วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

คณะกรรมการที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.อุทัยรัตน์ ณ นคร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง จักรใจ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.เผดิมศักดิ์ จารยะพันธุ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัย (Peer review)

ดร.ศักดิ์ชัย เมืองศรีนุ่น	บริษัท จูโน เทคโนโลยี จำกัด
ศาสตราจารย์ ดร.ดอกรัก มารอด	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต มานะธุระ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑามาศ ร่มแก้ว	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ศักดิ์ ศิรษะภูมิ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิจิตรา แก้วสอน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินรำไพ เศรษฐ์ธณบุตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา พิมลศิริผล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีวรา สุวรรณ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิติ คำเมืองลือ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ดร.ปณิดา กาจีนะ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทวัส สิฏฐกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.อาภัสรา แสงนาค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤมล มงคลธนวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนากร กฤษณชาญดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกาล เสนน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันโชค เครือหงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ดร.สุพรรษา ชินวรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนัน ปานสาคร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัฒน์ เจริญจิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินดา สามัคคี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สกุลรัตน์ หาญศึก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาริษา โสภาจารย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กลอยใจ ครุฑจ้อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.ณัฐพล แก้วทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.สุดนัย เครือหลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พรรณ อำพันธ์ทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณะพงศ์ พันธ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิรยา สิทธิสาร	มหาวิทยาลัยทักษิณ
รองศาสตราจารย์ ดร.บุรฉัตร ฉัตรวีระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เยาวพา จิระเกียรติกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุมาศ ฤทธิไชย	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ดร.เอกสิทธิ์ พัชรวงศ์ศักดา	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิราภรณ์ ชื่นบาล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ดร.ดวงนภา วานิชสรรพ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณยา เพ่งผล	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิกาญจน์ จันทร์มาทอง	มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชรินทร์ นมรักษ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง
ดร.อังคณา เชื้อเจ็ดตน	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
รองศาสตราจารย์ ดร.คริษฐ์สพล หนูพรหม	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธิเดช คูหาทองสัมฤทธิ์	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวนันท์ ขุนดำ	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิบดินทร์ แสงสว่าง	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.การุณ ทองประจุแก้ว	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ดนุพล ตันนโยภาส	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สันทัด วิเชียรโชติ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มักตาร์ แวหะยี	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาคม ปะหลามานิต	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิงอร ไชยเยศ	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
รองศาสตราจารย์ ดร.ชณทัต บุญรัตนกิตติภูมิ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ รัตนเดช	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิษณุ แก้วตะพาน	สถาบันเทคโนโลยีพระเจ้าเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร.อาภารัตน์ มหาขันธ์	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

บทความทุกเรื่องก่อนลงตีพิมพ์ในวารสารฯ ได้ผ่านการพิจารณากลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ อย่างน้อย 2 ท่าน

วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บรรณาธิการ ศาสตราจารย์ ดร.สุวัจน์ ธัญรส
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยบรรณาธิการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ทองหนูนุ้ย
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ มะเห
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สงรักษ์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพร ธารางกูร
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดคนึง ณ ระนอง
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.อลงกลด แทนออมทอง

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง จุฑาเกตุ

คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Professor Ir. Dr.Anuar Mat Safar

University Malaysia Perlis, Malaysia

Professor Mitsuhiko Sano

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

Professor Qinghua Zhang

Chongqing University of Posts and Telecommunications, China

Professor Zhangyong Li

Chongqing University of Posts and Telecommunications, China

Professor Clarissa Yvonne Domingo

Central Luzon State University, Philippines

Professor Virginia Venturina

Central Luzon State University, Philippines

Professor Noraine Medina

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ravelina Velasco

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ronaldo Alberto

Central Luzon State University, Philippines

Professor Edilyn Lansangan

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ariel Mactal

Central Luzon State University, Philippines

Associate Professor Dr.David Crookall

University of Nice Sophia Antipolis, France

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

Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Indonesia

รองศาสตราจารย์ณิฏฐารัตน์ ปภาวสิทธิ์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิ่น จันจุฬา
คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาตรี หอมเขียว
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิศีโรตม์ เกตุแก้ว
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
รองศาสตราจารย์ ดร.พูนสุข อุดม
คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์เกชา คูหา
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ประพฤติ พรหมสมบูรณ์
คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิยม กำลังดี
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ร้อยโท (หญิง) ดร.เกิดศิริ เจริญวิศาล
คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตสารสนเทศเพชรบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิธิดา จรุงเกียรติกุล
คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ แก้วบุญมา
คณะเทคโนโลยีการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลักษมี วิทยา
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหพงศ์ สมวงค์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิกรม ฉันทรางกูร
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.ทรงสิน ธีระกุลพิศุทธิ์
คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ดร.ทัศนีย์ ขาวเนียม
คณะคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
ดร.กิตติมา ตันติหาชัย
คณะศิลปะศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
นางสาวคุลิกา ธนะเศวตร
วิทยาลัยการโรงแรมและการท่องเที่ยว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

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

สารบัญ

การกำจัดน้ำมันดินชีวมวลจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น..... 282-295
โดยใช้เตาปฏิกรณ์พลาสมาความร้อนต่ำ
กิตติกร สาสุจิตต์ เสริมสุข บัวเจริญ และ นิกราน หอมดวง

ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์และไซโทไคนิน…….……..…….. 296-308
ต่อการรอดชีวิตและการพัฒนาของยอดกุหลาบมอญในสภาพปลอดเชื้อ
ธนภูมิ ศิริงาม และ วาสินี พงษ์ประยูร

จลนศาสตร์การถ่ายเทมวลและคุณภาพทางเคมีกายภาพของมะขามป้อม……..…..... 309-326
จากการดึงน้ำออกโดยวิธีออสโมซิสด้วยสารละลายน้ำตาลผสมเข้มข้น
ชมณี ยืนยงพุทธกาล อภิศักดิ์ ไชยโรจน์วัฒนา และ ศุภิสรา เปี่ยมผล

เครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดแบบอัตโนมัติ……..…….…… 327-342
ศุภชัย มะเดื่อ วันประชา นวนสร้อย และ วรพงค์ บุญช่วยแทน

ผลของจมูกข้าวต่อคุณภาพของไอศกรีมและความคิดเห็น..... 343-357
ของผู้บริโภคในการทำธุรกิจ
ณพศักดิ์ เจิมมงคล ปฏิภาณ จันทรนารา ปวริศ สุทธิเสรีสกุล
ปัณณธร ธารอุไรกุล สุริโย มีนาม และ ณัฐธญาณ์ ศรีสุวอ

อิฐบล็อกประสานที่ผสมขยะเปลือกหอยนางรมบดไม่ผ่านกระบวนการเผา……..…….…… 358-371
ทวิช กล้าแท้ กงกิจ ยิ่งเจริญกิจขจร เกรียงศักดิ์ จันทกูล
และ อรรคเดช อับดุลมาติน

ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุง……..…….... 372-384
นราเดช สุขแก้ว และ วิชัย หวังวโรดม

การออกแบบและจำลองสายอากาศยากิ-อูดะแถวลำดับแบบสลับลำคลื่น…… 385-404
เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครือข่าย LoRa
ธนพงศ์ คุ้มญาติ พงษ์นรินทร์ ศรีพลอย และ พีระพงษ์ อุฑารสกุล

การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนด้วยกระบวนการไพโรไลซิส……...…….... 405-417
โชคชัย เหมือนมาศ และ รวมพร นิคม

ผลของการเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะ (*Smallanthus sonchifolius*)…… 418-429
ในอาหารต่อประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลอง การเจริญเติบโต
และการใช้ประโยชน์จากอาหารของปลากาดำ (*Labeo chrysophekadion*)
จุลทรรศน์ คีรีแลง เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน ชนกันต์ จิตมนัส
Hien Van Doan และ สุดาพร ตงศิริ

การใช้ประโยชน์เศษวัสดุก่อสร้างในคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก…… 430-440
ชูเกียรติ ชูสกุล และ ขวัญชีวา หยงสตาร์

Enhancement of Germination and Seedling Growth of Common Buckwheat…… 441-453
(*Fagopyrum esculentum* Moench) by Seed Coating with Plant Nutrient
and Fungicide
Pheeraphan Thongplew, Jakkrapong Kangsopa and Nednapa Insalud

สาหร่ายลดโลกร้อน…….. 454-464
ครรชิต เงินคำคง นันท์นภัส เงินคำคง และ พิสิฐ ศรีสุริยจันทร์

การสำรวจรังวัดรูปตัดขวางลำน้ำโดยอากาศยานไร้คนขับในแม่น้ำลำภาชี……..... 465-484
จังหวัดกาญจนบุรี
กิติพงศ์ ทองเชื้อ และ วิษุวัฒก์ แต้สมบัติ

ความสัมพันธ์ของวัสดุปลูกที่ต่างกันต่อการเจริญของไมโครกรีนผักบุ้ง…… 485-496
กัญญารัตน์ เหลืองประเสริฐ และ ไกรยศ แซ่ลิ้ม

ระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณี ในจังหวัดลพบุรี…….. 497-512
แสดงผลด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริงสำหรับนักท่องเที่ยวสูงอายุ
ไชยพล กลิ่นจันทร์

การประเมินศักยภาพถิ่นอาศัยที่เหมาะสมของผักหวานป่า ตามปัจจัยแวดล้อมบางประการ……... 513-528
ในพื้นที่โครงการพัฒนาบ้านโป่ง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่
มะโนลม วงแสนแก้ว สุธีระ เหิมฮึก วิชญ์ภาส สังพาลี
เกรียงศักดิ์ ศรีเงินยวง และ ขนิษฐา เสถียรพีระกุล

ผลของระยะเวลาเก็บรวบรวมต่อคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ยางพาราพันธุ์ดั้งเดิมจากต้นแม่ทาบกิ่ง..... 529-535

วิชัย หวังวโรดม ปัทมาวดี คุณวัลลี สุภาณี ชนะวีรวรรณ

นราเดช สุขแก้ว และ นาฏอนงค์ เมืองนาโพธิ์

การอนุรักษ์พลังงานสำหรับโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย: 536-552
กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม

ประพนธ์ ชูประเสริฐ กีรติ สุลักษณ์ ปรีชา ทุมมุ

และ อุดร นามเสน

วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบการถดถอยพหุคูณที่แกร่งปรับใหม่..... 553-567

นิธิภัทร กมลสุข

การพัฒนาระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณ..... 568-583
สำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง

ราธส จิรวัฒน์สถิต นัฐพงศ์ ส่งเนียม ดุษณี ศุภวรรธนะกุล

และ สุรีมาศ จันต๊ะอินทร์

การกำจัดน้ำมันดินชีวมวลจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น โดยใช้เตาปฏิกรณ์พลาสมาความร้อนต่ำ

An Investigation of Biomass Tar Removal from Gasification by Non-thermal Plasma Reactor

กิตติกร สาสุจิตต์* เสริมสุข บัวเจริญ และ นิกราน หอมดวง

Kittikorn Sasujit*, Sermsuk Buochareon and Nigran Homdoung

Received: 26 November 2020, Revised: 21 January 2021, Accepted: 5 February 2021

บทคัดย่อ

การผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นเชื้อเพลิงชีวมวลพบข้อจำกัดการนำไปใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในเนื่องจากปัญหาน้ำมันดินที่ปนกับโปรดิวเซอร์แก๊ส งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเตาปฏิกรณ์พลาสมาความร้อนต่ำแบบไกลดิงอาร์คหมุนวนย้อนกลับสำหรับกำจัดน้ำมันดินโดยใช้สารประกอบแนฟทาลีนเป็นตัวแทนน้ำมันดินจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น โดยทำการศึกษาที่ระดับความเข้มข้นน้ำมันดินในช่วง 823-9,750 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กำหนดให้อัตราการไหลแก๊สรวมป้อนเข้ารวมคงที่ 30 ลิตรต่อนาที และความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 และ 12 กิโลโวลต์ ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันดินเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาปฏิกรณ์พลาสมาส่งผลให้มีพลังงานมากพอทำลายโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบในน้ำมันดิน โดยจะให้ประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินในช่วงร้อยละ 70-87 และประสิทธิภาพพลังงานในช่วง 3.63-20.07 กรัมต่อหน่วยไฟฟ้าที่ใช้งานเตาปฏิกรณ์พลาสมา งานวิจัยนี้พบว่าสามารถรองรับอัตราการไหลของแก๊สที่สูงกว่าเตาปฏิกรณ์ไกลดิงอาร์คแบบทั่วไป และสามารถพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบแก๊สซิฟิเคชั่นต่อไป

คำสำคัญ: พลาสมาความร้อนต่ำ, ไกลดิงอาร์คแบบหมุนวนย้อนกลับ, แนฟทาลีน, การกำจัดน้ำมันดิน, แก๊สซิฟิเคชั่น

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เลขที่ 63 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

School of Renewable Energy, Maejo University, 63, Nongharn, Sansai, Chiang Mai 50290, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): k.sasujit@yahoo.com

ABSTRACT

The producer gas produced from biomass gasification was found to be limited in its use as an internal combustion engine due to the problem of tar. The purpose of this research is to develop a low temperature gliding arc plasma reactor that can be utilized to remove tar from gasification by using naphthalene compounds as model tar. The naphthalene concentration inlet is between 823-9,750 mg/m^3 with a constant total gas feed rate of 30 LPM and a high voltage of 10-12 kV. The plasma assisted tar removal was found to increase with applied electrical energy as it can decompose the chemical structure of the compounds in the model tar. It was found that the removal efficiency was in the range of 70-87% and the energy efficiency was in the range of 3.63-20.07 g/kWh. This study shows the reverse vortex flow gliding arc reactor could be achieved with a higher flow rate of producer gas than a conventional gliding arc, which is suitable for further development in gasification systems.

Key words: non-thermal plasma, reverse vortex flow gliding arc, naphthalene, tar removal, gasification

บทนำ

จากสถานการณ์ด้านการใช้พลังงานปัจจุบัน มีการใช้พลังงานสูงขึ้นสอดคล้องการขยายตัวภาคอุตสาหกรรม กลุ่มวิสาหกิจชุมชนขนาดเล็กที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้หน่วยงานระดับกระทรวงพลังงาน จึงทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579 (AEDP2015) มีเป้าหมายเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน สนับสนุนอุตสาหกรรมการผลิตเทคโนโลยีพลังงานทดแทนในประเทศ และเพื่อวิจัยพัฒนาส่งเสริมเทคโนโลยีพลังงานทดแทนสัญชาติไทยให้สามารถแข่งขันในตลาดสากล โดยกำหนดเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนร้อยละ 30 ในปี พ.ศ. 2579 (Energy Policy and Planning Office, 2015) พื้นที่ส่วนใหญ่ประเทศไทยพบว่ามีพื้นที่เพาะปลูกจำนวนมากเนื่องจากประกอบอาชีพเกษตรกรรมเป็นหลัก และมีการปลูกพืชหมุนเวียนทั้งพืชอาหาร และไม่ใช่อาหาร อย่างไรก็ตามยังคงพบปัญหาในการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ยังไม่ก่อให้เกิดการนำไปใช้ประโยชน์ ขณะเดียวกันมักจะถูกทำลายอย่างผิดวิธีโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาทิ้งในที่โล่ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศ ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้สามารถผ่านกระบวนการแปลงสภาพเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อใช้ประโยชน์ในเชิงพลังงานได้ เช่น ผลิตเป็นเชื้อเพลิงแข็ง ผลิตเป็นถ่านชีวภาพ และในรูปแบบอื่นๆ เป็นต้น

แก๊สซิฟิเคชั่น (Gasification) ถือว่าเป็นกระบวนการ แปลงสภาพชีวมวลด้วยวิธีทางเคมีความร้อน โดยแปลงสภาพชีวมวลจากเชื้อเพลิงแข็งเป็นแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานความร้อน หรือเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อการผลิตไฟฟ้า ปัญหาหลักที่พบจากกระบวนการได้แก่สิ่งปนเปื้อนในแก๊สเชื้อเพลิง เมื่อควบแน่นแล้วเป็นของเหลวสีดำ ความหนืดสูง ซึ่งมักจะเรียกว่าน้ำมันดินชีวมวล หรือทาร์ ซึ่งเกิดจากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล เมื่อมีจำนวนมากจะไปอุดตันในระบบท่อส่งแก๊สเชื้อเพลิง เกิดการกัดกร่อน หรือชุดทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง และระบบกลไกลอื่นๆ เป็นต้น (Sasujit *et al*., 2017) วิธีการกำจัดน้ำมันดินนั้นมีวิธีการหลัก 2 วิธีคือ

การจัดการระหว่างกระบวนการ (In-situ process) ได้แก่การออกแบบเตาเหมาะสม การใช้เบดร่วม ตัวเร่งปฏิกิริยา และการปรับเงื่อนไขกระบวนการให้เหมาะสม เป็นต้น ส่วนอีกวิธีคือการจัดการหลังเกิดกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น (Post gasification) ซึ่งเป็นการลดปริมาณสิ่งปนเปื้อนโดยวิธีการทางกายภาพ ได้แก่ ไซโคลนดักฝุ่น เวนจูรี่สครับเบอร์ ระบบกรองโปรดิวเซอร์แก๊ส ระบบกำจัดฝุ่นโดยใช้ไฟฟ้าสถิตย์ เป็นต้น ในวิธีการนี้จะมีการกำจัดน้ำมันดินโดยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาแบบรวดเร็ว (Nunnally *et al*., 2014) ต่อมาคือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีการนี้ช่วยเร่งปฏิกิริยาในการแปลงสภาพองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันดินจากสารประกอบโมเลกุลใหญ่เป็นโมเลกุลเล็ก และเปลี่ยนเป็นแก๊สเชื้อเพลิง ทั้งนี้วิธีการนี้ให้ประสิทธิภาพมากที่สุด แต่พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยายังคงมีราคาสูง เกิดการปนเปื้อนของคาร์บอนและฝุ่นละอองเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ประสิทธิภาพลดลง อีกวิธีการที่น่าสนใจคือการใช้เทคนิคพลาสมาความร้อนต่ำ ข้อดีคือให้ประสิทธิภาพการสลายตัวของสารประกอบน้ำมันดินสูง ระยะเวลาการทำปฏิกิริยารวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับการใช้วิธีการข้างต้น และยังได้แก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ประโยชน์ในรูปของเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน แต่ทั้งนี้ต้องมีปริมาณน้ำมันดินต่ำหรืออยู่ในช่วง 10-100 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Basu, 2010; Reed and Das, 1988; Rios *et al*., 2018) การนำระบบนี้ไปใช้งานจะติดตั้งภายหลังจากกระบวนการกำจัดฝุ่นด้วยการใช้วิธีการทางกายภาพ และลดอุณหภูมิให้เหมาะสมก่อนเข้าสู่ชุดกำจัดน้ำมันดินด้วยเทคนิคพลาสมาความร้อนต่ำ (Sasujit *et al*., 2019)

พลาสมาเป็นสถานะที่สี่ของสสารเกิดขึ้นโดยที่แก๊สตัวกลางถูกทำให้เป็นไอออนซึ่งคือการที่อิเล็กตรอนอย่างน้อยหนึ่งตัวหลุดออกจากอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลาง ทำให้อะตอมหรือโมเลกุลกลายเป็นไอออนบวกของโปรตรอน และอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นไอออนลบผสมกระจายกันอยู่อย่างเท่าๆ กันในตัวกลางของแก๊ส และยังมีนิวตรอน อนุมูลอิสระ อะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นอยู่ในสภาวะกึ่งเสถียรผนึกผสมประกอบอยู่รวมกันในสภาพที่มีพลวัตอย่างไร้ดุลภาพก่อให้เกิดกระบวนการทำปฏิกิริยาเคมีและการเคลื่อนที่ของอนุภาคชนิดต่างๆ ในพลาสมา (Fridman, 2008) เทคโนโลยีพลาสมาในปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ พลาสมาความร้อนสูง (Thermal Plasma) พบได้ในภาคอุตสาหกรรมใช้พลังงานค่อนข้างสูงให้ความร้อนระหว่างกระบวนการสูง และพลาสมาความร้อนต่ำ (Non-thermal Plasma) ใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ เช่น การประยุกต์ใช้ในด้านเคลือบผิวเซลล์แสงอาทิตย์ การเปลี่ยนรูปแก๊สไฮโดรคาร์บอน (Lamacz *et al*., 2009) รวมไปถึงการประยุกต์ใช้ในการกำจัดน้ำมันดินจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น โดยจำลองน้ำมันดินโดยใช้สารประกอบทางเคมี เช่น สารประกอบแนฟทาลีน (Tippayawong and Inthasan, 2010; Yang and Chun, 2011; Yu *et al*., 2010; Kunnikar and Tippayawong, 2014) สารประกอบโทลูอีน (Zhu *et al*., 2016) สารประกอบแอนทราซีน (Chun *et al*., 2012a) สารประกอบเบนซีน (Chun *et al*., 2012b) รวมไปถึงการจำลององค์ประกอบของโปรดิวเซอร์แก๊ส (Nunnally *et al*., 2014) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารประกอบแนฟทาลีนเป็นตัวแทนน้ำมันดินจำลองจากชีวมวลเนื่องจากมีองค์ประกอบหลักในน้ำมันดินร้อยละ 15 (Rios *et al*., 2018) และเตาปฏิกรณ์พลาสมาในการกำจัดน้ำมันดิน โดยพบว่าประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินจำลองมากกว่าร้อยละ 80 (Yang and Chun, 2011; Yu *et al*., 2010; Zhu *et al*., 2016) โดยใช้เตาปฏิกรณ์พลาสมาแบบ

ไกลดิงอาร์คแบบใบมีด 2 ขั้วอิเล็กโทรด (Tippayawong and Inthasan, 2010; Kunnikar and Tippayawong, 2014) ในเตาปฏิกรณ์แบบกล่อง ต่อมามีการพัฒนาขั้วอิเล็กโทรดเป็นแบบใบมีดจำนวน 3-6 อิเล็กโทรดในเตาปฏิกรณ์แบบทรงกระบอก (Yang and Chun, 2011; Yu *et al*., 2010; Chun *et al*., 2012a; Cimerman *et al*., 2018) ซึ่งพบว่าการใช้ขั้วอิเล็กโทรดแบบ 2 ใบมีดนั้น มีพื้นที่การดิสชาร์จทางไฟฟ้าแบบไม่เสถียรส่งผลทำให้การเกิดพลาสมาไม่ต่อเนื่องและรองรับอัตราการไหลของแก๊สต่ำ ซึ่งจะไม่สอดคล้องกับกรณีไปใช้งานจริงที่มีอัตราการไหลแก๊สที่สูงซึ่งจะส่งผลต่อระยะเวลาทำปฏิกิริยาพลาสมาต่ำเนื่องจากเมื่ออัตราการไหลตามแนวแกนสูงขึ้นทำให้แก๊สมีปล่อยออกจากเตาปฏิกรณ์ทำให้ประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินต่ำและลดการเปลี่ยนรูปกระบวนการ (Kalra *et al*., 2005) ต่อมามีการพัฒนาเตาปฏิกรณ์แบบการไหลหมุนวนแบบทรงกระบอกโดยฉีดแก๊สตามแนวสัมผัสผนังเตาปฏิกรณ์ เพื่อสร้างกระแสหมุนวนในเตาปฏิกรณ์ ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาทำปฏิกิริยาเพียงพอต่อการแตกตัวน้ำมันดินเพิ่มขึ้น โดยเตาปฏิกรณ์ดังกล่าวนี้มีหลายแบบเช่น เตาปฏิกรณ์แบบหมุนวนตามแนวแกน (Rotating Gliding arc) (Zhu *et al*., 2016) เตาปฏิกรณ์แบบเวอร์เท็กซ์โฟลว์ (Forward vortex flow gliding arc) (Nunnally *et al*., 2014) ซึ่งให้ประสิทธิภาพแตกตัวน้ำมันดินสูงถึงร้อยละ 90 เนื่องจากความเสถียรเปลวพลาสมารวมถึงพฤติกรรมการหมุนวนทำให้เพิ่มระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเพียงพอ แต่อย่างไรก็ตามการหมุนวนตามแนวแกนข้างต้นซึ่งฉีดแก๊สตามแนวสัมผัสผนังเตาจากด้านล่างและหมุนวนออกตามแนวแกนด้านบนของเตาปฏิกรณ์ ซึ่งพบว่าพฤติกรรมการไหลดังกล่าวจะหมุนวนตามแนวผนังเตาเป็นส่วนใหญ่ทำให้มีพื้นที่การทำปฏิกิริยากับเปลวพลาสมาน้อยเกินไป (Kalra *et al*., 2005; Guofeng and Xinwei, 2012) ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนาเตาปฏิกรณ์พลาสมาแบบหมุนวนย้อนกลับ (Reverse vortex flow gliding arc, RVF-GA) ซึ่งให้ประสิทธิภาพการแตกตัวและการเปลี่ยนรูปแก๊สสูงเช่นเดียวกันให้ระยะเวลาทำปฏิกิริยาดีเยี่ยมเนื่องจากเตาปฏิกรณ์ชนิดนี้มีการฉีดแก๊สตามแนวสัมผัสจากด้านบนเพื่อสร้างการหมุนวนจากบนลงสู่ด้านล่าง และมีการฉีดแก๊สตามแนวแกนของเตาปฏิกรณ์ร่วมด้วย ทำให้แก๊สเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาตามแนวแกนสัมผัสกับเปลวพลาสมาโดยตรง นอกจากนั้นสามารถรองรับอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสูงกว่าแบบอื่นๆ (Kalra *et al*., 2005) ซึ่งสอดคล้องกับการขยายขนาดเพื่อใช้ในกระบวนการกำจัดน้ำมันดินจริงจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น

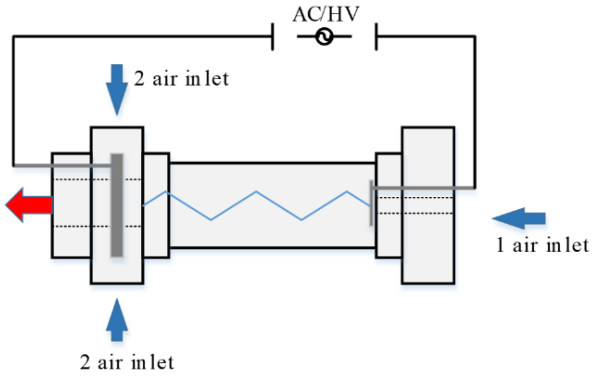
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเตาปฏิกรณ์พลาสมาความร้อนต่ำแบบไกลดิงอาร์คหมุนวนย้อนกลับสำหรับการกำจัดน้ำมันดินโดยใช้สารประกอบแนฟทาลีนเป็นตัวแทนน้ำมันดินจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น โดยศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า ความเข้มข้นของน้ำมันดินจำลอง อัตราการไหลแก๊สรวมที่ป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดิน และประสิทธิภาพเชิงพลังงานของระบบ

วิธีดำเนินการวิจัย

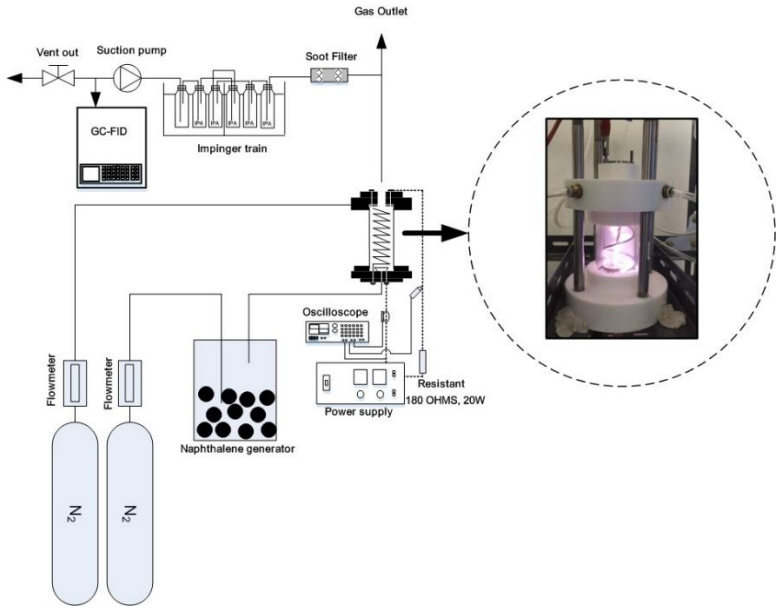
1. เตาปฏิกรณ์ไกลดิงอาร์คพลาสมาแบบหมุนวนย้อนกลับ

เตาปฏิกรณ์พลาสมาในงานวิจัยนี้ใช้ห้องทำปฏิกิริยาเป็นท่อควอซ์ทนความร้อนเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 40 มิลลิเมตร ความยาว 60 มิลลิเมตร อิเล็กโทรดประกอบไปด้วยวงแหวนอิเล็กโทรดในส่วนด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ พร้อมเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าโดยเป็นขั้วแคโทด ในส่วนด้านบนเตาปฏิกรณ์เป็นวงแหวนอิเล็กโทรดเชื่อมต่อ

กับขั้วไฟฟ้าแอโนด ซึ่งจะมีวงแหวนอิเล็กโทรดแบบเกลียวหมุนวน โดยระยะช่องว่างระหว่างขั้วห่างประมาณ 3 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 1 สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบนีออน (LECIP EX230A) ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 15 กิโลโวลต์ ที่กระแสไฟฟ้าสูงสุด 30 มิลลิแอมแปร์ เชื่อมต่อกับชุดปรับความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยใช้โพรบชนิดวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (Fluke 80K-40, Germany) ร่วมกับเครื่องมือวัดสัญญาณไฟฟ้า (Oscilloscope GW Instek : GDS-1102-U) ซึ่งแผนผังการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ 2



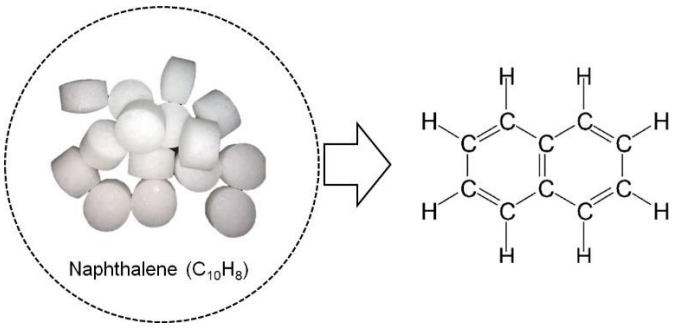
ภาพที่ 1 เตาปฏิกรณ์ไกลดิงอาร์คพลาสมาแบบหมุนวนย้อนกลับ



ภาพที่ 2 แผนผังการทดลองการกำจัดน้ำมันดินจำลองโดยใช้เทคนิคพลาสมา

งานวิจัยนี้ได้เลือกสารประกอบแนฟทาลีน ($C_{10}H_8$) เป็นตัวแทนน้ำมันดินจำลองเนื่องจากมีองค์ประกอบในน้ำมันดินชีวมวลร้อยละ 15 (Rios *et al*., 2018) สถานะเป็นของแข็งโดยโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนเบนซีนจำนวน 2 วงแหวน เชื่อมต่ออยู่ด้วยกันพันธะคู่ ซึ่งเป็นกลุ่มสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) เป็นกลุ่มน้ำมันดินเบา (Light tar) สามารถควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำ (Hernández *et al*., 2013; Kunnikar and Tippayawong, 2014) ซึ่งหลักการแตกตัวสารประกอบเคมีในน้ำมัน

ดินชีวมวลโดยใช้เทคนิคทางพลาสมานี้จะใช้พลังงานจากกระบวนที่มากพอสลายพันธะคู่ของคาร์บอนในโครงสร้างของสารประกอบแนฟทาลีน เพื่อให้เกิดการแตกตัวหรือเปลี่ยนรูปแก๊สที่มีโมเลกุลต่ำลง (Sasujit *et al*., 2019) ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีสารประกอบแนฟทาลีน

2. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

วิธีการทดลองเริ่มจากหาความเข้มข้นสารประกอบแนฟทาลีน โดยควบคุมอุณหภูมิอ่างน้ำในช่วง 30 50 และ 70 องศาเซลเซียส ควบคุมอุณหภูมิไม่เกินจุดหลอมเหลวประมาณ 80.6 องศาเซลเซียส งานวิจัยนี้ใช้หลักการระเหิดกลายเป็นไอของสารประกอบแนฟทาลีน และใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพาเข้าสู่เตาปฏิกรณ์พลาสมา โดยควบคุมอัตราการไหลโดยโรตามิเตอร์ (Dwyer, Germany) ในช่วง 5 10 และ 15 ลิตรต่อนาที ภายหลังทำปฏิกิริยาเก็บตัวอย่างน้ำมันดินจำลองละลายในสารละลายไอโซโพรพานอลที่ชุดเก็บตัวอย่างน้ำมันดินซึ่งใช้วิธีการเก็บตัวอย่างตามข้อแนะนำในงานด้านการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล (Tar protocol) ส่วนการวิเคราะห์ความเข้มข้นน้ำมันดินหลังจากกระบวนการจะวิเคราะห์โดยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟฟี (GC-FID: Agilent 6890 Gas Chromatograph, USA) และวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าที่ใช้จากเครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าแบบดิจิตอล ร่วมกับมิเตอร์วัดการใช้พลังงานไฟฟ้า ทั้งนี้ทุกเงื่อนไขการทดลองทำการเก็บข้อมูล 3 ซ้ำการทดลองที่ระยะเวลาการเก็บข้อมูลอย่างน้อย 1 ชั่วโมงต่อเงื่อนไข

3. การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง

3.1) ประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดิน

ประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดิน (Removal efficiency) หาได้จากมวลน้ำมันดินที่กำจัดต่อมวลน้ำมันดินเริ่มต้น ตามสมการที่ (1) (Nunnally *et al*., 2014; Yang and Chun, 2011; Zhu *et al*., 2016; Chun *et al*., 2012a; Cimerman *et al*., 2018)

$$\eta_d = \frac{[C]_{in} - [C]_{out}}{[C]_{in}} \times 100 \qquad (1)$$

โดยที่ η_d คือประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดิน (ร้อยละ) $[C]_{in}$ คือค่าความเข้มข้นน้ำมันดินเริ่มต้น (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) $[C]_{out}$ คือค่าความเข้มข้นน้ำมันดินหลังถูกกำจัด (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

3.2) พลังงานจำเพาะป้อนเข้า

พลังงานจำเพาะที่ป้อนเข้า (Specific Energy Input) คือหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ต่ออัตราการไหลรวมแก๊ส คำนวณตามสมการที่ (2) (Nunnally *et al*., 2014; Yang and Chun, 2011; Zhu *et al*., 2016)

$$SEI = \frac{P}{Q} \quad (2)$$

โดยที่ P คือกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าระบบ (กิโลวัตต์) Q คืออัตราการไหลของแก๊สที่เข้าสู่เตาปฏิกรณ์พลาสมา (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)

3.3) ประสิทธิภาพพลังงาน

ประสิทธิภาพพลังงานระบบวิเคราะห์ได้โดยมวลน้ำมันดินที่ถูกกำจัดต่อพลังงานที่ป้อนเข้าจำเพาะ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3) (Nunnally *et al*., 2014; Cimerman *et al*., 2018)

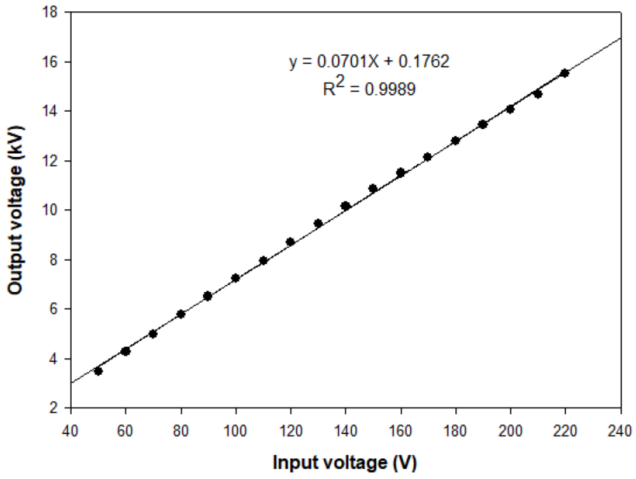
$$\eta_e = \frac{[C]_{in} - [C]_{out}}{SEI} \quad (3)$$

โดยที่ η_e คือประสิทธิภาพพลังงาน (กรัมต่อหน่วยไฟฟ้า) SEI คือพลังงานจำเพาะป้อนเข้าสู่ระบบ (หน่วยไฟฟ้าต่อลูกบาศก์เมตร)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการทดลองแหล่งจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง

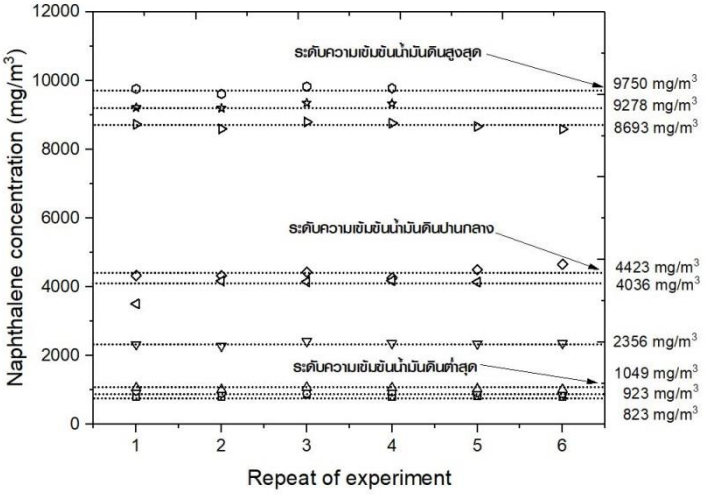
การหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กับแหล่งจ่ายทางไฟฟ้างานวิจัยนี้ทำโดยการปรับความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าในช่วง (x) ในช่วง 50 - 220 โวลต์ เพื่อแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกจากหม้อแปลงไฟฟ้า (y) ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออกมีค่าสูงขึ้นในช่วง 3 - 15 กิโลโวลต์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นตามสมการ $y = 0.0701x + 0.1762$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ $R^2 = 0.9989$ ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้าและขาออกจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง

2. ผลการทดสอบระบบจำลองความเข้มข้นน้ำมันดิน

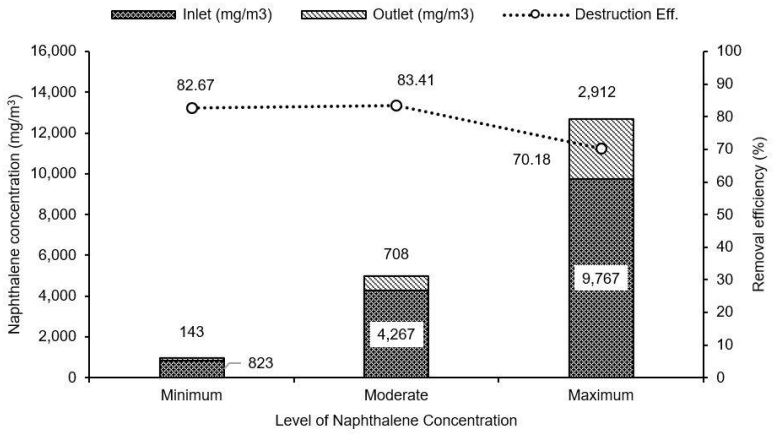
ผลการศึกษาชุดจำลองน้ำมันดินงานวิจัยนี้พบว่าสามารถแบ่งระดับความเข้มข้นน้ำมันดินจำลองเป็นระดับความเข้มข้นต่ำมีค่าเฉลี่ย 823 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระดับความเข้มข้นปานกลางมีค่าเฉลี่ย 4,423 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และระดับความเข้มข้นสูงสุดมีค่าเฉลี่ย 9,750 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งแปรผันตามอัตราการไหลของก๊าซพาที่ใช้ก๊าซไนโตรเจน และอุณหภูมิน้ำชุดอ่างควบคุมการระเหิด ซึ่งการเพิ่มอัตราการไหลก๊าซพาจะส่งผลต่อการถ่ายเทมวลน้ำมันดินถูกพาออกมากขึ้น เช่นเดียวกับอุณหภูมิน้ำเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการระเหิดของสารประกอบแนฟทาลีนเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน (Tippayawong and Inthasan, 2010) ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกศึกษาผลของระดับความเข้มข้นสารประกอบแนฟทาลีนในช่วงดังกล่าวตามขีดจำกัดของชุดจำลองน้ำมันดินที่พัฒนาขึ้น นอกจากนั้นระดับความเข้มข้นเฉลี่ยที่เลือกก็มีค่าสูงกว่าข้อกำหนดการใช้งานของแก๊สเชื้อเพลิงในการเป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยผลการทดสอบระดับความเข้มข้นน้ำมันดินจำลองเชิงการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ 5



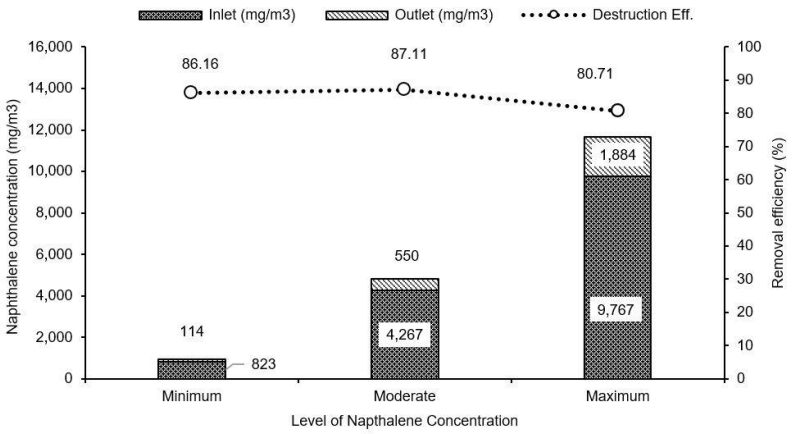
ภาพที่ 5 ระดับความเข้มข้นของน้ำมันดินจำลองก่อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์พลาสมา

3. ผลความเข้มข้นน้ำมันดินจำลองที่มีผลต่อประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินจำลอง

ผลของความเข้มข้นน้ำมันดินที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด ซึ่งทำการทดสอบที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาปฏิกรณ์พลาสมาเท่ากับ 10 กิโลโวลต์ และ 12 กิโลโวลต์ โดยศึกษาที่ระดับความเข้มข้นน้ำดันที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ปานกลาง และสูงสุด จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพกำจัดที่ระดับความเข้มข้นปานกลางมีค่าใกล้เคียงกับระดับความเข้มข้นต่ำโดยมีแนวโน้มสูงกว่าเล็กน้อย ขณะเดียวกันระดับความเข้มข้นสูงพบว่าให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันดินสูงขึ้น เนื่องจากการพามวลไอที่ระเหิดจากสารประกอบแนฟทาลีนป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ที่ค่าความเข้มข้นระดับปานกลาง และสูงสุด มีอัตราการไหลของก๊าซพา 10 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิน้ำ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทำให้การพามวลตามแนวแกนเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ระยะเวลาการแตกตัวน้อยเกินไป ขณะเดียวกันที่ระดับความเข้มข้นต่ำที่มีค่าอัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิน้ำ 30 องศาเซลเซียส พบว่าให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูง เนื่องจากอัตราการไหลก๊าซพาตามแนวแกนมีผลต่อประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดิน ขณะเดียวกันผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้วอิเล็กโทรดเพื่อแตกตัวแก๊สตัวกลาง พบว่าให้ประสิทธิภาพกำจัดสูงสุดร้อยละ 83.41 ที่ระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 10 กิโลโวลต์ และเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 12 กิโลโวลต์ พบว่าให้ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 87.11 ที่ระดับความเข้มข้นน้ำมันดินระดับปานกลางเท่ากับ 4,423 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังภาพที่ 6 และภาพที่ 7



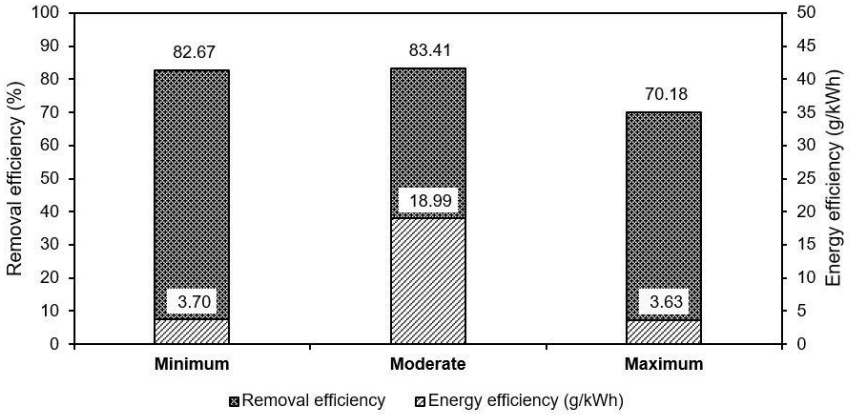
ภาพที่ 6 ระดับความเข้มข้นน้ำมันดินที่มีผลต่อประสิทธิภาพกำจัดที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์



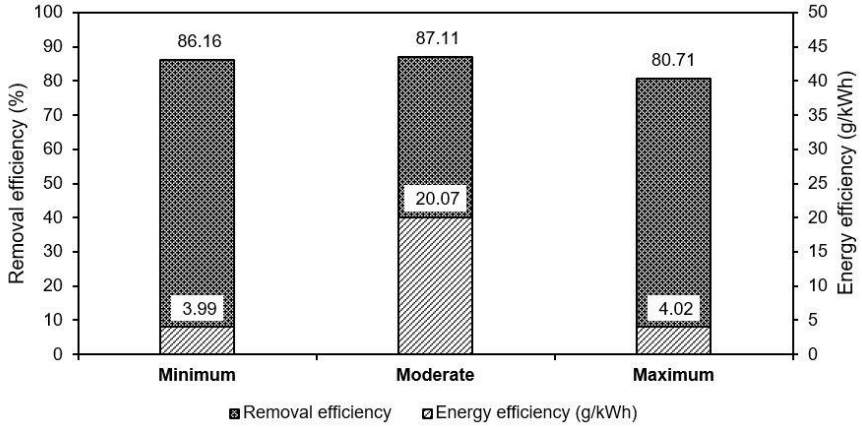
ภาพที่ 7 ระดับความเข้มข้นน้ำมันดินที่มีผลต่อประสิทธิภาพกำจัดที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์

4. ผลความเข้มข้นน้ำมันดินจำลองที่มีผลต่อประสิทธิภาพกำจัด และประสิทธิภาพพลังงาน

ภาพที่ 8 และ 9 แสดงผลของระดับความเข้มข้นของน้ำมันดินที่มีต่อประสิทธิภาพกำจัด และประสิทธิภาพเชิงพลังงาน พบว่าประสิทธิภาพกำจัดสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำมันดินที่ถูกกำจัดต่อหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินจำลองสูงสุดร้อยละ 83.41 จะให้ประสิทธิภาพพลังงานเฉลี่ย 18.99 กรัมต่อหน่วยไฟฟ้า ที่เงื่อนไขการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับเตาปฏิกรณ์พลาสมาเป็น 12 กิโลโวลต์ จะให้ประสิทธิภาพกำจัดสูงสุดร้อยละ 87.11 ประสิทธิภาพพลังงานเพิ่มขึ้นเฉลี่ยเท่ากับ 20.07 กรัมต่อหน่วยไฟฟ้า



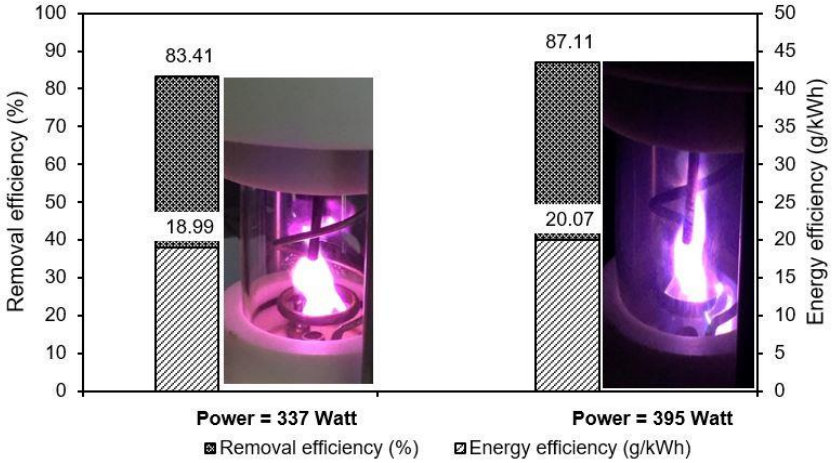
ภาพที่ 8 ความเข้มข้นน้ำมันดินที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดและการใช้พลังงานที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์



ภาพที่ 9 ความเข้มข้นน้ำมันดินที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดและการใช้พลังงานที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์

5. ผลของกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพกำจัดและประสิทธิภาพพลังงาน

ภาพที่ 10 แสดงผลของกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินจำลอง และลักษณะเปลวพลาสมา โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ (กำลังไฟฟ้า 337 วัตต์) ให้ประสิทธิภาพกำจัดสูงสุดร้อยละ 83.41 ประสิทธิภาพพลังงานเท่ากับ 18.99 กรัมต่อหน่วยไฟฟ้า ลักษณะเปลวพลาสมาเป็นแสงสีส้มแดง เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 12 กิโลโวลต์ (กำลังไฟฟ้า 395 วัตต์) พบว่าประสิทธิภาพกำจัดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยมีค่าเท่ากับร้อยละ 87.11 ประสิทธิภาพพลังงาน 20.07 กรัมต่อหน่วยไฟฟ้า ให้เปลวพลาสมาเป็นสีม่วง ซึ่งกลไกการแตกตัวของน้ำมันดินนั้นเกิดขึ้นจากที่แก๊สผสมถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์พลาสมาและไหลผ่านช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีระยะห่าง 3 มิลลิเมตร ซึ่งแก๊สที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดดังกล่าวทำให้อิเล็กตรอนแก๊สตัวกลางหลุดและปล่อยพลังงานสูงออกมาในรูปของพลังงานไอออไนเซชันของแก๊ส (Yang and Chun, 2011; Yu *et al*., 2010) จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกนี้จะไปชนกับอนุภาคแก๊สตัวกลางทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ และเกิดการทำลายโครงสร้างโมเลกุลสารประกอบแนฟทาลีน หรือกลุ่มสารประกอบไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันดิน ทำให้พันธะที่จับตัวกันของสารประกอบจึงแยกออกจากกัน ทำให้โครงสร้างโมเลกุลเล็กลง (Nunnally *et al*., 2014; Zhu *et al*., 2016; Chun *et al*., 2012b) ดังนั้นการเพิ่มกำลังไฟฟ้าจะส่งผลต่อการลดลงของปริมาณน้ำมันดิน และประสิทธิภาพกำจัดเพิ่มมากขึ้น (Sasujit *et al*., 2019)



ภาพที่ 10 ผลของกำลังไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการแตกตัวและประสิทธิภาพพลังงานระดับความเข้มข้นปานกลาง

6. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกำจัดและประสิทธิภาพพลังงานกับงานวิจัยอื่น

ผลการศึกษาประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินจำลองงานวิจัยนี้ พบว่าให้ประสิทธิภาพภาพกำจัดสูงสุดในช่วงร้อยละ 70 - 87 เปรียบเทียบกับเตาปฏิกรณ์ไกลดิงอาร์คทั่วไป พบว่าให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับงานวิจัย (Kunnikar and Tippayawong, 2014) ทั้งนี้งานวิจัยนี้รองรับอัตราการไหลของแก๊สรวมสูงกว่า และระดับความเข้มข้นน้ำมันดินสูง นอกจากนั้นยังให้ประสิทธิภาพพลังงานดีกว่าด้วยเช่นกัน สอดคล้องงานวิจัย Tippayawong and Inthasan (2010) ใช้เตาปฏิกรณ์ไกลดิงอาร์คแบบทั่วไปและแหล่งจ่ายไฟฟ้าเช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ พบว่าให้ประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินสูงร้อยละ 90 ซึ่งข้อดีเตาปฏิกรณ์พลาสมางานวิจัยนี้ให้ประสิทธิภาพกำจัดสูงเนื่องจากพฤติกรรมการไหลของแก๊สในเตาปฏิกรณ์แบบหมุนวนซึ่งส่งผลให้มีระยะเวลาการหมุนวนนานเพียงพอ และสามารถทำปฏิกิริยาแตกตัวสลายพันธะทางเคมีของสารประกอบน้ำมันดินได้ดีกว่า (Yu *et al*., 2010; Zhu *et al*., 2016; Guofeng and Xinwei, 2012; Chun *et al*., 2012b)

ตารางที่ 1 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพเตาปฏิกรณ์พลาสมากับงานวิจัยอื่น

Type of Reactor	**Gliding arc reactor (GA)**			**RVF-GA**
	Kunnikar and Tippayawong, 2014	Yang and Chun, 2011	Tippayawong and Inthasan, 2010	This research
Model tar compound	Naphthalene compound			
Reactor chamber	Rectangle	Cylindrical	Rectangle	Cylindrical
Tar Concentration (g/m^3)	0.21	0.79	0.13-0.69	0.82-9.77
Total gas feed rate (LPM)	5	18.4	5-15	30
Destruction efficiency (%)	87.12	79	90-100	70-87
Energy efficiency (g/kWh)	0.184	68	-	3.63-20.07

สรุป

การกำจัดน้ำมันดินชีวมวลจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นด้วยเทคนิคการใช้พลาสมาความร้อนต่ำโดยการใช้สารประกอบแนฟทาลีนเป็นตัวแทนน้ำมันดินชีวมวล ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพกำจัดน้ำมันดินช่วงร้อยละ 70-87 ทั้งนี้ค่าความเข้มข้นน้ำมันดินที่เหลือยังคงปนไปกับแก๊สเชื้อเพลิงที่หลุดออกจากเตาปฏิกรณ์ หรืออีกนัยหนึ่งกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาการกำจัดน้ำมันดินมีระยะเวลาไม่เพียงพอต่อการสลายพันธะและการเปลี่ยนรูปเป็นแก๊สเชื้อเพลิง ในส่วนของประสิทธิภาพเชิงพลังงานพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 3.63-20.07 กรัมต่อหน่วยไฟฟ้าที่ระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าป้อนให้กับเตาปฏิกรณ์พลาสมา 10-12 กิโลโวลต์ หรือคิดเป็นกำลังไฟฟ้า 337-395 วัตต์ ขณะเดียวกันเตาปฏิกรณ์งานวิจัยนี้สามารถรองรับอัตราการไหลแก๊สที่สูงกว่าเตาปฏิกรณ์พลาสมาแบบไกลดิงอาร์คทั่วไป และสามารถขยายขนาดเพื่อพัฒนาในระดับอุตสาหกรรมสำหรับการกำจัดน้ำมันดินจริงจากระบบแก๊สซิฟิเคชั่นเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สสำหรับเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าชีวมวล

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณประจำปี 2560 จากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ รหัสโครงการวิจัยเลขที่ มจ.1-60-086 และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

เอกสารอ้างอิง

Basu, P. 2010. **Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory.** Academic press, Burlington USA.

Chun, Y.N., Kim, S.C. and Yoshikawa, K. 2012a. Destruction of biomass tar using a gliding arc plasma reformer. **International Journal of Environmental Protection** 2(12): 1-8.

Chun, Y.N., Kim, S.C. and Yoshikawa, K. 2012b. Removal characteristics of tar benzene using the externally oscillated plasma reformer. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification** 57: 65-74.

Cimerman, R., Rackova, D. and Hensel, K. 2018. Tars removal by non-thermal plasma and plasma catalysis. **Journal of Physics D: Applied Physics** 51(27): 1-13.

Energy Policy and Planning Office. 2015. **Alternative Energy Development Plan: AEDP2015.** Policy and Plan. Available Source: http://www.eppo.go.th/images/POLICY/ENG/AEDP2015ENG.pdf, November 22, 2020.

Fridman, A. 2008. **Plasma chemistry.** Cambridge University Press, USA.

Guofeng, X. and Xinwei, D. 2012. Electrical characterization of a reverse vortex gliding arc reactor in atmosphere. **IEEE Transactions on Plasma Science** 40(12): 3458-3464.

Hernández, J., Ballesteros, R. and Aranda, G. 2013. Characterization of tars from biomass gasification: effect of the operating conditions. **Energy** 50(1): 333-342.

Kalra, C.S., Cho, Y.I., Gutsol, A., Fridman, A. and Rufael, T.S. 2005. Gliding arc in tornado using a reverse vortex flow. **Review of Scientific Instruments** 76(2): 1-7.

Kunnikar, A. and Tippayawong, N. 2014. Destruction of model light tar using pulsed gliding arc

discharge, pp. 40-44. *In* **The 5th Joint Symposium between CMU and KU.** Chiang Mai, Thailand.

Lamacz, A., Krzton, A., Musi, A. and Costa, P.D. 2009. Reforming of model gasification tar compounds. **Catalysis Letters** 128(1): 40-48.

Nunnally, T., Tsangaris, A., Rabinovich, A., Nirenberg, G., Chernets, I. and Fridman, A. 2014. Gliding arc plasma oxidative steam reforming of a simulated syngas containing naphthalene and toluene. **International Journal of Hydrogen Energy** 39(23): 11976-11989.

Reed, T.B. and Das, A. 1988. **Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems.** Biomass Energy Foundation, USA.

Rios, M.L.V., González, A.M., Lora, E.E.S. and del Olmo, O.A.A. 2018. Reduction of tar generated during biomass gasification: A review. **Biomass and Bioenergy** 108: 345-370.

Sasujit, K., Dussadee, N., Homdoung, N., Ramaraj, R. and Kiatsiriroat, T. 2017. Waste-to-Energy: Producer Gas Production from Fuel Briquette of Energy Crop in Thailand. **International Energy Journal** 17(1): 37-46.

Sasujit, K., Dussadee, N. and Tippayawong, N. 2019. Development of a non-thermal gliding-arc discharge reactor for biomass tar treatment. **Engineering and Applied Science Research** 46(2): 170-175.

Tippayawong, N. and Inthasan, P. 2010. Investigation of light tar cracking in a gliding arc plasma system. **International Journal of Chemical Reactor Engineering** 8(1): 1-16.

Yang, Y.C. and Chun, Y.N. 2011. Naphthalene destruction performance from tar model compound using a gliding arc plasma reformer. **Korean Journal of Chemical Engineering** 28(2): 539-543.

Yu, L., Li, X., Tu, X., Wang, Y., Lu, S. and Yan, J. 2010. Decomposition of naphthalene by dc gliding arc gas discharge. **The Journal of Physical Chemistry A** 114(1): 360-368.

Zhu, F., Li, X., Zhang, H., Wu, A., Yan, J., Ni, M., Zhang, H. and Buekens, A. 2016. Destruction of toluene by rotating gliding arc discharge. **Fuel** 176: 78-85.

ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์และไซโทไคนิน ต่อการรอดชีวิตและการพัฒนาของยอดกุหลาบมอญในสภาพปลอดเชื้อ

Effect of Sodium Hypochlorite and Cytokinin Concentrations on Survival and Shoot Development of *In Vitro* Damask Rose (*Rosa damascena* Mill.)

ธนภูมิ ศิริงาม[1*] และ วาสินี พงษ์ประยูร[2]

Thanapoom Siringam[1*] and Wasinee Pongprayoon[2]

Received: 21 September 2020, Revised: 15 January 2021, Accepted: 5 February 2021

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันความแปรปรวนของสภาพแวดล้อมจัดเป็นปัญหาสำคัญในการขยายพันธุ์กุหลาบมอญที่ปลูกในสภาพแปลงกลางแจ้ง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออัตราการรอดชีวิต ปริมาณ และคุณภาพของกุหลาบมอญ ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์และไซโทไคนินต่อการขยายพันธุ์กุหลาบมอญภายใต้สภาพปลอดเชื้อ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design) จำนวน 5 ซ้ำ จากการศึกษาพบว่า ชิ้นส่วนข้อของกุหลาบมอญที่ฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และนำไปเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร Murashige and Skoog (MS, 1962) เป็นเวลา 28 วัน มีการปนเปื้อนมากที่สุด คือ 40.00±0.00 เปอร์เซ็นต์ ในทางตรงกันข้าม ชิ้นส่วนข้อที่ฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีการรอดชีวิตและการพัฒนาของเนื้อเยื่อมากที่สุด คือ 76.67±1.67 เปอร์เซ็นต์ และ 53.33±3.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเพาะเลี้ยงยอดบนอาหารสูตร MS ที่เติม BAP ความเข้มข้น 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีจำนวนยอดและจำนวนใบมากที่สุด คือ 2.67±0.17 ยอด และ 35.00±0.50 ใบ ตามลำดับ ส่วนยอดที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่ไม่เติม BAP

---

[1] สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีการเกษตรสมัยใหม่ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

[1] Modern Agricultural Technology Management Program, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University, Anusawaree, Bangkhen, Bangkok 10220, Thailand.

[2] ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

[2] Department of Biology, Faculty of Science, Burapha University, Saensook, Muang, Chonburi 20131, Thailand.

[*] ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): thanapoom@pnru.ac.th Tel: 08 0795 1451

มีความยาวยอด จำนวนราก และความยาวรากมากที่สุด เท่ากับ 2.05±0.15 เซนติเมตร 2.17±1.01 ราก และ 2.13±0.82 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 42 วัน

คำสำคัญ: การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช, การขยายพันธุ์พืช, สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช, กุหลาบ

ABSTRACT

In the present, environmental variation is an important problem for propagation of damask rose grown under field condition which affects survival, quantity and quality of damask rose. Therefore, the objective of this study was to investigate the effect of sodium hypochlorite and cytokinin concentrations on micropropagation of *in vitro* Damask rose. The experimental design was completely randomized design with 5 replications. The results showed that the highest contamination of 40.00±0.00% was obtained after single node explants of damask roses were sterilized by 5% and 10% (v/v) sodium hypochlorite and cultured on the Murashige and Skoog (1962) for 28 days. In contrast, the highest survival and development of 76.67±1.67% and 53.33±3.33%, respectively occurred when single node explants were sterilized by 15% (v/v) sodium hypochlorite. The greatest of shoot number (2.67±0.17) and leaf number (35.00±0.50) were found on MS medium supplemented with 2.00 mg L^{-1} BAP. In addition, the highest shoot length (2.05±0.15 cm), root number (2.17±1.01) and root length (2.13±0.82 cm) were achieved when shoot explants were cultured on the MS medium without BAP for 42 days.

Key words: plant tissue culture, plant propagation, plant growth regulators, rose

บทนำ

กุหลาบมอญ (*Rosa damascena* Mill.) อยู่ในวงศ์ Rosaceae เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในทวีปเอเชีย โดยพืชในวงศ์ Rosaceae มีมากกว่า 200 ชนิด และมากกว่า 18,000 สายพันธุ์ กุหลาบมอญจัดเป็นพืชดอกที่นิยมปลูกมากที่สุดชนิดหนึ่งในโลก เนื่องจากกุหลาบเป็นพืชดอกที่มีความสวยงามและมีมูลค่าทางการตลาดสูง (Hameed *et al.*, 2006) โดยนิยมนำมาปลูกเพื่อใช้ในการประดับตกแต่งสถานที่ให้มีความสวยงาม รวมทั้งใช้ประโยชน์ในทางพาณิชย์ทั้งในรูปแบบของไม้ตัดดอก นอกจากนี้กุหลาบมอญยังมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมความงามโดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์เวชสำอางต่างๆ และอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ น้ำหอม สารแต่งกลิ่น (Zeinali *et al.*, 2009; Bruneau *et al.*, 2007) เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยที่ได้จากกลีบดอกของกุหลาบมอญประกอบด้วย น้ำมัน คิดเป็น 0.12 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก และสารประกอบที่สามารถจำแนกลักษณะของสารได้ จำนวน 50 ชนิด คิดเป็น 99.06 เปอร์เซ็นต์ (Naquvi *et al.*, 2014) รวมทั้งยังมีสรรพคุณในทางเภสัชวิทยาเนื่องจากอุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในระดับสูงที่ช่วยในการต่อต้านมะเร็ง (Ren *et al.*, 2003) ต่อต้านริ้วรอย (Jafari *et al.*, 2008) ยาระบาย (Abbaszadeh *et a*l., 2010) ลดระดับน้ำตาลในเลือด (Gholamhoseinian *et al.*, 2010; Gholamhoseinian *et al.*, 2012) ยาต้านเบาหวาน

(Gholamhoseinian *et al*., 2009) ต้านเชื้อแบคทีเรีย (Basim and Basim, 2003) และต่อต้านกิจกรรมของจุลินทรีย์ (Aridogan *et al*., 2002)

ในปัจจุบันการปลูกและการขยายพันธุ์กุหลาบมอญนิยมใช้วิธีการติดตาและทาบกิ่ง ซึ่งเป็นวิธีการขยายพันธุ์พืชที่ต้องอาศัยความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน รวมทั้งความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างต้นตอและ กิ่งพันธุ์ รวมถึงความสามารถในการออกรากที่มีผลต่อความสำเร็จในการขยายพันธุ์กุหลาบมอญ (Horn *et al*., 1992) ในปัจจุบันการปลูกกุหลาบมอญส่วนใหญ่ปลูกในสภาพแปลงกลางแจ้งมักประสบปัญหาความแปรปรวนของสภาพแวดล้อมที่ส่งผลโดยตรงต่อการรอดชีวิต ปริมาณ และคุณภาพของกุหลาบ (Pati *et al*., 2006) ดังนั้นจึงควรศึกษาหาแนวทางการขยายพันธุ์กุหลาบมอญเพื่อให้ได้ต้นกุหลาบมอญที่มีความสมบูรณ์และตรงตามพันธุ์ ในปัจจุบันมีการนำเทคนิคการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชมาประยุกต์ใช้ในการขยายพันธุ์กุหลาบแต่ละชนิดมากขึ้น (Khosravi *et al*., 2007) การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชจัดเป็นเทคโนโลยีการผลิตพืชที่มีการนำองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมปัจจัยพื้นฐานที่จำเป็นต่อการเจริญและพัฒนาของพืช ได้แก่ ธาตุอาหาร แหล่งคาร์บอน สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช ค่าความเป็นกรด-เบส อุณหภูมิ ความชื้น แสง เป็นต้น ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการขยายพันธุ์พืช การพัฒนาพันธุ์พืช การผลิตสารทุติยภูมิจากพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ประโยชน์ในด้านการขยายพันธุ์พืชที่มีความแข็งแรงและปราศจากเชื้อสาเหตุของโรคพืช (Razavizadeh and Ehsanpour, 2008)

การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชจัดเป็นวิธีการที่สามารถเพิ่มปริมาณต้นพืชได้ภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว อย่างไรก็ตามขั้นตอนที่สำคัญในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช คือ การทำให้เนื้อเยื่อพืชสะอาดปราศจากการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ของสารฟอกกำจัดเชื้อที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ โดย Pumisutapon *et al*. (2018) พบว่า ชิ้นส่วนยอดของพืชสกุลกนกนารีที่ฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายเมอร์คิวริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 5 นาที มีเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนต่ำที่สุด และ มีเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตมากที่สุด ในขณะที่ชิ้นส่วนตายอดของต้นบูเซปที่ฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 20 นาที และสารละลายเมอร์คิวริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 10 นาที มีเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตมากที่สุด และมีเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนและการตายน้อยที่สุด เมื่อเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 4 สัปดาห์ (Laohavisuti *et al*., 2018) ส่วนเนื้อเยื่อปลายยอดของกล้วยหินที่ฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 10 นาที มีเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตมากที่สุด (Tudses *et al*., 2019) นอกจากนี้ยังมีรายงานที่แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารฟอกกำจัดเชื้อมีความสัมพันธ์ต่อเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตของเนื้อเยื่อพืชหลายชนิด เช่น ไพล (Khamrit and Preeman, 2019) ไวท์อนูเบียส (Srisawang *et al*., 2019) สตรอเบอรี (Topoonyanont *et al*., 2019) ส้มซ่า (Somsong, 2013) และ กาบหอยแครง (Jala and Paitoon, 2013) ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาความเข้มข้นของสารฟอกกำจัดเชื้อที่เหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกุหลาบ

การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านการขยายพันธุ์พืชนิยมนำสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชมาเป็นองค์ประกอบในอาหารเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารควบคุมการเจริญเติบโตในกลุ่มไซโทไคนินที่มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มจำนวนยอดและจำนวนต้น โดย

Gogoi *et al*. (2017) รายงานว่า การเพาะเลี้ยงชิ้นส่วนข้อของมัลเบอร์รี่พันธุ์ K-2 บนอาหารสูตร Murashige and Skoog (MS, 1962) ที่เติม kinetin (Kn) ความเข้มข้น 1.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถเพิ่มจำนวนยอดและความยาวยอดใหม่ได้ ในขณะที่ Baig *et al*. (2011) พบว่าชิ้นส่วนปลายยอดของยี่สุ่นที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่เติม 6-Benzylaminopurine; (BAP) ความเข้มข้น 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีจำนวนยอด ความยาวยอด น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งมากที่สุด นอกจากนี้ยังมีรายงานการนำสารควบคุมการเจริญเติบโต กลุ่มไซโทไคนินมาใช้ประโยชน์ในการเพิ่มปริมาณพืชหลายชนิด เช่น พรมมิ (Kachonpadungkitti and Jala, 2014) มัลเบอร์รี่ (Chumpookam *et al*., 2017) ดาหลา (Prasertsongskun, 2016) กุหลาบ (Nak-Udom *et al*., 2009) แก้วมังกร (Kachonpadungkitti and Jala, 2016) ว่านค้างคาวดำ (Sukkeaw *et al*., 2016) กะเพราแดง (Autaijamsripon *et al*., 2019) และ องุ่น (Kaewpiboon and Boonnak, 2019) อย่างไรก็ตามการศึกษาการขยายพันธุ์กุหลาบมอญภายใต้สภาพปลอดเชื้อยังคงมีรายงานไม่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเข้มข้นของสารฟอกกำจัดเชื้อและสารควบคุมการเจริญเติบโตกลุ่มไซโทไคนินต่อการรอดชีวิตและการพัฒนาของยอดกุหลาบมอญที่เพาะเลี้ยงในสภาพปลอดเชื้อ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ต่อการรอดชีวิตของชิ้นส่วนข้อกุหลาบมอญ

นำชิ้นส่วนข้อของกุหลาบมอญ ความยาว 3.00±0.50 เซนติเมตร มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปาไหลผ่านเป็นเวลา 10 นาที แล้วทำความสะอาดบริเวณพื้นผิวโดยแช่ในแอลกอฮอล์ ความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นนำชิ้นส่วนข้อมาฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (Haiter®) ที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เติมสารลดแรงตึงผิว (Sunlight®) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร นำไปเขย่าภายในตู้ปลอดเชื้อ เป็นเวลา 15 นาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นที่นึ่งกำจัดเชื้อแล้ว จำนวน 3-5 ครั้ง จนกระทั่งไม่มีฟองของสารกำจัดเชื้อ

หลังจากนั้นนำชิ้นส่วนข้อมาตัดแต่งให้มีความยาว 1.00±0.50 เซนติเมตร เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS (1962) ที่เติมน้ำตาลซูโครส 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร Gellan Gum (Kelcogel® CP Kelco A HUBER COMPANY, USA) จำนวน 0.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และมีค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 5.60±0.20 หลังจากนั้นนำไปวางบนชั้นเพาะเลี้ยงภายในห้องเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ ที่มีอุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส และได้รับแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนส์ (TLD 36 W/84 Cool White 3350 Im, Philips, Thailand) ความเข้มแสง 60±5 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 16 ชั่วโมงต่อวัน หลังการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 28 วัน ทำการบันทึกข้อมูลการปนเปื้อน การรอดชีวิต และการพัฒนาของชิ้นส่วนข้อกุหลาบมอญ โดยมีวิธีการบันทึกข้อมูล ดังนี้

1) การปนเปื้อน (เปอร์เซ็นต์) สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{การปนเปื้อน (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{\text{จำนวนชิ้นส่วนข้อที่ปนเปื้อน}}{\text{จำนวนชิ้นส่วนข้อที่เพาะเลี้ยง}} \times 100$$

2) การรอดชีวิต (เปอร์เซ็นต์) สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{การรอดชีวิต (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{\text{จำนวนชิ้นส่วนข้อที่รอดชีวิต}}{\text{จำนวนชิ้นส่วนข้อที่เพาะเลี้ยง}} \times 100$$

3) การพัฒนาของชิ้นส่วนข้อ (เปอร์เซ็นต์) สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{การพัฒนาของชิ้นส่วนข้อ (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{\text{จำนวนชิ้นส่วนข้อที่มีการพัฒนา}}{\text{จำนวนชิ้นส่วนข้อที่เพาะเลี้ยง}} \times 100$$

2. ผลของความเข้มข้นของ BAP ต่อการพัฒนาของยอดกุหลาบมอญ

นำยอดของกุหลาบมอญที่มีอายุ 28 วันหลังฟอกกำจัดเชื้อ มาเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่เติม BAP (Merck, Germany) ความเข้มข้น 0.00 0.50 1.00 2.00 และ 3.00 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำตาลซูโครส 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร Gellan Gum (Kelcogel® CP Kelco A HUBER COMPANY, USA) จำนวน 0.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และมีค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 5.60±0.20 หลังจากนั้นนำไปวางบนชั้นเพาะเลี้ยงภายในห้องเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ ที่มีอุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส และได้รับแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนส์ (TLD 36 W/84 Cool White 3350 Im, Philips, Thailand) ความเข้มแสง 60±5 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 16 ชั่วโมงต่อวัน หลังการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 42 วัน ทำการบันทึกข้อมูลจำนวนยอด ความยาวยอด จำนวนใบ จำนวนราก และ ความยาวราก

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design) จำนวน 5 ซ้ำ นำข้อมูลการปนเปื้อน การรอดชีวิต และการพัฒนาของเนื้อเยื่อกุหลาบมอญมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยโปรแกรมประยุกต์ทางสถิติ และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างสิ่งทดลองโดยวิธี Tukey's ที่ระดับนัยสำคัญ $p \leq 0.05$

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ต่อการรอดชีวิตของชิ้นส่วนข้อกุหลาบมอญ

จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ที่แตกต่างกัน 4 ระดับ มีผลต่อการปนเปื้อน การรอดชีวิต และการพัฒนาของชิ้นส่วนข้อกุหลาบมอญอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 1) โดยการปนเปื้อนของชิ้นส่วนข้อเกิดขึ้นมากที่สุด เท่ากับ 40.00±0.00 เปอร์เซ็นต์ เมื่อฟอกกำจัดเชื้อชิ้นส่วนข้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในขณะที่การฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีการปนเปื้อนน้อยที่สุด เท่ากับ 23.33±1.67 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับการฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (Table 1)

ชิ้นส่วนข้อที่ฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีการรอดชีวิตมากที่สุด เท่ากับ 76.67±1.67 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับการฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

มีการรอดชีวิตน้อยที่สุด เท่ากับ 60.00±0.00 เปอร์เซ็นต์ (Table 1)

การพัฒนาของชิ้นส่วนข้อไปเป็นยอดเกิดขึ้นมากที่สุด เท่ากับ 53.33±6.67 เปอร์เซ็นต์ และ 53.33±3.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 5 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับการฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในขณะที่การฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีการพัฒนาของชิ้นส่วนข้อไปเป็นยอดน้อยที่สุด เท่ากับ 26.67±6.67 เปอร์เซ็นต์ (Table 1)

Table 1 Contamination (%), survival (%) and development (%) of single node explants of damask rose sterilized with sodium hypochlorite at 5, 10, 15 and 20 % (v/v) after culturing on MS medium for 28 days

Sodium Hypochlorite (%) (v/v)	Contamination (%)	Survival (%)	Development (%)
5	40.00±0.00 a	60.00±0.00 b[1/]	53.33±6.67 a
10	40.00±0.00 a	60.00±0.00 b	46.67±6.67 a
15	23.33±1.67 b	76.67±1.67 a	53.33±3.33 a
20	26.67±6.67 b	73.33±6.67 a	26.67±6.67 b
ANOVA	*	*	*

* Statistical significant different at $p \leq 0.05$

[1/]Means ± S.E. within column with the same letter are not significantly different at $p \leq 0.05$ by Tukey's ANOVA, Analysis of variance

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการฟอกกำจัดเชื้อชิ้นส่วนข้อของกุหลาบมอญ เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์มีสารประกอบประเภทเกลือที่มีคุณสมบัติเป็นสารฟอกขาวเป็นองค์ประกอบ นิยมนำมาใช้ประโยชน์ในการทำความสะอาดเนื่องจากมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ได้ ในการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ส่งผลต่อความสำเร็จในการฟอกกำจัดเชื้อชิ้นส่วนข้อกุหลาบมอญ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากการรอดชีวิตและการพัฒนาของชิ้นส่วนข้อกุหลาบมอญ (Table 1) โดยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีผลทำให้ชิ้นส่วนข้อของกุหลาบมอญมีการรอดชีวิตน้อยที่สุดและมีการปนเปื้อนมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์อาจมีปริมาณสารออกฤทธิ์ที่มีประสิทธิภาพในการฟอกกำจัดเชื้อต่ำ ทำให้กำจัดเชื้อบนชิ้นส่วนข้อของกุหลาบมอญได้น้อย จึงมีผลทำให้มีการปนเปื้อนมากที่สุดและมีการรอดชีวิตน้อยที่สุด โดย Laohavisuti *et al.* (2018) ที่รายงานว่า ชิ้นส่วนตายอดของต้นบูเซปที่ฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร นาน 20 นาที และสารละลายเมอร์คิวริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร นาน 10 นาที มีการรอดชีวิต

มากที่สุด เท่ากับ 90.00±6.88 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นส่วนตายอดของต้นบูเซปที่ฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์และสารละลาย เมอร์คิวริกคลอไรด์ในระดับความเข้มข้นอื่น

ส่วนสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แม้ว่าจะมีอัตราการรอดชีวิตของเนื้อเยื่อกุหลาบมอญไม่แตกต่างทางสถิติกับสารละลายสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แต่มีการพัฒนาของเนื้อเยื่อกุหลาบมอญน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานทดลองของ Khamrit and Preeman (2019) ที่พบว่า สารฟอกกำจัดเชื้อที่ระดับความเข้มข้นสูงอาจเป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อของพืชและส่งผลทำให้เนื้อเยื่อพืชมีการพัฒนาน้อยและตายในที่สุด นอกจากนี้ชนิดของชิ้นส่วนพืช จำนวนครั้งและระยะเวลาในการฟอกกำจัดเชื้อล้วนส่งผลต่อการปนเปื้อนและการรอดชีวิตของเนื้อเยื่อพืช โดย Topoonyanont *et al*. (2019) รายงานว่า การฟอกกำจัดเชื้อชิ้นส่วนไหลของสตรอเบอรีพันธุ์พระราชทาน 80 ในระยะปลายยอดตูมด้วยสารละลายเมอร์คิวริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตมากที่สุด แต่มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตลดลงเมื่อนำชิ้นส่วนไหลในระยะใบขนาดกลางและระยะใบแผ่เต็มที่มาฟอกกำจัดเชื้อ ในขณะที่ชิ้นส่วนไหลของสตรอเบอรีพันธุ์ 329 ในระยะปลายยอดตูม ระยะใบขนาดกลางและระยะใบแผ่เต็มที่ที่ฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายเมอร์คิวริกคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ส้มซ่ามีเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตมากที่สุดเมื่อฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 1.00-1.50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (Somsong, 2013)

