ำตกศิลาเพชรมีฝ่ายจำนวน 3 ฝ่าย ประกอบด้วยฝ่ายน้ำข้างมีความสูง 10 เมตรและอีก 2 ฝ่ายเป็นฝ่ายน้ำล้นสูง 3-5 เมตร ที่อาจเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดโอกาสการถ่ายเทยีนระหว่างประชากร ดังการศึกษาอื่นๆ ก่อนหน้านี้ที่พบว่าปลาเลียหินพื้นที่อำเภอเบตง จังหวัดน่าน กลุ่มตัวอย่างเหนือและใต้ น้ำตกสะปันที่มีความสูง 10 เมตรมีระยะห่างทางพันธุกรรม 0.238 (Jaisuk and Senanan 2018a) เช่นเดียวกับ Yamamoto *et al.* (2004) ปลา White-spotted charr (*S. leucomanis*) ในแม่น้ำบริเวณ Southern Hokkaido, ประเทศญี่ปุ่น และ Leclerc *et al.* (2008) ปลา *P. flavescens* ใน Saint Lawrence River, ประเทศแคนาดา ทั้งนี้หากพิจารณาประกอบกับการพบการปะปนทางพันธุกรรมในระดับแต่ละตัวอย่าง (ภาพที่ 2) อาจกล่าวได้ว่าประชากรปลาเลียหินในลำน้ำข้างยังไม่แยกออกจากกันในระดับพันธุกรรม

สำหรับการพบระยะห่างทางพันธุกรรมระหว่างกลุ่มตัวอย่างน้ำตกศิลาเพชรและบ้านผู้ที่มีค่าน้อยและความต่างทางพันธุกรรมไม่มีนัยสำคัญทางสถิติด้วยระยะทางระหว่างน้ำตกศิลาเพชรถึงบ้านผู้มีระยะทาง 15 กิโลเมตรและตลอดระยะลำน้ำมีฝ่ายน้ำล้นความสูง 3-5 เมตร จำนวน 6 ฝ่าย อาจเป็นผลมาจากการเพาะพันธุ์และปล่อยลูกพันธุ์คืนสู่ธรรมชาติเพื่อการอนุรักษ์และฟื้นฟูประชากรในลำน้ำก่อน ช่วง พ.ศ. 2556-2557 และ พ.ศ. 2559-2560 ได้นำพ่อแม่พันธุ์ปลาเลียหินจากน้ำตกศิลาเพชรไปเพาะพันธุ์

รวมจำนวนลูกพันธุ์ที่เกิดจากพ่อแม่พันธุ์ จากบริเวณน้ำตกศิลาเพชรที่ปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติบริเวณลำน้ำก่อนมีประมาณ 500,000 ตัว ซึ่งลำน้ำก่อนเป็นลำน้ำสาขาหนึ่งของแม่น้ำน่านที่อยู่เหนือลำน้ำข้างและจตุรบรรพตตัวอย่างบริเวณบ้านผู้กับแม่น้ำน่านมีระยะทาง 8 กิโลเมตรซึ่งเมื่อพิจารณาโอกาสการแพร่กระจายของปลาเลียหินในฤดูน้ำหลากจึงมีโอกาสที่ปลาเลียหินจากลำน้ำก่อนแพร่กระจายมายังแม่น้ำน่านและแพร่กระจายมาถึงลำน้ำข้างบริเวณบ้านผู้ ดังที่พบได้จากการศึกษาของ Pe'rez-Figueroa *et al.* (2015) ปลา Three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus*) ในลุ่มน้ำ Northwest Spain พบว่าปลาในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อกับลำน้ำอื่น ๆ มีการปะปนทางพันธุกรรมมากกว่าบริเวณที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับลำน้ำอื่น เช่นเดียวกับ Jaisuk and Senanan (2018b) พบปลาเลียหินจากลำน้ำมิดและลำน้ำก่อนมีค่า F_{ST} เท่ากับ 0.003 ด้วยระยะทาง 22.48 กิโลเมตร

สรุป

ความแปรปรวนทางพันธุกรรมที่พบได้ในกลุ่มตัวอย่างปลาเลียหินในลำน้ำข้างที่รวบรวมมาจาก 3 กลุ่มตัวอย่างได้แก่ น้ำตกศิลาเพชร บ้านคอนมูล และบ้านผู้ จากเครื่องหมายพันธุกรรมไมโครแซทเทลไลท์ สรุปได้ดังนี้ ประชากรปลาเลียหินในลำน้ำข้างมีความหลากหลายทางพันธุกรรมสูง คาดว่าเป็นผลมาจากชีววิทยาของปลาเลียหินที่มีฤดูผสมพันธุ์วางไข่ในช่วงฤดูฝนซึ่งมีการไหลหลากของน้ำในลำน้ำข้างเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายของพ่อแม่พันธุ์และไข่ปลาที่เป็นไข่ครึ่งจมครึ่งลอยจึงถูกพัดพาให้กระจายไปทั่วลำน้ำข้าง ถึงแม้ปลาเลียหินในลำน้ำข้างมีความหลากหลายทางพันธุกรรมเหมาะสมต่อการเป็นแหล่งพันธุกรรมแต่ทั้งนี้อาจต้องพิจารณาความเหมาะสมเนื่องจากปลาเลียหินในลำน้ำข้าง

โดยเฉพาะบริเวณน้ำตกศิลาเพชรมีขนาดตัวที่เล็กเมื่อเทียบกับลำน้ำอื่นๆ สำหรับการพบความแตกต่างทางพันธุกรรมระหว่างประชากรพบได้ในกลุ่มตัวอย่างจากน้ำตกศิลาเพชรกับบ้านดอนมูลคาดว่าอาจเป็นผลมาจากการฝายทำให้ประชากรถูกแบ่งออกจากกันจากผลการศึกษานี้เป็นข้อมูลสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของชีววิทยาของปลาและจำนวนประชากรมีผลต่อความหลากหลายทางพันธุกรรมภายในประชากร นอกจากนี้การพบสิ่งกีดขวางและระบบเครือข่ายลำน้ำมีผลต่อความต่างทางพันธุกรรมในกลุ่มตัวอย่างแสดงถึงข้อควรพิจารณาในการดำเนินงานที่มีผลต่อสภาพพื้นที่แหล่งน้ำอาจจะส่งผลถึงสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณเพื่อการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติอุปกรณ์ และครุภัณฑ์ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา และภาควิชาวชิรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เอกสารอ้างอิง

- Aljanabi, S.M. and Martinez, I. 1997. Universal and rapid salt-extraction of high quality genomic DNA for PCR-based techniques. **Nucleic Acids Research** 25(2): 4692-4693.
- Barson, N.J., Cable, J. and Van Oosterhout, C. 2009. Population genetic analysis of microsatellite variation of guppies (*Poecilia reticulata*) in Trinidad and Tobago: evidence for a dynamic source-sink metapopulation structure, founder events and population bottlenecks. **Evolution Biology** 22: 485-497.
- Do, C., Waples, R.S., Peel, D., Macbeth, G.M., Tillett, B.J. and Ovenden, J.R. 2014. NeEstimator v2: reimplementation of software for the estimation of contemporary effective population size (N_e) from genetic data. **Molecular Ecology Resources** 14: 209-214.
- Excoffier, L., Laval, G., Schneider, S. 2005. Arlequin (version 3.0): an integrated software package for population genetics data analysis. **Evolutionary Bioinformatics Online** 1: 47-50.
- Francis, R.M. 2017. POPHELPER: an R package and web app to analyse and visualize population structure. **Molecular Ecology Resources** 17(1): 27-32.
- Frankham, R., Ballou, J.D. and Briscoe, D.A. 2010. **Introduction to conservation genetics**. Cambridge, United Kingdom.
- Goudet, J. 2003. **FSTAT (version 2.9.4), a program (for Windows 95 and above) to estimate and test population genetics parameters**. FSTAT. Available Source: <http://WWW.unil.ch/popgen/softwares/fstat.htm>, January 14, 2021.
- Guo, S.W. and Thompson, E.A. 1992. Performing the exact test of Hardy-Weinberg proportions for multiple alleles. **Biometrics** 48: 361-372.
- Hedrick, W.P. 2011. **Genetics of Populations**. Jones and Bartlett Publishers, USA.

- Jaisuk, C., Lothongkum, A., Keereelang, J. and Sriyam, S. 2014a. Development of microsatellite primers for genetic diversity assessment of local fishes in Nan river. **Rajabhat journal of Science, Humanities & Social Sciences** 15(2): 12-22. (in Thai)
- Jaisuk, C., Lothongkum, A. and Wongsongkram, M. 2014b. **Research Report on Evaluation of genetic variation of wild population *Garra cambodgiensis* in Kon River (tributary of Nan River) using microsatellite DNA markers for management and conservation.** Rajamangala university of technology Lanna, Nan. (in Thai)
- Jaisuk, C., Lothongkum, A. and Sriyam, S. 2015. **Research Report on Genetic diversity of wild population Stone lapping minnow (*Garra cambodgiensis*) in the Nan River watershed using microsatellite DNA markers.** Rajamangala university of technology Lanna, Nan. (in Thai)
- Jaisuk, C. and Senanan, W. 2018a. Effects of physical barriers on genetic variation of populations of Stonelapping minnow, *Garra cambodgiensis* (Tirant, 1883), in Wa River, Nan Province, Thailand. **Journal of fisheries and environment** 42: 53-65.
- Jaisuk, C. and Senanan, W. 2018b. Effects of landscape features on population genetic variation of a tropical stream fish, Stone lapping minnow, *Garra cambodgiensis*, in the upper Nan River drainage basin, northern Thailand. **PeerJ** 6: 1-29.
- Kalinowski, S.T., Meeuwig, M.H., Narum, S.R. and Taper, M.L. 2008. Stream trees: a statistical method for mapping genetic differences between populations of freshwater organisms to the sections of streams that connect them. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences** 65: 2752-2760.
- Kirchner, S., Weinmaier, T., Rattei, T., Sattmann, H. and Kruckenhauser, L. 2014. Characterization of 19 new microsatellite loci for the Omani barb *Garra barreimiae* from 454 sequences. **BMC Research Notes** 7: 1-6.
- Leclerc, E., Mailhot, Y., Mingelbier, M. and Bernatchez, L. 2008. The landscape genetics of yellow perch (*Perca flavescens*) in a large fluvial ecosystem. **Molecular Ecology** 17: 1702-1717.
- Neville, M.H., Dunham, J., Rosenberger, A., Umek, A. and Nelson, B. 2009. Influences of wildfire, Habitat Size, and Connectivity on Trout in Headwater Streams Revealed by Patterns of Genetic Diversity. **Transactions of the American Fisheries Society** 138: 1314-1327.
- Peakall, R. and Smouse, P.E. 2006. GENALEX 6: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research. **Molecular Ecology Notes** 6: 288-295.
- Pe´rez-Figueroa, A., Ferna´ndez, C., Amaro, R., Hermida, M. and San Miguel, E. 2015. Population structure and effective/census population size ratio in threatened three-

- spined stickleback populations from an isolated river basin in northwest Spain. **Genetica** 143: 403-411.
- Piry, S., Luikart, G. and Cornuet, J.M. 1999. BOTTLENECK: a computer program for detecting recent reductions in the effective population size using allele frequency data. **Journal of Heredity** 90: 502-503.
- Pritchard, J.K., Stephens, M. and Donnelly, P. 2000. Inference of Population Structure Using Multilocus Genotype Data. **Genetics** 155: 945-959.
- Rice, W.R. 1989. Analyzing tables of statistical test. **Evolution** 43(1): 223-225.
- Rousset, F. 2008. GENEPOP'007: a complete re-implementation of the GENEPOP software for Windows and Linux. **Molecular Ecology Resources** 8: 103-106.
- Su, W.L., Liu, Z.Z., Wang, T.C., Zhen, Z., Liu, Y.A., Tang, Q.W. and Yang, Q.J. 2013. Isolation and characterization of polymorphic microsatellite markers in the fish *Garra orientalis* (Oriental sucking barb). **Conservation Genetics Resource** 5: 231-233.
- Yamamoto, S., Morita, K., Koizumi, I. and Maekawa, K. 2004. Genetic differentiation of white-spotted charr (*Salvelinus leucomaenis*) populations after habitat fragmentation: Spatial-temporal changes in gene frequencies. **Conservation Genetics** 5: 529-538.

ความเสื่อมสภาพและปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อแม่น้ำลิ จังหวัดลำพูน จากการใช้ประโยชน์เพื่อการเกษตรของเกษตรกร

Deterioration and Factors Affecting Li River, Lumphun Province from Its Utilization for Agriculture

สามารถ ใจเตี้ย *

Samart Jaitae *

Received: 12 March 2020, Revised: 7 May 2020, Accepted: 2 June 2020

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ความเสื่อมสภาพของแม่น้ำลิ และวิเคราะห์ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตร หน่วยตัวอย่างเป็นเกษตรกรในพื้นที่ลุ่มน้ำลิ จำนวน 223 ครัวเรือน รวบรวมข้อมูลโดยการวิจัยเอกสาร ประกอบด้วย เอกสารที่นำเสนอข้อมูลปฐมภูมิและทุติยภูมิ รวมถึงการใช้แบบสอบถาม และการสัมภาษณ์แบบไม่เป็นทางการ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการวิเคราะห์หาคะบวนทัศน์ สถิติเชิงพรรณนา และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำในแม่น้ำลิมีแนวโน้มลดลงในช่วงเดือนพฤษภาคม - พฤษภาคม ส่วนคุณภาพน้ำที่เสื่อมโทรมสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการปล่อยน้ำเสียจากชุมชน โดยบริเวณกลางน้ำเริ่มปรากฏการปนเปื้อนของแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด (TCB) กลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม (FCB) และโลหะหนักบางชนิดสูงกว่ามาตรฐานกำหนด ทั้งนี้เกษตรกรมีการใช้ประโยชน์จากแม่น้ำลิเพื่อการเกษตรโดยภาพรวมอยู่ในระดับน้อย (ค่าเฉลี่ย 1.95) และการมีส่วนร่วมในกิจกรรมการจัดการทรัพยากรน้ำของเกษตรกรมีความสัมพันธ์กับระดับการใช้ประโยชน์จากแม่น้ำลิเพื่อการเกษตรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 (p - value = < 0.0001, r = .598) ทั้งนี้เกษตรกรเสนอแนะเชิงนโยบายเพื่อการแก้ไขปัญหาความเสื่อมสภาพของแม่น้ำลิโดยบูรณาการกิจกรรมภายใต้แนวคิดนิเวศวัฒนธรรมที่ยังคงมีการปฏิบัติของประชาชนในพื้นที่ร่วมกับการสร้างเครือข่ายชุมชน

คำสำคัญ: ความเสื่อมสภาพแม่น้ำ, การใช้ประโยชน์, การเกษตร, ลุ่มน้ำลิ

ABSTRACT

The aim of this research was to synthesize deterioration of Li river and analyze factors related to Li river utilization for agricultural purposes. Sample size was 232 households. Data was collected by documentary analysis including primary and secondary documents reviews. In addition, questionnaires and non-structured interviews were executed. Data was analyzed by thematic analysis, descriptive statistics, content analysis, and multiple linear regression analysis. The results showed that the amount of water in the Li river tended to decrease during the November to June. Water quality deteriorates were mainly caused by the release of wastewater from the community. In the middle of the river, the contamination of total coliform bacteria (TCB), fecal coliforms bacteria (FCB) and heavy metals were found. Agricultural use of water from the river was at a low level ($\bar{X} = 1.95$). The participation of farmers in water resource management activities had significant positive correlations with Li river utilization of farmers (p -value = < 0.0001 , $r = .598$). The farmers made policy recommendations to solve the degenerative problems of the river that there should integrate the activities under the concept of cultural ecology that is being practiced in the community with the creation of community networks.

Key words: river deterioration, utilization, farmer, Li watershed

บทนำ

ระบบแม่น้ำมีอิทธิพลทั้งทางตรงทางอ้อมต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และการปรับเปลี่ยนสถานะแวดล้อมทางกายภาพ รวมถึงการตั้งถิ่นฐานของมนุษย์ ทั้งนี้มนุษย์ได้ใช้ประโยชน์จากแม่น้ำทั้งทางตรงและทางอ้อม (Juergen, 2011) แต่ในสถานการณ์ปัจจุบันแม่น้ำทั่วโลกกำลังเผชิญกับปัญหาความเสื่อมสภาพ ทั้งมลพิษทางน้ำ ภาวะอุทกภัยจากน้ำในแม่น้ำล้นตลิ่ง และปริมาณน้ำที่ลดลงในช่วงฤดูแล้ง ดังเช่นแม่น้ำยูเฟรติสในตะวันออกกลางที่เผชิญปัญหาการปนเปื้อนของสารพิษในแม่น้ำและปริมาณน้ำลดลง ซึ่งปรากฏการณ์นี้ส่งผลกระทบต่อระบบชลประทานเพื่อการเกษตร และการใช้น้ำเพื่อการอุตสาหกรรม (Al-Bahrani, 2014) สอดคล้องกับแม่น้ำโมเลกุลโกลา (Malekhu Khola) ตอนกลางของประเทศเนปาลที่เกิดความเสื่อมสภาพจากปริมาณตะกอนและการ

ปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในแม่น้ำที่เพิ่มขึ้นจากการทำเหมืองแร่ (Khanal, 2015) ในส่วนของประเทศไทย กรมควบคุมมลพิษได้รายงานความเสื่อมสภาพของแม่น้ำ โดยเฉพาะคุณภาพน้ำในแม่น้ำสายหลัก 59 แม่น้ำ และแหล่งน้ำนิ่ง 6 แห่ง มีแนวโน้มคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์เสื่อมโทรมลดลง แต่ในขณะเดียวกันแม่น้ำที่อยู่ในเกณฑ์ดีก็ลดลงด้วย โดยภาคกลางมีแหล่งน้ำที่เสื่อมสภาพมากที่สุด โดยสาเหตุหลักมาจากน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดที่ปล่อยลงสู่แม่น้ำโดยตรง (Pollution Control Department, 2018a) เช่นเดียวกับแม่น้ำลี้ อันเป็นแม่น้ำสายหลักสายหนึ่งในจังหวัดลำพูน ประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณลุ่มน้ำลี้ซึ่งมีชาวเขาเผ่ากะเหรี่ยงใช้ประโยชน์ตอนต้น (เขตอำเภอทุ่งหัวช้าง) ของแม่น้ำเพื่อการอุปโภคและการเกษตร ส่วนตอนกลาง (เขตอำเภอลี้) และตอนท้าย (เขตอำเภอบ้านโฮ่งและอำเภอเวียงหนองล่อง) เป็นกลุ่มคนพื้นเมืองใช้ประโยชน์ด้านอุปโภค

บริโภคและการเกษตร และยังมีการใช้น้ำในแม่น้ำลี้เป็นแหล่งน้ำดิบผลิตน้ำประปาโดยการประปาส่วนภูมิภาคสาขาบ้านโฮ้ง ซึ่งมีกำลังการผลิต 2,400 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในส่วนของการใช้น้ำเพื่อการเกษตรมีการใช้น้ำเพื่อการทำสวนลำไยและมะม่วง การปลูกข้าว หอมแดง สภาพปัจจุบันพบว่า แม่น้ำกำลังเผชิญปัญหาความเสื่อมโทรมทั้งทางกายภาพและชีวภาพ อันเกิดจากการชะล้างสารเคมีทางการเกษตร การทิ้งขยะและสิ่งปฏิกูลลงในแม่น้ำของประชาชน รวมถึงการบุกรุกพื้นที่ริมตลิ่งเพื่อการอยู่อาศัยและการเกษตร แม่น้ำลี้ยังถูกจัดให้เป็นแม่น้ำที่เสี่ยงต่อการเกิดมลพิษทางน้ำระดับสูงของภาคเหนือ (Ping River Basin Committee, 2011; Social Research Institute, 2017) สอดคล้องกับรายงานการศึกษาที่พบว่า ความเสื่อมสภาพของคุณภาพน้ำในแม่น้ำลี้มีแนวโน้มรุนแรงเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะช่วงเดือนมีนาคม - พฤษภาคม (ช่วงฤดูร้อน) ในบางช่วงของแม่น้ำที่ไหลผ่านชุมชนหนาแน่น น้ำจะมีสีขุ่น สัตว์น้ำที่เป็นอาหารสายพันธุ์ท้องถิ่นที่เคยมีจำนวนมากได้หายไปจากพื้นที่ ส่งผลต่อการแสวงหาอาหารจากธรรมชาติที่หาได้น้อยลง นอกจากนี้ความเสื่อมสภาพของคุณภาพน้ำในแม่น้ำลี้ยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อภาวะจิตใจของประชาชนทั้งความเครียด ความกังวล และความกลัวต่อการที่จะไม่สามารถใช้ประโยชน์แม่น้ำลี้ได้อย่างเต็มศักยภาพ (Jaitae, 2019) อีกทั้งสภาพแม่น้ำยังมีการฟุ้งกระจายของตะกอนท้องน้ำจากการคูทรายซึ่งเป็นสาเหตุของตลิ่งพัง และท้องน้ำตื้นเขินโดยในฤดูแล้งน้ำจะเหลือน้อยเฉพาะหน้าฝายทดน้ำเท่านั้น ในพื้นที่ลุ่มน้ำลี้ยังพบว่า โครงการพัฒนาแม่น้ำลี้ได้ก่อให้เกิดความขัดแย้งทางสังคมของประชาชนที่ได้รับผลกระทบจากโครงการพัฒนา เช่น กรณีโครงการสร้างเขื่อนห้วยตึงในพื้นที่ตอนกลางของแม่น้ำลี้ ประชาชนได้รับผลกระทบจากพื้นที่ที่เป็นแหล่งที่อยู่อาศัย พื้นที่ทำกิน และแหล่ง

วัฒนธรรมชุมชนจะหายไป รวมทั้งโครงการขุดลอกลำน้ำลี้ก่อให้เกิดการพังของตลิ่งสร้างความเสียหายต่อสวนมะม่วงและสวนลำไยริมตลิ่งส่งผลกระทบต่อรายได้ของเกษตรกรที่ลดลง (Jaitae, 2018) จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ความเสื่อมสภาพของแม่น้ำลี้ และวิเคราะห์ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตรของเกษตรกร ซึ่งผลจากการศึกษานี้จะส่งผลต่อการเรียนรู้ของเกษตรกรประชาชน ชุมชน และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการพิจารณาถึงแนวทางการสร้างการมีส่วนร่วมเพื่อการอนุรักษ์ พื้นฟู และใช้ประโยชน์แม่น้ำลี้ที่เหมาะสมต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การสังเคราะห์ความเสื่อมสภาพของแม่น้ำลี้ ใช้การศึกษาวิจัยจากเอกสาร (Documentary research) โดยการทบทวนวรรณกรรมแบบเรียงร้อยถ้อยคำ (Narrative review) จากเอกสารที่เกี่ยวข้อง โดย

ขั้นตอนที่ 1 การวางกรอบการวิจัย ตามประเด็นปริมาณน้ำท่าและคุณภาพน้ำ โดยประชากรที่ศึกษา เป็นข้อมูลทุติยภูมิจากเอกสารสาธารณะ (Public document) ซึ่งหมายถึง เอกสารที่เขียนและตีพิมพ์เผยแพร่โดยหน่วยงานภาครัฐและนักวิชาการทั่วไป ดังนี้ ปริมาณน้ำสังเคราะห์จากข้อมูลศูนย์อุทกวิทยาและบริหารน้ำภาคเหนือตอนบน (Upper Northern Region Irrigation Hydrology Center, 2018) ส่วนคุณภาพน้ำสังเคราะห์จากรายงานสถานการณ์สิ่งแวดล้อม ปี พ.ศ. 2560 (Regional Environment Office 1 (Chiang Mai), 2018) และรายงานสถานการณ์สิ่งแวดล้อม ปี พ.ศ. 2561 (Regional Environment Office 1 (Chiang Mai), 2019) และฐานข้อมูลคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดินทั่วประเทศ (IWIS) (Pollution Control Department, 2018b)

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกเอกสาร ดำเนินการตั้งคณะกรรมการเพื่อช่วยในการคัดเลือกเอกสารที่มีความเหมาะสมกับการวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม ผู้เชี่ยวชาญด้านการเกษตร และผู้เชี่ยวชาญด้านทรัพยากรน้ำ โดยมีเกณฑ์สำหรับการคัดเลือกเอกสารมาใช้ในการวิจัย (Mogalakwe, 2006; Scott, 1990) ประกอบด้วย ความจริง ความถูกต้องน่าเชื่อถือ การเป็นตัวแทน และความหมาย

การวิเคราะห์ข้อมูล วิเคราะห์ตีความหมายข้อมูลด้วยวิธีการวิเคราะห์หากระบวนทัศน์ (Thematic analysis) ตามขั้นตอน ดังนี้ อ่านข้อความในเอกสารที่คัดเลือกได้อย่างละเอียด กำหนดรหัส (Coding) ของประเด็นที่สำคัญแบบประโยคต่อประโยคในแต่ละบรรทัด (Line by line) กำหนดกระบวนทัศน์ (Theme) วิเคราะห์กระบวนทัศน์ที่ได้ และตรวจสอบข้อมูลที่วิเคราะห์ได้กับแหล่งข้อมูลเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง (Morse and Field, 1996)

2. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตรของเกษตรกร การศึกษานี้เป็นการศึกษาแบบภาคตัดขวาง ณ จุดเวลาใดเวลาหนึ่ง โดยพื้นที่เป้าหมายเป็นขอบเขตพื้นที่ลุ่มบริหารจัดการแม่ลี้ มีพื้นที่ประมาณ 2,079.65 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นพื้นที่ 1,299,781.25 ไร่ ครอบคลุมพื้นที่ใน 5 อำเภอ 15 ตำบล ของจังหวัดลำพูน ครอบคลุมพื้นที่ใน 5 อำเภอ 15 ตำบล 211 หมู่บ้าน ของจังหวัดลำพูน

2.1 ประชากรที่ศึกษา เป็นครัวเรือนเกษตรกร และผู้มีส่วนได้เสียที่อาศัยอยู่ในครัวเรือนที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มแม่น้ำลี้ ตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2559 - กันยายน พ.ศ. 2560 จำนวน 33,994 ครัวเรือน ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการคำนวณขนาดตัวอย่างจากสูตรของ Daniel (2010) ได้ขนาดตัวอย่าง จำนวน 223 ครัวเรือน การคัดเลือกตัวอย่างใช้วิธีการสุ่มแบบ

หลายชั้น (Multistage random sampling) ทั้งนี้ในการแบ่งชั้นแต่ละชั้นใช้การสุ่มอย่างง่าย (Simple random sampling) โดยชั้นแรกแบ่งพื้นที่เป็นชั้น (Stratum) ในระดับอำเภอสุ่มเลือกมา 2 อำเภอจากทั้งหมด 5 อำเภอโดยการจับฉลาก ชั้นที่สองแบ่งออกเป็นระดับตำบลร้อยละ 30 ของอำเภอ ชั้นที่สามจะแบ่งออกเป็นระดับหมู่บ้านร้อยละ 30 ของแต่ละตำบล และชั้นสุดท้ายแบ่งตามสัดส่วนครัวเรือนที่คำนวณได้ การคัดเลือกครัวเรือนแต่ละหมู่บ้านมาศึกษาผู้วิจัยใช้ตารางเลขสุ่ม (Random number table) ตามสัดส่วนของจำนวนหลังคาเรือนแต่ละหมู่บ้าน ในส่วนของการสัมภาษณ์แบบไม่เป็นทางการคัดเลือกตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจงจากเกษตรกรที่ใช้ประโยชน์แม่น้ำลี้ จำนวน 6 คน