2. ผลของความเข้มข้นของ BAP ต่อการพัฒนาของยอดกุหลาบมอญ

จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของ BAP ที่แตกต่างกัน 5 ระดับ มีผลต่อจำนวนยอด ความยาวยอด จำนวนใบ จำนวนราก และความยาวรากอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 2) โดยมีจำนวนยอดมากที่สุด เท่ากับ 2.67±0.44 และ 2.67±0.17 ยอด เมื่อเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่เติม BAP ความเข้มข้น 1.00 และ 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับจำนวนยอดที่พัฒนาบนอาหารสูตร MS ที่เติม BAP ความเข้มข้น 3.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีจำนวนยอด 2.00±0.00 ยอด จำนวนยอดที่พัฒนาบนอาหารสูตร MS ที่ไม่เติม BAP และ เติม BAP ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีจำนวนยอดน้อยที่สุด เท่ากับ 1.00±0.00 และ 1.00±0.00 ยอด ตามลำดับ (Table 2)

ยอดที่พัฒนาบนอาหารสูตร MS ที่ไม่เติม BAP มีความยาวยอดมากที่สุด เท่ากับ 2.05±0.15 เซนติเมตร ในขณะที่ยอดที่พัฒนาบนอาหารสูตร MS ที่เติม BAP ความเข้มข้น 2.00 และ 3.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความยาวยอดน้อยที่สุด เท่ากับ 0.72±0.03 และ 0.72±0.02 เซนติเมตร ตามลำดับ แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับความยาวของยอดที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่เติม BAP ความเข้มข้น 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีความยาวยอด เท่ากับ 0.77±0.04 เซนติเมตร (Table 2 and Figure 1)

ยอดที่พัฒนาบนอาหารสูตร MS ที่เติม BAP ความเข้มข้น 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีจำนวนใบมากที่สุด เท่ากับ 35.00±0.50 ใบ แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับค่าดังกล่าวของยอดที่พัฒนาบนอาหารสูตร MS ที่เติม BAP ความเข้มข้น 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีจำนวนใบ เท่ากับ 33.67±0.44 ใบ (Table 2) ในขณะที่ยอดที่พัฒนาบนอาหารสูตร MS ที่ไม่เติม BAP มีจำนวนใบน้อยที่สุด เท่ากับ 22.17±2.59 ใบ

แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับจำนวนใบของยอดที่พัฒนาบนอาหารสูตร MS ที่เติม BAP ความเข้มข้น 0.50 และ 3.00 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีจำนวนใบเท่ากับ 26.00±0.29 และ 22.67±0.73 ใบ ตามลำดับ ในขณะที่ยอดที่พัฒนาบนอาหารสูตร MS ที่ไม่เติม BAP มีการพัฒนาของราก โดยมีจำนวนรากและความยาวราก เท่ากับ 2.17±1.01 ราก และ 2.13±0.82 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนยอดที่พัฒนาบนอาหารสูตร MS ที่เติม BAP ความเข้มข้น 0.50 1.00 2.00 และ 3.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีการพัฒนาของราก (Table 2 and Figure 2)

BAP เป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตในกลุ่มไซโทไคนินที่มีผลในการควบคุมการขยายขนาดและการเปลี่ยนแปลงของเซลล์พืชที่มีความสำคัญต่อการกระตุ้นการเจริญและพัฒนาของเนื้อเยื่อส่วนตาของพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มปริมาณยอดใหม่ ดังเช่นผลการทดลองที่แสดงให้เห็นว่ายอดกุหลาบมอญที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่เติม BAP ความเข้มข้น 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีจำนวนยอดและจำนวนใบมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานทดลองของ Hameed *et al*. (2006) ที่พบว่า ยอดกุหลาบที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่เติม BAP ความเข้มข้น 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีเปอร์เซ็นต์การเกิดยอดใหม่มากที่สุด ในขณะที่ยอดกุหลาบที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่เติม BAP ความเข้มข้น 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีจำนวนยอดมากที่สุด ส่วน Sharma *et al*. (2014) รายงานว่า อาหารสูตร MS ที่เติม BAP ความเข้มข้น 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถชักนำยอดใหม่จากข้อของกะเพราได้ อย่างไรก็ตามการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชกลุ่มไซโทไคนินควรต้องคำนึงถึงชนิด ความเข้มข้น และชนิดของชิ้นส่วนพืช ดังเช่นงานทดลองของ Palee (2016) ที่พบว่า การเพาะเลี้ยงเอ็มบริโอของลิงลาว (*Tupistra albiflora* K. Larsen) บนอาหารสูตร MS ที่เติม 6-Benzyladenine (BA) ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้มีเปอร์เซ็นต์การเกิดยอดและรากสูงสุดเมื่อเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ในขณะที่ Chumpookam *et al*. (2017) รายงานว่า การเพาะเลี้ยงใบอ่อนของมัลเบอร์รี่พันธุ์เชียงใหม่ 60 บนอาหารสูตร MS ที่เติม Thidiazuron (TDZ) ความเข้มข้นตั้งแต่ 1.00-3.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้มีการตอบสนองของแผ่นใบอ่อนที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการเพาะเลี้ยงใบอ่อนของมัลเบอร์รี่พันธุ์เชียงใหม่ 60 บนอาหารสูตร MS ที่เติม TDZ ความเข้มข้น 4.00 และ 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 30 วัน

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่ายอดกุหลาบมอญที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่เติม BAP ความเข้มข้นตั้งแต่ 1.00-3.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความยาวยอดลดลงอย่างเด่นชัด รวมทั้งยังไม่พบการพัฒนาของรากทั้งในด้านจำนวนรากและความยาวราก ในทางตรงกันข้ามยอดกุหลาบมอญที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่ไม่เติม BAP มีความสูง จำนวนราก และความยาวรากมากที่สุด (Table 2) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการชักนำยอดโดยใช้สารควบคุม การเจริญเติบโตในกลุ่มไซโทไคนินที่มีความเข้มข้นสูงเป็นเวลานานทำให้เกิดการสะสมไซโทไคนินภายในเนื้อเยื่อพืชมีผลทำให้สัดส่วนของสารควบคุมการเจริญเติบโตในกลุ่มไซโตไคนินในเนื้อเยื่อพืชมีปริมาณมากกว่ากลุ่มออกซิน ทำให้เกิดภาวะไม่สมดุลของสารควบคุมการเจริญเติบโตภายในพืช ส่งผลทำให้ยอดที่ถูกชักนำจากการได้รับ BAP ความเข้มข้นสูงไม่สามารถออกรากได้ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Chanprame *et al*. (2018) ที่พบว่าชิ้นส่วนข้อของสักที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 6.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการเกิดยอดใหม่เฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 7.10 ยอดต่อข้อ ส่วนอาหารที่ไม่เติม BA เกิดยอดใหม่เฉลี่ย เท่ากับ 2.00 ยอด อย่างไรก็ตาม

ลักษณะยอดใหม่ที่เกิดขึ้นมีลักษณะข้อสั้น แต่ละยอดมีความสูงไม่สม่ำเสมอ ใบหงิกงอ และมีลักษณะฉ่ำน้ำ ในขณะที่ผลการทดลองของ Kachonpadungkitti and Jala (2014) รายงานว่า ต้นพรมมิที่เพาะเลี้ยงในอาหารสูตร MS ที่ไม่เติม BA มีความสูงมากกว่าต้นพรมมิที่เพาะเลี้ยงในอาหารสูตร MS ที่เติม BA ความเข้มข้น 0.10 0.20 0.50 1.00 และ 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร เช่นเดียวกันกับงานทดลองของ Kachonpadungkitti and Jala (2016) ที่พบว่า เนื้อเยื่อใบแก้วมังกรที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ที่ไม่เติม BA และ kinetin (Kn) มีความสูงและความยาวรากมากที่สุด รวมทั้งยังพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ BA และ Kn ในอาหารเพาะเลี้ยงมีผลทำให้ความสูง จำนวนราก และความยาวรากมีแนวโน้มลดลง

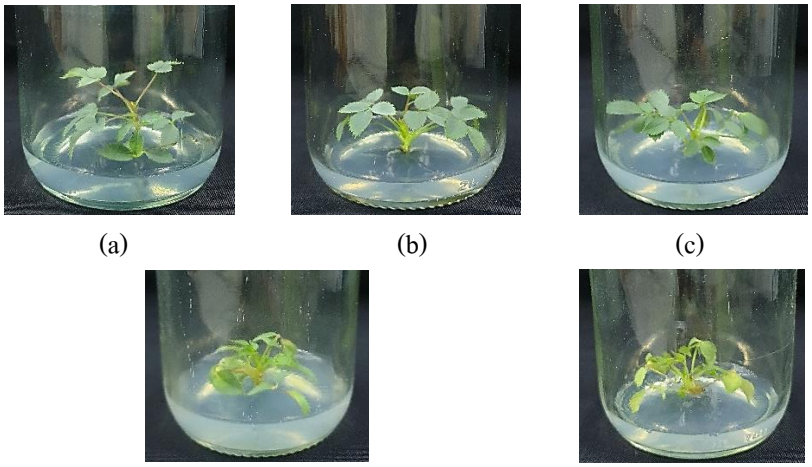
Table 2 Shoot length (cm), shoot number, leaf number, root number and root length (cm) of shoot explants of damask rose cultured on MS (1962) medium supplemented with BAP at the concentrations of 0.00, 0.50, 1.00, 2.00 and 3.00 mg L^{-1} after culturing for 42 days

BAP (mg L^{-1})	Shoot length (cm)	Shoot number	Leaf number	Root number	Root length (cm)
0.00	2.05±0.15 a	1.00±0.00 b	22.17±2.59 b	2.17±1.01 a	2.13±0.82 a
0.50	1.20±0.22 b	1.00±0.00 b	26.00±0.29 b	0.00±0.00 b[1/]	0.00±0.00 b
1.00	0.77±0.04 c[1/]	2.67±0.44 a	33.67±0.44 a	0.00±0.00 b	0.00±0.00 b
2.00	0.72±0.03 c	2.67±0.17 a	35.00±0.50 a	0.00±0.00 b	0.00±0.00 b
3.00	0.72±0.02 c	2.00±0.00 a	22.67±0.73 b	0.00±0.00 b	0.00±0.00 b
ANOVA	*	*	*	*	*

* Statistical significant different at $p \leq 0.05$

[1/]Means ± S.E. within column with the same letter are not significantly different at $p \leq 0.05$ by Tukey's

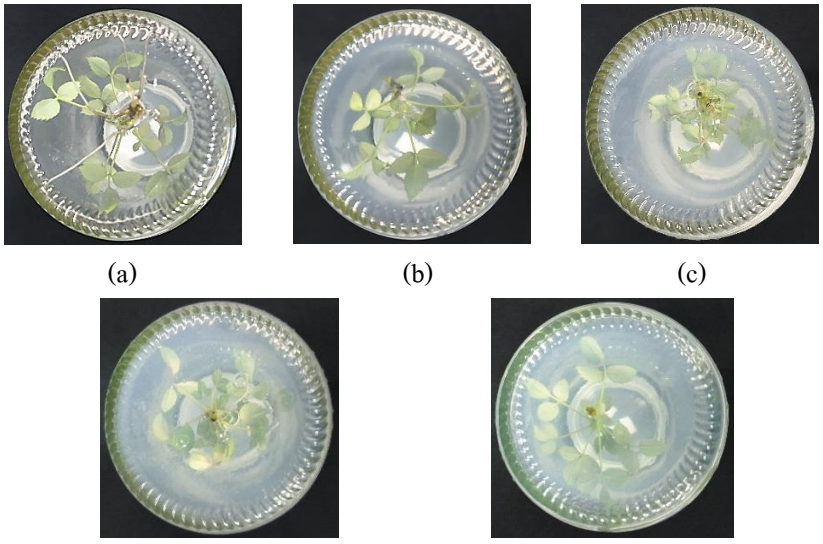
ANOVA, Analysis of variance



(a) (b) (c)

(d) (e)

Figure 1 Shoot explants of damask rose cultured on MS (1962) medium supplemented with BAP at the concentrations of 0.00 (a), 0.50 (b), 1.00 (c), 2.00 (d) and 3.00 (e) mg L^{-1} after culturing for 42 days



(a) (b) (c)

(d) (e)

Figure 2 Root development of damask rose cultured on MS (1962) medium supplemented with BAP at the concentrations of 0.00 (a), 0.50 (b), 1.00 (c), 2.00 (d) and 3.00 (e) mg L^{-1} after culturing for 42 days

สรุป

ชิ้นส่วนข้อกุหลาบมอญที่ฟอกกำจัดเชื้อด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีเปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตและการพัฒนาของเนื้อเยื่อมากที่สุด ในขณะที่ยอดกุหลาบมอญที่พัฒนาบนอาหารสูตร MS ที่เติม BAP ความเข้มข้น 1.00 และ 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีจำนวนยอดและจำนวนใบมากที่สุด ส่วนยอดที่พัฒนาบนอาหารสูตร MS ที่ไม่เติม BAP มีความยาวยอด จำนวนราก และความยาวรากมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

Abbaszadeh, M., Kazerani, H.R. and Kamrani, A. 2010. Laxative effects of *Rosa damascena*

Mill. in dogs. **Journal of Applied Animal Research** 38(1): 89-92.

Aridogan, B.C., Baydar, H., Kaya, S., Demirci, M., Ozbasar, D. and Mumcu, E. 2002. Antimicrobial activity and chemical composition of some essential oils. **Archives of Pharmacal *Research*** 25(6): 860-864.

Autaijamsripon, J., Jirakiattikul, Y., Rithichai, P. and Itharat, A. 2019. Effect of plant growth regulators on *in vitro* shoot multiplication and root induction of *Ocimum sanctum* L. (Holy Basil Purple Type). **Thai Science and Technology Journal** 27(4): 630-638. (in Thai)

Baig, M.M.Q., Hafiz, I.A., Hussain, A., Ahmad, T. and Abbasi, N.A. 2011. An efficient protocol for *in vitro* propagation of *Rosa gruss an teplitz* and *Rosa centifolia*. **African Journal of Biotechnology** 10(22): 4564-4573.

Basim, E. and Basim, H. 2003. Antibacterial activity of *Rosa damascena* essential oil. **Fitoterapia** 74(4): 394-396.

Bruneau, A., Starr, J.R. and Joly, S. 2007. Phylogenetic relationships in the Genus Rosa: New evidence from chloroplast DNA sequences and an appraisal of current knowledge. **Systematic Botany** 32(2): 366-378.

Chanprame, S., Sontikun, Y., Onwimol, P. and Chanprame, S. 2018. Shoots Induction from *In Vitro* Node of Teak. **King Mongkut's Agricultural Journal** 36(2): 126-134. (in Thai)

Chumpookam, J., Kaewnabon, K. and Chanchula, N. 2017. *In vitro* micropropagation of 'Chiangmai 60' and 'Vietnam GQ2' mulberry. **Thai Journal of Science and Technology** 5(3): 273-282. (in Thai)

Gholamhoseinian, A., Shahouzehi, B., Joukar, S. and Iranpoor, M. 2012. Effect of *Quercus infectoria* and *Rosa damascena* on lipid profile and atherosclerotic plaque formation in rabbit model of hyperlipidemia. ***Pakistan Journal* of *Biological Sciences*** 15(1): 27-33.

Gholamhoseinian, A., Shahouzehi, B. and Sharififar, F. 2010. Inhibitory effect of some plant extract on pancreatic lipase. **International Journal of Pharmacology** 6(1): 18-24.

Gholamhoseinian, A., Fallah, H. and Sharififar, F. 2009. Inhibitory effect of methanol extract of *Rosa damascena* Mill. Flowers on aglucosidase activity and postprandial hyperglycemia in normal and diabetic rats. **Phytomedicine** 16(10): 935-941.

Gogoi, G., Borua, P.K. and Al-Khayri, J.M. 2017. Improved micropropagation and *in vitro* fruiting of *Morus indica* L. (K-2 cultivar). **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology** 15(1): 249-256.

Hameed, N., Shabbir, A., Ali, A. and Bajwa, R. 2006. *In vitro* micropropagation of disease free rose (*Rosa indica* L.). **Mycopathology** 4(2): 35-38.

Horn, W.A.H., Schlegel, G. and Lerstuhl, K.J. 1992. Micropropagation of roses (*Rosa hybrida*). **Acta Horticulturae** 226: 623-627.

Jafari, M., Zarban, A., Pham, S. and Wang, T.J. 2008. *Rosa damascena* decreased mortality in adult Drosophila. **Journal of Medicinal Food** 11(1):9-13.

Jala, A. and Paitoon, S. 2013. Micropropagation of *Dionaea muscipula* by tissue culture. **Thai Journal of Science and Technology** 2(2): 134-139. (in Thai)

Kachonpadungkitti, Y. and Jala, A. 2014. Influence of BA and NAA on inducing new shoots and roots in *Bacopa monaneiri* (L.) Pennel *in vitro*. **Thai Journal of Science and Technology** 3(1): 7-14. (in Thai)

Kachonpadungkitti, Y. and Jala, A. 2016. Influence of BA, IAA, 2,4-D and Kinetin on micropropagation of *Hylocereus undatus* from segments of hypocotyl and true leaf. **Thai Journal of Science and Technology** 4(2): 147-154. (in Thai)

Kaewpiboon, C. and Boonnak, N. 2019. Effect of plant growth regulators on the grape callus induction and growth for secondary metabolite production. **Thai Science and Technology Journal** 27(4):675-683. (in Thai)

Khamrit, R. and Preeman, J. 2019. *In vitro* surface sterilization and shoot induction from the rhizome of *Zingiber montanum*. **Khon Kaen Agriculture Journal** 47(1) (Suppl.): 1393-1398. (in Thai)

Khosravi, P., Kermani, M.J., Nematzadeh, G.A. and Bihamta, M.R. 2007. A protocol for mass production of *Rosa hybrida* cv. Iceberg through *in vitro* propagation. **Iranian Journal of Biotechnology** 5(2): 100-104.

Laohavisuti, N., Ruangdej, U., Seesanong, S. and Wangwibulkit, S. 2018. Effect of disinfectants and plant growth regulator in aquatic plant *Bucephalandra* sp. Micropropagation. **King Mongkut's Agricultural Journal** 35(2): 95-103. (in Thai)

Murashige, T. and Skoog, F. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with Tobacco tissue culture. **Physiologia Plantarum** 15(3): 473-497.

Nak-Udom, N., Kanchanapoom, K. and Kanchanapoom, K. 2009. Micropropagation from cultured nodal explants of rose (*Rosa hybrida* L. cv. 'Perfume Delight'). **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 31(6): 583-586.

Naquvi, K.J., Ansari, S.H., Ali M. and Najmi, A.K. 2014. Volatile oil composition of *Rosa damascene* Mill. (Rosaceae). **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry** 2(5): 130-134.

Palee, J. 2016. Natural propagation and micropropagation of *Tupistra albiflora* K. Larsen. **Science and Technology RMUTT Journal** 6(2): 1-16. (in Thai)

Pati, P.K., Rath, S.P., Sharma, M., Sood, A. and Ahuja, P.S. 2006. *In vitro* propagation of rose: A review. **Biotechnology Advance** 24(1): 94-114.

Prasertsongskun, S. 2016. *In vitro* propagation of *Etlingera elatior*. **Journal of Yala Rajabhat University** 10(2): 21-28. (in Thai)

Pumisutapon, P., Saisueb, S. and Rodpradit, S. 2018. Studies on surface sterilization and callus

induction in *Selaginella*. **Agricultural Science Journal** 49(1)(Suppl.): 270-272. (in Thai)

Razavizadeh, R. and Ehsanpour, A.A. 2008. Optimization of *in vitro* propagation of *Rosa hybrida* L. cultivar Black Red. **American-Eurasian Journal of Agricultural Environment Science** 3(1): 96-99.

Ren, W., Qiao, Z., Wang, H., Zhu, L. and Zhang, L. 2003. Flavonoids: promising anticancer agents. **Medicinal Research Reviews** 23(4): 519-534.

Sharma, N.K., Choudhary, R.C. and Kumar, M. 2014. An improved plant regeneration system of *Ocimum sanctum* L- An important Indian holy basil plant. **Journal of Cell Tissue Research** 14(1): 4143-4148.

Somsong, U. 2013. Tissue culture of *citrus medica* L. var. *linetta Risso*. **Prawarun Agricultural Journal** 10(1): 29-37. (in Thai)

Srisawang, A., Laohavisuti, N. and Ruangdej, U. 2019. The optimum sterilization procedures on micropropagation of *Anubias* sp. 'White'. **King Mongkut's Agricultural Journal** 37(4): 648-654. (in Thai)

Sukkeaw, T., Ramasoot, S. and Parinyapong Chareonsap, P. 2016. Microprapagation of Black Bat Flower. **Wichcha Journal** 35(2): 33-40. (in Thai)

Topoonyanont, N., Audtama, N. and Kaewdam, T. 2019. Factors affecting micropropagation system of strawberry cv. Praratchatan 80 and cv. 329. **Thai Journal of Science and Technology** 8(2): 176-189. (in Thai)

Tudses, N., Phungbunhan, K. and Audta, L. 2019. Effects of BA and NAA on growth and development of *Musa sapientum* (ABB group) cv 'Kluai Hin' *in vitro* and effects of substrate on growth *in vivo*. **King Mongkut's Agricultural Journal** 37(2): 262-273. (in Thai)

Zeinali, H., Tabaei-Aghdaei, S.R. and Arzani, A. 2009. A study of morphological variations and their relationship with flower yield and yield components in *Rosa damascena*. **Journal of Agricultural Science and Technology** 11(4): 439-448.

จลนศาสตร์การถ่ายเทมวลและคุณภาพทางเคมีกายภาพของมะขามป้อมจากการดึงน้ำออกโดยวิธีออสโมซิสด้วยสารละลายน้ำตาลผสมเข้มข้น

Mass Transfer Kinetics and Physicochemical Quality of Amla from Osmotic Dehydration using Mixed Sugar Concentrated Solutions

วิชมณี ยืนยงพุทธกาล[1*] อภิศักดิ์ ไชยโรจน์วัฒนา[2] และ ศุภิสรา เปี่ยมผล[1]

Wichamanee Yuenyongputtakal[1*], Apisak Chairojwattna[2] and Supissara Piempol[1]

Received: 5 November 2020, Revised: 25 December 2020, Accepted: 5 February 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสัดส่วนน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสและน้ำตาลซูโครสในการเตรียมสารละลายออสโมติกความเข้มข้น 70 กรัม/100 กรัม สำหรับการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสจากเนื้อมะขามป้อม วิเคราะห์จลศาสตร์การถ่ายเทมวลตามกฎข้อที่สองของฟิค ที่พิจารณาภายใต้เงื่อนไขสำหรับวัสดุที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบ โดยทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็ง ผลการทำนาย พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำมีค่าระหว่าง $1.41*10^{-8}$ m^2/s และ $5.00*10^{-8}$ m^2/s ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็งมีค่าระหว่าง $0.45*10^{-8}$ m^2/s และ $2.15*10^{-8}$ m^2/s จากผลการทดลองพบแนวโน้มว่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) และปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (WR) เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของซูโครสที่ใช้ โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้สัดส่วนของน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตส 50% และน้ำตาลซูโครส 50% โดยออสโมซิสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ทำให้มีค่า WL SG และ WR เท่ากับ 46.01%, 2.25% และ 41.75% ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีกายภาพพบว่า มะขามป้อมหลังการออสโมซิสมีปริมาณความชื้นและค่า a_w ลดลง และมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณพฤกษเคมีลดลงกว่ามะขามป้อมสด โดยมะขามป้อมหลังการออสโมซิสมีปริมาณวิตามินซี 10.70 mg/g ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 248.17 mg GAE/g และสมบัติต้านอนุมูลอิสระ DPPH 78.10% ซึ่งมากกว่าเมื่อออสโมซิสด้วยน้ำตาลซูโครส 27.20% 20.13% และ 2.48% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการเลือกใช้โอลิโกฟรุกโตสร่วมด้วยทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นจึงเหมาะสำหรับตลาดอาหารเพื่อสุขภาพมูลค่าสูง

คำสำคัญ: น้ำตาลโอลิโกฟรุกโตส, น้ำตาลซูโครส, มะขามป้อม, จลนศาสตร์การถ่ายเทมวล

---

[1] ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

[1] Department of Food Science, Faculty of Science, Burapha University, Saensook, Mueang, ChonBuri 20131, Thailand.

[2] ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

[2] Department of Mathematics, Faculty of Science, Burapha University, Saensook, Mueang, ChonBuri 20131, Thailand.

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

ABSTRACT

The effect of proportions of oligofructose and sucrose to prepared 70 g/100g osmotic solution on Amla flesh osmotic dehydration were investigated. An analytical solution of Fick's second law for diffusion in infinite slab geometry successfully determined mass transfer kinetics in terms of the effective water and solid diffusion coefficient. The predicted water diffusion coefficients were between $1.41*10^{-8}$ m^2/s and $5.00*10^{-8}$ m^2/s, whereas solid diffusion coefficients were between $0.45*10^{-8}$ m^2/s, and $2.15*10^{-8}$ m^2/s. Based on these results, it can be concluded that water loss (WL), solid gain (SG), and weight reduction (WR) increased with sucrose concentration. It was found that the most appropriate condition was using the proportion of 50% oligofructose and 50% sucrose and osmosis for 10 hours yielding WL, SG and WR equal to 46.01%, 2.25%, and 41.75%, respectively. The physicochemical quality resulted in reduction in moisture content and a_w value of Amla flesh after osmotic dehydration process as well as resulting in increased total soluble solid. However, the content of phytochemicals was lower than fresh Amla. The osmosed Amla remained 10.70 mg/g of vitamin C, 248.17 mg GAE/g of total phenolic compound and 78.10% of DPPH scavenging antioxidant property, which were greater than obtained from sucrose impregnation 27.20%, 20.13% and 2.48%, respectively. However, the use of oligofructose increases production costs, so it might be suitable for high-value health foods market.

Key words: oligofructose, sucrose, amla, mass transfer kinetic

บทนำ

มะขามป้อมเป็นสมุนไพรที่เป็นแหล่งที่ดีของวิตามินซี มีสารประกอบฟีนอลิกที่มีประโยชน์ด้านการต้านอนุมูลอิสระ และมีรายงานว่ามะขามป้อมมีสารออกฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาที่มีผลดีต่อสุขภาพ เช่น แก้ไอ ยับยั้งการเป็นพิษต่อตับและไต ต้านการเกิดแผลในกระเพาะอาหาร และเพิ่มภูมิคุ้มกัน เป็นต้น (Pitiporn, 2005; Rose *et al.*, 2018) แผนแม่บทแห่งชาติว่าด้วยการพัฒนาสมุนไพรไทย พ.ศ. 2560-2564 กำหนดรายการสมุนไพรที่มีศักยภาพของประเทศ ที่ควรวางแผนด้านการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาด เพื่อสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับประเทศ โดยพบว่า มะขามป้อมจัดเป็นสมุนไพรที่มีศักยภาพ 1 ใน 5 ชนิด ร่วมกับกวาวเครือขาว กระชายดำ ขมิ้นชัน และบัวบก (Ministry of Public Health, 2016)

งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจปรับปรุงกระบวนการผลิตมะขามป้อมแช่อิ่ม โดยใช้หลักการออสโมซิสซึ่งทำได้โดยแช่ชิ้นผลไม้ในสารละลายออสโมติกที่มีความเข้มข้นสูง มีผลให้มีการถ่ายเทมวลสารระหว่างผลไม้กับสารละลายออสโมติก เป็นการดึงน้ำบางส่วนออกจากชิ้นผลไม้อย่างช้าๆ ซึ่งเป็นการลดปริมาณน้ำในชิ้นผลไม้ลง แรงดันออสโมติกของสารละลายเข้มข้นสูงเกิดเป็นแรงขับทำให้เกิดการแพร่ของน้ำจากผลไม้ (Rastogi and Raghavarao, 2004a) ข้อดีของการออสโมซิส เช่น ยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ รักษาสารให้กลิ่นรส ช่วยการคงสีตามธรรมชาติโดยไม่ต้องเติมซัลไฟต์ และเป็นการแปรรูปที่ไม่มีการเปลี่ยน

สถานะของของเหลวจึงใช้พลังงานน้อย (Beristain *et al*., 1990) รวมทั้งช่วยลดค่าวอเตอร์แอคติวิตีของผลไม้ด้วย (Corrêa *et al*., 2010) โดยงานวิจัยนี้ใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุกโตส (oligofructose) ทดแทนการใช้น้ำตาลซูโครส เนื่องจากน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสมีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติก ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของเชื้อกลุ่มที่มีประโยชน์อันส่งผลให้สามารถป้องกันการเกิดโรคต่างๆ ได้ และมีรสหวานน้อยกว่าน้ำตาลซูโครส (Niva, 2007) ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคยุคใหม่ที่สนใจในการรักษาสุขภาพ รวมทั้งกระบวนการแช่เป็นวิธีการที่สามารถเสริมสารอื่นที่ไม่พบในผลไม้ได้ (Sabater-Molina *et al*., 2009) โดยการแพร่ของตัวถูกละลายในสารละลายออสโมติกเข้าไปในชิ้นผลไม้ระหว่างการแช่และสารดังกล่าวอาจเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพหรือช่วยป้องกันโรคได้อีกทางหนึ่ง ดังนั้นการออสโมซิสด้วยสารละลายเข้มข้นที่มีส่วนผสมของน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสจึงเป็นแนวทางสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับมะขามป้อมแปรรูปได้อีกทางหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสในการออสโมซิส มีข้อจำกัดในการแพร่เพื่อเข้าไปกระตุ้นการถ่ายมวลสารต่ำกว่าน้ำตาลซูโครส เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า จึงมีโอกาสทำให้อัตราการสูญเสียน้ำออกจากชิ้นผลไม้ต่ำ (Matusek, 2008) การเข้าใจถึงจลนศาสตร์การถ่ายเทมวลและการติดตามเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีกายภาพที่เกิดขึ้นจากการออสโมซิสจะช่วยให้การปรับปรุงกระบวนการแช่อิ่มพัฒนาได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น Rubio-Arraez *et al.* (2015) รายงานว่า ในการออสโมซิสชิ้นส้มโดยการใช้สารให้ความหวานทางเลือก ได้แก่ ไอโซมอลทูโลส (isomaltulose) โอลิโกฟรุกโตส (oligofructose) และสารสกัดจากหญ้าหวาน พบว่า สามารถใช้รูปแบบสมการจลศาสตร์การถ่ายเทมวลตามกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลสารได้ โดยพบแนวโน้มว่าการใช้สารละลายผสมความเข้มข้นสูงช่วยเพิ่มแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนปริมาณน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสและน้ำตาลซูโครสที่ใช้เตรียมสารละลายออสโมติกต่อจลนศาสตร์การถ่ายเทมวลสารและคุณภาพทางเคมีกายภาพของมะขามป้อมจากกระบวนการออสโมซิส

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างมะขามป้อมและสารละลายออสโมติก

งานวิจัยนี้ใช้มะขามป้อมอินเดีย (*Phyllanthus indofischeri*) รับจากสวนในจังหวัดปราจีนบุรี เก็บรักษาในตู้แช่แข็ง (Sanyo รุ่น SF-C1497) ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส การนำมาใช้งานทำโดยละลายมะขามป้อมแช่แข็งโดยวางในตู้เย็นอุณหภูมิ 4-6 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วล้างทำความสะอาด โดยคัดเลือกผลที่มีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกัน ไม่มีรอยช้ำหรือแตก แล้วนำมาผ่าครึ่งผลตามความยาวผลจากขั้ว แบ่งให้เป็น 2 ชิ้น/ผล แล้วแกะเมล็ดออก นำมาเตรียมขั้นต้น โดยการลวกด้วยไอน้ำ (อุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 5 นาที แล้วแช่ในน้ำผสมน้ำแข็ง (อุณหภูมิ 4-6 องศาเซลเซียส) ทันทีเป็นเวลา 1 นาที และสะเด็ดน้ำเป็นเวลา 5 นาที สำหรับงานวิจัยนี้เก็บวัตถุดิบมะขามป้อมในสภาวะแช่แข็งก่อนการออสโมซิส จึงอาจมีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่เหมือนของสด เนื่องจากในระหว่างการแช่แข็งเกิดผลึกน้ำแข็งซึ่งอาจเกิดการทิ่มแทงเซลล์ ทำให้ผนังเซลล์มีโอกาสเกิดรูขนาดเล็กที่เอื้อต่อการแพร่ออกของน้ำออกจากเซลล์ (Floury *et al*., 2008) อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าการแช่แข็งก่อนการออสโมซิสไม่มีผลต่อค่าการถ่ายเทมวลสาร ใน

ผักผลไม้เนื้อแข็งบางชนิด เช่น ฟักทอง เป็นต้น (Kowalska *et al*., 2008) ดังนั้นคุณภาพวัตถุดิบจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาและควบคุม

ตัวถูกละลายที่ใช้ในการเตรียมสารละลายออสโมติกในงานวิจัยนี้ ได้แก่ น้ำตาลโอลิโกฟรุกโตส (P95, Beneo ORAFTI , ประเทศ เบลเยียม) และน้ำตาลซูโครส (ตรามิตรผล, ประเทศไทย) แปรสัดส่วนปริมาณการใช้เป็น 5 ระดับ ตามรายละเอียดในตารางที่ 1 โดยควบคุมความเข้มข้นของตัวถูกละลายให้เท่ากับ 70 กรัม/100 กรัม เตรียมสารละลายออสโมติกโดยผสมน้ำตาลกับน้ำตามสัดส่วนที่กำหนด ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75-80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องก่อนนำมาใช้งาน

2. การออสโมซิส

แช่ชิ้นมะขามป้อมในสารละลายออสโมติก โดยนำมะขามป้อมที่เตรียมไว้มาใส่ในตะกร้าสแตนเลสแบบโปร่ง รูปทรงกระบอกแบบมีฝาปิด ซึ่งมีขนาดรูตะแกรง 2×2 เซนติเมตร แล้วแช่ให้จมในสารละลายออสโมติกที่บรรจุในโหลแก้วปิดด้วยอลูมิเนียมฟอยด์ที่อุณหภูมิห้อง กำหนดใช้อัตราส่วนระหว่างมะขามป้อมกับสารละลายออสโมติก คือ 1:5 (น้ำหนัก/ปริมาตร) (Nambiar *et al*., 2016)

ตารางที่ 1 สัดส่วนปริมาณน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสและน้ำตาลซูโครสในการเตรียมสารละลายออสโมติก

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		ปริมาณที่ใช้สำหรับสารละลายออสโมติก 100 กรัม		
	ซูโครส	โอลิโกฟรุกโตส	ซูโครส (กรัม)	โอลิโกฟรุกโตส (กรัม)	น้ำกลั่น (กรัม)
1	0	100	0.0	70.0	30.0
2	25	75	17.5	52.5	30.0
3	50	50	35.0	35.0	30.0
4	75	25	52.5	17.5	30.0
5	100	0	70.0	0.0	30.0

3. การศึกษาจลศาสตร์การถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิส

สุ่มตัวอย่างชิ้นมะขามป้อมเมื่อแช่ในสารละลายออสโมติกเป็นเวลา 0, 2, 4, 6, 8, 10, และ 12 ชั่วโมง นำตัวอย่างมาล้างน้ำเพื่อกำจัดสารละลายส่วนเกินที่ผิวออกแล้วซับให้แห้งด้วยกระดาษซับ ชั่งน้ำหนัก วิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 1990) คำนวณหาค่าการถ่ายเทมวลสาร ได้แก่ ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water Loss; WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain; SG) และปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (Weight Reduction; WR) เพื่ออธิบายการถ่ายเทมวลสารที่เกิดขึ้นระหว่างการออสโมซิส โดยคำนวณตามสมการที่ (1) (2) และ (3) (Fernandes *et al*., 2006)

ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water Loss; WL)

$$WL = \frac{(W_0M_0 - W_tM_t)}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain; SG)

$$SG = \frac{\left[W_t-\left(1-M_t\right)-W_0(1-M_0)\right]}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

ปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (Weight Reduction; WR)

$$WR = \frac{W_0-W_t}{W_0} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ W_0 คือ น้ำหนักตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้น (g)

W_t คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังการออสโมซิสที่เวลา t (g)

M_0 คือ ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้น (g/g)

M_t คือ ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของตัวอย่างหลังการออสโมซิสที่เวลา t (g/g)

คำนวณค่าสัดส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) และค่าสัดส่วนของแข็ง (Solid ratio, SR) ระหว่างการแช่ในสารละลายออสโมติกตามสมการที่ (4) และ (5) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ของน้ำและของแข็ง ตามจลศาสตร์การถ่ายเทมวลตามกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) พิจารณาภายใต้เงื่อนไขสำหรับวัสดุที่มีรูปร่างเป็นแผ่นระนาบ (infinite slab) ตามสมการที่ (6) และ (7) โดยพิจารณาความน่าเชื่อถือของสมการจากค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) ภายใต้สมมติฐานดังนี้ (Rastogi and Raghavarao, 2004b)

1) มีรูปแบบการแพร่ของน้ำและของแข็งเท่ากันในทุกทิศทาง

2) ไม่มีสภาวะการต้านการถ่ายเทมวลสารจากแหล่งอื่น

3) ไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหดตัว

4) การออสโมซิสใช้สภาวะอุณหภูมิคงที่

ค่าสัดส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR)

$$MR = \frac{M_t-M_e}{M_0-M_e} \quad (4)$$

ค่าสัดส่วนของแข็ง (Solid ratio, SR)

$$SR = \frac{S_t-S_e}{S_0-S_e} \quad (5)$$

เมื่อ M_t คือ ปริมาณความชื้นเฉลี่ยของตัวอย่างหลังการออสโมซิสที่เวลา t (g/g)

M_e คือ ปริมาณความชื้นสมดุล (g/g)

M_0 คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง (g/g)

S_t คือ ปริมาณของแข็งเฉลี่ยของตัวอย่างหลังการออสโมซิสที่เวลา t (g/g)

S_e คือ ปริมาณของแข็งสมดุล (g/g)

S_0 คือ ปริมาณของแข็งเริ่มต้นของตัวอย่าง (g/g)

จลศาสตร์การถ่ายเทมวลตามกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) สำหรับการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (Water diffusion coefficients, D_{ew}) และของแข็งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (Solid diffusion coefficients, D_{ees}) (Rastogi and Raghavarao, 2004b)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-D_{ew}\pi^2 t}{4l^2}\right] \quad (6)$$

$$SR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-D_{es}\pi^2 t}{4l^2}\right] \quad (7)$$

เมื่อ D_{ew} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (m^2/s)

D_{es} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็ง (m^2/s)

t คือ เวลาการออสโมซิส (s)

l คือ ความหนาของตัวอย่าง (m)

4. การวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทมวลสารและคุณภาพทางเคมีกายภาพของมะขามป้อมหลังการออสโมซิส

สุ่มตัวอย่างชิ้นมะขามป้อมหลังการออสโมซิส 10 ชั่วโมง มาวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 1990) และคำนวณหาค่าการถ่ายเทมวลสารตามสูตรที่ (1) (2) และ (3) รวมทั้งวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีกายภาพ ได้แก่ ปริมาณวิตามินซี (AOAC, 1990) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Singleton *et al*., 1999) สมบัติการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (Turkmen *et al*., 2005) ค่า a_w ด้วยเครื่องวัดค่า a_W (Novasina, รุ่น AG Lab Master) และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) ด้วยเครื่อง Hand refractometer (Atago รุ่น Master, Japan) ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA) โดยวางแผนการทดลองแบบ CRD เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab version 18

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. จลศาสตร์การถ่ายเทมวลสารของมะขามป้อมระหว่างการออสโมซิส

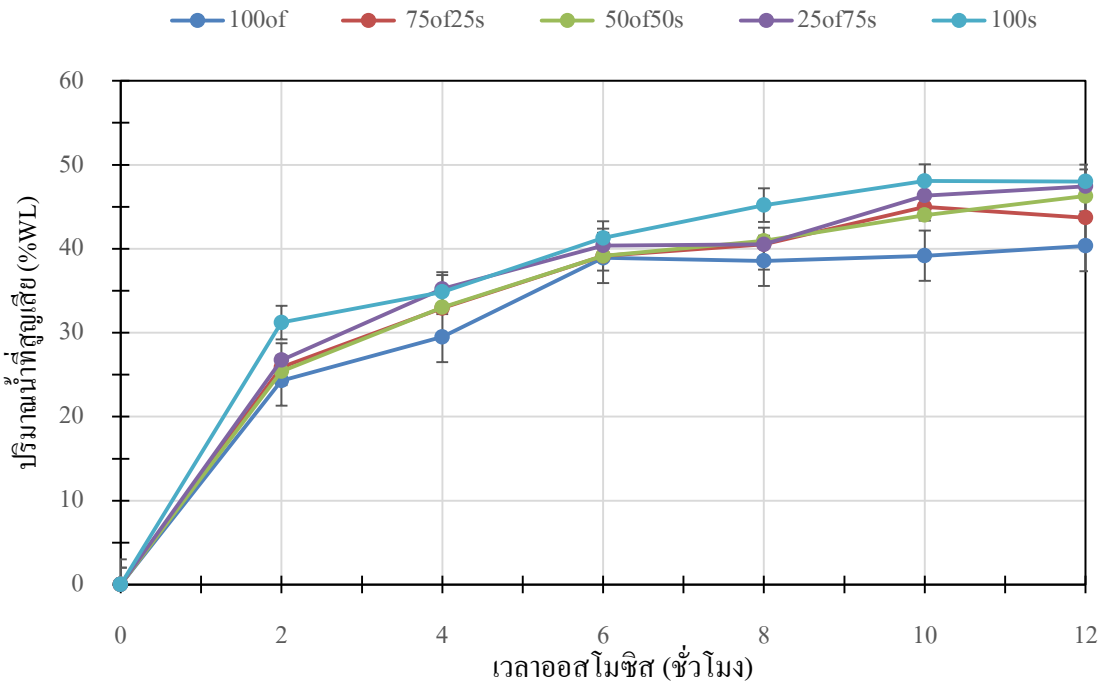
1.1 ค่าการถ่ายเทมวลสาร

ภาพที่ 1 พบปริมาณน้ำที่สูญเสียของชิ้นมะขามป้อมเมื่อผ่านการออสโมซิสในสารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ ครบเวลา 12 ชั่วโมง มีค่า WL อยู่ในช่วง 40.34% - 48.01% โดยค่า WL มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะในช่วง 2 ชั่วโมงแรกของการออสโมซิส และพบแนวโน้มว่าเมื่อใช้น้ำตาลโอลิโก ฟรุกโตสเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ค่า WL ต่ำกว่าสิ่งทดลองอื่น ในขณะที่เมื่อใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียว มีแนวโน้มค่า WL สูงกว่าสิ่งทดลองอื่น Ahmed *et al*. (2016) กล่าวว่า ชนิดของสารละลายออสโมติกที่ต่างกันเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลสารในระหว่างการออสโมซิส โดยสาเหตุหนึ่งที่มีความสำคัญคือมวลโมเลกุล (molecular weight) ของน้ำตาลที่ใช้เตรียมสารละลายออสโมติก หากใช้น้ำตาลที่มีมวลโมเลกุลต่ำจะ

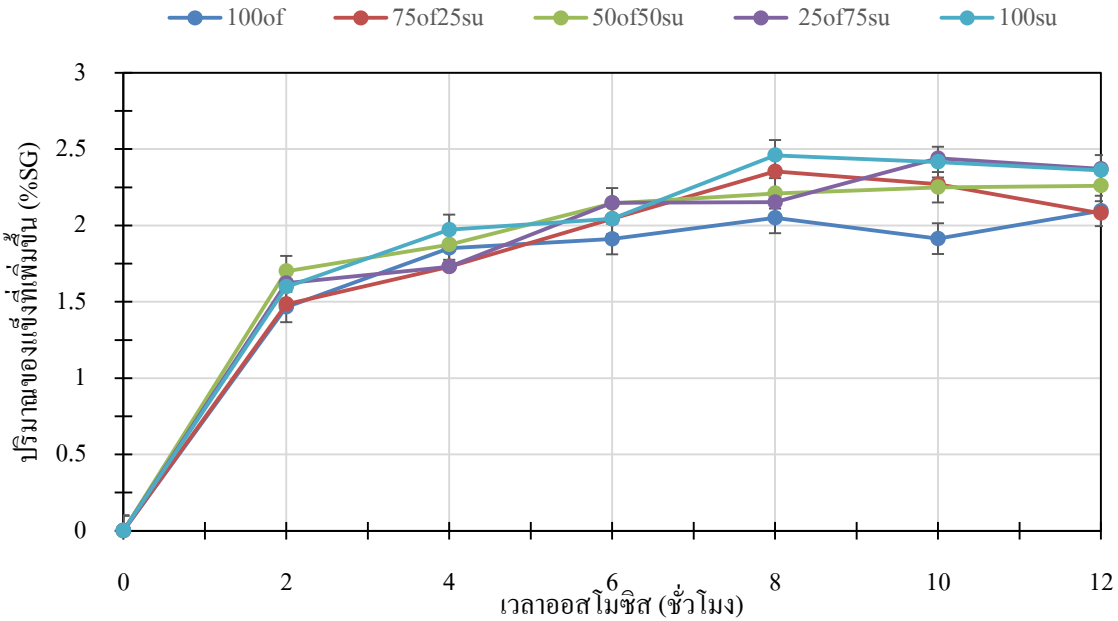
ส่งเสริมให้เกิดการถ่ายเทมวลสารมากกว่าน้ำตาลที่มีมวลโมเลกุลสูง โดยในระหว่างการออสโมซิสน้ำตาลที่มีมวลโมเลกุลต่ำจะสามารถแพร่เข้าสู่เซลล์ของผักผลไม้ได้ง่ายกว่าน้ำตาลที่มีมวลโมเลกุลสูง ทำให้เกิด osmotic pressure สูงกว่า จึงมีโอกาสกระตุ้นให้เกิดการถ่ายเทมวลของแข็งและมวลน้ำได้มากกว่า สำหรับงานวิจัยนี้ใช้น้ำตาลซูโครสซึ่งมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 342.30 กรัมต่อโมล และน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตส มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 828 กรัมต่อโมล (Khan, 2012) สิ่งทดลองที่มีการใช้น้ำตาลซูโครสมากก็จะสามารถแพร่เข้าไปในชิ้นมะขามป้อมได้มากกว่าการใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุกโตส มีผลให้เกิด osmotic pressure สูงที่จะกระตุ้นให้เกิดการถ่ายเทมวลน้ำในระหว่างการออสโมซิส เซลล์พืชเกิดปรากฏการณ์พลาสโมไลซิส (plasmolysis) โดยโพรโทพลาสซึม (protoplasm) เกิดการหดตัวและเซลล์เหี่ยวจากการสูญเสียน้ำออกจากเซลล์ได้มาก (Mayor *et al*., 2008)

ภาพที่ 2 พบปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นของมะขามป้อมเมื่อผ่านการออสโมซิสในสารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ ครบเวลา 12 ชั่วโมง มีค่า SG อยู่ในช่วง 2.06% - 3.06% ซึ่งพบว่ามีค่าน้อยกว่าค่า WL มาก (40.34% - 48.01%) Garcia-Noguera *et al*. (2010) กล่าวว่า ค่า SG ต่ำกว่าค่า WL มาก เนื่องจากมีความแตกต่างกันมากระหว่างขนาดโมเลกุลของน้ำและของแข็ง ซึ่งน้ำมีขนาดโมเลกุลน้อยกว่าของแข็งมากจึงสามารถแพร่ออกจากเซลล์พืชได้มากกว่า โดยในบางการทดลองอาจไม่พบว่ามีการแพร่เข้าของของแข็งหรือพบน้อยมาก

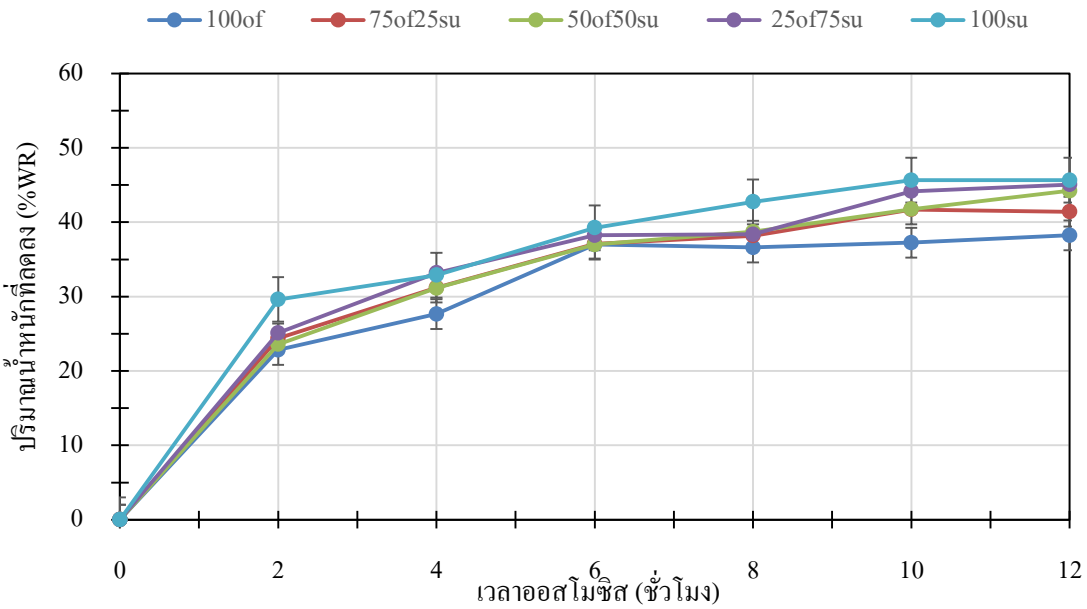
ภาพที่ 3 พบปริมาณน้ำหนักที่ลดลงของชิ้นมะขามป้อมเมื่อผ่านการออสโมซิสในสารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ เมื่อออสโมซิสครบเวลา 12 ชั่วโมง มีค่า WR อยู่ในช่วง 38.25% - 45.25% โดยมีแนวโน้มคล้ายกับค่า WL (ภาพที่ 2) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะในช่วง 2 ชั่วโมงแรกของการออสโมซิส โดยยังคงพบแนวโน้มว่าเมื่อใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสเพียงอย่างเดียว (100of) ส่งผลให้ค่า WR ต่ำกว่าสิ่งทดลองอื่น ในขณะที่เมื่อใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียว (100s) มีแนวโน้มค่า WR สูงกว่าสิ่งทดลองอื่น ค่า WR นี้เกี่ยวข้องสัมพันธ์กันกับค่า WL และค่า SG เนื่องจากเป็นน้ำหนักสุทธิของการถ่ายเทมวลสารหลังการออสโมซิส อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจขึ้นกับปัจจัยอื่น เช่น โครงสร้างของเนื้อเยื่อที่มีผลต่อการแพร่ของน้ำและตัวถูกละลาย Kowalska and Lenart (2001) รายงานว่า ในการออสโมซิสผักผลไม้ในสารละลายน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 61.5% ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ผลการทดลองมีแนวโน้มว่า ปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียหลังการออสโมซิสขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่สูญเสียและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น กรณีออสโมซิสฟักทอง พบว่า มีค่าปริมาณที่สูญเสียสูงแต่มีปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นต่ำ จึงเป็นผลให้ฟักทองมีปริมาณน้ำหนักที่ลดลงมาก ในขณะที่การออสโมซิสแอปเปิ้ล พบว่า มีปริมาณน้ำที่สูญเสียสูงและมีปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นสูงด้วย เนื่องจากแอปเปิ้ลมีโครงสร้างเนื้อเยื่อที่มีความเป็นรูพรุน (porosity) สูง ทำให้น้ำตาลซูโครสจากสารละลายออสโมติกสามารถแพร่เข้าสู่ชิ้นแอปเปิลได้ง่ายและมากกว่าชิ้นฟักทอง จึงเป็นผลให้แอปเปิ้ลมีปริมาณน้ำหนักที่ลดลงน้อยกว่าฟักทอง



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) กับเวลาการออสโมซิสชิ้นมะขามป้อมเมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตส (of) และน้ำตาลซูโครส (s) สัดส่วนต่างๆ



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) กับเวลาการออสโมซิสเมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตส (of) และน้ำตาลซูโครส (s) สัดส่วนต่างๆ



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (WR) กับเวลาการออสโมซิสมะขามป้อมเมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตส (of) และน้ำตาลซูโครส (s) สัดส่วนต่างๆ

1.2 **ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่**

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณความชื้นสมดุล (M_e) และปริมาณของแข็งสมดุล (S_e) พบว่า การใช้น้ำตาลโอลิโก ฟรุกโตสเพียงอย่างเดียวมีผลให้มีปริมาณความชื้นสมดุลและปริมาณของแข็งสมดุลต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าหากให้กลไกการถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นนานเพียงพอจะสามารถลดปริมาณความชื้นของตัวอย่างได้มากที่สุดโดยมีปริมาณตัวถูกละลายแพร่เข้าไปในตัวอย่างน้อยที่สุดนั่นเอง ในขณะที่หากใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียวมีผลให้มีปริมาณความชื้นสมดุลและปริมาณของแข็งสมดุลสูงที่สุด จากผลการทดลองจึงสามารถพบแนวโน้มว่าการใช้โอลิโกฟรุกโตสในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นจึงมีผลให้ค่า M_e และ S_e ลดลง เมื่อนำปริมาณมวลที่สมดุลนี้มาทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยใช้ความสัมพันธ์ทางจลศาสตร์การถ่ายเทมวลตามกฎข้อที่สองของฟิคได้ผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้นสมดุล (M_e) และปริมาณของแข็งสมดุล (S_e) ของมะขามป้อมเมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		ปริมาณมวลที่สมดุล (g/g)	
	ซูโครส	โอลิโกฟรุกโตส	M_e	S_e
1	0	100	0.396 ± 0.001	0.521 ± 0.001
2	25	75	0.409 ± 0.002	0.598 ± 0.001
3	50	50	0.411 ± 0.001	0.608 ± 0.002
4	75	25	0.428 ± 0.003	0.678 ± 0.001
5	100	0	0.468 ± 0.001	0.825 ± 0.003

ตารางที่ 3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (D_{ew}) และสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็ง (D_{es}) พบว่า การใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียวมีแนวโน้มค่า D_{ew} สูงกว่าสิ่งทดลองอื่น แสดงถึงเกิดการแพร่ของน้ำได้มาก เป็นผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลน้ำจากชิ้นมะขามป้อมได้ดีกว่าการใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสร่วมด้วย ทั้งนี้มีความสอดคล้องกับค่า WL ที่แสดงในภาพที่ 1 ที่แสดงให้เห็นว่าสิ่งทดลองที่ใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียว มีแนวโน้มค่า WL สูงกว่าสิ่งทดลองอื่น สัดส่วนและชนิดของตัวถูกละลายที่ใช้ในการเตรียมสารละลายออสโมติกมีผลให้เกิดแรงดันออสโมติกซึ่งเป็นแรงขับให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารแตกต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำและของแข็งที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำตาลซูโครสและโอลิโกฟรุกโตสในสัดส่วนต่างๆ ทำให้เกิดการแพร่และสูญเสียน้ำออกจากมะขามป้อม รวมทั้งการแพร่และเพิ่มขึ้นของตัวถูกละลายแตกต่างกัน โดยพบว่า ค่า D_{ew} และ D_{es} ของทุกสิ่งทดลองอยู่ในช่วง $1.41*10^{-8}$ - $5.00*10^{-8}$ m^2/s และ $0.45*10^{-8}$ - $2.15*10^{-8}$ m^2/s ตามลำดับ มีค่า RMSE 0.08-0.35 ซึ่งแสดงถึงมีความน่าเชื่อถือในการทำนาย โดยพบข้อสังเกตว่าทุกสิ่งทดลองมีค่า D_{ew} มากกว่าค่า D_{es} สอดคล้องกับรายงานการวิจัยของการออสโมซิสในผักผลไม้ต่างๆ เช่น Zecchi and Gerla (2020) รายงานว่า ในการออสโมซิสมะเขือเทศแบบหั่นครึ่งผลโดยแช่ในสารละลายผสมระหว่างน้ำตาลซูโครสและเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 35% (ซูโครส 30% และโซเดียมคลอไรด์ 5%) และ 50% (ซูโครส 40% และโซเดียมคลอไรด์ 10%) และทำนายค่า D_{ew} และ D_{es} ด้วยการใช้ความสัมพันธ์ทางจลศาสตร์การถ่ายเทมวลตามกฎของฟิค พบว่า ค่า D_{ew} ($2.36*10^{-10}$ และ $3.87*10^{-10}$ m^2/s) มากกว่าค่า D_{es} ($1.10*10^{-10}$ - $2.35*10^{-10}$ m^2/s) Prithani and Dash (2020) รายงานว่า ในการออสโมซิสกีวีที่อุณหภูมิ 25-60 องศาเซลเซียสโดยใช้สารละลายผสมระหว่างน้ำตาลซูโครสและกลีเซอรอลความเข้มข้น 60 องศาบริกซ์ ซึ่งเตรียมสารละลายออสโมติกโดยการเติมกลีเซอรอลต่อน้ำตาลซโครส ในอัตราส่วน 3:7 พบว่า ค่า D_{ew} มีค่ามากกว่า D_{es} คิดเป็น 1.927-2.366 เท่า อย่างไรก็ตาม ในการออสโมซิสผลไม้บางชนิดที่มีความเป็นรูพรุนสูงให้ผลการทำนายค่า D_{ew} และ D_{es} ในทางตรงกันข้ามกับงานวิจัยนี้ โดยพบว่า มีค่า D_{es} มากกว่าค่า D_{ew} ตัวอย่างเช่น การออสโมซิสชิ้นแอปเปิ้ลด้วยน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 42 องศาบริกซ์ สามารถทำนายค่า D_{es} ($4.40*10^{-10}$ m^2/s) ได้มากกว่าค่า D_{ew} ($2.94*10^{-10}$ m^2/s) เนื่องจากตัวถูกละลายสามารถแพร่เข้าไปในชิ้นผลไม้ได้มากจนมีโอกาสปิดช่องว่างระหว่างเซลล์ที่กั้นขวางการแพร่ของน้ำออกจากชิ้นผลไม้ได้ (Akharume *et al*., 2019)

จากผลการทดลอง พบว่า การลดปริมาณซูโครสลงและใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสร่วมด้วย มีผลทำให้ค่า D_{ew} และ D_{es} มีแนวโน้มลดลงอย่างมาก จากค่า D_{ew} เท่ากับ $5.00*10^{-8}$ m^2/s และค่า D_{es} เท่ากับ $2.15*10^{-8}$ m^2/s เหลือเพียง $1.41*10^{-8}$ m^2/s -$1.63*10^{-8}$ m^2/s และ $0.45*10^{-8}$ m^2/s - $0.87*10^{-8}$ m^2/s ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของตัวถูกละลายอาจมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของน้ำเชื่อม เช่น ความหนืด ความสามารถในการเกาะติดที่ผิวตัวอย่าง และการแพร่ผ่านเข้าในรูพรุน เป็นต้น ซึ่งล้วนมีผลต่อการแพร่เข้าและออกของมวลสสาร (Kowalska and Lenart, 2001) จึงอาจมีผลให้ประสิทธิภาพการแพร่ของน้ำและของแข็งลดลงได้ สอดคล้องกับที่ Assis *et al*. (2016) กล่าวว่า ประสิทธิภาพการแพร่ของน้ำและของแข็งในระหว่างการออสโมซิสขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น องค์ประกอบและโครงสร้างทางกายภาพของวัตถุดิบ และอุณหภูมิของกระบวนการยกตัวอย่างเช่น หากใช้อุณหภูมิในการออสโมซิสสูงจะช่วยเพิ่มการหลอมรวมของน้ำและตัวถูกละลายใน

ระบบอาหาร และมีผลโดยตรงต่อการกระตุ้นการแพร่ของน้ำออกจากวัตถุดิบ รวมทั้งทำให้ความหนืดของสารละลายออสโมติกลดลงซึ่งลดความต้านทานในการแพร่ของตัวถูกละลายได้อีกทางหนึ่ง

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (D_{ew}) และสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็ง (D_{es}) ของแข็งของมะขามป้อมเมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		สัมประสิทธิ์การแพร่			
	ซูโครส	โอลิโกฟรุกโตส	D_{ew} (m^2/s)	RMSE	D_{es} (m^2/s)	RMSE
1	0	100	$1.41*10^{-8}$	0.28	$0.45*10^{-8}$	0.35
2	25	75	$1.43*10^{-8}$	0.25	$0.57*10^{-8}$	0.35
3	50	50	$1.51*10^{-8}$	0.26	$0.67*10^{-8}$	0.35
4	75	25	$1.63*10^{-8}$	0.25	$0.87*10^{-8}$	0.31
5	100	0	$5.00*10^{-8}$	0.08	$2.15*10^{-8}$	0.09

2. ค่าการถ่ายเทมวลสารและคุณภาพทางเคมีกายภาพของมะขามป้อมหลังการออสโมซิส

2.1 ค่าการถ่ายเทมวลสาร

จากการพิจารณาข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทมวลสารกับเวลาการออสโมซิสเพื่อกำหนดเวลาการออสโมซิสที่เหมาะสม พบว่าเวลาการออสโมซิสที่ 10 ชั่วโมง เพียงพอต่อการทำให้มีค่าการถ่ายเทมวลสารมีแนวโน้มคงที่ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า เมื่อออสโมซิส 10 ชั่วโมง ค่าเฉลี่ยของ WL (46.33%) และ SG (2.25%) ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) กับค่าเฉลี่ยของ WL (48.01%) และ SG (2.26%) เมื่อออสโมซิส 12 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาความคุ้มค่าของการใช้ทรัพยากร จึงใช้เวลาการออสโมซิสที่ 10 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nambiar *et al*. (2016) ที่พบว่าในการออสโมซิสมะขามป้อมที่หั่นเป็นชิ้น โดยแช่ในสารละลายน้ำตาลฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ความเข้มข้น 70° Brix ในการแช่ชิ้นผลไม้ต่อสารละลายออสโมติก อัตราส่วนที่ 1 : 5 w/v พบแนวโน้มว่าค่าการถ่ายเทมวลสารต่างๆ เริ่มคงที่เมื่อเวลาออสโมซิส 10 ชั่วโมง โดยค่าการถ่ายเทมวลสารของมะขามป้อมที่ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า การใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียวมีแนวโน้มค่าการถ่ายเทมวลสารมากที่สุด อย่างไรก็ตาม การใช้สัดส่วนของน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสแทนน้ำตาลซูโครส 25% และ 50% ยังมีแนวโน้มให้ค่าการถ่ายเทมวลสารต่างๆ ไม่แตกต่างจากการใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียวมากนัก โดยพบว่า มีค่า WL SG และ WR ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≥0.05) โดยมีค่า WL อยู่ในช่วงประมาณ 46% -48% ค่า SG อยู่ในช่วงประมาณ 2.18-2.42% และค่า WR อยู่ในช่วงประมาณ 41.75% -45.66% จากแนวโน้มผลการทดลอง พบว่า การใช้โอลิโกฟรุกโตสเพียงอย่างเดียวมีทำให้ค่าการถ่ายเทมวลสารน้อยกว่าการใช้ซูโครสมาก Rubio-Arraez *et al.* (2015) รายงานว่า การใช้ในรูปแบบสารละลายผสม เช่น ใช้โอลิโกฟรุกโตสร่วมกับไอโซมอลทูโลสและสารสกัดจากหญ้าหวาน โดยเตรียมให้ความเข้มข้นสูง สามารถเพิ่มการถ่ายเทมวลสารได้ สำหรับลักษณะปรากฏของชิ้นมะขามป้อมทุกสิ่งทดลองที่ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง แสดงดังภาพ

ที่ 4 แสดงให้เห็นว่าทุกสิ่งทดลองยังคงมีลักษณะปรากฏดี คงรูป ไม่นิ่มเละ แต่มีลักษณะผิวย่นเล็กน้อย

2.2 **คุณภาพทางเคมีกายภาพ**

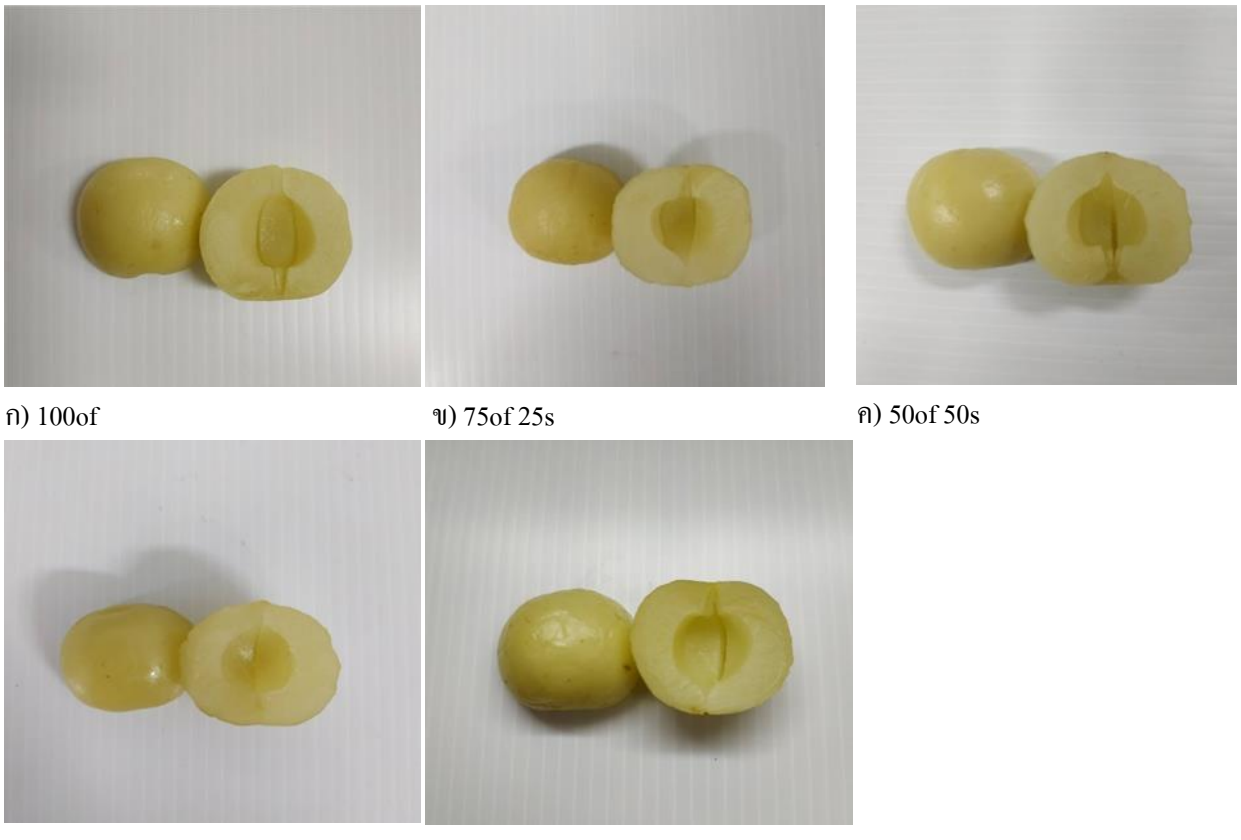
ตารางที่ 5-7 พบว่า สิ่งทดลองที่ใช้โอลิโกฟรุกโตสในสัดส่วน 75% และ 100% มีแนวโน้มรักษาสารพฤกษเคมีที่สำคัญของมะขามป้อมไว้ได้มากกว่าสิ่งทดลองอื่น โดยมีปริมาณวิตามินซีอยู่ในช่วง 10.87-11.20 mg/g ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 303.87-314.10 mg GAE/g และมี % inhibition การต้านอนุมูลอิสระ DPPH อยู่ในช่วง 80.03-81.19 (p<0.05) แม้ลดลงจากมะขามป้อมสดที่มีปริมาณวิตามินซี 19.65 mg/g ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 387 mg GAE/g และมี % inhibition การต้านอนุมูลอิสระ DPPH 85.35 ซึ่งคิดเป็นการสูญเสีย 43.00-44.68% 18.84-21.48% และ 4.87-6.23% ตามลำดับ เป็นผลมาจากกระบวนการแช่ชิ้นมะขามป้อมลงในสารละลายออสโมติกที่มีโอกาสเกิดการชะของสารพฤกษเคมีทั้งวิตามินซีและสารประกอบฟีนอลิกที่มีสมบัติละลายน้ำได้ เมื่อพิจารณาร่วมกับค่า WL ในตารางที่ 4 พบว่า สิ่งทดลองที่ 1 และ 2 มีค่า WL ต่ำที่สุด แสดงถึงมีการสูญเสียน้ำออกจากตัวอย่างน้อยที่สุดจึงสอดคล้องกับแนวโน้มการรักษาปริมาณสารพฤกษเคมีไว้ได้มากกว่าสิ่งทดลองอื่น การใช้โอลิโกฟรุกโตสแม้มีแนวโน้มประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลต่ำกว่าการใช้ซูโครสแต่มีข้อดีในแง่การรักษาสารพฤกษเคมีที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพไว้ได้มากกว่า จึงเป็นข้อพิจารณาในการเลือกใช้ร่วมกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ต้นทุน อย่างไรก็ตามจากการสูญเสียสารพฤกษเคมีระหว่างการออสโมซิส จึงมีแนวทางแก้ปัญหาจากงานวิจัยต่างๆ เช่น การเติมสารพฤกษเคมีในรูปสารสกัดเข้มข้นเพิ่มลงไปในสารละลายออสโมติกด้วย Castagnini *et al*. (2015) แช่ชิ้นมะม่วงในสารละลายน้ำตาลซูโครสที่มีส่วนผสมของสารสกัดโพลีฟีนอลจากกากองุ่น พบว่า ได้ผลน่าพึงพอใจในการรักษาสารพฤกษเคมีโดยเฉพาะปริมาณแคโรทีนอยด์และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ตารางที่ 8 พบว่า มะขามป้อมที่ผ่านการออสโมซิสทุกสิ่งทดลองมีปริมาณความชื้นและค่า a_w ต่ำกว่ามะขามป้อมสด โดยมะขามป้อมสดมีปริมาณความชื้น 85.99% และมีค่า a_w 0.979 ตามหลักการของการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสจะทำให้ปริมาณน้ำในผักผลไม้ลดลง ปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น และทำให้น้ำหนักสุทธิลดลงได้ รวมถึงทำให้ค่า a_w ของผักผลไม้ลดลงด้วย ซึ่งกล่าวได้ว่าค่า a_w เกี่ยวข้องกับการที่ปริมาณน้ำอิสระลดลง จากการแพร่ออกของน้ำและจากการที่ตัวถูกละลายในสารละลายออสโมติกซึ่งได้แก่ น้ำตาลชนิดต่างๆ แพร่เข้าสู่เซลล์ของผักผลไม้ โดยโมเลกุลของน้ำตาลสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำอิสระ จึงมีโอกาสให้น้ำอิสระที่อยู่ในชิ้นผักผลไม้เปลี่ยนเป็นน้ำที่มีพันธะ (bound water) เป็นผลให้ค่า a_w ลดลงนั่นเอง (Raoult-Wack, 1994) สำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด พบว่า ทุกสิ่งทดลองซึ่งผ่านการออสโมซิสมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 45-52 °Brix โดยปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นนี้ส่วนใหญ่ คือ น้ำตาล ที่เป็นตัวถูกละลายจากสารละลายออสโมติกนั่นเอง โดยเพิ่มขึ้นจากมะขามป้อมสดมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเท่ากับ 8.0 °Brix

ตารางที่ 4 ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) และปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (WR) ของมะขามป้อมที่ผ่านการออสโมซิสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		ค่าเฉลี่ย ± SD (%)		
	ซูโครส	โอลิโกฟรุกโตส	WL	SG	WR
1	0	100	$39.17^{b} \pm 1.09$	$1.91^{b} \pm 0.06$	$37.25^{b} \pm 1.15$
2	25	75	$44.97^{b} \pm 3.41$	$2.27^{a} \pm 0.03$	$41.70^{ab} \pm 1.38$
3	50	50	$46.01^{a} \pm 0.44$	$2.25^{a} \pm 0.02$	$41.75^{ab} \pm 0.32$
4	75	25	$47.34^{a} \pm 1.53$	$2.18^{a} \pm 0.13$	$44.16^{a} \pm 0.57$
5	100	0	$48.07^{a} \pm 0.68$	$2.42^{a} \pm 0.55$	$45.66^{a} \pm 0.16$

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



ก) 100of ข) 75of 25s ค) 50of 50s

ง) 25of 75s จ) 100s

ภาพที่ 4 ลักษณะปรากฏของชิ้นมะขามป้อมที่ผ่านการออสโมซิสเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตส (of) และน้ำตาลซูโครส (s) สัดส่วนต่างๆ

ตารางที่ 5 ปริมาณวิตามินซีของมะขามป้อมหลังการออสโมซิส 10 ชั่วโมง และใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลอลิโกฟรุกโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		ปริมาณวิตามินซี	ค่าการสูญเสีย*
	ซูโครส	โอลิโกฟรุกโตส	(mg/g)	(%)
1	0	100	$11.20^{a} \pm 0.09$	43.00
2	25	75	$10.87^{a} \pm 0.18$	44.68
3	50	50	$10.70^{a} \pm 0.08$	45.55
4	75	25	$7.98^{b} \pm 0.09$	59.39
5	100	0	$7.79^{b} \pm 0.09$	60.36

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

* เมื่อเปรียบเทียบกับวิตามินซีของมะขามป้อมสด เท่ากับ 19.65 mg/g

ตารางที่ 6 สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของมะขามป้อมหลังการออสโมซิส 10 ชั่วโมง และใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลอลิโกฟรุกโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		สารประกอบ	ค่าการสูญเสีย*
	ซูโครส	โอลิโกฟรุกโตส	ฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g)	(%)
1	0	100	$314.10^{a} \pm 0.88$	18.84
2	25	75	$303.87^{a} \pm 0.79$	21.48
3	50	50	$248.17^{b} \pm 0.28$	35.87
4	75	25	$205.32^{c} \pm 0.98$	46.95
5	100	0	$198.22^{d} \pm 0.39$	48.78

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

* เมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของมะขามป้อมสด เท่ากับ 387 mgGAE/g

ตารางที่ 7 สมบัติการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของมะขามป้อมหลังการออสโมซิส 10 ชั่วโมง และใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลอลิโกฟรุกโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		สมบัติการต้านอนุมูลอิสระ DPPH	ค่าการสูญเสีย*
	ซูโครส	โอลิโกฟรุกโตส	(%inhibition)	(%)
1	0	100	$81.19^{a} \pm 3.10$	4.87
2	25	75	$80.03^{a} \pm 2.39$	6.23
3	50	50	$78.10^{b} \pm 3.20$	8.49
4	75	25	$76.10^{c} \pm 1.98$	10.84
5	100	0	$76.16^{c} \pm 3.01$	10.77

^{a,b} คือ ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

* เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของมะขามป้อมสดที่มี % inhibition เท่ากับ 85.35

ตารางที่ 8 ปริมาณความชื้น ค่า a_w และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) ของมะขามป้อมหลังการออสโมซิส 10 ชั่วโมง และใช้สารละลายออสโมติกที่เตรียมจากน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสและน้ำตาลซูโครสสัดส่วนต่างๆ

สิ่งทดลองที่	สัดส่วน (%)		ค่าเฉลี่ย ±SD		
	ซูโครส	โอลิโกฟรุกโตส	ปริมาณความชื้น (%)	a_w	TSS (°Brix)
1	0	100	$47.91^{a} \pm 1.00$	$0.835^{a} \pm 0.010$	$45^{c} \pm 1$
2	25	75	$42.26^{b} \pm 0.86$	$0.821^{b} \pm 0.011$	$46^{c} \pm 1$
3	50	50	$42.98^{b} \pm 1.05$	$0.827^{b} \pm 0.012$	$48^{b} \pm 1$
4	75	25	$40.68^{b} \pm 1.21$	$0.820^{b} \pm 0.014$	$49^{b} \pm 1$
5	100	0	$38.99^{c} \pm 0.98$	$0.801^{c} \pm 0.010$	$52^{a} \pm 1$

^{a,b} คือ ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

สรุป

สัดส่วนปริมาณน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสและน้ำตาลซูโครสที่ใช้เตรียมสารละลายออสโมติกมีผลต่อค่าการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสชิ้นมะขามป้อม โดยพบแนวโน้มว่าการใช้น้ำตาลซูโครสมากทำให้มีค่า WL SG และ WR สูงที่สุด สอดคล้องกับผลการศึกษาจลนศาสตร์การถ่ายเทมวลสารที่ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่พบว่า การใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียวมีผลทำให้ค่า D_{ew} เท่ากับ $5.00*10^{-8}$ m^2/s และค่า D_{es} เท่ากับ $2.15*10^{-8}$ m^2/s ซึ่งมีค่าสูงที่สุด การลดปริมาณซูโครสลงและใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสร่วมด้วย มีผลทำให้ค่า D_{ew} และ D_{es} มีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามหากต้องการใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสร่วมด้วย พบว่า สิ่งทดลองที่เหมาะสมที่สุดที่มีการใช้สัดส่วนของน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตสได้มากที่สุดและยังทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารสูง ได้แก่ การใช้สัดส่วนของน้ำตาลโอลิโกฟรุกโตส 50% และน้ำตาลซูโครส 50% โดยใช้เวลาในการออสโมซิส 10 ชั่วโมง ทำให้มีปริมาณสารพฤกษเคมีที่สำคัญที่คงอยู่ ได้แก่ ปริมาณวิตามินซีและปริมาณสารประกอบฟีนอลิก รวมทั้งสมบัติการต้าน

อนุมูลอิสระมากกว่าสิ่งทดลองที่ใช้น้ำตาลซูโครสเพียงอย่างเดียว และยังมีค่า WL ค่า SG และค่า WR สูงที่สุด (p<0.05) อย่างไรก็ตามการเลือกใช้โอลิโกฟรุกโตสร่วมด้วยทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นจึงเหมาะสำหรับตลาดอาหารเพื่อสุขภาพมูลค่าสูง ความท้าทายในการปรับปรุงการถ่ายโอนมวลสารจึงเป็นเรื่องที่ควรศึกษาเพิ่มเติม แนวทางการวิจัย เช่น การเตรียมขั้นต้นวัตถุดิบเพื่อทำลายผนังเซลล์เพียงเล็กน้อยเพื่อกระตุ้นการแพร่

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัย ประเภทเงินรายได้ส่วนงาน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 เลขที่สัญญา SC10/2562

เอกสารอ้างอิง

Ahmed, I., Qazi, I.M. and Jamal, S. 2016. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. **Innovative Food Science & Emerging Technologies** 34: 29-43.

Akharume, F., Singh, K. and Sivanandan, L. 2019. Effects of liquid smoke infusion on osmotic dehydration kinetics and microstructural characteristics of apple cubes. **Journal of Food Engineering** 246: 51-57.

AOAC. 1990. **Official Method of Analysis.** 15th ed. The Association of official Analysis Chemists, Arlington Virginia.

Assis, F.R., Morais, R.M.S.C. and Morais, A.M.M.B. 2016. Mass Transfer in Osmotic Dehydration of Food Products: Comparison Between Mathematical Models. **Food Engineering Reviews** 8(2): 116-133.

Beristain, C.I., Azuara, E., CortÉS, R. and Garcia, H.S. 1990. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings. **International Journal of Food Science & Technology** 25(5): 576-582.

Castagnini, J.M., Betoret, N., Betoret, E. and Fito, P. 2015. Vacuum impregnation and air drying temperature effect on individual anthocyanins and antiradical capacity of blueberry juice included into an apple matrix. **LWT - Food Science and Technology** 64(2): 128-1296.

Corrêa, J.L.G., Pereira, L.M., Vieira, G.S. and Hubinger, M.D. 2010. Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. **Journal of Food Engineering** 96(4): 498-504.

Fernandes, F.A.N., Rodriguesi, S., Gaspareto, O. and Oliveira, E. 2006. Optimization of osmotic dehydration of bananas followed by air-drying. **Journal of Food Engineering** 77*:* 188-193.

Floury, J., Le Bail, A. and Pham, Q.T. 2008. A three-dimensional numerical simulation of the osmotic dehydration of mango and effect of freezing on the mass transfer rates. **Journal of Food Engineering** 85(1): 1-11.

Garcia-Noguera, J., Oliveira, F.I.P., Gallão, M.I., Weller, C.L., Rodrigues, S. and Fernandes, F.A.N. 2010. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: effect of pretreatment time

and ultrasonic frequency. **Drying Technology** 28: 294-303.

Khan, M.R. 2012. Osmotic dehydration technique for fruit preservation-A review. **Pakistan Journal of Food Sciences** 22(2): 71-85.

Kowalska, H. and Lenart, A. 2001. Mass exchange during osmotic pretreatment of vegetable. **Journal of food Engineering** 49: 137-140.

Kowalska, H., Lenart, A. and Leszczyk, D. 2008. The effect of blanching and freezing on osmotic dehydration of pumpkin. **Journal of Food Engineering** 86(1): 30-38.

Matusek, A.C. 2008. Comparison of diffusion of fructo-oligosaccharide components during vacuum impregnation and osmotic dehydration. **European Food Research Technology** 227: 417-423.

Mayor, L., Pissarra, J. and Sereno, A.M. 2008. Microstructural changes during osmotic dehydration of parenchymatic pumpkin tissue. **Journal of Food Engineering** 85(3): 326-339.

Ministry of Public Health. 2016. **National master plan of Thai herbs.** (1st ed. TS Interprint Co., Ltd., Nonthaburi. (in Thai)

Nambiar, S.S., Basu, A., Shetty, N.P., Rastogi, N.K. and Prapulla, S.G. 2016. Infusion of fructooligosaccharide in Indian gooseberry (*Emblica officinalis*) fruit using osmotic treatment and its effect on the antioxidant activity of the fruit. **Journal of Food Engineering** 190: 139-146.

Niva, M. 2007. All foods affect health: Understanding of functional foods and healthy eating among health-oriented finns. **Appetiite** 48*:* 384-393.

Pitiporn, S. 2005. Amla: herbs that should not be overlooked. **Mo Chaoban Magazine** 26(309): 17-27. (in Thai)

Prithani, R. and Dash, K.K. 2020. Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwi fruit. **Innovative Food Science & Emerging Technologies** 64(2020): 102407.

Raoult-Wack, A.L. 1994. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. **Trends in Food Science and Technology** 5: 255-260.

Rastogi, N.K. and Raghavarao, K.S.M.S. 2004a. Mass transfer during osmotic dehydration: Determination of moisture and solute diffusion coefficients from concentration profiles. **Food and Bioproducts Processing** 82(1): 44-48.

Rastogi, N.K. and Raghavarao, K.S.M.S. 2004b. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: Considering Fickian diffusion in cubical configuration. **LWT - Food Science and Technology** 37(1): 43-47.

Rose, K., Wan, C., Thomas, A., Seeram, N.P. and Ma, H. 2018. Phenolic compounds isolated and identified from Amla (*Phyllanthus emblica*) juice powder and their antioxidant and neuroprotective activities. **Natural Product Communications** 13(10): 1309-1311.

Rubio-Arraez, S., Capella, J.V., Ortolá, M.D. and Castelló, M. 2015. Kinetics of osmotic dehydration of orange slices using healthy

sweeteners. **International Food Research Journal** 22: 2162-2166.

Sabater-Molina, M., Larqué, E., Torrella, F. and Zamora, S. 2009. Dietary fructooligosaccharides and potential benefits on health. **Journal of Physiology and Biochemistry** 65(3): 315-328.

Singleton, V.L., Orthofer, R. and Lamuela-Raventos, R.M. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteau reagent. **Methods in Enzymology** 299: 152-178.

Turkmen, N., Sari, F. and Velioglu, S. 2005. The effect of cooking methods on total phenolics and antioxidant activity of selected green vegetables. **Food Chemistry** 93: 713-718.

Zecchi, B. and Gerla, P. 2020. Effective diffusion coefficients and mass flux ratio during osmotic dehydration considering real shape and shrinkage. **Journal of Food Engineering** 274(2020): 109821.

เครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดแบบอัตโนมัติ

Automatic Cutting Palmyra Seeds Machine

ศุภชัย มะเดื่อ[1] วันประชา นวนสร้อย[1*] และ วรพงศ์ บุญช่วยแทน[2]

Suppachai Maduea[1*], Wanpracha Nuansoi[1*] and Worapong Boonchouytan[2]

Received: 19 September 2020, Revised: 3 December 2020, Accepted: 5 February 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดแบบอัตโนมัติ ซึ่งมุ่งเน้นด้านการใช้งานง่าย ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องควบคุมการทำงานของเครื่องตลอดเวลา และประสิทธิภาพการทำงานไม่ขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ใช้งาน โดยผู้ใช้งานนำเมล็ดตาลโตนดไปวางในตำแหน่งจับยึดและกดปุ่ม การทำงานของเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดประกอบด้วยขั้นตอนการจับยึดเมล็ด การวัดขนาดเมล็ด การป้อนเมล็ดเข้าหาใบผ่า การผ่าเมล็ด การถ่ายเมล็ดออก และการปลดตัวจับยึดเมล็ด หลังจากนั้นผู้ใช้งานใช้มีดพร้าแซะเมล็ดตาลตามร่องผ่าเบาๆ ก็จะแยกกะลาตาลโตนดออกเป็น 2 ซีกได้ ระบบการทำงานแบบอัตโนมัติถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และมีการประดิษฐ์เซ็นเซอร์สำหรับการวัดขนาดของเมล็ด ผลการทดสอบการผ่าจำนวน 50 เมล็ดพบว่าเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดแบบอัตโนมัติสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีความถูกต้องในการผ่า 100% ใช้ระยะเวลาในการผ่าเฉลี่ย 3 นาที 10 วินาทีต่อเมล็ด และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 0.19 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ซึ่งผู้ใช้งานใช้เวลาควบคุมการทำงานเพียง 5 วินาทีต่อเมล็ดเท่านั้น และผู้ใช้งาน 1 คนสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดได้พร้อมกันหลายเครื่อง จากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมพบว่าถ้าหากผู้ใช้งาน 1 คนควบคุมการทำงานของเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดพร้อมกัน 2 เครื่องจะมีค่าใช้จ่ายเฉลี่ย 1.08 บาทต่อเมล็ดระยะเวลาคืนทุน 5.4 เดือน เมื่อเทียบกับแรงงานคน

คำสำคัญ: เครื่องผ่า, ระบบอัตโนมัติ, จาวตาล, เซ็นเซอร์, ไมโครคอนโทรลเลอร์

---

[1] สาขาอุตสาหกรรม วิทยาลัยรัตภูมิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 414 ตำบลท่าชะมวง อำเภอรัตภูมิ จังหวัดสงขลา 90180

[1] Department of Industrial, Rattaphum College, Rajamangala University of Technology Srivijaya, 414, Tachamoung, Rattaphum, Songkhla 90180, Thailand.

[2] สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

[2] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, 1 Ratchadamnoennok Rd, Boyang, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

[*] ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): wanpracha.n@rmutsv.ac.th

ABSTRACT

Automatic Cutting Palmyra Seeds machine has been developed with the aim for ease of use and of not requiring constant attention in operation. The user simply places the palmyra seed into the holding position and presses the button only once. After that, the machine proceeds automatically to a seed locking process, a seed size measurement, a seed movement towards cutting, cutting process and finally unlocks the seeds. The palmyra seeds can be picked up and gently split by a machete. The automation system is controlled by a microcontroller. Sensors for measuring the grain size and the displacement of machine components are also built. In the experiment of cutting 50 seeds, each step of the work process was tested and adjusted to achieve the best results. The results showed that the machine was able to work efficiently with 100% dissection accuracy. An average incision time was 3 minutes 10 seconds per seed and the power consumption was 0.19 kW-hour. These results are comparable to Cutting Palmyra Seeds machines in earlier research. This present research is highlighted by applications in which the user controls the machine for only 5 seconds per seed and is able to control dozens of machines simultaneously. Furthermore, an engineering economic analysis showed that, if one user controls the operation of two machines at the same time, the machine cost was on average THB 1.08/seed, the payback period was on 5.4 months.

Key words: cutting machine, automation, palm sugar, sensor, microcontroller

บทนำ

ตาลโตนดเป็นพืชที่สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ทุกปีติดต่อกันหลายชั่วอายุคนหรือประมาณ 80 ปี มีสารพัดประโยชน์ ให้ผลผลิตสม่ำเสมอและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วน ก่อให้เกิดอาชีพหลากหลายในชุมชนทั้งอาชีพโดยตรงและอาชีพเสริม เช่น อาชีพเกษตรกรผู้เพาะเมล็ดเพื่อให้ได้จาวตาล อาชีพปาดตาล อาชีพทำน้ำตาลโตนด อาชีพขายน้ำตาลโตนด อาชีพที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากน้ำตาลโตนด เช่น น้ำผึ้งตาลโตนด น้ำตาลปึก น้ำตาลแว่น หรือขนมต่างๆ เช่น ขนมตาล จาวตาลเชื่อม หัตถกรรมจากใยตาล ใบตาล ไม้ตาล ฯลฯ เมื่อพูดถึงเมล็ดตาลโตนดนั้น ในส่วนของจาวตาลโตนดมีสรรพคุณ แก้นิ่วในถุงน้ำดี แก้ไข้ที่มีพิษร้อน แก้พิษตานซาง (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2012) โดยจาวตาลโตนดมีรสชาติหวานหอม กรอบและอร่อยจึงสามารถบริโภคได้ทั้งจาวตาลสดหรือนำไปแปรรูปเป็นจาวตาลเชื่อม ซึ่งจาวตาลเชื่อมมีราคาขายอยู่ที่ประมาณกิโลกรัมละ 200 - 300 บาท โดยจาวตาลเชื่อม 1 กิโลกรัมจะใช้จาวตาลประมาณ 15 - 20 จาว แล้วแต่ขนาด ซึ่งถือว่ามีราคาสูงเมื่อเทียบกับการขายผลตาลสด แต่การทำจาวตาลเชื่อมก็ยังไม่เป็นที่นิยมของเกษตรกรมากนัก เนื่องจากการผ่าเมล็ดตาลมีความยากลำบากและใช้เวลานาน เปลือกของเมล็ดตาลมีความแข็งค่อนข้างสูงและรูปทรงไม่แน่นอน ในการผ่าเมล็ดตาลเกษตรกรจะใช้มีดหรือพร้าในการผ่า ซึ่งต้องอาศัยทักษะความชำนาญและความระมัดระวังสูง หากมีข้อผิดพลาดอาจจะทำให้เกิดอุบัติเหตุได้

หรือในกรณีที่ไม่สามารถผ่าเมล็ดตาลให้ได้ตามรูปทรงที่ต้องการจะส่งผลต่อการลดลงของราคาขาย

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีการสร้างเครื่องมือทางการเกษตรขึ้นมาเพื่ออำนวยความสะดวกและทดแทนการใช้แรงงานคนมากมาย เช่น Wongsangnoi (2020) ทำการพัฒนาเครื่องสับต้นข้าวโพดสำหรับผลิตอาหารสัตว์ Niamhom and Niamhom (2021) ทำการพัฒนาเครื่องหีบเมล็ดฝ้าย Langkapin *et al*. (2022) ทำการออกแบบและสร้างเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง ในส่วนของการพัฒนาและสร้างเครื่องผ่าพืชผลทางการเกษตรที่มีลักษณะทางกายภาพแข็ง แทนการใช้มีดพร้าซึ่งมีความยุ่งยากและเป็นอันตรายก็มีอยู่หลายงานวิจัย เช่น Kornpitak (2014) ออกแบบและสร้างเครื่องผ่าไม้ไผ่ที่ใช้ในการเตรียมเส้นตอกสำหรับสานเข่งผลไม้ Sukjai *et al*. (2021) ออกแบบและพัฒนาเครื่องผ่าและรีดไม้ไผ่จักสาน Yamfang *et al*. (2017) พัฒนาเครื่องผ่าผลหมากสดกึ่งอัตโนมัติสำหรับกระบวนการแปรรูปผลหมาก เป็นต้น สำหรับเครื่องผ่าเมล็ดตาลนั้น จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ได้มีการพัฒนาเครื่องผ่าเมล็ดตาลหลายชิ้นด้วยกันอาทิเช่น Wongvej (2013) สร้างเครื่องผ่าเมล็ดตาลโดยมีขั้นตอนการทำงานคือ นำเมล็ดตาลไปวางในตำแหน่งจับยึด เมื่อวางเมล็ดตาลเสร็จแล้วก็ทำการยึดเมล็ดตาลให้แน่น แล้วก็เปิดสวิทซ์ให้ใบเลื่อยทำงาน จากนั้นจึงเคลื่อนเมล็ดตาลเข้าหาใบเลื่อย ซึ่งผู้ใช้จะต้องกำหนดระยะความลึกที่จะผ่าเอง เมื่อใบเลื่อยผ่าได้ระยะความลึกที่ต้องการ ก็เคลื่อนเมล็ดตาลกลับมา ปิดใบเลื่อย แล้วกลับด้านเมล็ดตาลเพื่อที่จะผ่าอีกด้านหนึ่ง เมื่อผ่าเสร็จทั้งสองด้านแล้วก็ใช้คีมหนีบหรืองัดเพื่อให้เปลือกของเมล็ดตาลแยกออกจากกัน Nuesuk *et al*. (2015) พัฒนาเครื่องผ่าเมล็ดตาลที่มีขั้นตอนการทำงานที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Wongvej (2013) แต่มีข้อดีตรงที่ส่วนจับยึดสามารถที่จะหมุนเมล็ดตาลให้เข้าหาใบเลื่อยได้ทุกด้านในครั้งเดียว แต่ในการผ่าผู้ใช้งานก็จำเป็นต้องหมุนเมล็ดตาลอยู่ตลอดเวลาที่ผ่า Boonchouytan (2016) ได้พัฒนาเครื่องผ่าเมล็ดตาลแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยออกแบบให้เครื่องสามารถหมุนเมล็ดตาลเองแบบอัตโนมัติ แต่ให้ผู้ใช้งานจะต้องควบคุมระยะความลึกในการผ่าเอง Parnsakhorn *et al*. (2016) พัฒนาเครื่องผ่าเมล็ดตาลโดยมีลักษณะเด่นตรงที่ใช้ใบเลื่อยจำนวน 3 ใบ ทำให้ผ่าเมล็ดตาลโตนดได้เร็วขึ้นแต่ก็ต้องใช้คนในการควบคุมการเคลื่อนเมล็ดตาลเข้าหาใบเลื่อย และระยะความลึกในการผ่าเป็นการกำหนดตายตัวโดยใช้ค่าเฉลี่ยมาเป็นตัวกำหนด

ผลจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าว ในงานวิจัยนี้จึงได้เกิดแนวคิดในการพัฒนาเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดแบบอัตโนมัติ ที่สามารถใช้งานง่าย ผู้ใช้ไม่ต้องควบคุมการทำงานของเครื่องจักรตลอดเวลา เครื่องจักรสามารถกำหนดระยะความลึกในการผ่าที่ถูกต้องแม่นยำโดยผลที่ได้ไม่ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ใช้งาน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเมล็ดตาลโตนด

ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเมล็ดตาลโตนดดังภาพที่ 1 เพื่อใช้ในการออกแบบส่วนประกอบของเครื่องโดยได้ทำการวัดขนาด ความกว้าง ความยาว และ ความหนา ของเมล็ดตาลโตนดโดยการสุ่มวัดขนาดเมล็ดตาลโตนดจำนวน 50 เมล็ด ในพื้นที่ปลูก อ.สิงหนคร จ.สงขลา แล้วนำมาวัดด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ ได้ผลการวัดดังตารางที่ 1

ภาพที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของเมล็ดตาลโตนด

ตารางที่ 1 ขนาดของเมล็ดตาลโตนดที่ได้จากการวัดด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์

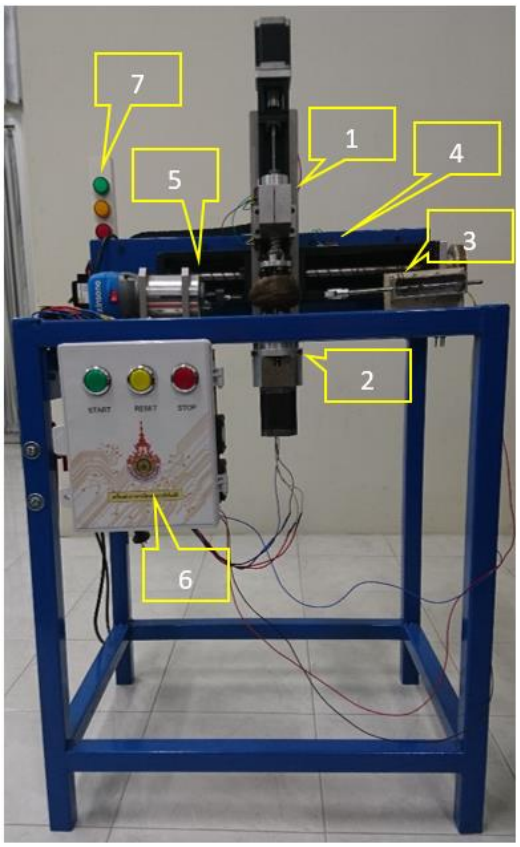
ความกว้าง (ซม.)	ความยาว (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ความหนาของกะลา (ซม.)
7.75 ± 0.60	7.93 ± 0.61	5.16 ± 0.42	0.40 ± 0.14

* หมายเหตุ mean ± sd.

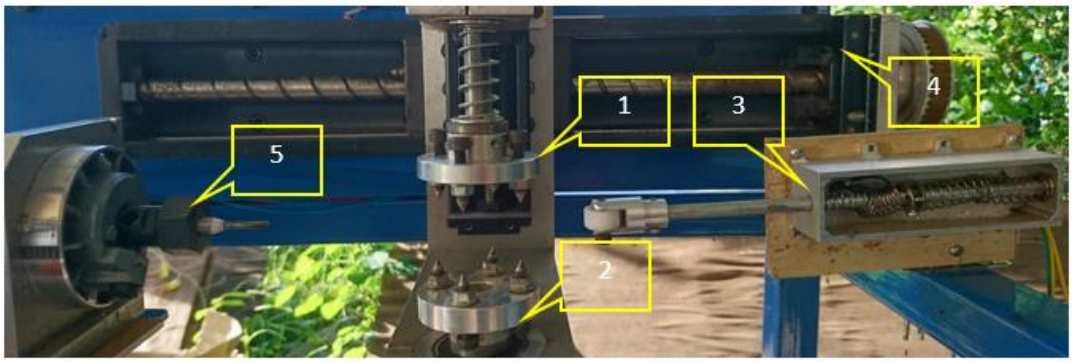
2. ทำการออกแบบและสร้างเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดแบบอัตโนมัติ

ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนด ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยตัวเครื่องที่สร้างขึ้นมีขนาดความกว้าง 80 เซนติเมตร ยาว 90 เซนติเมตร และสูง 120 เซนติเมตร วัสดุที่ใช้ทำจากเหล็กกล่อง ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ คือ

1. ชุดจับยึดเมล็ดตาลโตนด
2. ชุดหมุนเมล็ดตาลโตนด
3. ชุดเซ็นเซอร์วัดขนาดเมล็ดตาลโตนด
4. ชุดป้อนเมล็ดตาลโตนด เข้า- ออก
5. ชุดผ่าเมล็ดตาลโตนด
6. ชุดควบคุมการทำงาน
7. ไฟแสดงสถานะการทำงานของเครื่อง



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2 ส่วนประกอบเครื่องผ่าจาวเมล็ดตาลโตนด

2.1 การออกแบบชุดจับยึดเมล็ดตาลโตนด

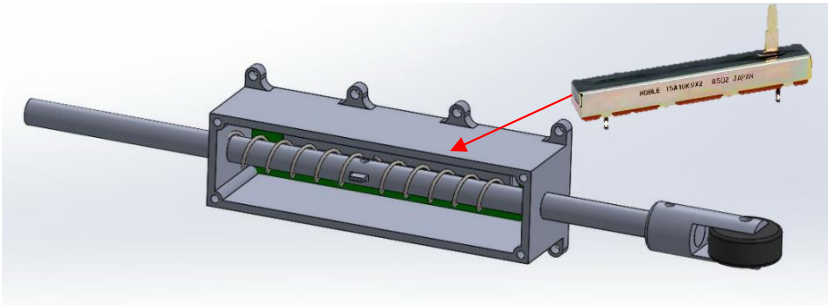
โดยใช้ชุดแกนสำเร็จรูปที่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่งโดยมีระยะเคลื่อนที่ 27.5 เซนติเมตร ติดตั้งลิมิตสวิตช์ 2 ตัวสำหรับกำหนดระยะจับยึดและระยะการปลดการจับยึดเมล็ดตาล ที่ปลายของส่วนยึดจับใช้หัวตะปูแหลมจำนวน 4 ตัว และมีการใส่ตัวสปริงเพื่อเพิ่มความมั่นคงในการจับยึด

2.2 การออกแบบชุดหมุนเมล็ดตาลโตนด

โดยใช้สเต็ปมอเตอร์ (Stepping Motor) ที่มีความละเอียด 1.8 องศา และเพื่อให้การควบคุมตำแหน่งมีความละเอียดมากยิ่งขึ้นจึงได้กำหนดค่าสเต็ป(step) ของบอร์ดขับมอเตอร์ในอัตราส่วน 1 : 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับการป้อนสัญญาณพัลส์(pulse) จำนวน 800 พัลส์/รอบ

2.3 การออกแบบเซ็นเซอร์วัดขนาดเมล็ดตาลโตนด

ในการออกแบบเซ็นเซอร์วัดขนาดเมล็ดตาลโตนด เมื่อทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพแล้วพบว่า เมล็ดตาลจะมีลักษณะของเส้นใยติดอยู่ ทำให้จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้เซ็นเซอร์แบบกดสัมผัส และลักษณะที่สำคัญอีกอย่างคือส่วนหัวของเมล็ดตาลโตนดจะมีลักษณะเป็นร่องแอ่งกระทะ ดังนั้นการออกแบบเซ็นเซอร์แบบสัมผัสจะต้องมีลักษณะเป็นล้อหมุนที่ส่วนปลายเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ผ่านร่องแอ่งกระทะได้ จากข้อจำกัดดังกล่าวทางผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบเซ็นเซอร์วัดขนาดเมล็ดตาลโตนดโดยการประยุกต์ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อนมาใช้งานดังภาพที่ 3

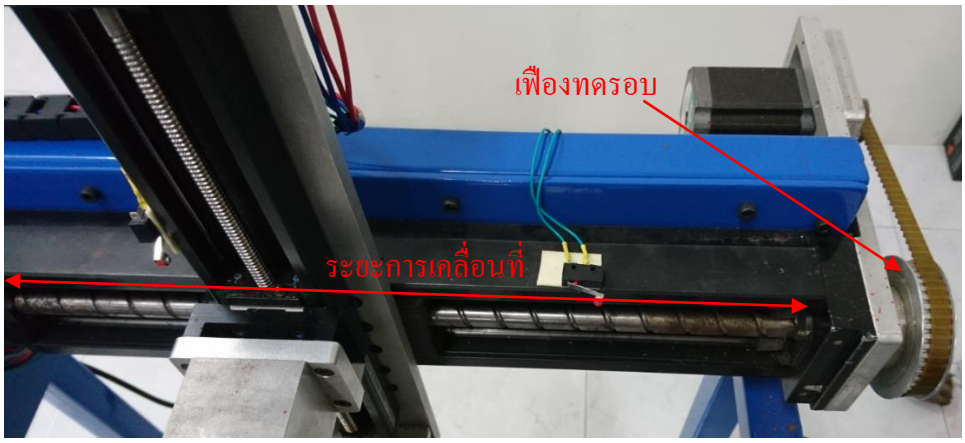


ภาพที่ 3 การออกแบบเซ็นเซอร์วัดขนาดเมล็ด

ประเด็นปัญหาถัดมาคือการเลือกตำแหน่งในการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดขนาดเมล็ด ซึ่งตำแหน่งที่ดีที่สุดก็คือการติดตั้งในตำแหน่งเดียวกับใบผ่า แต่ในความเป็นจริงเราไม่สามารถที่จะทำการติดตั้งเซ็นเซอร์ในตำแหน่งเดียวกับใบผ่าได้ เนื่องจากตำแหน่งในการจับยึดไม่เอื้ออำนวย ดังนั้นจึงใช้วิธีการติดตั้งฝั่งตรงข้ามกับใบผ่า แล้วใช้วิธีการอ่านค่าระยะเก็บไว้ก่อน โดยมุมของใบผ่ากับมุมตัวของเซ็นเซอร์จะต่างกัน 180 องศา

2.4 การออกแบบชุดป้อนเมล็ดตาลโตนด

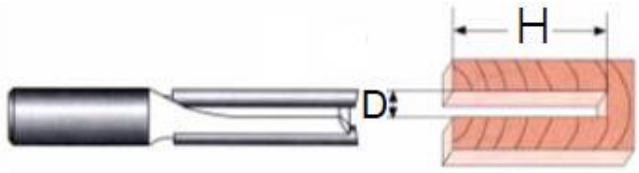
โดยใช้ชุดแกนสำเร็จที่มีระยะเคลื่อนที่ 40 เซนติเมตร มีระยะพิทช์ (ระยะที่มอเตอร์หมุนครบ 1 รอบ) เท่ากับ 1.7 เซนติเมตร สเต็ปมอเตอร์ มีความละเอียด 1.8 องศา และกำหนดค่าสเต็ป ของบอร์ดขับมอเตอร์ 1 : 4 ซึ่งการป้อนสัญญาณพัลส์ จำนวน 800 พัลส์ มอเตอร์จะหมุนได้ 1 รอบและมอเตอร์มีการต่อเฟืองทดรอบ โดยมีระยะในการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.65 เซนติเมตรต่อการหมุนของมอเตอร์ 1 รอบ ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การออกแบบชุดป้อนเมล็ดตาลโตนด

2.5 การออกแบบชุดผ่าเมล็ดตาลโตนด

ได้นำเอาเครื่องเซาะร่องไม้ ZINSANO รุ่น TM-635ST มาประยุกต์ใช้งาน โดยใช้ดอกเราเตอร์ ขนาด ¼ นิ้วสำหรับผ่าเมล็ดตาลโตนด ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ดอกเราเตอร์

2.6 ชุดควบคุมการทำงาน

ตู้ควบคุมการทำงานของเครื่องจะมีปุ่มควบคุมการทำงานอยู่ 3 ปุ่มด้วยกันคือ ปุ่มสีเขียว คือปุ่มเริ่ม (Start) ปุ่มสีเหลือง คือปุ่มรีเซ็ต (Reset) และปุ่มสีแดงคือปุ่มหยุด (Stop) ภายในชุดควบคุมจะประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดควบคุมการทำงาน

อุปกรณ์	หน้าที่การทำงาน
1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino mega 2560	ประมวลผลและควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ
2. บอร์ดขับสเต็ปมอเตอร์ 3 บอร์ด	ขับสเต็ปมอเตอร์ ทั้ง 3 แกน
3. ลิมิตสวิทช์ 3 ตัว	กำหนดระยะการล็อค ปลดล็อค และระยะเริ่มต้น
4. ปุ่มกด 3 ปุ่ม	ปุ่ม เริ่ม, รีเซ็ต, หยุด
5. บอร์ด รีเลย์ 4 ช่อง 1 ตัว	ใช้ขับหลอดไฟแสดงสถานะ
6. ไฟแสดงสถานะการทำงาน 3 ดวง	แสดงสถานะการทำงานของเครื่อง
7. เซ็นเซอร์วัดขนาดเมล็ด	วัดขนาดเมล็ดตาลโตนด

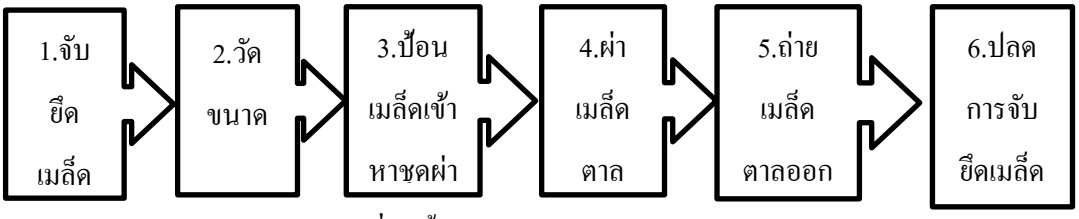
2.7 ไฟแสดงสถานะการทำงานของเครื่อง

ไฟแสดงสถานะการทำงานของเครื่องมีอยู่ด้วยกัน 3 สีประกอบด้วย สีเขียว หมายถึงสถานะที่เครื่องพร้อมสำหรับการทำงาน สีส้ม หมายถึงสถานะที่เครื่องกำลังทำงานอยู่ และไฟสีแดง หมายถึงเครื่องทำงานขัดข้อง

3. ขั้นตอนการทำงานของเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดแบบอัตโนมัติ

1. ผู้ใช้นำเมล็ดตาลโตนดมาวางไว้ในตำแหน่งกึ่งกลางของชุดหมุนเมล็ด หลังจากนั้นก็ทำการกดปุ่ม start

2. เครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดจะทำงานโดยอัตโนมัติ ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้



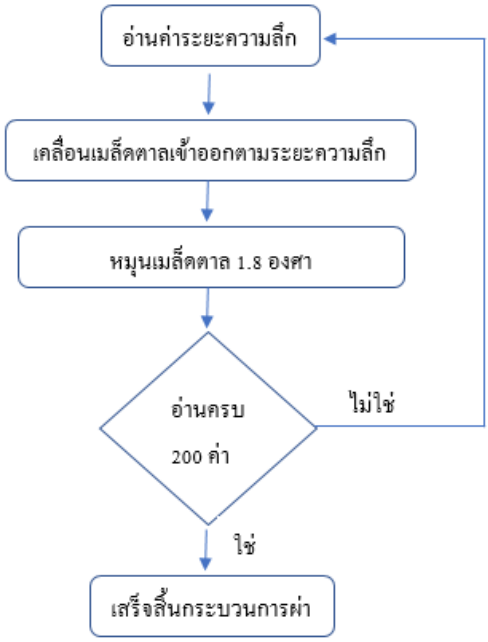
ภาพที่ 6 ขั้นตอนการทำงานแบบอัตโนมัติ

2.1 ทำการจับยึดเมล็ดโดยการควบคุมมอเตอร์ให้เคลื่อนชุดจับยึดเมล็ดลงมา โดยตรวจสอบระยะจากลิมิตสวิทช์ที่ติดตั้งไว้ ซึ่งระยะของลิมิตสวิทช์ที่ติดตั้งมาจากค่าเฉลี่ยความหนาของเมล็ดตาลโตนด

2.2 ทำการวัดขนาดเมล็ดตาลโตนดโดยการหมุนเมล็ดตาลครั้งละ 1.8 องศาแล้วทำการอ่านค่าระยะเก็บไว้ซึ่งเมื่อเมล็ดตาลหมุนครบ 1 รอบ จะได้ระยะที่ตำแหน่งองศาต่างๆ จำนวน 200 จุด

2.3 ทำการเคลื่อนเมล็ดตาลโตนดเข้าหาใบผ่า

2.4 เมื่อเคลื่อนเมล็ดตาลเข้าหาใบผ่าในระยะที่กำหนดแล้วก็จะเริ่มการผ่าโดยการเปิดมอเตอร์ใบผ่าให้ทำงานจากนั้นจะทำการหมุนเมล็ดตาลไป 1.8 องศาและเคลื่อนเมล็ดตาลเข้า - ออก จากใบเลื่อยให้ได้ระยะความลึก (ระยะความลึกในการผ่าอ้างอิงจากขนาดของเมล็ดที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์วัดขนาดเมล็ด) ซึ่งมีเงื่อนไขการทำงานดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 กระบวนการทำงานในขั้นตอนการผ่าเมล็ด

2.5 เคลื่อนเมล็ดตาลออกมายังตำแหน่งเริ่มต้น โดยการอ่านค่าตำแหน่งจากลิมิตสวิทซ์

2.6 ทำการปลดการจับยึดเมล็ดตาลโตนดโดยขับมอเตอร์ให้เคลื่อนชุดจับยึดเมล็ดขึ้น จนถึงระยะลิมิตสวิทซ์

3. ผู้ใช้นำเมล็ดตาลโตนดออก

4. ผู้ใช้งานใช้มีดพร้าแซะตามร่องรอยผ่าเบาๆ เปลือกของเมล็ดตาลจะแยกออกจากกันเป็น 2 ซีก จากนั้นผู้ใช้ก็ทำการแกะจาวตาลออกมา

4. การทดสอบและประเมินผลกระบวนการทำงาน

ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานจะทำการทดสอบและปรับปรุงกระบวนการทำงานของเครื่องในแต่ละขั้นตอนเพื่อให้ผลลัพธ์การทำงานโดยรวมของเครื่องมีความถูกต้องแม่นยำและมีความรวดเร็วในการทำงาน ซึ่งมีการทดสอบและปรับปรุงในแต่ละขั้นตอนดังนี้

4.1 ทดสอบความแม่นยำของเซ็นเซอร์วัดขนาดเมล็ดตาลโตนด

โดยการจับยึดวัตถุแข็งไว้ที่ตำแหน่งยึดจับ โดยวัตถุแข็งมีขนาดความกว้าง 2 เซนติเมตร จากจุดศูนย์กลางของส่วนจับยึด จากนั้นทำการเคลื่อนวัตถุเข้าหาตัวเซ็นเซอร์ครั้งละ 0.1 เซนติเมตร อ่านค่าสัญญาณที่ได้มาจากขาสัญญาณแบบอนาล็อคของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1023 ทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง

4.2 ทำการทดสอบหาความเร็วที่เหมาะสมในหมุนเมล็ดตาลโตนด

ทำการอ่านค่าขนาดของเมล็ดตาลที่ตำแหน่งมุมการหมุนทุกๆ 1.8 องศา จำนวน 200 จุด โดยการควบคุมความเร็วในการหมุนที่แตกต่างกัน

4.3 การทดสอบหาระยะความลึกในการผ่าที่เหมาะสม

จากลักษณะทางกายภาพของเมล็ดตาลโตนดในภาพที่ 1 ประกอบด้วยกะลาตาล เนื้อตาล และจาวตาล โดยกะลาตาลเป็นส่วนประกอบที่มีความแข็งมากที่สุด ในการทดลองหาระยะความลึกในการผ่าที่เหมาะสมได้กำหนดระยะความลึกในการผ่าออกเป็น 3 ระดับคือ 0.4 เซนติเมตร 0.6 เซนติเมตร และ 0.8 เซนติเมตร โดยทำการทดสอบที่ระยะความลึกละ 3 เมล็ด หลังจากนั้นนำเมล็ดตาลโตนดที่ผ่าตาม

ระยะความลึกต่างๆ เสร็จแล้วมาทำการแกะจาวตาลออก

4.4 ทดสอบประสิทธิภาพทำงานของเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนด

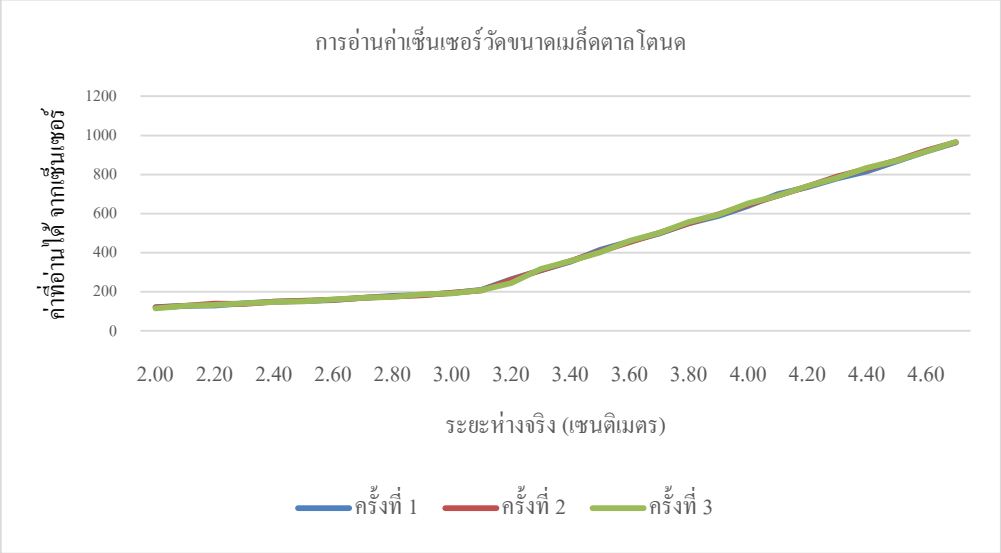
ทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดโดยใช้เมล็ดตาลโตนดสำหรับทดสอบจำนวน 50 เมล็ด ทำการทดสอบครั้งละ 1 เมล็ดโดยทำการจับเวลาในขั้นตอนการทำงานต่างๆ ของเครื่อง พร้อมทั้งตรวจวัดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าโดยรวม ทั้ง 50 เมล็ดและตรวจวัดการสูญเสียจาวตาลโตนดจากการผ่า

4.5 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

ทำการประเมินค่าใช้จ่ายโดยรวมเกี่ยวกับต้นทุนในการใช้งานเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดแบบอัตโนมัติเมื่อเทียบกับการใช้แรงงานคน ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรและทำการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน และเนื่องจากเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดแบบอัตโนมัติผู้ใช้งาน 1 คนสามารถที่จะทำการควบคุมการทำงานของเครื่องพร้อมกันได้หลายเครื่อง ในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์จึงทำการวิเคราะห์ใน 2 รูปแบบคือ กรณีที่ผู้ใช้งานลงทุนใช้งานเพียง 1 เครื่องและในกรณีที่ผู้ใช้งานลงทุนใช้งานพร้อมกัน 2 เครื่อง

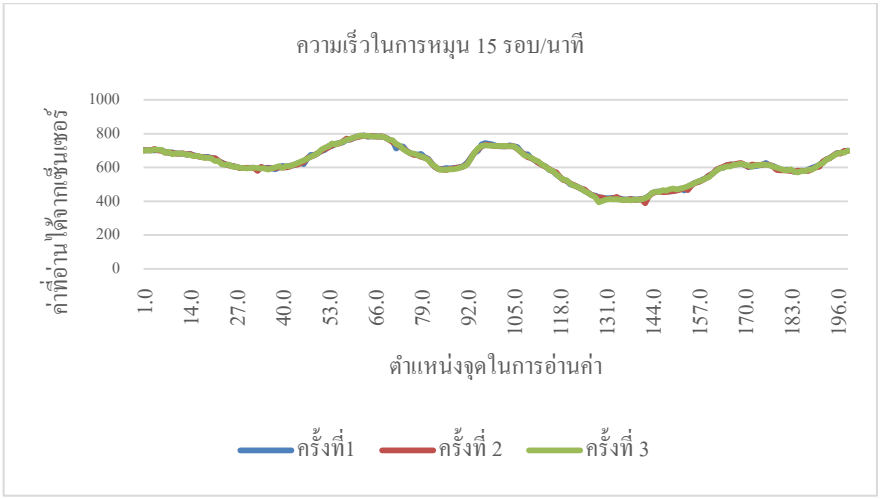
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการทดสอบความแม่นยำของเซ็นเซอร์วัดขนาดเมล็ดตาลโตนด จำนวน 3 ครั้งสามารถนำผลการทดลองมาสร้างกราฟได้ดังภาพที่ 8

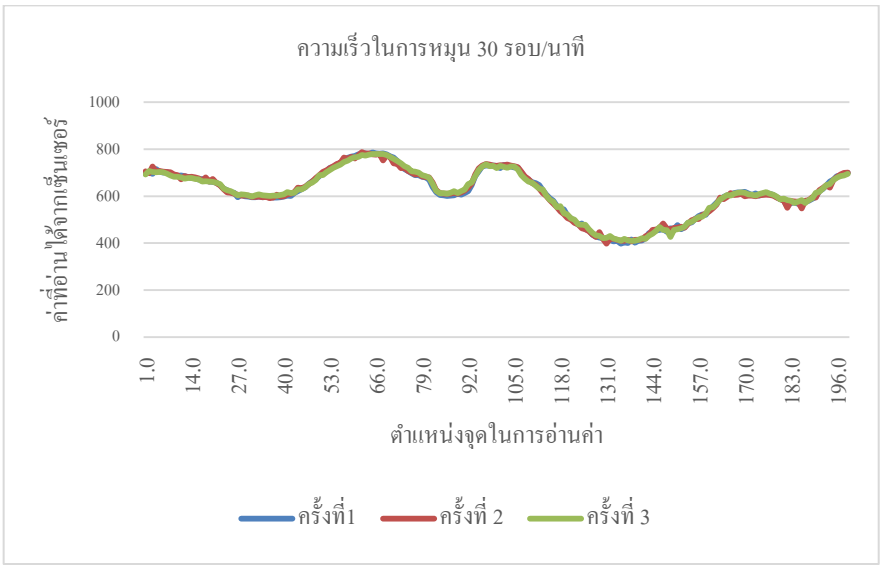


ภาพที่ 8 กราฟแสดงการทดสอบการอ่านค่าของเซ็นเซอร์วัดขนาดเมล็ด

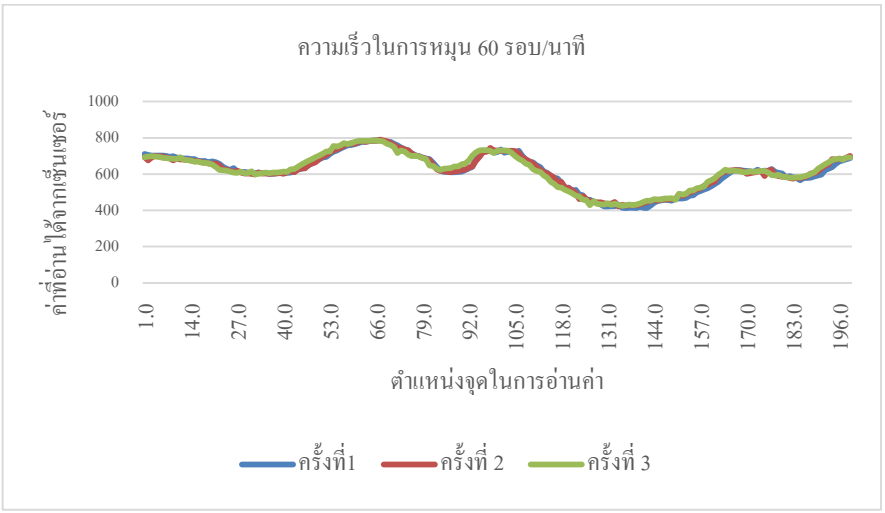
จากกราฟในภาพที่ 8 จะพบว่าค่าที่อ่านจากเซนเซอร์กับระยะห่างจริงมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบเชิงเส้นซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ช่วง และกราฟทั้ง 3 เส้นมีการซ้อนทับกันเกือบสนิท แสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์ที่สร้างขึ้นนี้มีความเที่ยงตรงและความแม่นยำในการวัดขนาดเมล็ดตาลโตนดสูง



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 9 กราฟแสดงการทดสอบความเร็วในการหมุนเมล็ด

ผลการทดสอบหาความเร็วที่เหมาะสมในหมุนเมล็ดตาลโตนด โดยทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้งในแต่ละความเร็วสามารถนำมาสร้างกราฟได้ดังแสดงในภาพที่ 9 เมื่อพิจารณาจากกราฟในภาพที่ 9 พบว่าการทดสอบการหมุนที่ความเร็ว 15 รอบ/นาที กราฟแสดงผลการทดสอบทั้ง 3 ครั้งมีการซ้อนทับกันมากที่สุด ซึ่งหมายความว่า การหมุนที่ความเร็ว 15 รอบต่อนาที จะทำให้มีความแม่นยำและความเที่ยงในการอ่านค่าของเซ็นเซอร์มากที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ความเร็วในการหมุน 15 รอบ/นาที

ผลการทดสอบหาระยะความลึกในการผ่าที่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าระยะความลึกในการผ่าที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.8 เซนติเมตร ซึ่งในการผ่าจะไม่สามารถผ่าในรอบเดียวได้เนื่องจากการหมุนเมล็ดตาลโตนดครั้งเดียวที่ระยะความลึก 0.8 เซนติเมตรจะทำให้เกิดแรงต้านระหว่างดอกเราเตอร์กับเมล็ดตาลโตนดมากเกินไป ทำให้ดอกเราเตอร์เสียหาย หรือแรงบิดของมอเตอร์ที่ใช้ในการหมุนไม่สามารถหมุนเมล็ดตาลโตนดได้ ดังนั้นค่าที่เหมาะสมในการผ่าคือแบ่งระยะความลึกในการผ่าออกเป็น 2 รอบ โดยรอบที่ 1 ผ่าที่ระยะความลึก 0.3 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นส่วนของกะลาที่มีความแข็งสูง และรอบที่ 2 ผ่าลึกลงไปจากรอบที่ 1 อีก 0.5 เซนติเมตร

ตารางที่ 3 การทดสอบหาระยะความลึกที่เหมาะสม

ระยะความลึก	ผลลัพธ์
0.4 เซนติเมตร	สามารถแยกกะลาตาลออกเป็น 2 ซีกได้ แต่ไม่สามารถแยกเนื้อตาลออกเป็น 2 ซีกได้จึงไม่สามารถแกะจาวตาลออกมาได้
0.6 เซนติเมตร	สามารถแยกกะลาตาลและเนื้อตาลออกเป็น 2 ซีก แล้วแกะจาวตาลออกมาได้ แต่ทำได้ด้วยความยากลำบาก
0.8 เซนติเมตร	สามารถแยกกะลาตาลและเนื้อตาลออกเป็น 2 ซีก แล้วแกะจาวตาลออกมาได้ง่าย

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เวลาที่ใช้ในการทำงานในแต่ละขั้นตอน

ขั้นตอน	จับยึดเมล็ด	วัดขนาดเมล็ด	ป้อนเมล็ดเข้าชุดผ่า	การผ่าเมล็ด	ถ่ายเมล็ดออก	ปลดการจับยึดเมล็ด
เวลา	2 วินาที	4 วินาที	3 วินาที	2 นาที 56 วินาที ± 3 วินาที	3 วินาที	2 วินาที
เวลารวม	3 นาที 10 วินาที ± 3 วินาที					

จากตารางที่ 4 สรุปได้ว่าในการผ่าเมล็ดตาลโตนด 1 เมล็ด จะใช้ระยะเวลาในการผ่าประมาณ 3 นาที 10 วินาที ± 3 วินาทีหรือประมาณ 19 เมล็ด/ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับรูปทรงของเมล็ดในขั้นตอนการผ่าเมล็ดที่จะต้องเคลื่อนเมล็ดให้ได้ระยะความลึกที่ต้องการก่อนที่จะทำการหมุนเมล็ด ส่วนขั้นตอนอื่นๆ

จะใช้ระยะเวลาคงที่ โดยมีภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการผ่าดังแสดงในภาพที่ 10 เมื่อทำการเปรียบเทียบความเร็วในการผ่าของเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดแบบอัตโนมัติกับการใช้แรงงานคน พบว่าเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดมีความสามารถในการผ่าที่เร็วกว่าการใช้แรงงานคนสอดคล้องกับ Kaikaew (2020) และ Sawatsup *et al*. (2021) ซึ่งโดยปกติแรงคนจะผ่าเมล็ดตาลได้ประมาณ 15 เมล็ด/ชั่วโมง (Klahan, 2014) แต่การใช้แรงงานคนจะผ่าได้วันละ 6 ชั่วโมงเท่านั้น เพราะต้องมีการหยุดพักบ่อยเนื่องการมีอาการเหนื่อยล้า ในขณะที่การใช้เครื่องผ่าเมล็ดตาลสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับการสร้างเครื่องจักรอัตโนมัติของ Phiphatpaiboon *et al*. (2013) เมื่อเทียบความเร็วในการผ่ากับเครื่องผ่าเมล็ดตาลของ Nuesuk *et al*. (2015) และ Parnsakhorn *et al*. (2016) พบว่าเครื่องที่สร้างขึ้นทำงานได้ช้ากว่าแต่มีข้อดีตรงที่ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องอยู่ควบคุมเครื่องตลอดเวลา

ภาพที่ 10 เมล็ดตาลโตนดที่ผ่าด้วยเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดแบบอัตโนมัติ

ผลจากการวัดอัตราการสูญเสียจาวตาลจากการผ่าเมล็ดตาลทั้งหมด 50 เมล็ดพบว่าไม่มีการสูญเสียจาวตาลโตนดจากการผ่า หรือมีประสิทธิภาพในการทำงาน 100% ผลจากการตรวจวัดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานโดยรวมพบว่าเครื่องผ่าจาวมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานอยู่ที่ 0.19 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ซึ่งมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่า Parnsakhorn *et al*. (2016)

ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

จากผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม โดยคิดราคาเครื่องต้นแบบ 25,000 บาท อายุการใช้งาน 5 ปี อัตราดอกเบี้ยหรือค่าสียโอกาส 10% ใช้ผู้ควบคุมการทำงานของเครื่อง 1 คน โดยถ้าผู้ใช้งานลงทุนใช้งาน 1 เครื่องจะมีต้นทุนในการผ่าเฉลี่ยอยู่ที่เมล็ดละ 2.07 บาท ระยะเวลาคืนทุน 10.5 เดือน แต่ถ้าหากผู้ใช้งานลงทุนใช้งาน 2 เครื่องพร้อมกันจะมีต้นทุนในการผ่าเฉลี่ยอยู่ที่เมล็ดละ 1.08 บาท ระยะเวลาคืนทุน 5.4 เดือน โดยมีผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การคำนวณเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนด

คุณลักษณะ	ลงทุน 1 เครื่อง	ลงทุน 2 เครื่อง
ต้นทุนคงที่(Fixed cost)		
ราคาเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนด (P)	25,000 บาท	50,000 บาท
มูลค่าเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดเมื่อสิ้นปีที่ 5 มีมูลค่าคงเหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ของราคาต้นทุน (S)	2,500 บาท	5,000 บาท
ค่าเสื่อมราคา (DP) = (P-S)/L	4,500 บาท	9,000 บาท
ดอกเบี้ยหรือค่าเสียโอกาส (I) = (P+S)/2 × (10/100)	1,375 บาท	2,750 บาท
รวมต้นทุนคงที่ต่อปี = ค่าเสื่อมราคา + ดอกเบี้ยหรือค่าเสียโอกาส	5,875 บาทต่อปี	11,750 บาทต่อปี
ต้นทุนผันแปร(Variable cost)		
ค่าบำรุงรักษาคิดเฉลี่ยวันละ 10 บาท ทำงาน 180 วันต่อปี	1,800 บาทต่อปี	3,600 บาทต่อปี
ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 0.19 กิโลวัตต์ชั่วโมง ราคาไฟฟ้าหน่วยละ 3.5 บาท ใน 1 ปีทำงาน 180 วัน วันละ 8 ชั่วโมง	957.6 บาทต่อปี	1,915.2 บาทต่อปี
ค่าจ้างแรงงานวันละ 300 บาท จำนวน 1 คน ทำงาน 180 วัน	54,000 บาทต่อปี	54,000 บาทต่อปี
รวมต้นทุนผันแปร	56757.6 บาทต่อปี	71265.2 บาทต่อปี
ต้นทุนรวม	62632.6 บาทต่อปี	71265.2 บาทต่อปี
ค่าใช้จ่ายต่อเมล็ด ทำงาน 1 ปี วันละ 8 ชั่วโมง = 1440 ชั่วโมง/ปี ความสามารถในการทำงาน 19 เมล็ดต่อชั่วโมงต่อเครื่อง	2.07 บาทต่อเมล็ด	1.08 บาทต่อเมล็ด
ผลประโยชน์ที่จะได้รับ (กำหนดการจ้างแรงงานสามารถผ่าได้ชั่วโมงละ 15 เมล็ดผ่าได้วันละ 6 ชั่วโมง เนื่องจากต้องมีการหยุดพัก)	91,108.8 บาทต่อปี	182,217.6 บาทต่อปี
ผลประโยชน์สุทธิ	28,476.2 บาทต่อปี	110,952.4 บาทต่อปี
ระยะเวลาคืนทุน	10.5 เดือน	5.4 เดือน

สรุป

เครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และมีประสิทธิภาพการทำงาน 100 เปอร์เซ็นต์ สามารถผ่าเมล็ดตาลโตนดได้ประมาณ 19 เมล็ดต่อชั่วโมง โดยที่ผู้ใช้งานจะใช้เวลาในการควบคุมการทำงานเพียงแค่ 5 วินาทีต่อผลเท่านั้น ในขณะที่การผ่าด้วยแรงงานคนสามารถผ่าได้ประมาณ 15 เมล็ดต่อชั่วโมง จากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมพบว่าถ้าหากผู้ใช้งานทำการควบคุมการทำงานของเครื่องผ่าเมล็ดตาลโตนดพร้อมกัน 2 เครื่องจะมีค่าใช้จ่าย 1.08 บาท/เมล็ด และระยะเวลาคืนทุน 5.4 เดือน

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยครั้งนี้ได้รับสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ. 2561 โดยได้รับการประเมินข้อเสนอจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ในที่นี้

เอกสารอ้างอิง

Boonchouytan, W. 2016. **Semi Automatic Cutting Palmyra Seeds Machine.** Available Source: http://www.clinictech.most.go.th/online/pages/techlist_display.asp?tid=1443, March 18, 2020. (in Thai)

Kaikaew, E. 2020. Automatic Honey Machine. **Technology Vocational Education Training** 4(8): 115-125. (in Thai)

Klahan, J. 2014. Development of a Semi-Automatic Cutting Sugar Pulp, pp. 249-254. *In* **Rethink : Social Development for Sustainability in ASEAN Community.** Centara Hotel & Convention Center Khon Kaen, Khon Kaen. (in Thai)

Kornpitak, T. 2014. A Bamboo Chopping Machine. **Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal** 7(2): 16-28. (in Thai)

Langkapin, J., Parnsakhorn, S. and Kalsirisilp, R. 2022. Design and Fabrication of Lotus Seeds Sizing Machine. **RMUTSV Research Journal** 14(1): 103-116. (in Thai)

Niamhom, O. and Niamhom, K. 2021. The Development of Cotton Ginning Machine. **Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University** 11(1): 41-54. (in Thai)

Nuesuk, S., Thaikeid, S. and Limsuwan, T. 2015. Cutting Palmyra Seeds Machine. Thesis of Bachelor Degree in Automotive Mechanic, Suratthani Technical College. (in Thai)

Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. 2012. Plants with potential to reduce air pollution classified by leaf characteristics, pp.6-64. *In* Simachaya, W., Boonprakab, S., Nantaphothidet, A. and Thiyajai, N., eds. **Plants with Potential to Reduce Pollution in Rayong Province and Nearby Areas. People's Edition of the Document under the Community Initiative Project.** B.V. Offset Limited Partnership, Bangkok. (in Thai)

Parnsakhorn, S., Langkapin, J. and Kalsirisilp, R. 2016. Design and Fabrication of Palmyra Seed Splitting Machine. **Khon Kaen Agriculture Journal** 44(3): 451-460. (in Thai)

Phiphatpaiboon, N., Chaikhot, C., Raksamerwong, M., Chiangkhang, T. and DonMueang, O. 2013. Design and Construction of Lid Automatic Machine for SMEs. **Sakon Nakhon Rajabhat University Journal** 5(9): 109-118. (in Thai)

Sawatsup, B., Budsri, T., Singmahachai, S. and Prapin, J. 2021. Automatic Lifter Loader. **Vocational Education Innovation and Research Journal** 4(2): 64-68. (in Thai)

Sukjai, K., Kalsirisilp, R. and Langapin, J. 2021. Design and Development of Bamboo Craft Splitting and Slicing Machine. **SWU Engineering Journal** 16(1): 71-81. (in Thai)

Wongsangnoi, P. 2020. Development of Maize Shreddre for Animal Feed Production. **Academic Journal** 15(1): 15-31. (in Thai)

Wongvej, C. 2013. **Cutting Palmyra Seeds Machine.** Available Source: https://www.youtube.com/watch?v=_w8Odx5nD6Y, November 12, 2021. (in Thai)

Yamfang, M., Boonwan, C., Nopporn, P., Preamjai, N., Sukchana, T. and Kuptasa, M. 2017. Developmentof the Fresh Betel Nut Splitter with a Semi-Automatic Operation for the Betel Nut Processing. **Area Based Development Research Journal** 9(6): 420-429. (in Thai)

ผลของจมูกข้าวต่อคุณภาพของไอศกรีมและความคิดเห็นของผู้บริโภคในการทำธุรกิจ

Effects of Rice Germ on Quality of Ice Cream and Consumers' Opinions on Business Operation

ณพศักดิ์ เจิมมงคล ปฏิภาณ จันทรนารา ปวริศ สุทธิเสรีสกุล ปัณณธร ธารอุไรกุล
สุริโย มีนาม และ ณัฐธญาณ์ ศรีสุวอ*

Noppasak Chermmongkol, Patiphan Chantaranara, Pavaris Sutthiseriskul, Pannatorn Tharn-uraikun, Suriyo Meenam and Nutthaya Srisuvor*

Received: 15 December 2020, Revised: 30 January 2021, Accepted: 5 February 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณของจมูกข้าวที่มีต่อโอเวอร์รัน การละลาย และลักษณะทางประสาทสัมผัสของไอศกรีม รวมทั้งความคิดเห็นของผู้บริโภคต่อไอศกรีมจมูกข้าวและการทำธุรกิจ ประเมินลักษณะทางประสาทสัมผัสโดยใช้วิธีการทดสอบความชอบด้วยระดับความชอบ 5 คะแนน ผู้ทดสอบชิม คือ นักศึกษา 50 คน ในการศึกษาการเพิ่มปริมาณจมูกข้าวที่ระดับร้อยละ 0 5 10 และ 15 (โดยน้ำหนัก) พบว่า ไอศกรีมไม่เสริมจมูกข้าวมีโอเวอร์รันและการละลายสูงที่สุด (ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และ ร้อยละ 0.42 ต่อนาที ตามลำดับ) การเพิ่มปริมาณจมูกข้าวที่ระดับร้อยละ 0 5 10 และ 15 (โดยน้ำหนัก) ทำให้โอเวอร์รันลดลงจากร้อยละ 25 เป็น 15 14 และ 12 ตามลำดับ และการละลายลดลงจากร้อยละ 0.42 เป็น 0.25 0.02 และ 0 ต่อนาที ตามลำดับ การประเมินลักษณะทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมเสริมจมูกข้าวที่ระดับร้อยละ 5 10 และ 15 (โดยน้ำหนัก) พบว่า ไอศกรีมเสริมจมูกข้าวที่ระดับร้อยละ 5 ได้รับความชอบสูงสุดในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ความคิดเห็นของผู้บริโภคสำหรับไอศกรีมจมูกข้าวและการทำธุรกิจ ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ต้องการที่จะซื้อไอศกรีมจมูกข้าวเพราะมีประโยชน์ต่อสุขภาพ ชอบบรรจุภัณฑ์และฉลากเป็นถ้วยกระดาษติดสติกเกอร์สีขาว ขายในราคา 25 บาท ต่อน้ำหนัก 120 กรัม ที่ร้านสะดวกซื้อ

คำสำคัญ: ไอศกรีม, จมูกข้าว, โอเวอร์รัน, การละลาย, ความคิดเห็นของผู้บริโภค

ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร 10120

Department of Food Technology and Nutrition, Faculty of Home Economic Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok 10120, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): srisuvor@gmail.com, nuttaya.s@mail.rmutk.ac.th

ABSTRACT

This research studied various amounts of rice germ on overrun, melting, and sensory characteristics of ice cream including opinions of consumers for rice germ ice cream and its business. The sensory characteristics were evaluated using a preference test with the 5-point hedonic scale. The panelists were 50 students. In this study, increasing the amounts of rice germ at the levels of 0, 5, 10, and 15 % (w/w) was found that the ice cream without rice germ had the highest overrun and melting (25 % w/w and 0.42 % min^{-1}, respectively). Increasing the rice germ at the level of 0 5 10 15 % w/w decreased the overrun from 25 to 15 14 and 12 % w/w and melting from 0.42 to 0.25 0.02 and 0 % min^{-1}, respectively. The sensory evaluation of the ice cream supplemented with rice germ at the levels of 5, 10, and 15 % (w/w) showed that the ice cream supplemented with rice germ at the level of 5 % received the highest preference in appearance, color, odor, flavor, taste, texture and overall liking. Regarding opinions of consumers for the rice germ ice cream and the business operation, most of the respondents preferred to purchase the rice germ ice cream because of the health benefits. The preferred packaging and label were a paper cup with white sticker. 25 baht per 120 grams was the preferred price at the convenience stores.

Key words: ice cream, rice germ, overrun, melting, consumer opinion

บทนำ

ไอศกรีมมีแนวโน้มการเติบโตทางธุรกิจแบบก้าวกระโดดโดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.1 ต่อปี และมีมูลค่ามากกว่า 30,000 ล้านบาท ซึ่งมากกว่าตลาดนมเปรี้ยวและโยเกิร์ตของไทย (National Food Institute, Food Intelligence Center, 2015; 2017) นอกจากนี้ยังสามารถส่งไอศกรีมไปขายในต่างประเทศได้ เนื่องจากประเทศไทยมีกำลังการผลิตและมีศักยภาพทางด้านวัตถุดิบภายในประเทศที่มีความหลากหลาย จึงทำให้ผู้ประกอบการสนใจที่จะลงทุนทำธุรกิจไอศกรีมทั้งระดับพรีเมียม ระดับกลาง จนถึงระดับล่าง โดยเน้นการทำการตลาดด้านราคา และการวางสินค้าจำหน่ายในร้านสะดวกซื้อ แหล่งท่องเที่ยว ชุมชน ร้านอาหาร ภัตาคาร หรือโรงแรม โดยสร้างรสชาติที่แตกต่างและมีเอกลักษณ์ รวมทั้งใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพและราคาไม่แพง แต่ในเรื่องของตราสินค้าอาจยังไม่เป็นที่รู้จักของผู้บริโภคทั่วไปมากนัก สำหรับไอศกรีมกลุ่มพรีเมียมมักมีช่องทางการจำหน่ายแบบแฟรนไชส์ (franchise) โดยเน้นการขยายสาขาและบุกตลาดระดับกลางโดยมีให้ซื้อกลับบ้าน (take home) และขายออนไลน์ ซึ่งทำให้ผู้ประกอบการรายใหม่ต้องปรับกลยุทธ์ทั้งทางด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การสร้างตราสินค้า และการขยายช่องทางการจำหน่าย (National Food Institute, Food Intelligence Center, 2017) โดยเฉพาะการทำการตลาดออนไลน์ซึ่งในปัจจุบันกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก อีกทั้งการเลือกสูตรและรสชาติของไอศกรีมให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ หรือกลุ่มคนรักสุขภาพ ซึ่งต้องการรับประทานไอศกรีมที่ทำจากวัตถุดิบที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย รวมทั้งมีขั้นตอนการผลิตที่ได้มาตรฐาน และมีรูปแบบการจัดตกแต่งไอศกรีมและบรรจุภัณฑ์ที่สวยงาม (Marshall *et al*., 2003)

จมูกข้าว (rice germ) เป็นส่วนปลายของเมล็ดข้าวที่ติดกับก้านดอกและเป็นส่วนที่ต้นอ่อนงอก (Royal Society, 2013) หรือเรียกว่า เอมบริโอ (embryo) ซึ่งมีสารไฟโตสเตอรอล (phytosterol) วิตามินอี และเส้นใยอาหาร (Negendra *et al*., 2011; Sripanidkulchai, 2018) จมูกข้าวที่ได้จากข้าวสีต่างๆ จะมีสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidants) ได้แก่ พอลิฟีนอล (polyphenol) แคโรทีนอยด์ (carotenoid) กรดเฟอรูลิก (ferulic acid) โทโคฟีรอล (tocopherol) และโทโคไตรอีนอล (tocotrienol) นอกจากนี้ยังมีแกมมาออริซานอล (gamma-oryzanol) ที่ช่วยลดอาการของวัยหมดประจำเดือน ต้านการเกิดริ้วรอย และต้านการเกิดมะเร็ง (Patel and Naik, 2004; Negendra *et al*., 2011; Sripanidkulchai, 2018; Tadakottisarn, 2018) ช่วยลดคอเลสเตอรอลชนิดไม่ดีหรือ LDL (low-density lipoprotein cholesterol) และเพิ่มคอเลสเตอรอลชนิดดีหรือ HDL (high-density lipoprotein cholesterol) ช่วยลดน้ำตาลและไขมันในเลือดของหนูที่มีภาวะเบาหวาน ช่วยเสริมความจำ ลดความเครียด ลดระดับ TSH (thyroid-stimulating hormone) ในซีรัม (serum) ของผู้ป่วยโรคไทรอยด์ ช่วยพัฒนากล้ามเนื้อ (Patel and Naik, 2004; Sattayasai, 2018) ป้องกันการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจตีบ ความดันโลหิตสูง เบาหวาน และช่วยลดไขมันในตับ (Lilitchan, 2018; Kubota *et al*., 2020) ในอดีตได้มีการนำส่วนต่างๆ ของข้าวมาใช้เป็นวัตถุดิบในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ การใช้ข้าวกล้องงอกในผลิตภัณฑ์ขนมหวาน (บัวลอย แช่แข็ง เต้าฮวย และลอดช่อง) (Petcharat *et al*., 2011) รวมทั้งไอศกรีมข้าวกล้องงอก (Ministry of Agriculture and Cooperatives, Rice Department, 2009) ใช้รำข้าวในไอศกรีมกะทิลดไขมัน (Chattong, 2012) ใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รีในไอศกรีมไขมันต่ำ (Chuaykarn *et al*., 2013) ศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในข้าวกล้องงอกและนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ (Banchuen, 2010) ใช้รำข้าวไรซ์เบอร์รีพัฒนาเป็นขนมขาไก่เพื่อให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Srichan, 2017) ไอศกรีมเนื้อนิ่มจากน้ำนมข้าวกล้องงอกโดยใช้สารให้ความคงตัว (stabilizer) (Malipant, 2018) และไอศกรีมไขมันต่ำจากน้ำนมข้าวเหนียวดำ (Charoenphun, 2019) แต่ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาผลของจมูกข้าวต่อคุณภาพของไอศกรีมและการทำธุรกิจ โดยนำจมูกข้าวที่เหลือทิ้งจากการขัดสีที่หลุดออกมาพร้อมกับรำข้าวและแกลบ ซึ่งสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น ส่วนใหญ่ใช้เป็นอาหารสัตว์นำมาเพิ่มมูลค่าโดยใช้เป็นวัตถุดิบที่มีสารพฤกษเคมี (phytochemicals) เสริมให้แก่ไอศกรีม ซึ่งจมูกข้าวมีสารอาหารจากพืช (phytonutrient) ที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพและทางเภสัชวิทยา (Santiwattana and Somsawat, 2013; Sripanidkulchai, 2018) สามารถนำมาผลิตเป็นไอศกรีมจมูกข้าวและต่อยอดทำธุรกิจจำหน่ายในเชิงการค้าได้เพื่อให้มีลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ดี สะอาด ปลอดภัย และเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคที่ห่วงใยสุขภาพ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณของผงจมูกข้าวที่มีต่อโอเวอร์รัน การละลาย และลักษณะทางประสาทสัมผัสของไอศกรีม รวมทั้งสำรวจความคิดเห็นของผู้บริโภคที่มีต่อไอศกรีมจมูกข้าวและการทำธุรกิจไอศกรีมจมูกข้าว

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบ

ผงจมูกข้าวสำเร็จรูปที่มีข้าวพันธุ์ผสม ได้แก่ ข้าวเหนียวดำ ข้าวเหนียวแดง ข้าวหอมนิล ข้าวไรซ์เบอร์รี ข้าวหอมมะลิ 105 และข้าวทิบทิมชุมแพ ซื้อจากกลุ่มวิสาหกิจศูนย์ส่งเสริมการผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าวชุมชน ตำบลสาวะถี อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น น้ำนมโค 100% พาสเจอร์ไรซ์ รสจืด (บริษัท ซีพี-เมจิ

จำกัด) วิปปิ้งครีม (ครีมแท้) UHT (บริษัท ฟอนเทียร่า แบรนด์ส (ประเทศไทย) จำกัด) น้ำตาลทรายขาวบริสุทธ์ (บริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด) ไข่ไก่ (บริษัท เกษมชัยฟู้ด จำกัด) แป้งข้าวโพด 100% (บริษัท คอนติแนนตัล ฟูด จำกัด) และเกลือเสริมไอโอดีน (บริษัท อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด) ซื้อจากห้างสรรพสินค้าในเขตสาทร และกลิ่นวานิลา (บริษัท ภูรินและภูริชญ์ จำกัด) ซื้อจากร้านค้าปลีกในเขตบางแค กรุงเทพมหานคร

2. การผลิตไอศกรีมจมูกข้าว

ศึกษาปริมาณของผงจมูกข้าว ได้แก่ ร้อยละ 0 5 10 และ 15 (โดยน้ำหนัก) ในการทำไอศกรีม โดยชั่งส่วนประกอบทั้งหมดของไอศกรีม จำนวน 4 สูตร ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของไอศกรีมจมูกข้าว

ส่วนประกอบ (กรัม)	สูตรควบคุม	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
นมพาสเจอไรซ์	65.4	65.4	65.4	65.4
ไข่ไก่	13.4	13.4	13.4	13.4
วิปปิ้งครีม	11	11	11	11
ผงจมูกข้าว	0	5	10	15
น้ำตาลทราย	8	9	10	11
แป้งข้าวโพด	1.2	1.2	1.2	1.2
เกลือ	0.2	0.2	0.2	0.2
กลิ่นวานิลา	0.8	0.8	0.8	0.8
รวม	100	106	112	118

ที่มา: ดัดแปลงจาก Wongfuk (2001)

ผสมน้ำตาล เกลือ และนมพาสเจอไรซ์ลงในอ่างผสม คนจนส่วนผสมละลาย และผสมแป้งข้าวโพดให้เข้ากันดี ตุ๋นในน้ำเดือด กวนจนแป้งสุก (ประมาณ 5 นาที) พักทิ้งไว้ให้อุ่น ตีไข่ให้เข้ากันดี และเทลงในส่วนผสมทั้งหมด ผสมให้เข้ากันโดยตุ๋นในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้อุ่น เติมวิปปิ้งครีม ผงจมูกข้าว และกลิ่นวานิลา คนให้เข้ากันแล้วใส่ลงในเครื่องทำไอศกรีม (HOM-122050, HOMEMATE®, Verasu) ปั่นจนกระทั่งส่วนผสมมีอุณหภูมิ -5±1 องศาเซลเซียส แล้วเทใส่ภาชนะบรรจุนำเข้าตู้แช่เยือกแข็ง (FF-105X, FRESHER®, ประเทศไทย) ที่อุณหภูมิ -18±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. การวิเคราะห์โอเวอร์รัน

หาโอเวอร์รันของไอศกรีมโดยชั่งน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมดที่บรรจุเต็มถ้วยพลาสติกก่อนเข้าเครื่องทำไอศกรีม แล้วปั่นจนส่วนผสมมีอุณหภูมิ -5 ± 1 องศาเซลเซียส บรรจุไอศกรีมที่ได้ลงถ้วยพลาสติกใบเดิมจนเต็ม ชั่งน้ำหนักไอศกรีม ทำ 3 ซ้ำ คำนวณหาโอเวอร์รัน (Adapa *et al.*, 2000a) ดังนี้

โอเวอร์รัน (ร้อยละ) = ((น้ำหนักส่วนผสมหนึ่งหน่วยปริมาตร - น้ำหนักของปริมาตรไอศกรีมหนึ่งหน่วย)/น้ำหนักของไอศกรีมหนึ่งหน่วยปริมาตร) × 100

4. การวิเคราะห์การละลาย

วิเคราะห์การละลายของไอศกรีมจมูกข้าว โดยชั่งไอศกรีมที่ผ่านการแช่แข็งที่อุณหภูมิ -18±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ววางลงบนตะแกรงลวดที่วางอยู่เหนือถ้วยที่ทราบน้ำหนัก และปล่อยให้ไอศกรีมละลายที่อุณหภูมิห้อง (27±1 องศาเซลเซียส) ชั่งน้ำหนักของเหลวที่ละลายอยู่ในถ้วยทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 30 นาที จดบันทึก ทำ 3 ซ้ำ และคำนวณหาอัตราส่วนของน้ำหนักไอศกรีมที่ละลายทั้งหมดต่อน้ำหนักของตัวอย่างไอศกรีมเริ่มต้นเทียบกับเวลา น้ำหนักของเหลวที่ละลายค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาหนึ่งจึงกำหนดอัตราการละลายโดยรวม และรายงานผลเป็นร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักต่อนาที (Prindiville *et al*., 2000)

5. การประเมินลักษณะทางประสาทสัมผัส

ประเมินลักษณะทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมจมูกข้าวทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยใช้วิธีการทดสอบความชอบ (preference test) ที่ระดับความชอบ 5 คะแนน (5-point hedonic scale) ได้แก่ 5 หมายถึง ชอบมาก 4 หมายถึง ชอบ 3 หมายถึง เฉยๆ 2 หมายถึง ไม่ชอบ และ 1 หมายถึง ไม่ชอบมาก โดยสุ่มเลข 3 หลัก และติดฉลากที่มีรหัสเลข 3 หลักที่ข้างถ้วย เสิร์ฟตัวอย่างไอศกรีมจมูกข้าวที่อุณหภูมิ 5±2 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 09.00-11.00 น. และ 14.00-16.00 น. ให้แก่นักศึกษาและอาจารย์ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ จำนวน 50 คน

6. การสำรวจพฤติกรรมและความคิดเห็นของผู้บริโภค

การศึกษาความเป็นไปได้ในการทำธุรกิจไอศกรีมจมูกข้าวโดยใช้แนวคิดและทฤษฎีเกี่ยวกับส่วนประสมทางการตลาด (marketing mix) สำรวจความคิดเห็นและการตัดสินใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ (product) ราคา (price) สถานที่จำหน่าย (place) และการส่งเสริมการขาย (promotion) (Lovelock *et al*., 2005) รวมทั้งบรรจุภัณฑ์และฉลาก ดังแสดงในภาพที่ 1

(ก) ถ้วยกระดาษ

(ข) ถ้วยพลาสติกทรงแบน

(ค) ถ้วยพลาสติกทรงสูง

(ง) สติกเกอร์สีขาว

(จ) สติกเกอร์สีเหลือง

(ฉ) สติกเกอร์สีฟ้า

ภาพที่ 1 รูปแบบบรรจุภัณฑ์และฉลากของไอศกรีมจมูกข้าว (Chermmongkol *et al*., 2019)

แบบสอบถามแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 สำรวจข้อมูลทั่วไปของผู้บริโภค ได้แก่ เพศ อายุ และรายได้เฉลี่ยต่อเดือน และส่วนที่ 2 สำรวจพฤติกรรมของผู้บริโภคที่มีต่อไอศกรีมทั่วไปและความคิดเห็น

ของผู้บริโภคที่มีต่อไอศกรีมจมูกข้าวและการทำธุรกิจโดยใช้คำถามปลายปิด (close-ended) แบบเป็นการตรวจสอบรายการ (check list) และมีหลายคำตอบให้เลือก (multiple choice questions) ใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจง (purposive sampling) ประชากรที่สำรวจ ได้แก่ นักศึกษา และเจ้าหน้าที่ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ จำนวน 100 คน

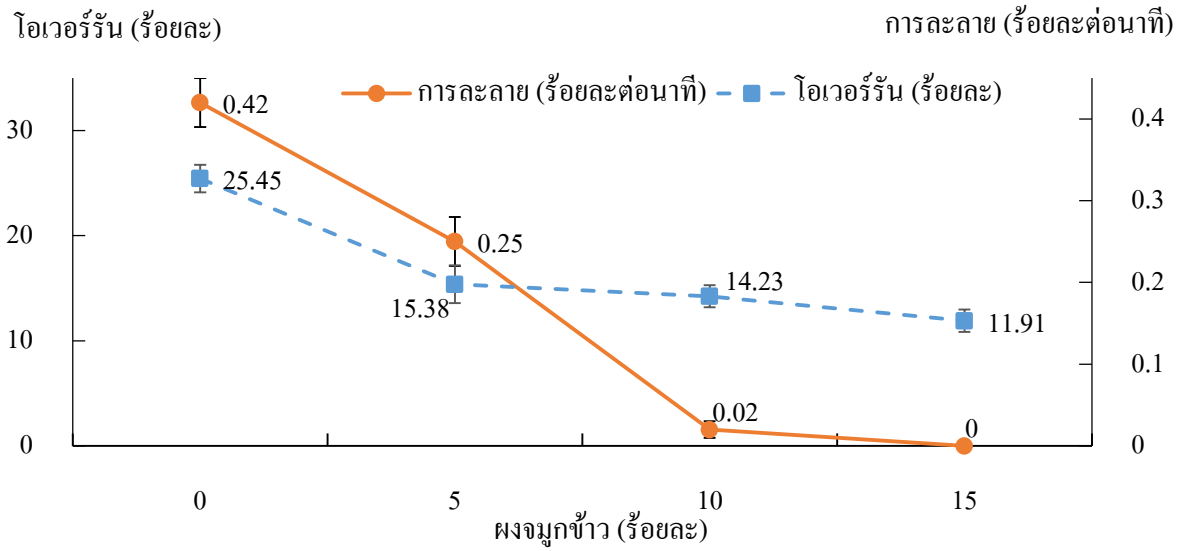
7. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การประเมินผลทางด้านลักษณะทางประสาทสัมผัสมีการวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized complete block design, RCBD) วิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ Analysis of Variance (ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในการสำรวจพฤติกรรมและความคิดเห็นของผู้บริโภคใช้สถิติในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ แจกแจงความถี่ (frequency) และรายงานผลเป็นร้อยละ