2.2 เครื่องมือการวิจัย เป็นแบบสอบถามและแบบบันทึกการสัมภาษณ์แบบไม่เป็นทางการ ครอบคลุมข้อมูลส่วนบุคคล และการใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตร ข้อคำถามประกอบด้วยการใช้ประโยชน์เพื่อการปลูกพืช การใช้ประโยชน์เพื่อการเลี้ยงสัตว์ และการใช้ประโยชน์เพื่อการสืบสานประเพณี ท้องถิ่นด้านการเกษตร ลักษณะแบบสอบถามเป็นมาตราส่วนประมาณค่า (Rating scale) ตามแบบของ Likert Scale แบบสอบถามแต่ละข้อมีคะแนนตั้งแต่ 1- 5 คะแนน แปลความหมายเป็นค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 1.00 - 5.00 น้อยที่สุด - มากที่สุด (Anderson, 1988) วิเคราะห์ความเชื่อมั่นของเครื่องมือด้วยสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's alpha coefficient) โดยกำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ $\alpha \geq 0.75$ เป็นค่าที่ยอมรับได้ ทั้งนี้แบบสอบถามจากการศึกษานี้ได้ค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.82 (Cronbach, 1951)

2.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้เก็บรวบรวมข้อมูลในการศึกษานี้ประกอบด้วย คณะผู้วิจัยและผู้ช่วยนักวิจัย (นักศึกษาสาขาวิชาสาธารณสุข

ศาสตร์ ชั้นปีที่ 3 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่) ทั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการอบรมชี้แจงรายละเอียดของข้อคำถาม และวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล เพื่อให้มีความเข้าใจตรงกันเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการเก็บรวบรวมข้อมูล ข้อคำถาม และวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล เพื่อให้การดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลไปในทางเดียวกัน

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยวิเคราะห์ข้อมูลโดยมีรายละเอียด ดังนี้ ข้อมูลปัจจัยส่วนบุคคล และการใช้ประโยชน์แม่น้ำลี้ ใช้การวิเคราะห์โดยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และใช้สถิติเชิงอนุมานวิเคราะห์ปัจจัยที่มี

ความสัมพันธ์กับการใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตร โดยการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson's Correlation Coefficient)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ส่วนที่ 1 ความเสื่อมสภาพของแม่น้ำลี้พบว่า ปริมาณน้ำในแม่น้ำลี้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นหลังจากต้องเผชิญปัญหาปริมาณน้ำในแม่น้ำลดลงอย่างมากจากภัยแล้งอย่างรุนแรงในปี พ.ศ. 2558 แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณน้ำเฉลี่ย 5 ปี สถานีตรวจวัด P.76 (แม่น้ำลี้ตอนกลาง) และ สถานีตรวจวัด P. 85 (แม่น้ำลี้ตอนล่าง)

ปี พ.ศ.	P. 76		P. 85	
	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	เฉลี่ย (ลบ.ม.ต่อวินาที)	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	เฉลี่ย (ลบ.ม.ต่อวินาที)
2557	127.27	4.04	182.01	5.77
2558	42.29	1.34	5.32	0.17
2559	224.95	7.13	79.96	2.54
2560	470.25	14.91	298.74	9.47
2561	104.90	3.33	95.19	3.02

แม่น้ำลี้มีความยาวประมาณ 180 กิโลเมตรมีต้นน้ำเกิดจากคอกยสบเปิม อำเภอทุ่งห้วยช้าง จังหวัดลำพูน แล้วไหลลงมาทางใต้จนถึงใกล้อำเภอฝางแล้วไหลวกขึ้นไปทางเหนือ ซึ่งแม่น้ำสายนี้ได้ไหลผ่านอำเภอฝาง และอำเภอบ้านโฮ่งจากนั้นไหลไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือไปบรรจบกับแม่น้ำปิงที่บ้านวังสะแกง อำเภอเวียงหนองล่อง จังหวัดลำพูน ในพื้นที่ลุ่มน้ำลี้มีลำน้ำย่อยที่สำคัญ ได้แก่ ห้วยแม่ผาหมื่น แม่น้ำจ้อง แม่น้ำเทย แม่น้ำหาง ห้วยแม่ตะและ ห้วยแม่หละ ห้วยแม่ลอง และห้วยหยวก จากตาราง

ที่ 1 จะเห็นได้ว่า ปริมาณน้ำในแม่น้ำลี้ลดลงอย่างมากในช่วง ปี พ.ศ. 2558 แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 - 2561 โดยเฉพาะในปี พ.ศ. 2560 ที่ปริมาณน้ำสูงสุดเมื่อเทียบกับปี พ.ศ. อื่นเนื่องจากปริมาณฝนเฉลี่ยของประเทศสูงกว่าค่าปกติถึงร้อยละ 27 โดยช่วงเดือนมกราคมพบปริมาณฝนสูงกว่าค่าปกติในพื้นที่ตอนบนของประเทศไทย ร้อยละ 130 - 600 ส่วนการลดลงของปริมาณน้ำทำที่ไหลมาจากตอนกลางถึงตอนล่าง มาจากในปัจจุบันช่วงกลางแม่น้ำขยายพื้นที่เขตการอยู่อาศัยก่อให้เกิดชุมชน

ขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลต่อความต้องการใช้น้ำเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ส่วนคุณภาพน้ำในแม่น้ำลิในช่วงฤดูน้ำหลากทุกสถานีตรวจวัดจะมีคุณภาพน้ำในเกณฑ์ที่ดีกว่าช่วงฤดูแล้ง ข้อมูลคุณภาพน้ำโดยรวมจากการ

ตรวจวัดคุณภาพน้ำ โดยใช้วิธีการประเมินคุณภาพน้ำจากค่าดัชนีคุณภาพน้ำทั่วไป (WQI) ด้วยการตรวจวิเคราะห์อ้างอิงตามค่าคะแนนรวมของคุณภาพน้ำ 5 พารามิเตอร์ (การคำนวณค่า WQI แบบใหม่) แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณภาพน้ำเฉลี่ย 5 ปี จากฐานข้อมูลคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดินทั่วประเทศ

ปี พ.ศ.	คุณภาพน้ำ	
	ค่า WQI	ระดับคุณภาพ
2557	70	พอใช้
2558	75	ดี
2559	75	ดี
2560	71	ดี
2561	73	ดี

โดยช่วงค่าคะแนน WQI มีเกณฑ์คุณภาพน้ำคือ 0 - 30 เลื่อนโทรมมาก 31 - 60 เลื่อนโทรม 61 - 70 พอใช้ 71 - 90 ดี และ 91 - 100 ดีมาก จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า คุณภาพน้ำโดยรวมเฉลี่ย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558 ถึงปี พ.ศ. 2561 คุณภาพน้ำในแม่น้ำลิมีแนวโน้มอยู่ในเกณฑ์ดี (WQI = 71 - 90)

ทั้งนี้จากการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2560 พบว่า บริเวณกลางน้ำ เริ่มปรากฏการปนเปื้อนของแบคทีเรียกลุ่ม

โคลิฟอร์มทั้งหมด (TCB) และกลุ่มฟิคอลโคลิฟอร์ม (FCB) สูงเกินกว่ามาตรฐานกำหนด แสดงถึงการปนเปื้อนจากอุจจาระของสัตว์เลื้อยคลานสูง เช่น มนุษย์ และยังแสดงถึงความไม่สะอาดและไม่ปลอดภัยในการบริโภคโดยไม่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคก่อน สอดคล้องกับข้อมูลคุณภาพน้ำในแม่น้ำลิจากฐานข้อมูลคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดินทั่วประเทศ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณภาพน้ำในแม่น้ำลิระหว่างเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2560

สถานีตรวจสอบ	พารามิเตอร์					ค่าคะแนนรวม	เกณฑ์คุณภาพน้ำ
	DO	BOD	TCB	FCB	NH ₃		
	mg/l	mg/l	หน่วย	หน่วย	mg/l		
LE 1 สะพานบ้านต้นผึ้ง อำเภอเวียงหนองล่อง	7.4	1.9	7,900	3,300	0.13	63	พอใช้
LE 2 สะพานบ้านทุ่ง ม่าน อำเภอบ้านโฮ่ง	7.5	1.3	3,500	170	0.07	86	ดี

ตารางที่ 3 (ต่อ)

สถานีตรวจสอบ	พารามิเตอร์					ค่าคะแนน	เกณฑ์
	DO	BOD	TCB	FCB	NH ₃	รวม	คุณภาพน้ำ
	mg/l	mg/l	หน่วย	หน่วย	mg/l		
LE 3 สะพานแยกเข้าถึง อำเภอทุ่งหัวช้าง อำเภอ ลี้	7.7	1.0	5,400	1,700	0.19	68	พอใช้
LE 4 สะพานบ้านใหม่ ศิวิไล อำเภอลี้	6.4	1.6	54,000	780	0.32	59	เสื่อมโทรม
มาตรฐานแหล่งน้ำ ประเภท 2	≥6.0	≤1.5	≤5,000	≤1,000	0.50		

สถานีตรวจวัดคุณภาพน้ำ LE 2 (ตอนกลาง) ยังตรวจพบ สารโลหะหนักเกินค่ามาตรฐานทั้ง โครเมียม (Total Cr) มีค่า ND - 1.0260 mg/l ค่ามาตรฐานกำหนดไว้ไม่เกิน ≤ 0.05 mg/l แมงกานีส (Mn) มีค่า 0.093 - 1.6240 mg/l ค่ามาตรฐานกำหนดไว้ไม่เกิน ≤ 1.0 mg/l เป็นต้น ทั้งนี้แม่น้ำลี้ในช่วง สถานีตรวจวัดนี้ไหลผ่านเขตเมืองที่มีประชากรอาศัย อยู่หนาแน่นทำให้เกิดปริมาณน้ำเสียจำนวนมากที่ไม่ ผ่านการบำบัด รวมถึงยังมีพื้นที่การเกษตรที่ยังใช้ สารเคมีการเกษตรเพิ่มขึ้น

ส่วนที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีความ สัมพันธ์ กับการใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตร ของเกษตรกร

ข้อมูลส่วนบุคคล พบว่า เกษตรกรส่วนใหญ่เป็นเพศชาย ร้อยละ 56.7 ระดับการศึกษา ประถมศึกษา ร้อยละ 64.4 อายุเฉลี่ย 49.63 ปี เกษตรกรมีรายได้เฉลี่ยต่อเดือน 9,277.12 บาท มี ภาระหนี้สิน 128,423.08 บาทต่อครัวเรือน จำนวน สมาชิกในครัวเรือนเฉลี่ย 2.18 คน ระยะเวลาที่อาศัย อยู่ในชุมชนเฉลี่ย 40.92 ปี ใช้น้ำเพื่อการดูแลพืชหลัก 2.83 ครั้งต่อเดือน มีส่วนร่วมในกิจกรรมการจัดการ ทรัพยากรน้ำของเกษตรกรโดยรวมระดับปานกลาง (ค่าเฉลี่ย = 2.73) และมีทัศนคติต่อความเสื่อมสภาพ ของแม่น้ำลี้โดยรวมระดับปานกลาง (ค่าเฉลี่ย = 1.99)

ผลการวิเคราะห์การใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อ การเกษตรของเกษตรกร ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตรของเกษตรกร

การใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตรของเกษตรกร	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับการใช้ประโยชน์
การใช้ประโยชน์เพื่อการปลูกพืช	2.95	0.27	ปานกลาง
การใช้ประโยชน์เพื่อการเลี้ยงสัตว์	1.05	0.34	น้อยที่สุด
การใช้ประโยชน์เพื่อการสืบสานประเพณีท้องถิ่นด้าน การเกษตร	1.88	0.81	น้อย
เฉลี่ย	1.95	0.55	น้อย

จากตารางที่ 4 เกษตรกรใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตร โดยเฉลี่ยระดับน้อย (ค่าเฉลี่ย 1.95) โดย ใช้ประโยชน์เพื่อการปลูกพืชระดับปานกลาง (ค่าเฉลี่ย 2.95) ใช้ประโยชน์เพื่อการสืบสานประเพณีท้องถิ่นด้านการเกษตรระดับน้อย (ค่าเฉลี่ย 1.88) และใช้ประโยชน์เพื่อการเลี้ยงสัตว์ ระดับน้อยที่สุด (ค่าเฉลี่ย 1.05) นอกจากนี้ข้อมูลจากการสัมภาษณ์แบบไม่เป็นทางการยังสรุปได้ว่า การใช้ประโยชน์แม่น้ำลี้ในปัจจุบันไม่สามารถตอบสนองความต้องการ

ต้องการการใช้น้ำเพื่อการเกษตรได้อย่างเต็มศักยภาพ โดยเฉพาะความเสื่อมโทรมของฝายทดน้ำที่มีจำนวนมากในแม่น้ำลี้ และคลองส่งน้ำจากฝายทดน้ำที่ถูกถมจากการใช้พื้นที่ดินเพื่อการอยู่อาศัย บางช่วงเวลาเกษตรกรจะเกิดความขัดแย้งจากความต้องการปริมาณน้ำเพื่อการทำสวนลำไยและมะม่วงเพิ่มขึ้น

ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับระดับการใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตรของเกษตรกร ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับระดับการใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตรของเกษตรกร