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การวิเคราะห์โอเวอร์รัน

ผลของโอเวอร์รันของไอศกรีมเสริมจมูกข้าวที่ระดับร้อยละ 0 5 10 และ15 (โดยน้ำหนัก) ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ปริมาณผงจมูกข้าวที่มีต่อโอเวอร์รันและการละลายของไอศกรีม (Chermmongkol *et al.*, 2019)

ไอศกรีมนมไม่เสริมผงจมูกข้าวมีโอเวอร์รันสูงสุด ถ้าเสริมผงจมูกข้าวในปริมาณมากขึ้นทำให้โอเวอร์รันลดลงเนื่องจากไอศกรีมนมมีสมบัติในการเกิดโฟมหรือโอเวอร์รันได้สูงกว่าไอศกรีมนมผสมแป้งข้าวชนิดต่างๆ (Charoenphun, 2019) การเติมแป้งข้าวหรือจมูกข้าวในปริมาณมากขึ้นทำให้ไอศกรีมมีความหนืดเพิ่มขึ้นจึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของใบพัดขณะตีอากาศเข้าไปในเนื้อไอศกรีมส่งผลทำให้การเกิดโฟมหรือโอเวอร์รันลดลง แต่ช่วยทำให้เกิดลักษณะโฟมที่คงตัว และจำกัดการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ (Stanley *et al.*, 1996) ผลของการวิจัยสอดคล้องกับการศึกษาไอศกรีมที่ทดแทนน้ำนมด้วยแป้งข้าวไรซ์เบอร์รีและทดแทนน้ำนมด้วยแป้งข้าวเหนียวดำ พบว่ามีโอเวอร์รันลดลงจากไอศกรีม

นมสูตรควบคุม ตามลำดับ (Charoenphun, 2019) ไอศกรีมที่มีคุณภาพดีควรมีผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กกว่า 30 ไมโครเมตร (Marshall *et al*., 2003) ปริมาณของส่วนผสมและปริมาณอากาศของไอศกรีมที่แตกต่างกันมีผลต่อขนาดของผลึกน้ำแข็งที่ลดลง (Flores and Goff, 1999) ถ้าผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่จะทำให้ไอศกรีมมีลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นน้ำแข็ง (icy texture) และถ้าไอศกรีมมีโอเวอร์รันมากกว่าร้อยละ 70 (โดยน้ำหนัก) มีผลต่อการกระจายของผลึกน้ำแข็งทำให้ความหนาของเฟสที่ไม่แข็งตัว (unfrozen phase) ลดลงโดยมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ล้อมรอบฟองอากาศ (air bubble) ซึ่งจะช่วยลดการชนกันของผลึกน้ำแข็งทำให้ผลึกมีขนาดเล็ก และอยู่ในเฟสที่ไม่แข็งตัวในระหว่างการแช่เยือกแข็ง (Adapa *et al*., 2000b) นอกจากนี้เม็ดไขมันที่มีลักษณะเป็นก้อนจะแทรกอยู่ระหว่างฟองอากาศกับเฟสที่ไม่แข็งตัวซึ่งจะช่วยเก็บกักอากาศ และทำให้ฟองอากาศมีความเสถียรเพิ่มขึ้น (Flores and Goff, 1999)

2. การวิเคราะห์การละลาย

ไอศกรีมที่ไม่เสริมผงจมูกข้าวมีการละลายมากที่สุด ถ้าเสริมผงจมูกข้าวมากขึ้นส่งผลทำให้ไอศกรีมมีความข้นหนืดและความคงตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากจมูกข้าวมีความสามารถในการเก็บกักน้ำ (water holding capacity) ช่วยต้านทานการละลาย ช่วยป้องกันการหดตัวและการแพร่ของน้ำออกจากไอศกรีม จึงทำให้ไอศกรีมมีการละลายน้อยลง (Stanley *et al*., 1996) ซึ่งสอดคล้องกับการทดแทนแป้งข้าวเหนียวในไอศกรีมนมทำให้ไอศกรีมมีการจับตัวกันดี มีความข้นหนืด และการละลายช้าลง (Charoenphun, 2019) มีรายงานว่าโปรตีนในรำข้าวประกอบด้วยแอลบูมิน (albumin) ต่อโกลบูลิน (globulin) ต่อโพรลามิน (prolamine) ต่อกลูเตลิน (glutelin) เท่ากับ 37: 36: 5: 22 นอกจากนี้ยังมีเปปไทด์ (peptide) และกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย ได้แก่ ลิวซีน (leucine) ไอโซลิวซีน (isoleucine) เมไทโอนีน (methionine) ไทโรซีน (tyrosine) ฟีนิลแอลานีน (phenylalanine) ฮีสทิดีน (histidine) และทริปโตเฟน (tryptophan) ซึ่งมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระ (Tadakottisarn, 2018) และยังมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ แกมมาออริซานอล โทโคฟีรอล โทโคไตรอีนอล ไฟโตสเตอรอล สเตอริลเอสเทอร์ (steryl ester) และสควาลีน (squalene) รวมทั้งมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในสัดส่วนที่ดีต่อสุขภาพ (Chavasit, 2018; Lilitchan, 2018) ดังนั้นจากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าจมูกข้าวมีทั้งปริมาณโปรตีนและไขมันสูง ซึ่งจากผลการทดลองเมื่อเติมปริมาณผงจมูกข้าวมากขึ้นส่งผลทำให้ไอศกรีมมีโอเวอร์รันและการละลายลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการเพิ่มปริมาณไขมันลงในไอศกรีมโดยพบว่า ไอศกรีมที่มีไขมันนมร้อยละ 5 (โดยน้ำหนัก) มีโอเวอร์รันและอัตราการละลายสูงกว่าไอศกรีมที่มีไขมันนมร้อยละ 10 (โดยน้ำหนัก) และไอศกรีมที่มีไขมันนมร้อยละ 5 ที่เติมเวย์โปรตีนเข้มข้น (whey protein isolate) มีโอเวอร์รันและอัตราการละลายต่ำกว่าไอศกรีมที่มีไขมันนมร้อยละ 5 ที่ไม่เติมเวย์โปรตีนเข้มข้น (Danesh *et al*., 2017) และมีการเสริมโปรตีนโดยใช้เวย์โปรตีนเข้มข้นที่ระดับร้อยละ 0 0.5 และ 1.0 ทดแทนหางนมผง (skimmed milk powder) ในไอศกรีมกะทิที่มีไขมันต่ำ (ร้อยละ 2) พบว่าเมื่อทดแทนหางนมผงด้วยเวย์โปรตีนเข้มข้นในปริมาณมากขึ้นทำให้ไอศกรีมมีความหนืดเพิ่มขึ้นและการละลายช้าลง (Kerdchouay and Surapat, 2008)

3. การประเมินลักษณะทางประสาทสัมผัส

ผลการประเมินลักษณะทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมเสริมจมูกข้าวที่ระดับร้อยละ 0 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณผงจมูกข้าวที่มีต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสของไอศกรีม

ลักษณะทางประสาทสัมผัส	ผงจมูกข้าว (ร้อยละ)			
	0	**5**	**10**	**15**
ลักษณะปรากฏ	4.5 ± 0.62 [a]	4.1 ± 0.81 [b]	3.8 ± 0.97 [b]	3.2 ± 1.18 [c]
สี	4.5 ± 0.61 [a]	4.0 ± 0.89 [b]	3.5 ± 0.99 [c]	3.0 ± 0.94 [d]
กลิ่น	4.4 ± 0.72 [a]	3.8 ± 0.89 [b]	3.6 ± 1.06 [b]	3.6 ± 1.11 [c]
กลิ่นรส	4.3 ± 0.73 [a]	3.8 ± 0.86 [b]	3.4 ± 0.92 [c]	2.9 ± 1.04 [d]
รสชาติ	4.3 ± 0.80 [a]	3.8 ± 0.83 [b]	3.4 ± 1.04 [c]	2.6 ± 1.02 [d]
ลักษณะเนื้อสัมผัส	4.2 ± 0.78 [a]	3.7 ± 0.88 [b]	3.4 ± 0.94 [c]	2.4 ± 0.99 [d]
ความชอบโดยรวม	4.4 ± 0.64 [a]	4.0 ± 0.82 [b]	3.5 ± 0.88 [c]	2.7 ± 0.87 [d]

[a, b, c, d] อักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$)

ผู้บริโภคชอบไอศกรีมสูตรควบคุมมากที่สุด รองลงมา คือ สูตรที่เสริมผงจมูกข้าวร้อยละ 5 ซึ่งการเสริมจมูกข้าวในปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความชอบของผู้บริโภคลดลง ($p \leq 0.05$) ทั้งทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม การเสริมผงจมูกข้าวร้อยละ 15 (โดยน้ำหนัก) ผู้บริโภคชอบน้อยที่สุด เนื่องมาจากการเติมผงจมูกข้าวในปริมาณเพียงเล็กน้อยมีผลทำให้ไอศกรีมมีลักษณะเนื้อสัมผัสหยาบ (coarse texture) ไม่เรียบเนียนเหมือนสูตรควบคุม มีสีคล้ำขึ้น กลิ่นนมลดลง ความข้นหนืดเพิ่มขึ้น เนื้อไอศกรีมมีลักษณะแน่นหนัก (heavy texture) และขึ้นฟูน้อย ส่งผลทำให้ความชอบของผู้บริโภคต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสทางด้านต่างๆ ของไอศกรีมลดลง การเติมแป้งข้าว (rice flour) ลงในไอศกรีมทำให้มีความแข็ง (hardness) มากขึ้น โดยเฉพาะไอศกรีมที่ไม่มีไขมันหรือไขมันต่ำ ส่วนไอศกรีมที่มีไขมันร้อยละ 4 และ 10 มีความแข็งลดลงตามลำดับ การเติมแป้งข้าวลงในไอศกรีมหรือขนมหวานแช่เยือกแข็งควรใช้ปริมาณแป้งข้าวที่ระดับร้อยละ 2-4 หรือต่ำกว่า (Cody *et al*., 2007) และมีรายงานการเสริมรำข้าวลงในผลิตภัณฑ์อาหารควรใช้ที่ระดับร้อยละ 5-10 แต่ไม่ควรนำรำข้าวที่มีไขมันเต็มมาใช้ในการผลิตขนมขบเคี้ยวที่ผ่านการบีบอัด (extruded snack food) (Sekhon *et al*., 1997)

4. การสำรวจพฤติกรรมและความคิดเห็นของผู้บริโภค

การสำรวจผู้บริโภคเกี่ยวกับข้อมูลโดยทั่วไป ผู้ตอบแบบสอบถามเป็นเพศหญิง ร้อยละ 52 เพศชาย ร้อยละ 48 มีอายุระหว่าง 18-25 ปี ร้อยละ 69 และ 26-33 ปี ร้อยละ 31 มีรายได้เฉลี่ยต่ำกว่า 15,000 บาทต่อเดือน ร้อยละ 64 และ 15,001-25,000 บาทต่อเดือน ร้อยละ 36 ผลของการสำรวจพฤติกรรมของผู้บริโภคที่มีต่อไอศกรีมทั่วไปและความคิดเห็นของผู้บริโภคที่มีต่อไอศกรีมจมูกข้าวได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 พฤติกรรมและความคิดเห็นของผู้บริโภคที่มีต่อไอศกรีมจมูกข้าว

พฤติกรรมและความคิดเห็นของผู้บริโภคที่มีต่อไอศกรีมจมูกข้าว	**จำนวนผู้บริโภค (ร้อยละ)**
ความถี่ในรับประทานไอศกรีมทั่วไป	
1-3 ครั้งต่อเดือน	50.00
4-6 ครั้งต่อเดือน	41.43
7-9 ครั้งต่อเดือน	7.14
อื่น ๆ	1.43
ราคาที่ชอบซื้อไอศกรีมทั่วไป	
10-30 บาท	71.43
31-60 บาท	25.71
61-90 บาท	2.86
ประเภทของไอศกรีมเพื่อสุขภาพที่ชอบ	
ไอศกรีมจมูกข้าว	58.57
ไอศกรีมมอลต์สกัด	21.43
ไอศกรีมข้าวโอ๊ต	10.00
ไอศกรีมงาดำ	7.14
ไอศกรีมข้าวกล้องงอก	1.43
อื่นๆ	1.43
การตัดสินใจที่จะซื้อไอศกรีมจมูกข้าว	
ซื้อ	95.71
ไม่ซื้อ	4.29
เกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจซื้อไอศกรีมจมูกข้าว	
ประโยชน์ต่อสุขภาพ	30.56
ผลิตภัณฑ์ใหม่	25.56
รสชาติดี	25.00
รับประทานสะดวก	12.78
บรรจุภัณฑ์สวยงาม	4.44
น้ำหนักสุทธิเหมาะสม	1.66
บรรจุภัณฑ์ที่ชอบ	
ถ้วยกระดาษ	64.29
ถ้วยพลาสติกทรงสูง	22.85
ถ้วยพลาสติกทรงแบน	12.86

ตารางที่ 3 (ต่อ)

พฤติกรรมและความคิดเห็นของผู้บริโภคที่มีต่อไอศกรีมจมูกข้าว	จำนวนผู้บริโภค (ร้อยละ)
ฉลากสินค้าที่ชอบ	
สติกเกอร์สีขาว	64.29
สติกเกอร์สีฟ้า	31.42
สติกเกอร์สีเหลือง	4.29
ความคิดเห็นของราคาไอศกรีมจมูกข้าว 25 บาท ต่อน้ำหนัก 120 กรัม	
เหมาะสม	100.00
ไม่เหมาะสม	0
ความคิดเห็นของราคาไอศกรีมจมูกข้าวเปรียบเทียบกับไอศกรีมในตลาด	
ไม่แตกต่าง	54.29
แตกต่าง	45.71
สถานที่จำหน่ายที่ชอบ	
ร้านสะดวกซื้อ	32.95
ห้างสรรพสินค้า	25.43
ร้านอาหารหรือภัตตาคาร	16.76
รถขายไอศกรีม	16.19
ตลาดชุมชน	8.67
การส่งเสริมการขายที่ชอบ	
ให้ชิมก่อนตัดสินใจซื้อ	33.98
โฆษณาทางออนไลน์ ได้แก่ Facebook, Line, Instagram หรืออื่น ๆ	23.08
ลดราคาร้อยละ 15 ทุกวันจันทร์	18.59
ซื้อครบ 10 ถ้วย ฟรี 1 ถ้วย	18.59
ซื้อครบ 300 บาท ลดราคาร้อยละ 10	5.76

จากตารางที่ 3 พบว่าผลการสำรวจพฤติกรรมของผู้บริโภคส่วนใหญ่รับประทานไอศกรีมโดยทั่วไปความถี่ 1-3 ครั้งต่อเดือน ในราคา 10-30 บาท ถ้าจะเลือกซื้อไอศกรีมเพื่อสุขภาพที่ชื่นชอบในการรับประทานจะเลือกซื้อไอศกรีมจมูกข้าวมากกว่าไอศกรีมชนิดอื่นๆ ได้แก่ ไอศกรีมมอลต์สกัด (Milo, Nestle) ไอศกรีมข้าวโอ๊ต (Oatly ประเทศสหรัฐอเมริกา) ไอศกรีมงาดำ (Gomaya Kuki ประเทศญี่ปุ่น) และไอศกรีมข้าวกล้องงอก (งานวิจัย ITAP สวทช. ภาคเหนือหนุน SMEs) ถ้ามีไอศกรีมจมูกข้าวจำหน่ายในตลาด ผู้บริโภคร้อยละ 96 ตัดสินใจซื้อเพราะคิดว่าไอศกรีมจมูกข้าวมีสารอาหารที่มีประโยชน์ และมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ แกมมาออริซานอล และวิตามินอี ทั้งกลุ่มโทโคฟีรอลและโทโคไตรอีนอลที่ช่วยต้านอนุมูลอิสระ ป้องกันและบรรเทาการเกิดโรคเรื้อรังต่างๆ (Chavasit, 2018; Lilitchan, 2018) ผู้บริโภคชอบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นถ้วยกระดาษติดสติกเกอร์สีขาว

เพราะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ย่อยสลายได้เอง ตามธรรมชาติ มีสีขาวดูสบายตา และมีรูปไอศกรีมที่มีสีสันสดใสซึ่งเป็นสัญลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ และให้ความคิดเห็นว่า ถ้าไอศกรีมจมูกข้าวจำหน่ายในราคา 25 บาท ต่อน้ำหนักสุทธิ 120 กรัม คิดว่าเหมาะสม (ร้อยละ 100) และคิดว่าราคานี้ไม่แตกต่างจากไอศกรีมที่จำหน่ายทั่วไปในตลาด ส่วนใหญ่ต้องการที่จะซื้อไอศกรีมจมูกข้าวที่ร้านสะดวกซื้อ เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย สะดวก และมีจำหน่ายตลอดเวลา และชอบการส่งเสริมการขายแบบมีให้ชิมก่อนตัดสินใจซื้อ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผู้บริโภคส่วนใหญ่ต้องการรู้รสชาติของไอศกรีมก่อนตัดสินใจเลือกซื้อสินค้าเนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่และเป็นไอศกรีมที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพซึ่งกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน แต่ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เป็นอาหารเพื่อสุขภาพส่วนใหญ่มักมีราคาสูงกว่าไอศกรีมโดยทั่วไป ซึ่งการให้ชิมสินค้าใหม่ก่อนตัดสินใจซื้อเป็นกลยุทธ์หนึ่งในการส่งเสริมการขาย เพราะถึงแม้ว่าไอศกรีมจะมีราคาสูงกว่าในตลาดเล็กน้อย แต่ถ้าไอศกรีมมีรสชาติดีและมีประโยชน์ต่อสุขภาพ ผู้บริโภคมักตัดสินใจเลือกซื้อโดยไม่คำนึงถึงราคาและสถานที่จำหน่าย โดยจะเห็นได้ว่าผู้ตอบแบบสอบถามอีกกลุ่มหนึ่งแสดงความคิดเห็นว่าราคาของไอศกรีมจมูกข้าวแตกต่างจากไอศกรีมทั่วไปในตลาดเพราะในตลาดยังมีไอศกรีมระดับพรีเมียมอีกหลายแบรนด์ ได้แก่ ฮาเก้นดาส (Häagen-Dazs) สเวนเซนส์ (Swensens) บัดส์ (Bud's) และบาสกิ้นรอบบิ้น (Baskin Robbins) ที่จำหน่ายในราคาสูงกว่าไอศกรีมจมูกข้าว

ผลของการสำรวจยังพบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามอีกจำนวนมากกว่าร้อยละ 60 ที่ต้องการจะซื้อไอศกรีมจมูกข้าวที่จำหน่ายในห้างสรรพสินค้า ร้านอาหารหรือภัตตาคาร รถขายไอศกรีม หรือตลาดชุมชน ดังนั้นสรุปได้ว่า ถ้าไอศกรีมที่เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ มีประโยชน์ต่อสุขภาพ และมีรสชาติดี ผู้บริโภคจะตัดสินใจเลือกซื้อโดยไม่คำนึงถึงรูปแบบบรรจุภัณฑ์ น้ำหนักสุทธิ ราคา สถานที่จำหน่าย และการส่งเสริมการขายในรูปแบบต่างๆ เช่น การโฆษณาทางออนไลน์ หรือการจัดโปรโมชัน (ลด แลก แจก แถม) มาเป็นอันดับต้นๆ ในการตัดสินใจเลือกซื้อ แต่ถ้าไอศกรีมนั้นมีราคาเหมาะสมกับคุณภาพก็จะได้รับความสนใจในการเลือกซื้อมากยิ่งขึ้น (Rattanayon, 2016; Thongcot *et al*., 2016) จากผลของการสำรวจธุรกิจหรือองค์กรที่ผลิตและจำหน่ายไอศกรีมพบว่า ผู้บริโภคมีทัศนคติที่ดีต่อไอศกรีมทั้งในด้านรสชาติ คุณภาพ ราคา และความน่าสนใจของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ภาพลักษณ์ขององค์กร รูปลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ และแหล่งที่มาของสินค้า ซึ่งส่งผลต่อความเชื่อมั่นของผู้บริโภค โดยพบว่าผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานครนิยมซื้อไอศกรีมแม็กนัม (Magnum, Walls) มากกว่าไอศกรีมฮาเก้นดาส และไอศกรีมแมกโนเลีย (Magnolia) ที่ห้างสรรพสินค้าและร้านสะดวก โดยมีความถี่ในการซื้อ 1-2 ครั้งต่อสัปดาห์ (Wijakkul, 2015; Munsook, 2017) และมีการนำเอากลยุทธ์ส่วนประสมทางการตลาดมาใช้ในการพัฒนาไอศกรีมเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการบริหารงานทางการตลาดพบว่า การพัฒนาไอศกรีมให้มีรสชาติเป็นเอกลักษณ์แตกต่างจากไอศกรีมแบบเดิมเป็นการสร้างจุดขายและเพิ่มยอดขายโดยตอบสนองพฤติกรรมของผู้บริโภคที่อยากลองสินค้าที่ออกมาใหม่ เป็นการเพิ่มฐานลูกค้า และช่วยจัดการฐานข้อมูลลูกค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Rungnapakun, 2011; Rattanayon, 2016) นอกจากนี้การตั้งราคาของไอศกรีมให้ใกล้เคียงกับตลาดจัดเป็นกลยุทธ์ที่ทำให้ไอศกรีมสามารถแข่งขันกับคู่แข่งที่ใกล้เคียงกันในตลาดได้ รวมถึงการจำหน่ายไอศกรีมในช่องทางออนไลน์ภายในประเทศในปัจจุบันยังสามารถเติบโตทางธุรกิจได้อีกมาก

เนื่องจากการสั่งไอศกรีมออนไลน์สามารถทำได้ง่าย รวดเร็ว และสะดวกกว่าการเดินทางไปยังหน้าร้าน จึงเป็นกลยุทธ์ในการพัฒนาการตลาด (market development strategy) ที่ควรดำเนินการควบคู่ไปกับกลยุทธ์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ (product development strategy) (Ruengsinsub, 2020)

สรุป

การเสริมปริมาณจมูกข้าวมากขึ้นในไอศกรีมนมทำให้โอเวอร์รัน การละลายของไอศกรีม และความชอบโดยรวมของผู้ทดสอบชิมลดลง ควรเสริมผงจมูกข้าวในไอศกรีมไม่เกินร้อยละ 5 (โดยน้ำหนัก) ผู้บริโภคส่วนใหญ่พึงพอใจที่จะซื้อไอศกรีมจมูกข้าวเนื่องจากมีประโยชน์ต่อสุขภาพ เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีรสชาติดี และมีราคาไม่แตกต่างจากตลาดทั่วไป ส่วนใหญ่ชอบการส่งเสริมการขายในรูปแบบมีให้ชิมก่อนตัดสินใจซื้อ งานวิจัยนี้เป็นแนวทางในการพัฒนาไอศกรีมที่เป็นอาหารฟังก์ชัน (functional food) โดยมีจมูกข้าวที่มีประโยชน์ต่อร่างกายสามารถนำมาผลิตในระดับอุตสาหกรรมและพัฒนาเป็นไอศกรีมเพื่อสุขภาพจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ได้ ในอนาคตควรมีการพัฒนาไอศกรีมจมูกข้าวให้มีเนื้อสัมผัสที่ดี มีหลายรสชาติ และมีปริมาณของสารออกฤทธิ์ทางเคมีและชีวภาพที่มีความเสถียรเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อผู้บริโภค และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารประเภทอื่นๆ ได้

เอกสารอ้างอิง

Adapa, S., Dingeldein, H., Schmidt, K.A. and Herald, T.J. 2000a. Rheological properties of ice cream mixed and frozen ice cream containing fat and fat replacer. **Journal of Dairy Science** 83(10): 2224-2229.

Adapa, S., Schmidt, K.A., Jeon, I.J., Herald, T.J. and Flores, R.A. 2000b. Mechanisms of ice crystallization and recrystallization in ice cream: A review. **Food Reviews International** 16(3): 259-271.

Banchuen, J. 2010. Bio-active compounds in germinated brown rice and its application. Degree of Doctor of Philosophy in Food Technology, Prince of Songkla University. (in Thai)

Charoenphun, N. 2019. Production of low fat ice cream from black glutinous rice milk. **Journal of Food Technology, Siam University** 14(1): 1-11. (in Thai)

Chattong, U. 2012. Effects of rice bran on qualities of reduced fat coconut milk ice cream. **Rajabhat Phranakhon Research Journal** 7(1): 44-51. (in Thai)

Chavasit, V. 2018. Rice bran oil: The precious stones of Southeast Asia, pp. 48-49. *In* Agricultural Research Development Agency (Public Organization), ed. **Worth Creation of Thai Rice with Safe Agriculture and Sustainable Innovation.** Agricultural Research Development Agency (Public Organization), Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)

Chermmongkol, N., Chantaranara, P., Sutthiseriskul, P., Tharn-uraikun, P. and Meenam, S. 2019. The development of rice germ ice cream on the acceptance of consumer. Bachelor Thesis of Home Economic Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep. (in Thai)

Chuaykarn, N., Laohakunjit, N., Suttisansanee, U., Hudthagosol, C. and Somboonpanyakul, P. 2013. Effect of riceberry flour on physico-chemical and sensory properties of low fat ice cream. **Agricultural Science Journal** 44(2)(Suppl.): 589-592. (in Thai)

Cody, T.L., Olabi, A., Pettingell, A.G., Tong, P.S. and Walkers, J.H. 2007. Evaluation of rice flour for use in vanilla ice cream. **Journal of Dairy Science** 90(10): 4575-4585.

Danesh, E., Goudarzi, M. and Jooyandeh, H. 2017. Short communication: Effect of whey protein addition and transglutaminase treatment on the physical and sensory properties of reduced-fat ice cream. **Journal of Dairy Science** 100(7): 5206-5211.

Flores, A.A. and Goff, H.D. 1999. Ice crystal size distributions in dynamically frozen model solutions and ice cream as affected by stabilizers. **Journal of Dairy Science** 82(7): 1399-1407.

Kerdchouay, P. and Surapat, S. 2008. Effect of whey protein concentrate and sugar contents on the qualities of low fat coconut milk ice cream, pp. 262-269. *In* **Proceedings of 46th Kasetsart University Annual Conference, Kasetsart, Thailand: Agro-Industry.** Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)

Kubota, M., Watanabe, R., Hosojima, M., Saito, A., Sasou, A., Masumura, T., Harada, Y., Hashimoto, H., Fujimura, S. and Kadowaki, M. 2020. Rice bran protein ameliorates diabetes, reduces fatty liver, and has renoprotective effects in Zucker Diabetic fatty rats. **Journal of Functional Foods** 70: 103981.

Lilitchan, S. 2018. Rice bran oil to the creation of functional oil that gives more value, pp. 37-39. *In* Agricultural Research Development Agency (Public Organization), ed. **Worth Creation of Thai Rice with Safe Agriculture and Sustainable Innovation.** Agricultural Research Development Agency (Public Organization), Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)

Lovelock, C., Wirtz, J., Ken, H.T. and Lui, X. 2005. **Service Marketing in Asia.** 2nd ed. Prentice Hall, Singapore.

Malipant, C. 2018. Use of stabilizers for developing a formula of brown rice milk soft serve ice cream, pp. 349-360. *In* **2nd National and International Research Conference 2018.** Buriram Rajabhat University. (in Thai)

Marshall, R.T., Goff, H.D. and Hartel, R.W. 2003. **Ice Cream.** 6th ed. Springer, New York.

Ministry of Agriculture and Cooperatives, Rice Department. 2009. **Petty Patent No. 4864. Germinated brown rice ice cream.** Department of Intellectual Property, Ministry of Commerce, Bangkok. (in Thai)

Munsook, S. 2017. Influence of corporate image and trust on the goods on satisfaction of customer towards Magnum ice cream in Bangkok. Master Thesis of Business Administration, Bangkok University. (in Thai)

National Food Institute, Food Intelligence Center. 2015. **Ice cream market in Thailand.** Market Intelligence. Available Source: http://fic.nfi.or.th/MarketOverviewDomesticDetail.php?id=76, January 27, 2021. (in Thai)

National Food Institute, Food Intelligence Center. 2017. Ice cream market in Thailand, sweet and cool business that is still "hot" forever. **Industrial Journal** 59(6): 8-10. (in Thai)

Negendra, P.M.N., Sanjay, K.R., Shravya, K.M., Vismaya, M.N. and Nanjunda, S.S. 2011. Health benefits of rice bran - A review. **Journal of Nutrition & Food Sciences** 1(3): 1-7.

Patel, M. and Naik, S.N. 2004. Gamma-oryzanol from rice bran oil - A review. **Journal of Scientific & Industrial Research** 63: 569-578.

Petcharat, K., Ke-ariyo, C., Sakonyerongsuk, N. and Saetang, D. 2011. **Research Report on Application of germinated brown rice in Thai desserts.** Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. (in Thai)

Prindiville, E.A., Marshall, R.T. and Heymann, H. 2000. Effect of milk fat, cocoa butter, and whey protein fat replacers on the sensory properties of lowfat and nonfat chocolate ice cream. **Journal of Dairy Science** 83(10): 2216-2223.

Rattanayon, J. 2016. Marketing mix factors affecting purchasing decision on ice cream production in Pathum Thani Province. Master Thesis of Business Administration, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)

Royal Society. 2013. **Dictionary of Royal Society 2011.** 2nd ed. Nanme Book Publication, Bangkok. (in Thai)

Ruengsinsub, K. 2020. Business plan for ice cream homemade brand (D.I.Y by homemade). Master Thesis of Business Administration, Bangkok University. (in Thai)

Rungnapakun, P. 2011. Marketing strategy and strategic management in consumer satisfaction in ice cream business: Case studies of Swensen's ice cream in the subsidiary of The Minor Food Group Co., Ltd. Master Thesis of Business Administration, University of the Thai Chamber of Commerce. (in Thai)

Santiwattana, P. and Somsawat, R. 2013. Phytosterol: Phytonutrient in rice bran oil. **Food Journal (Thailand)** 43(1): 28-32. (in Thai)

Sattayasai, J. 2018. Nutraceutical from rice bran oil for patients of diabetes, brain, vascular system and heart, pp. 18-21. *In* Agricultural Research Development Agency (Public Organization), ed. **Worth Creation of Thai Rice with Safe Agriculture and Sustainable Innovation.** Agricultural Research Development Agency (Public Organization), Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)

Sekhon, K.S., Dhillon, S.S., Singh, N. and Singh, B. 1997. Functional suitability of commercially milled rice bran in India for use in different food products. **Plant Foods for Human Nutrition** 50(2): 127-140.

Srichan, S. 2017. Development of breadsticks enriched with riceberry rice bran. Master of Home Economics, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. (in Thai)

Sripanidkulchai, B. 2018. Active compounds from color rice for cosmetic production, pp. 58-61. *In* Agricultural Research Development Agency (Public Organization), ed. **Worth Creation of Thai Rice with Safe Agriculture and Sustainable Innovation.** Agricultural Research Development Agency (Public Organization), Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)

Stanley, D.W., Goff, H.D. and Smith, A.K. 1996. Texture -structure relationships in foamed dairy emulsions. **Food Research International** 29(1): 1-13.

Tadakottisarn, S. 2018. Albumin protein from Thai rice is a super food for health, pp. 26-29. *In* Agricultural Research Development Agency (Public Organization), ed. **Worth Creation of Thai Rice with Safe Agriculture and Sustainable Innovation.** Agricultural Research Development Agency (Public Organization), Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)

Thongcot, M., Aungvaravong, C. and Sajja-areewat, P. 2016. Consumer behavior and factors affecting the decision to the ice-cream shop of Kon Kaen University student. **VRU Research and Development Journal Humanities and Social Science** 11(3): 233-241. (in Thai)

Wijakkul, S. 2015. Factors influencing attitude and intention when purchasing ice cream brands: The role of county of origin of consumers in Bangkok. Master Thesis of Business Administration, Bangkok University. (in Thai)

Wongfuk, A. 2001. **Ice Cream & Sherbet.** 1st ed. Maeban, Bangkok. (in Thai)

อิฐบล็อกประสานที่ผสมขยะเปลือกหอยนางรมบดไม่ผ่านกระบวนการเผา

Non-Burnt Ground Oyster Shell Waste Interlocking Block

ทวิช กล้าแท้[1*] กงกิจ ยิ่งเจริญกิจขจร[1] เกรียงศักดิ์ จันทกูล[1] และ อรรคเดช อับดุลมาติน[2]

Tawich Klathae[1*], Kongkit Yingchaloenkitkhajorn[1], Kriangsak Jantakool[1] and Akkadath Abdulmatin[2]

Received: 24 June 2020, Revised: 23 March 2021, Accepted: 14 May 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำขยะเปลือกหอยนางรมบดที่ไม่ผ่านกระบวนการเผา (OSW) มาทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ในการผลิตอิฐบล็อกประสาน ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (CT, 10OSW, 20OSW, 30OSW, 40OSW และ 50OSW) โดยกำหนดอัตราส่วนวัสดุเชื่อมผสาน (ปูนซีเมนต์ และขยะเปลือกหอยนางรมบด) ต่อดินลูกรังในอัตราส่วน 1:6 โดยน้ำหนัก เพื่อทดสอบความต้านทานรับแรงอัด ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน รวมถึงการดูดกลืนน้ำที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า ที่อายุการบ่ม 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน CT, 10OSW, 20OSW, 30OSW, 40OSW และ 50OSW มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 6.3, 5.6, 5.0, 4.9, 4.8 และ 4.5 MPa ตามลำดับ และยังพบว่าค่าการดูดกลืนน้ำ เฉลี่ยเท่ากับ 79, 84, 91, 121, 148 และ 155 kg/m^3 ตามลำดับ ต่อมาที่อายุการบ่ม 90 วัน อิฐบล็อกประสาน CT มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 8.4 MPa และยังพบว่าอิฐบล็อกประสาน 10OSW, 20OSW, 30OSW, 40OSW และ 50OSW มีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 7.4, 6.5, 6.0, 5.9 และ 5.6 MPa หรือคิดเป็นคิดเป็นร้อยละ 88, 77, 77, 70 และ 67 ของอิฐบล็อกประสานที่ CT ตามลำดับ

คำสำคัญ: ขยะเปลือกหอยนางรม, ไม่ผ่านกระบวนการเผา, กำลังอัด, การดูดกลืนน้ำ, อิฐบล็อกประสาน

---

[1] สาขาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช เลขที่ 99 หมู่ 4 ตำบลท้องเนียน อำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช 80210

[1] Department of Civil Engineering, College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thammarat Campus, 99 Moo 4, Thong Nian, Khanom, Nakhon Si Thammarat 80210, Thailand.

[2] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ 99 ตำบลโคกเคียน อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส 96000

[2] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, 99 Khokian, Muang, Narathiwas 96000, Thailand.

[*] ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): Tawich.k@rmutsv.ac.th Tel: 08 4149 7426

ABSTRACT

This research aims to utilize ground oyster shell waste (OSW) to replace ordinary Portland cement (OPC) in interlocking blocks. OSW was used to replace OPC at 0, 10, 20, 30, 40 and 50 wt% of binder (CT, 10OSW, 20OSW, 30OSW, 40OSW and 50OSW) in interlocking blocks. The ratio of binder (OPC and OSW) to lateritic soil was 1:6 %wt. The properties of interlocking blocks such as compressive strength at 28, 90 days and water absorption capacity at 28 days were investigated. The result showed that at the age of 28 days CT interlocking blocks had compressive strength and water absorption capacity about 6.3 MPa and 79 kg/m^3, respectively. At the same age, the interlocking blocks 10OSW, 20OSW, 30OSW, 40OSW and 50OSW had compressive strength about 6.3, 5.6, 5.0, 4.9, 4.8 and 4.5 MPa, respectively, while, the water absorption capacity of interlocking blocks was 79, 84, 91, 121, 148 and 155 kg/m^3, respectively. At the later age of 90 days, CT interlocking blocks had compressive strength of about 8.4 MPa, while, the interlocking blocks 10OSW, 20OSW, 30OSW, 40OSW and 50OSW had compressive strength about 7.4, 6.5, 6.0, 5.9 and 5.6 MPa or 88, 77, 71, 70 and 67% of CT interlocking blocks, respectively.

Key words: oyster shell waste, not process burning, compressive strength, water absorption, interlocking block

บทนำ

จังหวัดสุราษฎร์ธานี เป็นจังหวัดที่มีการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นอันดับต้นๆ ของประเทศไทย สินค้าสร้างชื่อเสียงให้กับจังหวัดสุราษฎร์ธานี ได้แก่ หอยนางรม กุ้ง ปลา ปู กั้ง หอยแครง และสัตว์น้ำอื่นๆ ส่งผลให้จังหวัดสุราษฎร์ธานี เป็นแหล่งผลิตอาหารทะเลของประเทศ โดยในปี 2560 จังหวัดสุราษฎร์ธานี มีจำนวนฟาร์มเลี้ยงหอยจำนวน 874 ฟาร์ม คิดเป็นเนื้อที่เลี้ยงหอย 14,688.88 ไร่ หรือร้อยละ 22.05 ของเนื้อที่เลี้ยงหอยทั้งหมด มากที่สุดเป็นอันดับสอง รองจากจังหวัดสมุทรสงคราม และมีผลผลิตหอยรวมกัน 10,945.46 ตันต่อปี เป็นอันดับสี่ รองจากจังหวัดสมุทรสงคราม จังหวัดชลบุรี และจังหวัดชุมพร ตามลำดับ และเมื่อจำแนกผลผลิตออกตามชนิดพบว่าจังหวัดสุราษฎร์ธานี มีผลผลิตหอยแครง 8,486.53 ตัน หอยแมลงภู่ 319.66 ตัน และหอยนางรม 2,139.27 ตัน (Fishery Statistics Analysis and Research Group, 2018) ทุกๆ 1 กิโลกรัมของผลผลิตหอยนางรม จะส่งผลให้เกิดขยะจากเปลือกหอยนางรม ประมาณ 370-700 กรัม หรือประมาณ 790-1,497 ตันต่อปี เฉพาะในจังหวัดสุราษฎร์ธานี (Yao *et al*., 2014) ซึ่งขยะจากเปลือกหอยนางรมเหล่านี้ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยการเผาทำลาย หรือย่อยสลายไปได้เองตามธรรมชาติ ทำได้เพียงกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบเท่านั้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อม เป็นต้น

โดยปัจจุบันปัญหาที่เกิดขึ้นจากขยะเปลือกหอยชนิดต่างๆ ได้เกิดขึ้นในหลายประเทศ เช่น ประเทศจีน และประเทศไต้หวัน โดยมีรายงานการเกิดขยะที่มาจากจากเปลือกหอยนางรมประมาณ 300,000 และ 160,000 ตันต่อปี ตามลำดับ (Chiou *et al*., 2014; Li *et al*., 2015) ในงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาเปลือกหอยชนิดต่างๆ เช่น เปลือกหอยลาย เปลือกหอยแมลงภู่ เปลือกหอยแครง รวมถึงเปลือก

หอยนางรม พบว่าเปลือกหอยเหล่านี้ มีองค์ประกอบหลักของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับหินปูน ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (Cao) และมีส่วนของออกไซด์อื่นปะปนอยู่บ้างเล็กน้อย ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เฟอรัสออกไซด์ (Fe_2O_3) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) โดยในกรณีของหอยนางรม พบว่ามีองค์ประกอบของ Cao อยู่ระหว่าง ร้อยละ 48.0-86.8 ในขณะที่มีการสูญเสียน้ำหนักหลังจากการเผา (Loss on ignition, LOI) อยู่ระหว่างร้อยละ 23.2-51.0 (Yoon *et al*., 2004; Yang *et al*., 2005; Lertwattanaruk *et al*., 2012; Olivia *et al*., 2015; Li *et al*., 2015; Ez-zaki *et al*., 2016; Djobo *et al*., 2016) ในปี 2012 Bin-Yang *et al*. (2012) ได้ทำการศึกษาวิธีการบดเปลือกหอยนางรมบดแบบเปียก และแบบแห้งเพื่อเป็นวัสดุสำหรับการทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในคอนกรีต โดยตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของผงเปลือกหอยนางรมบด โดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (XRF) และการสังเกตของลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) โดยทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อัตราส่วน ร้อยละ 0, 5, 10, 15, และ 20 ที่อายุการบ่ม 3, 7, และ 28 วัน ผลการทดลองพบว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมผงเปลือกหอยนางรมบดที่มีวิธีการบดแบบเปียก ที่อัตราส่วนร้อยละ 5-10 มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ต่อมา Klathae and Horpet (2019) ได้ศึกษากำลังอัดและการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เปลือกหอยนางรมบด แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการศึกษาพบว่า ซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย เปลือกหอยนางรมบดที่อัตราส่วนร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ควบคุม (OPC100) ที่อายุ 90 วัน และมีการลดลงของกำลังอัดเมื่อมีการเพิ่มขึ้น ที่ร้อยละ 20, 30 และ 40 ตามลำดับ การหดตัวแบบออโตจีเนียสพบว่าซีเมนต์เพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย เปลือกหอยนางรมบดนั้น มีค่าสูงกว่า OPC100 และเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ ด้านคุณสมบัติทางกายภาพของเปลือกหอยนางรมบด มีลักษณะเป็นผงละเอียด มีสีคล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือสีเทาแต่มีสีอ่อนกว่าเล็กน้อยโดยมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.59 ซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ หรือความละเอียดเท่ากับ 1,200 ตารางเซนติเมตร/กรัม มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 60.53 ไมครอน ในขณะที่องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอยนางรมบด มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณของ CaO เท่ากับร้อยละ 48.85 แต่อยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจาก ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผา ในส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับร้อยละ 4.31 ในขณะที่มีอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) มีปริมาณต่ำมาก มีเพียงร้อยละ 1.17 และร้อยละ 0.40 ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 Physical properties and chemical composition (%) of ordinary Portland cement (OPC), ground oyster shells waste (OSW) (Klathae and Horpet, 2019)

Materials		**OPC**	**OSW**
Physical Properties	Specific gravity	3.15	2.48
	Median particle size, d_{50} (μm)	16.50	60.53
	Blaine fineness, (cm^2/g)	3,400	1,200
Chemical Composition (%)	Silicon dioxide (SiO_2)	20.80	4.31
	Aluminum oxide (Al_2O_3)	5.50	1.17
	Ferric oxide (Fe_2O_3)	3.16	0.40
	Calcium oxide (CaO)	64.97	48.85
	Magnesium oxide (MgO)	1.06	0.99
	Potassium oxide (K_2O)	0.55	0.14
	Sodium oxide (Na_2O)	0.08	0.87
	Sulfur trioxide (SO_3)	2.96	0.62
	Loss on ignition (LOI)	1.40	40.37

จากผลการวิจัยดังกล่าวข้างต้น มีความเป็นไปได้ในการลดขยะจากเปลือกหอยนางรมบด โดยการนำมาผลิตเป็นวัสดุในงานก่อสร้าง ดังนั้น บทความวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เปลือกหอยนางรมบด ซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติ ไม่ผ่านกระบวนการเผา ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตอิฐบล็อกประสาน ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน อิฐบล็อกประสาน (Thai Industrial Standards Institute (TISI), 2004) และนำเสนออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเปลือกหอยนางรมบดที่เหมาะสม รวมถึงวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตอิฐบล็อกประสานจากเปลือกหอยนางรมบด เพื่อลดปริมาณขยะในชุมชน และกำจัดขยะจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเล อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่จำกัด ได้อย่างเหมาะสม และพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่สามารถผลิตขึ้นเองได้ในชุมชน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC), ASTM C150 (ASTM C150, 2015)

ภาพที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ภาพที่ 2 ขยะเปลือกหอยนางรมบดที่ไม่ผ่านกระบวนการเผา

ภาพที่ 3 ดินลูกรัง จากบ่อดินในพื้นที่ ตำบลท้องเนียน อำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช

1.2 เปลือกหอยนางรมบดที่ไม่ผ่านกระบวนการเผา (OSW) จากพื้นที่ อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยนำเปลือกหอยนางรมมาทำความสะอาด และทำให้แห้งโดยการตากแดด อย่างน้อย 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดเปลือกหอยโดยไม่ผ่านการเผา ด้วยเครื่องบดหยาบเป็นเวลา 4 ชม. เมื่อเปลือกหอยบดสามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) แล้วนำไปบดต่อด้วยเครื่องบดอนุภาคแบบบอลมิลล์ เป็นเวลา 2 ชม. เพื่อให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 100 (0.149 มิลลิเมตร) แล้วนำเปลือกหอยนางรมบดมาอบให้แห้งในตู้อบ ที่มีอุณหภูมิ 110± 5 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.3 ดินลูกรังจากบ่อดินในพื้นที่ ตำบลท้องเนียน อำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช ผึ่งแดดให้แห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 ± 5 ºC ใช้เวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบสมบัติพื้นฐานของดินลูกรัง ได้แก่ การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ และทดสอบการหาค่า Atterberg limit

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 อัตราส่วนผสมการทำอิฐบล็อกประสานที่ประกอบด้วยวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และขยะเปลือกหอยนางรมบด) : ดินลูกรัง เท่ากับ 1:6 โดยน้ำหนัก (วัสดุประสาน 1 กิโลกรัม : ดินลูกรัง 6 กิโลกรัม) จำนวน 6 อัตราส่วนผสม คือร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ทุกอัตราส่วนผสมเท่ากับ 0.98 โดยอัตราส่วนผสมและสัญลักษณ์ที่

ใช้ในการทดสอบ แสดงในตารางที่ 2 โดยใช้เครื่องผสมวัสดุ และใช้เครื่องอัดบล็อกประสานแบบมือโยก (Cinva Ram) แสดงในภาพที่ 4 สำหรับตัวอย่างอิฐบล็อกประสานมีขนาด กว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร หนา 25 เซนติเมตร แสดงในภาพที่ 5 จากนั้น ทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน และทดสอบค่าการดูดกลืนน้ำที่ อายุ 28 วัน ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน มผช. 602/2547 แสดงในภาพที่ 6

ภาพที่ 4 การอัดอิฐบล็อกประสานแบบมือโยก (Cinva Ram)

ภาพที่ 5 ก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานหลังจากการขึ้นรูปอิฐบล็อกประสาน

ภาพที่ 6 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างอิฐบล็อกประสาน

ตารางที่ 2 Mixture proportions (Binder: Lateritic soil, 1:6)

Interlocking block	kg/m^3				
Symbols	OPC	OSW	Lateritic soil	Water	W/B
CT	240	-	1,440	235	0.98
10OSW	216	24	1,440	235	0.98
20OSW	192	48	1,440	235	0.98
30OSW	168	72	1,440	235	0.98
40OSW	144	96	1,440	235	0.98
50OSW	120	120	1,440	235	0.98

Remark: OPC: Ordinary Portland Cement Type I, OSW: Ground Oyster Shell Waste

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผสม

ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรัง (Lateritic soil) ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าการดูดกลืนน้ำ รวมถึงคุณสมบัติด้าน Atterberg limit เพื่อเป็นการทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรัง และหาค่าขีดความสามารถในการเปลี่ยนแปลงลักษณะของดินลูกรัง แสดงผลใน ตารางที่ 3 พบว่าดินลูกรังที่ใช้มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.73 ซึ่งโดยทั่วไปดินลูกรังจะมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.7 ถึง 3.0 (Charoennatkul, 2014) และค่าการดูดกลืนน้ำ เท่ากับ 1.93 ในขณะที่ดินลูกรังมีค่า L.L. เท่ากับร้อยละ 34.37 ค่า P.L. เท่ากับร้อยละ 16.88 และค่า P.I. เท่ากับร้อยละ 5.48 จากค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าดินลูกรังที่นำมาทดสอบ มีค่าความสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงเป็นของเหลวค่อนข้างสูง กล่าวคือหากมีการผสมน้ำในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ดินลูกรังชนิดนี้ไม่สามารถขึ้นรูปได้

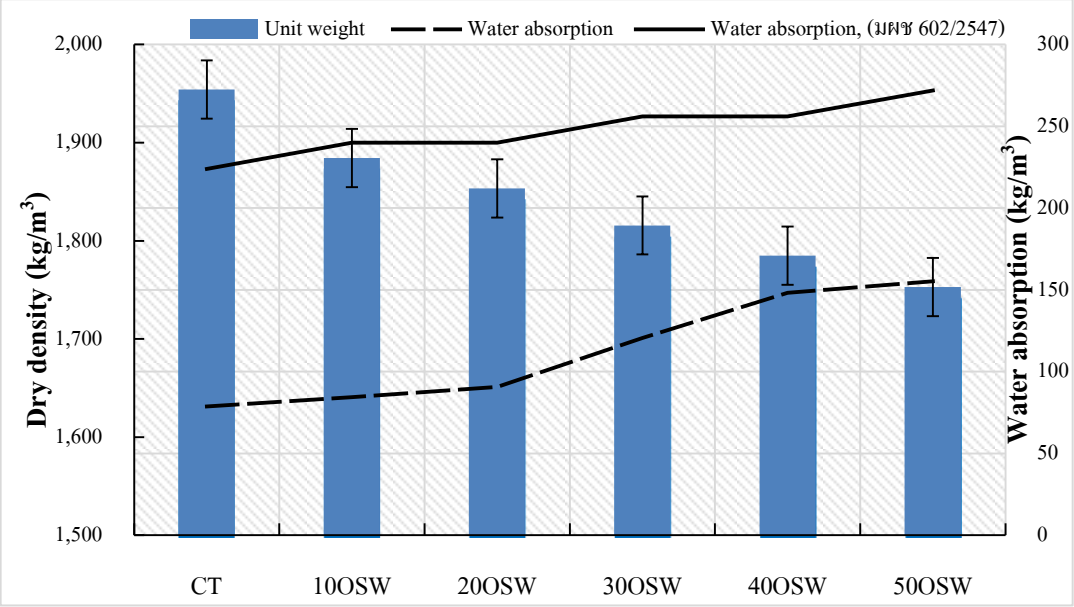
ตารางที่ 3 The physical properties of aggregate

Properties of aggregate	Specific gravity	Absorption (%)	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Plastic index (%)
Standard (Charoennatkul, 2014)	2.7-3.0	1.5-2.0	< 50	N/A	< 18
Lateritic soil	2.73	1.93	34.37	16.88	5.48

2. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน

ภาพที่ 7 แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน ที่มีการนำขยะเปลือกหอยนางรมบด ที่ไม่ผ่านกระบวนการเผา (OSW) มาทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าอิฐบล็อกประสาน CT มีค่าการดูดกลืนน้ำเฉลี่ย และความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย เท่ากับ 79 kg/m^3 และ 1,954 kg/m^3 ตามลำดับ ในขณะที่อิฐบล็อกประสาน 10OSW, 20OSW, 30OSW, 40OSW และ 50OSW มีค่าการดูดกลืนน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 84, 91, 121, 148 และ 155 kg/m^3 หรือเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 107, 115, 153,

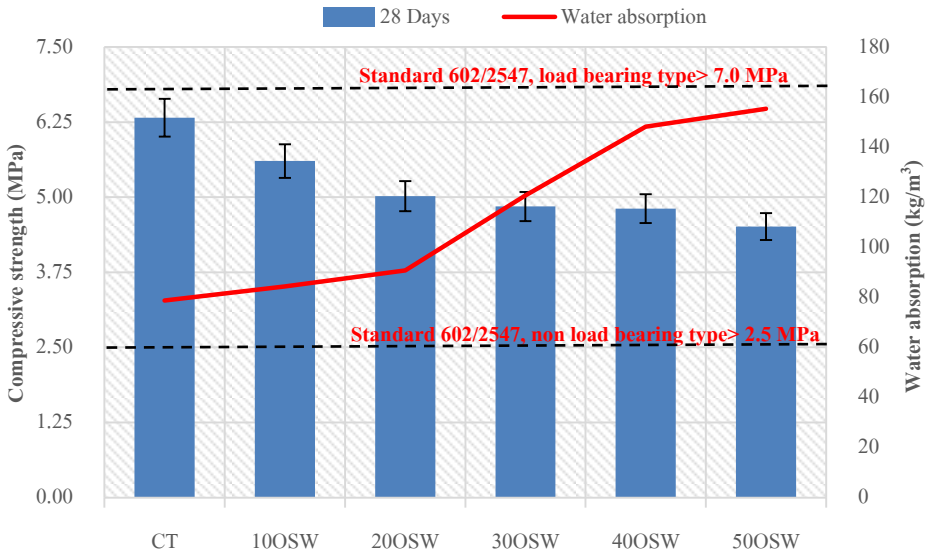
188 และ 197 ของอิฐบล็อกประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ตามลำดับ ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย ของอิฐบล็อกประสาน 10OSW, 20OSW, 30OSW, 40OSW และ 50OSW มีค่าเท่ากับ 1,884, 1,853, 1,816, 1,785, และ 1,753 kg/m^3 หรือลดลงคิดเป็นร้อยละ 96, 95, 93, 91 และ 90 ของอิฐบล็อกประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ตามลำดับ จากผลการทดสอบความหนาแน่นแห้ง และการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน แสดงให้เห็นว่า การดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่ของขยะเปลือกหอยนางรมบด ในขณะที่ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยจะมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มอัตราการแทนที่ของขยะเปลือกหอยนางรมบด กล่าวคือ ความหนาแน่นแห้งของอิฐบล็อกประสานจะแปรผกผันกับการดูดกลืนน้ำ โดยเมื่ออิฐบล็อกประสานมีความหนาแน่นมากขึ้นจะส่งผลให้มีการดูดกลืนน้ำได้น้อยลง และเมื่อความหนาแน่นน้อยก็จะดูดกลืนน้ำได้มากขึ้น (Dasaesamoh *et al.*, 2015) เนื่องจากขยะเปลือกหอยนางรมบดมีขนาดใหญ่ และมีรูพรุนสูง ทำให้มีความหนาแน่นน้อย ส่งผลให้มีการดูดกลืนน้ำที่มากกว่า และขนาดของขยะเปลือกหอยนางรมบดที่ใหญ่กว่าปูนซีเมนต์นั้น ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ทำได้ยากกว่าอิฐบล็อกประสานที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของอิฐบล็อกประสาน ลดลงเช่นกัน อย่างไรก็ดีเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (602/2547) พบว่าการทดสอบการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานที่ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยขยะเปลือกหอยนางรมบด เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด คือต้องมีค่าการดูดกลืนน้ำเฉลี่ย จากอิฐบล็อกประสานทั้ง 5 ก้อน ไม่มากกว่า 208-288 kg/m^3 ซึ่งอิฐบล็อกประสาน ที่มีการนำขยะเปลือกหอยนางรมบดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนทุกส่วนผสม ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน กับร้อยละการแทนที่เปลือกหอยนางรมบดที่อายุ 28 วัน

3. ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วันและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน

ภาพที่ 8 แสดงค่ากำลังอัดของอิฐบล็อกประสานซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขยะเปลือกหอยนางรมบด (OSW) ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าอิฐบล็อกประสาน มีลักษณะการพัฒนาค่ากำลังอัดลดลงเมื่อทำการเพิ่มอัตราการแทนที่ของขยะเปลือกหอยนางรมบด โดยอิฐบล็อกประสานที่มีอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 (CT) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 6.3 MPa ในขณะที่อิฐบล็อกประสาน 10OSW, 20OSW, 30OSW, 40OSW และ 50OSW มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 5.6, 5.0, 4.9, 4.8 และ 4.5 MPa คิดเป็นร้อยละ 89, 79, 77, 76 และ 71 ของอิฐบล็อกประสาน CT ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วันและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน พบว่าอิฐบล็อกประสาน มีค่ากำลังอัดลดลง เมื่อทำการเพิ่มขึ้นของการแทนที่ OSW ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 การเพิ่มขึ้นของการแทนที่ OSW ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิฐบล็อกประสาน มีความหนาแน่นน้อยลง เกิดโพรงและช่องว่างมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Siripattarapravat (2009) ซึ่งพบว่าการทดสอบการดูดซึมน้ำของปูนฉาบที่มีการนำ OSW แทนที่บางส่วน ในทุกการแทนที่ OSW ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ร้อยละการดูดซึมน้ำของปูนฉาบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยปูนฉาบที่มีอัตราส่วนการแทนที่ด้วย OSW ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำสูงที่สุดเมื่อเทียบกับปูนฉาบ มีอัตราส่วนการแทนที่ด้วย OSW ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานที่ได้ไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน มผช.602/2547 ซึ่งกำหนดให้กำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานต้องสามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยได้ไม่น้อยกว่า 7.0 MPa สำหรับชนิดรับน้ำหนัก และสามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยได้ไม่น้อยกว่า 2.5 MPa สำหรับชนิดไม่รับน้ำหนัก ที่อายุทดสอบ 28 วัน พบว่าอิฐบล็อกประสานซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขยะเปลือกหอยนางรมบด สามารถนำมาใช้ได้ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน มผช.602/2547 สำหรับชนิดไม่รับน้ำหนัก

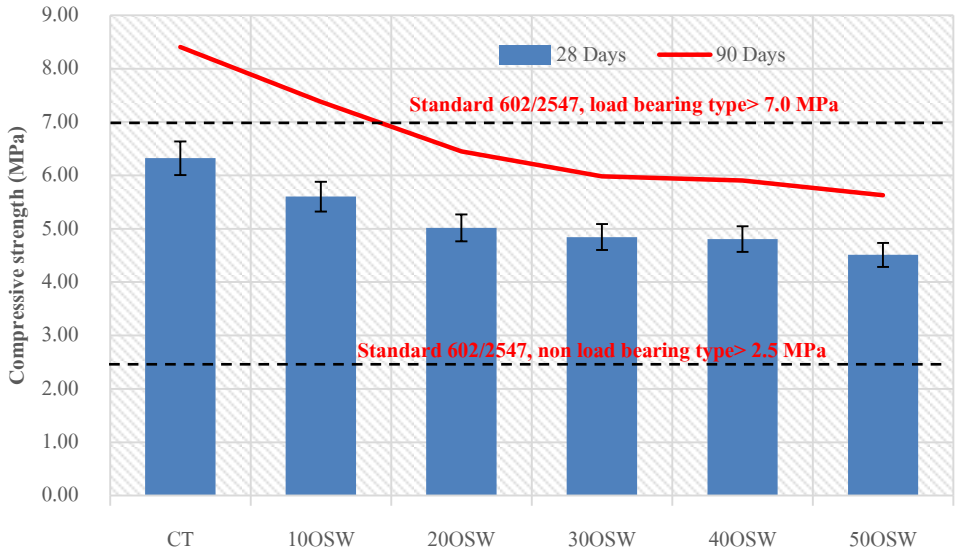


ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วันและการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน กับร้อยละการแทนที่เปลือกหอยนางรมบด

4. ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วันและ 90 วันของอิฐบล็อกประสาน

ภาพที่ 9 แสดงค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วันของอิฐบล็อกประสาน ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขยะเปลือกหอยนางรมบด (OSW) ที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จากผลการทดสอบพบว่า ที่อายุการบ่ม 90 อิฐบล็อกประสานที่มีอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 (CT) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 8.4 MPa ในขณะที่อิฐบล็อกประสาน 10OSW, 20OSW, 30OSW, 40OSW และ 50OSW มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 7.4, 6.5, 6.0, 5.9 และ 5.6 MPa คิดเป็นร้อยละ 88, 77, 71, 70 และ 67 ของอิฐบล็อกประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดของอิฐบล็อกประสานมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออายุการบ่มมากขึ้นในทุกกลุ่มตัวอย่าง ในขณะที่การแทนที่ ที่เพิ่มขึ้นของขยะเปลือกหอยนางรมบด ส่งผลให้กำลังอัดของอิฐบล็อกประสานมีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lertwattanaruk *et al.*, (2012) ซึ่งศึกษาการนำ OSW มาใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ปูนฉาบ โดยแทนที่ OPC ที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดของปูนฉาบที่มีการแทนที่ OSW ในปริมาณที่มากขึ้นจะมีค่ากำลังอัดลดลง เพราะว่า OSW ค่อนข้างเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา แต่เนื่องจากขนาดอนุภาคของ OSW นั้นมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์เล็กน้อย ทำให้อนุภาคของ OSW บางส่วน สามารถสอดแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคปูนซีเมนต์นั้นได้ ซึ่งเมื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานที่ได้ไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน มผช.602/2547 ซึ่งกำหนดให้กำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานต้องสามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยได้ไม่น้อยกว่า 7.0 MPa สำหรับชนิดรับน้ำหนัก และสามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยได้ไม่น้อยกว่า 2.5 MPa สำหรับชนิดไม่รับน้ำหนัก ที่อายุทดสอบ 28 วัน พบว่าสามารถนำมาใช้ได้ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ซึ่งจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน มผช.602/2547 สำหรับชนิด

ไม่รับน้ำหนัก ในขณะที่ อิฐบล็อกประสาน ซึ่งทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขยะเปลือกหอยนางรมบด (OSW) ที่ร้อยละ 10 (10OSW) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน มผช.602/2547 สำหรับชนิดรับน้ำหนัก ที่อายุการบ่ม ที่ 90 วัน



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วันและค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 90 วันของอิฐบล็อกประสาน ที่ร้อยละการแทนที่ต่างๆ กัน

5. การวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิต

ตารางที่ 4 The costs of interlocking blocks

Specimen	Mixture proportions, (Binder: Lateritic soil, 1:6), [kg. *(Baht/kg)*]			
	OPC	OSW	Lateritic soil	Baht/Block
CT	0.83 *(2.98)*	-	4.95 *(0.50)*	4.93
10OSW	0.74 *(2.98)*	0.08 *(0.40)*	4.95 *(0.50)*	4.72
20OSW	0.66 *(2.98)*	0.17 *(0.40)*	4.95 *(0.50)*	4.51
30OSW	0.58 *(2.98)*	0.25 *(0.40)*	4.95 *(0.50)*	4.29
40OSW	0.50 *(2.98)*	0.33 *(0.40)*	4.95 *(0.50)*	4.08
50OSW	0.41 *(2.98)*	0.41 *(0.40)*	4.95 *(0.50)*	3.87

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขยะจากเปลือกหอยนางรมบด ซึ่งไม่ผ่านการเผา (OSW) มาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) บางส่วน ในอิฐบล็อกประสานในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยเมื่อนำมาวิเคราะห์หาราคาต้นทุนในการผลิตอิฐบล็อกประสาน ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าการใช้ขยะเปลือกหอยนางรมบด (OSW) ซึ่งมีราคาประมาณ 0.40 บาทต่อกิโลกรัม (ผลเฉลี่ยการบดเปลือกหอยในเวลา 60 นาที น้ำหนักที่บดได้ 60.7 กิโลกรัม ใช้

พลังงานไฟฟ้า 231.3 โวลล์ กระแสไฟฟ้า 5.31 แอมป์ ขนาดที่บดได้เล็กกว่า 5 มิลลิเมตร คิดเป็นต้นทุนการผลิตมี ค่าใช้จ่าย 3.57 บาท โดยคิดจากค่าไฟหน่วยละ 3 บาท โดยใช้เวลาในการบดประมาณ 6 ชั่วโมง (บดหยาบเป็นเวลา 4 ชม. เมื่อเปลือกหอยบดสามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) แล้วนำไปบดต่อด้วยเครื่องบดอนุภาคแบบบอลมิลล์ เป็นเวลา 2 ชม.) และเปลือกหอยนางรมซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจึงไม่มีค่าใช้จ่าย แต่อาจจะมีในส่วนของค่าขนย้ายรวมถึงค่าแรงในการทำความสะอาด) (Klathae and Horpet, 2019) ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ซึ่งมีราคาประมาณ 2.98 บาทต่อกิโลกรัม หรือ 149 บาทต่อกระสอบ (50 กิโลกรัม) (ราคากลาง ณ เดือนกุมภาพันธ์ 2562)

ตารางที่ 5 แสดงการคำนวนระยะเวลาในการคืนทุนของการผลิตอิฐบล็อกประสาน พบว่าอิฐบล็อกประสานที่มีการใช้ขยะจากเปลือกหอยนางรมบด ซึ่งไม่ผ่านการเผา มีราคาประมาณ 3.87-4.72 บาทต่อก้อน โดยต้นทุนขึ้นอยู่กับปูนซีเมนต์ และดินลูกรัง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับราคาอิฐบล็อกประสานที่มีขายทั่วไปมีราคาประมาณ 9-10 บาท ซึ่งมีราคาถูกกว่าร้อยละ 50 ซึ่งต้นทุนนี้ไม่รวมกับค่าแรง และค่าใช้จ่ายอื่นๆ สำหรับกรณีการผลิตเชิงอุตสาหกรรม ในขณะที่เมื่อทำการพิจารณาจุดคุ้มทุน และระยะเวลาในการคืนทุนของการผลิตอิฐบล็อกประสาน พบว่า อิฐบล็อกประสานที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวนั้น ต้องใช้ระยะเวลาในการคืนทุนประมาณ 9.36 เดือน ในขณะที่อิฐบล็อกประสานที่มีการใช้ขยะจากเปลือกหอยนางรมบด ซึ่งไม่ผ่านการเผา มีระยะเวลาในการคืนทุนเฉลี่ยอยู่ที่ระหว่าง 8.5 เดือน เท่านั้น

ตารางที่ 5 Break-even point of interlocking blocks

Specimen	CT	10OSW	20OSW	30OSW	40OSW	50OSW
Price Materials (Baht/Block)	4.93	4.72	4.51	4.29	4.08	3.87
Price Materials/Days (200 Block/Days) (Baht)	987	944	902	859	816	774
Price Materials/Years (20 Days/Month) (Baht)	236,808	226,591	216,374	206,158	195,941	185,724
Labor Cost /Years (400 Baht/2 Man/20 Days/Month) (Baht)	96,000					
Machine Cost (Baht)	22,000					
Summary Cost (Baht)	355,795	345,535	335,276	325,017	314,757	304,498
Sale Price/Block (Baht)	9.50					
Amount Block of Return (Block)	37,452	36,372	35,292	34,212	33,132	32,052
Month of Return (Month)	9.36	9.09	8.82	8.55	8.28	8.01

Remark: OPC: Ordinary Portland Cement Type I, OSW: Ground Oyster Shell Waste

สรุป

1. อิฐบล็อกประสานตัวอย่างที่อายุการบ่มที่ 28 วัน ในทุกอัตราส่วน มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.602/2547) ชนิดไม่รับน้ำหนัก ต่อมาที่อายุการบ่มที่ 90 วัน อิฐบล็อกประสาน ในอัตราส่วนการแทนที่ ร้อยละ 0 และร้อย

ละ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (602/2547) ชนิดรับน้ำหนัก ในขณะที่การดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานทุกอัตราส่วนผสม ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน อิฐบล็อกประสาน (602/2547) ชนิดรับน้ำหนัก

2. การใช้ขยะเปลือกหอยนางรมบด ที่ไม่ผ่านกระบวนการเผา ทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ช่วยลดต้นทุนในการผลิตอิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนักได้สูงสุดถึง 1.06 บาทต่อก้อน ที่อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยลดระยะเวลาคืนทุนลงจาก 9.36 เดือน เหลือเพียง 8 เดือน

เมื่อพิจารณาผลข้างต้นแล้วสามารถสรุปได้ว่าขยะเปลือกหอยนางรมบด ที่ไม่ผ่านกระบวนการเผา สามารถนำมาเป็นวัสดุทางเลือกชนิดใหม่ในงานอิฐบล็อกประสานได้ เมื่อมีการใช้ในปริมาณที่เหมาะสม และมีการควบคุมปริมาณน้ำที่พอเหมาะ เนื่องจากอิฐบล็อกประสานมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานอิฐบล็อกประสานทั้งชนิดรับน้ำหนักแบกทานและไม่รับน้ำหนักแบกทาน หรือนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในการผลิตวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น นอกจากจะสามารถลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยตรงแล้ว หากมีการส่งเสริมและให้ความรู้แก่ชุมชนที่มีวัสดุประเภทเปลือกหอยอยู่มาก อาจเป็นการสร้างรายได้และอาชีพ รวมถึงการนำขยะที่เหลือทิ้ง มาใช้ให้เกิดประโยชน์และสามารถใช้งานได้จริงในชุมชน ได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนเงินงบประมาณโครงการวิจัย ประเภทเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองวิจัย และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ASTM. 2015. ASTM C150. Standard Specification for Portland Cement. ASTM International, PA, USA.

Bin-Yang, Z., Qiang, Z., Chang-Feng, C. and Yan, Y. 2012. Structure and property characterization of oyster shell cementing material. **Chinese Journal Structural Chemistry** 31(1): 85-92.

Charoennatkul, C. 2014. Interlocking blocks containing oil palm ash and shells waste. **Journal of Community Development and Life Quality** 2(1): 103-112. (in Thai)

Chiou, I.J., Chen, C.H. and Li, Y.H. 2014. Using oyster-shell foamed bricks to neutralize the acidity of recycled rainwater**. Construction and Building Materials** 64(C): 480-487.

Dasaesamoh, A., Kabae, Y., Nialee, A., Reebu, S., Mamataeha, P. and Samae, Y. 2015. Effect of improvement of para-rubber wood fly ash on compressive strength. **Rajamangala University of Technology Tawan-ok Research Journal** 8(1): 66-71. (in Thai)

Djobo, Y.J.N., Elimbi, A., Manga, J.D. and Ndjock, I.D.L. 2016. Partial replacement of volcanic ash by bauxite and calcined oyster shell in the synthesis of volcanic ash-based geopolymers.

Construction and Building Materials 113(2016): 673-681.

Ez-Zaki, H., Diouri, A., Kamali-Bernard, S. and Sassi, O. 2016. Composite cement mortars based on marine sediments and oyster shell powder. **Materiales de Construcción** 66(321): e080. doi: https://doi.org/10.3989/mc.2016.01915

Fishery Statistics Analysis and Research Group. 2018. **Statistics of Marine Shellfish Culture Survey 2017.** Information and Communication Technology Center, Department of Fisheries, Ministry of Agriculture and Cooperatives 2018. Available Source. https://www.fisheries.go.th/strategy-stat/themeWeb/books/2560/.pdf., March 27, 2019. (in Thai)

Klathae, T. and Horpet, P. 2019. Compressive strength and autogenous shrinkage properties of cement paste containing ground oyster shell. **Thai Science and Technology Journal** 27(4): 752-763. (in Thai)

Lertwattanaruk, P., Makul, N. and Siripattarapravat, C. 2012. Utilization of ground waste seashells in cement mortars for masonry and plastering. **Journal of Environmental Management** 111(2012): 133-141.

Li, G., Xu, X., Chen, E., Fan, J. and Xiong, G. 2015. Properties of cement-based bricks with oyster -shells ash. **Journal of Cleaner Production** 91: 279-287.

Olivia, M., Mifshella, A.A. and Darmayanti, L. 2015. Mechanical properties of seashell concrete. **Procedia Engineering** 125: 760-764.

Siripattarapravat, C. 2009. Influence of ground seashells on properties of plastering mortar. Master of Architecture and Planning. Thammasat University. (inThai)

Thai Industrial Standards Institute (TISI). 2004. **Community Product Standard 602/2004. Interlocking blocks non-load bearing type.** Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)

Yang, E.I., Yi, S.T. and Leem, Y.M. 2005. Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics: Part I. Fundamental properties. **Cement and Concrete Research** 35(11): 2175-2182.

Yao, Z., Xia, M., Li, H., Chen, T., Ye, Y. and Zheng, H. 2014. Bivalve shell: not an abundant useless waste but a functional and versatile biomaterial. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology** 44(22): 2502-2530.

Yoon, H., Park, S., Lee, K. and Park, J. 2004. Oyster shell as substitute for aggregate in mortar. **Waste Management & Research** 22(3): 158-170.

ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุง

Effect of Storage Periods on Seed Quality of Sangyod Phatthalung Rice

นราเดช สุขแก้ว * และ วิชัย หวังวโรดม

Naradat Sukkaew * and Vichai Wongvarodom

Received: 26 October 2020, Revised: 24 December 2020, Accepted: 5 February 2021

บทคัดย่อ

การศึกษาคุณภาพหลังการเก็บรักษาของเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุง ที่เก็บรักษาในกระสอบพลาสติกสาน ใส่ในกล่องโฟม เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง และห้องเย็นอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 เดือน ระหว่างเดือนพฤษภาคม 2562 ถึงพฤษภาคม 2563 ดำเนินการที่สาขาวิชานวัตกรรมการเกษตรและการจัดการ (วิชาเอกพืชศาสตร์) คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา พบว่า เมล็ดพันธุ์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องมีความงอกมาตรฐาน 80 เปอร์เซ็นต์ หลังการเก็บรักษานาน 3 เดือน และเมล็ดพันธุ์ที่อายุการเก็บรักษานาน 9 เดือนขึ้นไป มีความงอกและความแข็งแรงลดลงอย่างมาก ในขณะที่การเก็บรักษาในห้องเย็น นาน 12 เดือน เมล็ดพันธุ์ยังคงมีความงอกมาตรฐานสูง 85 เปอร์เซ็นต์ มีความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ในรูปเวลาเฉลี่ยในการงอก 7.29 วัน ความงอกในดิน 87 เปอร์เซ็นต์ และมีการเจริญเติบโตของต้นกล้าสูงเช่นเดียวกับก่อนการเก็บรักษา ส่วนความสัมพันธ์ของลักษณะคุณภาพเมล็ดพันธุ์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง และ ห้องเย็น พบว่าความงอกมาตรฐาน มีความสัมพันธ์สูงกับความงอกเมื่อนับครั้งแรก ($r=0.91^{**}$ และ $r=0.64^{**}$ ตามลำดับ) และน้ำหนักแห้งต้นกล้ามีความสัมพันธ์สูงกับความยาวยอด ($r=0.98^{**}$ และ $r=0.84^{**}$ ตามลำดับ) และความยาวราก ($r=0.98^{**}$ และ $r=0.75^{**}$ ตามลำดับ) ผลจากการศึกษานี้อาจนำไปสู่การพัฒนารูปแบบการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุงที่เหมาะสม และวิธีการประเมินคุณภาพเมล็ดพันธุ์ข้าวที่สัมพันธ์กับการตั้งตัวของต้นกล้าในแปลงนา

คำสำคัญ: ข้าว, คุณภาพเมล็ดพันธุ์, การเก็บรักษา, ความงอก, ความแข็งแรง

สาขาวิชานวัตกรรมการเกษตรและการจัดการ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Agricultural Innovation and Management Division, Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Hat Yai Campus, Kho Hong, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): tew.naradat@hotmail.com

ABSTRACT

Seed quality after storage of Sangyod Phatthalung rice stored in plastic woven bag and kept in polystyrene foam box at room temperature and in a cold room (10°C) for 12 months was investigated during May 2019 - May 2020 at Agricultural Innovation and Management Division (Plant Science), Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla. The result showed that seeds stored at room temperature had standard germination of 80% after being stored for 3 months. Seed germination and vigor rapidly decreased after being stored for more than 9 months. After storage for 12 months, seeds stored in a cold room maintained high standard germination of 85%. Seed vigor in terms of mean germination time was 7.29 days and soil emergence of 87%, and the seedling growth was not different from before storage. The correlation between seed quality traits after stored at room temperature and in a cold room were revealed. The standard germination had high correlation with first count germination (r=0.91** and r=0.64** respectively) and seedling dry weight showing high correlation with shoot length (r=0.98** and r=0.84** respectively) and root length (r=0.98** and r=0.75** respectively). Such information may help in developing the appropriate rice seed storage conditions and seed testing methods which correlate to rice seedling establishment in the paddy field.

Key words: rice, seed quality, seed storage, germination, vigor

บทนำ

ข้าวเป็นพืชอาหารหลักและเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญกับคนไทย และคนเอเชีย รวมถึงประเทศอื่นๆ ทั่วโลก คนไทยบริโภคข้าวเฉลี่ยประมาณ 109-120 กิโลกรัมต่อคนต่อปี และส่งออกต่างประเทศประมาณ 9.20 ล้านตันข้าวสาร คิดเป็นมูลค่าประมาณ 119,215 ล้านบาท (Weerapat, 2012) ในปี พ.ศ.2561 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวประมาณ 69 ล้านไร่ หรือประมาณ 46 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่เกษตรกรรมทั้งหมด (Office of Agricultural Economics, 2019) ใช้สำหรับปลูกข้าวนาปีประมาณ 59 ล้านไร่ และปลูกข้าวนาปรังประมาณ 9 ล้านไร่ (Department of Agricultural Extension, 2019a) โดยภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือนิยมปลูกทั้งข้าวเจ้าและข้าวเหนียว ภาคกลางปลูกข้าวเจ้าเป็นส่วนใหญ่ และภาคใต้ส่วนใหญ่เป็นข้าวเจ้า โดยภาคใต้มีข้าวพันธุ์พื้นเมืองหลายพันธุ์ที่เป็นที่นิยม เช่น สังข์หยดพัทลุง เฉี้ยงพัทลุง และเล็บนกปัตตานี เป็นต้น (Weerapat, 2012) ข้าวสังข์หยดพัทลุงยังได้ขึ้นทะเบียนเป็นข้าวสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (Geographical Indication; GI) (Rice Product Development Division, 2016) ในปี พ.ศ. 2561 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวสังข์หยดพัทลุงประมาณ 14,440 ไร่ (Department of Agricultural Extension, 2019b) โดย Rice Department (2020) แนะนำอัตราการใช้เมล็ดพันธุ์ข้าวที่มีคุณภาพสูง งอกได้ดี แนะนำให้ใช้ 15-20 กิโลกรัมต่อไร่สำหรับนาหว่าน และ 5-7 กิโลกรัมต่อไร่สำหรับนาปักดำ แสดงให้เห็นถึงความต้องการใช้เมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุงในประเทศไทย ซึ่งการขาดแคลนเมล็ดพันธุ์ข้าวคุณภาพดีเป็นปัญหาที่สำคัญในการผลิตข้าวในประเทศไทย (Agricultural Research Development Agency, 2017)

ทั้งนี้มาตรฐานคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าวต้องมีความงอกไม่ต่ำกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ (Ministry of Agriculture and Cooperatives, 2013) คุณภาพเมล็ดพันธุ์จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการผลิตข้าวให้ได้ผลผลิต และคุณภาพ ตามที่ต้องการ ดังนั้นเมล็ดพันธุ์ข้าวจำเป็นต้องมีคุณภาพสูง มีความงอกสูง แข็งแรง งอกเร็ว สม่ำเสมอ ต้นกล้าตั้งตัวได้ดีและแข็งแรง อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ในช่วงเวลาก่อนถึงฤดูเพาะปลูก ทำให้เมล็ดพันธุ์มีการเสื่อมคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษา โดยเฉพาะในสภาพภูมิอากาศภาคใต้ ที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงตลอดเวลา ทำให้เมล็ดพันธุ์ข้าวมีความชื้นเพิ่มสูงขึ้น ประกอบกับอุณหภูมิที่สูงยังเร่งอัตราการเสื่อมสภาพของเมล็ดพันธุ์ และส่งเสริมการแพร่กระจายของโรคและแมลง ทำให้เมล็ดพันธุ์เสื่อมคุณภาพไปอย่างรวดเร็ว (Songkrairat and Prasertsak, 2015) โดยเมล็ดพันธุ์มีความสามารถในการเก็บรักษาแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์พืช ความชื้น ของเมล็ดพันธุ์ ประวัติเมล็ดพันธุ์ และสภาพการเก็บรักษา (Duangpatra, 1986) การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณภาพและความสัมพันธ์ของคุณภาพเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุงหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง และห้องเย็น เพื่อนำไปสู่การเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ และใช้ความสัมพันธ์ของคุณภาพเมล็ดพันธุ์ในการร่วมประเมินคุณภาพเมล็ดพันธุ์ได้อย่างเหมาะสม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมเมล็ดพันธุ์

นำเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุงจากศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวพัทลุง มาเก็บรักษาในกระสอบพลาสติกสาน ที่อุณหภูมิห้อง และห้องเย็นอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ณ ห้องปฏิบัติการเมล็ดพันธุ์พืช สาขาวิชานวัตกรรมการเกษตรและการจัดการ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ในระหว่างเดือนพฤษภาคม 2562 - เดือนพฤษภาคม 2563 สุ่มตัวอย่างเมล็ดพันธุ์ก่อนการเก็บรักษา และทุก 3 เดือนหลังการเก็บรักษา จนครบ 12 เดือน

2. การทดสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์

นำเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุงที่เก็บรักษาในสภาพและระยะเวลาการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน มาทดสอบคุณภาพทางกายภาพ และคุณภาพทางสรีรวิทยา ดังนี้

2.1 การทดสอบคุณภาพทางกายภาพ

1) ความชื้นของเมล็ดพันธุ์ นำตัวอย่างเมล็ดพันธุ์ข้าว จำนวน 4 ซ้ำๆ ละ 25 เมล็ด ชั่งน้ำหนักก่อนอบ แล้วอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนด นำมาชั่งน้ำหนักหลังอบ แล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดพันธุ์โดยใช้น้ำหนักสดเป็นเกณฑ์ (ISTA, 2019) จากสูตร

$$\text{ความชื้น (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักสด} - \text{น้ำหนักแห้ง})}{\text{น้ำหนักสด}} \times 100$$

2.2 การทดสอบคุณภาพทางสรีรวิทยา

1) ความงอกมาตรฐาน เพาะเมล็ดพันธุ์ในกระดาษเพาะแบบ between paper จำนวน 4 ซ้ำๆ ละ 50 เมล็ด นำไปไว้ในตู้เพาะที่อุณหภูมิสลับ 20-30 องศาเซลเซียส ประเมินความงอกครั้งแรกที่อายุ 5 วัน และประเมินความงอกครั้งสุดท้ายที่อายุ 14 วัน หลังการเพาะ (ISTA, 2019)

2) เวลาเฉลี่ยในการงอก คำนวณจากจำนวนต้นกล้าปกติในแต่ละวันจากการทดสอบความงอกมาตรฐาน (Santipracha, 2007) จากสูตร

$$MGT = \frac{\sum Dn}{\sum n}$$

เมื่อ D = อายุวันที่ตรวจนับ และ n = จำนวนต้นกล้าปกติที่งอกในวันที่ตรวจนับ

3) ความงอกในดิน สุ่มเมล็ดพันธุ์จำนวน 4 ซ้ำๆ ละ 50 เมล็ด เพาะเมล็ดพันธุ์ในกระบะดินผสมระหว่าง ดินร่วนกับดินลำดวนในอัตรา 1:1 ประเมินต้นกล้าที่อายุ 14 วัน นำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความงอกในดิน

4) การวัดการนำไฟฟ้า สุ่มเมล็ดพันธุ์จำนวน 4 ซ้ำๆ ละ 25 เมล็ด มาชั่งน้ำหนักและนำเมล็ดพันธุ์ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ที่มีน้ำปราศจากประจุ 75 มิลลิลิตร นำไปไว้ในตู้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำสารละลายที่แช่เมล็ดพันธุ์มาวัดค่าการนำไฟฟ้าในหน่วยไมโครซีเมนต่อเซนติเมตร และคำนวณการนำไฟฟ้าของเมล็ดพันธุ์ในหน่วยไมโครซีเมนต่อเซนติเมตรต่อกรัม (μS/cm/g) (Santipracha, 2007) จากสูตร

$$\text{การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมน/เซนติเมตร/กรัม)} = \frac{\text{ค่าการนำไฟฟ้าอ่านจากเครื่องวัด (ไมโครซีเมน/เซนติเมตร)}}{\text{น้ำหนัก 25 เมล็ด (กรัม)}}$$

5) การเจริญของต้นกล้าในรูปของความยาวยอด ความยาวราก และน้ำหนักแห้งของต้นกล้า โดยสุ่มเมล็ดพันธุ์จำนวน 4 ซ้ำๆ ละ 20 เมล็ด วางเมล็ดพันธุ์บนกระดาษเพาะเรียงเป็น 2 แถว ตามความยาวของกระดาษ แถวแรกห่างจากขอบกระดาษด้านบน 6 เซนติเมตร และแถวที่สองห่างจากขอบกระดาษด้านบน 13 เซนติเมตร วางเมล็ดพันธุ์ให้ส่วนที่เจริญเป็นปลายรากอ่อนอยู่ด้านล่าง และต้นอ่อนอยู่ด้านบนของกระดาษ แล้วม้วนกระดาษเพาะ วางให้ตั้งเอียงเป็นมุม 45 องศา ในตู้เพาะสภาพมืดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อครบกำหนด 7 วัน นำต้นกล้ามาวัดความยาวยอดและความยาวราก โดยวัดจากส่วนที่เป็นรอยต่อระหว่างยอดกับรากถึงปลายยอดและปลายราก ตามลำดับ และนำต้นกล้าปกติของแต่ละซ้ำมาตัดแยกส่วนเนื้อเยื่อสะสมอาหารออกให้เหลือเฉพาะส่วนของแกนต้นอ่อน นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแห้งของต้นกล้า คำนวณหาน้ำหนักแห้งของต้นกล้า (AOSA, 2002)

3. การวางแผนการทดลอง และวิเคราะห์ข้อมูล

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม R (Soonsuwon, 2015) และวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะคุณภาพเมล็ดพันธุ์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง และห้องเย็น นาน 0 3 6 9 และ 12 เดือน ด้วยวิธีหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient; r)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. คุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุง ที่เก็บรักษาในถุงพลาสติกสานที่อุณหภูมิห้อง นาน 12 เดือน

เมล็ดพันธุ์ข้าวสังข์หยดพัทลุงที่เก็บรักษาในถุงพลาสติกสานที่อุณหภูมิห้อง มีความชื้นไม่แตกต่างกัน ทางสถิติโดยลดลงเล็กน้อยหลังการเก็บรักษานาน 3-6 เดือน และเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับ 11.61-12.14 เปอร์เซ็นต์ หลังการเก็บรักษานาน 9-12 เดือน (ตารางที่ 1) และสามารถคงความงอกมาตรฐานได้สูง

กว่า 80 เปอร์เซ็นต์ จนถึงอายุ 3 เดือนหลังการเก็บรักษา และความงอกลดลงอย่างรวดเร็วหลังเก็บรักษานาน 9 เดือนขึ้นไป สอดคล้องกับ Santipracha and Santipracha (1998) พบว่าเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์พัทลุง 60 ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง สามารถคงความงอกมาตรฐานสูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ได้นาน 3 เดือน ส่วนเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์ กข 7 กข13 แก่นจันทร์ ขาวดอกมะลิ 105 ดอกพะยอม และนางพญา 132 (Santipracha and Santipracha, 1998) ปทุมธานี 1 (Diregphok, 2013) หอมชลสิทธิ์ (Romkaew *et al*., 2018) Telangana Sona (Harsha *et al*., 2017) BW 196 (Mutinda *et al*., 2017) Giza 179 และ Egyptian Yasmen (Katta *et al*., 2019) มีความงอกมาตรฐานสูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ได้นาน 6 เดือน แสดงให้เห็นว่าเมล็ดพันธุ์ข้าวมีการเสื่อมคุณภาพ และสูญเสียความงอกไปอย่างรวดเร็วเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องภายใน 3-6 เดือน เนื่องจากอุณหภูมิสูงเร่งอัตราการหายใจของเมล็ดพันธุ์ อาหารสะสมถูกใช้และสลายตัวไป เมล็ดพันธุ์เสื่อมคุณภาพมีผลทำให้เมล็ดพันธุ์สูญเสียความแข็งแรงและความงอกไปในที่สุด (Bewley and Black, 1994; Aguiar *et al*., 2015)

เวลาเฉลี่ยในการงอกของเมล็ดพันธุ์ก่อนการเก็บรักษาเร็วที่สุด 6.83 วัน และเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในระหว่างการเก็บรักษา กระทั่งมีค่าสูงสุด 11 วัน ในเมล็ดพันธุ์ที่เก็บรักษานาน 12 เดือน (ตารางที่ 1) ความงอก เมื่อนับครั้งแรกลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามอายุการเก็บรักษา สอดคล้องกับความงอกมาตรฐาน และความงอกในดิน ที่สูงจนถึงอายุ 3 เดือนหลังการเก็บรักษา และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเก็บรักษานาน 9 เดือนขึ้นไป เช่นเดียวกันกับ Santos *et al*. (2019) พบว่าเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์ BRS Esmeralda มีความงอกเมื่อนับครั้งแรกลดลงสอดคล้องกันกับการลดลงของความงอกมาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าความงอกเมื่อนับครั้งแรกสามารถบ่งชี้การเสื่อมคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าวได้

ตารางที่ 1 ความชื้น ความงอกมาตรฐาน เวลาเฉลี่ยในการงอก ความงอกเมื่อนับครั้งแรก และความงอกในดิน ของเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุงที่เก็บรักษาในกระสอบพลาสติกสานที่อุณหภูมิห้อง นาน 12 เดือน

เดือน	ความชื้น (%)	ความงอกมาตรฐาน (%)	เวลาเฉลี่ยในการงอก (วัน)	ความงอกเมื่อนับครั้งแรก (%)	ความงอกในดิน (%)
0	11.56	96.00 a	6.83 c	84.50 a	94.50 a
3	9.95	80.00 b	7.52 bc	45.50 b	93.00 a
6	9.56	70.00 c	6.91 c	29.00 c	47.00 b
9	12.14	11.50 d	8.36 b	3.50 d	7.00 c
12	11.61	1.00 e	11.00 a	0 d	0 c
F-test	ns	**	**	**	**
C.V.(%)	19.71	6.45	5.11	18.62	8.67

ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ; ** = มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p \leq 0.01$); ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรต่างกัน แตกต่างกันทางสถิติจากการวิเคราะห์แบบ DMRT

เมล็ดพันธุ์ที่เก็บรักษานาน 0 เดือน มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำสุด 43.38 ไมโครซีเมนต่อเซนติเมตรต่อกรัม เพิ่มขึ้นทางสถิติอยู่ในช่วง 75.33-81.97 ไมโครซีเมนต่อเซนติเมตรต่อกรัม ในเมล็ดพันธุ์ที่เก็บรักษานาน 3-12 เดือน (ตารางที่ 2) เมล็ดพันธุ์ข้าวมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นภายหลังการเก็บรักษา เนื่องจากการเสื่อมสภาพของเมมเบรน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์แรกที่เกิดขึ้นเมื่อเมล็ดพันธุ์เริ่มเสื่อมคุณภาพ เป็นผลให้เกิดการสูญเสียความสามารถในการกักเก็บสารต่างๆ ของเมมเบรน ทำให้มีการรั่วไหลของสารและโมเลกุลต่างๆ ออกมา (Duangpatra, 1986) Guenha *et al.* (2014) รายงานว่าเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์ ITA 312 ที่เก็บรักษาในกระสอบป่านที่อุณหภูมิห้อง ก่อนการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำสุด 42.77 ไมโครซีเมนต่อเซนติเมตรต่อกรัม เพิ่มขึ้นทางสถิติ อยู่ในช่วง 57.82-58.65 ไมโครซีเมนต่อเซนติเมตรต่อกรัม หลังเก็บรักษานาน 3-6 เดือน เช่นเดียวกันกับเมล็ดพันธุ์ทานตะวันพันธุ์ลูกผสม G3 ที่เก็บรักษาในถุงกระดาษที่อุณหภูมิห้อง หลังการเก็บรักษานาน 1 เดือน เมล็ดพันธุ์มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำที่สุด และเพิ่มขึ้นทางสถิติอยู่ในระดับเดียวกันหลังการเก็บรักษานาน 5-19 เดือน (Szemruch *et al.*, 2015) ส่วนความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ในรูปความยาวยอด ความยาวราก และน้ำหนักแห้งต้นกล้าลดลงชัดเจน หลังการเก็บรักษานาน 9 เดือน จาก 5.31 เซนติเมตร 8.85 เซนติเมตร และ 4.32 มิลลิกรัมต่อต้น เป็น 2.35 เซนติเมตร 3.08 เซนติเมตร และ 1.68 มิลลิกรัมต่อต้น ตามลำดับ แสดงว่าความสามารถในการสร้างน้ำหนักแห้งของต้นกล้าลดลง ทั้งนี้การเจริญเติบโตของต้นกล้าสามารถแสดงถึงการใช้อาหารสะสมของเมล็ดพันธุ์ในการเจริญเติบโต และสร้างอวัยวะของต้นอ่อนขณะงอกเป็นต้นกล้า ซึ่งเป็นลักษณะหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ (Santipracha, 1997)

ตารางที่ 2 ค่าการนำไฟฟ้า ความยาวยอด ความยาวราก และน้ำหนักแห้งต้นกล้าของเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุงที่เก็บรักษาในกระสอบพลาสติกสานที่อุณหภูมิห้อง นาน 12 เดือน

เดือน	การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมน/เซนติเมตร/กรัม)	ความยาวยอด (เซนติเมตร)	ความยาวราก (เซนติเมตร)	น้ำหนักแห้งต้นกล้า (มิลลิกรัม/ต้น)
0	43.38 b	5.31 a	8.85 a	4.32 a
3	79.47 a	3.94 a	5.72 ab	3.35 ab
6	75.33 a	4.97 a	6.74 ab	3.84 ab
9	77.22 a	2.35 ab	3.08 bc	1.68 bc
12	81.97 a	0 b	0 c	0 c
F-test	**	**	**	**
C.V. (%)	10.44	40.33	40.60	43.87

** = มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p \leq 0.01$); ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรต่างกันแตกต่างกันทางสถิติจากการวิเคราะห์แบบ DMRT

2. คุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุง ที่เก็บรักษาในถุงพลาสติกสานในห้องเย็น นาน 12 เดือน

เมล็ดพันธุ์ข้าวสังข์หยดพัทลุงที่เก็บรักษาในถุงพลาสติกสานที่ห้องเย็น มีความชื้นลดลงในช่วงเดือนที่ 3-6 และเพิ่มขึ้นสูงสุด 14.13 เปอร์เซ็นต์ หลังการเก็บรักษานาน 12 เดือน (ตารางที่ 3) เมล็ดพันธุ์สามารถรักษาความงอกอยู่ในช่วง 85.00-96.50 เปอร์เซ็นต์ ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา สอดคล้องกับการทดลองของ Santipracha and Santipracha (1998) พบว่าเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์ กข 7 กข 13 แก่นจันทร์ ขาวดอกมะลิ 105 ดอกพะยอม นางพญา 132 และพัทลุง 60 ที่เก็บรักษาในถุงกระดาษที่ห้องเย็น รวมถึงพันธุ์ หอมชลสิทธิ์ (Romkaew *et al*., 2018) ปทุมธานี 1 และปิ่นเกษตร ที่เก็บรักษาในกระสอบป่านที่ห้องเย็น (Diregphok, 2013) มีความงอกมาตรฐานสูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ได้นาน 12 เดือน ทั้งนี้การเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ที่อุณหภูมิต่ำทำให้การหายใจและกิจกรรมทางชีวเคมีต่างๆ ภายในเมล็ดลดลง (Duangpatra, 1986) ช่วยลดอัตราการเสื่อมคุณภาพ (Aguiar *et al*., 2015) มีผลทำให้สามารถเก็บเมล็ดพันธุ์ไว้ได้เป็นเวลานาน (Chanprasert, 1999)

ในด้านความแข็งแรง พบว่าก่อนการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์มีเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วที่สุด 6.83 วัน และเมื่อเก็บรักษานาน 6 เดือน เมล็ดพันธุ์มีเวลาเฉลี่ยในการงอกช้าที่สุด 8.82 วัน หลังจากนั้นลดลงอยู่ในช่วง 7.29-7.32 วัน หลังการเก็บรักษานาน 9-12 เดือน ความงอกเมื่อนับครั้งแรกสูงสุด 84.50 เปอร์เซ็นต์ ในเมล็ดพันธุ์ก่อนการเก็บรักษา และลดลงอย่างมีนัยสำคัญจนมีค่าต่ำสุด 42.00 เปอร์เซ็นต์ หลังการเก็บรักษานาน 12 เดือน สอดคล้องกับการลดลงของความงอกในดิน ที่พบว่าเมล็ดพันธุ์มีความงอกในดิน 94.50-97.00 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 0-6 เดือน หลังการเก็บรักษา จากนั้นลดลงเหลือ 72.00-87.50 เปอร์เซ็นต์ หลังเก็บรักษานาน 9-12 เดือน (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ความชื้น ความงอกมาตรฐาน เวลาเฉลี่ยในการงอก ความงอกเมื่อนับครั้งแรก และความงอกในดินของมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุงที่เก็บรักษาในกระสอบพลาสติกสานในห้องเย็น นาน 12 เดือน

เดือน	ความชื้น (%)	ความงอกมาตรฐาน (%)	เวลาเฉลี่ยในการงอก (วัน)	ความงอกเมื่อนับครั้งแรก (%)	ความงอกในดิน (%)
0	11.56 ab	96.00 a	6.83 b	84.50 a	94.50 a
3	8.94 c	96.50 a	7.42 b	76.00 a	95.00 a
6	10.50 b	96.50 a	8.82 a	49.50 b	97.00 a
9	12.09 a	93.00 a	7.32 b	62.50 ab	72.00 b
12	14.13 a	85.00 b	7.29 b	42.00 b	87.50 ab
F-test	**	**	**	**	*
C.V.(%)	14.22	2.68	6.56	16.22	12.27

* = มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$); ** = มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p \leq 0.01$); ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรต่างกัน แตกต่างกันทางสถิติจากการวิเคราะห์แบบ DMRT

เมล็ดพันธุ์ก่อนเก็บรักษาในห้องเย็น มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำสุด 43.38 ไมโครซีเมนต่อเซนติเมตรต่อกรัม เพิ่มขึ้นทางสถิติอยู่ในช่วง 63.82-70.57 ไมโครซีเมนต่อเซนติเมตรต่อกรัม หลังเก็บรักษานาน 3-12 เดือน เมื่อพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของเมล็ดพันธุ์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง และห้องเย็น พบว่าเมล็ดพันธุ์ที่เก็บรักษาในห้องเย็น มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นน้อยกว่าที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง แสดงว่าเมล็ดพันธุ์ที่เก็บรักษาในห้องเย็นมีการเสื่อมสภาพของเมมเบรนที่น้อยกว่าเมล็ดพันธุ์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ทำให้มีการรั่วไหลของสารต่างๆ ที่น้อยกว่า จึงวัดค่าการนำไฟฟ้าของเมล็ดพันธุ์ได้ต่ำกว่า

ส่วนความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ที่วัดจากการเจริญเติบโตของต้นกล้าในรูปของความยาวยอด พบว่า มีค่าลดลงทางสถิติในช่วงเดือนที่ 3-9 และเพิ่มขึ้นสูงสุด 6.78 เซนติเมตร หลังการเก็บรักษานาน 12 เดือน ส่วนความยาวราก และน้ำหนักแห้งต้นกล้าลดลงน้อยมากโดยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับก่อนการเก็บรักษา มีค่าอยู่ระหว่าง 7.42-9.16 เซนติเมตร และ 3.28-5.16 มิลลิกรัมต่อต้น ตามลำดับ (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 ค่าการนำไฟฟ้า ความยาวยอด ความยาวราก และน้ำหนักแห้งต้นกล้าของเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุงที่เก็บรักษาในกระสอบพลาสติกสานในห้องเย็น นาน 12 เดือน

เดือน	การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมน/เซนติเมตร/กรัม)	ความยาวยอด (เซนติเมตร)	ความยาวราก (เซนติเมตร)	น้ำหนักแห้งต้นกล้า (มิลลิกรัม/ต้น)
0	43.38 b	5.32 b	8.85	4.32
3	69.14 a	3.35 c	7.92	3.28
6	63.82 a	3.94 bc	7.42	3.84
9	68.20 a	3.45 c	9.16	3.77
12	70.57 a	6.78 a	8.82	5.16
F-test	**	**	ns	ns
C.V.(%)	9.21	14.92	17.55	22.69

ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ; ** = มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p \leq 0.01$); ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรต่างกัน แตกต่างกันทางสถิติจากการวิเคราะห์แบบ DMRT

3. สหสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุงที่เก็บรักษาในกระสอบพลาสติกสานที่อุณหภูมิห้อง และห้องเย็น

ความสัมพันธ์ระหว่างความงอกมาตรฐานและความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุง ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง และห้องเย็น แสดงในตารางที่ 5 และ 6 ตามลำดับ พบว่าความงอกเมื่อนับครั้งแรก มีความสัมพันธ์ทางบวกกับความงอกมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (r=0.91** และ r=0.64** ตามลำดับ) สอดคล้องกับการศึกษาในเมล็ดพันธุ์ข้าวสาลี (r=0.938**) (Fuller *et al*., 2012) เมล็ดพันธุ์ทานตะวัน (r=0.97**) (Mohsen and Naser, 2015) (r=0.99*) (Chambo *et al*., 2017) เมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง (r=0.8085**) (Matera *et al*., 2019) (r=0.99**) (Edje, 1970) เมล็ดพันธุ์ข้าวฟ่าง (r=0.829**) (Wang *et al*., 2017) (r=0.8808**) (Negi *et al*., 2019) เมล็ดพันธุ์ถั่ว

ดำ (r=0.84*) (Scariot *et al*., 2017) เมล็ดพันธุ์พืชตระกูลแตง (r=0.48**) (Kaymak, 2012) และเมล็ดพันธุ์ถั่วลันเตา (r=0.435*) (Panwar *et al*., 2018)

การนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ทางลบกับความงอกมาตรฐานของเมล็ดพันธุ์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (r=-0.57**) แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับเมล็ดพันธุ์ที่เก็บรักษาในห้องเย็น ความแข็งแรงในรูปของความยาวยอดมีความสัมพันธ์ทางบวกกับน้ำหนักแห้งต้นกล้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (r=0.98** และ r=0.84** ตามลำดับ) สอดคล้องกับการศึกษาในเมล็ดพันธุ์ข้าว (r=0.87**) (Zhang *et al*., 2017) (r=0.627**) (Kalhori *et al*., 2018) และเมล็ดพันธุ์ถั่วดำ (r=0.75*) (Scariot *et al*., 2017) เช่นเดียวกันกับความแข็งแรงในรูปของความยาวรากที่มีความสัมพันธ์ทางบวกกับน้ำหนักแห้งต้นกล้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (r=0.98** และ r=0.75** ตามลำดับ) สอดคล้องกับเมล็ดพันธุ์ข้าว (r=0.596**) (Kalhori *et al*., 2018) (r=0.50**) (Zhang *et al*., 2017) และเมล็ดพันธุ์ถั่วลันเตา (r=0.464*) (Panwar *et al*., 2018) นอกจากนี้พบว่าความงอกเมื่อนับครั้งแรกมีความสัมพันธ์ทางลบกับการนำไฟฟ้า (r=-0.78** และ r=-0.56* ตามลำดับ) คุณภาพเมล็ดพันธุ์ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องมีความสัมพันธ์สูงระหว่างกัน ดังนี้ ความงอกมาตรฐาน เวลาเฉลี่ยในการงอก ความงอกในดิน ความยาวยอด ความยาวราก และ น้ำหนักแห้งต้นกล้า และคุณภาพเมล็ดพันธุ์ที่เก็บรักษาในห้องเย็นมีความสัมพันธ์สูงระหว่างความงอกมาตรฐานกัความยาวยอด และน้ำหนักแห้งต้นกล้า และเวลาเฉลี่ยในการงอกกับความงอกเมื่อนับครั้งแรก (ตารางที่ 5 และ 6) ในภาพรวมแสดงการใช้ประโยชน์จากความสัมพันธ์ของความงอกเมื่อนับครั้งแรกกับความงอกมาตรฐาน และ ความแข็งแรงในรูปของความยาวยอดและรากกับน้ำหนักแห้งต้นกล้า ซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนาวิธีการทดสอบความแข็งแรงที่สามารถใช้ประเมินความงอกมาตรฐาน ศักยภาพการเจริญเติบโตในระยะต้นกล้า และความสามารถในการแตกกอกับการให้ผลผลิตของข้าวต่อไป

ตารางที่ 5 สหสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุงที่เก็บรักษาในกระสอบพลาสติกสานที่อุณหภูมิห้อง

Traits	**MC**	**SG**	**MGT**	**FCG**	**SE**	**EC**	**SL**	**RL**	**SDW**
MC	1.00								
SG	-0.26ns	1.00							
MGT	0.17ns	-0.83**	1.00						
FCG	-0.06ns	0.91**	-0.71**	1.00					
SE	-0.20ns	0.95**	-0.74**	0.90**	1.00				
EC	-0.06ns	-0.57**	0.48*	-0.78**	-0.51*	1.00			
SL	-0.26ns	0.77**	-0.81**	0.66**	0.68**	-0.56*	1.00		
RL	-0.22ns	0.80**	-0.79**	0.74**	0.74**	-0.67**	0.98**	1.00	
SDW	-0.26ns	0.78**	-0.80**	0.67**	0.71**	-0.57**	0.98**	0.98**	1.00

ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ; * = มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$); ** = มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p \leq 0.01$)

MC = ความชื้น; SG = ความงอกมาตรฐาน; MGT = เวลาเฉลี่ยในการงอก; FCG = ความงอกเมื่อนับครั้งแรก; SE = ความงอกในดิน; EC = การนำไฟฟ้า; SL = ความยาวยอด; RL = ความยาวราก; SDW = น้ำหนักแห้งต้นกล้า

ตารางที่ 6 สหสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุงที่เก็บรักษาในกระสอบพลาสติกสานในห้องเย็น

Traits	MC	SG	MGT	FCG	SE	EC	SL	RL	SDW
MC	1.00								
SG	-0.54*	1.00							
MGT	-0.12ns	0.20ns	1.00						
FCG	-0.40ns	0.64**	-0.61**	1.00					
SE	-0.23ns	0.38ns	0.27ns	0.13ns	1.00				
EC	0.05ns	-0.38ns	0.30ns	-0.56*	-0.16ns	1.00			
SL	0.52*	-0.70**	-0.28ns	-0.30ns	0.11ns	-0.12ns	1.00		
RL	0.05ns	-0.38ns	-0.29ns	-0.03ns	-0.15ns	-0.02ns	0.48*	1.00	
SDW	0.36ns	-0.63**	-0.17ns	-0.33ns	-0.01ns	-0.04ns	0.84**	0.75**	1.00

ns = ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ; * = มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$); ** = มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p \leq 0.01$)

MC = ความชื้น; SG = ความงอกมาตรฐาน; MGT = เวลาเฉลี่ยในการงอก; FCG = ความงอกเมื่อนับครั้งแรก; SE = ความงอกในดิน; EC = การนำไฟฟ้า; SL = ความยาวยอด; RL = ความยาวราก; SDW = น้ำหนักแห้งต้นกล้า

สรุป

เมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุงในกระสอบพลาสติกสาน ใส่ในกล่องโฟมที่อุณหภูมิห้อง มีความงอกมาตรฐาน 80 เปอร์เซ็นต์ หลังการเก็บรักษานาน 3 เดือน หลังจากนั้นความงอกลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่การเก็บรักษาในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 12 เดือน เมล็ดพันธุ์ยังคงมีความงอกมาตรฐานสูง 85 เปอร์เซ็นต์ และ มีความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ในรูปของความงอกในดิน ความยาวยอด ความยาวราก และน้ำหนักแห้งต้นกล้าดีเช่นเดียวกันกับเมล็ดพันธุ์ก่อนการเก็บรักษา

ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพเมล็ดพันธุ์ต่างๆ ของเมล็ดพันธุ์ข้าวพันธุ์สังข์หยดพัทลุงที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง และห้องเย็น พบว่าความงอกมาตรฐานมีความสัมพันธ์สูงกับความงอกเมื่อนับครั้งแรก (r=0.91** และ r=0.64** ตามลำดับ) และน้ำหนักแห้งต้นกล้ามีความสัมพันธ์สูงกับความยาวยอด (r=0.98** และ r=0.84** ตามลำดับ) และความยาวราก (r=0.98** และ r=0.75** ตามลำดับ)

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ขอขอบคุณ สาขาวิชานวัตกรรมการเกษตรและการจัดการ คณะทรัพยากรธรรมชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการเมล็ดพันธุ์พืชในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Agricultural Research Development Agency. 2017. **Rice Production Model Development with Farmer Participation.** Published documents, Agricultural Research Development Agency, Bangkok. (in Thai)

Aguiar, R.W.S., Brito, D.R., Lopes, M.M., Santos, G.R., Sousa, C.M., Silva, E.M.M. and Didonet, J. 2015. Physiological and enzymatic changes in rice seeds stored at low temperatures. **African Journal of Biotechnology** 14(31): 2434-2441.

AOSA. 2002. **Seed Vigor Testing Handbook.** The Association of Official Seed Analysts, Washington.

Bewley, J.D. and Black, M. 1994. **Seeds: Physiology of Development and Germination.** 2nd ed. Plenum Press, New York.

Chambo, E.D., Oliveira, N.T.E., Garcia, R.C., Ruvolo -Takasusuki, M.C.C. and Toledo, V.A.A. 2017. Phenotypic correlation and path analysis in sunflower genotypes and pollination influence on estimates. **Open Biological Sciences Journal** 3: 9-15.

Chanprasert, W. 1999. **Agronomy Seed Technology.** Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)

Department of Agricultural Extension. 2019a. **Rice production situation in 2018/2019.** Agricultural Production. Available Source: http://www.agriinfo.doae.go.th/year62/plant/rortor/rice/p1.pdf, October 11, 2020. (in Thai)

Department of Agricultural Extension. 2019b. **Sangyod Phatthalung: planting year 2018/2019.** Agricultural Production. Available Source: http://www.agriinfo.doae.go.th/year62/plant/rortor/rice/rice1/r2.pdf, October 11, 2020. (in Thai)

Diregphok, W. 2013. Seed Quality of Rice Storage under Hermetic Low-Pressure, Fumigation, Temperature and Humidity Control Conditions. Master of Science Thesis, Kasetsart University. (in Thai)

Duangpatra, J. 1986. **Seed Technology.** 2nd ed. Agri Book Group, Bangkok. (in Thai)

Edje, O.T. 1970. Physiological and Biochemical Changes and Field Performance of Deteriorated Soybean Seeds. Doctor of Philosophy in Botany Thesis, Iowa State University.

Fuller, M.P., Hamza, J.H., Rihan, H.Z. and Al-Issawi, M. 2012. Germination of primed seed under NaCl stress in wheat. **International Scholarly Research Network Botany** 12: 1-5.

Guenha, R., Salvador, B.V., Rickman, J., Goulao, L.F., Muocha, I.M. and Carvalho, M.O. 2014. Hermetic storage with plastic sealing to reduce insect infestation and secure paddy seed quality: A powerful strategy for rice farmers in Mozambique. **Journal of Stored Products Research** 59: 275-281.

Harsha, A., Rajeswari, B., Krishnaveni, D. and Keshavulu, K. 2017. Effect of seed treatments and storage containers on seed quality parameters of popular rice (*Oryza sativa* L.) cultivar. **South Asian Journal of Food Technology and Environment** 3(1): 502-506.

ISTA. 2019. **International Rules for Seed Testing.** International Seed Testing Association, Bassersdorf.

Kalhori, N., Nulit, R., Azizi, P., Abiri, R. and Atabki, N. 2018. Hydro priming stimulates seedling growth and establishment of Malaysian indica rice (MR219) under drought stress. **Acta Scientific Agriculture** 2(11): 9-16.

Katta, Y.M., Kamara, M.M., El-Aty, M.S.A., Elgamal, W.H., Soleiman, R.M., Mousa, K.M. and Ueno, T. 2019. Effect of storage temperature on storage efficacy, germination and physical characters of some paddy rice cultivars during different storage periods. **Journal-Faculty of Agriculture Kyushu University** 64(1): 61-69.

Kaymak, H.C. 2012. The relationships between seed fatty acids profile and seed germination in cucurbit species. **Zemdirbyste** 99(3): 299-304.

Matera, T.C., Pereira, L.C., Braccini, A.L., Krzyzanowski, F.C., Scapim, C.A., Piana, S.C., Marteli, D.C.V., Pereira, R.C., Ferri, G.C. and Suzukawa, A.K. 2019. Accelerated aging test and its relationship to physiological potential of soybean seeds. **Journal of Seed Science** 41(3): 301-308.

Ministry of Agriculture and Cooperatives. 2013. **Standards for quality and storage methods for controlled seed.** Notification of Ministry of Agriculture and Cooperatives. Available Source: http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2556/E/058/26.PDF, October 11, 2020. (in Thai)

Mohsen, J. and Naser, S. 2015. Effect of pre-sowing seed treatments with silicon nanoparticles on germinability of sunflower (*Helianthus Annuus*). **Botanica Lithuanica** 21(1): 13-21.

Mutinda, Y.A., Muthomi, J.W., Kimani, J.M., Cheminigw'wa, G.N. and Olubayo, F.M. 2017. Viability and dormancy of rice seeds after storage and pre-treatment with dry heat and chemical agents. **Journal of Agricultural Science** 9(7): 175-185.

Negi, S., Kumar, V. and Panwar, A. 2019. Correlation studies on seed quality traits in diverse genotypes of finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn). **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences** 8(9): 737-744.

Office of Agricultural Economics. 2019. **Agricultural land use of each province in 2018.** Agricultural Production Information. Available Source: http://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/socio/LandUtilization2561.pdf, October 11, 2020. (in Thai)

Panwar, A., Mishra, A.C. and Negi, S. 2018. Correlation studies on seed quality, pod and seed yield in germplasm of pea (*Pisum sativum* L.). **International Journal of Bio-Resource and Stress Management** 9(1): 98-102.

Rice Department. 2020. **Seeding rate.** Rice Knowledge Bank. Available Source: http://www.ricethailand.go.th/rkb3 / title-index.php-file=content.php&id=46-2.htm, October 10, 2020. (in Thai)

Rice Product Development Division. 2016. **Best rice from the south of Thailand.** Sangyod Phatthalung Rice. Available Source: http://brpd.ricethailand.go.th/index.php/standard-rice/88-sangyod, December 8, 2020. (in Thai)

Romkaew, J., Teingtham, K., Diregphok, W. and Chayaprasert, W. 2018. Effect of hermetic low-pressure storage condition on rice seed quality and storage insects. **Khon Kaen Agriculture Journal** 46(1): 93-104. (in Thai)

Santipracha, W. 1997. **Seed Technology.** Department of Plant Science, Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Songkhla. (in Thai)

Santipracha, W. 2007. **Seed Technology Laboratory Manual.** Department of Plant Science, Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Songkhla. (in Thai)

Santipracha, W. and Santipracha, Q. 1998. **Seed Accelerated Aging Technique for the Humid Tropics.** Department of Plant Science, Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Songkhla. (in Thai)

Santos, M.A.D., Oliveira, I.C., Nogueira, G.A., Silva, J.B., Candido, A.C.S. and Alves, C.Z. 2019. Test of exudate pH in rice seeds. **Revista Caatinga** 32(4): 960-965.

Scariot, M.A., Tiburski, G., Junior, F.W.R., Radunz, L.L. and Meneguzzo, M.R.R. 2017. Moisture content at harvest and drying temperature on bean seed quality. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 47(1): 93-101.

Songkrairat, M. and Prasertsak, A. 2015. Seed accelerated aging of rice for longevity evaluation in the humid tropic, pp. 312-319. *In* **Proceedings of the 12th National Seed Conference 2015.** Rajamangala University of Technology Lanna, Lampang. (in Thai)

Soonsuwon, W. 2015. **Using R program for data analysis.** Department of Plant Science, Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Songkhla. (in Thai)

Szemruch, C., Longo, O.D., Ferrari, L., Renteria, S., Murcia, M., Cantamutto, M. and Rondanini, D. 2015. Ranges of vigor based on the electrical conductivity test in dehulled sunflower seeds. **Research Journal of Seed Science** 8(1): 12-21.

Wang, M.L., Xin, Z., Burow, G., Chen, J., Vankus, P., Pinnow, D., Tonnis, B., Cuevas, H. and Yu, J. 2017. Evaluation of sweet sorghum accessions for seedling cold tolerance using both lab and field cold germination test. **Journal of Agricultural Science and Botany** 1(1): 4-11.

Weerapat, P. 2012. **Basic Knowledge of Rice.** Rice Department, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)

Zhang, A., Liu, C., Chen, G., Hong, K., Gao, Y., Tian, P., Peng, Y., Zhang, B., Ruan, B., Jiang, H., Guo, L., Qian, Q. and Gao, Z. 2017. Genetic analysis for rice seedling vigor and fine mapping of a major QTL *qSSL1b* for seedling shoot length. **Breeding Science** 67(3): 307-315.

การออกแบบและจำลองสายอากาศยากิ-อูดะแถวลำดับแบบสลับลำคลื่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครือข่าย LoRa

Design and Simulation of Yagi-Uda Switched Beam Array Antenna to Enhance the Efficiency of LoRa Networks

ธนพงศ์ คุ้มญาติ[1*] พงษ์นรินทร์ ศรีพลอย[2] และ พีระพงษ์ อุฑารสกุล[3]

Tanapong Khumyat[1*], Pongnarin Sriploy[2] and Peerapong Uthansakul[3]

Received: 19 August 2020, Revised: 7 November 2020, Accepted: 19 July 2021

บทคัดย่อ

"LoRa คือ เครือข่ายสื่อสารแบบกว้างที่ใช้พลังงานต่ำ หรือเรียกว่า เครือข่าย LPWAN (Low power wide area network)" ซึ่งมีความสำคัญกับเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง ส่งข้อมูลด้วยอัตราข้อมูลต่ำ และใช้พลังงานต่ำในการส่งสัญญาณระยะทางไกล ในพื้นที่ที่สัญญาณอินเทอร์เน็ต หรือเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ไม่ครอบคลุม ดังนั้นการขยายพื้นที่ครอบคลุมโดยการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศจึงมีความสำคัญ งานวิจัยนี้ได้เสนอการออกแบบและจำลองสายอากาศยากิ-อูดะแถวลำดับแบบสลับลำคลื่นที่ความถี่ 920 MHz เพื่อเพิ่มอัตราขยายสายอากาศให้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศ LoRa แบบทั่วไป หลักการออกแบบ และจำลองสายอากาศได้อธิบายไว้เป็นขั้นตอนตามหลักการในทางปฏิบัติ ผลคือ เมื่อเพิ่มจำนวนอิลิเมนท์ของสายอากาศยากิ-อูดะ และจัดรูปแบบสายอากาศยากิ-อูดะแบบแถวลำดับทำให้ได้อัตราขยายสายอากาศเพิ่มขึ้น และได้ระยะทางการส่งสัญญาณที่ไกลมากขึ้นบนเครือข่าย LoRa ในขณะเดียวกันการปรับทิศทางของลำคลื่นสามารถทำได้โดยการปรับเฟสของสัญญาณ

คำสำคัญ: เครือข่าย LoRa, สายอากาศยากิ-อูดะ, สายอากาศแถวลำดับแบบสลับลำคลื่น

---

[1] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

[1] Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Muang, Tak 63000, Thailand.

[2] คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

[2] Faculty of Industrial Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

[3] สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

[3] Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

[*] ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): k_tnp@hotmail.com Tel: 09 3347 0181

ABSTRACT

LoRa is a type of Low Power Wide Area Networks (LPWANs) using low energy, which is important for internet of things technology that transfers data with low data rate and uses low energy for long distance transmission in the area without the use of internet signals or mobile phone networks. Thus, expanding of an area coverage by increasing antenna gain is significant. This research proposes the design and simulation of Yagi-Uda switched beam array antenna in the 920 MHz frequency band in order to enhance antenna gain compared to general LoRa antennas. Criteria of antenna design and simulation are orderly described according to the practical principle. As shown in the results, when increasing the number of elements in Yagi-Uda antenna and arranging Yagi-Uda antennas in the array form, the antenna gain can be increased and the longer distance transmission on the LoRa networks can be achieved. Meanwhile, beam steering can be performed by adjusting phases of signals.

Key words: LoRa networks, Yagi-Uda antenna, switched beam array antenna

บทนำ

พื้นที่สำหรับทำเกษตรกรรมส่วนใหญ่ของประเทศ มักอยู่บนพื้นที่ห่างไกล ไม่สามารถติดต่อสื่อสารข้อมูลที่มีความจำเป็นในชีวิตประจำวัน ข้อมูลทางด้านการเกษตร การเตือนภัย หรือสถานการณ์ต่างๆ รอบตัว เนื่องจาก ไม่มีสัญญาณจากเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือสัญญาณอินเทอร์เน็ต เทคโนโลยี LoRa คือโปรโตคอลการสื่อสารไร้สายที่ถูกพัฒนาและออกแบบมาเพื่อการสื่อสารระยะไกล (Long-range) และใช้พลังงานต่ำ จึงสามารถใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการชาร์จประจุกับแบตเตอรี่ได้ เหมาะสมกับการใช้ในพื้นที่ๆ ไม่มีไฟฟ้า และเหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่ห่างไกล LoRa เป็นเทคโนโลยีที่สำคัญกับเครือข่ายเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (IoT) ที่เชื่อมต่อกับเซนเซอร์จำนวนมาก มีการรายงานข้อมูลที่มีอัตราข้อมูลความเร็วต่ำตลอดเวลา ข้อมูลที่ได้มาจากโนด หรือเซนเซอร์จะถูกส่งผ่านเกตเวย์ ไปยังเซิร์ฟเวอร์ที่เชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยเครือข่าย LoRa แบ่งออกเป็น 3 คลาสที่มีลักษณะการใช้งานแตกต่างกัน (Ron *et al*., 2020) โดยที่คลาสเอ มีโนดหรือเซนเซอร์ที่อยู่ในโหมดสลีปหลังจากส่งข้อมูล และจะรับสัญญาณตามช่วงเวลาที่กำหนดเท่านั้น ทำให้ประหยัดพลังงาน เหมาะสมกับโนดที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และการส่งสัญญาณเตือนภัยต่างๆ ส่วนคลาสบี ทางสถานีเกตเวย์สามารถกำหนดช่วงเวลาส่งได้ และสามารถส่งข้อมูลไปยังหลายโนดพร้อมกัน เหมาะสมกับงานที่ต้องการส่งข้อมูลจากโนดแบบสม่ำเสมอ เช่น พื้นที่ทำการเกษตร หรือทำงานวิจัยภาคสนาม และคลาสซี ทางสถานีเกตเวย์และโนดสามารถสื่อสารข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง แต่ใช้พลังงานสูง จึงเหมาะกับพื้นที่ที่มีไฟฟ้าใช้ ข้อดีอีกประการของเครือข่าย LoRa คือมีความไวของภาครับสัญญาณสูงกว่าระบบสื่อสารชนิดอื่นทำให้ส่งสัญญาณได้ระยะทางไกล (Zhou *et al*., 2019) เครือข่ายชนิดนี้เหมาะสำหรับเทคโนโลยีด้านอื่นๆ อีก เช่น สมาร์ทซิตี้ การบริการข้อมูลทางสุขภาพ การทำสมาร์ทฟาร์ม เป็นต้น การใช้ในพื้นที่เมือง มีประโยชน์หลายด้าน เช่น ข้อมูลมิเตอร์ไฟฟ้า ระบบรักษาความปลอดภัย ระบบจอดรถ การติดตามวัตถุ การจัดการของเสีย

เป็นต้น (Toma and Gemein, 2018) เทคโนโลยี LoRa มีหลายโมดูลให้เลือกใช้ขึ้นอยู่กับพื้นที่และลักษณะการใช้งาน (Khutsoane *et al*., 2017) ข้อจำกัดสิ่งหนึ่งของระบบสื่อสารทุกชนิดคือ กำลังงาน ความไวของภาครับ ซึ่งรวมถึงระยะทางในการสื่อสารข้อมูล ซึ่งปัจจัยสำคัญคือ ชนิดของสายอากาศที่มีอัตราขยายและรูปแบบการแพร่กระจายของลำคลื่นที่แตกต่างกันไป โดยทั่วไป LoRa สื่อสารได้ทั้งระยะทางใกล้และไกลขึ้นอยู่กับโมดูลที่เลือกใช้ บางรุ่นสื่อสารได้ไกล 10-30 กิโลเมตร (Seye *et al*., 2018) โดยมีการใช้สายอากาศหลายชนิด ทั้งที่มีวางจำหน่ายทั่วไป และแบบที่พัฒนาในงานวิจัย (Mushtaq *et al*., 2020; Pham *et al*., 2017) ซึ่งมีอัตราขยายไม่สูงมากนัก อย่างไรก็ดีที่โมดูลเครื่องส่ง เครื่องรับ LoRa จะมีลายวงจร หรือคอนเน็คเตอร์สำหรับเชื่อมต่อสายอากาศจากภายนอกได้ วิธีการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศวิธีหนึ่งคือ การใช้สายอากาศแถวลำดับ (Phased array antenna) ที่ใช้สายอากาศหลายต้นนำมาวางเรียงกันเป็นเส้นตรง หรือเรียงกันทั้งแนวแถวและหลัก (Takano *et al*., 2013) โดยที่สัญญาณที่สายอากาศแต่ละต้นจะต้องมีการปรับเฟสโดยใช้อุปกรณ์เลื่อนเฟส (Phase shifter)ให้เหมาะสม เพื่อรวมสัญญาณให้มีกำลังแรงขึ้นในทิศทางที่ต้องการ สามารถเพิ่มความจุช่องสัญญาณ และลดอัตราผิดพลาดบิต (Silva *et al*., 2003) รวมถึงมีงานวิจัยที่จำลองผล และทำการทดลองการใช้สายอากาศเก่งแบบปรับตัว และการใช้สายอากาศแถวลำดับแบบสลับลำคลื่น ที่มีจำนวนสายอากาศหลายต้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และเพิ่มอัตราบิตได้ (Rehfuess and Ivanov, 2000) ซึ่งส่วนใหญ่จะทดลองกับสายอากาศแบบรอบทิศทาง ซึ่งไม่เหมาะกับการใช้งานในเครือข่าย LoRa ที่มีสถานีฐานกับลูกข่ายเป็นแบบไม่เคลื่อนที่ ซึ่งถ้าใช้สายอากาศแบบลำคลื่นแคบจะทำให้ได้ระยะส่งสัญญาณได้ไกลกว่า และคุณภาพสัญญาณที่ดีกว่า มีการทำวิจัยออกแบบสายอากาศยากิ-อูดะแถวลำดับแบบสลับลำคลื่นในหลายช่วงความถี่ สามารถเพิ่มอัตราขยายและปรับทิศทางของลำคลื่นได้ (Dao *et al*., 2016; Naeini and Fakharzadeh, 2017; Ramadan and Gabriel, 2009) จากเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาและออกแบบสายอากาศยากิ-อูดะที่มีการแผ่ลำคลื่นแคบนำมาจำลองเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบสลับลำคลื่นด้วยโปรแกรม CST Studio เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้เครือข่าย LoRa ที่ได้รับอนุญาตในประเทศไทยบนช่วงความถี่ 920-925 MHz ที่กำลังส่งไม่เกิน 4 วัตต์ และงานวิจัยนี้มีผลการทดลองการกำหนดทิศทางลำคลื่นจากการปรับความต่างเฟสระหว่างสายอากาศเพื่อพิสูจน์สมมุติฐานงานวิจัย

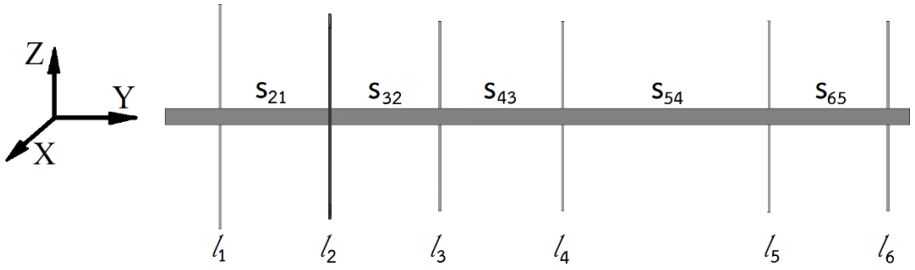
วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ ในส่วนแรกดำเนินการศึกษาหลักการออกแบบสายอากาศยากิ-อูดะ ในส่วนของการกำหนดความยาวของแต่ละอิลิเมนท์ และระยะห่างระหว่างอิลิเมนท์ ที่มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น และจำนวนของอิลิเมนท์ที่ใช้ การใช้โปรแกรม CST Studio เพื่อออกแบบและจำลองสายอากาศยากิ-อูดะเมื่อเพิ่มจำนวนอิลิเมนท์ โดยอธิบายวิธีการปรับความยาว และการปรับระยะห่างระหว่างอิลิเมนท์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ส่วนที่สอง จำลองการจัดเรียงสายอากาศยากิ-อูดะแถวลำดับแบบสลับลำคลื่น เพื่อหาประสิทธิภาพของสายอากาศที่มีรูปแบบแถวลำดับที่แตกต่างกัน ส่วนสุดท้ายคือผลการจำลอง และผลการทดลองการเบนทิศทางพูหลักของลำคลื่น เมื่อมีการปรับความต่างเฟสที่แตกต่างกันโดยมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

1. หลักการออกแบบสายอากาศยากิ-อูดะ

สายอากาศยากิ-อูดะเป็นสายอากาศที่ใช้ได้กับหลายช่วงความถี่ตั้งแต่ 3MHz - 3GHz สายอากาศ

ประกอบด้วยส่วนประกอบของไดโพลหลายชิ้น มีส่วนที่ต่อกับสายส่งโดยตรง 1 ชิ้นคือ สายอากาศโฟลเด็ดไดโพล ด้านหลังเป็นส่วนสะท้อนคลื่น และที่เหลือด้านหน้าหลายชิ้นเป็นไดเร็คเตอร์ ซึ่งมีได้ตั้งแต่ 6 - 12 ชิ้น โดยชิ้นส่วน



ภาพที่ 1 ลักษณะของสายอากาศยากิ-อูดะ 6 อิลิเมนท์

ทั้งหมดมีความยาวน้อยกว่าครึ่งคลื่น การออกแบบสามารถปรับได้ทั้งความยาว และระยะห่างของชิ้นส่วน (Balanis, 2005; Thiele, 1969) ลักษณะของสายอากาศมีลักษณะตามการอธิบายในภาพที่ 1

ตารางที่ 1 การกำหนดขนาดและระยะห่างระหว่างอิลิเมนท์ของสายอากาศยากิ-อูดะ 6 อิลิเมนท์ (Balanis, 2005)

l_1/λ	l_2/λ	l_3/λ	l_4/λ	l_5/λ	l_6/λ	s_{21}/λ	s_{32}/λ	s_{43}/λ	s_{54}/λ	s_{65}/λ	**Directivity (dB)**
0.51	0.490	0.430	0.430	0.430	0.430	0.250	0.310	0.310	0.310	0.310	10.93
0.51	0.490	0.430	0.430	0.430	0.430	0.250	0.289	0.406	0.323	0.422	12.83
0.472	0.452	0.436	0.430	0.434	0.430	0.250	0.289	0.406	0.323	0.422	13.41

มีงานวิจัยหลายเรื่องที่เสนอการออกแบบสายอากาศยากิ-อูดะ ทั้งการทดลอง และการคำนวณโดยการปรับขนาด ความยาวของอิลิเมนท์ และระยะห่างระหว่างอิลิเมนท์ เพื่อให้มีการสะท้อนน้อยที่สุด และให้มีอัตราขยายสูงสุด ในหนังสือทฤษฎีสายอากาศ (Balanis, 2005) เสนอการออกแบบสายอากาศยากิ-อูดะแบบ 6 อิลิเมนท์ โดยมีขนาดตามตารางที่ 1 โดยรูปแบบการแผ่สัญญาณของสายอากาศยากิ-อูดะ มีลักษณะตามสมการ ดังนี้

1.1 รูปแบบการแผ่สนามระยะไกลของสายอากาศยากิ-อูดะ (Far-Field Pattern)

ขนาดสนามไฟฟ้ารวมจากชิ้นส่วนสายอากาศจำนวน N ชิ้นตามฟังก์ชันของมุม α เขียนได้ดังสมการ

$$E_\alpha = \sum_{n=1}^{N} E_{\alpha n} = -j\omega A_\alpha \tag{1}$$

เมื่อ

$$A_\alpha = \sum_{n=1}^{N} A_{\alpha n}$$

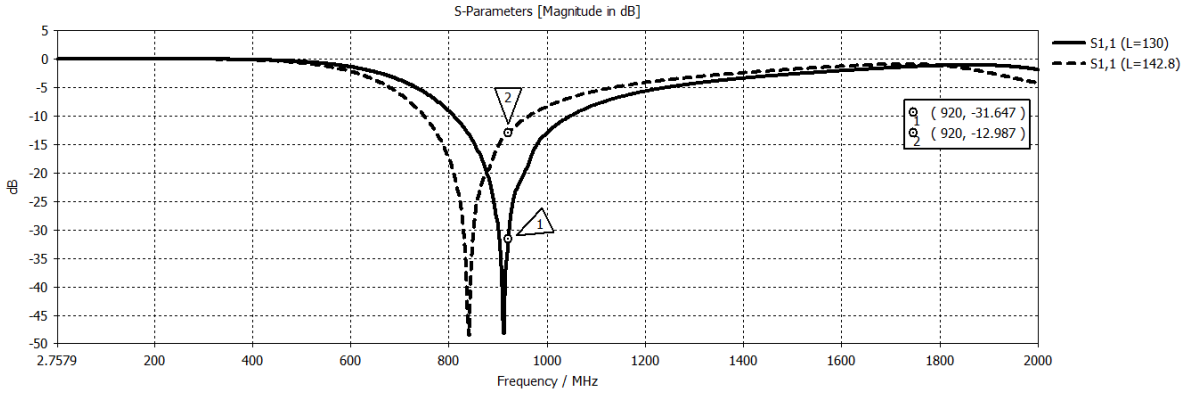
$$= -\frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} sin\alpha \sum_{n=1}^{N} \left\{ e^{jk(x_n sin\alpha cos\varphi + y_n sin\alpha sin\varphi)} \times \left[\int_{-\frac{l_n}{2}}^{+\frac{l_n}{2}} I_n e^{jkz'_n cos\alpha} dz'_n \right] \right\} \quad (2)$$

และ

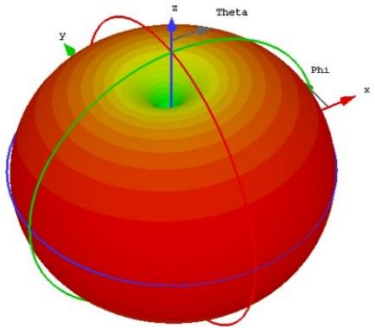
$$\int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jkz'_n cos\alpha} dz'_n = \sum_{m=1}^{M} I_{nm} \left[\frac{sin(Z^+)}{Z^+} + \frac{sin(Z^-)}{Z^-} \right] \frac{l_n}{2} \quad (3)$$

โดยที่ $Z^+ = [(2m-1)\pi/l_n + kcos\alpha]\ l_n/2$ และ $Z^- = [(2m-1)\pi/l_n - kcos\alpha]\ l_n/2$

จากภาพที่ 1 เมื่อสายอากาศตั้งบนแกน z วางที่พิกัด x_n และ y_n โดยที่ l_n คือความยาวลวดตัวนำเส้นที่ *n* ที่สนามมีการแผ่ตามมุมก้มเงยตามแกน *z* และมุมกวาดรอบรัศมีเส้นลวด เป็นมุม α และมุม φ ตามลำดับ ระยะ *r* วัดจากจุดป้อนสัญญาณไปถึงจุดสังเกตสนาม และ I_n คือกระแสไฟฟ้าบนลวดตัวนำลำดับที่ *n* และ z'_n คือตำแหน่งตามทิศทางแกน z ของเส้นลวดลำดับที่ *n* โดยที่ *M* คือจำนวนที่แบ่งส่วนย่อยในการอินทิเกรตกระแสไฟฟ้าบนอิลิเมนท์ รูปแบบการแผ่กำลังงานของสายอากาศยากิ-อูดะสามารถอธิบายได้โดยสมการที่ (1) (2) และ (3) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลการจำลองการแผ่กำลังงานของสายอากาศยากิ-อูดะที่ออกแบบด้วยโปรแกรม CST Studio เมื่อพิจารณาจากทิศทางของสนามไฟฟ้า

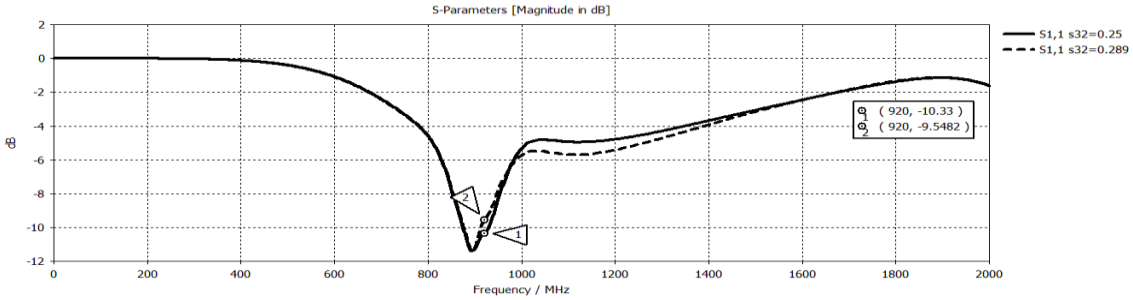


ภาพที่ 2 เปรียบเทียบค่า s_{11} ก่อนและหลังการปรับความยาวเส้นลวด

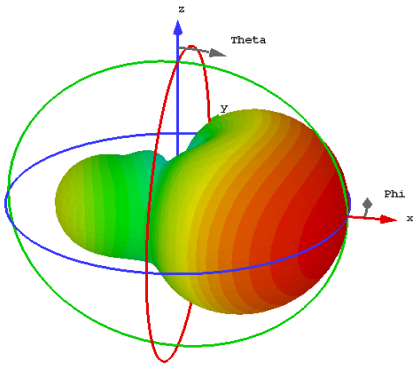


ภาพที่ 3 การแผ่กำลังงานของสายอากาศโฟลเด็ดไดโพล

ภาพที่ 4 สายอากาศโฟลเด็ดไดโพล



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบค่า s_{11} ก่อนและหลังการปรับความยาว s_{21} และ s_{32}



ภาพที่ 6 การแผ่กำลังงานของสายอากาศยากิ-อูดะ 3 อิลิเมนท์

การออกแบบสายอากาศยากิ-อูดะในหนังสือทฤษฎีสายอากาศ (Balanis, 2005) ได้ผลมาจากการทดลอง ซึ่งมีช่องสัญญาณที่แตกต่างจากการจำลองในคอมพิวเตอร์ โดยให้ผลการจำลองการสะท้อน s_{11}= -10.829 dB เมื่อใช้ขนาดต่างๆ จากการออกแบบตามตารางที่ 1 (ลำดับที่สองที่แรเงา) ซึ่งมีค่าไม่ดีพอที่จะใช้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นในบทความนี้จึงทดลองปรับความยาว และระยะห่างระหว่างอิลิเมนท์สายอากาศ ดังขั้นตอนในหัวข้อถัดไป

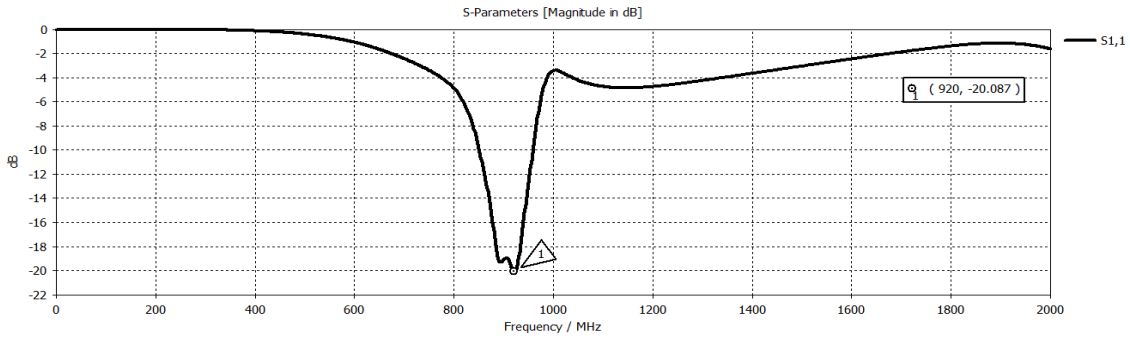
1.2 การออกแบบสายอากาศโฟลเด็ดไดโพล

สายอากาศยากิ-อูดะป้อนสัญญาณเข้าที่สายอากาศโฟลเด็ดไดโพล เพื่อเหนี่ยวนำสัญญาณไปยังไดเร็คเตอร์ที่อยู่ใกล้กัน การกำหนดความยาวของโฟลเด็ดไดโพล ใช้ความยาว $l_2/\lambda = 0.5$ ซึ่งคิดเป็นความยาว 162 มิลลิเมตร หรือ 142.8 มิลลิเมตร เมื่อหักระยะรัศมีดัดโค้งทั้งสองด้าน และความยาวคลื่นที่ 920 MHz ยาว λ = 324 มิลลิเมตร ใช้ลวดตัวนำรัศมี 0.003369λ คิดเป็น 1.0916 มิลลิเมตร ดัดโค้งเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.2 มิลลิเมตร และมีช่องว่างขนาด 3 มิลลิเมตร เพื่อใช้ป้อนสัญญาณ กำหนดอิมพีแดนซ์ 300 โอห์ม โดยสายอากาศมีลักษณะดังภาพที่ 4 เมื่อจำลองสายอากาศด้วยคอมพิวเตอร์ ค่าการสะท้อนของสัญญาณยังสูงเกินไป คือได้ค่า s_{11}= -12.987 dB ดังอธิบายในภาพที่ 2 จากนั้นทดลองปรับความยาวของสายอากาศหลายขนาด จนได้ค่าการสะท้อนของสัญญาณ ที่ค่า s_{11}= -31.647 dB ซึ่งอธิบายไว้ในภาพที่ 2 และได้ค่าอัตราขยายของสายอากาศสูงสุดที่ 2.7 dBi เมื่อสายอากาศมีความยาว 130 มิลลิเมตร เมื่อไม่รวม

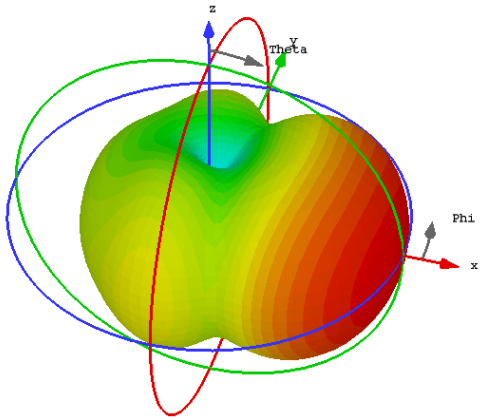
ความยาวรัศมีดัดโค้งของเส้นลวด หรือ $l_2/\lambda = 0.4605$ ดังภาพที่ 3

1.3 การออกแบบสายอากาศยากิ-อูดะ 3 อิลิเมนท์

เมื่อได้ขนาดของสายอากาศโฟลเด็ดไดโพลแล้ว นำไปจำลองกับรีเฟล็กเตอร์ที่มีขนาด $l_1/\lambda = 0.51$ และ



ภาพที่ 7 ค่า s_{11} หลังการปรับความยาว s_{43}



ภาพที่ 8 การแผ่กำลังงานของสายอากาศยากิ-อูดะ 4 อิลิเมนท์

ไดเร็คเตอร์ชิ้นแรกขนาด $l_3/\lambda = 0.43$ ตามขนาดในตารางที่ 1 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอีลิเมนท์ $s_{21}/\lambda = 0.25$ และ $s_{32}/\lambda = 0.289$ ได้ค่า s_{11} = -9.5482 dB ซึ่งมีค่าสูงเกินไป ดังนั้นจึงนั้นปรับระยะห่างระหว่างอิลิเมนท์ จนได้ค่า s_{11} ดีที่สุดที่ -10.33 dB และมีอัตราขยายสูงสุด 8.57 dBi เมื่อ $s_{21}/\lambda = 0.25$ และ $s_{32}/\lambda = 0.25$ ตามภาพที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

1.4 การออกแบบสายอากาศยากิ-อูดะ 4 อิลิเมนท์

เมื่อได้ขนาดของสายอากาศยากิ-อูดะ 3 อิลิเมนท์จากหัวข้อที่ 1.3 แล้ว นำไปจำลองร่วมกับไดเร็คเตอร์ชิ้นที่สองที่มีขนาด $l_4/\lambda = 0.43$ ตามขนาดในตารางที่ 1 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอีลิเมนท์ $s_{43}/\lambda = 0.406$ ได้ค่า s_{11} ซึ่งมีค่าสูงเกินไป ดังนั้นจึงปรับระยะห่างระหว่างอิลิเมนท์ จนได้ค่า s_{11} ดีที่สุดที่ -20.087 dB และมีอัตราขยายสูงสุด 9.18 dBi เมื่อปรับระยะ $s_{43}/\lambda = 0.28$ ตามภาพที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

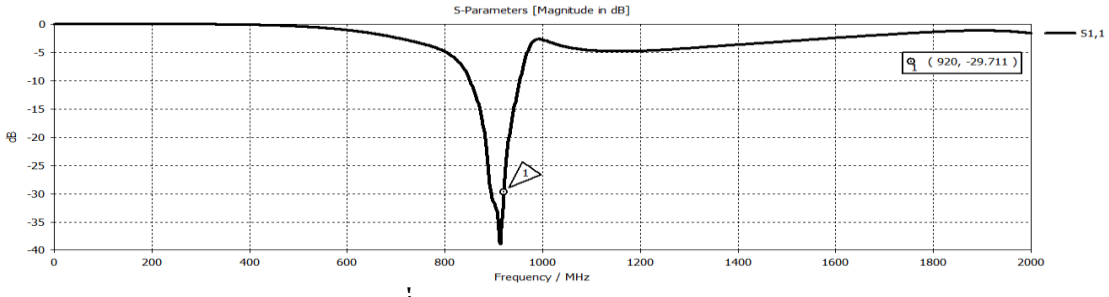
1.5 การออกแบบสายอากาศยากิ-อูดะ 5 อิลิเมนท์

เมื่อได้ขนาดของสายอากาศยากิ-อูดะ 4 อิลิเมนท์จากหัวข้อที่ 1.4 แล้ว นำไปจำลองร่วมกับไดเร็คเตอร์ชิ้นที่สามที่มีขนาด $l_5/\lambda = 0.43$ ตาม

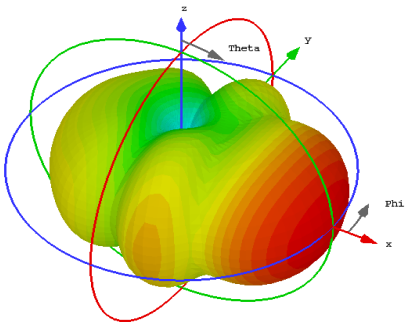
ขนาดในตารางที่ 1 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอีลิเมนท์ $s_{54}/\lambda = 0.323$ ได้ค่า s_{11} ซึ่งมีค่าสูงเกินไป ดังนั้นจึงปรับระยะห่างระหว่างอิลิเมนท์ จนได้ค่า s_{11} ดีที่สุดที่ -29.711 dB และมีอัตราขยายสูงสุด 9.85 dBi เมื่อปรับความยาวไดเร็คเตอร์ $l_5/\lambda = 0.434$ และปรับระยะ $s_{54}/\lambda = 0.47$ ดังภาพที่ 9 และ 10 ตามลำดับ

1.6 การออกแบบสายอากาศยากิ-อูดะ 6 อิลิเมนท์

เมื่อได้ขนาดของสายอากาศยากิ-อูดะ 5 อิลิเมนท์จากหัวข้อที่ 1.5 แล้ว นำไปจำลองร่วมกับไดเร็คเตอร์ชิ้นที่สี่ที่มีขนาด $l_6/\lambda = 0.43$ ตามขนาดในตารางที่ 1 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอีลิเมนท์ $s_{65}/\lambda = 0.422$ ได้ค่า s_{11} ซึ่งมีค่าสูง



ภาพที่ 9 ค่า s_{11} หลังการปรับความยาว s_{54}



ภาพที่ 10 การแผ่กำลังงานของสายอากาศยากิ-อูดะ 5 อิลิเมนท์

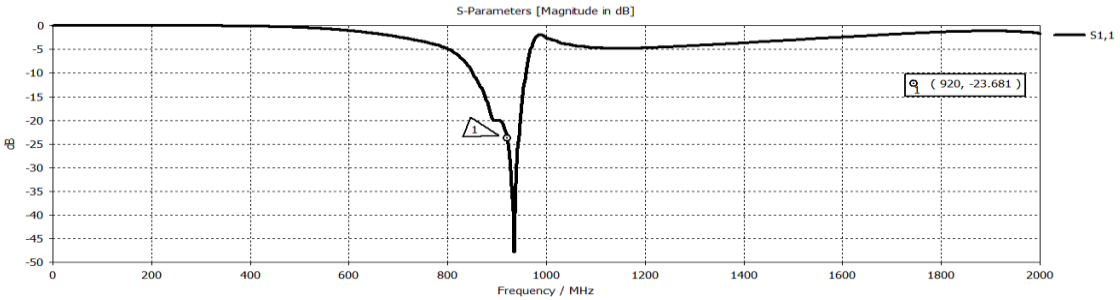
เกินไป ดังนั้นจึงปรับระยะห่างระหว่างอิลิเมนท์ จนได้ค่า s_{11} ดีที่สุดที่ -23.681 dB และมีอัตราขยายสูงสุด 11.1 dBi เมื่อปรับระยะ $s_{65}/\lambda = 0.27$ ดังภาพที่ 11 และ 12 ตามลำดับ

จากผลการออกแบบและการจำลอง พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนอิลิเมนท์ของสายอากาศยากิ-อูดะจะทำให้อัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้นดังนี้ สายอากาศยากิ-อูดะ 3 อิลิเมนท์ มีอัตราขยายสูงสุด 8.57 dBi แบบ 4 อิลิเมนท์ มีอัตราขยายสูงสุด 9.18 dBi แบบ 5 อิลิเมนท์ มีอัตราขยายสูงสุด 9.85 dBi และแบบ 6 อิลิเมนท์ มีอัตราขยายสูงสุด 11.1 dBi นั่นคือ แบบ 4 อิลิเมนท์มีอัตราขยายเพิ่มขึ้น 0.61 dB เมื่อเปรียบเทียบกับแบบ 3 อิลิเมนท์ โดยที่แบบ 5 อิลิเมนท์มีอัตราขยายเพิ่มขึ้น 0.67 dB เมื่อเปรียบเทียบกับแบบ 4 อิลิเมนท์ และแบบ 6 อิลิเมนท์มีอัตราขยายเพิ่มขึ้น 1.25 dB เมื่อเปรียบเทียบกับแบบ 5 อิลิเมนท์ สายอากาศยากิ-อูดะที่ออกแบบสามารถใช้งานได้กับเครือข่าย LoRa ภายในประเทศไทย ซึ่งได้รับอนุญาตจากกสทช. ให้ใช้ความถี่ 920-925 MHz โดยไม่ต้องขออนุญาตถ้ากำลังส่งไม่เกิน 500 มิลลิวัตต์

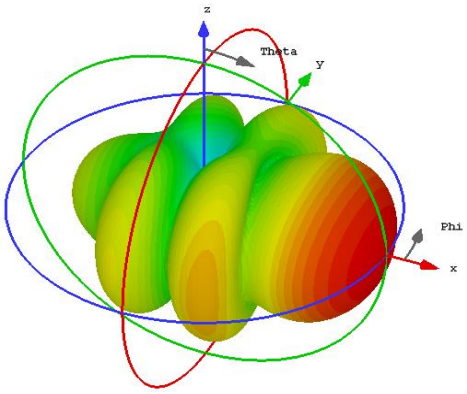
เมื่อพิจารณา ค่า s_{11} จากภาพที่ 11 สายอากาศที่ออกแบบสามารถใช้ได้ในช่วงความถี่ 890-940 MHz ที่มีค่า s_{11} ต่ำกว่า -20 dB ซึ่ง ครอบคลุมช่วงความถี่ที่ได้รับอนุญาต และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้เครือข่าย LoRa การใช้เทคนิคการสลับลำคลื่นจะสามารถเพิ่มอัตราขยาย และสามารถปรับทิศทางของลำคลื่นได้ตามต้องการ ดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

2. ระบบสายอากาศแบบสลับลำคลื่น

สายอากาศแถวลำดับคือ การนำสายอากาศหลายต้นวางเป็นรูปแบบต่างๆ ที่เหมาะสม จะทำให้สามารถเพิ่มอัตราขยายให้กับภาคส่ง และสามารถเพิ่มอัตรากำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวนได้ที่ภาครับ และการปรับเฟส

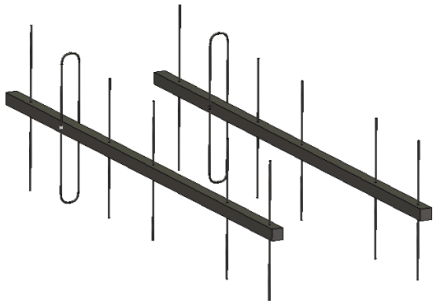


ภาพที่ 11 ค่า s_{11} หลังการปรับความยาว s_{65}



ภาพที่ 12 การแผ่กำลังงานของสายอากาศยากิ-อูดะ 6 อิลิเมนท์

สัญญาณบนสายอากาศแถวลำดับแต่ละต้น จะสามารถกำหนดทิศทางของลำคลื่นได้ โดยใช้หลักการต่อไปนี้



ภาพที่ 13 สายอากาศยากิ-อูดะแถวลำดับแบบเส้น 1x2

2.1 สายอากาศแถวลำดับ

สายอากาศแถวลำดับมีการวางตัวหลายรูปแบบ เช่น สายอากาศแถวลำดับแบบเส้น สายอากาศแถวลำดับระนาบ สายอากาศแถวลำดับแบบวงกลม การเลือกใช้งานขึ้นอยู่กับกำลังงานที่ต้องการ ลักษณะพื้นที่ใช้งาน เป็นต้น งานวิจัยนี้จำลองสายอากาศแถวลำดับแบบเส้น สายอากาศแถวลำดับระนาบ ที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานในเครือข่าย LoRa สายอากาศที่ใช้จำลองมีลักษณะตามภาพที่ 13

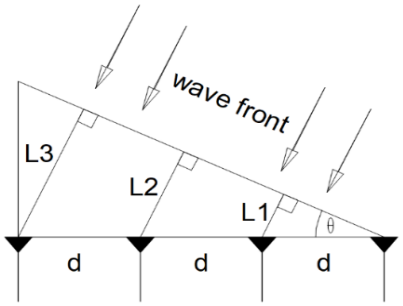
โดยพลังงานรวมของสนามไฟฟ้า E_T จากสายอากาศแถวลำดับแบบเส้น (Pongnarin, 2009) คำนวณจากความเข้มสนามไฟฟ้าของสายอากาศยากิ-อูดะ 1 ต้นที่มุมใดๆ และค่าตัวประกอบแถวลำดับแบบเส้น (AF : Array factor) ดังสมการ

$$E_T = E_\alpha \times AF \tag{4}$$

เมื่อ

$$AF = \left[\frac{sin\left(\frac{N}{2}\epsilon\right)}{\frac{\epsilon}{2}}\right] \tag{5}$$

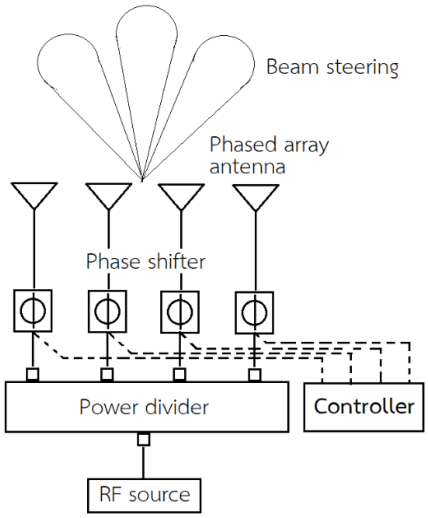
เมื่อ $\epsilon = kdcos\beta, k = 2\pi/\lambda$ และ $\beta = 90 - \theta$ (ในภาพที่ 14)



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของหน้าคลื่นและความต่างเฟสบนสายอากาศ

2.2 การควบคุมทิศทางลำคลื่นจากการปรับเฟส

ลำคลื่นที่พุ่งออก หรือพุ่งเข้า สายอากาศแถวลำดับ (Phased array antenna) จะทำมุม θ เท่ากัน เมื่อพิจารณาที่สนามระยะไกล (Far-fields) ซึ่งเป็นระยะที่สัมพันธ์กับความยาวคลื่น หรือความถี่ ดังการอธิบายในภาพที่ 14 คือ



ภาพที่ 15 การควบคุมเฟสของระบบสลับลำคลื่น

สายอากาศแถวลำดับแบบเส้น 1x4 ที่มีสายอากาศ 4 ต้น สายอากาศต้นทางขวาสุดจะมีระยะห่างจากหน้าคลื่น (Wave front) สั้นที่สุด ในขณะที่สายอากาศต้นถัดมาทางซ้ายจะมีระยะห่างยาวกว่าเป็นระยะ L1 L2 และ L3 ซึ่งจะมีผลกับการหน่วงเวลา หรือความต่างเฟสของสัญญาณบนสายอากาศแต่ละต้นในชุดแถวลำดับ ดังนั้นความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นจะคำนวณได้จาก

$$\Delta\emptyset = \frac{2\pi \mathrm{L}}{\lambda} = \frac{2\pi d sin\theta}{\lambda} \quad (6)$$

เมื่อ L คือระยะห่างระหว่างสายอากาศกับหน้าคลื่นที่แตกต่างกันระหว่างสายอากาศที่อยู่ติดกัน เมื่อ L1 = $dsin\theta$ = L2-L1 = L3-L2 โดยที่ θ คือมุมที่หน้าคลื่นทำกับระนาบสายอากาศ และ d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในงานวิจัยนี้ใช้ $d = \lambda/2$ ทำให้สายอากาศแต่ละต้นมีเฟสต่างกัน $\Delta\emptyset = \pi sin\theta$

2.3 ระบบสายอากาศแบบสลับลำคลื่น

การเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศลำดับ ใช้การกำหนดความต่างเฟสของสัญญาณบนสายอากาศแต่ละต้น โดยคำนวณจากสมการที่ 6 นำไปกำหนดค่าของตัวเลื่อนเฟส (Phase shifter) เพื่อให้เพื่อให้สัญญาณที่ออก หรือเข้าชุดสายอากาศแถวลำดับ มีกำลังรวมสูงสุดที่เกิดจากการมีเฟสตรงกันของสัญญาณแต่ละเส้นทาง ตัวเลื่อนเฟสใช้สัญญาณทางไฟฟ้าควบคุมมีสองประเภท คือ แบบสัญญาณแอนะล็อกปรับการเลื่อนเฟสโดยใช้การปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และแบบสัญญาณดิจิทัลที่ใช้การป้อนชุดบิตดิจิทัลให้อุปกรณ์เพื่อปรับเฟสสัญญาณที่เข้ามา ดังภาพที่ 15 เป็นระบบสลับลำคลื่นเมื่อการควบคุมทิศทางของลำคลื่นใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผล และควบคุมการเลื่อนเฟสของตัวเลื่อนเฟสทุกตัวอย่างเหมาะสมเพื่อให้ลำคลื่นที่รวมตัวกันมีทิศทางตามต้องการ