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (<i>r</i>)	<i>p</i> - value *
อายุเฉลี่ย	-.240	0.114
รายได้เฉลี่ยต่อเดือน	-.047	0.637
ภาระหนี้สินต่อครัวเรือน	.102	0.305
จำนวนสมาชิกในครัวเรือน	.333	0.410
ระยะเวลาการอยู่อาศัยในชุมชนเฉลี่ย	-.074	0.453
จำนวนครั้งการใช้น้ำเพื่อการดูแลพืชหลัก	-.028	0.776
การมีส่วนร่วมในกิจกรรมการจัดการทรัพยากรน้ำของเกษตรกร	.598	< 0.0001 *
ทัศนคติต่อความเสื่อมสภาพของแม่น้ำลี้	-.032	0.750

* นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

จากตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับระดับการใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตรของเกษตรกร พบว่า การมีส่วนร่วมในกิจกรรมการจัดการทรัพยากรน้ำของเกษตรกร มีความสัมพันธ์ทางบวกในระดับปานกลางกับการใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตรของเกษตรกรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ($r = .598$)

แนวโน้มปริมาณน้ำที่ลดลงในแม่น้ำลี้ได้สะท้อนปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของแม่น้ำลี้จากปริมาณฝนที่ไม่มีความแน่นอน ใน

พื้นที่ลุ่มน้ำลี้ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน - พฤษภาคม มักจะเผชิญกับปัญหาการขาดแคลนน้ำทั้งน้ำในการอุปโภค บริโภค โดยเฉพาะเขตต้นน้ำ ซึ่งเป็นพื้นที่สูง มักจะเกิดปัญหาการบริหารจัดการน้ำ และยังคงเผชิญกับความผันแปรของปริมาณน้ำฝน ซึ่งโดยปกติแต่ละรอบปีฝนจะตก ร้อยละ 80 - 90 จะตกหนักในช่วงเดือนกันยายน (Kijmee, 2008) นอกจากนี้ยังมีโครงการพัฒนาแม่น้ำลี้ของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งการขุดลอกแม่น้ำ การซ่อมแซมฝายทดน้ำ และการสร้างพนังป้องกันการพังทลายของตลิ่งแม่น้ำ

โครงการเหล่านี้ทำให้แม่น้ำเปลี่ยนทิศทางการไหล ทั้งนี้ความขุ่นในฤดูฝนจะมีความขุ่นสูงสุดเนื่องจากการขุดหน้าดินเมื่อฝนตกหนักจะชะหน้าดินจากตลิ่งและพื้นที่การเกษตรลงสู่แม่น้ำลำ รวมถึงการก่อสร้างฝกั้นกั้นน้ำและการสร้างฝายที่ทำให้ลักษณะริมฝั่งมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม (Chumok *et al.*, 2014) ส่วนคุณภาพน้ำที่เริ่มปรากฏการปนเปื้อนของแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด (TCB) และกลุ่มฟิโคลิฟอร์ม (FCB) และโลหะหนักบางชนิดสูงเกินกว่ามาตรฐานกำหนดบริเวณแม่น้ำตอนกลางอาจเป็นไปได้ว่าบริเวณแม่น้ำตอนกลางมีประชาชนอาศัยอยู่หนาแน่นส่งผลให้มีปริมาณน้ำเสียจากการใช้น้ำเพื่อการดำรงชีวิตประจำวันเพิ่มขึ้นโดยน้ำเสียบางส่วนไม่ผ่านการบำบัดหรือผ่านการบำบัดที่ไม่ถูกต้อง รวมถึงยังมีการทิ้งขยะและสิ่งปฏิกูลริมตลิ่งแม่น้ำ ส่วนการใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตรในระดับน้อย อาจเป็นไปได้ว่าปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อการใช้ประโยชน์เพื่อการเกษตร บางส่วนของแม่น้ำมีคุณภาพน้ำเสื่อมโทรม การเข้าถึงการใช้ประโยชน์แม่น้ำลำเข้าถึงได้ยากเนื่องจากการปกคลุมของไม้ร่ายยักษ์และวัชพืชชนิดอื่นๆ ริมตลิ่ง ฝายท่อน้ำไม่สามารถกักเก็บน้ำได้อย่างเต็มศักยภาพเนื่องจากทรุดโทรม และต้นเงินส่งผลให้ไม่มีน้ำส่งผ่านคลองส่งน้ำที่ผ่านพื้นที่เกษตร รวมถึงพื้นที่การเกษตรได้เปลี่ยนจากการปลูกพืชไร่เป็นการปลูกพืชสวน (ลำไยและมะม่วง) ซึ่งกระบวนการดูแลใช้ปริมาณน้ำไม่มากนัก เกษตรกรบางส่วนจึงหันมาใช้น้ำบาดาลทดแทนน้ำจากแม่น้ำลำ เช่นเดียวกับแม่น้ำกวังที่มีปริมาณน้ำน้อยและมีสถานะเสื่อมโทรม เนื่องจากวัชพืชเพิ่มจำนวนมากขึ้น รวมทั้งการปล่อยน้ำเสียจากชุมชนลงสู่ลำน้ำกวัง เกษตรกรไม่สามารถนำน้ำในแม่น้ำกวังมาใช้เนื่องจากปริมาณน้ำแห้งขอด เกษตรกรต้องอาศัยน้ำจากบ่อน้ำบาดาล (Regional Environment Office 1 (Chiang Mai), 2018) ส่วนการ

มีส่วนร่วมในกิจกรรมการจัดการทรัพยากรน้ำของเกษตรกรพบว่าการใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตรได้อย่างมีนัยสำคัญ อาจเป็นไปได้ว่าเกษตรกรเมื่อเผชิญปัญหาการเข้าถึงการใช้ประโยชน์แม่น้ำลำ และเผชิญความเสี่ยงสภาพของแม่น้ำลำที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอาจมีความต้องการเข้ามามีส่วนร่วมในการแก้ไขปัญหาความเสี่ยงสภาพดังกล่าวเพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสม รวมถึงการเสริมแรงจากการดำเนินกิจกรรมการอนุรักษ์และฟื้นฟูแม่น้ำของหน่วยงานภาครัฐ การองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และเครือข่ายชุมชนที่เห็นความสำคัญของแม่น้ำลำและป่าต้นน้ำจึงได้ดำเนินกิจกรรมเชิงนิเวศวัฒนธรรม เช่น การแห่ช้างเผือกและการบวชป่าต้นน้ำอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้แนวทางที่บูรณาการแนวคิดเชิงนิเวศวัฒนธรรมเป็นแนวทางการฟื้นฟูความเสี่ยงสภาพของแม่น้ำลำที่ได้ดำเนินการอย่างต่อเนื่องในหลายประเทศทั่วโลก แนวทางที่ดำเนินการนี้จะส่งผลต่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำ และฟื้นฟูความหลากหลายของสัตว์น้ำและแหล่งที่อยู่อาศัย (Vidhya and Mario, 2015; Steward, 1955) สอดคล้องกับการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในชุมชนที่มุ่งบริหารจัดการน้ำเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ร่วมกันอย่างทั่วถึงเป็นธรรม ไม่ทำลายระบบนิเวศของแม่น้ำ ส่วนใหญ่จะเชื่อมโยงกับความเชื่อเรื่องผีสงเทวดาที่ผูกโยงกับการเกษตรเป็นฐานสร้างแนวทางให้ใช้ประโยชน์แม่น้ำร่วมกัน (Meetum, 2015)

สรุป

ความเสี่ยงสภาพของแม่น้ำลำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งปริมาณน้ำที่ลดลงและคุณภาพน้ำที่เกินเกณฑ์มาตรฐานในบางช่วงเวลา ทั้งนี้ความเสี่ยงสภาพของแม่น้ำลำที่ปรากฏการณ์นี้อาจส่งผลต่อการใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตรของ

เกษตรกรที่อยู่ในระดับน้อย อย่างไรก็ตามปัญหาความเสื่อมสภาพของแม่น้ำก็อาจเป็นแรงเสริมให้เกิดการมีส่วนร่วมในกิจกรรมการจัดการทรัพยากรน้ำของเกษตรกร อันเป็นปัจจัยพยากรณ์การใช้ประโยชน์แม่น้ำเพื่อการเกษตรได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนแนวทางการแก้ไขปัญหาคือความเสื่อมสภาพของแม่น้ำลี้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรบูรณาการกิจกรรมภายใต้แนวคิดนิเวศวัฒนธรรมที่ยังคงมีการปฏิบัติของประชาชนในพื้นที่ร่วมกับการสร้างเครือข่ายชุมชนเพื่อดำเนินกิจกรรมการอนุรักษ์และฟื้นฟูแม่น้ำได้อย่างเหมาะสม

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย

1.1 ข้อมูลปริมาณน้ำและคุณภาพน้ำเป็นข้อเท็จจริงที่ผ่านกระบวนการตรวจสอบด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นการยืนยันสภาพความเสื่อมสภาพของแม่น้ำลี้ที่แท้จริงได้ หน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรประชาสัมพันธ์เพื่อให้ประชาชนในพื้นที่รับทราบอันจะเป็นการสร้างความรู้ ความเข้าใจ และตระหนักถึงปัญหาความเสื่อมสภาพของแม่น้ำที่เป็นปัจจุบัน

1.2 ปัจจัยพยากรณ์การมีส่วนร่วมในกิจกรรมการจัดการทรัพยากรน้ำของเกษตรกร ได้สะท้อนความต้องการเข้ามาเพื่อการแก้ไขปัญหาความเสื่อมสภาพของแม่น้ำลี้ที่เชื่อมโยงกับการประกอบอาชีพของประชาชนส่วนใหญ่ ข้อมูลนี้อาจนำไปใช้เป็นแนวทางเพื่อกำหนดนโยบาย แผนการดำเนินงาน หรือกิจกรรมโครงการของหน่วยงานหรือภาคประชาสังคมได้

2. ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

2.1 ควรดำเนินการศึกษาประเด็นเกี่ยวกับมาตรการป้องกันการปนเปื้อนของแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด (TCB) และกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม

(FCB) และโลหะหนักบางชนิดสูงเกินกว่ามาตรฐานกำหนด โดยอาจจะพัฒนาโครงการการเรียนรู้ชุมชนโดยใช้โรงเรียนเป็นฐาน การพัฒนาสื่อชุมชนเพื่อให้เกิดการรับรู้ข้อมูล รวมถึงรูปแบบการมีส่วนร่วมของชุมชนในการพัฒนานโยบายสาธารณะ

2.2 พัฒนากิจกรรมเชิงนิเวศวัฒนธรรมเพื่อการอนุรักษ์และฟื้นฟูแม่น้ำลี้ เช่น การฟื้นฟูระบบเหมืองฝายการแห่ช้างเผือก และการสืบชะตาแม่น้ำ โดยการบูรณาการร่วมกับการเรียนการสอนในระดับการศึกษาขั้นพื้นฐาน ซึ่งกิจกรรมเหล่านี้จะส่งผลต่อการแสวงหาแนวทางการอนุรักษ์และฟื้นฟูแม่น้ำลี้ภายใต้บริบทที่แท้จริงของกลุ่มน้ำลี้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่งบประมาณแผ่นดินปีงบประมาณ 2560 โดยการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

เอกสารอ้างอิง

- Al-Bahrani, H.S. 2014. Water quality deterioration of the euphrates river before entering Iraqi lands. **Water Pollution XII** 182: 3-14.
- Anderson, L.W. 1988. **Education Research Methodology and Measurement: An International Handbook**. Pergamon, New York.
- Cronbach, L.J. 1951. Coefficient alpha and the Internal structure of tests. **Psychometrika** 16: 297-334.
- Daniel, W.W. 2010. **Biostatistics: Basic Concepts and Methodology for the Health**

- Sciences (9thed.)**. John Wiley & Sons, New York.
- Chumok, P., Kunpradid, T. and Peerapornpisal, Y. 2014. Diversity of macroalgae, Phytoplankton, Zooplankton and Benthic diatoms and utilization water quality bioindicators in Li river, Lamphun province. **Ganesha Journal** 10(2): 81-97. (in Thai)
- Jaitae, S. 2018. Social dimension and Li river utilization. **Environment** 21(4): 36-46. (in Thai)
- Jaitae, S. 2019. Community health impact of degradation water quality and policy recommendation: case study of Li watershed, Lumphun Province. **Disease Control Journal** 44(1): 1-8. (in Thai)
- Juergen, G. 2011. Integrative freshwater ecology and biodiversity conservation. **Ecological Indicators** 11(6): 1507-1516.
- Kijmee, V. 2008. Learning process and potential of community in Li Watershed co-management, Changwat Lamphun. Master's thesis of Science, Chiang Mai University. (in Thai)
- Khanal, J. 2015. Alluvial mining and its impact on deterioration of physical health of Malekhu Khola, Central Nepal. **Bulletin of the Department of Geology** 18: 59-66.
- Mogalakwe, M. 2006. The Use of Documentary Research Methods in Social Research. **African Sociological Review** 10(1): 221-230.
- Meetum, S. 2015. **Local wisdom of community water management**. Available Source: <http://www.orphyia.org/index.php/th/features>, July 1, 2018. (in Thai)
- Morse, J. and Field, P. 1996. **Nursing Research: The Application of Qualitative Approaches**. Chapman and Hall, London.
- Regional Environment Office 1 (Chiang Mai). 2018. **State of Environment Report 2018**. Available Source: file:///C:/Users/User/Downloads/รายงานสถานการณ์สิ่งแวดล้อม 2560.pdf, June 2, 2019. (in Thai)
- Regional Environment Office 1 (Chiang Mai). 2019. **State of Environment Report 2019**. Available Source: file:///C:/Users/User/Downloads/รายงานสถานการณ์สิ่งแวดล้อมปี 2020 ภาพสิ่งแวดล้อม 202562.pdf, May 21, 2020. (in Thai)
- Scott, J. 1990. **A Matter of Record, Documentary Sources in Social Research**. Polity Press, Cambridge.
- Social Research Institute. 2017. **Nature and Environment Plan Project for People: Case study Lamphun Province**. Available Source: http://www.sri.cmu.ac.th/~lamphun_envi/modules.php?name=Content, February 22, 2018. (in Thai)
- Steward, J. 1955. **Theory of culture change**. University of Illinois Press, Chicago.
- Ping River Basin Committee. 2011. **The Ping River Basin's plan water management**. Mimeographed documents. (in Thai)
- Pollution Control Department. 2018a. **Thailand State of Pollution Report 2017**. Available Source: <https://www.onep.go.th/ebook/soe/soereport2017.pdf>, May 21, 2020. (in Thai)

- Pollution Control Department. 2018b. **Inland Water Quality Information System**. Available Source: <http://iwis.pcd.go.th/>, December 19, 2018. (in Thai)
- Upper Northern Region Irrigation Hydrology Center. 2018. **Runoff Data**. Available Source: <http://www.hydro-1.net/>, December 19, 2018. (in Thai)
- Vidhya, C.V. and Mario, S. 2015. Water quality deterioration as a driver for river restoration: A review of case studies from Asia, Europe and North America. **Environmental Earth Sciences** 74: 3145-3158.