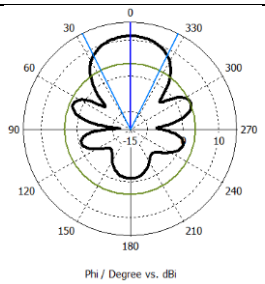
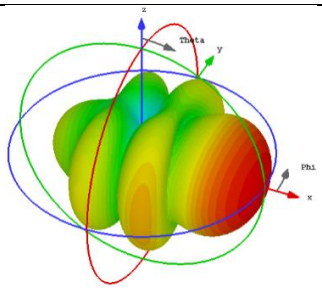
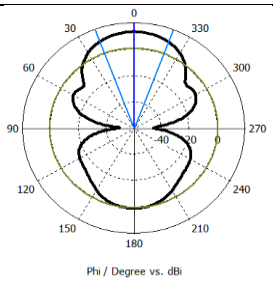
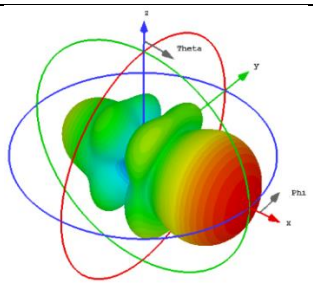
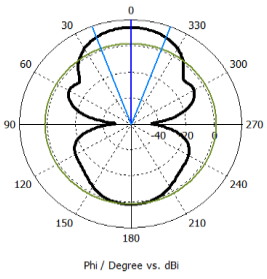
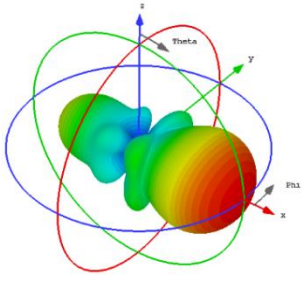
นอกจากนี้การปรับลำคลื่นอีกวิธีคือ การใช้บัทเลอร์เมทริกซ์ (Butler matrix) ซึ่งประกอบด้วยวงจรปรับเฟส ร่วมกับไฮบริดคัปเลอร์ เพื่อเลื่อนเฟสของสัญญาณที่มีหลายเส้นทางในอุปกรณ์ โดยพอร์ตขาเข้าและขาออกมีหลายพอร์ต การกำหนดทิศทางของลำคลื่น จะต้องเลือกพอร์ตขาเข้า 1 พอร์ต โดยใช้แบบแมนนวล หรือใช้พินไดโอดสวิทช์ (SPST: Single

pole single throw) ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อเลือกเส้นทางการป้อนสัญญาณเข้าพอร์ทบัทเลอร์เมทริกซ์

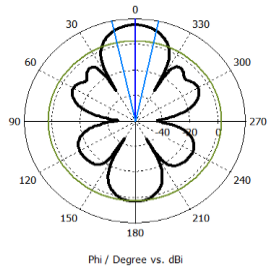
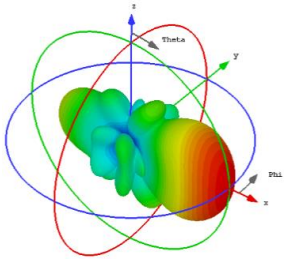
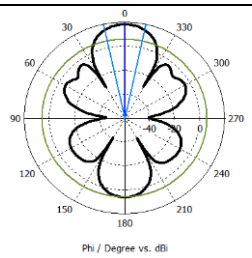
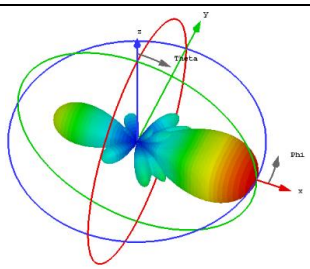
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

เมื่อนำสายอากาศยากิ-อูดะมาเรียงเป็นแถวลำดับแบบต่างๆ รูปแบบการแผ่สนามระยะไกลของสายอากาศ ก็จะเปลี่ยนแปลงไป และอัตราขยายของสายอากาศจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของสายอากาศที่เพิ่มขึ้น สัมพันธ์กับพลังงานรวมของสนามไฟฟ้าในสมการที่ 4 (Pongnarin, 2009) ในส่วนของการวิเคราะห์ด้านกำลังงาน และระยะทางการส่งสัญญาณได้อธิบายไว้ในส่วนแรก โดยใช้คุณสมบัติต่างๆ ของเครือข่าย LoRa เช่น กำลังส่ง อัตราการสูญเสียกำลังงาน และความไวของเครื่องรับ LoRa ที่ทำงานบนความถี่ 920 MHz และส่วนสุดท้ายได้กล่าวถึงผลการจำลอง และผลการทดลองปรับทิศทางพูหลักของลำคลื่น เมื่อมีการปรับความต่างเฟสของสายอากาศแถวลำดับแต่ละชุด ผลการวิจัยทั้งหมดมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 2 ลักษณะการแผ่สนามระยะไกลของสายอากาศยากิ-อูดะแถวลำดับรูปแบบต่างๆ

รูปแบบแถวลำดับ	2Ds-Farfields	3Ds-Farfields	อัตราขยาย (dBi)
1x1			11.1
1x2			13.0
2x2			14.0

ตารางที่ 2 (ต่อ)

รูปแบบแถวลำดับ	2Ds-Farfields	3Ds-Farfields	อัตราขยาย (dBi)
1x4			15.2
4x4			18.1

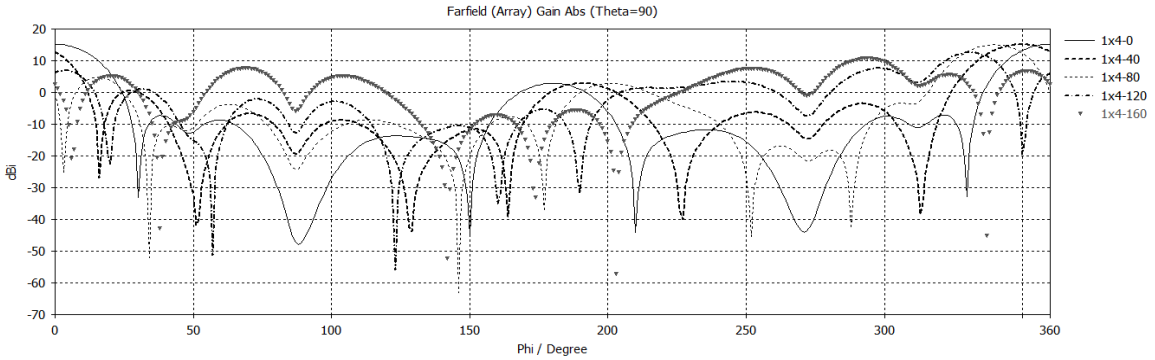
3.1 ผลการจำลอง

จากภาพที่อธิบายไว้ในตารางที่ 2 อัตราขยายของสายอากาศยากิ-อูดะแถวลำดับ รูปแบบต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน สัมพันธ์กับจำนวนของแถวลำดับ โดยรูปแบบ 1x1 มีอัตราขยาย 11.1 dBi รูปแบบ 1x2 มีอัตราขยาย 13.0 dBi รูปแบบ 2x2 มีอัตราขยาย 14.0 dBi รูปแบบ 1x4 มีอัตราขยาย 15.2 dBi และรูปแบบ 4x4 มีอัตราขยาย 18.1 dBi จึงสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนแถวลำดับ จะส่งผลให้สายอากาศมีอัตราขยายเพิ่มขึ้น และจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้สายอากาศแถวลำดับ 1x4 จะมีอัตราขยายมากกว่าแบบต้นเดี่ยว (1x1) ประมาณ 4 dB (Dao *et al*., 2016; Naeini and Fakharzadeh, 2017; Ramadan and Gabriel, 2009) เมื่อพิจารณาการคำนวณกำลังงานในตารางที่ 3 ที่มีการกำหนดกำลังส่ง อัตราขยาย การสูญเสียกำลังงานระบบที่ใช้สายอากาศแถวลำดับ 1x4 ส่งได้ไกลกว่าแบบสายอากาศต้นเดี่ยวประมาณ 34 กิโลเมตร (Seye *et al*., 2018) และจากผลการจำลองพบว่าสายอากาศยากิ-อูดะ รูปแบบแถวลำดับ 4x4 มีอัตราขยายสูงสุดที่ 18.1 dBi ซึ่งสูงกว่าแบบแถวลำดับ 1x4 เกือบ 3 dBi ทำให้สามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุด สัมพันธ์กับข้อมูลในตารางที่ 3 นอกจากนี้สายอากาศยากิ-อูดะรูปแบบแถวลำดับ 4x4 มีมุมการแผ่กำลังงานของพูหลักแคบที่สุด สามารถลดการแทรกสอดกับสถานีข้างเคียงได้ดี แต่ในทางปฏิบัติ การใช้สายอากาศหลายต้นต้องใช้พื้นที่การติดตั้งมากกว่าแบบต้นเดี่ยว เพื่อลดปัญหาการเชื่อมต่อรวมของสายอากาศ (Mutual coupling) ที่ทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง (Lui *et al*., 2009) โดยทั่วไปการวางสายอากาศแต่ละต้นห่างกัน 0.5λ แต่ไม่เกิน 1λ เพื่อลดการรบกวนระหว่างสายอากาศ ซึ่งการจำลองสายอากาศในบทความนี้ทดลองที่ความถี่ 920 MHz สายอากาศแต่ละชุดวางห่างกันไม่เกิน 32.6 เซนติเมตร ดังนั้นการเลือกใช้รูปแบบแถวลำดับของสายอากาศจำเป็นต้องพิจารณาความเหมาะสมของพื้นที่ในการติดตั้งสายอากาศด้วย

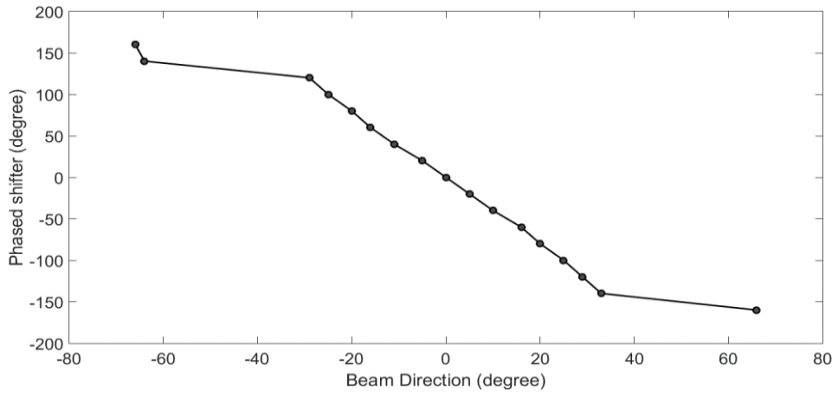
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบกำลังงาน และระยะทางการส่งสัญญาณจากภาคส่งใช้สายอากาศโฟลเด็ดไดโพล สายอากาศยากิ-อูดะแบบต้นเดี่ยว และแบบสายอากาศยากิ-อูดะแถวลำดับ โดยที่ภาครับใช้

สายอากาศแบบโฟลเด็ดไดโพล (แบบ A ในตาราง) เปรียบเทียบกับการใช้สายอากาศยากิ-อูดะต้นเดี่ยว (แบบ B ในตาราง) โดยกำหนดให้ระบบสื่อสาร LoRa ที่จำลองมีกำลังส่งเท่ากันที่ 20 มิลลิวัตต์หรือประมาณ 13 dBm มีการสูญเสียกำลังงานรวม 40 dB ที่เกิดในเครื่องส่งรวมกับเครื่องรับ ประกอบด้วย การสูญเสียกำลังในสายส่ง คอนเน็คเตอร์ จัมเปอร์ วงจรเลื่อนเฟส และอุปกรณ์แยกสัญญาณ กำหนดให้อัตราขยายสายอากาศด้านส่งมีค่าแตกต่างกันตามรูปแบบของสายอากาศ โดยที่อัตราขยายสายอากาศด้านรับคงที่ที่ 2.7 dBi และ 11.1 dBi และเครื่องรับมีความไวในการรับสัญญาณเท่ากันที่ -140 dBm ในส่วนของค่า EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) ของสายอากาศยากิ-อูดะ รูปแบบต่างๆ จะมีค่าแตกต่างกันตามอัตราขยายสายอากาศที่ไม่เท่ากัน เช่น สายอากาศยากิ-อูดะ รูปแบบแถวลำดับ 1x4 มีค่า EIRP 8.2 dBm และรูปแบบแถวลำดับ 4x4 มีค่า EIRP 11.1 dBm เมื่อกำหนดให้ภาคส่งและภาครับมีการสูญเสียกำลังงาน 20 dB เท่ากัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนสายอากาศในแถวลำดับจะทำให้ได้อัตราขยาย และระยะทางส่งสัญญาณได้มากขึ้น โดยเฉพาะถ้าเปลี่ยนสายอากาศภาครับจากสายอากาศโฟลเด็ดไดโพลไปเป็นสายอากาศยากิ-อูดะต้นเดี่ยว จะสามารถเพิ่มระยะส่งสัญญาณได้เกือบ 2 เท่า ระยะทางส่งสัญญาณในตารางที่ 3 ได้มาจากสมการต่อไปนี้

$$RSL = P_T - (92.45 + 20logf + 20logd) + G_T - L_T + G_R - L_R \quad (7)$$



ภาพที่ 16 ลักษณะการแผ่สนามระยะไกลของสายอากาศยากิ-อูดะแถวลำดับ 1x4 เมื่อปรับความต่างเฟส



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ของความต่างเฟสในสายอากาศยากิ-อูดะแถวลำดับ 1x4 และทิศทางลำคลื่น

เมื่อ RSL คือระดับสัญญาณที่เครื่องรับ, P_T คือ กำลังงานเครื่องส่ง, f คือความถี่หน่วย GHz, d คือระยะห่างระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับหน่วยกิโลเมตร, G_T และ G_R คืออัตราขยายสายอากาศด้านส่งและด้านรับ ตามลำดับ, L_T และ L_R คือการสูญเสียกำลังงานในภาคส่งและภาครับ ตามลำดับ โดยที่ภาครับมีการเผื่อระดับกำลังงานด้วยค่าเฟสมาจิน $P_{MG} = RSL - Rx$ เมื่อ Rx คือความไวของวงจรเครื่องรับ

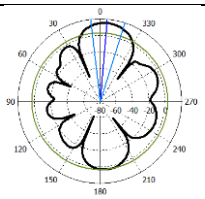
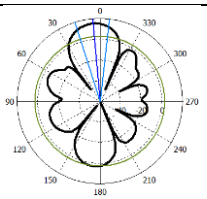
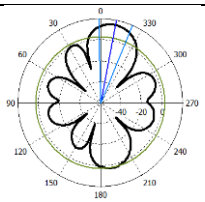
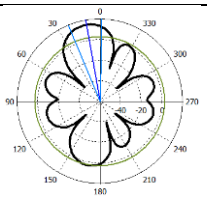
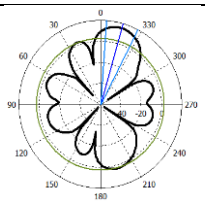
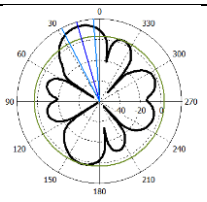
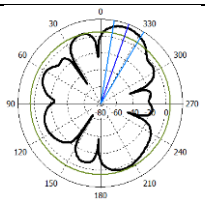
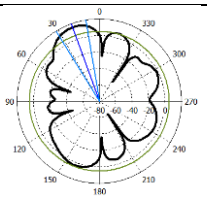
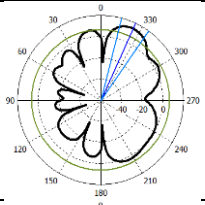
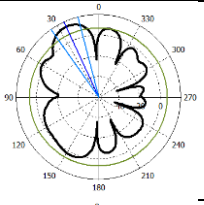
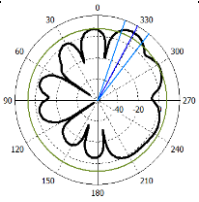
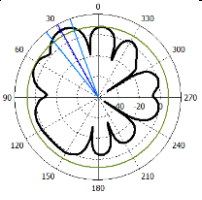
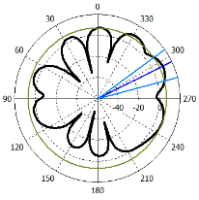
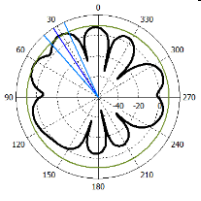
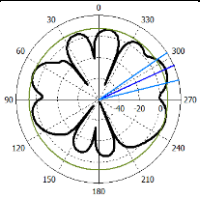
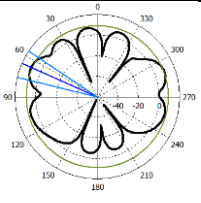
ตารางที่ 4 อธิบายลักษณะทิศทางลำคลื่นของสายอากาศยากิ-อูดะแถวลำดับ 1x4 เมื่อปรับความต่างเฟสจะเห็นได้ว่าทิศทางพูหลักของลำคลื่นค่อยๆ เบนไปทีละนิด ในช่วงความต่างเฟส 0-120 องศา และทิศทางพูหลักของลำคลื่นจะเบนไปอย่างรวดเร็ว เมื่อความต่างเฟสของสายอากาศมากกว่า 120 องศา ซึ่งสัมพันธ์กับภาพที่ 16 และ 17 เมื่อพิจารณาความต่างเฟสที่ 160 ทั้งด้านบวกและลบ จะมีทิศทางพูหลักเบนไปประมาณ 70 องศา ซึ่งในทางปฏิบัติถ้าต้องการปรับทิศทางพูหลักให้เบนมากขึ้น สามารถทำได้โดยหมุนสายอากาศไปในทิศทางที่ต้องการ เนื่องจากเมื่อปรับความต่างเฟสมากกว่า 160 องศาจะมีเปลี่ยนแปลงการเบนทิศทางพูหลักไม่มากนัก

ภาพที่ 16 อธิบายลักษณะการแผ่สนามระยะไกล เมื่อปรับเฟสแตกต่างกัน ตั้งแต่ 0 - 160 องศา จะสังเกตได้ว่าในช่วงความต่างเฟส 0 - 120 องศา มีทิศทางการแผ่สัญญาณของพูหลักไม่ต่างกันมากนัก ในขณะที่ช่วงการเลื่อนเฟส 160 องศามีทิศทางของพูหลักเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นความละเอียดในการปรับทิศทางของพูหลักจะมีช่วงที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ในภาพที่ 17 ที่อธิบายความสัมพันธ์ของความต่างเฟสในสายอากาศลำดับและทิศทางลำคลื่น

ตารางที่ 3 กำลังงานและระยะทางส่งสัญญาณ

Antenna Fc=920MHz	**Tx Power (dBm)**	**Loss in systems (dB)**	**G_T (dBi)**	**G_R (dBi)**	**Rx Sensitivity (dBm)**	**FSPL (dB)**	**Distance (km)**
Folded dipole	13	-40	2.7	2.7 (A)	-140	-118.4	21.58
Yagi-Uda			11.1			-126.8	56.77
Yagi-Uda 1x2			13.0			-128.7	70.65
Yagi-Uda 2x2			14.0			-129.7	79.27
Yagi-Uda 1x4			15.2			-130.9	91.02
Yagi-Uda 4x4			18.1			-133.8	127.09
Yagi-Uda 1x4			15.2	11.1 (B)		-139.3	239.40
Yagi-Uda 4x4			18.1	11.1 (B)		-142.2	334.29

ตารางที่ 4 ทิศทางพูหลักของสายอากาศยากิ-อูดะแถวลำดับ 1x4 เมื่อปรับความต่างเฟส

ความต่างเฟส (ΔØ)	2Ds-Farfields	ความต่างเฟส (ΔØ)	2Ds-Farfields
20		-20	
40		-40	
60		-60	
80		-80	
100		-100	
120		-120	
140		-140	
160		-160	

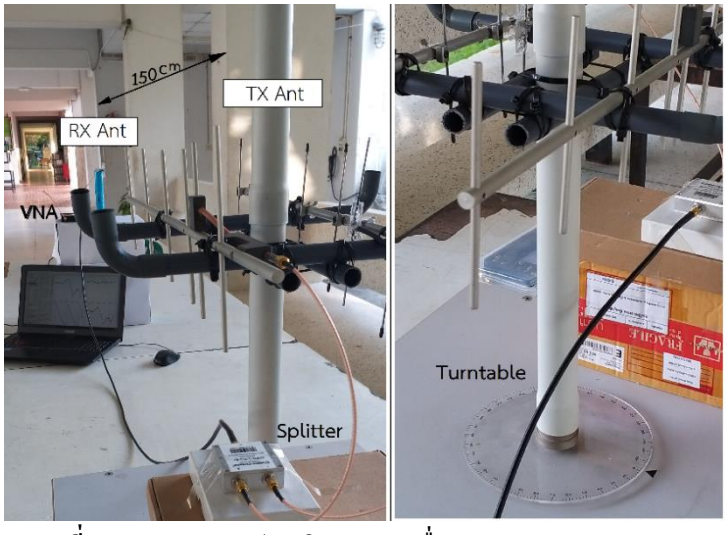
3.2 ผลการทดลองปรับทิศทางลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับ

จัดทำการทดลองที่อาคารวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ใช้เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายต่อกับสายอากาศยากิ-อูดะ 6 อิลิเมนท์แถวลำดับแบบเส้น 1x2 ส่งสัญญาณผ่านอากาศไปยังสายอากาศไดโพลห่างออกไป 150 เซนติเมตร โดยสายอากาศสูงจากพื้น 50 เซนติเมตร ตามภาพที่ 18 ใช้ตัวปรับเฟสแบบคงที่ 120 องศา ที่ความถี่ 920 MHz เครื่องวิเคราะห์เครือข่ายต่อกับตัวแยกสัญญาณของ Mini-Circuits แบบ 2 ทางรุ่น ZAPD-2-272-S+ ใช้แท่นหมุนปรับมุมกวาดของสายอากาศยากิ-อูดะ 6 อิลิเมนท์แถวลำดับแบบเส้น 1x2 วางห่างกันครึ่งคลื่น โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีไม่ใช้ตัวปรับเฟส กับกรณีใช้ตัวปรับเฟส จากการทดลองพบว่าทิศทางลำคลื่นมีความแตกต่างกันดังตารางที่ 5

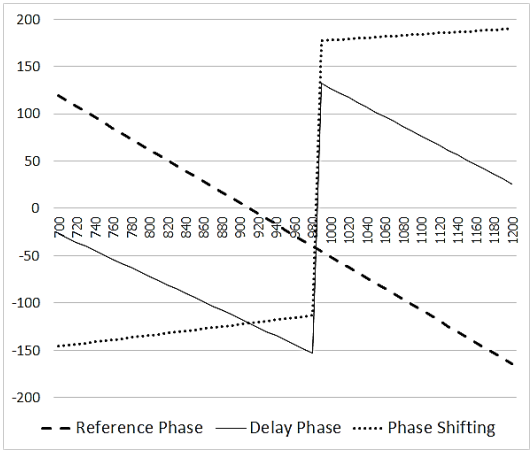
ภาพที่ 19 การวัดเฟสสัญญาณช่วงความถี่ 700-1200 MHz เมื่อเส้นกราฟ Reference phase คือ เฟสของสายจัมเปอร์ที่ต่อกับสายอากาศยากิต้นแรก เส้นกราฟ Delay phase คือ เฟสของสายจัมเปอร์ที่ต่อกับตัวเลื่อนเฟสและต่อกับสายอากาศยากิต้นที่สอง และเส้นกราฟ Phase shifting คือความต่างเฟสระหว่างสายอากาศทั้งสองต้น มีค่าประมาณ 120 องศาที่ความถี่ 920 MHz

ภาพที่ 20 ค่า S_{21} ที่วัดจากเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายที่ทำการทดลองตามภาพที่ 18 ในช่วง 700-1200 MHz

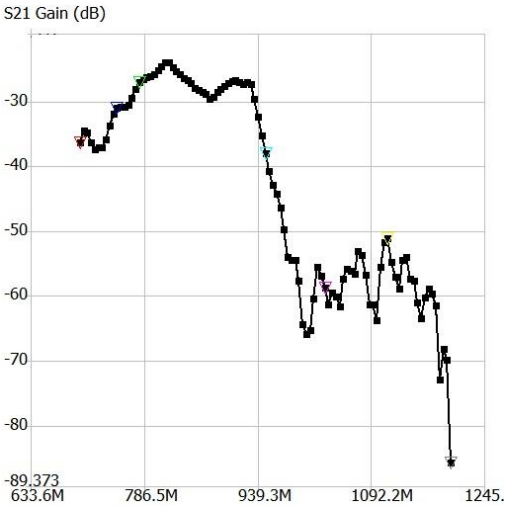
ตารางที่ 5 เมื่อปรับมุมกวาดสายอากาศบน Turntable ในภาพที่ 18 พบว่า เมื่อความต่างเฟส $\Delta\phi$=0° มีค่า S_{21} สูงสุด -27.5 dB ที่มุมกวาด 0° และเมื่อความต่างเฟส $\Delta\phi$=120° มีค่า S_{21} สูงสุด -27.7 dB ที่มุมกวาด -30° ดังนั้น เมื่อปรับความต่างเฟสระหว่างสายอากาศจะทำให้ลำคลื่นปรับทิศทางไปประมาณ -30° ซึ่งสัมพันธ์กับทฤษฎีในสมการที่ 6 ลำคลื่นปรับมุม -41.8° เมื่อความต่างเฟส $\Delta\phi$=120° จึงมีความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 28 เนื่องจากพื้นที่ทดลองบางจุดมีวัตถุสะท้อนคลื่น



ภาพที่ 18 การทดลองปรับทิศทางลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับ



ภาพที่ 19 ความต่างเฟสระหว่างสายอากาศ



ภาพที่ 20 ค่า S_{21} จากการทดลอง

ตารางที่ 5 การวัดทิศทางพูหลักเมื่อปรับเฟส

มุมกวาด (องศา)	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S_{21}: dB)	
	$\Delta\phi$=0°	$\Delta\phi$=120°
-60	-42.7	-41.3
-45	-40.0	-32.6
-30	-37.5	-27.7
-15	-34.0	-29.2
0	-27.5	-33.1
15	-28.1	-35.7
30	-28.7	-36.4
45	-33.3	-37.3
60	-43.5	-45.1

สรุป

งานวิจัยนี้อธิบายขั้นตอนการออกแบบสายอากาศยากิอูดะสำหรับนำไปจำลองใช้เป็นสายอากาศยากิ-อูดะแถวลำดับแบบสลับลำคลื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารของเครือข่าย LoRa ที่ย่าน 920 MHz มีการจำลอง และการทดลองการเบนพูหลักของลำคลื่นเมื่อมีการปรับเฟสในระบบสลับลำคลื่น พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนอิลิเมนท์ของสายอากาศยากิ-อูดะ จะทำให้อัตราขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้น และเมื่อนำไปจัดเรียงเป็นสายอากาศยากิ-อูดะแถวลำดับ จะสามารถเพิ่มอัตราขยายมากขึ้นไปอีก สามารถส่งสัญญาณได้ไกลกว่าสายอากาศแบบทั่วไปหลายกิโลเมตร นอกจากนี้เมื่อสถานีเกตเวย์ของระบบ LoRa หรือสถานีเซนเซอร์ของระบบ LoRa เปลี่ยนพิกัดตำแหน่ง จากผลการจำลองและผลการทดลอง พบว่าระบบที่นำเสนอสามารถปรับเบนทิศทางลำคลื่นได้ โดยการควบคุมความต่างเฟสระหว่างสายอากาศ

เอกสารอ้างอิง

Balanis, C.A. 2005. **Antenna Theory Analysis and Design.** John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Dao, H.N., Krairiksh, M. and Le, D.T. 2016. A design of Switched-Beam Yagi-Uda antenna for wireless sensor networks, pp. 393-396. *In* **2016 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC).** Radio Electronics Association of Vietnam (REV) and the IEEE Communications Society (IEEE ComSoc), Bangkok, Thailand.

Khutsoane, O., Isong, B. and Abu-Mahfouz, A.M. 2017. IoT devices and applications based on LoRa/ LoRaWAN, pp. 6107-6112. *In* **IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.** IEEE, Beijing, China.

Lui, H., Hui, H. and Leong, M.S. 2009. A note on the Mutual-Coupling problems in transmitting and receiving antenna arrays. **IEEE Antennas and Propagation Magazine** 51(5): 171-176.

Mushtaq, A., Gupta, S.H. and Rajawat, A. 2020. Design and performance analysis of LoRa LPWAN antenna for IoT applications, pp. 1153-1156. *In* **2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN).** IEEE, Noida, India.

Naeini, M.R. and Fakharzadeh, M. 2017. A 28 GHz Beam-Switching Yagi-Uda array using Rotman lens for 5G wireless communications, pp. 2617-2618. *In* **2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting.** San Diego, CA.

Pham, C., Ferrero, F., Diop, M., Lizzi, L., Dieng, O. and Thiare. 2017. Low-cost antenna technology for LPWAN IoT in rural applications, pp. 1-6. *In* **2017 7th IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI).** Vieste, Italy.

Pongnarin, S. 2009. Performance enhancement of GPRS systems for the mobile client using switched beam antennas. Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology. (in Thai)

Ramadan, A.A. and Gabriel, M.R. 2009. High-Gain Yagi-Uda antennas for Millimeter-Wave Switched-Beam systems. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation** 57(11): 3672-3676.

Rehfuess, U. and Ivanov, K. 2000. Estimating the gains of adaptive antenna systems for GPRS and EDGE data services in GSM networks, pp. 3026-332. *In* **2000 52nd Vehicular Technology Conference (VTC).** IEEE, Tokyo, Japan.

Ron, D., Lee, C., Lee, K., Choi, H. and Lee, J. 2020. Performance analysis and optimization of downlink transmission in LoRaWAN class B mode. **IEEE Internet of Things Journal** 7(8): 7836-7847.

Seye, M.R., Ngom, B., Gueye, B. and Diallo, M. 2018. A Study of LoRa coverage: Range evaluation and channel attenuation model, pp. 1-4. *In* **2018 1st International Conference on Smart Cities and Communities (SCCIC).** IEEE, Ouagadougou, Burkina Faso.

Silva, J.M., Roy, S. and Fortier, P. 2003. The impact on the capacity of a GSM/GPRS system using space-time processing techniques, pp. 977-980. *In* **Electrical and Computer Engineering, 2003. (CCECE 2003).** IEEE, Montreal, Quebec, Canada.

Takano, T., Saegusa, K. and Hosono, H. 2013. A Large -Scale phased array antenna its applications and key technologies, pp. 1-6. ***In*** **2013 International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP).** IEEE, Dhanbad, India.

Thiele, G.A. 1969. Analysis of Yagi-Uda-Type antennas. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation** 17(1): 24-31.

Toma, R. and Gemein, O.G. 2018. LoRa network for cities private and complete secured by design, pp. 1-5. *In* **2018 Global Internet of Things Summit (GIoTS).** IEEE, Bilbao, Spain.

Zhou, Q., Zheng, K., Hou, L., Xing, J. and Xu, R. 2019. Design and implementation of open LoRa for IoT. **IEEE Access** 7: 100649-100657.

การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะพลาสติกพอลิเอทิลีน ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

Liquid Fuel Production from Polyethylene Plastic Waste by Pyrolysis Process

โชคชัย เหมือนมาศ* และ รวมพร นิคม

Chokchai Mueanmas* and Ruamporn Nikhom

Received: 10 July 2020, Revised: 24 September 2020, Accepted: 22 June 2021

บทคัดย่อ

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกที่พบมากที่สุดในชีวิตประจำวัน โมเลกุลของพอลิเอทิลีนประกอบด้วยสายโซ่ของเอทิลีน ซึ่งเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยไฮโดรเจน 2 อะตอมที่ต่ออยู่กับแต่ละอะตอมของคาร์บอน ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงเหลวได้ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้เพื่อศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนสำหรับการผลิตน้ำมันไพโรไลซิส การทดลองเบื้องต้นได้ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 300-600°C ผลการศึกษาพบว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจะอยู่ในช่วง 385-425°C จากนั้นจึงทำการศึกษาผลของปัจจัย (อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราการให้ความร้อน) ต่อกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกพอลิเอทิลีน ซึ่งพบว่า ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาจะแปรผันตรงกับร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิส ในขณะที่ผลของอัตราการให้ความร้อนจะแปรผกผัน โดยร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสมีค่าเท่ากับ 53.36 เมื่อใช้อุณหภูมิ 405°C เป็นเวลา 150 นาที ด้วยอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 8°C/นาที ซึ่งผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้มีค่าความร้อนเท่ากับ 43,438 kJ/kg ความหนืด 2.014 cSt และ pH เท่ากับ 7.2 จากนั้นน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะทำการกลั่นเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ และแยกออกเป็นน้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำมันดีเซล ซึ่งเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ทั้งสองส่วนพบว่ามีความคล้ายคลึงกับน้ำมันเชื้อเพลิงทางการค้า ดังนั้น พลาสติกจึงเป็นวัตถุดิบที่ดีเยี่ยมสำหรับใช้ในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิง

คำสำคัญ: พอลิเอทิลีน, พลาสติก, ไพโรไลซิส, น้ำมันแก๊สโซลีน, น้ำมันดีเซล

หลักสูตรวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง เลขที่ 222 หมู่ที่ 2 ตำบลบ้านพร้าว อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง 93210

Energy Engineering Program, Faculty of Engineering, Thaksin University, Phatthalung Campus, 222 Moo 2, Baan Prao, Paphayom, Phatthalung, 93210, Thailand.

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

ABSTRACT

Polyethylene is the most common plastics found in daily life. Its molecule is nothing more than a long chain of ethylene, two hydrogen atoms attached to each carbon atom, which can be changed to liquid fuel. The pyrolysis of plastics (polyethylene) to produce the fuel oil was investigated. The preliminary experiments were carried out in the range of temperature 300 to 600^{o}C. The results showed that the suitable range of temperature for pyrolysis process of polyethylene was 385-425^{o}C. Then, the influence of the parameters (temperature, reaction time and heating rate) on the pyrolysis was studied. The results indicated that the effect of reaction time was directly proportional to the yield of pyrolysis oil while the heating rate was inversely proportional. The maximum yield of pyrolysis oil (53.36%) was achieved under the optimum experiment conditions of temperature of 405^{o}C, reaction time of 150 min and heating rate of 8^{o}C/min. The heating value, viscosity and pH of pyrolysis oil were 43,438 kJ/kg, 2.014 cSt and 7.2, respectively. After that, the pyrolysis oil was distillated to purify and was separated to gasoline and diesel oil. The chemical composition of two fractions was similar to the commercial fuel oil. Therefore, plastic is an excellent feedstock for the production of fuel oil.

Key words: polyethylene, plastic, pyrolysis, gasoline oil, diesel oil

บทนำ

ในสภาวะปัจจุบันประเทศไทยมีความจำเป็นที่จะต้องแสวงหาแหล่งพลังงานหมุนเวียนเพื่อทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งนับวันจะมีปริมาณลดน้อยลงในขณะที่ปริมาณความต้องการกลับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังส่งผลกระทบอย่างกว้างขวางทั้งต่อสิ่งมีชีวิต และสิ่งแวดล้อมต่างๆ จึงได้มีการตื่นตัวในการที่จะพัฒนาเชื้อเพลิงที่สามารถเกิดการหมุนเวียน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งหน่วยงานภาครัฐยังได้ให้การสนับสนุนเพื่อพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านการผลิตพลังงานทดแทน จึงได้มีการกำหนดไว้ในแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 ของกระทรวงพลังงาน เพื่อลดการนำเข้าของน้ำมันปิโตรเลียม อันจะนำไปสู่ความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืนทางด้านพลังงานภายในประเทศ อีกทั้งยังส่งผลต่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศในระยะยาวได้อีกด้วย

ขยะพลาสติกเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตพลังงาน เพราะขยะมีศักยภาพที่สามารถนำมาใช้เพื่อผลิตพลังงานได้ อีกทั้งยังมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ในปัจจุบันพบว่ามีการนำขยะมาผลิตเป็นพลังงานน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานทดแทนด้านอื่นๆ ซึ่งจากรายงานของกรมควบคุมมลพิษ พบว่า ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ประเทศไทยมีขยะพลาสติกเกิดขึ้นประมาณ 12% ของปริมาณขยะที่เกิดขึ้นทั้งหมด หรือประมาณปีละ 2 ล้านตัน โดยขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นมีการนำกลับไปใช้ใหม่เพียง 0.5 ล้านตัน ส่วนที่เหลือ 1.5 ล้านตันส่วนใหญ่เป็นพลาสติกที่ใช้ครั้งเดียว ซึ่งพลาสติกส่วนที่เหลือนี้ประกอบด้วย ถุงพลาสติก 1.2 ล้านตัน และ 3 แสนตันจะเป็นพลาสติกอื่นๆ เช่น แก้ว กล่อง ถาด ขวด ฝาจุก เป็นต้น (Pollution

Control Department, 2018) โดยวิธีการกำจัดส่วนใหญ่จะใช้วิธีการฝังกลบ อันจะส่งผลให้เกิดการสะสมเพิ่มขึ้นทุกปี และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบเชิงโมเลกุลของพลาสติกพบว่าสามารถนำมาแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากโมเลกุลของพลาสติกจะเป็นสายโซ่ยาวที่เป็นหน่วยซ้ำของมอนอเมอร์ (monomer) ซึ่งเมื่อสายโซ่เหล่านี้ได้รับพลังงานก็จะสามารถสลายตัวกลายเป็นโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลงซึ่งมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิง อีกทั้งกระทรวงพลังงานได้ตั้งเป้าหมายการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสเอาไว้ในปี 2579 เท่ากับ 0.53 ล้านลิตร/วันเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในภาคขนส่งจากพลังงานทดแทน โดยหากส่งเสริมให้เกิดการแปรรูปขยะพลาสติกดังกล่าวจะสามารถลดปริมาณขยะ ลดงบประมาณในการจัดการขยะ ซึ่งจะช่วยแก้ไขปัญหาขยะที่นับวันจะมีจำนวนมากขึ้น ในขณะเดียวกันก็จะช่วยลดการนำเข้าน้ำมันได้อีกทางหนึ่ง

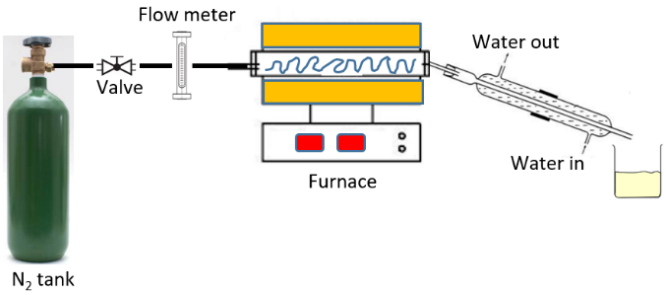
กระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนโดยการแตกพันธะทางเคมีของสารตั้งต้นในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน (Zhang *et al*., 2020) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะอยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ก็ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารตั้งต้น และสภาวะของกระบวนการที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา Tulashie *et al.* (2019) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกผสมหลายชนิดด้วยท่อปฏิกรณ์แบบ fixed bed ที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 40 นาที โดยในช่วงเริ่มต้นของการศึกษาจะใช้ N_2 ไหลผ่านท่อปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 200 mL/min เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดออกซิเจนออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นโมเลกุลที่อยู่ในช่วงน้ำมันดีเซล (C_{12} - C_{24}) Thahir *et al*. (2019) ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากขยะพลาสติกชนิด polypropylene ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบ fixed bed ในสภาวะสุญญากาศ (-3 mm H_2O) ที่อุณหภูมิ 580°C จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของ gasoline และ kerosene นอกจากนี้ Zattini *et al*. (2017) ได้ทำการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของ low-density polyethylene ที่อุณหภูมิ 450 - 600°C ผลการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำจะมีอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันต่อขี้ผึ้ง (wax) สูง และผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สจะประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนโมเลกุลของคาร์บอนตั้งแต่ 3 โมเลกุลขึ้นไป ที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์จะเป็นแก๊สมากกว่าของเหลว ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สมีเทนและไฮโดรเจน โดยน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้ Kalargaris *et al*. (2017) ได้นำมาผสมกับน้ำมันดีเซลและทำการทดสอบในเครื่องยนต์ดีเซลแล้วพบว่า การทำงานของเครื่องยนต์ที่ภาระสูง (high load) มีประสิทธิภาพเหมือนกับการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ในขณะที่เมื่อภาระของเครื่องยนต์ต่ำ (lower load) จะมีความล่าช้าในการจุดระเบิด ซึ่งเป็นผลมาจากความคงตัวของเชื้อเพลิง อีกทั้งประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค (Brake Thermal Efficiency) จะต่ำกว่าเชื้อเพลิงดีเซลเล็กน้อย ในขณะที่ปริมาณ NO_x ที่ปล่อยออกมาจะมีค่าสูงกว่า นอกจากนี้ Khairil *et al*. (2020) ได้นำน้ำมันไพโรไลซิสมาผสมกับน้ำมันแก๊สโซลีนเพื่อใช้ในการทดสอบกับเครื่องยนต์ที่มีการจุดระเบิดด้วยประกายไฟ (spark ignition) ผลการศึกษาพบว่า กำลังเบรก (Brake Power) และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค (Brake Specific Fuel Consumption) มีค่าเท่ากับ 4.1 kW และ 0.309 kg/kW h ตามลำดับ และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันแก๊สโซลีนเพียงอย่างเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำมันไพโรไลซิสสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล และเครื่องยนต์แก๊สโซลีนได้โดยไม่ต้องปรับแต่งหรือดัดแปลงเครื่องยนต์ แต่อย่างไรก็ตาม

น้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้จะมีการผสมกันของโมเลกุลเล็กและโมเลกุลใหญ่ในช่วงกว้าง หากนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์เป็นระยะเวลานานจะส่งผลเสียต่อเครื่องยนต์ได้ จึงจำเป็นต้องมีการกลั่นแยกเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ และปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันไพโรไลซิสก่อนที่จะนำไปใช้ในเครื่องยนต์เพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล จากการทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกพบว่ามีศักยภาพ และประสิทธิภาพในการผลิตเป็นพลังงานทดแทน ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกพอลิเอทิลีน และศึกษาการกลั่นแยกน้ำมันแก๊สโซลีน และน้ำมันดีเซลจากน้ำมันไพโรไลซิสเพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบ และเพิ่มความบริสุทธิ์สำหรับนำไปใช้ในเครื่องยนต์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ปฏิกิริยาไพโรไลซิสของพอลิเอทิลีน

พลาสติกพอลิเอทิลีนที่ใช้ในการศึกษาเป็นถุงพลาสติกที่ใช้ในการบรรจุเสื้อผ้าของผู้ป่วยที่ผ่านการซักรีดแล้ว ซึ่งรวบรวมได้จากแผนกห้องผ้าส่วนกลางของโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา โดยกระบวนการไพโรไลซิสจะใช้พลาสติกพอลิเอทิลีน 150 กรัมบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบงวด (Batch) ชนิด Horizontal tubular reactor ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 5 เซนติเมตร และยาว 50 เซนติเมตร (ดังแสดงในภาพที่ 1) โดยการให้ความร้อนด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงเพื่อควบคุมอุณหภูมิตามที่กำหนด และทำการกำจัดออกซิเจนออกจากระบบโดยใช้ Nitrogen ไหลผ่านด้วยอัตราการไหล 500 มิลลิลิตร ต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นดำเนินการทดลองโดยกำหนดอุณหภูมิ (385 393 405 417 และ 425 ^{o}C) เวลา (30 60 105 150 และ 180 นาที) และอัตราการให้ความร้อน (5 8 13 17 และ 20^{o}C/min) ตามที่กำหนด ไอระเหยที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกส่งผ่านไปยัง condenser เพื่อควบแน่นให้กลายเป็นของเหลวด้วยน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 10 ^{o}C เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ ทำการชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ และคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวตามสมการที่ (1) จากนั้นวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph-Flame Ionization Detector (GC-FID) เพื่อหาสัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบ โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ แก๊สโซลีน (ผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคาร์บอนในช่วง C_7 - C_{11}) ดีเซล (ผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคาร์บอนในช่วง C_{12} - C_{24}) และผลิตภัณฑ์ที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่ (ผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า C_{24})



ภาพที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกพอลิเอทิลีน

$$\text{ร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิส} = \frac{\text{มวลของผลิตภัณฑ์เหลว}}{\text{มวลของพลาสติก}} \times 100 \quad (1)$$

2. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วย GC-FID

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส จะทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง GC-FID โดยใช้คอลัมน์ชนิด Stationary phase DB-5MS (HP-5) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร และความหนาของฟิล์ม 0.25 ไมโครเมตร ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์จะทำการควบคุมอุณหภูมิของ Inlet และ Detector ไว้ที่ 290°C และ 310°C ตามลำดับ และ Oven จะทำการควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50°C และคงที่ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 10°C ต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 270°C และ คงที่ที่อุณหภูมิ 270°C เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 20°C ต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 310°C และคงที่ที่อุณหภูมิ 310 °C เป็นเวลา 5 นาที ด้วยอัตราการไหลของ He H_2 N_2 และ Air เท่ากับ 1.0 30 25 และ 300 mL/min ตามลำดับ ด้วย split ratio เท่ากับ 50:1

3. การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เมื่อนำมาเขียนกราฟจะได้ TGA thermogram ที่อธิบายถึงความสามารถในการทนทานต่อความร้อนของวัสดุ และจะสามารถใช้ในการอธิบายกลไกการเกิดการสลายตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำอนุพันธ์ของเทคนิค TGA ที่เรียกว่า Derivative Thermogravimetry (DTG) ซึ่งสามารถทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน ซึ่งการวิเคราะห์ TGA จะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analysis, TGA8000, Perkin Elmer, USA ในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 1000 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5.0 °C/min ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

4. การกลั่นแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

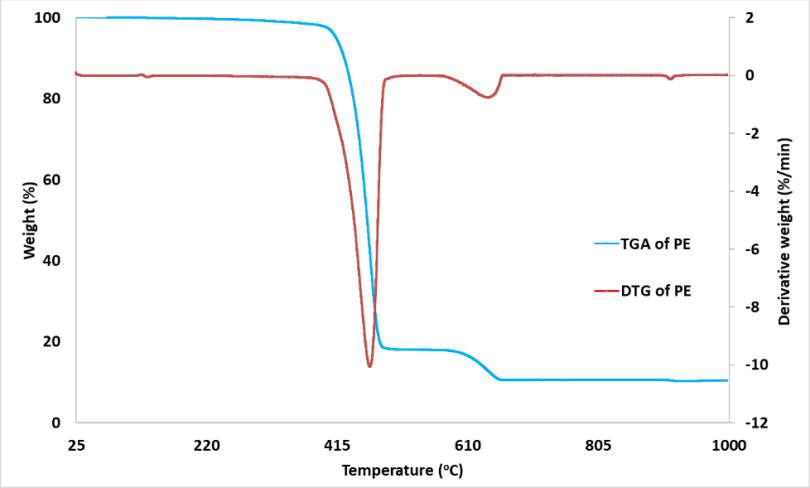
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโลไรซิส จะทำการกลั่นแยกเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ด้วยชุดกลั่นลำดับส่วนชนิดยาว (Fractionating Distillation) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะทำการกลั่นแยกออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกจะทำการกลั่นแยกที่อุณหภูมิไม่เกิน 200°C ซึ่งเป็นช่วงของแก๊สโซลีน และช่วงที่สองจะทำการกลั่นแยกที่อุณหภูมิในช่วง 200-300°C ซึ่งเป็นช่วงของดีเซล จากนั้นจะทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่กลั่นแยกได้ด้วยเทคนิค GC-FID

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) ของพอลิเอทิลีน

การศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเอทิลีน ทำได้โดยใช้การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นดังแสดงในภาพที่ 2 พบว่า พอลิเอทิลีนมีการเปลี่ยนแปลง 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 370-500°C มีเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนัก เท่ากับ 80.3% ซึ่งเป็นส่วนของพอลิเอทิลีนที่เกิดการระเหยตัวกลายเป็นไอ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Shan-jun *et al*. (2013) ขั้นตอนที่สองมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 580-670°C มีเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนัก เท่ากับ

7.3% ซึ่งเป็นการสูญเสียที่เกิดจากการสลายตัวของ char ที่เกิดขึ้นจากการที่พอลิเอทิลีนได้รับความร้อน ซึ่งปริมาณของน้ำหนัก char ที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Quesada *et al*. (2019)



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ต่ออุณหภูมิของพอลิเอทิลีน

2. การศึกษาช่วงอุณหภูมิสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติก

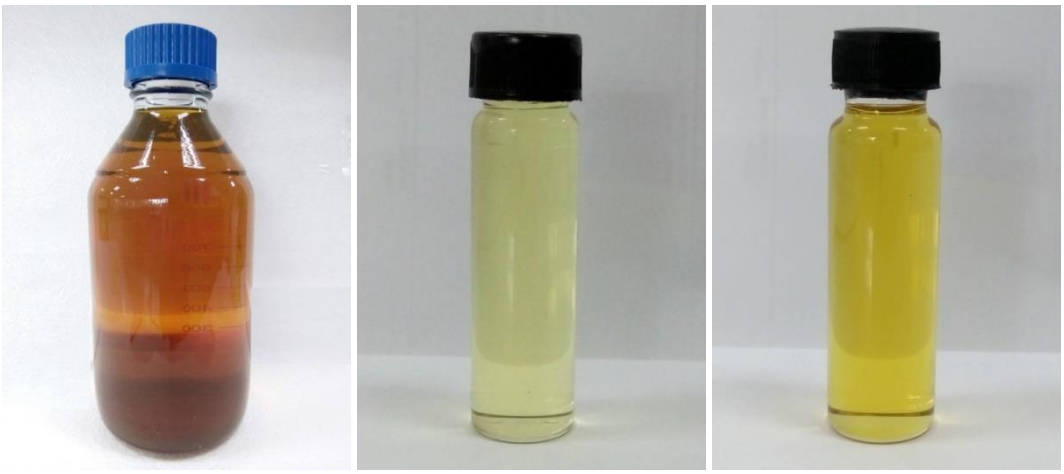
จากผลการวิเคราะห์การสลายตัวของพอลิเอทิลีน ด้วยเทคนิคการสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อน หรือ TGA พบว่า พอลิเอทิลีนจะเกิดการสลายตัวได้สูงในช่วงอุณหภูมิ 370-500°C จึงทำการทดลองโดยใช้อุณหภูมิช่วง 300 - 600°C ในการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิง โดยผลที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเบื้องต้นเป็นดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสำหรับกระบวนการไพโลไรซิสของพอลิเอทิลีนคือช่วง 385-425°C เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 385°C จะทำให้พอลิเอทิลีนเกิดการหลอมเหลวแต่ไม่สลายตัวเป็นแก๊สโซลีน และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 425°C จะทำให้พอลิเอทิลีนเกิดการสลายตัวกลายเป็นแก๊สทั้งหมด

3. ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพอลิเอทิลีน

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลดำ มีความหนืดสูง (ดังแสดงในภาพที่ 3(ก)) จากนั้นจึงทำการกลั่นแยกเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับเชื้อเพลิงโดยการกลั่น ซึ่งจะทำการแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกจะเก็บผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกลั่นที่อุณหภูมิของไอระเหยต่ำกว่า 200°C และช่วงที่ 2 จะเก็บผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกลั่นที่อุณหภูมิของไอระเหยในช่วง 200-300°C ดังแสดงในภาพที่ 3(ข) และภาพที่ 3(ค) ตามลำดับ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิของไอระเหยต่ำกว่า 200°C จะเป็นช่วงอุณหภูมิที่โมเลกุลขนาดเล็กเกิดการระเหย ซึ่งจะเป็นส่วนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงชนิดแก๊สโซลีน จะมีลักษณะสีเหลืองใส และผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิของไอระเหยในช่วง 200-300°C จะเป็นช่วงอุณหภูมิที่โมเลกุลขนาดใหญ่เกิดการระเหย ซึ่งจะเป็นส่วนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงชนิดดีเซล จะมีลักษณะสีเหลืองใส และเข้มกว่าผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิของไอระเหยต่ำกว่า 200°C ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเหมือนกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการศึกษาของ Muzarpar *et al*. (2020)

ตารางที่ 1 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้
300	พลาสติกเกิดการหลอมเหลว แต่ไม่กลั่นตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ เมื่อเย็นตัวกลายเป็นก้อนพลาสติกแข็งอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์
350	พลาสติกเกิดการหลอมเหลว แต่ไม่กลั่นตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ เมื่อเย็นตัวกลายเป็นก้อนพลาสติกแข็งอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์
380	พลาสติกเกิดการหลอมเหลว แต่ไม่กลั่นตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ เมื่อเย็นตัวกลายเป็นก้อนพลาสติกแข็งอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์
385	พลาสติกเกิดการสลายตัว และกลั่นตัวออกมาเป็นของเหลวสีเหลือง มี slurry สีน้ำตาลเข้ม และของแข็งสีดำเหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์
400	พลาสติกเกิดการสลายตัว และกลั่นตัวออกมาเป็นของเหลวสีเหลือง มี slurry สีน้ำตาลเข้ม และของแข็งสีดำเหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์
425	พลาสติกเกิดการสลายตัว และกลั่นตัวออกมาเป็นของเหลว ผสมกับ slurry สีเหลือง ไม่มี slurry และของแข็งเหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์
450	พลาสติกเกิดการสลายตัว และกลั่นตัวออกมาเป็น slurry สีเหลืองเข้ม ไม่มีส่วนที่เป็นของเหลว ไม่มี slurry และของแข็งเหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์
500	พลาสติกเกิดการสลายตัว และกลั่นตัวออกมาเป็น slurry สีเหลือง เพียงเล็กน้อย อีกทั้งเป็นควันสีขาวออกมามาก ไม่มี slurry และของแข็งเหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์
600	พลาสติกเกิดการสลายตัว มีควันสีขาวออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์มาก ไม่มี slurry และของแข็งเหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์

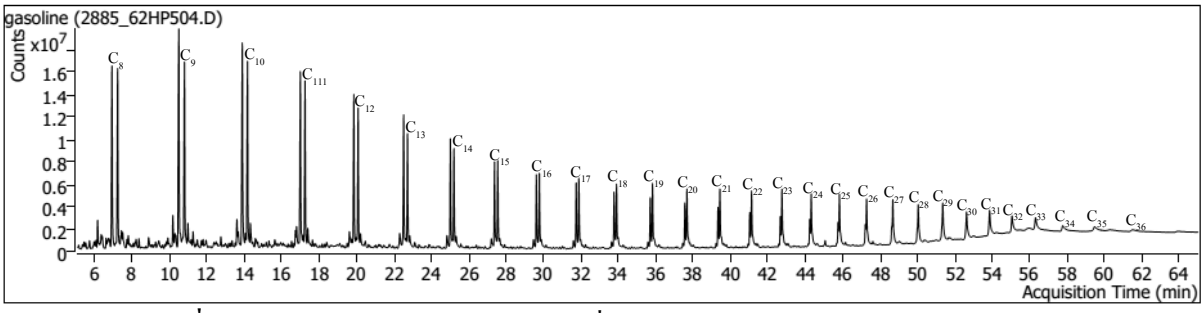


(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 3 ลักษณะของผลิตภัณฑ์ (ก) ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติก (ข) ที่ผ่านการกลั่นที่อุณหภูมิของไอระเหยต่ำกว่า 200°C (ค) ที่ผ่านการกลั่นที่อุณหภูมิของไอระเหยในช่วง 200-300°C

4. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกด้วยเทคนิค Gas chromatograph-Mass spectrometer (GC-MS)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติก ในเบื้องต้นได้ส่งวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อหาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิค GC-MS ซึ่งโครมาโทแกรมที่ได้เป็นดังแสดงในภาพที่ 4 โดยเมื่อทำการทวนสอบการแตกโมเลกุลขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์กับฐานข้อมูลของเครื่อง Mass spectrometer พบว่า องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนโมเลกุลในช่วง C_8 - C_{36} ซึ่งเป็นผลมาจากการสลายตัวด้วยความร้อนของพลาสติก

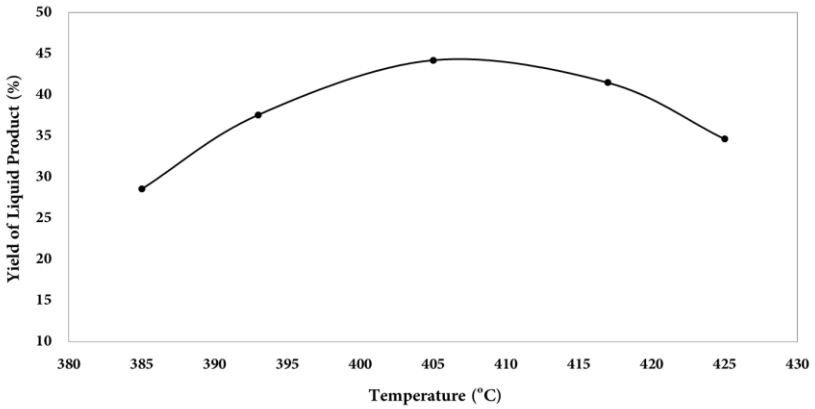


ภาพที่ 4 โครมาโทแกรมสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติก

5. ผลของปัจจัยจากกระบวนการไพโรไลซิสต่อปริมาณผลิตภัณฑ์เหลว

5.1 ผลของอุณหภูมิ

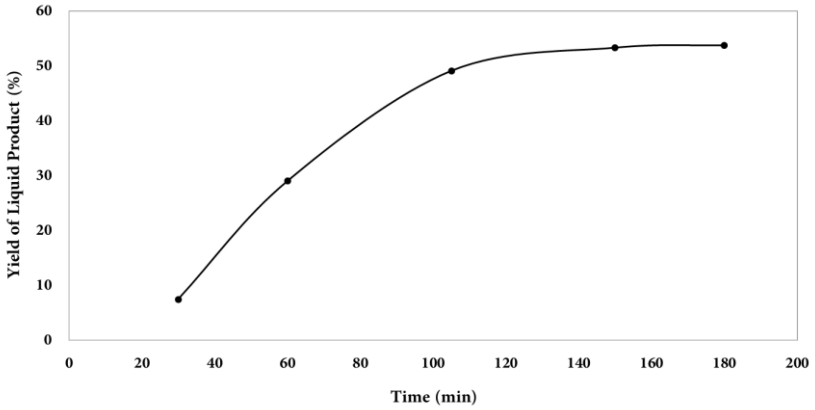
จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณของน้ำมันไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติก ผลที่ได้เป็นดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 385°C เป็น 405°C %yield ของน้ำมันไพโรไลซิสจะเพิ่มขึ้นจาก 28.55% เป็น 44.22% แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 405°C ไปเป็น 425°C พบว่า %yield ของน้ำมันไพโรไลซิสจะลดลงจาก 44.22% เป็น 34.65% ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการสลายตัวของพลาสติกที่มากเกินไป นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิต่ำๆ อัตราการสลายตัวของพลาสติกจะต่ำ และอัตราการสลายตัวของพลาสติกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม ซึ่งเมื่อพลาสติกเกิดการสลายตัวต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ก็จะสามารถกลั่นตัวออกมาเป็นของเหลวได้ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการสลายตัวของพลาสติกมีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง จนไม่สามารถกลั่นตัวเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Thahir *et al*. (2019) ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้พันธะทางเคมีของพอลิเมอร์อ่อนตัวลงจึงสามารถที่จะเกิดการแตกสลายได้ง่ายขึ้น



ภาพที่ 5 ผลของอุณหภูมิต่อ %yield ของน้ำมันไพโรไลซิส

5.2 ผลของเวลา

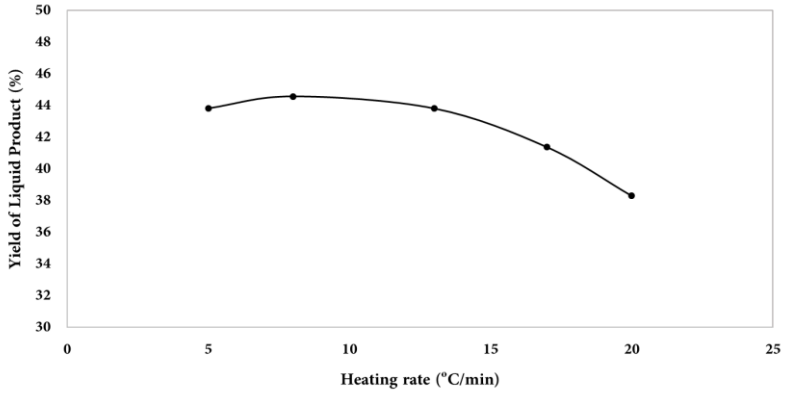
เวลาสำหรับกระบวนการไพโรไลซิส เป็นอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งมีความสำคัญ เนื่องจากจะส่งผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสที่เกิดขึ้น นั่นคือถ้าใช้ระยะเวลาน้อย จะส่งผลให้ปริมาณของไอระเหยเกิดการกลั่นตัวน้อย จึงทำให้ปริมาณน้ำมันไพโรไลซิสลดลง แต่ถ้าใช้ระยะเวลามากจนเกินไปก็จะสิ้นเปลืองพลังงานส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาเป็นดังแสดงในภาพที่ 6 พบว่าในช่วง 100 นาทีแรก ร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสจะค่อยๆ ลดลง จนคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 140 นาที เป็นผลสืบเนื่องมาจากเมื่อเวลาของกระบวนการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ปริมาณพลาสติกที่เป็นสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์จะค่อยๆ ลดลง จึงทำให้ไอระเหยที่เกิดจากการสลายตัวของพลาสติกลดลงจนไม่กลั่นตัวออกมาเป็นน้ำมันไพโรไลซิส ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ López *et al*. (2011) ที่พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณการเปลี่ยนแปลงและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 6 ผลของเวลาต่อ %yield ของน้ำมันไพโรไลซิส

5.3 ผลของอัตราการให้ความร้อน

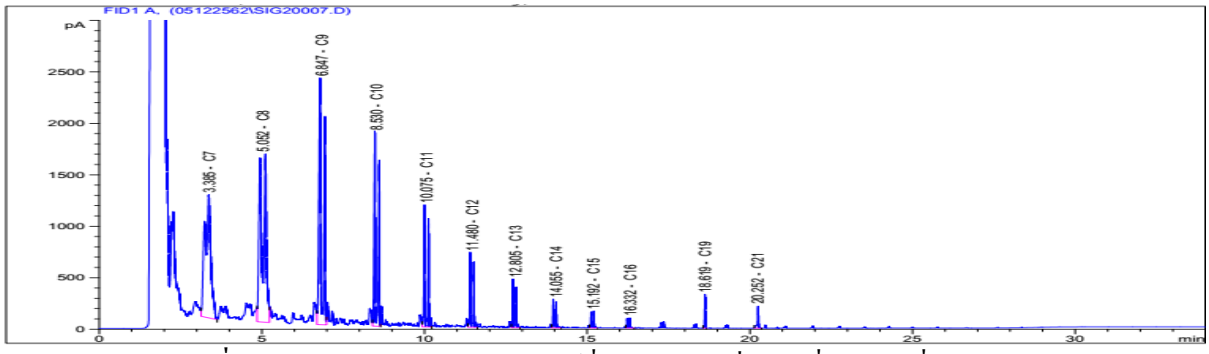
อัตราการให้ความร้อนส่งผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสเป็นดังแสดงในภาพที่ 7 เมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันไพโรไลซิสมีค่าลดลง เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสจะถูกควบคุมด้วยกระบวนการแพร่กระจายแบบจำกัด (diffusion-limited process) ซึ่งเป็นกลไกที่ถูกควบคุมโดยการกระจายตัวของความร้อน (Cahyono and Styana, 2017) ดังนั้นเมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้การกระจายความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้ไอระเหยของพลาสติกสามารถที่จะเกิดการสลายโมเลกุลได้อย่างต่อเนื่อง จนทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีโมเลกุลต่ำจนไม่สามารถที่จะเกิดการกลั่นตัวออกมาเป็นของเหลวได้ เพราะฉะนั้นเมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พอลิเอทิลีนเกิดการสลายตัวเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Dubdub and Al-Yaari (2020) และ Budsaereechai *et al.* (2019)



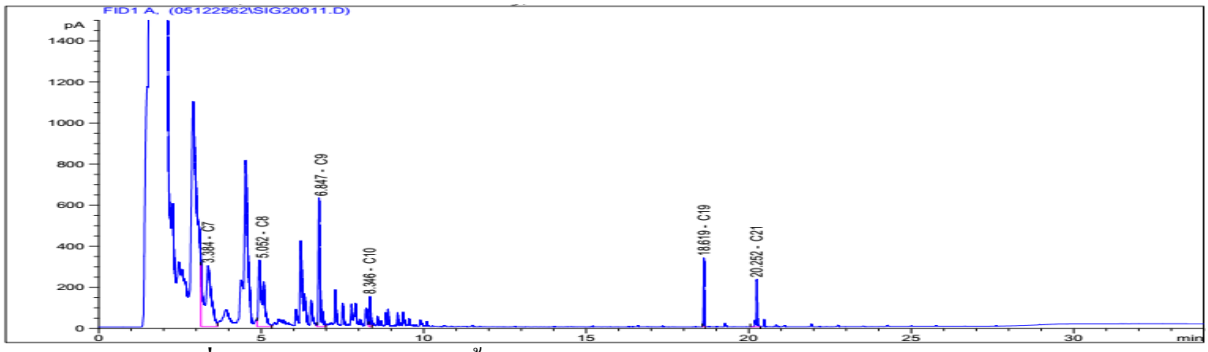
ภาพที่ 7 ผลของอัตราการให้ความร้อนต่อ %yield ของน้ำมันไพโรไลซิส

6. การกลั่นแยกน้ำมันไพโรไลซิส

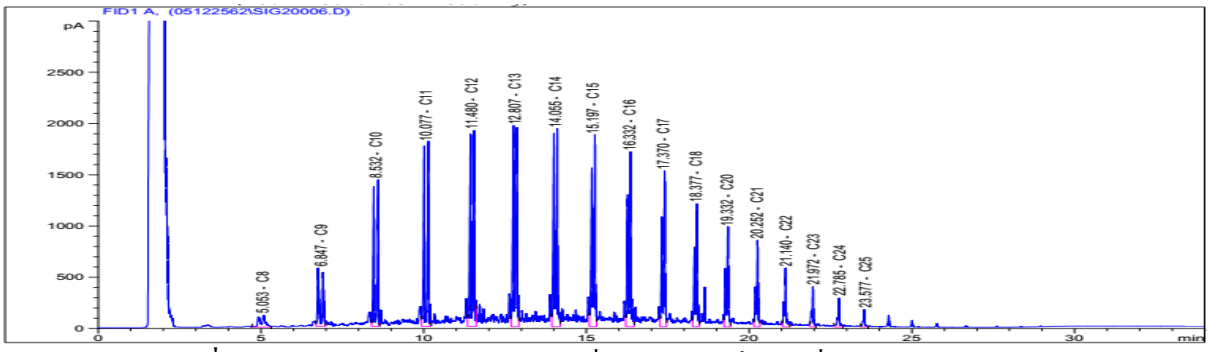
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกเป็นสารผสมของไฮโดรคาร์บอน เมื่อทำการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่ามีค่าความร้อนเท่ากับ 43,438 kJ/kg ความหนืด 2.014 cSt และ pH เท่ากับ 7.2 ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Syamsiro *et al*. (2014) โดยองค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสจะอยู่ในช่วงกว้าง (ดังแสดงในภาพที่ 4) จึงจำเป็นต้องทำการกลั่นแยกเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับเชื้อเพลิงที่ได้ โดยการกลั่นแยกจะทำการเก็บตัวอย่างแยกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกจะทำการเก็บผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิของไอระเหยต่ำกว่า 200°C ซึ่งเป็นสารที่มีโมเลกุลอยู่ในช่วงของน้ำมันแก๊สโซลีน และช่วงที่ 2 จะเก็บผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกลั่นที่อุณหภูมิของไอระเหยในช่วง 200-300°C ซึ่งเป็นสารที่มีโมเลกุลอยู่ในช่วงของน้ำมันดีเซล โดยเมื่อคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกลั่น พบว่า สารที่มีโมเลกุลอยู่ในช่วงของน้ำมันแก๊สโซลีน และดีเซล มีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 22.12 และ 44.98 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าผลการศึกษาของ Pradipta *et al*. (2019) ที่สามารถกลั่นแยกน้ำมันแก๊สโซลีน และดีเซลได้เพียงร้อยละ 10.5 และ 19.37 ตามลำดับ โดยปัจจัยที่ทำให้ได้ปริมาณของน้ำมันแก๊สโซลีน และดีเซลเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากกระบวนการไพโรไลซิสเนื่องจากใช้กระบวนการกลั่นแยกที่เหมือนกัน จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์ที่กลั่นได้ทั้ง 2 ส่วน มาวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง GC-FID ผลเป็นดังแสดงในภาพที่ 8 และภาพที่ 10



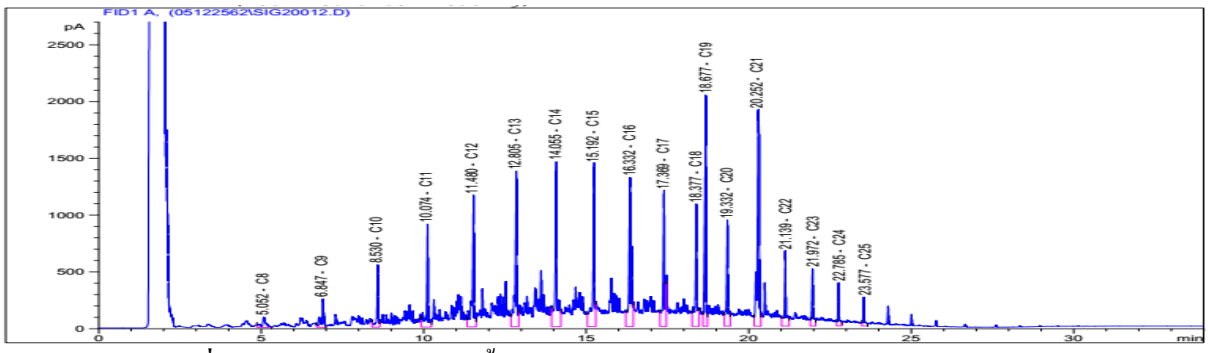
ภาพที่ 8 Chromatogram ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นแยกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200°C



ภาพที่ 9 Chromatogram ของเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์ 91 (Gasohol 91) ทางการค้า



ภาพที่ 10 Chromatogram ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นแยกที่อุณหภูมิในช่วง 200-300°C



ภาพที่ 11 Chromatogram ของเชื้อเพลิงดีเซล (Diesel) ทางการค้า

โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่กลั่นแยกที่อุณหภูมิของไอระเหยต่ำกว่า 200°C จะอยู่ในช่วง C_7 - C_{21} และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่กลั่นแยกที่อุณหภูมิของไอระเหยในช่วง 200-300°C จะอยู่ในช่วง C_8 - C_{25} และเมื่อทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่กลั่นแยกที่อุณหภูมิของไอระเหยต่ำกว่า 200°C กับเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์ 91 (ภาพที่ 9) และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่กลั่นแยกที่อุณหภูมิของไอระเหยในช่วง 200-300°C กับเชื้อเพลิงดีเซล (ภาพที่ 11) พบว่าองค์ประกอบมีความใกล้เคียงกันมาก สามารถนำมาใช้ทดแทนกันได้

สรุป

จากผลการศึกษาการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนด้วยกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 385 - 425°C โดยองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันไพโรไลซิสจะมีโมเลกุลอยู่ในช่วง C_8 - C_{36} ซึ่งน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จะสามารถกลั่นแยกออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือผลิตภัณฑ์เหลวที่อุณหภูมิของไอระเหยต่ำกว่า 200°C และส่วนที่สองคือผลิตภัณฑ์เหลวที่อุณหภูมิของไอระเหยอยู่ในช่วง 200-300°C ซึ่งผลิตภัณฑ์เหลวทั้งสองส่วนมีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงเหลวทางการค้าชนิดแก๊สโซลีน และดีเซล ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยทักษิณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

เอกสารอ้างอิง

Budsaereechai, S., Hunt, A.J. and Ngernyen, Y. 2019. Catalytic pyrolysis of plastic waste for the production of liquid fuels for engines. **RSC advances** 9: 5844-5857.

Cahyono, M.S. and Styana, U.I.F. 2017. Influence of Heating Rate and Temperature on the Yield and Properties of Pyrolysis Oil Obtained from Waste Plastic Bag. **Conserve: Journal of Energy and Environmental Studies** 1(1): 1-8.

Dubdub, I. and Al-Yaari, M. 2020. Pyrolysis of Low Density Polyethylene: Kinetic Study Using TGA Data and ANN Prediction. **Polymer** 12(891): 1-14.

Kalargaris, I., Tian, G. and Gu, S. 2017. Combustion, Performance and Emission analysis of DI Diesel Engine using Plastic Pyrolysis Oil. **Fuel Processing Technology** 157: 108-115.

Khairil, Riayatsyah, T.M.I., Bahri, S., Sofyan, S.E., Jalaluddin, J., Kusumo, F., Silitonga, A.S., Padli, Y., Jihad, M. and Shamsuddin, A.H. 2020. Experimental Study on the Performance of an SI Engine Fueled by Waste Plastic Pyrolysis Oil-Gasoline Blends. **Energies** 13(4196): 1-15.

López, A., de Marco, I., Caballero, B.M., Laresgoiti, M.F. and Adrados, A. 2011. Influence of time and temperature on pyrolysis of plastic wastes in a semi-batch reactor. **Chemical Engineering Journal** 173(1): 62-71.

Muzarpar, S., Leman, A.M., Rahman, K.A. and Foudzi, M. T.R.M. 2020. Recycling of Plastic Throughout

Pyrolysis and Distillation Process to Recover an Alternative Fuel Sources, pp. 1-9. *In* **International Conference on Innovative Research - ICIR EUROINVENT 2020.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Romanian.

Pollution Control Department. 2018. **Waste Plastic Management 2018-2030.** Available Source: http://www.pcd.go.th/Info_serv/File/Plastic%20Roadmap.pdf, June 30, 2020. (in Thai)

Pradipta, I.Z., Rochmadi and Purnomo, C.W. 2019. High Grade Liquid Fuel from Plastic Waste Pyrolysis Oil by Column Distillation, pp. 240-244. *In* **2019 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON).** IEEE Power Electronics (PEL) Malaysia Chapter, Indonesia.

Quesada, L., Pérez, A., Godoy, V., Peula, F.J., Calero, M. and Blázquez, G. 2019. Optimization of the pyrolysis process of a plastic waste to obtain a liquid fuel using different mathematical models. **Energy Conversion and Management** 188: 19-26.

Shan-jun, M., Jun, Z., Dong, L. and Hong-yin, C. 2013. Study on Pyrolysis Characteristics of Cross-linked Polyethylene Material Cable. **Procedia Engineering** 52: 588-592.

Syamsiro, M., Saptoadi, H., Norsujianto, T., Noviasri, P., Cheng, S., Alimuddin, Z. and Yoshikawa, K. 2014. Fuel Oil Production from Municipal Plastic Wastes in Sequential Pyrolysis and Catalytic Reforming Reactors. **Energy Procedia** 47: 180-188.

Thahir, R., Altway, A., Juliastuti, S.R. and Susianto. 2019. Production of liquid fuel from plastic waste using integrated pyrolysis method with refinery distillation bubble cap plate column. **Energy Reports** 5: 70-77.

Tulashie, S.K., Boadu, E.K. and Dapaah, S. 2019. Plastic waste to fuel via pyrolysis: A key way to solving the severe plastic waste problem in Ghana. **Thermal Science and Engineering Progress** 11: 417-424.

Zattini, G., Leonardi, C., Mazzocchetti, L., Cavazzoni, M., Montanari, I., Tosi, C., Benelli, T. and Giorgini, L. 2017. Pyrolysis of Low-Density Polyethylene. **Sustainable Design and Manufacturing** 2017: 480-490.

Zhang, Y., Cui, Y., Liu, S., Fan, L., Zhou, N., Peng, P., Wang, Y., Guo, F., Min, M., Cheng, Y., Liu, Y., Lei, H., Chen, P., Li, B. and Ruan, R. 2020. Fast microwave-assisted pyrolysis of wastes for biofuels production - A review. **Bioresource Technology** 297: 122480.

ผลของการเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะ (*Smallanthus sonchifolius*) ในอาหารต่อประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลอง การเจริญเติบโต และการใช้ประโยชน์จากอาหารของปลากาดำ (*Labeo chrysophekadion*)

Dietary Supplementation Effect of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) Tubers on *In Vitro* Digestibility, Growth Performance and Feed Utilization in Greater Black Shark (*Labeo chrysophekadion*)

จุลทรรศน์ คีรีแลง [1,2*] เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน [2] ชนกันต์ จิตมนัส [2] Hien Van Doan [3] และ สุดาพร ตงศิริ [2]

Julatat Keereelang [1,2*], Kriangsak Mangumphan [2], Chanagun Chitmanat [2], Hien Van Doan [3] and Sudaporn Tongsiri [2]

Received: 25 March 2020, Revised: 25 March 2021, Accepted: 8 April 2021

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระดับที่เหมาะสมในการเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะ (*Smallanthus sonchifolius*) ในสูตรอาหารต่อการเจริญเติบโตของปลากาดำ (*Labeo chrysophekadion*) และประสิทธิภาพในการย่อยคาร์โบไฮเดรต และโปรตีนในหลอดทดลองของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอาหารปลากาดำ และในสูตรอาหารปลากาดำที่เสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะในระดับที่ต่างกัน โดยทำการศึกษาในปลากาดำที่มีน้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น 3.09 ± 0.61 กรัม ความยาวเริ่มต้นเฉลี่ย 7.05 ± 0.60 เซนติเมตร ภายใต้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ซึ่งประกอบด้วย 1 ชุดควบคุม และ 3 ชุดทดลอง ชุดทดลองละ 3 ซ้ำ ได้แก่ ปลาที่ได้รับอาหารเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่ระดับ 0 (ชุดควบคุม), 2, 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์ โดยมีระดับโปรตีนในอาหารเท่ากับ 36.70 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์ จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตในลำต้นใต้ดินของบัวหิมะโดยเอนไซม์ที่สกัดได้จากทางเดินอาหารปลากาดำมีค่าสูงที่สุด (62.48 ± 15.89 µmol maltose/g feed/amylase activity, P0.05)

---

[1] คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 50290

[1] Faculty of Fisheries Technology and Aquatic Resources, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand.

[2] สาขาสัตวศาสตร์และประมง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน จังหวัดน่าน 55000

[2] Department of Animal Science and Fisheries, Faculty of Sciences and Agricultural, Rajamangala University of Technology Lanna Nan, Nan 55000, Thailand.