การสร้างต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนสำหรับการไล่ความชื้นในอิฐดิบ

ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการเผาด้วยพลังงานชีวมวล

Construction of a Hot Air Control System for Moisture Repellent in Raw Bricks Before Entering the Combustion Process with Biomass

ศุภฤกษ์ การธรรมณี^{1*} รัศมี แสงศิริมงคลยิ่ง² นัฐพงศ์ ส่งเนียม³ และ กฤษดา เสือเอี่ยม⁴

Suppharerk Kathammanee^{1*}, Ratsamee Sangsirimongkolying², Nattapong Songneam³ and Gritsada Sua-iam⁴

Received: 18 January 2020 , Revised: 26 April 2020, Accepted: 29 April 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนสำหรับการไล่ความชื้นในอิฐดิบก่อนนำเข้าสู่กระบวนการเผาด้วยพลังงานชีวมวล โดยทำการออกแบบและสร้างระบบควบคุมลมร้อนสำหรับไล่ความชื้นที่อาศัยการทำงานจากส่วนของชุดกำเนิดลมร้อนประกอบด้วยเตาชีวมวลและตู้ควบคุมลมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยระบบดังกล่าวสามารถนำส่งความร้อนไปยังพัดลมขนาด 1 แรงม้า ความเร็วลม 17 เมตรต่อวินาที เข้าสู่ส่วนต่อมาได้แก่ห้องสะสมความร้อนขนาด $4 \times 9 \times 1.8$ ลูกบาศก์เมตร ซึ่งสามารถถอดประกอบได้ จากนั้นทดสอบการไล่ความชื้นด้วยรูปแบบการจัดเรียงอิฐดิบที่แตกต่างกัน 3 แบบ ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 65 องศาเซลเซียส พบว่า การจัดเรียงอิฐดิบแบบเสาที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง สามารถอบไล่ความชื้นอิฐดิบจำนวน 3,300 ก้อน ให้มีปริมาณความชื้นลดลงไม่น้อยกว่าร้อยละ 4.20 ซึ่งอัตราเฉลี่ยการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนด้วยพลังงานชีวมวลช่วยลดระยะเวลาการไล่ความชื้นในอิฐดิบจากกระบวนการแบบเดิมที่ต้องอาศัยธรรมชาติภายในโรงเรือนอย่างน้อยร้อยละ 30 โดยมีระยะเวลาดำเนินการประมาณ 80 วัน

¹ สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพมหานคร 10220

¹ Technology Management Program, Faculty of Industrial Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok 10220, Thailand.

² สาขาวิชานวัตกรรมและเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพมหานคร 10220

² Innovation and product technology Program, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok 10220, Thailand.

³ สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพมหานคร 10220

³ Computer Science Program, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok 10220, Thailand.

⁴ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร 10800

⁴ Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phranakhon, Bangkok 10800, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): paboyjung_21@hotmail.com

คำสำคัญ: ระบบควบคุมลมร้อน, อิฐดิบ, กระบวนการเผา, ความชื้นในอิฐดิบ

ABSTRACT

This research aims to construct a hot air control system prototype to dry raw bricks before entering the biomass combustion process. The researchers designed and created the system for repelling moisture by using a hot air generator which included a biomass furnace, a hot air suction cabinet which transferring heat to 1 hp 17 w/s fan, and finally a $4 \times 9 \times 1.8 \text{ m.}^3$ heat accumulation room. The system was then tested for expelling moisture with three different types of raw brick arrangements at 40 °C, 50 °C and 65 °C. It was found that the arrangement of raw brick with pillar at 65 °C for 8 hours can reduce moisture of 3,300 bricks by 4.20 percent and the average speed of drying varied according to the rising temperatures. As a result, the hot air control system prototype with biomass energy can reduce the time for expelling moisture from raw brick more efficiently than the original process which used at least 30 percent of natural energy in the building. The return of investment was 80 days.

Key words: hot air moisture system, raw brick, combustion process, moisture content in raw brick

บทนำ

กระทรวงอุตสาหกรรมได้จัดทำแผนยุทธศาสตร์ พ.ศ. 2559 - 2564 และแนวทางในการดำเนินงานที่มุ่งเน้นส่งเสริมพัฒนาศักยภาพของผู้ประกอบการวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม ให้มีความเข้มแข็งและสามารถแข่งขันได้ในตลาดโลก การพัฒนาอุตสาหกรรมนั้นจำเป็นต้องผลักดันให้ภาคการผลิตมีความมั่นคงและยั่งยืน ซึ่งในปัจจุบันอุตสาหกรรมการก่อสร้างถือเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการเติบโตและมีความต้องการใช้วัสดุในงานก่อสร้างในปริมาณที่สูงมาก โดยเฉพาะวัสดุงานก่อสร้างผนังการเลือกใช้อิฐแดงยังมีความจำเป็นสำหรับงานอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เพราะอิฐแดงหาซื้อได้ง่าย มีราคาถูกกว่าอิฐชนิดอื่น และถือเป็นภูมิปัญญาท้องถิ่นที่มีลักษณะรูปแบบของอิฐแดงที่แตกต่างกันไปตามภูมิภาค โดยคุณสมบัติเด่นของอิฐแดงคือ มีความแข็งแรงทนทาน มีเนื้อที่แน่น การดูดซึมน้ำต่ำ เมื่อเทียบกับอิฐบล็อกและอิฐมวลเบา

นอกจากนี้การผลิตอิฐแดงยังคงมีแหล่งผลิตที่กระจายอยู่ภูมิภาคต่างๆ ของประเทศไทย ประกอบกับการขยายตัวทางธุรกิจอสังหาริมทรัพย์อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความต้องการอิฐแดงที่ใช้ในงานก่อสร้างยังคงมีความต้องการอย่างต่อเนื่องในปริมาณมาก ปัจจุบันผู้ประกอบการผลิตอิฐแดงมีอยู่ในประเทศไทยมากกว่า 1,100 โรงงาน ทั้งนี้ในส่วนภาคใต้จะพบมากในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยพบว่ามีจำนวนโรงงานผู้ผลิตอิฐแดงมากถึง 50 โรงงาน ประกอบไปด้วยโรงงานที่มีขนาดกลางและขนาดใหญ่ (Neramit et al., 2015) จากการลงพื้นที่สัมภาษณ์ผู้ประกอบการโรงงานผลิตอิฐแดงในจังหวัดนครศรีธรรมราชเบื้องต้น พบว่าการผลิตอิฐแดงมีขั้นตอน 5 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขั้นตอนที่เรียกว่าอิฐดิบ ประกอบด้วย 1) การเตรียมดินก่อนการขึ้นรูป 2) การการขึ้นรูปอิฐดิบขนาด 8 รู 3) การไล่ความชื้นด้วยไอลมร้อน 4) จัดเรียงอิฐดิบภายในเตาเผาเพื่อทำการอบและเผา ส่วนขั้นตอนสุดท้ายจะ

เรียกว่า อีฐแดง คือ 5) การเผาอีฐดิบในเตาเผาจนสุก ตัวกลายเป็นอีฐแดง ขั้นตอนการไล่ความชื้นในอีฐดิบก่อนนำไปสู่การเผานับว่าเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งขั้นตอนหนึ่งในการผลิตเนื่องจากขั้นตอนการไล่ความชื้นในอีฐดิบจำเป็นจะต้องอาศัยไอร้อนจากธรรมชาติเป็นหลัก ต้องใช้เวลาในการไล่ความชื้นนานไม่สามารถควบคุมได้ตามความต้องการ หากอีฐดิบมีความชื้นที่เหมาะสมก่อนการเผาจะช่วยป้องกันอัตราของความเสียหายหลังจากการเผาได้ แต่หากอีฐดิบยังคงมีความชื้นสูงจะส่งผลต่อการเผา ซึ่งจะเสียเวลาในการอบและเผาอีฐดิบภายในเตาเผาและต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงในการเผามากกว่าปกติ ตลอดจนทำให้จำนวนรอบของการเผาน้อยลง การเผาอีฐดิบให้สุกตัวนั้นเป็นกระบวนการเปลี่ยนสภาพวัตถุดิบไปเป็นเนื้อผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงโดยกระบวนการความร้อนซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ดังนั้นหากอีฐดิบมีความชื้นที่ไม่เหมาะสมหรือสูงมากเกินไป ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของอีฐแดงที่ได้หลังจากการเผาไม่เป็นไปตามที่ต้องการ และก่อให้เกิดความเสียหายต่อการประกอบธุรกิจ

เทคโนโลยีการไล่ความชื้นในผลิตภัณฑ์ได้มีการพัฒนาหลากหลายวิธีเพิ่มมากขึ้น โดยมีการเลือกใช้แหล่งพลังงานที่เหมาะสมต่อพื้นที่และลักษณะผลิตภัณฑ์ของผู้ประกอบการในการเลือกใช้และต้นทุนค่าใช้จ่ายของการผลิต (Sackhow *et al.*, 2012) การไล่ความชื้นในผลิตภัณฑ์นั้นสามารถใช้แหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนได้จากหลากหลายชนิด และสามารถใช้เทคนิคของการไล่ความชื้นได้หลายวิธี เช่น การอบไล่ความชื้นด้วยลมร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Bala and Janjai, 2009) การอบแห้งแบบฟลูอิดเซชัน (Soponronnarit *et al.*, 2006) การเร่งกระบวนการอบไล่ความชื้นด้วยสนามไฟฟ้า (Tirawanichakul *et al.*, 2007) การอบไล่

ความชื้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Tulasidas *et al.*, 1995) และการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานความร้อนจากชีวมวล (Varith *et al.*, 2009) ปัจจุบันพลังงานชีวมวลนับได้ว่าเป็นพลังงานทดแทนจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรมที่น่าสนใจเป็นอย่างมากซึ่งในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราชเป็นพื้นที่ที่มีแหล่งชีวมวลหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานความร้อนได้ เช่น ทะลายปาล์ม น้ำมัน กะลา ปาล์ม กะลามะพร้าว เศษไม้ยางพาราจี่เลื้อยจากไม้ยางพาราและเศษไม้ต่างๆ เป็นต้น (Kongphupha *et al.*, 2016) ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในกระบวนการไล่ความชื้นในอีฐดิบได้อย่างพอเพียง อีกทั้งการใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการอบไล่ความชื้นยังส่งผลให้ปริมาณความชื้นในเนื้อวัสดุมีการเคลื่อนที่ไปยังผิววัสดุและระเหยออกไปจากวัสดุได้อย่างรวดเร็ว (Katinonkun, 2018)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการสร้างต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนด้วยพลังงานชีวมวลที่เหลือทิ้งจากจี่เลื้อยไม้ยางพาราในพื้นที่สำหรับไล่ความชื้นในกระบวนการผลิตอีฐดิบก่อนเข้าสู่เตาเผา เพื่อช่วยลดเวลาในกระบวนการผลิตอีฐแดง ทั้งยังสามารถเพิ่มจำนวนรอบในกระบวนการผลิตอีฐแดงโดยไม่ต้องอาศัยสภาพอากาศในกระบวนการไล่ความชื้นในอีฐดิบ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการในการผลิตอีฐแดง อีกทั้งเป็นการส่งเสริมอนุรักษ์ภูมิปัญญาท้องถิ่นที่เป็นธุรกิจชุมชนการผลิตอีฐแดงในท้องถิ่นให้เป็นธุรกิจที่เข้มแข็งและยั่งยืน

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยการสร้างต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนสำหรับการไล่ความชื้นในอีฐดิบแบบมีส่วนร่วมกับผู้ประกอบการในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและใช้หลักการควบคุมทิศทางลมด้วยการพาความร้อนให้ไหลผ่านวัตถุเพื่อทำการไล่ความชื้น