[3] ภาควิชาสัตวศาสตร์และสัตว์น้ำ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

[3] Department of Animal and Aquatic Sciences, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand.

[*] ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): junlatat999@hotmail.com Tel: 08 6101 1606

ส่วนประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในปลาป่น (50.74 ± 2.47 µmol DL-alanine equivalent/g feed/trypsin activity) มีค่าสูงที่สุด และใกล้เคียงกันกับลำต้นใต้ดินของบัวหิมะ (48.55± 1.74 µmol DL-alanine equivalent/g feed/trypsin activity) ซึ่งมีค่าสูงกว่าวัตถุดิบชนิดอื่น (p<0.05) ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตในสูตรอาหารที่เสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่ระดับ 2 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงที่สุด แต่ไม่แตกต่างจากอาหารในชุดควบคุม (p>0.05) ส่วนประสิทธิการย่อยโปรตีนในสูตรอาหารดังกล่าวมีค่าสูงเช่นเดียวกัน และแตกต่างจากชุดควบคุม (p<0.05) เมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตของปลาพบว่าอาหารที่เสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่ระดับ 2 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ปลามีการเจริญเติบโตสูงกว่าชุดควบคุม (p<0.05) ส่วนอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และประสิทธิภาพการใช้โปรตีนของปลาทั้ง 2 กลุ่ม พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกัน (p>0.05) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะในสูตรอาหารสำหรับเลี้ยงปลากาดำที่ระดับ 2 เปอร์เซ็นต์ เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุด

คำสำคัญ: ปลากาดำ, ลำต้นใต้ดินของบัวหิมะ, ประสิทธิภาพการย่อยได้, การเจริญเติบโต

ABSTRACT

This study aimed to investigate the optimal supplementation level of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) tubers in diets on growth performance of greater black shark (*Labeo chrysophekadion*) and *in vitro* digestibilities of carbohydrate and protein from feed ingredients and the diets containing yacon tubers. Greater black shark (3.09 ± 0.61 g initial weight, 7.05 ± 0.60 cm length) was assigned into four treatments comprising three experimental treatments (2, 4 and 6% yacon tubers) and one control fish group (0% yacon tubers). Triplicate observations under completely randomized design treatment were performed and the fish were fed by isonitrogenous diets (36.70% protein) containing different supplementation levels of yacon tubers over 16 weeks. Across various types of feed ingredients tested using digestive enzymes from greater black shark, the highest carbohydrate digestibility (62.48 ± 15.89 µmol maltose/g feed/amylase activity, p<0.05) was observed in yacon tubers, while protein digestibility was the highest and similar (p>0.05) between fish meal (50.74 ± 2.47 µmol DL-alanine equivalent/g feed/trypsin activity) and yacon tubers (48.55 ± 1.74 µmol DL-alanine equivalent/g feed/trypsin activity), relative to other feed ingredients. In diets, carbohydrate digestibility was significantly increased when supplementing with 2% yacon tubers, followed by control diet (0%, p>0.05). Also, protein digestibility was significantly higher in this diet in comparison with the control group (p<0.05). For *in vivo* measurements, superior growth was observed in fish fed by diet containing 2% yacon tubers relative to control group (p<0.05), while feed conversion and protein efficiency ratios did not differ between these two groups (p>0.05). Results from the current study indicated the optimal supplementation level of yacon tubers (2%) in diet for greater black shark.

Key words: greater black shark, yacon tubers, digestibility, growth performance

บทนำ

ปลากาดำ (*Labeo chrysophekadion*) เป็นปลาพื้นเมืองของไทย ตัวโตเต็มวัยมีขนาด 5 - 8 กิโลกรัม สามารถพบทั้งในแหล่งน้ำนิ่ง และน้ำไหลทั่วประเทศ (Uk-katawewat and Pongchawee, 2000) มีพฤติกรรมว่ายแทะเล็มตามหิน และชอบกัดเกล็ดของปลาอื่น กินตะไคร่น้ำ และซากพืชซากสัตว์เป็นอาหาร (Vidthayanon, 2004) เป็นปลาที่มีรสชาติดี นิยมบริโภคสด และเลี้ยงเป็นปลาสวยงาม ในภาคเหนือประชาชนนิยมนำมาประกอบอาหาร ราคาขายกิโลกรัมละ 80 - 180 บาท ขึ้นอยู่กับขนาด ปัจจุบันปลากาดำมีการเพาะเลี้ยงเพื่อจำหน่ายเป็นปลาสวยงามทั้งใน และต่างประเทศ ปลาที่ผลิตได้จะส่งออกในลักษณะปลาสวยงามเป็นส่วนใหญ่ โดยเป็นปลาที่มีขนาดเล็ก ส่วนปลาขนาดใหญ่ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดส่วนใหญ่เป็นปลาที่จับจากธรรมชาติ ซึ่งไม่เพียงพอต่อการบริโภค ในปัจจุบันได้มีการทดลองเลี้ยงปลากาดำในบ่อดินโดยปล่อยที่ความหนาแน่น 2 ตัวต่อตารางเมตร โดยเลี้ยงเป็นระยะเวลา 9 เดือน ได้ปลาขนาดตัวละ 200 กรัม ได้ผลผลิต 290 กิโลกรัมต่อไร่ (Ingram and Lasasimma, 2008) ซึ่งผลผลิตที่ได้ค่อนข้างต่ำเนื่องจากปลามีการเจริญเติบโตค่อนข้างช้า และใช้ระยะเวลาเลี้ยงนาน จึงทำให้ต้นทุนในการเลี้ยงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเลี้ยง สำหรับการเจริญเติบโตของปลาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้านเช่น อาหาร คุณภาพน้ำ และพันธุกรรมของปลา ซึ่งอาหารถือเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของปลา ที่ส่งผลให้ปลาโตเร็ว มีอัตราแลกเนื้อต่ำ ปลาสามารถนำอาหารไปใช้ได้มากที่สุด และทำให้ปลามีสุขภาพดี (Chitmanat, 2008) การใช้ประโยชน์ของอาหารขึ้นอยู่กับการทำงานของระบบย่อยอาหารในสัตว์น้ำ ถ้าระบบย่อยอาหารทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจะส่งผลต่อประสิทธิภาพใช้อาหารที่สูงขึ้น

การใช้พรีไบโอติก (Prebiotics) เป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้การทำงานของระบบย่อยอาหารทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยพรีไบโอติกคือ อาหารซึ่งร่างกายสัตว์น้ำไม่สามารถย่อยและไม่ถูกดูดซึมได้ในระบบทางเดินอาหารทั้งในกระเพาะอาหาร และลำไส้เล็ก แต่จะถูกย่อยด้วยแบคทีเรียที่อยู่ในลำไส้ โดยจะกระตุ้นการทำงานและส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์โปรไบโอติกที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ โดยในปลาพรีไบโอติกสามารถเพิ่มการเจริญเติบโต ช่วยปรับสมดุลของจุลินทรีย์ในกระเพาะอาหาร กระตุ้นภูมิคุ้มกัน และเพิ่มการต้านทานโรค (Dawood *et al*., 2015)

ลำต้นใต้ดินของบัวหิมะเป็นพืชชนิดหนึ่งที่นิยมบริโภคในรูปของผลไม้ โดยบริโภคส่วนของราก คุณค่าทางโภชนาการประกอบไปด้วยคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอยู่ในรูปของ β (2⟶1) fructooligosaccharides ซึ่งช่วยควบคุม และปรับปรุงของเหลวในเลือด ช่วยการทำงานของระบบขับถ่ายในกระเพาะลำไส้ และทางเดินปัสสาวะ และช่วยย่อยอาหารได้ดี (Andrade *et al*., 2014) โดยจากข้อมูลในปัจจุบันพบว่าลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่มีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติก ซึ่งจะช่วยลดปริมาณพิษที่ผลิตจากแบคทีเรียที่ไม่มีประโยชน์ที่อาศัยอยู่บริเวณลำไส้ได้ (Shengjie *et al*., 2014) ได้ นอกจากนี้ยังมีผลช่วยให้การทำงานของระบบย่อยอาหารของปลามีประสิทธิภาพสูงขึ้น ส่งผลต่อการใช้อาหารในการเจริญเติบโตได้ดีขึ้น

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงระดับที่เหมาะสมของการใช้ลำต้นใต้ดินของบัวหิมะในสูตรอาหารปลากาดำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อย การใช้ประโยชน์จากอาหาร และการเจริญเติบโตของปลากาดำ ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาในการเลี้ยงให้น้อยลง และได้อาหารที่มีต้นทุนต่ำในการเลี้ยงปลากาดำเชิงพาณิชย์ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาความสามารถในการย่อยวัตถุดิบ และอาหารทดลอง

1.1 การเตรียมตัวอย่างกระเพาะอาหารและลำไส้ปลา

นำตัวอย่างปลากาดำตัวโตเต็มวัยขนาดความยาว 15 เซนติเมตร น้ำหนัก 20 กรัม ที่ได้จากการเลี้ยงที่สาขาวิชาประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน จังหวัดน่าน มาทำการสลบด้วยน้ำมันกานพลู (clove oil) ความเข้มข้น 20 ppm. จากนั้นทำการผ่าท้องปลาเพื่อเก็บตัวอย่างกระเพาะอาหาร และลำไส้เล็ก จากนั้นนำตัวอย่างกระเพาะอาหาร และลำไส้เล็กมาทำการบดละเอียดด้วยเครื่อง homogenizer ขณะที่บดจะแช่ในอ่างน้ำแข็ง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 × g เป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เก็บส่วนใสที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็น Crude extract สำหรับวิเคราะห์ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีน และคาร์โบไฮเดรตในวัตถุดิบอาหาร และสูตรอาหารทดลอง ตามวิธีของ Rungruangsak-Torrissen *et al*. (2002)

1.2 การศึกษาความสามารถในการย่อยวัตถุดิบและอาหารทดลองด้วยเอนไซม์ย่อยอาหารที่สกัดจากทางเดินอาหารปลากาดำ

ทำการศึกษาการย่อยได้ในวัตถุดิบอาหารจำนวน 5 ชนิดได้แก่ ปลาป่น แป้งสาลี กากถั่วเหลือง กลูเตนข้าวสาลี และลำต้นใต้ดินของบัวหิมะ และสูตรอาหารทดลองที่ผสมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่ระดับ 0, 2, 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์ ด้วยวิธี *in vitro* digestibility โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในอาหาร และประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตในอาหาร ตามวิธีของ Rungruangsak-Torrissen *et al*. (2002) ดังนี้

1) การศึกษาการย่อยโปรตีนด้วยวิธี Trinitrobenzene sulphonic acid (TNBS)

นำ Digested solution ที่เตรียมไว้จากข้อ 1.1 ปริมาตร 200 ไมโครลิตร เติมด้วย 50 mM Phosphate buffer pH 8.2 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร แล้วผสมให้เข้ากันด้วย Vortex mixer นำไปพักไว้ในที่มืดอุณหภูมิ 60 องศา-เซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบ 1 ชั่วโมงทำการเติม 1 M HCl ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แล้วผสมให้เข้ากันด้วย Vortex mixer ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง และนำไปวัดค่าการดูดแสงที่ 420 นาโนเมตร จากนั้นนำไปคำนวณหาปริมาณ Free amino group โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ *DL*-alanine

2) การศึกษาการย่อยคาร์โบไฮเดรตด้วยวิธี Dinitrosalicylic acid (DNS)

นำ Digested solution ที่เตรียมไว้จากข้อ 1.1 ปริมาตร 250 ไมโครลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 × g เป็นเวลา 10 นาที นำมาเติม 1% DNS (ละลายใน 2 M NaOH และ 0.6% Sodium potassium tartrate) ปริมาตร 250 ไมโครมิลลิลิตร แล้วผสมให้เข้ากันด้วย Vortex mixer นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง เติมน้ำกลั่น 2.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วย Vortex mixer และนำไปวัดค่าการดูดแสงที่ 540 นาโนเมตร จากนั้นนำไปคำนวณหาปริมาณ Reducing sugar โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Maltose

2. การศึกษาการเจริญเติบโตของปลากาดำ

2.1 การเตรียมปลาทดลอง

ปลากาดำที่ใช้ในการศึกษาเป็นลูกปลาที่ได้จากการเพาะพันธุ์จากศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืดจังหวัดแพร่ มีอายุประมาณ 2 เดือน นำมาเลี้ยงไว้ที่สาขาวิชาประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน ในถังไฟเบอร์กลาส ขนาด 1,000 ลิตร เพื่อปรับสภาพปลาให้คุ้นเคยกับการทดลอง และให้

อาหารเม็ดสูตรควบคุม วันละ 2 มื้อ (9.00 น. และ 17.00 น.) ในระหว่างการเลี้ยงทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ และดูดตะกอนทุกวัน จนได้ลูกปลาน้ำหนักประมาณ 3 กรัม

2.2 การเตรียมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะ

นำลำต้นใต้ดินของบัวหิมะมาทำการล้างให้สะอาด และปอกเปลือก จากนั้นนำมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปตากแดดที่อุณหภูมิ 33 - 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน จนกระทั่งลำต้นใต้ดินของบัวหิมะแห้ง จากนั้นนำลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่แห้งแล้วมาทำการบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่น และนำไปใส่ไว้ในถุงโพลีเอทิลีน โดยปิดให้สนิทแล้วนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2.3 การเตรียมอาหารทดลอง

สูตรอาหารที่ใช้ได้ปรับปรุงมาจากสูตรของ Roghieh *et al*. (2017) ซึ่งเป็นสูตรอาหารที่ใช้ศึกษาในปลาไนมาใช้เป็นสูตรอาหารชุดควบคุม (control) โดยนำส่วนผสมทั้งหมดในแต่ละสูตรการทดลองมาคลุกเคล้าให้เข้ากัน จากนั้นนำไปอัดเป็นเม็ดได้อาหารที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องอัดอาหารเม็ดลอย และนำไปผึ่งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของสูตรอาหารแต่ละสูตร และนำอาหารส่วนที่เหลือไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป โดยสูตรอาหารแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สูตรอาหาร และองค์ประกอบทางเคมีของอาหารทดลอง

วัตถุดิบ	**ปริมาณวัตถุดิบของอาหารทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)**			
	0	**2**	**4**	**6**
ปลาป่น	40.00	40.00	40.00	40.00
แป้งสาลี	21.00	19.00	17.00	15.00
กากถั่วเหลือง	13.50	13.50	13.50	13.50
กลูเตนข้าวสาลี	5.50	5.50	5.50	5.50
น้ำมันถั่วเหลือง	6.00	6.00	6.00	6.00
น้ำมันปลา	6.00	6.00	6.00	6.00
แร่ธาตุรวม	3.00	3.00	3.00	3.00
วิตามินรวม	2.00	2.00	2.00	2.00
สารเหนียว	2.00	2.00	2.00	2.00
สารกันเชื้อรา	0.50	0.50	0.50	0.50
สารต้านอนุมูลอิสระ	0.50	0.50	0.50	0.50
ลำต้นใต้ดินของบัวหิมะแห้ง	0.00	2.00	4.00	6.00
องค์ประกอบในอาหาร (เปอร์เซ็นต์วัตถุแห้ง)				
ความชื้น	10.39	10.43	10.17	10.28
โปรตีน	36.88	36.76	36.70	36.65
เยื่อใย	10.55	10.29	10.35	10.39

ตารางที่ 1 (ต่อ)

วัตถุดิบ	ปริมาณวัตถุดิบของอาหารทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)			
	0	**2**	**4**	**6**
เถ้า	4.11	4.16	4.09	4.19
ไขมัน	1.67	1.64	1.87	2.04
คาร์โบไฮเดรต	36.40	36.72	36.82	36.45

หมายเหตุ: แร่ธาตุรวมประกอบไปด้วย กรดนิโคทินิก 9.0 มก/กก, ทองแดง 1.5 มก/กก, เหล็ก 150 มก/กก, ไอโอดีน 2.25 มก/กก, แมงกานีส 132 มก/กก, สังกะสี 132 มก/กก, โคบอลต์ 1.95 มก/กก, แคลเซียม 792 มก/กก, วิตามินรวมประกอบไปด้วย วิตามินเอ 30,000 IU/กก, วิตามินดี 3 4,800 IU/กก, วิตามินอี 30 มก/กก, วิตามินเค 3 4.95 มก/กก, วิตามินบี 1 3.3 มก/กก, วิตามินบี 2 6.75 มก/กก, วิตามินบี 12 67.5 มคก/กก

2.4 การทดสอบประสิทธิภาพของอาหารในปลากาดำ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 1 ชุดควบคุม และ 3 ชุดการทดลอง แต่ละชุดการทดลองมี 3 ซ้ำ โดยอาหารทดลองแต่ละสูตรประกอบด้วย ชุดควบคุมใช้อาหารที่มีลำต้นใต้ดินของบัวหิมะเป็นส่วนผสม 0 เปอร์เซ็นต์ และชุดการทดลองที่ 1 - 3 อาหารที่มีลำต้นใต้ดินของบัวหิมะเป็นส่วนผสม 2, 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทดสอบอาหารโดยใช้ลูกปลากาดำ น้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 3 กรัม เลี้ยงในตู้กระจกขนาด 36×16×18 นิ้ว จำนวน 12 ตู้ ใส่ปลาตู้ละ 30 ตัว ในระหว่างการเลี้ยงให้อาหาร 2 มื้อ (9.00 น. และ 17.00 น.) โดยให้ปลากินจนอิ่ม พร้อมทั้งบันทึกปริมาณอาหารที่ปลากินในแต่ละวัน และทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ ทุกวัน ในระหว่างการทดลองทำการสุ่มชั่งน้ำหนัก และวัดความยาวปลาทุกชุดการทดลองเดือนละ 1 ครั้ง โดยทำการทดลองเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 16 สัปดาห์ เมื่อสิ้นสุดการทดลองนำข้อมูลที่ได้ไปทดสอบความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการย่อยได้ของอาหาร และการเจริญเติบโตของปลาในแต่ละชุดการทดลอง โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way Analysis of Variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's multiple rang test โดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics 24 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยได้ของวัตถุดิบ ได้แก่ ปลาป่น กากถั่วเหลือง กลูเตนข้าวสาลี แป้งสาลี และลำต้นใต้ดินของบัวหิมะ ด้วยเอนไซม์ที่สกัดจากทางเดินอาหารปลากาดำ (ตารางที่ 2) พบว่าประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตในลำต้นใต้ดินของบัวหิมะมีค่าสูงที่สุด และมีค่าแตกต่างกันทางสถิติกับวัตถุดิบชนิดอื่น (p<0.05) และเอนไซม์ในทางเดินอาหารปลากาดำมีความสามารถในการย่อยโปรตีนในปลาป่น และลำต้นใต้ดินของบัวหิมะได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งสาลี กากถั่วเหลือง และกลูเตนข้าวสาลี พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรต (μmol maltose/g feed/amylase activity) และโปรตีน (μmol *DL*-alanine equivalent/g feed/trypsin activity) ในวัตถุดิบอาหารด้วยเอนไซม์ที่สกัดได้จากทางเดินอาหารของปลากาดำ

วัตถุดิบ	ประสิทธิภาพการย่อย	
	คาร์โบไฮเดรต (μmol maltose/g feed/amylase activity)	โปรตีน (μmol *DL*-alanine equivalent/g feed/trypsin activity)
ปลาป่น	15.05 ± 2.86[c]	50.74 ± 2.47[a]
แป้งสาลี	43.96 ± 2.96[b]	38.77 ± 2.28[c]
กากถั่วเหลือง	22.47 ± 1.62[c]	40.10 ± 0.38[c]
กลูเตนข้าวสาลี	Nd	44.56 ± 0.47[b]
ลำต้นใต้ดินของบัวหิมะ	62.48 ± 15.89[a]	48.55 ± 1.74[a]
p - value	0.0037	0.0059

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยด้วยตัวอักษรต่างกันตามแนวตั้งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

Nd = ตรวจวัดไม่พบ (not detected)

ทั้งนี้เนื่องจากปลากาดำเป็นปลาที่กินทั้งพืชทั้งสัตว์ (omnivorous) (Rainboth, 1996; Uk-katawewat and Pongchawee, 2000; Vidthayanon, 2004) มีความสามารถในการย่อยคาร์โบไฮเดรตได้ดีกว่าปลากินเนื้อ (Chuapoehuk, 2000) ซึ่งจากวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีแป้งสาลี และลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่เป็นพืช และมีส่วนประกอบของแป้งมากกว่าวัตถุดิบชนิดอื่น จึงส่งผลต่อความสามารถในการย่อยคาร์โบไฮเดรตได้ดีกว่าวัตถุดิบชนิดอื่นๆ ส่วนประสิทธิภาพการย่อยได้ของโปรตีนพบว่ามีค่าสูงในปลาป่น เนื่องด้วยปลากาดำเป็นปลาที่กินทั้งพืช และสัตว์ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนจะมีค่าน้อยกว่าปลากินเนื้อ แต่จะมีค่าสูงกว่าในปลากินพืช (De Silva and Anderson, 1994) ซึ่งคล้ายกับปลานิลที่เป็นปลาที่กินทั้งพืช และสัตว์ ดังนั้นจึงส่งผลให้ปลากาดำย่อยโปรตีนจากปลาป่นได้ดีกว่าโปรตีนจากแหล่งอื่น อีกทั้งปลาป่นเป็นแหล่งโปรตีนที่มีคุณภาพทั้งปริมาณโปรตีนที่สูง และโปรตีนในปลาป่นเป็นโปรตีนที่ย่อยง่ายกว่าโปรตีนที่พบในพืช ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในปลาป่นสูงกว่าโปรตีนในพืช โดยเฉพาะปลาที่กินทั้งพืช และสัตว์ที่มีระดับเอนไซม์กลุ่มโปรติเอส ต่ำกว่าปลากินเนื้อ ทำให้สามารถย่อยโปรตีนในปลาป่นได้ดีกว่าโปรตีนจากแหล่งวัตถุดิบชนิดอื่นๆ

จากการศึกษาค่าประสิทธิภาพการย่อยได้ของสูตรอาหารทดลองที่มีการเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่ระดับต่างกัน (ตารางที่ 3) พบว่าประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตในอาหารที่เสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่ระดับ 2 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงที่สุด เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าอาหารที่เสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่ระดับ 0 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) แต่แตกต่างกับสูตรอาหารที่เสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่ระดับ 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์ ($p<0.05$) ส่วนประสิทธิการย่อยโปรตีน

ในสูตรอาหารที่เสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่ระดับ 2 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงที่สุด และแตกต่างกันทางสถิติกับชุดควบคุม (p<0.05)

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรต (μmol maltose/g feed/amylase activity) และโปรตีน (μmol *DL*-alanine equivalent/g feed/trypsin activity) ในสูตรอาหารด้วยเอนไซม์ที่สกัดได้จากทางเดินอาหารของปลากาดำ

ระดับการเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะ (เปอร์เซ็นต์)	ประสิทธิภาพการย่อย	
	คาร์โบไฮเดรต (μmol maltose/g feed/amylase activity)	โปรตีน (μmol *DL*-alanine equivalent/g feed/trypsin activity)
0	6.33 ± 0.66[a]	19.84 ± 0.32[b]
2	6.66 ± 0.47[a]	27.25 ± 0.00[a]
4	4.33 ± 0.56[b]	23.54 ± 0.91[ab]
6	3.77 ± 0.91[b]	26.68 ± 0.53[a]
p - value	0.0086	0.0229

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันตามแนวตั้งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของปลากาดำที่ได้รับอาหารเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่ระดับ 0, 2, 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์ (ตารางที่ 4) พบว่าอาหารที่มีการเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะมีค่าการเจริญเติบโตดีกว่าชุดควบคุม โดยเฉพาะในปลากาดำกลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะ 2 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการเจริญเติบโตสูงที่สุด และมีความแตกต่างกันทางสถิติกับชุดควบคุม (p<0.05) ในส่วนของอัตราการเจริญเติบโตต่อวัน พบว่าอาหารที่เสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะมีค่าสูงกว่าชุดควบคุม ส่วนอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และประสิทธิภาพการใช้โปรตีน อาหารชุดควบคุมมีค่าดีกว่าอาหารที่เสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะ แต่เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างกัน (p>0.05) ในส่วนของค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ อัตราการเจริญเติบโตต่อวันมีค่าค่อนข้างต่ำ และค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อที่ค่อนข้างสูง เนื่องมาจากเป็นการทดลองเลี้ยงในตู้กระจกที่มีพื้นที่น้อย และมีการปล่อยที่หนาแน่น ส่งผลให้ปลามีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ อัตราการเจริญเติบโตต่อวันต่ำ และมีค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อที่สูง ประกอบกับปลากาดำเป็นปลาที่มีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างช้า การเลี้ยงต้องใช้ระยะเวลาในการเลี้ยงที่นานกว่าจะได้ขนาดตามที่ตลาดต้องการ เมื่อเทียบกับปลาชนิดอื่นในกลุ่มเดียวกัน (Ng *et al.*, 2008) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรต และโปรตีน พบว่าในอาหารที่มีการเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่ระดับ 2 เปอร์เซ็นต์ มีค่าดังกล่าวสูงกว่ากลุ่มทดลองอื่นทั้งสองค่า และเมื่อพิจารณาประกอบกับค่าประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรต และโปรตีนของลำต้นใต้ดินของบัวหิมะ พบว่ามีค่าสูงกว่าวัตถุดิบ

ชนิดอื่นเช่นกัน จึงส่งผลให้ปลามีค่าการเจริญเติบโต ที่ดีกว่า

ตารางที่ 4 การเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน และอาหารของปลากาดำที่ได้รับอาหารเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่ระดับต่างๆ เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์

พารามิเตอร์	ระดับการเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะในอาหาร (เปอร์เซ็นต์)				*p* - value
	0	2	4	6	
น้ำหนักสุดท้าย (กรัม/ตัว)	8.38 ± 0.26 [b]	9.57 ± 0.03 [a]	8.42 ± 0.60 [b]	8.82 ± 0.13 [ab]	0.0364
ความยาวสุดท้าย (เซนติเมตร/ตัว)	8.10 ± 0.10 [c]	8.85 ± 0.07 [a]	8.76 ± 0.15 [ab]	8.40 ± 0.26 [bc]	0.0188
น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม/ตัว)	5.26 ± 0.25 [c]	6.45 ± 0.07 [a]	6.00 ± 0.42 [ab]	5.56 ± 0.25 [bc]	0.0133
ความยาวที่เพิ่มขึ้น (เซนติเมตร/ตัว)	1.76 ± 0.14 [b]	2.51 ± 0.07 [a]	2.42 ± 0.15 [a]	2.21 ± 0.07 [a]	0.0058
การเจริญเติบโตจำเพาะ (เปอร์เซ็นต์/วัน)	0.82 ± 0.02 [c]	0.94 ± 0.00 [a]	0.89 ± 0.03 [ab]	0.85 ± 0.02 [bc]	0.0120
อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (กรัม/ตัว/วัน)	0.04 ± 0.00 [a]	0.05 ± 0.01 [a]	0.05 ± 0.01 [a]	0.05 ± 0.00 [a]	0.0012
อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ	4.28 ± 0.05 [b]	4.51 ± 0.07 [ab]	4.82 ± 0.14 [a]	4.63 ± 0.17 [a]	0.0492
ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน	0.64 ± 0.03 [a]	0.61 ± 0.02 [a]	0.60 ± 0.04 [a]	0.62 ± 0.04 [a]	0.0388

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกันตามแนวนอนแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม/ตัว) = น้ำหนักเมื่อสิ้นสุดการทดลอง - น้ำหนักเริ่มต้นการทดลอง, ความยาวที่เพิ่มขึ้น (เซนติเมตร/ตัว) = ความยาวเมื่อสิ้นสุดการทดลอง - ความยาวเริ่มต้นการทดลอง, การเจริญเติบโตจำเพาะ (เปอร์เซ็นต์/วัน) = ((ln น้ำหนักเมื่อสิ้นสุดการทดลอง - ln น้ำหนักเริ่มต้นการทดลอง)/ระยะเวลาที่เลี้ยง) × 100, อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (กรัม/ตัว/วัน) = (น้ำหนักเมื่อสิ้นสุดการทดลอง – น้ำหนักเริ่มต้นการทดลอง)/ระยะเวลาที่เลี้ยง, อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ = น้ำหนักอาหารที่ให้/น้ำหนักสัตว์ น้ำที่เพิ่ม, ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน = น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้น/น้ำหนักโปรตีนที่ปลากิน

นอกจากนี้ด้วยคุณสมบัติของลำต้นใต้ดินของบัวหิมะที่อุดมไปด้วยกรดอะมิโน แร่ธาตุหลักและธาตุรองอีกหลายชนิด โดยเฉพาะแคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก สังกะสี และซีลีเนียม ซึ่งมีอยู่ในสัดส่วนที่สูง ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มการเจริญเติบโตของร่างกายของสัตว์ได้ นอกจากนี้ลำต้นใต้ดินของบัวหิมะยังช่วยในเรื่องการทำงานของกระเพาะอาหารและลำไส้ ลำต้นใต้ดินของบัวหิมะยังเป็นแหล่งของ fructooligosaccharides (Goto *et al*., 1995) และเต็มไปด้วยสารประกอบ phenolic, chlorogenic acid และ

caffeic acid (Takenaka *et al*., 2003) นอกจากนี้ยังช่วยในเรื่องของสุขภาพ รวมไปถึงการมีคุณสมบัติเป็น prebiotic, antidiabetic, antioxidative และ antimicrobial (Ojansivu *et al*., 2011) David *et al*. (2012) ได้ศึกษาคุณสมบัติของ fructooligosaccharides จากลำต้นใต้ดินของบัวหิมะในการเป็นพรีไบโอติก พบว่า สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของ Bifidobacteria และ Lactobacilli เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ในครั้งนี้กับการทดลองของ Kim *et al*. (2019) ที่ทำการทดลองเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะ ขิง และบลูเบอรี่ในอาหารสำหรับปลา olive flounder ระยะวัยรุ่น พบว่าการเจริญเติบโตของปลาไม่แตกต่างกันในแต่ละกลุ่มทดลอง แต่อัตราการรอดตายสะสมของปลาจะน้อยกว่าในกลุ่มควบคุม ซึ่งผลที่ได้แตกต่างจากการทดลองที่พบในปลากาดำครั้งนี้ ทั้งนี้เนื่องจากในการเติบโตที่ชัดเจนมีการเสริมที่ 2 เปอร์เซ็นต์ จึงส่งผลให้เห็นการเจริญเติบโตที่ชัดเจนมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Akrami *et al*. (2013) ได้ทำการศึกษาผลของอาหารเสริม fructooligosaccharide ต่อการเจริญเติบโต อัตรารอด และจำนวนของ lactobacillus bacteria และภูมิคุ้มกันในลูกปลาสเตอร์เจียน (*Acipenser stellatus*) ผลการศึกษาพบว่าการใช้ fructooligosaccharide 1 เปอร์เซ็นต์ สามารถเพิ่มการเจริญเติบโต เป็นประโยชน์ต่อแบคทีเรียในลำไส้ และสามารถกระตุ้นภูมิคุ้มกันในลูกปลาสเตอร์เจียนได้ และสอดคล้องกับการทดลองของ Kim *et al*. (2017) ที่ทำการทดลองเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะ ขิง และบลูเบอรี่ในอาหารสำหรับปลา rockfish ระยะวัยรุ่น พบว่าผลที่ได้คล้ายกับการทดลองในครั้งนี้คือการเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะในสูตรอาหารมีผลให้ปลา rockfish มีการเจริญเติบโตดีกว่ากลุ่มทดลองอื่น ถึงแม้จะทำการเสริมเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ ก็ตาม

สรุป

จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่าเอนไซม์ในกระเพาะอาหาร และลำไส้ของปลากาดำสามารถย่อยลำต้นใต้ดินของบัวหิมะได้ดี โดยมีค่าประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตสูงที่สุด (p<0.05) และมีค่าประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนมีค่าที่สูง และใกล้เคียงกับปลาป่น (p>0.05) ส่วนการเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะในสูตรอาหารเลี้ยงปลา-กาดำ พบว่าที่ระดับ 2 เปอร์เซ็นต์ ค่าประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรต และโปรตีนมีค่าสูงที่สุด โดยที่ค่าประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตไม่แตกต่างจากชุดควบคุม (p>0.05) ส่วนค่าประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนแตกต่างจากชุดควบคุม (p<0.05) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการเจริญเติบโต โดยการเสริมลำต้นใต้ดินของบัวหิมะในสูตรอาหารสำหรับเลี้ยงปลากาดำที่ระดับ 2 เปอร์เซ็นต์ เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่าการเจริญเติบโตดีที่สุด ซึ่งปลาสามารถใช้ประโยชน์จากอาหารได้ดีที่สุด

เอกสารอ้างอิง

Akrami, R., Iri, Y., Rostami, H.K. and Mansour, M.R. 2013. Effect of dietary supplementation of fructooligosaccharide (FOS) on growth performance, survival, lactobacillus bacterial population and hemato-immunological parameters of stellate sturgeon (*Acipenser stellatus*) juvenile. **Fish & Shellfish Immunology** 35: 1235-1239.

Andrade, E.F., Leone, R.S., Ellendersen, L.N. and Masson, M.L. 2014. Phenolic profile and antioxidant activity of extracts of leaves and flowers of yacon (*Smallanthus sonchifolius*). **Industrial Crops and Product** 62: 499-506.

Chitmanat, C. 2008. **Fish disease handbook.** 1st ed. Maejo University press, Chiangmai. (in Thai)

Chuapoehuk, W. 2000. **Aquatic animal nutrition and feeding.** 2nd ed. Kasetsart University Press, Bangkok. (in Thai)

David, C., Indira, B.P., Rosana, C., Ana, A.G., Giuliana, N. and Romina, P. 2012. Prebiotic effects of yacon (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. & Endl), a source of fructooligosaccharides and phenolic compounds with antioxidant activity. **Food Chemistry** 135(3): 1592-1599.

Dawood, M.A.O., Koshio, S., Ishikawa, M. and Yokoyama, S. 2015. Interaction effects of dietary supplementation of heat-killed *Lactobacillus plantarum* and β-glucan on growth performance, digestibility and immune response of juvenile red sea bream, *Pagrus major*. **Fish & Shellfish Immunology** 45: 33-42.

De Silva, S.S. and Anderson, T.A. 1994. **Fish nutrition in Aquaculture.** 1st ed. Chapman & Hall, London.

Goto, K., Fukai, K., Hikida, J., Nanjo, F. and Hara, Y. 1995. Isolation and structural analysis of oligosaccharides from yacon (*Polymnia sonchifolia*). **Bioscience, Biotechnology and Biochemistry** 59: 2346-2347.

Ingram, B.A. and Lasasimma, O. 2008. Production of *Cirrhinus molitorella* and *Labeo chrysophekadion* for culture based fisheries development in Lao PDR. Part 1 Captive spawning. **Aquaculture Asia** 13(2): 24-31.

Kim, J., Ki, W.L., Hae, S.J., Most, W.R.A., Hee, S.K., Taeho, K., Mun-Gyeong, K. and Sung, H.C. 2019. Oral administration effect of yacon, ginger and blueberry on the growth, body composition and plasma chemistry of juvenile olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) and immunity test against *Streptococcus iniae* compared to a commercial probiotic, *Lactobacillus fermentum*. **Aquaculture Reports** 15: 1-7.

Kim, H.S., Lee, K.W., Jung, H.S., Kim, J.A., Yun, S.H. and Cho, M.K. 2017. Effects of dietary inclusion of yacon, ginger and blueberry on growth, body composition and challenge test of juvenile rockfish (*Sebastes schlegeli*) against *Edwardsiella tarda*. **Aquaculture Nutrition** 24: 1048-1055.

Ng, W.K., Abdullah, N. and De Silva, S.S. 2008. The dietary protein requirement of the Malaysian mahseer, *Tor tambroides* (Bleeker) and the lack of protein-sparing action by dietary lipid. **Aquaculture** 284(1-4): 201-206.

Ojansivu, I., Ferreira, C.L. and Salminen, S. 2011. Yacon, a new source of prebiotic oligosaccharides with a history of safe use. **Trends in Food Science & Technology** 22: 40-46.

Rainboth, W.J. 1996. **Fishes of the Cambodian Maekong.** 1st ed. Food and Agriculture Organization of the United Nations press, Rome.

Roghieh, S., Seyed, H., Hoseinifar, H.V.D. and Maryam, D. 2017. The effects of dietary Myrtle (*Myrtus communis*) on skin mucus immune parameters and mRNA levels of growth, antioxidant and immune related genes in zebrafish (*Danio rerio*). **Fish & Shellfish Immunology** 66: 264-269.

Rungruangsak-Torrissen, K., Rustad, A., Sunde, J., Eiane, S.A., Jensen, H.B., Opstvedt, J., Nygard, E., Samuelsen, T.A., Mundheim, H., Luzzana, U. and Venturini, G. 2002. *In vitro* digestibility based on fish crude enzyme extract for prediction of feed quality in growth trials. **Science of Food and Agriculture** 82: 644-654.

Shengjie, L., Renhui, H., Nagendra, P., Shah, X.T., Yonghua, X. and Hua, W. 2014. Antioxidant and antibacterial activities of exopolysaccharides from *Bifidobacterium bifidum* WBIN03 and *Lactobacillus plantarum* R315. **Dairy Science** 97(12): 7334-7343.

Takenaka, M., Yan, X.J., Ono, H., Yoshida, M., Nagata, T. and Nakanishi, T. 2003. Caffeic acid derivatives in the roots of yacon (*Smallanthus sonchifolius*). **Agricultural and Food Chemistry** 51: 793-796.

Uk-katawewat, S. and Pongchawee, K. 2000. **Taxonomy of Ornamental Fish for Thailand Exports.** 1st ed. Fisheries Department press, Bangkok. (in Thai)

Vidthayanon, C. 2004. **Handbook of Freshwater Fishes.** 1st ed. Bangkoksarakadee press, Bangkok. (in Thai)

การใช้ประโยชน์เศษวัสดุก่อสร้างในคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

The Utilization of Construction Waste in Hollow Non-Load-Bearing Concrete Masonry Unit

ชูเกียรติ ชูสกุล[1] และ ขวัญชีวา หยงสตาร์[2*]

Chookiat Choosakul[1] and Khwanchiwa Yongsata[2*]

Received: 12 August 2020, Revised: 22 February 2021, Accepted: 14 May 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์นำเศษวัสดุก่อสร้างมาผลิตคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก โดยใช้เศษคอนกรีตแทนที่ทราย และเศษกระเบื้องเซรามิคแทนที่หินฝุ่น ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมเท่ากับ 1:5 ทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตบล็อกเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มผช. 779/2548 และ มอก.58/2533 ผลการศึกษาพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) เศษคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าทราย และเศษกระเบื้องเซรามิคมีค่าต่ำกว่าหินฝุ่น พิจารณาคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกพบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้นทำให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกลดลง และความสามารถในการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ในด้านค่ากำลังต้านทานแรงอัดพบว่าคอนกรีตบล็อกที่อัตราส่วนร้อยละ 50 มีความเหมาะสมที่สุดโดยผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มผช.779-2548 และ มอก.58-2533 ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 2.53 เมกะพาสคาล

คำสำคัญ: คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก, วัสดุผสม, เศษวัสดุก่อสร้าง, กำลังต้านทานแรงอัด

---

[1] วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช 80210

[1] College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Srivijaya, Khanom, Nakornsrithammarat 80210, Thailand.

[2] คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง 92150

[2] Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Srivijaya, Sikao, Trang 92150, Thailand.

[*] ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): khwanchiwa.y@rmutsv.ac.th

ABSTRACT

The objective of this study was to reuse construction waste for hollow non-load-bearing concrete masonry unit production. In this study, concrete fragments and ceramic tile fragments were replaced by sand and crushed dust, respectively. The percentages for replacement were 0, 25, 50, 75, and 100 by weight, and ratio of cement to total mass was 1:5. The finished concrete blocks were evaluated in order to compare with Thai Community Product Standards (TCPS) 779/2548 and Thai Industrial Standards Institute (TIS) 58/2533. The results of the study showed that the specific gravity of concrete fragments and ceramic tile fragments were lower than those of sand and crushed dust, respectively. Based on concrete block characteristic, adding more sand and crushed dust can decrease the weight of concrete block and increase water absorption capacity. For compressive strength of concrete, 50% of replacement was the most appropriate and passed TCPS.779/2548 and TIS.58/2533 at 28 days with 2.53 Megapascal (MPa).

Key words: hollow non-load-bearing concrete masonry unit, aggregate, construction waste, compressive strength

บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมก่อสร้างมีการขยายตัวเป็นอย่างมาก อันเนื่องมาจากการขยายตัวของโครงการก่อสร้าง อีกทั้งเกิดจากนโยบายของภาครัฐ ซึ่งส่งผลให้ปริมาณเศษวัสดุก่อสร้างมีปริมาณเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีอาคาร หรือโครงสร้างที่มีการรื้อถอน ทำให้เกิดเศษวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเพิ่มภาระด้านต้นทุนต่อโครงการก่อสร้างด้านการจัดการเศษวัสดุก่อสร้างที่เกิดขึ้น ที่จริงแล้วเศษวัสดุก่อสร้างประเภทนี้หากได้มีการจัดการที่เหมาะสมบางส่วนก็จะสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น

ขยะจากการก่อสร้าง และรื้อถอนในประเทศไทย เฉพาะในพื้นที่กรุงเทพมหานคร การก่อสร้างอาคารส่วนใหญ่จะสร้างขึ้นโดยการทุบรื้อหรือปรับปรุงพื้นที่ที่มีอาคารเดิมอยู่แล้ว ทำให้มีของเสียจากเศษวัสดุเหลือใช้ที่เป็นมูลฝอยจากการก่อสร้างและรื้อถอนสิ่งปลูกสร้างเฉลี่ย 5.81 ตันต่อพื้นที่ขออนุญาตก่อสร้าง 100 ตารางเมตร หรือมีปริมาณขยะจากเศษวัสดุก่อสร้างเฉลี่ย 3,173 ตันต่อวัน ซึ่งถือเป็นปริมาณขยะจำนวนมาก (Environment Department, 2014) นับเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ และต้องหาแนวทางแก้ไขอย่างเร่งด่วน

กระบวนการปรับนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) คือ การนำของเสียหรือเศษวัสดุมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์อีกครั้ง (Reclamation) เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดเศษวัสดุที่เกิดขึ้น นอกจากนั้นยังสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้มากกว่าการนำเศษวัสดุมาจัดการภายหลัง (United State Environment Protection Agency [USEPA], 2017) โดยกระบวนการนี้สามารถนำมาใช้ได้เพื่อลดเศษวัสดุก่อสร้างจากแหล่งกำเนิดได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตสามารถพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดให้มีค่าเทียบเท่าคอนกรีตควบคุมได้ที่อายุ 28 วัน (Rattanachu *et al*., 2015) มอร์ตาร์ปูนฉาบจะมีกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดเมื่อแทนที่ทรายด้วยคอนกรีตเก่าบดละเอียดที่มีขนาดเล็ก

อนุภาคเฉลี่ยในช่วง 0.149-0.297 มม. (Wongsa-nga and Sathonsaowaphak, 2018) เศษเซรามิคผสมในคอนกรีต ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราส่วนที่ให้กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดคือ เศษเซรามิคแทนที่ทรายร้อยละ 2.5 และแทนที่หินร้อยละ 10 ซึ่งมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตควบคุม (Amnuaypornlert, 2017) และคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบเซรามิคมีลักษณะความแข็งแรงเทียบเคียงได้กับคอนกรีตทั่วไป (Senthamarai and Manoharan, 2005) อีกทั้งผลการวิจัยของ Boonseela *et al*. (2019) ชี้ให้เห็นว่าเศษคอนกรีตที่เหลือใช้จากการรื้อถอนงานก่อสร้างในชุมชนสามารถเพิ่มมูลค่าและแปรรูปแผ่นคอนกรีตปูทางเดินสำหรับใช้ในครัวเรือนได้โดยรับน้ำหนักไม่มากนัก

ด้วยปัญหาดังกล่าวข้างต้น และผลจากการนำเศษวัสดุก่อสร้างไปใช้ในงานคอนกรีตด้านต่างๆ จึงมีแนวคิดศึกษาการใช้ประโยชน์มวลรวมจากเศษวัสดุก่อสร้างมาผลิตคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของคอนกรีตบล็อกให้มีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 58-2533 (TIS, 1990) อีกทั้งเป็นการลดปัญหาการกองวัสดุเหลือทิ้งจากงานก่อสร้างที่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตรา SCG โดยมีคุณสมบัติตาม มอก. 15 เล่ม 1 (TIS, 2004) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.12

- มวลรวม (ทราย และหินฝุ่น) จากโรงงานผลิตคอนกรีตบล็อกในอำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช

- เศษคอนกรีต จากการทุบอาคารเก่าในวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ ซึ่งมีค่ากำลังอัดประลัย (Fc') ตามรายการออกแบบ 240 กก./ซม.^{2} (ทรงกระบอก) นำมาทุบและคัดแยกวัสดุแปลกปลอมอื่นๆ คัดแยกขนาดโดยร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ค้างตะแกรงเบอร์ 200

- เศษกระเบื้องเซรามิค รวบรวมจากร้านค้าวัสดุก่อสร้างในอำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช นำมาทุบและบดด้วยวิธีการตอกด้วยค้อนให้มีขนาดใกล้เคียงกับหินฝุ่น

2. อัตราส่วนผสมของคอนกรีตบล็อก

การศึกษาครั้งนี้ในการออกแบบอัตราส่วนส่วนผสมคอนกรีตบล็อกใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ทราย : หินฝุ่น เท่ากับ 1 : 2 : 3 โดยน้ำหนัก (Boonseela *et al*., 2019) ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) คงที่เท่ากับ 0.62 ซึ่งได้จากการทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน American Society for Testing Materials (ASTM) ASTM C230 (ASTM, 2005) แทนที่ทรายด้วยเศษคอนกรีต และแทนที่หินฝุ่นด้วยเศษกระเบื้องเซรามิค ในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้แบบหล่อคอนกรีตบล็อกพิมพ์กลวง (Hollow Block) ขนาดที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ 70 × 190 × 390 มม. ขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกด้วยเครื่องไฮโดรลิก เมื่ออัดขึ้นรูปแล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบ จากนั้นนำคอนกรีตบล็อกไปบ่มในสภาพอากาศปกติ โดยไม่มีการบ่มด้วยน้ำ เพื่อให้เหมือนกับสภาพการผลิตจริง ก่อนที่จะนำไปทดสอบตามระยะเวลาที่ต้องการศึกษา 7, 14 และ 28 วัน

3. ขั้นตอนการทดสอบ

การศึกษาสมบัติทางกายภาพมวลรวม (ทราย, หินฝุ่น, เศษคอนกรีต และเศษกระเบื้องเซรามิค) โดยทำการทดสอบดังนี้

1) ทดสอบความถ่วงจำเพาะโดยใช้มวลรวมตัวอย่างที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated

Surface Dry, SSD) และการดูดซึมน้ำของมวลรวมตาม ASTM C128 (ASTM, 2001a)

2) ทดสอบหน่วยน้ำหนัก และช่องว่างของมวลรวม ตาม ASTM C29 (ASTM, 2001b)

3) ทดสอบขนาดคละของมวลรวม ตาม ASTM C136 (ASTM, 2001c)

ตารางที่ 1 อัตราส่วนส่วนผสมของคอนกรีตบล็อก

ตัวอย่าง	อัตราส่วนผสม (กก./ม.^{3})					
	ซีเมนต์	ทราย	เศษคอนกรีต	หินฝุ่น	เศษกระเบื้อง	น้ำ
Control	330	660	0	990	0	205
CW-25	330	495	165	743	247	205
CW-50	330	330	330	495	495	205
CW-75	330	165	495	247	743	205
CW-100	330	0	660	0	990	205

หมายเหตุ: Control คือ คอนกรีตบล็อกควบคุม

CW-25 คือ คอนกรีตบล็อกผสมเศษวัสดุก่อสร้างแทนที่มวลรวมร้อยละ 25

การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางกลของคอนกรีตบล็อก โดยการทดสอบดังนี้

1) ทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกตัวอย่างตาม มอก.109-2517 (TIS, 1974) ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน

2) ทดสอบหาความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกตัวอย่างตาม ASTM C138 (ASTM, 2011a) ที่อายุ 28 วัน

3) ทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกตัวอย่างตาม มอก.109-2517 (TIS, 1974) ที่อายุ 28 วัน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

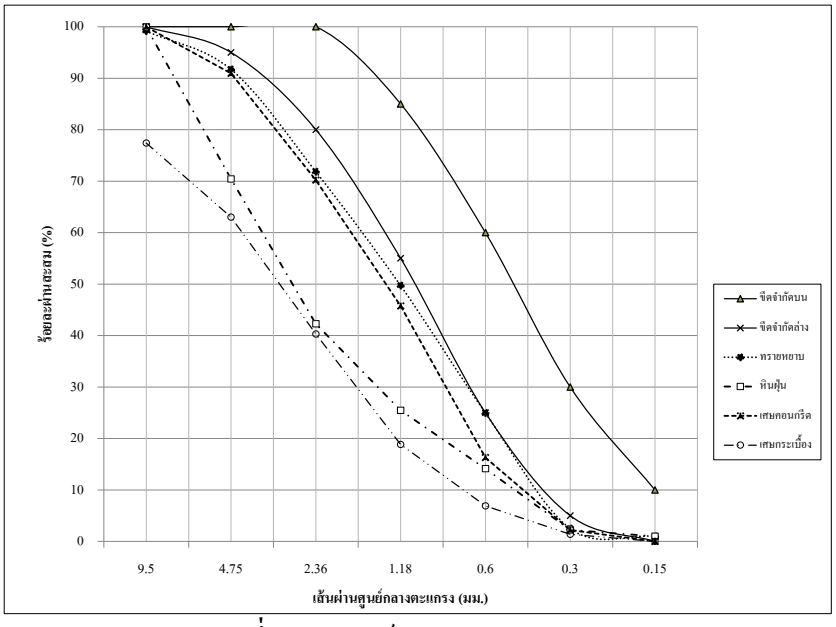
1. สมบัติทางกายภาพของมวลรวม

สมบัติทางกายภาพของวัสดุมวลรวมสำหรับใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม

วัสดุ	ค่าความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.)	ค่าการดูดซึมน้ำ (%)	หน่วยน้ำหนัก (กก./ม.^{3})	โมดูลัสความละเอียด (F.M.)
ทราย	2.58	0.75	1,634	2.60
หินฝุ่น	2.72	1.10	2,065	3.45
เศษคอนกรีต	2.14	5.83	1,590	2.75
เศษกระเบื้องเซรามิค	2.29	5.75	1,471	3.92

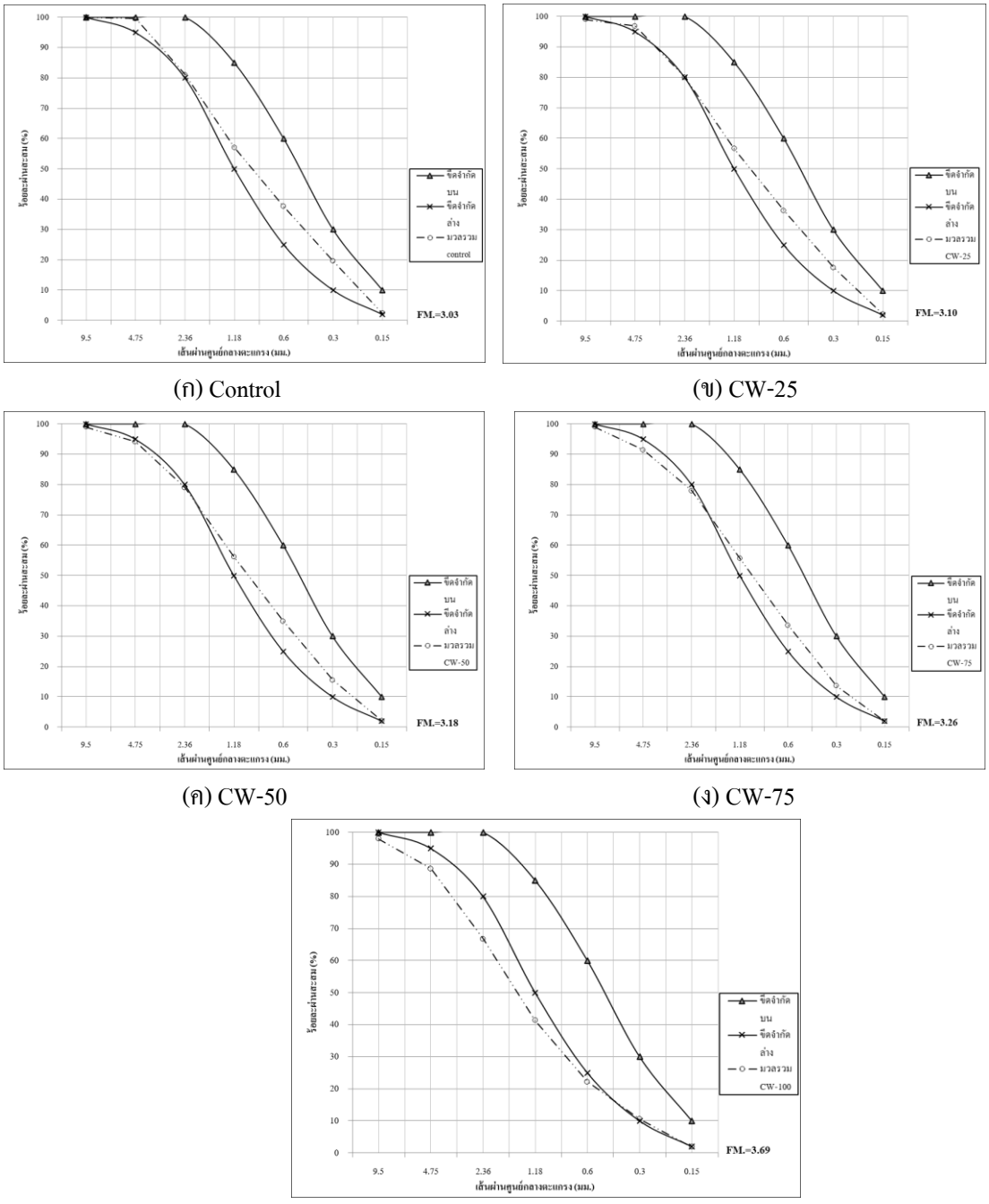
จากตารางที่ 2 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง (ถ.พ.) ของทราย และหินฝุ่นเท่ากับ 2.58 และ 2.72 ตามลำดับโดยมีค่าอยู่ในช่วงมาตรฐานของมวลรวมละเอียดทั่วไป เศษคอนกรีตมีค่า ถ.พ. เท่ากับ 2.14 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Al-Bukhaiti *et al*. (2018) และเศษกระเบื้องเซรามิคมีค่า ถ.พ. เท่ากับ 2.29 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Khamput (2018) ค่าการดูดซึมน้ำของหินฝุ่น เศษคอนกรีต และเศษกระเบื้องเซรามิค มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.10, 5.73 และ 5.75 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่ามวลรวมทางธรรมชาติในท้องถิ่นที่โดยทั่วไปอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5-1 (Chindaprasirt and Jaturapitakkul, 2013) โดยพบว่ามวลรวมจากเศษวัสดุก่อสร้างมีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่ามวลรวมธรรมชาติ เนื่องจากมีปริมาณซีเมนต์เพสต์เก่าหรือมอร์ตาร์เกาะอยู่ที่ผิวจึงทำให้มีการดูดซึมน้ำมากขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Treepong and Thepwong (2020) ในส่วนค่าหน่วยน้ำหนักของทราย และหินฝุ่นเท่ากับ 1,634 และ 2,065 กก./ม.^{3} ตามลำดับ เศษคอนกรีตมีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,590 กก./ม.^{3} ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหน่วยน้ำหนักของทรายร้อยละ 3 ทั้งนี้เนื่องจากซีเมนต์เพสต์ หรือมอร์ตาร์จากเศษคอนกรีตเดิมมีความพรุน (Rattanachu *et al*., 2015) เศษกระเบื้องเซรามิคมีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,471 กก./ม.^{3} มีค่าน้อยกว่าหินฝุ่นประมาณร้อยละ 29 ซึ่งเมื่อนำเศษคอนกรีต และเศษกระเบื้องเซรามิคมาใช้แทนที่มวลรวมในปริมาตรที่เท่ากัน จะส่งผลให้คอนกรีตบล็อกมีน้ำหนักลดลง พิจารณาค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) พบว่าทราย หินฝุ่น เศษคอนกรีต และเศษกระเบื้องเซรามิคมีค่าเท่ากับ 2.60, 3.45, 2.75 และ 3.92 ตามลำดับ ทราย หินฝุ่นและเศษคอนกรีตมีค่า F.M. อยู่ในเกณฑ์ของมวลรวมที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป (2.15-3.45) ส่วนเศษกระเบื้องเซรามิคมีค่าสูง ซึ่งแสดงว่าเศษกระเบื้องเซรามิคมีขนาดค่อนข้างใหญ่ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Higashiyama *et al*. (2012)



ภาพที่ 1 วิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวม

ในส่วนของขนาดคละของทั้งทราย หินฝุ่น เศษคอนกรีต และเศษกระเบื้องเซรามิค ไม่เป็นไปตาม ASTM C33 (ASTM, 2011b) ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับค่า F.M. พิจารณาจากเส้นกราฟ

และความโค้งงอ สรุปได้ว่า ทรายมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ (Uniform Grading) ส่วนหินฝุ่นเศษคอนกรีตและเศษกระเบื้องเซรามิคมีการกระจายตัวแบบขาดช่วง (Gap Grading) กล่าวคือประกอบด้วยขนาดใดขนาดหนึ่งในสัดส่วนที่มากเกินไป แต่หากเมื่อนำมวลรวมทั้ง 4 ชนิดมารวมกัน (Combined Aggregate) ในปริมาณที่พอเหมาะ จะทำให้มวลรวมมีขนาดคละที่ดี ช่องว่างระหว่างมวลรวมมีปริมาณน้อยลง ลดการแยกตัว (Segregation) ของเนื้อคอนกรีตได้ (Choosakul, 2016) โดยผลการวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวมทั้ง 5 อัตราส่วนการผสมดังแสดงในภาพที่ 2



(ก) Control (ข) CW-25

(ค) CW-50 (ง) CW-75

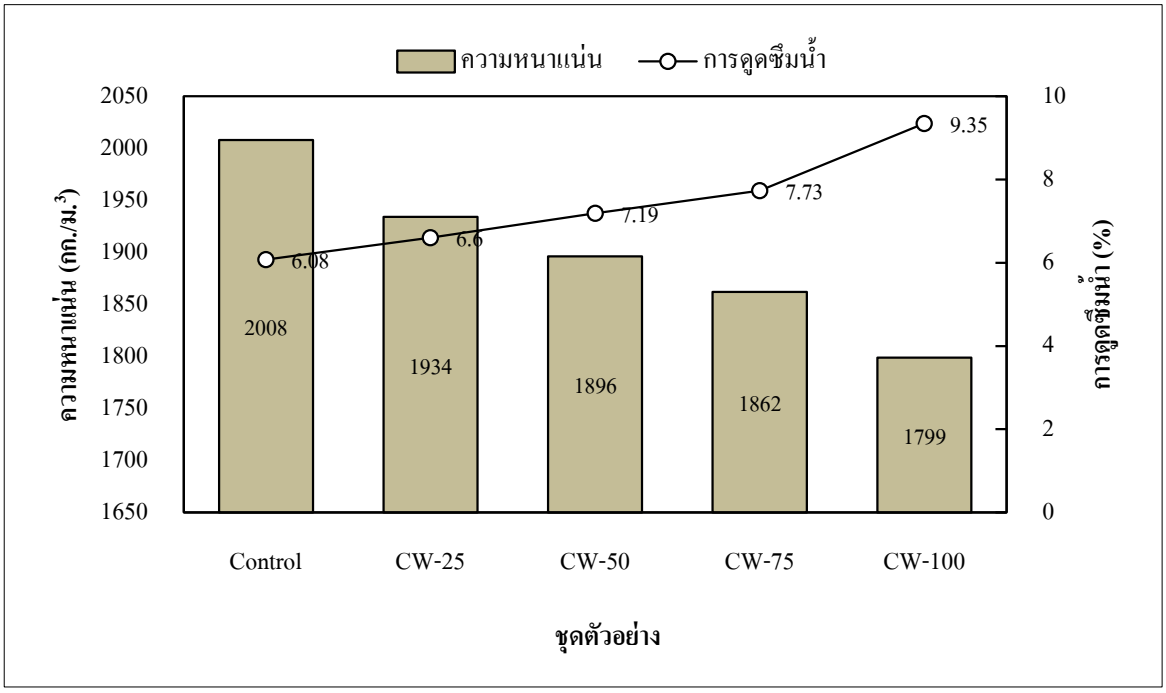
(จ) CW-100

ภาพที่ 2 วิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวมที่อัตราส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 2 พบว่าขนาดคละของมวลรวมควบคุม และมวลรวมผสมเศษวัสดุก่อสร้างร้อยละ 25 เป็นไปตาม ASTM C33 ดังแสดงในภาพที่ 2(ก) และ 2(ข) ส่วนอีก 3 อัตราส่วนไม่เป็นไปตามมาตรฐานดังกล่าว ซึ่งขนาดคละที่ดีจะช่วยให้วัสดุเรียงกันได้แน่น มีช่องว่างน้อย ช่วยให้ทำงานได้ง่าย และปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้จะลดลง (Chindaprasirt and Jaturapitakkul, 2013) พิจารณาค่า F.M. พบว่า สอดคล้องกับขนาดคละ โดยมวลรวมของ CW-100 จะมีความหยาบมากที่สุด ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมมวลรวมที่มีความหยาบสูงจะทำให้คอนกรีตมีความกระด้างสูงและความต้านทานต่อการเสียดสีต่ำ

2. ผลการทดสอบสมบัติของคอนกรีตบล็อก

1) ค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกกับอัตราส่วนของเศษวัสดุก่อสร้าง

ค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกที่อายุบ่ม 28 วัน ตามภาพที่ 3 พบว่าแนวโน้มความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเศษวัสดุก่อสร้าง (คอนกรีตบล็อกทั่วไปมีความหนาแน่น 1,700-2,100 กก./ม.^{3}) สอดคล้องกับขนาดคละหรือการกระจายตัวที่เหมาะสมของมวลรวม รวมทั้งสาเหตุจากเศษวัสดุก่อสร้างมีค่า ถ.พ. และมีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำกว่ามวลรวมปกติ ดังนั้นเมื่อขึ้นรูปเป็นก้อนคอนกรีตบล็อกที่เท่ากัน จึงมีผลทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกลดลง โครงสร้างของคอนกรีตบล็อกที่ผสมเศษวัสดุก่อสร้างมากขึ้นจึงเกิดช่องว่างอากาศมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ของเศษวัสดุก่อสร้างเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยความหนาแน่นลดลงเฉลี่ยร้อยละ 3 ต่อการเพิ่มขึ้นของเศษวัสดุก่อสร้างร้อยละ 25 ส่วนค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกพบว่าเมื่อเพิ่มร้อยละของการแทนที่มวลรวมด้วยเศษวัสดุก่อสร้างค่า

การดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ก็เนื่องจากเศษวัสดุก่อสร้างมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่ามวลรวมปกติเมื่อนำไปผสมเป็นมวลรวมในคอนกรีตบล็อกจึงทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกสูงขึ้นตามไปด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rattanachu *et al.* (2015) และ Khamput (2017) โดยค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกผสมเศษวัสดุก่อสร้างทุกอัตราส่วนการผสมอยู่ภายในเกณฑ์ มอก. 58-2533 (TIS, 1990) กำหนดไว้คือไม่เกินร้อยละ 25

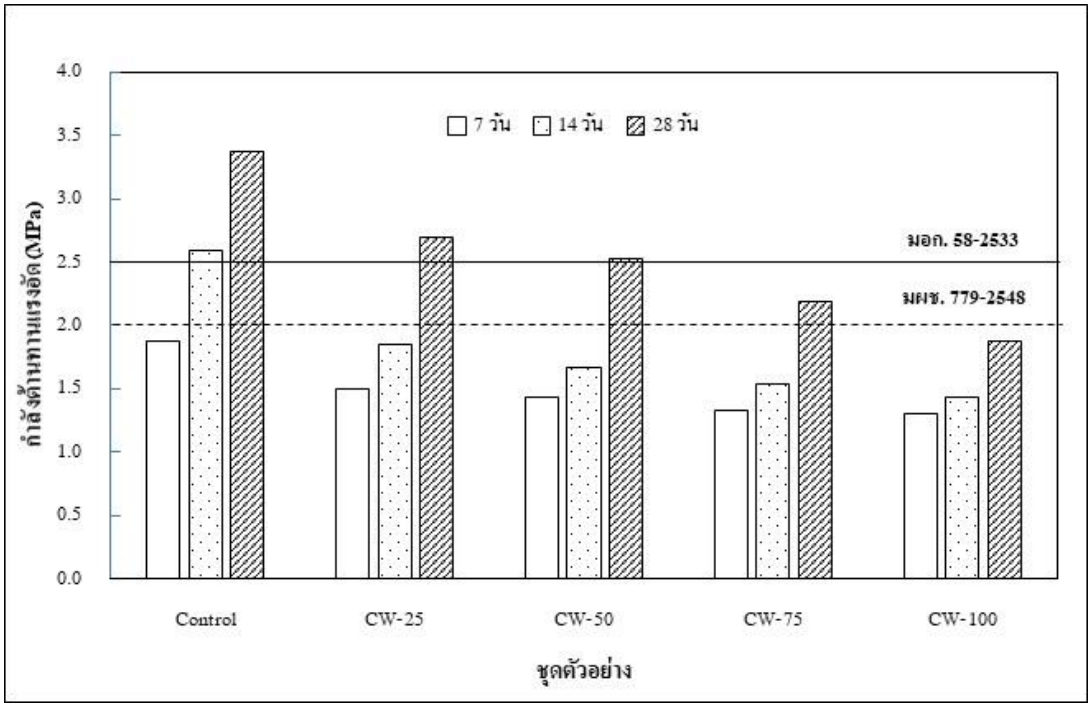
2) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อก

ผลการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มของคอนกรีตบล็อก กล่าวคือ คอนกรีตบล็อกจะพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้น ซึ่งผลลัพธ์ของปฏิกิริยานี้จะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตบล็อก และ C-S-H จะมากเพิ่มขึ้นเมื่อคอนกรีตบล็อกมีอายุการบ่มมากขึ้น (Chindaprasirt and Jaturapitakkul, 2013) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเศษวัสดุก่อสร้างแทนที่มวลรวมจะส่งผลให้กำลังต้านทานแรงอัดมีค่าลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเศษวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากเศษวัสดุก่อสร้างมีค่า ถ.พ. และหน่วยน้ำหนักต่ำกว่ามวลรวมปกติ รวมถึงเศษคอนกรีตมีมอร์ตาร์ติดอยู่ที่ผิวซึ่งมีความพรุนสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wagih *et al.* (2013) และเศษกระเบื้องเซรามิคมีความพรุนสูง มีผิวเรียบ และมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมสูงกว่ามวลรวมปกติ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Senthamarai and Manoharan (2005) อีกทั้งการดูดซึมน้ำของเศษวัสดุก่อสร้างที่มีค่าสูง ทำให้ปริมาณน้ำในคอนกรีตหายไป ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์และส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต (Sukontasukkul, 2013)

ตารางที่ 3 กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อก

ตัวอย่าง	กำลังต้านทานแรงอัด (MPa)(ร้อยละ)		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
Control	1.88 (100)	2.59 (100)	3.37 (100)
CW-25	1.50 (80)	1.85 (71)	2.70 (80)
CW-50	1.44 (77)	1.67 (64)	2.53 (75)
CW-75	1.33 (71)	1.54 (59)	2.19 (65)
CW-100	1.31 (70)	1.44 (56)	1.88 (56)

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดกับ มผช. 779-2548 (TCPS, 2005) และ มอก.58-2533 (TIS, 1990) ซึ่งกำหนดค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกเฉลี่ย 5 ก้อนที่อายุบ่ม 28 วัน ต้องไม่น้อยกว่า 2 และ 2.5 เมกะพาสคาล ตามลำดับ พบว่าคอนกรีตบล็อกควบคุม และคอนกรีตบล็อกผสมเศษวัสดุก่อสร้างร้อยละ 25 และ 50 ผ่านทั้งสองเกณฑ์มาตรฐาน โดยคอนกรีตบล็อกผสมเศษวัสดุก่อสร้างร้อยละ 75 ผ่านเฉพาะเกณฑ์ มผช.779-2548 (TCPS, 2005) และคอนกรีตบล็อกผสมเศษวัสดุก่อสร้างร้อยละ 100 ไม่ผ่านทั้งสองเกณฑ์มาตรฐาน ดังปรากฏตามภาพที่ 4



ภาพที่ 4 กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกเปรียบเทียบกับ มผช.779-2548 และ มอก.58-2533

สรุป

ผลการศึกษาการนำเศษวัสดุก่อสร้างประเภทเศษคอนกรีต และเศษกระเบื้องเซรามิคมาแทนที่มวลรวมในการผลิตคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก ตาม มอก.58-2533 (TIS, 1990) ในครั้งนี้ สรุปได้ว่า เมื่อใช้เศษวัสดุก่อสร้างในส่วนผสมของคอนกรีตบล็อก ส่งผลให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดลดลง และค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อกควบคุม แต่จะมีคุณสมบัติที่ดีคือ ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกจะลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับ มผช. 779-2548 (TCPS, 2005) และ มอก.58-2533 (TIS, 1990) พบว่าคอนกรีตบล็อกผสมอัตราส่วนเศษวัสดุก่อสร้างแทนที่มวลรวมร้อยละ 50 เหมาะสมมากที่สุดในการศึกษาครั้งนี้ โดยมีกำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 2.53 เมกะพาสคาล ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1,896 กก. /ม.^{3} และค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 7.19

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ และคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่อนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์ และห้องทดสอบ และขอบคุณ นายยศกร เกิดหนู และนายภาณุวัฒน์ แต่งสวน ทีมงานวิจัยที่ช่วยเก็บข้อมูลการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Al-Bukhaiti, K.M., Hassan, M., Hamzah, A., Zaidi, K. and Ali, A. 2018. Study the Recycling and Use of Construction Waste in Concrete Mixtures in Yemen. **International Journal of Scientific & Engineering Research** 9(3): 1152-1154.

Amnuaypornlert, S. 2017. A Study of Property Compressive Strength and Bending Strength

of Concrete Mixed with Ceramic Fragments. **Kasalongkham Research Journal** 11(3): 279-291. (in Thai)

ASTM. 2001a. ASTM C128. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 04.02, Philadelphia.

ASTM. 2001b. ASTM C29. Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregates. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 04.02, Philadelphia.

ASTM. 2001c. ASTM C136. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 04.02, Philadelphia.

ASTM. 2005. ASTM C203. Standard Specification for Flow Table for Use in Test of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 04.01, Philadelphia.

ASTM. 2011a. ASTM C138. Standard Test Method for Density ("Unit Weight"), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 04.02, Philadelphia.

ASTM. 2011b. ASTM C33. Standard Specification for Concrete Aggregates. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 04.02, Philadelphia.

Boonseela, M., Kheefah, P., Butakhian, P., Geunram, R. and Ritdej, S. 2019. The Recycle Demolished Concrete from Community Construction Sites to be used as Processed Concrete Sheets for Pavement. **Journal of Industrial Technology Buriram Rajabhat University** 9(2): 82-90. (in Thai)

Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C. 2013. **Cement Pozzolan and Concrete.** 7th ed. Thai Concrete Association, Bangkok. (in Thai)

Choosakul, C. 2016. **Concrete Technology Theory and Practice.** Triple Group Co.,Ltd., Bangkok. (in Thai)

Environment Department. 2014. **Provide construction waste disposal services Open for free.** Available Source: http://203.155.220.174/modules. php?name= activeshow_mod&file=article& asid=685, November 6, 2014. (in Thai)

Higashiyama, H., Yagishita, F., Sano, M. and Takahashi, O. 2012. Compressive Strength and Resistance to Chloride Penetration of Mortar using Ceramic Waste as Fine Aggregate. **Construction and Building Materials** (26): 96-101.

Khamput, P. 2017. Hollow Non-Load-Bearing Concrete Block Products from Fragments of Ceramic Tiles, pp. 79-84. *In* **Proceedings of the 22nd National Convention on Civil Engineering.** Rajamangala University of Technology Isan, Suranaree University of Technology, The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The king's Patronge, Nakhon Ratchasima. (in Thai)

Khamput, P. 2018. **Research Report on Hollow Non -Load-Bearing Concrete Block Products from Fragments of Ceramic Tiles for Small and Medium Enterprises.** Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)

Rattanachu, P., Premruetha, K., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. 2015. Effects of Ground Fly Ash on Compressive Strength and Durability of Recycled Aggregate Concretes. **Princess of Naradhiwas University Journal** 7(1): 92-105. (in Thai)

Senthamarai, R.M. and Manoharan, P.D. 2005. Concrete with ceramic waste aggregate. **Cement & Concrete Composites** 27(9-10): 910-913.

Sukontasukkul, P. 2013. **Concrete.** 2nd ed. Wankawee Publishing, Pathumthani. (in Thai)

TCPS. 2005. TCPS. 779-2005. Thai Industrial Standards Institute, Community Production Standards for Hollow Block Non-Load-Bearing. Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)

TIS. 1974. TIS. 109-1974. Thai Industrial Standards Institute, Standard for Sampling and Testing Concrete Masonry Unit. Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)

TIS. 1990. TIS. 58-1990. Thai Industrial Standards Institute, Standards for Hollow Non-Load-Bearing Concrete Masonry Unit. Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)

TIS. 2004. TIS. 15-2004. Thai Industrial Standards Institute, Portland Part 1 Specification. Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)

Treepong, K. and Thepwong, R. 2020. A Study of Water Permeability on Porous Concrete Using Recycle Coarse Aggregates, pp. MAT13-1-MAT13-7. *In* **Proceedings of the 25th National Convention on Civil Engineering.** The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The king's Patronge, Burapha University, Rambhai Barni Rajabhat University, Kasetsart University, Chonburi. (in Thai)

United State Environment Protection Agency [USEPA]. 2017. **Waste Minimization Opportunity Assessment Manual.** USEPA, Ohio.

Wagih, A.M., El-Karmoty, H.Z., Ebid, M. and Okba, S.H. 2013. Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. **Housing and Building National Research Center Journal** 9(3): 193-200.

Wongsa-nga, S. and Sathonsaowaphak, A. 2018. Optimum Usage of Recycle Concrete with Different Particle Size for Compressive Strength of Mortar Plastering. **Srinakharinwirot University (Journal of Science and Technology)** 10(19): 136-143. (in Thai)

การยกระดับความงอกและการเจริญเติบโตของต้นกล้าบักวีต โดยการเคลือบเมล็ดร่วมกับธาตุอาหารพืชและสารเคมีป้องกันเชื้อรา

Enhancement of Germination and Seedling Growth of Common Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) by Seed Coating with Plant Nutrient and Fungicide

พีรพันธ์ ทองเปลว จักรพงษ์ กางโสภา และ เนตรนภา อินสลุด*

Pheeraphan Thongplew, Jakkrapong Kangsopa and Nednapa Insalud*

Received: 26 August 2020, Revised: 20 December 2020, Accepted: 5 February 2021

บทคัดย่อ

บักวีตสามารถปลูกได้ดีในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำและเกษตรกรนิยมปลูกบักวีตด้วยวิธีการโรยเมล็ดเป็นแถวหรือหว่านกระจายไปทั่วแปลง แต่การปลูกด้วยวิธีการดังกล่าวมักจะพบปัญหาการงอกและการเจริญเติบโตของต้นกล้าไม่สม่ำเสมอ และการเข้าทำลายของโรคในระยะต้นกล้า จากปัญหาดังกล่าวจึงได้แก้ปัญหาโดยการใช้เทคโนโลยีการเคลือบเมล็ดพันธุ์มาใช้เพื่อยกระดับคุณภาพเมล็ดพันธุ์ให้ดีขึ้นและมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อยที่สุด งานทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเคลือบเมล็ดร่วมกับธาตุอาหารและสารเคมีป้องกันเชื้อรา และติดตามความงอกและการเจริญเติบโตของต้นกล้าบักวีต ดำเนินการทดลองที่ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์และห้องปฏิบัติการสรีรวิทยาพืชไร่ สาขาวิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ซึ่งกรรมวิธีการเคลือบ 8 กรรมวิธี ประกอบไปด้วย เมล็ดไม่เคลือบ (T1), เมล็ดเคลือบ Carboxylmethyl cellulose 0.1 เปอร์เซ็นต์ (CMC) (T2), เมล็ดเคลือบร่วมกับ NH_4NO_3, NaH_2PO_4, KCl ที่อัตรา 0.384 กรัม (T3), 0.512 กรัม (T4) และ 0.104 กรัม (T5) ตามลำดับ และเมล็ดเคลือบร่วมกับ NH_4NO_3, NaH_2PO_4, KCl ที่อัตรา 0.384 กรัม ร่วมกับ Metalaxyl 2.0 g.ai. (T6), 0.512 กรัม ร่วมกับ Metalaxyl 2.0 g.ai. (T7) และ 0.104 g. ร่วมกับ Metalaxyl 2.0 g.ai. (T8) ตามลำดับ จากการศึกษา พบว่า การเคลือบเมล็ดด้วย KCl อัตรา 0.104 กรัม เพิ่มอัตราการงอกของเมล็ดขึ้น 14% เมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ ส่วนการตรวจสอบในสภาพเรือนทดลองแสดงให้เห็นว่าการเคลือบเมล็ดด้วย carboxymethyl cellulose (CMC) และ NaH_2PO_4 0.384 กรัม ร่วมกับ Metalaxyl 2.0 g.ai. มีความงอกสูงที่สุดและมีแตกต่างกันในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ นอกจากนี้การเคลือบเมล็ดด้วย NaH_2PO_4 0.384 กรัม ร่วมกับ Metalaxyl 2.0 g.ai. ยังช่วยส่งเสริมให้ต้นกล้ามีความยาวรากเพิ่มขึ้นจากเดิม 13% ดังนั้นสรุปได้ว่า การเคลือบเมล็ดด้วย NaH_2PO_4 0.384 กรัม เพียงอย่างเดียวจะทำให้ต้นกล้ามีความยาวลำต้น น้ำหนักสดลำต้นต้นกล้า และน้ำหนักแห้งลำต้นต้นกล้าดีมากกว่าเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบอย่างชัดเจนเมื่อตรวจสอบในสภาพเรือนทดลอง

สาขาวิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

Department of Agronomy, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, San Sai, Chiang Mai 50290, Thailand.