(Wongthom and Kiatsirirot, 2004) การออกแบบต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนจากพลังงานชีวมวลและหลักการการทำงานของระบบควบคุมลมร้อนสำหรับไล่ความชื้นในอู่คิบนั้น ได้ใช้หลักการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการพาความร้อนโดยการบังคับ (Sukkasem, 2007) ซึ่งผู้วิจัยเลือกการใช้พัดลมเป็นตัวบังคับและควบคุมทิศทางของลมร้อน และมีการพาความร้อนหรือลมร้อนเข้าสู่ห้องสะสมความร้อน ด้วยโบลเวอร์และพัดลมเป่าลมร้อน การติดตั้งพัดลมเพื่อบังคับทิศทางลมทำให้เกิดการกระจายความร้อนภายในอู่คิบนได้ทั่วถึง (Kurusathien, 2011) ส่วนรูปแบบของการไล่ความชื้นสามารถทำได้หลายวิธีในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการบังคับให้ลมร้อนไหลเวียนผ่านผิวของวัสดุอย่างต่อเนื่อง และใช้แหล่งกำเนิดความร้อนของระบบควบคุมลมร้อนจากพลังงานชีวมวลซึ่งได้เชื้อเพลิงมาจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปไม้ยางพาราจากโรงงานอุตสาหกรรมในพื้นที่ใกล้เคียงกับโรงงานผลิตอิฐแดงในจังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งมีปริมาณเหลือทิ้ง 150 กิโลกรัมต่อวัน โดยศึกษาตัวแปรดังนี้

ตัวแปรต้น

1. อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้สำหรับไล่ความชื้นในอู่คิบน 40 50 และ 65 องศาเซลเซียส
2. การจัดเรียงอู่คิบน 3 แบบ คือแบบเสาแบบสลับพื้นปลา และแบบสลับแถวซ้อนทับกันบนแผ่นพาเลต

ตัวแปรตาม

1. ปริมาณความชื้นในอู่คิบนจากค่าเฉลี่ยจำนวน 30 ตัวอย่าง ปริมาณความชื้นในอู่คิบนหลังผ่านการอบไล่ความชื้นไม่น้อยกว่าร้อยละ 4.20 โดยใช้สูตรการคำนวณความชื้นมาตรฐานแห้ง ดังสมการที่ 1

$$M_d = \frac{(w - d) \times 100}{d} \quad (1)$$

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง

w คือ มวลของวัตถุดิบ (kg)

d คือ มวลของวัตถุดิบแห้ง (kg)

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กันในงานวิจัยทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ และค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของร้อยละ (Rattanablu, 2018)

2. ระยะเวลาที่ใช้ในการไล่ความชื้น

3. สมบัติทางกายภาพของอู่คิบนที่ผ่านกระบวนการไล่ความชื้น (สีของอู่คิบน)

การสร้างต้นแบบระบบควบคุมลมร้อน

การออกแบบและสร้างต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนสำหรับการไล่ความชื้นในอู่คิบนดังแสดงในภาพที่ 1 สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญ คือ

A ชุดกำเนิดลมร้อน ประกอบด้วย

A1 คือ เตาพลังงานชีวมวลจำนวน 5 เตา ใช้ขี้เลื่อยปริมาณ 20 กิโลกรัมต่อเตา

A2 คือ ชุดควบคุมลมสำหรับควบคุมลมร้อนและควบคุมทิศทางของลมร้อนส่งผ่านไปยังโบลเวอร์และท่อนำส่งลมร้อน ขึ้นรูปด้วยเหล็กแผ่นขนาดความหนา 5 มิลลิเมตร พร้อมด้วยเหล็กกล่องขนาด 1 นิ้ว $\times$ 2 นิ้ว สำหรับทำขารับน้ำหนักของชุดควบคุมลมร้อน

A3 คือ โบลเวอร์สำหรับควบคุมลมร้อนส่งผ่านไปยังท่อนำส่งลมร้อนไปยังพัดลมเป่าลมร้อน ซึ่งโบลเวอร์มีขนาดของมอเตอร์ 2 แรงม้า (1491.4 วัตต์) มีใบพัดเหล็กจำนวน 8 ใบพัด ให้กำลังลมอยู่ที่ 20 เมตรต่อวินาที

A4 คือ พัดลมเป่าลมร้อนเพื่อทำหน้าที่เป่าลมร้อนเข้าไปยังห้องสะสมความร้อน ให้ลมร้อนสัมผัสกับอู่คิบนที่ถูกจัดเรียงไว้ภายในห้องสะสม

ความร้อน ซึ่งพัฒนามีขนาดของมอเตอร์ 1 แรงม้า (745.7 วัตต์) มีจำนวนใบพัด 20 ใบพัด ให้กำลังลมอยู่ที่ 17 เมตรต่อวินาที

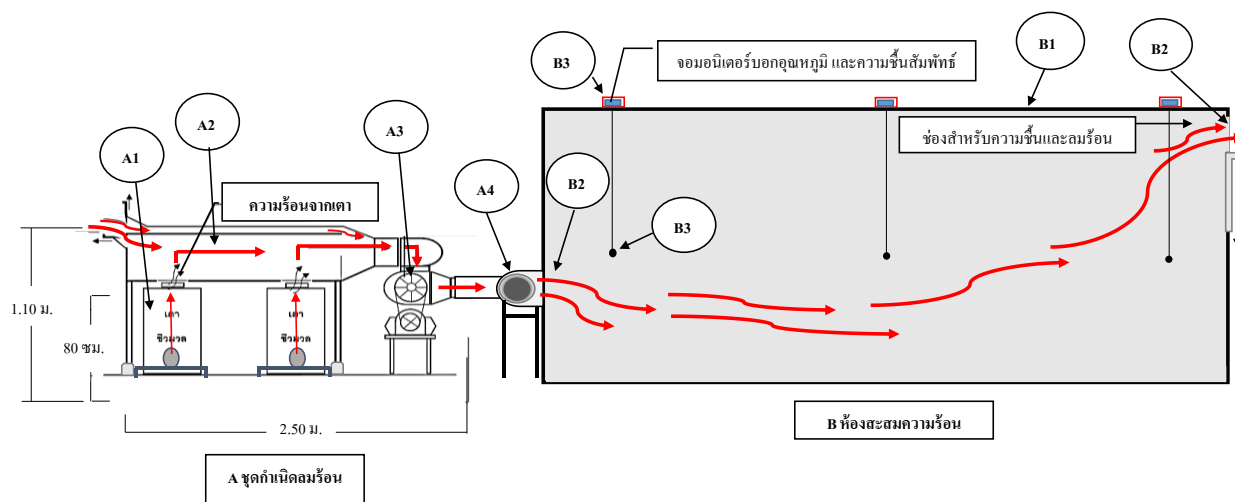
B ห้องสะสมความร้อน ขนาดความกว้าง 4 เมตร ยาว 9 เมตร สูง 1.8 เมตร ปริมาตรโดยรวมของห้องสะสมความร้อน 64.8 ลูกบาศก์เมตร ขึ้นรูปด้วยโครงเหล็กกล่องขนาด 1 นิ้ว $\times$ 2 นิ้ว กรูด้วยแผ่นเมทัลชีทที่มีขนาดความหนา 0.45 มิลลิเมตร ประกอบด้วย

B1 คือ ผนังสำหรับกั้นความร้อนรวมทั้งหมด 5 ด้าน ได้แก่ ผนังกั้นห้องด้านหน้า-หลัง ผนังด้านซ้าย-ขวา (เป็นแบบเลื่อนได้) และผนังด้านบน (เป็นแบบยกประกอบ)

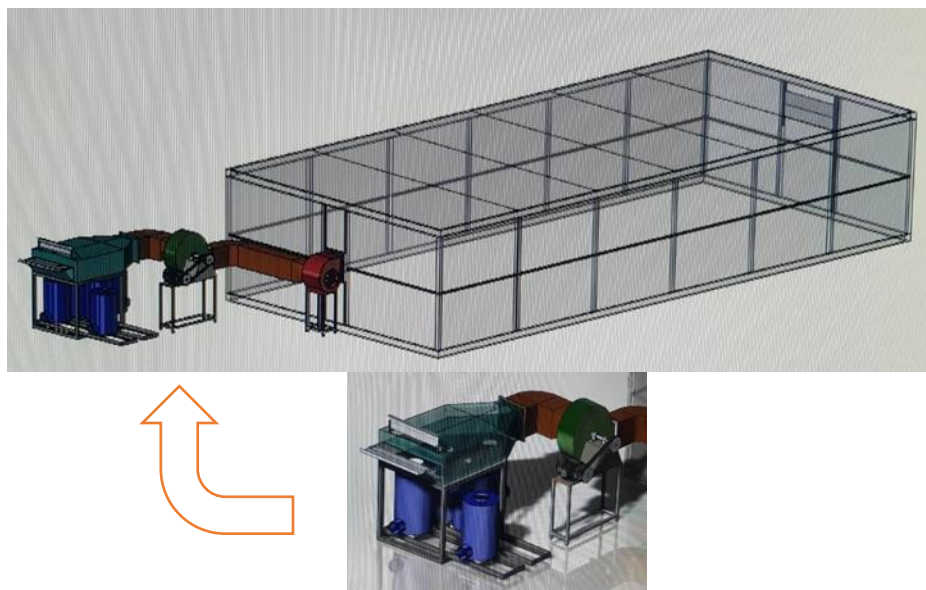
B2 ช่องหน้าต่างหรือตำแหน่งสำหรับลมร้อนเข้าและช่องสำหรับความชื้นและลมร้อน

บางส่วนออกจากห้องสะสมความร้อน (สามารถปรับขยายขนาดได้)

B3 เครื่องวัดอุณหภูมิ และจอมอนิเตอร์ สำหรับบอกอุณหภูมิและปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องสะสมความร้อน จะทำการติดตั้ง 3 จุด คือ หน้าห้อง กลางห้อง และหลังห้อง ซึ่งจะมีหัวเซนเซอร์สำหรับวัดปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องสะสม และแสดงผลมายังหน้าจอมอนิเตอร์เป็นแบบดิจิตอลอยู่ภายนอกห้อง ตัวเครื่องเป็นแบบ 1/16 DIN Temperature PID Controller with 4-20mA Output รุ่น 48VFL13 แสดงผลแบบเรียลไทม์ ลักษณะของแบบชุดกำเนิดลมร้อนและห้องสะสมความร้อน แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 1 ต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนประกอบด้วย A ชุดกำเนิดลมร้อน B ห้องสะสมความร้อน



ภาพที่ 2 แสดงลักษณะแบบชุดกำเนิดลมร้อนและห้องสะสมความร้อน

การสร้างและการประกอบติดตั้งต้นแบบระบบควบคุมลมร้อน ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การสร้างและการประกอบติดตั้งต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนที่โรงงานผลิตอิฐแดง

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการสร้างระบบควบคุมลมร้อนสำหรับไล่ความชื้นในอิฐดิบมีการกำหนดขนาดของพื้นที่ความกว้าง 4 เมตร ยาว 9 เมตร และสูง 1.8 เมตร ทั้งหมด 36 ตารางเมตร เป็นขนาดที่ได้จากขนาดพื้นที่จริงของโรงเรือน 450 ตารางเมตร คิดเป็นอัตราส่วน 1 ต่อ 12.5 ผนังห้องมี 5 ด้านทำด้วยโครงเหล็กกล่องติดแผ่นเมลท์ซีทความหนา 0.45 มิลลิเมตร สามารถกักเก็บความร้อนและทนความร้อนในระดับที่ทำการทดลองได้ต่อเนื่องซึ่งเรียกว่า ห้องสะสมความร้อน และส่วนชุดกำเนิดลมร้อนจะแยกออกมาจากห้อง

สะสมความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับ Rattanabanlue *et al.* (2018) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งเปลือกแก้วด้วยระบบปั๊มลมร้อนจากสนามแม่เหล็กที่ได้ทำการออกแบบตู้อบแห้งซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนโดยความร้อนจากเทคนิคสนามไฟฟ้าร่วมกับชุดปั๊มลมร้อน และตู้อบสำหรับกักเก็บอุณหภูมิและอบผลิตภัณฑ์ จากการทดลองการทำงานของระบบควบคุมลมร้อนเพื่อทดสอบการกักเก็บอุณหภูมิภายในห้องสะสมความร้อนและกำลังลมโดยใช้โบลเวอร์ขนาด 2 แรงม้า ความเร็วลม 20 เมตรต่อวินาที ทำหน้าที่ดูดลมร้อน

จากเตาชีวมวลให้ลมร้อนไหลผ่านไปยังพัดลมขนาด 1 แรงม้า (745.7 วัตต์) ความเร็วลม 17 เมตรต่อวินาที เป่าลมร้อนเข้าสู่ห้องสะสมความร้อน ได้ระยะของ กำลังลมไกลกว่า 10 เมตรโดยไม่มีการจัดเรียงอิฐดิบ ผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่า การใช้พลังงานความร้อนจากเตาชีวมวลจำนวน 2 เตา วัสดุที่ใช้ทำผนัง ของระบบควบคุมลมร้อนสามารถกักเก็บความร้อน ได้ที่อุณหภูมิสูงสุด 46 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และการใช้พลังงานความร้อนจากเตาชีวมวล จำนวน 4 เตา พบว่าระบบควบคุมลมร้อนสามารถกัก เก็บความร้อนได้ที่อุณหภูมิสูงสุด 68 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับ Taikhao and Theekhasub (2016) ที่กล่าวถึงการทำงานของ

เครื่องอบแห้งชนิดพาความร้อนแบบบังคับที่มีการ ควบคุมทิศทางและกำลังลมโดยใช้พัดลมที่มีความเร็ว ลม 0.56-0.94 เมตรต่อวินาที ทำให้ได้อุณหภูมิอยู่ ในช่วง 45-60 องศาเซลเซียส

จากการศึกษารูปแบบการจัดเรียงอิฐดิบเพื่อ ไล่ความชื้นด้วยระบบควบคุมลมร้อนจากพลังงานชีวมวลในพื้นที่ห้องสะสมความร้อนขนาด 36 ตาราง เมตร ซึ่งสามารถจัดเรียงอิฐดิบได้ 3,300 ก้อน โดย จัดเรียงอิฐดิบรูปแบบที่แตกต่างกันจำนวน 3 แบบ ได้แก่ แบบที่ 1 การจัดเรียงแบบเสา แบบที่ 2 การจัดเรียงแบบสลับพื้นปลา และแบบที่ 3 การจัดเรียง แบบสลับแถวซ้อนทับกันบนแผ่นพาเลต ดังแสดงใน ภาพที่ 4



แบบที่ 1



แบบที่ 2



แบบที่ 3

ภาพที่ 4 รูปแบบการจัดเรียงอิฐดิบที่ต่างกัน 3 แบบ

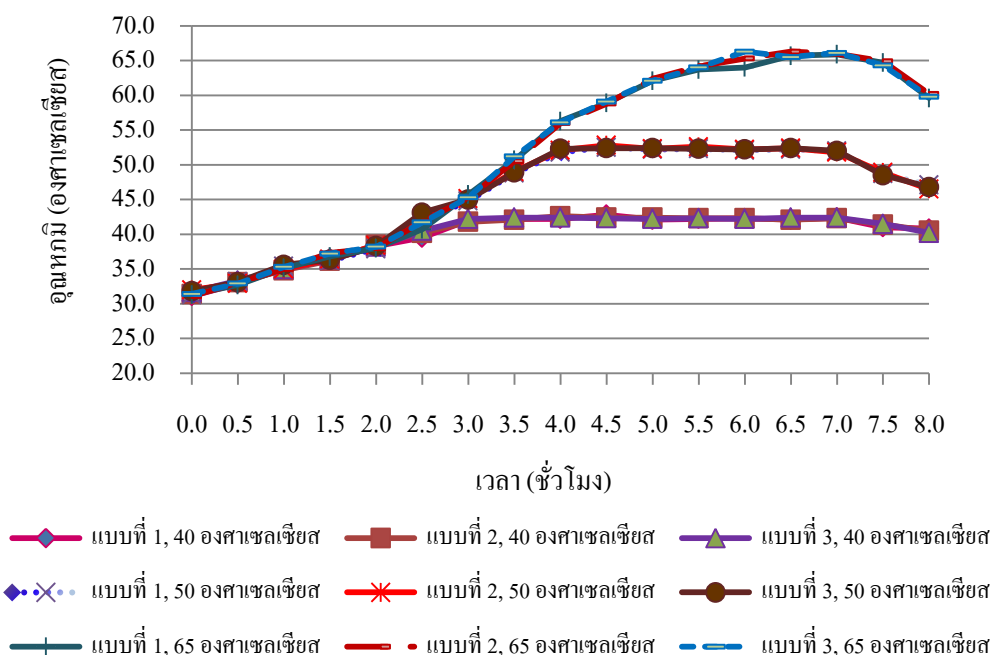
ผลของรูปแบบการจัดเรียงอิฐดิบที่มีต่ออัตราการเพิ่ม อุณหภูมิและระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ

ผลการทดสอบต้นแบบระบบควบคุมลม ร้อนสำหรับไล่ความชื้นในอิฐดิบจำนวน 3,300 ก้อน ที่อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องสะสมความร้อน 40, 50

และ 65 องศาเซลเซียส ด้วยรูปแบบการจัดเรียงอิฐ 3 แบบ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยการวัดอุณหภูมิภายใน ห้องสะสมความร้อน 3 จุด คือหน้าห้อง กลางห้อง และหลังห้องทุก 30 นาที แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ดัง แสดงในภาพที่ 5 เพื่อเปรียบเทียบอัตราการเพิ่ม

อุณหภูมิในการไล่ความชื้นในอิฐดิบที่ 40, 50 และ 65 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ

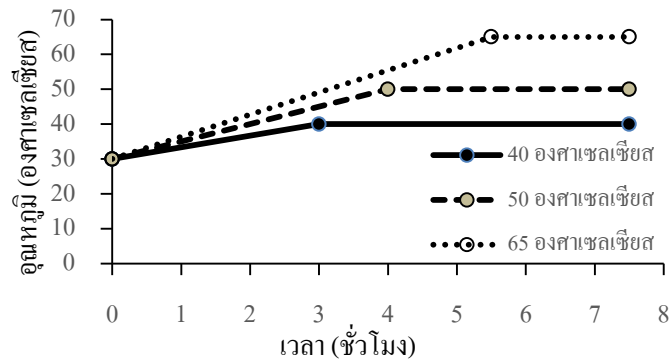
ดังแสดงภาพที่ 6



ภาพที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องสะสมความร้อนกับเวลาในการไล่ความชื้นในอิฐดิบเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่มีรูปแบบการจัดเรียงอิฐดิบที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 5 การไล่ความชื้นในอิฐดิบด้วยรูปแบบการจัดเรียงอิฐ 3 แบบ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 40, 50 และ 65 องศาเซลเซียส พบว่าการจัดเรียงอิฐดิบทั้ง 3 รูปแบบไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องสะสมความร้อน แต่มีผลต่อปริมาณความชื้นในอิฐดิบหลังผ่านการไล่ความชื้นทำให้มีปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอิฐดิบลดลงแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 7

เมื่อเปรียบเทียบการไล่ความชื้นในอิฐดิบด้วยการจัดเรียงอิฐดิบที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 65 องศาเซลเซียส พบว่า กระบวนการไล่ความชื้นด้วยระบบควบคุมลมร้อนจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในห้องสะสมความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดเท่ากับ 3.33, 5.00 และ 6.36 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง และใช้ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิที่กำหนดเท่ากับ 4.5, 3.5 และ 2.0 ชั่วโมง ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 6

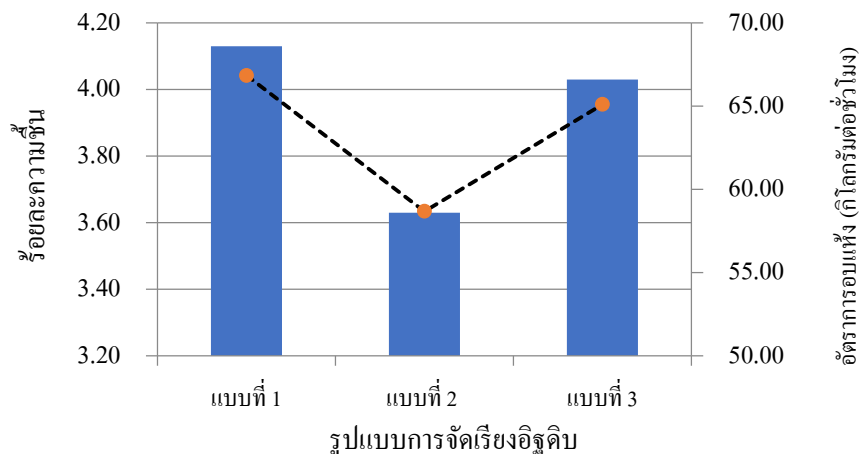


ภาพที่ 6 อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการไล่ความชื้นแต่ละช่วงอุณหภูมิที่กำหนด

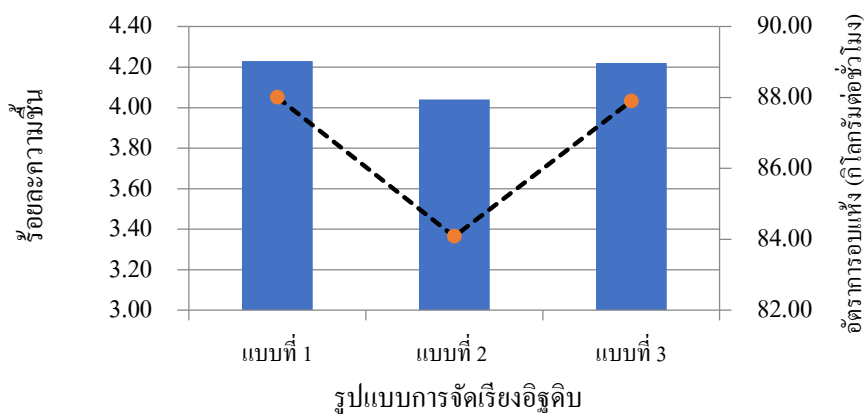
ผลของรูปแบบการจัดเรียงอิฐดิบและอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณความชื้นที่ลดลงและอัตราการอบแห้งในอิฐดิบ

และ 65 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาปริมาณความชื้นที่ลดลงและอัตราการอบแห้งในอิฐดิบ ดังแสดงในภาพที่ 7

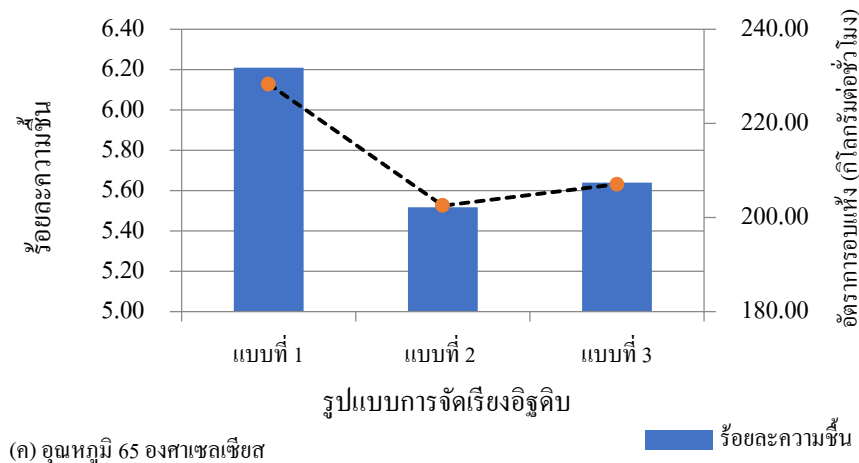
เมื่อนำอิฐดิบที่มีการจัดเรียงแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ทำการไล่ความชื้นที่อุณหภูมิเฉลี่ย 40 50



(ก) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



(ข) อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

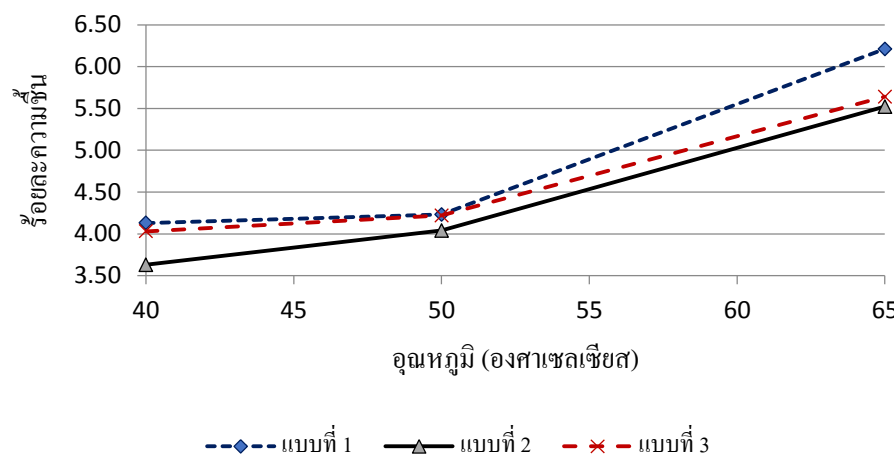


(ก) อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ลดลงและอัตราการอบแห้งกับรูปแบบการจัดเรียงอิฐดิบที่อุณหภูมิ (ก) 40 องศาเซลเซียส (ข) 50 องศาเซลเซียส และ (ค) 65 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 7 พบว่า รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดต่อการไล่ความชื้น คือ รูปแบบที่ 1 คือแบบเสา ซึ่งสามารถไล่ความชื้นออกจากอิฐดิบได้ดีและมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าวิธีการจัดเรียงในรูปแบบที่ 2 และ 3 เนื่องจากเป็นรูปแบบที่ถูกจัดเรียงไว้ในห้องสะสมความร้อนที่มีการไหลผ่านของลมร้อนไปยังอิฐดิบได้ทั่วถึงทุกก้อนมากกว่า การอบไล่ความชื้นอิฐดิบที่อุณหภูมิเฉลี่ย 40 50 และ 65 องศาเซลเซียส อิฐแบบที่ 1 มีความชื้นลดลงร้อยละ 4.13 4.23 และ 6.21 ตามลำดับ และอัตราการอบแห้งเฉลี่ย 66.84 88.00 และ 228.37 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ สอดคล้องกับ Jhider and Bagané (2020) ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิการอบแห้งที่มีต่อกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ดินเหนียวและประสิทธิภาพการแพร่ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้น อีกทั้งปริมาณอิฐดิบที่ได้ในแต่ละรอบพบว่าการจัดเรียงด้วยรูปแบบที่ 1 อิฐดิบจะมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสามารถนำเข้าสู่เตาเผาได้ถึง 3,300 ก้อน ส่วนการจัดเรียงอิฐดิบด้วยรูปแบบที่ 2 และ 3 อิฐดิบยังคงมีความชื้นที่สูงอยู่บางส่วนและไม่สามารถนำเข้าสู่เตาเผาได้จำนวนไม่

น้อยกว่า 1,000 ก้อน ดังนั้นปริมาณความชื้นที่เหมาะสมก่อนนำอิฐดิบเข้าเตาเผานั้นต้องทำการไล่ความชื้นที่อุณหภูมิมากกว่า 50 องศาเซลเซียส แต่ไม่เกิน 65 องศาเซลเซียส เนื่องจากเนื้อดินของอิฐดิบจะแข็งเกินไปจนขาดความเหนียวเพราะมีปริมาณน้ำเหลืออยู่ในเนื้อดินน้อยเกินไป จึงส่งผลต่อการนำอิฐดิบที่ผ่านการไล่ความชื้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 65 องศาเซลเซียส ไปทำการจัดเรียงในเตาเผาเพื่อทำการเผา เพราะเมื่อจัดเรียงอิฐดิบดังกล่าวจะทำให้อิฐดิบเกิดการแตกหักได้ง่ายกว่าและเกิดความเสียหายหลังจากการเผาได้ง่าย ดังนั้นอุณหภูมิเฉลี่ยที่เหมาะสมสำหรับการไล่ความชื้นในอิฐดิบคือ 65 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับ Pujari *et al.* (2016) ศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของอิฐที่มีขนาดต่างกันพบว่าอิฐขนาดมาตรฐานของอินเดียสามารถใช้อุณหภูมิต่ำในช่วง 40-60 องศาเซลเซียส และการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสสามารถทำให้อิฐใช้เวลาสำหรับการเผาภายใน 20 ชั่วโมง จากข้อมูลข้างต้นสามารถนำมาเปรียบเทียบปริมาณความชื้นในอิฐดิบที่ลดลงกับอุณหภูมิและรูปแบบการจัดเรียงอิฐดิบ ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณความชื้นที่ลดลงเมื่อรูปแบบการจัดเรียงอิฐที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 8 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของการไล่ความชื้นในอิฐดิบจากต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนที่อุณหภูมิและรูปแบบการจัดเรียงอิฐที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่ายิ่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ระดับปริมาณความชื้นที่ลดลงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ Lu *et al.* (2017) ศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่มีต่อสมบัติการอบแห้งของอิฐชีวมวล พบว่าปริมาณความชื้นของอิฐชีวมวลลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลา หลังจากการอบไล่ความชื้นในอิฐดิบพบว่าเมื่อปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอิฐดิบลดลง ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนคือ สีของอิฐดิบที่เปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับ Lu *et al.* (2017) พบว่าสมบัติทางกายภาพของอิฐชีวมวลมีการ

เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิอากาศร้อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อประโยชน์สำหรับผู้ประกอบการในการตัดสินใจว่าอิฐดิบที่ผ่านกระบวนการไล่ความชื้นแล้วมีความเหมาะสมที่จะนำเข้าสู่กระบวนการต่อไป คือการนำอิฐดิบไปสู่กระบวนการเผา โดยการทำให้เทียบสีเพื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นที่ลดลงในอิฐดิบแห้งเบื้องต้นเพื่อให้ง่ายต่อการตัดสินใจของผู้ประกอบการและผู้ปฏิบัติงานที่มีประสบการณ์น้อย และได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการพิจารณาด้วยสายตาจากวิธีการแบบเดิมซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์ในการทำงานลักษณะของใบเทียบสีของอิฐดิบแสดงได้ดังในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ใบเทียบสีอิฐดิบที่พร้อมนำเข้าสู่เตาเผา

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถการผลิตโอ่งแดงของผู้ประกอบการในรอบ 1 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559-2560 (Kathammanee *et al.*, 2018) พบว่า รอบการผลิตโอ่งแดงหรือการเผาเฉลี่ยในระยะเวลา 12 เดือนด้วยกระบวนการแบบเดิมโดยอาศัยลมร้อนจากธรรมชาติจะอยู่ที่จำนวน 35 รอบ จากการคำนวณเมื่อต้นแบบของระบบควบคุมลมร้อนที่สร้างขึ้นในการไล่ความชื้นในโอ่งดิบจะทำให้รอบของการผลิตหรือการเผาในระยะเวลา 12 เดือนอยู่ที่ 50 รอบ ซึ่งระบบควบคุมลมร้อนสามารถเพิ่มรอบของการผลิตโอ่งดิบได้เพิ่มขึ้น 15 รอบของกำลังการผลิตจากเดิมที่ผลิตได้ 35 รอบตลอดทั้งปี ซึ่งสอดคล้องกับ Borompichaichartkul *et*

al. (2009) ศึกษาการใช้ปั๊มลมร้อนร่วมการอบแห้งลมร้อนในการอบแห้งถั่วแมคคาเดเมียทั้งกะลา พบว่าการอบแห้งด้วยการปั๊มลมร้อนร่วมการอบแห้งลมร้อน สามารถทำให้ปริมาณความชื้นของถั่วลดลงให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ภายใน 3 วัน ซึ่งเร็วกว่าจากเดิมที่ต้องใช้เวลาถึง 17 วัน และ Pujari *et al.* (2016) พบว่าการไล่ความชื้นในโอ่งโดยใช้ห้องควบคุมอุณหภูมิใช้เวลา 1 วัน สามารถลดเวลาจากแบบธรรมชาติที่ใช้เวลา 2-3 สัปดาห์ จากการคำนวณค่าใช้จ่ายในการสร้างต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าใช้จ่ายวัสดุรวมค่าแรงในการสร้างต้นแบบระบบควบคุมลมร้อน

ค่าใช้จ่าย (ค่าวัสดุ+ค่าแรง)	ราคา (บาท)
1. ชุดกำเนิดลมร้อนประกอบด้วย	
1.1 เตาพลังงานชีวมวล 10 เตา เตาละ 3,200 บาท	32,000
1.2 ตู้ควบคุมร้อน	25,000
1.3 โบลเวอร์ตู้ควบคุมร้อน	15,000
1.4 พัดลมเป่าลมร้อน	4,000
2. ห้องสะสมความร้อนประกอบด้วย	
2.1 ผนังกันห้องซ้าย - ขวา 4 ชั้น	20,000 บาท
2.2 ผนังกันส่วนด้านบน 5 ชั้น	15,000 บาท
2.3 ผนังกันส่วนด้านหน้า - หลัง 2 ชั้น	15,000 บาท
รวม	126,000 บาท

ระยะคืนทุนของการใช้ระบบควบคุมลมร้อนสำหรับไล่ความชื้น ต้นทุนในการสร้างต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนสำหรับไล่ความชื้นในโอ่งดิบ

126,000 บาท ถ้าไรสุทธีที่ได้ต่อ 1 รอบการผลิตโอ่งจำนวน 20,000 ก้อน เท่ากับ 9,760 บาท ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กำไรสุทธิในการผลิตอิฐแดงจำนวน 20,000 ก้อนต่อรอบการผลิต

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
1. ต้นทุนการผลิตอิฐแดงก้อนละ 3.00 บาท	60,000
2. ราคาขายอิฐแดงก้อนละ 3.50 บาท	70,000
3. ค่าขนส่งเชื้อเพลิงและค่าไฟฟ้า	240
4. กำไรสุทธิต่อรอบการผลิต	$70,000 - 60,000 - 240 = 9,760$

ข้อมูล ณ เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2562

ดังนั้นระยะคืนทุนเท่ากับ $126,000/9,760 = 12.91$ รอบของการเผาอิฐแดง (ประมาณ 13 รอบ) จึงมีระยะเวลาคืนทุนในการใช้ระบบควบคุมลมร้อน = 80 วัน

สรุป

ผลการออกแบบ สร้างและทดสอบการใช้งานต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนสำหรับการไล่ความชื้นในอิฐดิบก่อนนำเข้าสู่กระบวนการเผาด้วยพลังงานชีวมวลที่โรงงานผลิตอิฐแดง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การออกแบบและสร้างระบบควบคุมลมร้อนสำหรับไล่ความชื้นในอิฐดิบแบ่งเป็น 2 ส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ ชุดกำเนิดลมร้อนและห้องสะสมความร้อน โดยใช้หลักการควบคุมทิศทางลมด้วยการพาความร้อนให้ไหลผ่านวัตถุเพื่อทำการไล่ความชื้นในอิฐดิบ โดยใช้ชีวมวลจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราซึ่งเป็นของเหลือทิ้งในพื้นที่มาใช้เป็นพลังงานทางเลือกในการให้พลังงานความร้อน

2. การไล่ความชื้นในอิฐดิบจากต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนด้วยอุณหภูมิและรูปแบบการจัดเรียงอิฐดิบที่ต่างกัน แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ระดับปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอิฐดิบลดลง โดยรูปแบบการจัดเรียงอิฐดิบที่เหมาะสมต่อการอบไล่ความชื้นคือ

รูปแบบที่ 1 เป็นการจัดเรียงแบบเสา ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมก่อนนำอิฐดิบเข้าเตาเผานั้นต้องทำการไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 - 65 องศาเซลเซียส ซึ่งอิฐดิบจะมีปริมาณความชื้นที่ลดลงอยู่ในช่วง 4.22-6.21 (ไม่น้อยกว่าร้อยละ 4.20)

3. ผลของการใช้ต้นแบบระบบควบคุมลมร้อนสำหรับไล่ความชื้นในอิฐดิบก่อนนำไปสู่กระบวนการเผาด้วยพลังงานชีวมวล ช่วยลดระยะเวลาในการไล่ความชื้นในอิฐดิบจากกระบวนการเดิมอย่างน้อยร้อยละ 30 และไม่ต้องพึ่งพาแสงแดดจากธรรมชาติซึ่งเป็นอุปสรรคในพื้นที่ภาคใต้เนื่องจากมีฝนตกชุกตลอดทั้งปี และสามารถเพิ่มรอบการผลิตอิฐได้ อีกทั้งในช่วงฤดูฝนก็สามารถไล่ความชื้นในอิฐดิบได้อย่างต่อเนื่องอย่างน้อย 2-3 เตา ระยะเวลาคืนทุนการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 80 วัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณคุณลุงโชคดีและคุณป้านันทาวดี เหมทานนท์ ที่กรุณาและให้ความอนุเคราะห์สถานที่ภายในโรงงานเพื่อการศึกษาและสนับสนุนพื้นที่ในการสร้างและทดลองระบบควบคุมลมร้อนสำหรับไล่ความชื้นในอิฐดิบก่อนนำไปสู่กระบวนการเผาด้วยพลังงานชีวมวลตลอดระยะเวลาจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Bala, B.K. and Janjai, S. 2009. Solar drying of fruits, vegetables, spices, medicinal plants and fish: Developments and Potentials, pp. 1-24. *In The International Solar Food Processing Conference*. The International Solar Energy Society, Indore, India.
- Borompichaichartkul, C., Luengsode, K., Chinprahast, N. and Devahastin, S. 2009. Improving quality of macadamia nut (*Macadamia integrifolia*) through the use of hybrid drying process. **Journal of Food Engineering** 93: 348-353.
- Jhider, N. and Bagané, M. 2020. Investigation of the effect of temperature on Tunisian clay product during drying process. **Heat Mass Transfer** 56: 2015-2024
- Kathammanee, S., Sangsirimongkolying, R., Sua-iam, G. and SongNiem, N. 2018. Problems in the clay brick production process of entrepreneurs in Nakhon Si Thammarat province, 561. *In National Conference in Science and Technology*. Bansomdejchaopraya Rajabhat University, S.D. Avenue Hotel, Bangkok. (in Thai)
- Katinonkun, W. 2018. **Biomass energy**. Department of Science Service. Available Source: <http://www.siweb.dss.go.th/repack/Fulltext/IR5.Pdf>, January 15, 2018.
- Kongphupha, P., Tapai, U. and Saoadchom, P. 2016. Effect of drying temperatures on charcoal briquettes drying using a combined solar energy and far-infrared radiation dryer, and far-infrared radiation dryer.
- Academic and Research Journal of Rajamangala University of Technology Phra Nakhon** 10(1): 77-93. (in Thai)
- Kurusathien, S. 2011. Study of hot air in the oven with different internal structure. Master's Thesis (Chemical Engineering), Chulalongkorn University. (in Thai)
- Lu, Z., Wang, M., Jia, W. and Zhao, Z. 2017. Effects of hot air temperature on drying properties of biomass brick during heat treatment. **BioResources** 12(2): 3236-3249.
- Neramit, L., Watjawong, K. and Kris, C. 2015. Improvement the properties of fired clay brick. **Civil Engineering Journal** 25(5): 24-34. (in Thai)
- Pujari, A.S., Bhosale, C.H., Wagh, M.M. and Shinde, N.N. 2016. Effect of temperature on drying rate of various types of bricks. **International Research Journal of Engineering and Technology** 3(5): 2793-2795.
- Rattanabanlue, A., Leejongpermpoon, S., Kammon, S., Markjan, C., Khlaydee, K. and Watcharodom, N. 2018. **Research Report no Dryer chestnut peel by technical electric field combine with heat pump**. Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi. (in Thai)
- Rattanablue, E. 2018. **Research Report no Water chestnut dryer with electric field technique combined with heat pump**. Faculty of

- Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi. (in Thai)
- Saekhow, A., Thirawanitkun, S. and Thirawanitkun, Y. 2012. Factors of drying with convection heat energy sources and heat radiation on kinetics and the quality of black pepper. **Burapha Science Journal** 18(1): 166-180. (in Thai)
- Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Jirajindalert, A. and Taechapairoj, C. 2006. Parboiling brown rice using super heated steam fluidization technique. **Journal of Food Engineering** 75(3): 423-432.
- Sukkasem, A. 2007. Study on the Conduction Heat Transfer of Cylindrical Pin Fins. Master's Thesis (Mechanical Engineering). Srinakharinwirot University. (in Thai)
- Taikhao, A. and Theekhasub, S. 2016. Solar dryer types of natural convection and forced convection type. **EAU Heritage Journal Science and Technology** 7(1): 23-31. (in Thai)
- Tirawanichakul, S., Tasara, J. and Tirawanichakul, Y. 2007. Thermo-physical properties and effect of electrical field on drying process of paddy. **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 29(2): 325-333. (in Thai)
- Tulasidas, T.N., Raghavan, G.S.V. and Mujumdar, A.S. 1995. Microwave drying of grapes in a single mode at 2450 MHz-II and energy aspect. **Drying Technology** 13(8-9): 1973-1992.
- Varith, J., Dijkanarukkul, P., Achariyaviriya, A. and Achariyaviriya, S. 2009. Combined microwave-hot air drying of peeled longan. **Journal of Food Engineering** 81(2): 459-466.
- Wongthom, S. and Kiatsirirot, T. 2004. Increasing the productivity of dome kiln by recycling waste heat. **Journal of the Engineering Network** (18): 76-77. (in Thai)