* Corresponding author, e-mail: nedins@hotmail.com

คำสำคัญ: คุณภาพเมล็ดพันธุ์, ความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์, การยกระดับคุณภาพเมล็ดพันธุ์, สารออกฤทธิ์

ABSTRACT

Common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) grows well in nutrient-poor soil. Seed sprinkling and sowing are the most popular methods for growing buckwheat. However, with such methods, there are problems with inconstant germination and seedling growth as well as seedling diseases. Consequently, a seed coating is applied to resolve the problem and to enhance seed quality with the lowest impact on the environment. The objectives of this research were (1) to study the results of seed coating with plant nutrients and fungicide and (2) to monitor the germination and seedling growth of common buckwheat. The experiment was conducted at the Seed Technology Laboratory and Field Crop Physiology Laboratory of the Agronomy Program, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, Chiang Mai, Thailand. Eight treatments were applied in this research consisting of non-coated seeds (T1); coated seeds + Carboxymethyl cellulose 0.1% (CMC) (T2); coated seeds + NH_4NO_3, NaH_2PO_4, and KCl at rates of 0.384 g (T3), 0.512 g (T4), and 0.104 g (T5), respectively; and coated seeds + NH_4NO_3, NaH_2PO_4, and KCl at rates of 0.384 g + Metalaxyl 2.0 g.ai. (T6), 0.512 g + Metalaxyl 2.0 g.ai. (T7), and 0.104 g + Metalaxyl 2.0 g.ai. (T8), respectively. The experimental results showed that seeds coated with 0.104 g of potassium chloride (KCl) increased the germination rate significantly by 14% relative to non-coated seeds. The greenhouse results illustrated that seeds coated with carboxymethyl cellulose (CMC) and 0.384 g of monosodium phosphate (NaH_2PO_4) mixed with 2.0 g.ai. of metalaxyl resulted in the highest germination rate, which was significantly different from that obtained from other methods. Furthermore, coating of seeds with 0.384 g of NaH_2PO_4 mixed with 2.0 g.ai. of metalaxyl lengthened the roots of the seedlings by 13%. Thus, it was concluded that seeds coated with 0.384 g of NaH_2PO_4 enhanced germination and increased shoot length in common buckwheat and resulted in higher shoot fresh and dry weight relative to non-coated seeds when tested under greenhouse conditions.

Key words: seed quality, seed vigor, seed enhancement, active ingredient

INTRODUCTION

Common buckwheat is an annual crop that grows well in nutrient-poor soil. It is widely planted in countries in the global temperate zone (Valenzuela and Smith, 2002) and in the northern region of Thailand. Common buckwheat contains various nutrients (Alvarez-Jubete *et al*., 2009), such as protein, flavonoids, and others (Antonio *et al*., 2015). In Thailand, the Rice Department encourages agriculturists to grow common buckwheat after the rice growing season in order to earn extra income (Rice Department, 2017; Insalud *et al*., 2020). Most agriculturists use the seed sprinkling and sowing technique to grow common buckwheat at the appropriate seeding rate and distance. However, these methods experience problems with the germination rate, slow and inconstant seedling growth, dwarfing seedlings, and diseases in the seedlings in a high humidity area (Manitoba Agriculture, 2017), which lead to seed loss. As a result, the provision of seed quality in terms of germination and seed vigor is very significant to agriculturists.

In light of the above problems, a seed coating technique has been applied to enhance the quality of common buckwheat. Seed coating is a method of coating the seed skin with a solution of, for example, a polymer (Siri, 2015). Currently, the cost of seed coating is low because the coating substance can be produced or supplied within Thailand; seed coating is thus a cost-effective solution. Seed coating is a technique wherein the coating is the medium for delivery of active substance such as plant nutrients, growth regulators, or active substances for preventing

diseases and insects that are necessary for germination and seedling growth (Pedrini *et al*., 2017). Siri and Keawmaungklang (2014) revealed that coating cucumber seeds with a phosphorus solution gave greater enhancement of germination and seed vigor relative to uncoated seeds. Similarly, Kucera *et al*. (2005) reported that nitrogen was very crucial for respiration and the nutrient digestion process in the seeds. Additionally, Keawkham *et al*. (2014) discovered that coating cucumber seeds with metalaxyl improved the germination rate, while some active substances coated on the seed surface prevented diseases caused by the soil (Ren *et al*., 2019). With the lower cost of coating and the higher efficiency of growing common buckwheat, this would be an alternative for growing quality economic crops and increasing productivity in the future.

Therefore, this research aimed to study the results of coating seeds with plant nutrients and fungicide, and monitor the germination and seedling growth of common buckwheat to enhance seed quality and increase productivity.

MATERIALS AND METHODS

Common buckwheat Taiwan 01, which was provided from the Phrae Rice Research Center, Division of Rice Research and Development, Rice Department, was used in the experiment, which was conducted in the Seed Technology Laboratory and Field Crop Physiology Laboratory of the Agronomy Program, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, Chiang Mai, Thailand during July 2019 and March 2020.

1. Coating of seeds with plant nutrients and fungicide

The study on common buckwheat seed coating used carboxymethyl cellulose (CMC) as the coating mixed with four active substances, ammonium nitrate (NH_4NO_3), monosodium phosphate (NaH_2PO_4), potassium chloride (KCl), and metalaxyl, per 15 g of common buckwheat for each substance (Table 1). Then, the seeds were coated with JK-01 seed coating equipment, and the seed moisture was minimized after coating by sitting at room temperature for 48 hours before seed quality was tested.

Table 1 Seed coating treatment formulation

Coating substance	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
CMC	-	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %
NH_4NO_3	-	-	0.384 g	-	-	0.384 g	-	-
NaH_2PO_4	-	-	-	0.512 g	-	-	0.512 g	-
KCl	-	-	-	-	0.104 g	-	-	0.104 g
Metalaxyl	-	-	-	-	-	2.0 g.ai	2.0 g.ai	2.0 g.ai

CMC = Carboxymethyl cellulose, NH_4NO_3 = Ammonium nitrate, NaH_2PO_4 = monosodium phosphate, KCl = Potassium chloride, g.ai = Grams of active ingredient, Plant nutrient
Modified from: Kangsopa (2018)

2. Seed quality testing

2.1 Germination test under laboratory conditions: Non-coated seeds and seeds coated with all substances were randomized, 50 seeds to each of four replications, to test for germination between paper (BP). Then, the seeds were placed in a seed germination incubator at alternating temperatures (30 °C for 8 hours and 20 °C for 16 hours). Germinated seeds were counted on Day 4, the (first count) and again on Day 7 (final count) of the culture by evaluating germination according to ISTA (2019).

$$\text{Germination (\%)} = \frac{\text{Number of normal seedlings} \times 100}{\text{Total number of seeds sown}}$$

For the examination of dead seeds, non-germinated seeds that were fresh or had no fungi from the four replications were evaluated, and the number of dead seeds was calculated. For hard seeds, live seeds that could not absorb water were evaluated, the number of seeds in the same condition as before germination was determined for the four replications, and the percentage of hard seeds was calculated. For the examination of abnormal seedlings, the seedlings that had no potential to grow or those with unhealthy roots and shoots from the four replications were evaluated and their percentage calculated.

2.2 Germination test under greenhouse conditions: Non-coated seeds and seeds coated with all substances were randomized, 50 seeds for each of the four replications, to test germination in a nursery tray by using peat moss as a growing medium. During days 4-7, germination was evaluated as in the laboratory test.

2.3 Speed of germination test under laboratory and greenhouse conditions: Non -coated seeds and seeds coated with all substances were randomized, 50 seeds for each of the four replications, from the laboratory and greenhouse. The number of normal germinated seeds and the number of the germination days from the first culture day (first count) until the last day (final count) were counted. The speed of germination was calculated according to the following equation AOSA (1983)

$$\text{Speed of germination (Seedling/days)} = \frac{\text{No. normal seedlings}}{\text{Day of first count}} + \frac{\text{No. normal seedlings}}{\text{Day of final count}}$$

2.4 Radicle emergence test under laboratory conditions: Radicle emergence from the laboratory was randomly evaluated from the four replications. Counting began when the radicle was 2 mm and the percentage calculated according to the following equation:

$$\text{Radicle emergence (\%)} = \frac{\text{Number of germinated roots} \times 100}{\text{Total number of seeds sown}}$$

2.5 Speed of radicle emergence test under laboratory conditions: Counting was conducted daily from Day 1 to Day 3 after the culture of the four replications, 50 seeds for each method.

2.6 Cotyledon emergence and speed of cotyledon emergence test under greenhouse conditions: Cotyledon germination of emergent common buckwheat seedlings for each method for the four replications was randomly evaluated and the percent emergence calculated. To test the speed of emergence, cotyledon germination of emergent buckwheat seedlings for every day from Day 1 to Day 3 after the culture was randomly counted and the speed of emergence calculated.

2.7 Shoot and root length test under laboratory and greenhouse conditions: Shoot and root length at Day 7 of culture in the laboratory were evaluated. For those from the greenhouse, only shoot length was evaluated in the four replications, 10 seedlings for each. Then, the seedlings were randomly evaluated by measuring from the connection of the shoot and root to the tip of the leaf using a ruler with millimeter units. For root length, the measurement was conducted from the end of the root to the connection between the root and the shoot. To evaluate seedling length, the measurement was conducted from the end of root to the tip of the leaf. To evaluate the shoot length of those from the greenhouse, the measurement was conducted from the connection of the shoot to the tip of the leaf.

2.8 Shoot fresh weight and shoot dry weight test under laboratory and greenhouse conditions: Shoot weight was obtained from Item 2.7 to determine shoot

fresh weight. Then, shoots were dried at 72 ^{o}C for 72 hours and weighed to obtain shoot dry weight. In greenhouse conditions, seedlings were weighed to obtain the fresh weight (in milligrams) then dried at the same temperature and duration as in the laboratory test to calculate the shoot dry weight. Of the four replicates, 10 seedlings were examined at a time.

2.9 Data analysis: Seed quality and the change in quality were analyzed using a completely randomized design (CRD). The percentage of the germination was transformed for statistical analysis using an arcsine transformation. If the data were zero, the square root $\sqrt{x+0.5}$ was applied. Means were compared using Duncan's Multiple Range Test (DMRT). Statistical analysis was performed using SAS (Version 9.3).

RESULTS AND DISCUSSION

1.1 Common buckwheat seed quality in the laboratory

After coating of seeds by different methods and quality testing, statistically significant differences were found between dead seeds and hard. Coating of seeds with NH_4NO_3, NaH_2PO_4, and KCl coupled with 2 g of metalaxyl (T6, T7, and T8, respectively) resulted in 150% more dead seeds than leaving seeds uncoated (T1). Seeds coated with NH_4NO_3 (T3) were hard and were statistically different from those treated by other methods, but similar to seeds coated with one coating substance and non-coated seeds. None of the seed coating methods resulted in abnormal seedlings, in contrast to non-coated seeds. In addition, when considering the percentage increase or decrease in hard seeds, coated seeds did not differ significantly from uncoated seeds. A declining trend in hard seeds was also found in coated kernels. The exception was seed coating with NH_4NO_3 0.384 g with hard seeds, which increased by 55% (Table 2).

The evaluation results of common buckwheat seed quality from the laboratory showed that only a few dead seeds were found from each method, but 1%-2% dead seeds were found from those seeds coated with plant nutrients mixed with metalaxyl (T6-T8). Moreover, in seeds coated with NH_4NO_3 at a ratio of 0.384 g, there were many hard seeds that were not different from those coated with one type of coating because Nitric oxide (NO•) is an uncharged, gaseous and lipophilic free radical that can readily diffuses across biological membranes. These free radicals restrict biochemical processes during germination (Arc *et al*., 2013). Consequently, common buckwheat seeds that were coated with nitrogen had more hard seeds than those coated with other substances or non-coated seeds. Furthermore, no methods of seed coating caused any abnormal seedlings. When evaluating the changes in the seeds after the culture, it was found that seeds coated with NH_4NO_3 gave the lowest rate and speed of radicle emergence, which was statistically different from the other methods. Additionally, seeds coated with KCl at a ratio of 0.104 g gave a higher rate of germination, which was statistically different from that of non-coated seeds by 14%. The evaluation results of the speed of radicle emergence showed that seeds coated with 0.104 g of KCl and 0.384 g of NaH_2PO_4 coupled with 2 g.ai. of metalaxyl had more rapid radicle emergence than non-coated seeds (Table 3).

In addition, NH_4^+ from NH_4NO_3 was the source of nitrogen that was absorbed during germination. Nitrogen plays an important role in the respiration and nutrient digestion system in seeds (Kucera *et al*., 2005) (Table 3). As a result, seed growth was better in seeds coated with NH_4NO_3 than in non-coated seeds. This concurred with the observed results of radicle emergence at 48 hours of culture, which showed that coating seeds with an active substance for all methods increased the possibility of root spread and produced a greater number of rootlets than non-coated seeds (Figure 1)

.

Table 2 Dead seed, hard seed, and abnormal seedling percentage of buckwheat seeds after coating with difference types of plant nutrients and fungicide, tested under laboratory conditions.

Treatment[1]	Laboratory condition				
	Dead seed (%)[2]	(%)[4]	Hard seed (%)	(%)	Abnormal seedling (%)
T1	0 b[3]		10.0 ab		12.0
T2	0 b	(0)	9.0 ab	(-10)	7.5
T3	0.5 ab	(+50)	15.5 a	(+55)	10.0
T4	0 b	(0)	7.0 b	(-30)	10.0
T5	0.5 ab	(+50)	6.5 b	(-35)	5.0
T6	1.5 a	(+150)	4.5 b	(-55)	9.0
T7	1.5 a	(+150)	7.5 b	(-25)	6.0
T8	1.5 a	(+150)	5.5 b	(-45)	9.5
Mean	0.69		8.2		8.0
F-test	*		*		ns
CV (%)	34.29		22.9		32.41

ns, *: Not significantly different and significantly different at $p \leq 0.05$ respectively.

[1] T1 = Untreated, T2 = coating with CMC, T3 = coating with NH_4NO_3 0.384 g, T4 = coating with NaH_2PO_4 0.512 g, T5 = coating with KCl 0.104 g, T6 = coating with NH_4NO_3 0.384 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai., T7 = coating with NaH_2PO_4 0.384 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai. and T8 = coating with KCl 0.104 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai.

[2] Data are transformed by square root $\sqrt{x+0.5}$ before statistical analysis.

[3] Means within a column followed by the same letter are not significantly different at $p \leq 0.05$ by DMRT.

[4] The number in parentheses refer to percentage increase (+) and decrease (-) compared with the control.

Table 3 Radicle emergence, speed of radicle emergence (SRE), germination percentage, and speed of germination (SPG) of buckwheat seeds after coating with difference types of plant nutrients and fungicide, tested under laboratory conditions.

Treatment[1]	Laboratory condition							
	Radicle emergence (%)	(%)[4]	SRE (roots/day)	(%)	Germination (%)	(%)	SPG (plants/day)	(%)
T1	82 a[2, 3]		39.50 a		77.0 bc		16.41 b	
T2	81 a	(-1)	39.08 a	(-1)	83.5 a-c	(+9)	17.00 ab	(+4)
T3	66 b	(-20)	30.33 b	(-23)	74.0 c	(-4)	14.53 c	(-11)
T4	80 a	(-2)	36.75 a	(-7)	83.0 a-c	(+8)	15.70 bc	(-4)
T5	84 a	(+2)	38.17 a	(-3)	88.0 a	(+14)	18.69 a	(+14)
T6	82 a	(0)	39.42 a	0	85.0 ab	(+10)	17.38 ab	(+6)
T7	83 a	(+1)	39.67 a	0	85.0 ab	(+10)	18.78 a	(+14)
T8	81 a	(-1)	38.67 a	(-2)	83.5 a-c	(+9)	17.38 ab	(+6)
Mean	80		37.70		82.0		16.98	
F-test	*		**		*		**	
CV(%)	6.67		7.17		7.09		6.8	

*, **: Significantly different at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively.

[1] T1 = Untreated, T2 = coating with CMC, T3 = coating with NH_4NO_3 0.384 g, T4 = coating with NaH_2PO_4 0.512 g, T5 = coating with KCl 0.104 g, T6 = coating with NH_4NO_3 0.384 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai., T7 = coating with NaH_2PO_4 0.384 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai. and T8 = coating with KCl 0.104 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai.

[2] Data were arcsine transformed before statistical analysis, and back transformed data are presented.

[3] Means within a column followed by the same letter are not significantly at $p \leq 0.05$ by DMRT.

[4] Numbers in parentheses refer to the percentage increase (+) and decrease (-) compared with the control.

1.2 Common buckwheat seed quality under greenhouse conditions

When buckwheat seed quality was tested with different seed coating methods and under greenhouse conditions, it was found that seeds coated with 0.512 g of NaH_2PO_4 and 0.104 g of KCl coupled with 2 g.ai. of metalaxyl (T7 and T8, respectively) gave a better result for cotyledon emergence percentage and speed of cotyledon emergence than other methods, with no statistically significant difference from seeds coated with 0.384 g of NH_4NO_3 and 0.104 g of KCl. Moreover, seeds coated with only one coating substance and seeds coated with 0.384 g of NaH_2PO_4 and 2 g.ai. of metalaxyl gave the highest germination percentage (increase 8% from non-coated seeds), which was statistically different from other methods. When the speed of germination was compared, the speed of germination of seeds coated with one coating substance, with 0.384 g of NH_4NO_3 and with 0.384 g of NaH_2PO_4 coupled with 2 g.ai. of metalaxyl, was faster than and statistically different from the non-coated seeds (Table 4).

Table 4 Cotyledon emergence percentage, speed of cotyledon emergence (SCE), germination percentage, and speed of germination (SPG) of buckwheat seeds after coating with difference type of plant nutrient and fungicide, tested under greenhouse condition

Treatment [1]	Greenhouse condition							
	Cotyledon emergence (%)	(%)[4]	SCE (plant/day)	(%)	Germination (%)[2]	(%)	SPG (plants/day)	(%)
T1	19 cd[3]		6.58 c		93 b		16.6 d	
T2	18 d	(-5)	6.25 c	(-5)	99 a	(+6)	18.4 a	(+11)
T3	29 a-c	(+53)	10.42 ab	(+58)	95 b	(+2)	17.8 a-c	(+7)
T4	16 d	(-16)	5.58 c	(-15)	97 b	(+4)	17.4 cd	(+5)
T5	33 ab	(+74)	11.75 ab	(+79)	95 b	(+2)	16.9 d	(+2)
T6	26 bc	(+37)	9.08 bc	(+38)	94 b	(+1)	17.0 cd	(+2)
T7	38 a	(+100)	14.00 a	(+113)	100 a	(+8)	17.9 ab	(+8)
T8	37 a	(+95)	13.42 a	(+104)	94 b	(+1)	17.0 cd	(+2)
Mean	27		9.64		95.88		17.4	
F-test	**		**		**		**	
CV(%)	14.75		25.41		4.11		2.97	

**: Significantly different at $p \leq 0.01$.

[1] T1 = Untreated, T2 = coating with CMC, T3 = coating with NH_4NO_3 0.384 g, T4 = coating with NaH_2PO_4 0.512 g, T5 = coating with KCl 0.104 g, T6 = coating with NH_4NO_3 0.384 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai., T7 = coating with NaH_2PO_4 0.384 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai. and T8 = coating with KCl 0.104 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai.

[2] Data are transformed by the arcsine before statistical analysis and back transformed data are presented.

[3] Means within a column followed by the same letter are not significantly at $p \leq 0.05$ by DMRT.

[4] Numbers in parentheses refer to percentage of increase (+) and decrease (-) compared with the control.

After buckwheat seed coating, considering the results of the experiment under laboratory conditions, it was found that seeds had a lower germination rate than those tested under greenhouse conditions. A possible explanation is that the conditions that occur in the laboratory with a number of factors as a control, such as the cultivation of treated seeds and between paper (BP), may result in various active substances; therefore, the substance adheres to the seed better than in the greenhouse test. As the germination rate was higher in the laboratory than in the greenhouse, the coated seed was subjected to a greater number of different factors, such as the substrate. Moreover, through the watering process, active substances attached to the seeds may have dissolved in the surrounding planting material. Also, fungicide chemical coatings on seeds may be able to dissolve in the substrate area. This gave the seedling roots a greater potential for utilization

of the active ingredient in the greenhouse than in laboratory tests.

The experimental results showed that seeds coated with NaH_2PO_4 at a ratio of 0.512 g with 2 g.ai. of metalaxyl had a higher possibility of cotyledon emergence percentage, speed of cotyledon emergence, germination percentage, and speed of germination than other methods. Phosphorus (P) was the insufficient nutrient for the plants. In general, plants absorb P from the soil in the form of $H_2PO_4^-$ and HPO_4^{2-}, and the amount of the two substances would depend on the pH. Black (1968) reported that at pH 6-7, the amount of P was 50% of the total P, while a pH of 4-6 contained $H_2PO_4^-$ or 100% of Phosphorus in the solution. Simultaneously, at pH 8, $H_2PO_4^-$ was 20% and HPO_4^{2-} was 80% of the total P. However, most plants were unable to utilize such substances because they were separately adhered to clay (Vance *et al.*, 2003), so the seed coating delivered P to contact the seed. It could thus utilize the nutrients promptly after germination, which was useful for the seedlings' growth (Kangsopa and Siri, 2019). Moreover, P is very important to activate phytase activity in the form of orthophosphate from an inositol of phytic acid to form inorganic P together with phytase, which is useful for germination (Debnath *et al*., 2005; Azeke *et al*., 2011). With all the significances of P, some researchers had investigated this matter. For example, Rebafka *et al*. (1993) coated millet seeds with superphosphate, ammonium dihydrogen phosphate ($NH_4H_2PO_4$), monocalcium phosphate Ca $(H_2PO_4)_2$, sodium dihydrogen phosphate, and sodium triphosphate (STP) and found that coating with $(NH_4)H_2PO_4$ resulted in the best growth of the millet seeds. Karanam and Vadez (2010) also added that seeds coated with P were the optimal alternative to promoting the growth of millet seedlings and had positive effects on inflorescence and resulted in higher productivity. Furthermore, Masauskas *et al*. (2008) examined seed coating of malting barley with P and discovered that it helped with the vigor during the seedling phase and growth until the stage of productivity. Moreover, it enhanced the concentration of protein in the seeds, which increased the productivity. Additionally, Soares *et al*. (2016) discovered that P was one of the most important nutrients for soybean. The results of coating soybean with P showed that the shoot dry weight, root dry weight, yield components, and shoot height increased, as well as the root nodules that assist in nitrogen fixation. Importantly, it was noted that growth was more efficient.

2. Changes in common buckwheat seedling growth

2.1 Common buckwheat seedling growth under laboratory conditions

After testing the growth of the common buckwheat seedlings in the laboratory after coating with different methods, it was found that for all coating methods, there was no statistically significant difference in shoot length, seedling length, seedlings fresh weight or dry weight. For the test on the length of the common buckwheat root, it was found that seeds coated with 0.384 g of NaH_2PO_4 and 2 g.ai. of metalaxyl gave better results and were different from seeds coated with one coating substance. However, there was no difference when compared with other methods (Table 5).

The experimental results indicated that the shoot length, seedling length, seedlings fresh weight, and dry weight were similar. The most notable difference was in the change in the growth of the common buckwheat seedlings' roots, which were coated with 0.384 g of NaH_2PO_4 with 2 g.ai. of metalaxyl. This implied that root length was better than those of the non-coated seeds. P had the properties to activate the production of the substance that affected the root's emergence, such as glucose, auxins, ethylene, cytokinin, nitric oxide (NO), and reactive oxygen species (ROS) (Niu *et al*., 2013), so the seeds coated with 0.384 g of NaH_2PO_4 with 2 g.ai. of metalaxyl were likely to have better root growth than other methods. This result was consistent with the report of Zhu and Smith (2001), who compared the level of P of wheat seed and found that seeds with a high level of P showed enhanced root development.

Table 5 Shoot length, root length, seedling length, seedling fresh weight, and seedling dry weight of buckwheat seeds after coating with different types of plant nutrients and fungicide, tested under laboratory conditions

Treatment[1]	Laboratory condition					
	Shoot length (mm)	Root length (mm)	(%)[3]	Seedling length (mm)	Seedling fresh weight (mg)	Seedling dry weight (mg)
T1	101.38	154.33 ab[2]		255.70	1,975	115
T2	110.38	144.23 b	(-7)	254.60	2,015	117
T3	105.73	165.10 ab	(+7)	270.83	2,005	114
T4	106.28	152.68 ab	(-1)	258.95	2,020	120
T5	102.90	155.23 ab	(+1)	258.13	1,920	120
T6	107.20	169.20 ab	(+10)	276.40	1,897	111
T7	107.40	174.83 a	(+13)	282.23	1,962	115
T8	108.00	165.03 ab	(+7)	273.03	2,090	115
Mean	106.16	160.08		266.23	1985	116
F-test	ns	*		ns	ns	ns
CV(%)	6.17	11.4		7.88	8.53	9.03

ns, *: Not significantly different and significantly different at $p \leq 0.05$, respectively.

[1] T1 = Untreated, T2 = coating with CMC, T3 = coating with NH_4NO_3 0.384 g, T4 = coating with NaH_2PO_4 0.512 g, T5 = coating with KCl 0.104 g, T6 = coating with NH_4NO_3 0.384 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai., T7 = coating with NaH_2PO_4 0.384 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai. and T8 = coating with KCl 0.104 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai.

[2] Means within a column followed by the same letter are not significantly at $p \leq 0.05$ by DMRT.

[3] Numbers in parentheses refer to percentage increase (+) and decrease (-) compared with the control.

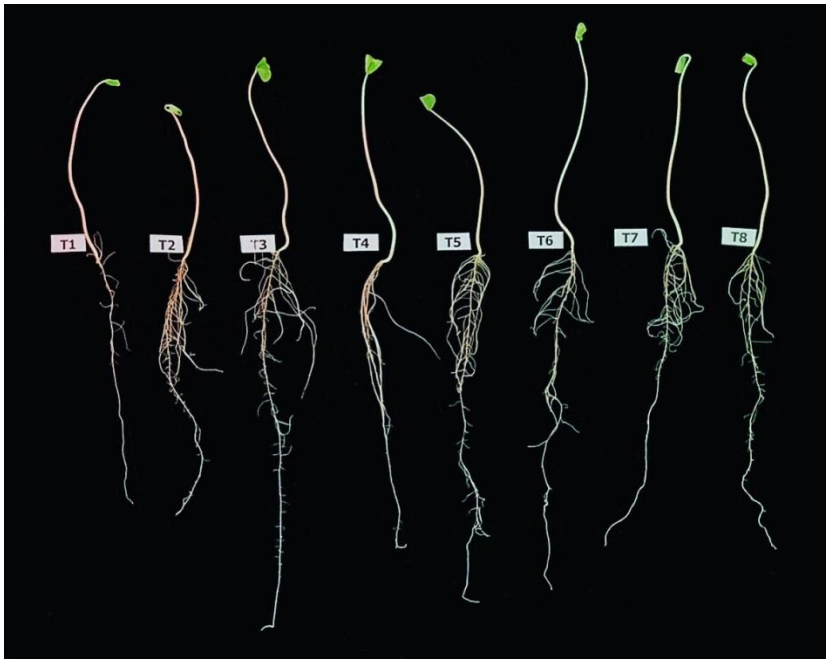


Figure 1 Effect of seed coating with different types of plant nutrients and fungicide on radicle emergence 3 days after planting tested under laboratory conditions. Untreated T1), coating with CMC T2), coating with NH_4NO_3 0.384 g T3), coating with NaH_2PO_4 0.512 g T4), coating with KCl 0.104 g T5), coating with NH_4NO_3 0.384 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai. T6), coating with NaH_2PO_4 0.384 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai. T7) and coating with KCl 0.104 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai. T8).

2.2 Changes in common buckwheat seedling growth in the greenhouse

When seedling length in common buckwheat was examined, it was found that seeds coated with 0.512 g of NaH_2PO_4 had the longest seedling length at 69.10 mm, which was statistically different from other methods. Regarding seedling fresh weight, it was found that seeds coated with 0.512 g of NaH_2PO_4 had higher fresh weight than those of other methods, with no statistically significant difference from coating with 0.384 g of NH_4NO_3. For seedling dry weight, seeds coated with 0.512 g of NaH_2PO_4 had a higher weight than non-coated seeds, which displayed a statistically significant difference (Table 6). Coated seeds in all treatments had a seedling dry weight 32%-67% higher than uncoated seeds.

The experimental results showed that seeds coated with 0.512 g of NaH_2PO_4 gave optimal growth of common buckwheat seedlings. Moreover, the change in shoot fresh and shoot dry weight was greater than that in non-coated seeds. Phosphorus (P) affected root growth during the seedling phase, so the seedlings grew faster (Baas *et al*., 2016) because this delivered the signal related to gibberellins, auxin, cytokinins, ethylene, and strigalactones, including the movement of microRNAs (miRNAs) that were related to the gene affecting cell expansion (White and Veneklaas, 2012). In addition, this helped the root to efficiently absorb potassium (George *et al*., 2016). These results also conformed with the study of Zelonka *et al*. (2005), who discovered that coating barley seeds with P enhanced the physiological activities of the seeds and increased productivity by 3%-91%. Moreover, the seeds absorbed P very well, which prevented them from being affected by environmental conditions. Furthermore, Kangsopa and Siri (2019) found that coating lettuce seeds with P improved seedling growth in terms of shoot length, root length, and seedling fresh and dry weight. Based on the results of seedling growth tested in the laboratory (shoot length, seedling length, seedling fresh weight, and seedling dry weight), although there were no statistically significant differences (Table 5), but the results for some seed quality parameters, including germination potential and seedling strength, were statistically significantly different. However, when considering the purpose of seed coatings combined with plant nutrients and anti-fungal chemicals in this study, metalaxyl did not affect the development of buckwheat at the seedling stage and was not different from other methods (Table 6).

Table 6 Shoot length, shoot fresh weight, and shoot dry weight of buckwheat seeds after coating with different types of plant nutrients and fungicide, tested under greenhouse conditions

Treatment[1]	Greenhouse condition					
	Shoot length (mm)	(%)[3]	Shoot fresh weight (mg)	(%)	Shoot dry weight (mg)	(%)
T1	46.85 d[2]		875 e		78.50 d	
T2	55.43 c	(+18)	1,230 d	(+41)	104.25 c	(+32)
T3	63.53 b	(+36)	1,502 ab	(+72)	124.50 ab	(+58)
T4	69.10 a	(+47)	1,555 a	(+78)	131.75 a	(+67)
T5	62.73 b	(+34)	1,340 cd	(+53)	119.50 b	(+52)
T6	60.90 b	(+30)	1,405 bc	(+61)	121.75 ab	(+55)
T7	63.58 b	(+36)	1,390 bc	(+59)	119.50 b	(+52)
T8	63.68 b	(+36)	1,455 bc	(+66)	126.50 ab	(+61)
Mean	60.72		1,344		116	
F-test	**		**		**	
CV(%)	4.61		6.23		6.20	

**: Significantly different at $p \leq 0.01$

[1] T1 = Untreated, T2 = coating with CMC, T3 = coating with NH_4NO_3 0.384 g, T4 = coating with NaH_2PO_4 0.512 g, T5 = coating with KCl 0.104 g, T6 = coating with NH_4NO_3 0.384 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai., T7 = coating with NaH_2PO_4 0.384 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai. and T8 = coating with KCl 0.104 g mixed metalaxyl 2.0 g.ai.

[2] Means within a column followed by the same letter are not significantly at $p \leq 0.05$ by DMRT.

[3] Numbers in parentheses refer to percentage increase (+) compared with the control.

CONCLUSION

The results of coating common buckwheat seeds with plant nutrients and fungicide at different ratios that were cultured to examine the quality in different environments were as follows:

1) Coating of seeds with 0.104 g of KCl increased the germination percentage by 14%

2) Tests conducted under greenhouse conditions showed that seeds coated with CMC and with 0.384 g of NaH_2PO_4 mixed with 2.0 g.ai of metalaxyl gave the best germination percentage, with a statistically significant difference when compared with other methods.

3) Coating of seeds with 0.384 g of NaH_2PO_4 mixed with 2.0 g.ai. of metalaxyl increased root length by 13%.

4) Seeds coated with 0.384 g of NaH_2PO_4 had longer shoots and higher shoot fresh and dry weights than non-coated seeds when tested under greenhouse conditions.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was in partial fulfillment of the requirements of Seed Physiology Course AG521. The author is very grateful for the scholarship from the Graduate School Department, Office of Academic Administration and Development of Maejo University for the Academic Year 2019 in support of this research. Gratitude is also given to the Agronomy Program, Faculty of Agricultural Production, Maejo University for providing the experimental venue and equipment.

REFERENCES

Alvarez-Jubete, L., Arendt, E.K. and Gallagher, E. 2009. Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients. **International Journal of Food Sciences and Nutrition** 60(4): 240-257.

Antonio, J., Bastida, G. and Zielinski, H. 2015. Buckwheat as a functional food and its effects on health. **Journal of**

Agricultural and Food Chemistry 63: 7896-7913.

AOSA. 1983. **Seed Vigor Testing Handbook.** Association of Official Seed Analysts, New York.

Arc, E., Galland, M., Godin, B., Cueff, G. and Rajjou, L. 2013. Nitric oxide implication in the control of seed dormancy and germination. **Frontiers in Plant Science** 19(4): 346.

Azeke, M.A., Egielewa, S.J., Eigbogbo, M.U. and Ihimire, I.G. 2011. Effect of germination on the phytase activity, phytate and total phosphorus contents of rice (*Oryza sativa*), maize (*Zea mays*), millet (*Panicum miliaceum*), sorghum (*Sorghum bicolor*) and wheat (*Triticum aestivum*). **Journal of Food Science and Technology** 48(6): 724-729.

Baas, P., Bell, C., Mancini, M.N., Conant, R.T. and Wallenstein, M.D. 2016. Phosphorus mobilizing consortium Mammoth PTM enhances plant growth. **PeerJ** 4: e2121.

Black, C.A. 1968. **Soil-Plant Relationships.** John Wiley and Sons, New York.

Debnath, D., Sahu, N.P., Pal, A.K., Baruah, K., Yengkokpam, S. and Mukherjee, S.C. 2005. Present scenario and future prospects of phytase in aquafeed - review. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences** 18(12): 1800-1812.

George, T.S., Hinsinger, P. and Turner, B.L. 2016. Phosphorus in soils and plants -facing phosphorus scarcity. **Plant Soil** 401(1): 1-6.

Insalud, N., Thongplew, P., Sungpalee, W., Hermhuk, S. and Seesenzui, T. 2020. Soil chemical properties affecting growth and nutrient uptake of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench.). **Khon Kaen Agriculture Journal** 48(Suppl.1): 561-566. (in Thai).

ISTA. 2019. **International Rules for Seed Testing 2019.** Bassersdorf, Switzerland.

Kangsopa, J. 2018. Effects of Pelleting Formulas Combined Plant Nutrients and Microorganisms on Lettuce Seed Quality. Doctor of Philosophy Thesis in Agronomy, Graduate School, Khon Kaen University. (in Thai)

Kangsopa, J. and Siri, B. 2019. Change of germination, vigour and seedling growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) after seed pelleting with phosphorus. **King Mongkut's Agricultural Journal** 37(2): 274-283. (in Thai).

Karanam, P.V. and Vadez, V. 2010. Phosphorus coating on pearl millet seed in low P alfisol improves plant establishment and increases stover more than seed yield. **Experimental Agriculture** 46(4): 457-469.

Keawkham, T., Siri, B. and Hynes, R.K. 2014. Effect of polymer seed coating and seed dressing with pesticides on seed quality and storability of hybrid cucumber. **Australian Journal of Crop Science** 8(10): 1415-1420.

Kucera, B., Cohn, M.A. and Leubner-Metzger, G. 2005. Plant hormone interactions during seed dormancy release and germination. **Seed Science Research** 15: 281-307.

Manitoba Agriculture. 2017. **Buckwheat: Production and Management.** Available Source: https://bit.ly/3kRY9fj, January 9, 2020.

Masauskas, V., Mašauskiene, A., Repsiene, R., Skuodiene, R., Braziene, Z. and Peltonen, J. 2008. Phosphorus seed coating as starter fertilization for spring malting barley. **Acta Agriculturae Scandinavica** 58(2): 124-131.

Niu, Y.F., Chai, R.S., Jin, G.L., Wang, H., Tang, C.X. and Zhang, Y.S. 2013. Responses of root architecture development to low phosphorus availability: a review. **Annals of Botany** 112(2): 391-408.

Pedrini, S., Merritt, D.J., Stevens, J. and Dixon, K. 2017. Seed coating: science or marketing spin?. **Trends in Plant Science** 22(2): 106-116.

Rebafka, F.P., Bationo, A. and Marschner, H. 1993. Phosphorus seed coating increases phosphorus uptake, early growth and yield of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.)

grown on an acid sandy soil in Niger, West Africa. **Fertilizer Research** 35(3): 151-160.

Ren, X.X., Chen, C., Ye, Z.H., Su, X.Y., Xiao, J.J., Liaoand, M. and Cao, H.Q. 2019. Development and application of seed coating agent for the control of major soil-borne diseases infecting wheat. **Agronomy** 9(8): 413.

Rice Department. 2017. **Her Royal Highness Princess Maha Chakri Sirindhorn in Progress Monitoring of Crop Cultivation as Post-Paddy Rice Production in the Project Area of Phufa Development Center.** Available Source: https://bit.ly/2Q2QM 6M, December 11, 2019. (in Thai).

Siri, B. 2015. **Seed Conditioning and Seed Enhancements.** Klungnanawitthaya Press, Khon Kaen. (in Thai).

Siri, B. and Keawmaungklang, P. 2014. Effects of seed coating with plant nutrients on hybrid cucumber seed quality after storage. **Khon Kaen Agriculture Journal** 42(Suppl.1): 478-484. (in Thai).

Soares, M.M., Sediyama, T., Neves, J.C.L., Júnior, H.C.S. and Silva, L.J. 2016. Nodulation, growth and soybean yield in response to seed coating and split application of phosphorus. **Journal of Seed Science** 38(1): 30-40.

Valenzuela, H. and Smith, J. 2002. **Buckwheat,** (Sustainable Agriculture; SA-GM-4). Academic documents, University of Hawaii, Honolulu (HI).

Vance, C.P., Stone, C. and Allen, D.L. 2003. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist** 157(3): 423-447.

White, P.J. and Veneklaas, E. 2012. Nature and nurture: the importance of seed. **Plant and Soil** 357: 1-8.

Zelonka, L., Stramkale, V. and Vikmane, M. 2005. Effect and after-effect of barley seed coating with phosphorus on germination, photosynthetic pigments and grain yield. **Acta Universitatis Latviensis** 691: 111-119.

Zhu, Y-G. and Smith, S.E. 2001. Seed phosphorus (P) content affects growth, and P uptake of wheat plants and their association with *arbuscular mycorrhizal* (AM) fungi. **Plant and Soil** 231(1): 105-112.

สาหร่ายลดโลกร้อน

CO_2 Mitigation by Algae

ครรชิต เงินคำคง[1*] นันท์นภัส เงินคำคง[2] และ พิสิฐ ศรีสุริยจันทร์[2]

Khanchit Ngoenkhamkhong[1*], Nannaphat Ngoenkhamkhong[2] and Phisit Seesuriyachan[2]

Received: 17 July 2020, Revised: 7 January 2021, Accepted: 5 February 2021

บทคัดย่อ

การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสาเหตุหลักในการเกิดก๊าซเรือนกระจก นับเป็นปัญหาท้าท้ายด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญในระดับโลก การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ *Chlorella* sp., *Spirulina* sp. และ *Scenedesmus* sp. โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในถังปฏิกิริยาปริมาตรสาหร่าย 5 ลิตร ให้ความเข้มแสงที่ 4,000 ลักซ์ และให้อากาศ โดยการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 99 ที่อัตราการไหล 0.05 vvm อย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 20 วัน ผลการศึกษา พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด โดยมีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด 0.43±0.05 ต่อวัน มีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย (OD_{560}) สูงสุดถึง 0.62±0.02 มวลสาหร่ายสูงสุด 2,166.70±57.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดร้อยละ 97.33±0.58 อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดถึง 4,073.30±108.50 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน และค่าประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 20 วัน คือ 3.88±0.01 โมล จากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ พบว่า การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการกักเก็บคาร์บอนแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

คำสำคัญ: สาหร่าย, การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ก๊าซเรือนกระจก

---

[1] หลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อำเภอเมืองเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50300

[1] Department of Environmental, Faculty of Engineering, Rajamagala University of Technology Lanna, Muang, Chiang Mai 50300, Thailand.

[2] สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50100

[2] School of Agro-Industry, Faculty of Agro-Industy, Chiang Mai University, Muang, Chiang Mai 50100, Thailand.

[*] ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): kunchit2516@hotmail.com Tel: 08 6184 7248

ABSTRACT

The increasing of atmospheric carbon dioxide (CO_2), one of the greenhouse gases, is a global critical environmental issue. The objective of this research was to study the efficiency of CO_2 reduction using 3 algae strains (*Chlorella* sp., *Spirulina* sp. and *Scenedesmus* sp.). The three strains were cultivated in 5liter photobioreactor under the light intensity of 4,000 lux. They were continuously sparged with CO_2 (99%) at a flow rate of 0.05 vvm for 20 days. The results found that *Chlorella* sp. expressed the highest efficiency with the maximum specific growth rate, cell density (OD_{560}), biomass productivity, efficiency of CO_2 reduction and CO_2 fixation rate of 0.43±0.05 d^{-1}, 0.62±0.02, 2,166.70±57.70 $mg.l^{-1}$., 97.33±0.58%, and 4,073.30±108.50 $mg.l^{-1}.d^{-1}$, respectively. The average CO_2 sequestration obtained in 20 days was 3.88±0.01 mole. In addition, the efficiency of CO_2 reduction and CO_2 sequestration were significantly different (p<0.05).

Key words: algae, CO_2 mitigation, greenhouse gas

บทนำ

ปัญหาโลกร้อนจัดว่าเป็นความท้าทายที่สำคัญระดับโลกโดยที่ทุกฝ่ายก็ได้เห็นพ้องต้องกันในการหาทางลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ได้ โดยมีการให้สัตยาบันในอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change-UNFCCC) (Srethasirot *et al*., 2014) หน่วยงานระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (IPCC) ได้เสนอรายงานทุกๆ 5 ปี โดยสรุปว่าโลกได้ร้อนขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีสาเหตุหลักมาจากกิจกรรมของมนุษย์ นั่นคือการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศในปริมาณที่มากและในอัตราการที่เร็วมาก (Chidthaisong, 2010) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าวมีสาเหตุสำคัญมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหล่านี้จะประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 10-20 (Ho *et al*., 2011) ซึ่งมีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming potential; GWP) ปัจจุบันเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ แนวทางในการแก้ไขปัญหาและการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากการลดการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิล ในปัจจุบันมีอีกทางเลือกหนึ่งคือการนำศักยภาพของสาหร่ายมาใช้ประโยชน์ในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Biological CO_2 mitigation) โดยอาศัยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นสำคัญในการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นน้ำตาลซึ่งเป็นสารที่ให้พลังงาน กระบวนการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศด้วยวิธีนี้สามารถใช้กับพืชและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่สามารถสังเคราะห์แสงได้ สาหร่ายซึ่งเป็นกลุ่มของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก มีทั้งเซลล์เดียวและหลายเซลล์นั้นมีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่ามาก จึงมีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงได้มากกว่าพืช ไม่ว่าจะเป็นป่าไม้ พืชทางการเกษตรตลอดจนพืชน้ำอื่นๆ (Ahn *et al*., 2012) สาหร่ายหลายสายพันธุ์มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี เช่น *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพ ในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง

ร้อยละ 97.07 (Mann *et al*., 2009) และร้อยละ 82.50-99.00 (Man and Keat, 2013) และสาหร่าย *Spirulina maxica* มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีถึงร้อยละ 98.00 (Chan, 2011) ส่วนสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* ประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีถึงร้อยละ 67.00 (Li *et al*., 2011) ด้วยกัน การศึกษาวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างต่อเนื่องมุ่งเน้นในการนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ประโยชน์ผ่านกระบวนการต่างๆ อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่าย ถือเป็นแนวทางหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสาหร่ายมีการเติบโตโดยใช้แสงเป็นพลังงาน และใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์ด้วยแสง ด้วยเหตุนี้ การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายเพื่อลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาถึงประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp. *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. คณะผู้วิจัยได้วางกรอบแนวคิดและตั้งสมมุติฐานของการศึกษา ประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายแต่ละชนิด

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. อาหารเลี้ยงสาหร่าย (Barsanti and Gualtieri, 2014)

1.1 สูตรอาหาร Jaworski's medium สำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. และ *Scenedesmus* sp.

1.2 สูตรอาหาร Zarrouk's medium สำหรับเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina* sp.

2. สาหร่ายที่ใช้ในการศึกษา

สาหร่ายที่ใช้ในการศึกษา จำนวน 3 สายพันธุ์ ได้แก่ *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. โดยเก็บสาหร่ายมาทำการขยายพันธุ์จากสระน้ำหลังโรงอาหาร เมื่อปี พ.ศ. 2558 ทำการเพาะเลี้ยงมาแล้ว 7 ปี ที่ห้องปฏิบัติการชีววิทยาสิ่งแวดล้อม หลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

3. การเตรียมหัวเชื้อสาหร่าย

ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายให้ได้ปริมาตรตามที่ต้องการ นำหัวเชื้อสาหร่ายทั้ง 3 ชนิด มาเลี้ยงในอาหารสำหรับสาหร่ายแต่ละชนิด โดยวัดหัวเชื้อเริ่มต้นด้วยเครื่องวัดดูดกลืนแสง (Carry 60 Agilent, Germany) ที่ค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย (Optical density : OD_{560}) ที่ 0.80 แล้วนำมาถ่ายลงถังปฏิกิริยาแบบให้แสง (ถังพลาสติกสีขาวขุ่น) ขนาด 80 ลิตร ที่บรรจุอาหารเหลว ปริมาตร 50 ลิตร เพื่อทำการเพิ่มปริมาณสาหร่าย ให้แสงไฟจากหลอดไฟสีขาว (Warm white light) (LX-73 Digicon; Taiwan) ความเข้มแสงประมาณ 4,000 ลักซ์ ตลอด 24 ชั่วโมง และให้อากาศจากเครื่องปั๊มอากาศอัตรา 30 ลิตรต่อนาที (AP-10 Yamano; China) ตลอด 24 ชั่วโมง ทำการเลี้ยงสาหร่ายจนมีค่าความหนาแน่นของเซลล์ (OD_{560}) อยู่ในช่วง 0.30-0.50 เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อตั้งต้นในการศึกษาขั้นต่อไป

4. ศึกษาประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอน และประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายแต่ละสายพันธุ์

นำหัวเชื้อตั้งต้นสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงไว้ มาทำการศึกษาโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ โดยทำการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบให้แสง (Thermo Scientific Nalgeng: USA) ขนาด 10 ลิตร ที่บรรจุอาหารเหลวปริมาตร 5

ลิตร เติมอากาศจากปั๊มเติมอากาศตลอด 24 ชั่วโมง อัตรา 30 ลิตรต่อนาที เติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 99) อัตราการไหล 0.05 vvm ตลอดเวลาการทดลองใช้เครื่องดูดจ่ายก๊าซ (Watson Marlow Model 502S: UK) ทำการศึกษาเป็นเวลา 20 วัน เก็บตัวอย่างทุกๆ 2 วัน ศึกษาพารามิเตอร์ดังนี้

4.1 การเจริญเติบโตของสาหร่าย

วัดการเจริญเติบโตของสาหร่ายในรูปของค่าความหนาแน่นของเซลล์ (OD_{560}) ชีวมวล (Biomass algae) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (μ) เพื่อดูแนวโน้มการเจริญเติบโต

4.2 วัดความเป็นกรดด่าง ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH Meter; Eutech pH 700, Singapore)

4.3 ศึกษาประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายแต่ละชนิด

ทำการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าชุดการทดลอง (Influent of CO_2) และที่ออกจากชุดการทดลอง (Effluent of CO_2) ใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ (Biogas 5000 Geoteck; UK) นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายซึ่งคำนวณได้จากสมการ 1 (Kao *et al*., 2012a)

$$\text{Efficiency of } CO_2 \text{ reduction} = \left(\frac{\text{Influent of } CO_2 - \text{Effluent of } CO_2}{\text{Influent of } CO_2}\right) x\ 100 \quad (1)$$

4.4 ศึกษาอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายแต่ละชนิด (CO_2 fixation rate)

นำค่ามวลสาหร่ายมาคำนวณหาค่าอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่ายแต่ละชนิดดังสมการ 2 (Ho *et al*., 2011)

$$CO_2 \text{ fixation rate } (mg.L^{-1}.d^{-1}) = 1.88 \times \text{biomass productivity} \quad (2)$$

4.5 ศึกษาการกักเก็บคาร์บอนในสาหร่ายแต่ละชนิด (CO_2 sequestration)

คำนวณจากสมการ 3 (Kargupta *et al*., 2015)

$$CO_2\ sequestration\ (mole) = \frac{F_{in} - F_{out}}{dt} \quad (3)$$

เมื่อ F_{in} = เปอร์เซ็นต์โมลคาร์บอนที่เข้าระบบ

F_{out} = เปอร์เซ็นต์โมลคาร์บอนที่ออกระบบ

dt = ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป

5. การรวบรวมข้อมูล

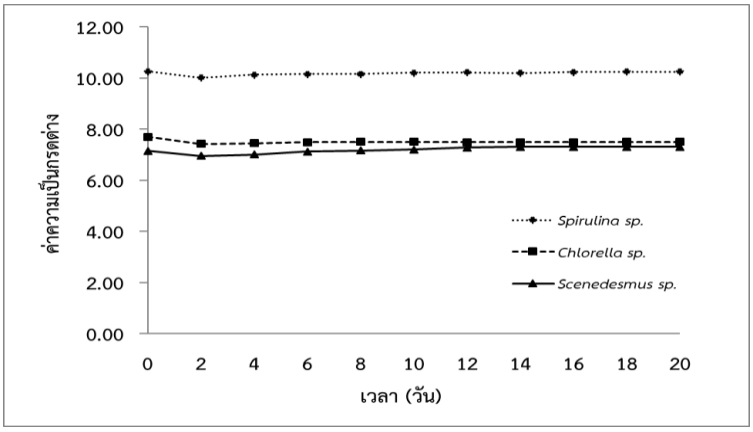
นำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลการทดสอบทางสถิติใช้โปรแกรม Minitab version 16 (Minitab Inc., USA) และวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Tukey simultaneous tests ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าความเป็นกรดด่างของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp.

จากการศึกษาผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความเป็นกรดด่างของอาหารเหลวของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus*

sp. และ *Spirulina* sp. มีค่าความเป็นกรดด่างของอาหารเหลวเมื่อเติมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 99 ที่อัตราการไหล 0.05 vvm พบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 7.43±0.02-7.70±0.01, 6.95±0.06-7.31±0.05 และ 10.02±0.13-10.25±0.00 ตามลำดับ



ภาพที่ 1 ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความเป็นกรดด่างของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp.

จากภาพที่ 1 พบว่า ในวันแรกๆ ค่าความเป็นเป็นกรดด่างของสาหร่ายทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดต่ำลงเล็กน้อย ส่วนสาหร่าย *Chlorella* sp. มีค่าความเป็นกรดด่างลดลงจาก 7.70±0.01 มาอยู่ที่ 7.43±0.02 เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Ngoenkhamkhong *et al*. (2017) ที่ทำการศึกษาถึงการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chlorella* sp. พบว่า ค่าความเป็นกรดด่างจะลดลงจาก 7.35 มาอยู่ที่ 6.92 หลังจากนั้นเมื่อสาหร่ายปรับตัวได้ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนได้ถูกใช้ไปในการสังเคราะห์แสงทำให้ค่าความเป็นกรดด่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หลังจากนั้นค่าความเป็นกรดด่างคงที่ (Shuler *et al*., 1922) โดยทั่วไปทั้งสาหร่าย *Chlorella* sp. และ *Scenedesmus* sp. เจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรดด่างกว้าง กล่าวคือค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Chlorella vulguris* อยู่ในช่วง 6.48-8.58 (Morais and Costa, 2007) ส่วนสาหร่าย *Scenedesmus* sp. R-16 อยู่ในช่วง 6.00-11.00 (Ren *et al*., 2013) และสาหร่าย *Scenedesmus quadricauda* อยู่ในช่วง 5.00-7.00 (Lane and Burris, 1981)

ส่วนสาหร่าย *Spirulina* sp. มีค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วง 10.02±0.13-10.25±0.00 ซึ่งถือว่าเหมาะสม โดยทั่วไปสาหร่าย *Spirulina* sp. เจริญเติบโตได้ดีค่าความเป็นกรดด่างมีค่าเหมาะสมอยู่ในช่วง 9.00-11.00 (Zeng *et al*., 2012) ทำให้มวลสาหร่ายและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูง ส่วนสาหร่าย *Spirulina maxima* อยู่ในช่วง 8.50-9.50 (Morais and Costa, 2007) และอยู่ในช่วง 9.04-9.88 (Oliveira *et al*., 1999)

2. ผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะและมวลสาหร่าย

จากการศึกษาผลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย (ตารางที่ 1) พบว่า ความหนาแน่นของเซลล์ สาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. มีค่าความ

หนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุด คือ 0.62±0.02, 0.52±0.01 และ 0.45±0.02 ตามลำดับ โดยสาหร่าย *Chlorella* sp. มีมวลชีวภาพสูงสุด รองลงมาเป็นสาหร่าย *Scenedesmus* sp. และสาหร่าย *Spirulina* sp. ที่ 2,166.70±57.70, 2,066.70±76.40 และ 2,033.30 ±76.40 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากการศึกษายังพบว่าการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 99 ที่อัตราการไหล 0.05 vvm สาหร่าย *Chlorella* sp. มีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายและมวลชีวภาพสูงสุด เนื่องจากสาหร่ายมีการนำเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในกระบวนการการสังเคราะห์แสงซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ จึงทำให้สาหร่ายมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Ngoenkhamkhong *et al*. (2017) พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. MJU มีความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุด คือ 0.91±0.02 และยังสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Sumardiono *et al.* (2014) จากการศึกษาการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพเพาะเลี้ยงสาหร่าย พบว่าสาหร่ายมีอัตราการการเจริญเติบโตจำเพาะอยู่ที่ 0.39 ต่อวัน และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

เมื่อนำค่ามวลสาหร่ายมาหาค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. มีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด คือ 0.43±0.05, 0.36±0.01 และ 0.35±0.00 ต่อวัน ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุด (OD_{max}) มวลสาหร่ายสูงสุด (Algae $biomass_{max}$) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (μ_{max}) ของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp.

Parameter	Microalgae		
	***Chlorella* sp.**	***Scenedesmus* sp.**	***Spirulina* sp.**
OD_{max}	0.62±0.02[a]	0.52±0.01[b]	0.45±0.02[c]
Algae $biomass_{max}$ (mg/L)	2,166.70±57.70[a]	2,066.70±76.40[a]	2,033.30±76.40[a]
μ_{max} (d^{-1})	0.43±0.05[a]	0.36±0.01[b]	0.35±0.00[c]

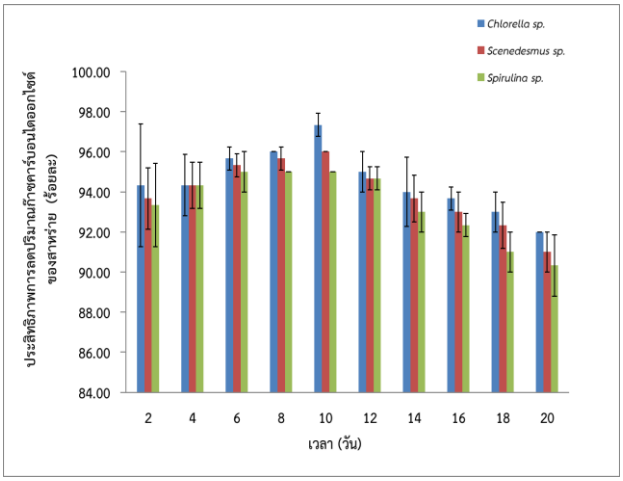
หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย (±S.D.) ในแถวแนวนอนอักษรภาษาอังกฤษกำกับ (a, b และ c) ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยวิธี Tukey simultaneous

3. ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Efficiency of CO_2 reduction) อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 fixation rate) และประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอน (CO_2 sequestration) ของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp.

จากการศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. พบว่า มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยที่ร้อยละ 94.53±1.54, 94.07±1.73 และ 93.60±1.99 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในวันที่ 10 คือ ร้อยละ 97.33±0.58, 96.00±0.00 และ 95.00±0.00 ตามลำดับ (ภาพที่ 2) จากตารางที่ 2 พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. มี ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ร้อยละ 97.33±0.58 สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Mann *et al*. (2009) พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp.

มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 97.07 และบางสายพันธุ์ลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี เช่น สาหร่าย *Chlorella* sp. TISTR 8263 ร้อยละ 86.70 (Tongprawhan *et al*., 2014) สาหร่าย *Chlorella vulgaris* ร้อยละ 98 (Chan, 2011) และร้อยละ 80 (Serejo *et al*., 2015) ส่วนสาหร่าย *Chlorella* sp. MTF-7 ร้อยละ 95 (Chiu *et al*., 2011) เมื่อเวลาผ่านไปประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อยๆ เนื่องจากสารอาหารจะลดน้อยลงตามการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่เพิ่มขึ้น (Sumardiono, 2014) และจากการศึกษา พบว่าสาหร่าย *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีซึ่งถือว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Chiu *et al*. (2011) ในอัตราการเติมก๊าซที่อัตราการไหล 0.05 vvm แต่แตกต่างกับงานวิจัยของ Kao *et al*. (2012b) ในอัตราการเติมก๊าซที่อัตราการไหลเท่ากัน คือ 0.05 vvm ผลการศึกษาครั้งนี้ พบว่า สาหร่าย *Chlorell* sp. มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่า งานวิจัยของ Kao *et al*. (2012b) ผลที่ต่างกันอาจเป็นเพราะว่าปัจจัยจากแสงที่ต่างกันซึ่งในการทดลองเลี้ยงสาหร่ายของ Kao *et al*. (2012b) ใช้แสงอาทิตย์ในการเพาะเลี้ยงสาหร่าย แต่ในการทดลองนี้ใช้แสงจากหลอดไฟสีขาวในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายซึ่งสามารถควบคุมได้ และถังปฏิกิริยา อุณหภูมิที่แตกต่างกัน รวมไปถึงสภาพอากาศที่แตกต่างกันในแต่ละประเทศจึงทำให้การทดลองมีความแตกต่างกัน (Toledo-Cervantes *et al*., 2013) แต่อย่างไรก็ตามสาหร่าย *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไปวิเคราะห์ค่าความแตกต่าง พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)



ภาพที่ 2 ประสิทธิภาพการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp.

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในวันที่ 10 (Efficiency of CO_2 reduction) อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในวันที่ 10 (CO_2 fixation rate) และประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 20 วัน (CO_2 sequestration) ของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp.

Parameter	Algae		
	***Chlorella* sp.**	***Scenedesmus* sp.**	***Spirulina* sp.**
Efficiency of CO_2 $reduction_{max}$ (%)	97.33±0.58[a]	96.00±0.00[b]	95.00±0.00[c]
CO_2 fixation $rate_{ave20day}$ ($mg.L^{-1}.d^{-1}$)	4,073.30±108.50[a]	3,885.30±143.60[a]	3,822.70±143.60[a]
CO_2 $sequestration_{max}$ (mole)	3.88±0.01[a]	3.71±0.02[b]	3.66±0.01[c]

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย (±S.D.) ในแถวแนวนอนอักษรภาษาอังกฤษกำกับ (a, b และ c) ต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยวิธี Tukey simultaneous

จากการศึกษาอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. พบว่า มีอัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในวันที่ 10 คือ 4,073.30±108.50, 3,885.30±143.60 และ 3,822.70±143.60 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ (ตารางที่ 2) และยังพบว่าการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีของสาหร่ายทั้ง 3 ชนิด ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) และยังพบว่าสาหร่ายทั้ง 3 สายพันธุ์มีประสิทธิภาพในการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในวันที่ 10 หลังจากนั้นการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารอาหารที่ลดน้อยลงตามการเจริญเติบโตของสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสาหร่าย สาหร่ายจะใช้สารอาหารที่มีอยู่ในอาหารตั้งต้นในการเจริญเติบโตได้ดีในช่วงเวลาแรกๆ แต่เมื่อระยะผ่านไปทำให้สารอาหารเริ่มหมดไป ทำให้อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายลดลงส่งผลให้การตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงตามไปด้วย (Sumardiono, 2014) ดังนั้นควรทำการเพาะเลี้ยงสาหร่ายแบบต่อเนื่อง (Continuous culture) ซึ่งเป็นการเติมสารอาหารเข้าสู่ถังไบโอรีแอคเตอร์ตลอดเวลา เพื่อให้มีอาหารเพียงพอต่อการเจริญเติบโตได้อย่างต่อเนื่องและยั่งยืน

จากการศึกษาประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 20 วัน สูงสุด คือ 3.88±0.01 โมล ซึ่งแตกต่างจากสาหร่ายชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

สรุป

จากการศึกษาการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสาหร่าย *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp. และ *Spirulina* sp. โดยทำการเพาะเลี้ยงสาหร่าย ในถังปฏิกิริยาแบบให้แสง บรรจุอาหารเหลวปริมาตร 5 ลิตร ให้ความเข้มแสงที่ 4,000 ลักซ์ และให้อากาศจากเครื่องปั๊มอากาศอัตรา 30 ลิตรต่อนาที ตลอดเวลา นอกจากเติมอากาศแล้วทำการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 99 อัตราการไหล 0.05 vvm เป็นเวลา 20 วัน ผลการศึกษา พบว่า สาหร่าย *Chlorella* sp. มีประสิทธิภาพในการกักเก็บคาร์บอนสูงสุด โดยมีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด 0.43±0.02 ต่อวัน

มีค่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายสูงสุดถึง 0.62±0.02 มวลสาหร่ายสูงสุด 2,166.70±57.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดร้อยละ 97.23±0.68 อัตราการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดถึง 4,073.30±108.50 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน และค่าประสิทธิภาพการกักเก็บคาร์บอนเฉลี่ยต่อ 20 วัน คือ 3.88±0.01โมล ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายดังกล่าว จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้ทุนอุดหนุนทุนวิจัยส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยที่มุ่งเป้า ด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสำนักงานพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานชีวภาพ (องค์การมหาชน)

เอกสารอ้างอิง

Ahn, J.W., Hwangbo, K., Lee, S.Y., Choi, H.G., Park, Y.l., Liu, J.R. and Jeong, W.J. 2012. Shorth communication anew arctic *Chlorella* species for biodiesel production. **Bioresource Technology** 125: 340-343.

Barsanti, L. and Gualtieri, P. 2014. **Algae Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology.** 2nd ed. Taylor & Francis Group, NewYork.

Chan, A. 2011. Use of microalgae in wastewater treatment to remove contaminants and purify biogas. Master of Applied Science, The University of Guelph, Canada.

Chidthaisong, A. 2010. **Thailand Climate Change Information.** The Thailand Research Fund's Research development and Co-ordination Center for Global Warming and Climate Change, Bangkok. (in Thai)

Chiu, S.Y., Kao, C.Y., Huang, T.T., Lin, C.J., Ong, S.C., Chen, C.D., Chang, J.S. and Lin, C.S. 2011. Microalgal biomass production and on-site bioremediation of carbon dioxide, nitrogen oxide and sulphur dioxide from flue gas using *Chlorella* sp. cultures. **Bioresource Technology** 102: 9135-9142.

Ho, S.H., Chen, C.Y., Lee, D.J. and Chang, J.S. 2011. Research review paper: Perspectives on microalgle CO_2-emission mitigation systems - A review. **Biotechnology Advances** 29: 189-198.

Kao, C.Y., Chiu, S.Y., Huang, T.T., Dai, L., Hsu, L.K. and Lin, C.S. 2012a. Ability of a mutant strain of microalgae *Chlorella* sp. to capture carbon dioxide capture for biogas upgrading. **Applied Energy** 39: 76-183.

Kao, C.Y., Chiu, S.Y., Huang, T.T., Dai, L., Wang, G.H, Tseng, C.P., Chen, C.H. and Lin, C.S. 2012b. A mutant strain of microalgae *Chlorella* sp. for the carbon dioxide capture from biogas. **Biomass and Bioenergy** 36: 32-140.

Kargupta, W., Ganesh, A. and Mukherji, S. 2015. Estimation of carbon dioxide sequestration Potential of microalgae grown in a batch photobioreactor: Short Communication. **Bioresource Technology** 180: 370-375.

Lane, A.E. and Burris, J.E. 1981. Effects of environmental pH on the internal pH of *Chlorella pyrenoidosa*,

Scenedesmus quadricauda and *Euglena mutablis*. **Plant Physiol** 68: 439-442.

Li, F.F., Yang, Z., Zeng, R., Yang, G., Chang, X., Yan, J.B. and Hou, Y.L. 2011. Microalgae capture of CO_2 from actual flue gas discharged from a combustion chamber. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 50(10): 6496-6502.

Man, K.L. and Keat, T.L. 2013. Effect of carbon source towards the growth of *chlorella vulgaris* for CO_2 bio-mitigation and biodiesel production. **International Journal of Greenhouse Gas Control** 14: 169-176.

Mann, G., Schlegel, M., Schumann, R. and Sakalauskas, A. 2009. Biogas-condition with microalgae. **Agronomy Research** 7(1): 33-38.

Morais, M.G.D. and Costa, J.A.V. 2007. Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *Chlorella vulguris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors. **Biotechnol Lett** 29: 1349 -1352.

Ngoenkhamkhong, K., Cheunbarn, S., Cheunbaen, T. and Ngoenkhamkhong, N. 2017. The Efficiency of CO_2 Capture by Green Microalgae. **RMUTI Journal** 10(2): 119-129. (in Thai)

Oliveira, M.A.C., Monteiro, L.D., Robb, P.G. and Leite, S.G.F. 1999. Growth and Chemical composition of *Spirulina maxima* and *Spirulina patensis* biomass at different temperature. **Aquaculture International** 7: 261-275.

Ren, H.Y., Liu, B.F., Ma, C., Zhao, L. and Ren, N.Q. 2013. A new lipid-rich microalga *Scenedesmus* sp. strain R-16 isolated using Nile red staining: effects of Carbon and nitrogen sources and initial pH on the biomass and lipid production. **Biotechnology for biofuels** 6(143): 1-10.

Serejo, M.L., Olmos, E.P., Boncz, M., Blanco, S., Garcia-Encina, P.A. and Munoz, R. 2015. Influence of biogas flow rate on biomass composition during the optimization of biogas upgrading in microalgal-bacterial process. **Environmental Science & Technology** 49(5): 1-16.

Shuler, M.L., Kargi, F. and De Lisa, M. 1922. **Bioprocess engineering: basic concept.** 3rd ed. Prentical Hall, Englewood Cliffis New Jersey, United State.

Srethasirot, B., Chidthaisong, A. and Chinwanno, S. 2014. **Climate@risk.** Bangkok Business Publishing, Bangkok. (in Thai)

Sumardiono, S., Yono, B., Syaichurrozi, I. and Sasongko, S.B. 2014. Utilization of biogas as carbon dioxide provider for *Spirulina platensis* culture. **Biological Sciences** 6(1): 53-59.

Toledo-Cervantes, A., Morales, M., Novelo, E. and Revah, S. 2013. Carbon dioxide fixation and lipid storage by *Scenedesmus obtusiusculus*. **Bioresource Technology** 130: 652-658.

Tongprawhan, W., Srinuanpa, S. and Cheirsilp, B. 2014. Biocapture of CO_2 from biogas by Oleaginous microalgae for improving methane content and simultaneously producing lipid. **Bioresource Technology** 170: 90-99.

Zeng, X., Danquah, M.K., Zhang, S., Zhang, X., Wu, M., Chen, X.D., Ng, I.S., Jing, K. and Lu, Y.

2012. Autotrophic cultivation of *Spirulina platensis* for CO_2 fixation and phycocyanin production. **Chemical Engineering** 183: 192-197.

การสำรวจรังวัดรูปตัดขวางลำน้ำโดยอากาศยานไร้คนขับในแม่น้ำลำภาชี จังหวัดกาญจนบุรี

A River Cross Section Survey by UAV Photogrammetry in Lam Pa Chi River, Kanchanaburi Province

กิติพงศ์ ทองเชื้อ และ วิษุวัฒก์ แต้สมบัติ *

Kitipong Thongchua and Wisuwat Taesombat *

Received: 29 December 2020, Revised: 23 August 2021, Accepted: 7 October 2021

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้เป็นการสำรวจรังวัดรูปตัดขวางลำน้ำในแม่น้ำลำภาชี ในพื้นที่ตำบลด่านมะขามเตี้ย อำเภอด่านมะขามเตี้ย จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรม โดยความยาวของแม่น้ำลำภาชีที่ใช้ในการศึกษาประมาณ 1 กิโลเมตร และความกว้างระหว่างตลิ่งซ้ายกับตลิ่งขวาอยู่ในช่วงประมาณ 23 - 40 เมตร ทำการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศโดยอากาศยานไร้คนขับ โดยกำหนดให้มีส่วนซ้อนระหว่างภาพ ร้อยละ 80 และส่วนเกยระหว่างแนวบิน ร้อยละ 70 ของภาพถ่ายทางอากาศ ส่วนข้อมูลจุดควบคุมภาคพื้นดิน จำนวน 23 จุด รวมทั้งการสำรวจรูปตัดขวางของลำน้ำ จำนวน 5 รูปตัด สำรวจด้วยวิธีการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ จากนั้นทำการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินที่แตกต่างกัน 4 กรณี ได้แก่ การใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน จำนวน 4, 8, 16 และ 23 จุด ตามลำดับ ต่อมาทำการวิเคราะห์ผลกระทบของจำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดินที่ส่งผลต่อความถูกต้องทางตำแหน่งของแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัล ซึ่งในแต่ละกรณีได้ทำการเปรียบเทียบในลักษณะของรูปตัดขวางลำน้ำที่ได้จากแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลกับผลการสำรวจรูปตัดขวางของลำน้ำที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีการสำรวจด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ที่ตำแหน่งตรงกัน ผลที่ได้พบว่า รูปตัดขวางลำน้ำที่ได้จากแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่มีค่าความถูกต้องทางตำแหน่งมากที่สุด คือ การใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 23 จุด ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสอง (root mean square error) เท่ากับ 0.56 เมตร และตามมาตรฐาน NSSDA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.82 เมตร รองลงมาได้แก่ การใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน 8, 16 และ 4 จุด ตามลำดับ

คำสำคัญ: รูปตัดขวางลำน้ำ, แบบจำลองพื้นผิวดิจิทัล, อากาศยานไร้คนขับ, การสำรวจด้วยดาวเทียมแบบจลน์

ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus, Nakhonpathom 73140, Thailand.

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

ABSTRACT

This study was to survey the river cross sections in Lam Pa Chi river, Dan Makham Tia Subdistrict, Dan Makham Tia District, Karnchanaburi Province. Almost of study areas are agricultural. The length of the Lam Pa Chi river used in the study was approximately 1 km. and the width range between the left bank and the right bank is about 23 - 40 m. The aerial imagery data from UAV were collected with the overlap distance is 80% and the side lap is 70% of the aerial imagery data. The data collection of 23 ground control points and 5 river cross sections were surveyed by real time kinematics method. The aerial imagery was then processed using 4 different ground control points such as the use of ground control points in total of 4, 8, 16 and 23 points, respectively. The effect of the number of ground control points was subsequently analyzed on the positioning accuracy of the obtained digital surface models in each case. The comparison between the river cross section obtained from the digital surface models and the river cross sectional survey results obtained from the real time kinematics method in each same position were carried out. The results found that the river cross section obtained from the digital surface model with the highest accuracy is the use of 23 ground control points with an average root mean square error of 0.56 m., and NSSDA standard at a 95% confidence level, the average is 0.82 m., followed by the use of ground control points in total of 8, 16 and 4 points, respectively.

Key words: river cross section, digital surface model, unmanned aerial vehicle, real time kinematic survey

บทนำ

การสำรวจรังวัดเป็นการจำลองลักษณะของภูมิประเทศ ตามจุดต่างๆ ของภูมิประเทศ เพื่อหาความสัมพันธ์ของตำแหน่งแต่ละจุดที่อยู่บนพื้นผิวโลก เพื่อให้ทราบ ขนาดพื้นที่ ปริมาตร รูปร่าง ขอบเขต ทิศทาง ตำแหน่ง และความสูง โดยอาศัยเครื่องมือและวิธีการสำรวจต่างๆ ที่ได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง อาทิเช่น การรังวัดด้วยโซ่ กล้อง Transit พัฒนามาเป็นการรังวัดและทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ การสำรวจและส่งข้อมูลระยะไกล การสำรวจด้วยดาวเทียม การสำรวจด้วยเครื่องวัดระยะอิเลคโทรนิคส์ การสำรวจด้วยกล้อง Total Station การรังวัดพิกัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม และในปัจจุบันได้มีการนำอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle : UAV) มาประยุกต์ใช้ในการสำรวจสภาพภูมิประเทศ เนื่องจากข้อมูลที่ได้ มีความเป็นปัจจุบัน และเหมาะสมกับงานที่ต้องการข้อมูลอย่างเร่งด่วน เพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้น

ซึ่งข้อมูล (Rinaldi *et al*., 2019) แบบจำลองระดับความสูงที่ได้จากดาวเทียมเหมาะสำหรับแบบจำลองน้ำท่วม 2 มิติ ในพื้นที่ขนาดใหญ่ แต่สำหรับพื้นที่ในเมืองขนาดเล็กที่ต้องการความละเอียดและความคมชัดสูง ที่มีความทันสมัย จึงต้องใช้แบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่สร้างขึ้นด้วยโฟโตแกรมเมตรี โดยใช้ภาพถ่าย ที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งมีต้นทุนต่ำและมีคุณภาพสูง เมื่อใช้ร่วมกับแบบจำลองน้ำท่วม สามารถคาดการณ์สถานการณ์น้ำท่วมจากฝนที่ตกในพื้นที่เมืองขนาดเล็กและมีความซับซ้อนได้โดย ภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ (Santitamnont, 2012) เป็นภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัล ที่มีการพัฒนาให้มี

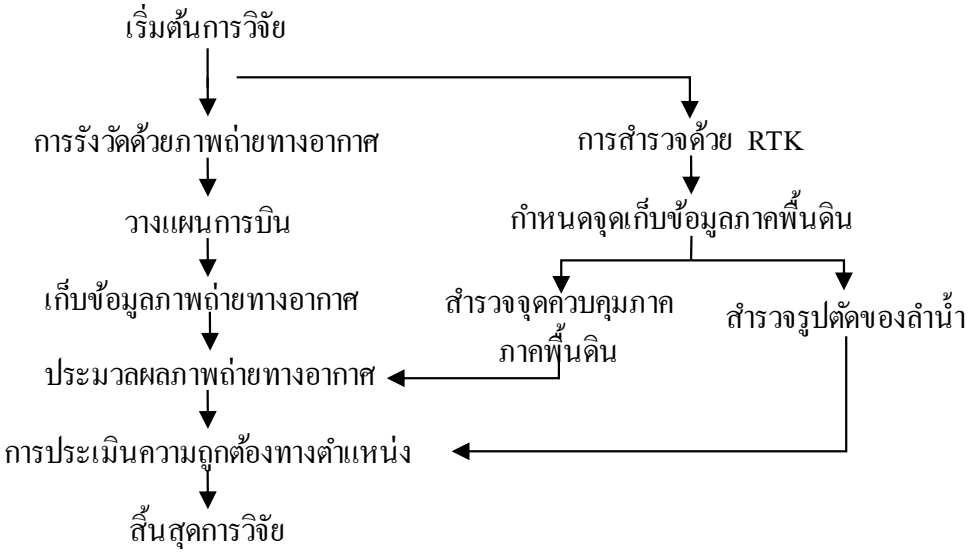
ประสิทธิภาพสามารถบันทึกภาพได้ด้วยความละเอียดสูงระดับ 10 - 40 เมกกะพิกเซล (Mega Pixel : MP) ในการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับใช้หลักการรังวัดด้วยภาพดิจิทัล (Digital Photogrammetry) หรือการสำรวจด้วยภาพถ่ายเชิงเลข ซึ่งเป็นการรังวัดด้วยภาพที่นำเอาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) มาใช้ในกระบวนการรังวัดและประมวลผล กระบวนการทำงานจะใช้การคำนวณเชิงวิเคราะห์โดยอาศัยการคำนวณเชิงเลขเป็นหลัก เป็นการนำคอมพิวเตอร์ และซอฟต์แวร์มาช่วยในการรังวัด ช่วยลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น (Kunii, 2018) ในการทดสอบความแม่นยำของการรังวัด การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล (Photogrammetry) และจากการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing) จากภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับแนวตั้งที่ระดับความสูง 70 - 90 เมตร ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ที่ได้ประมาณ ± 0.200 เมตร ซึ่งความถูกต้องเหล่านี้ยอมรับได้สำหรับการสำรวจสถานที่ก่อสร้าง และ เมื่อ (Sooahm and Taejung, 2015) สร้างแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัล (Digital Surface Model : DSM) จากภาพถ่ายอากาศยานไร้คนขับที่เกิดจากการจัดเรียงของชุดข้อมูลภาพและการจับคู่ภาพโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างสีและพิกเซลของภาพ ทำให้เกิดแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัล และเมื่อนำแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัล ที่สร้างจากอากาศยานไร้คนขับนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลจาก Lidar ความแม่นยำโดยรวมอยู่ที่ 1.5 เมตร ในค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์แบบเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Normalized Median absolute deviation : NMAD) (Yutaka and Yoshihisa, 2016) ทำการศึกษาความแม่นยำของแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลของลักษณะสัณฐานของแม่น้ำด้วยอากาศยานไร้คนขับระดับความสูงของเที่ยวบิน 100 เมตร ได้ดำเนินการเก็บข้อมูลก่อนและหลังน้ำท่วม ในแม่น้ำ Jyoge จังหวัดฮิโรชิม่า ประเทศญี่ปุ่น พร้อมกับการสำรวจภาคพื้นดินโดยใช้การสำรวจด้วยดาวเทียมแบบจลน์ และ Total Station พบว่าแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 4 เซนติเมตร บริเวณที่มีความสูงของพืชต่ำ (Chaninchoduek and Taesombat, 2020) ได้ทำการทดสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยาน ไร้คนขับสำหรับการสร้างแบบจำลองพื้นผิว บนระดับความสูงการบินที่ 100, 150, และ 200 เมตร มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสองทางดิ่ง (RMSEz) เท่ากับ 0.007, 0.393 และ 0.173 เมตร และมีระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 ทางดิ่งเท่ากับ 0.014, 0.771 และ 0.339 เมตร ตามลำดับ พบว่าที่ระดับความสูง 100 เมตร มีค่าความถูกต้องทางตำแหน่งมากกว่าระดับความสูงที่ 150 และ 200 เมตร (Langhammer *et al*., 2017) ทำการสร้างแบบจำลองน้ำท่วมโดยการสำรวจอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ร่วมกับการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ สำหรับแบบจำลองสามมิติ (3D) ที่มีความละเอียด 1.5 เซนติเมตร/พิกเซล พบว่าแหล่งข้อมูลเหล่านี้มีศักยภาพสูงสำหรับการใช้งานในแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ และสำหรับในการสร้างแผนที่ และแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัล ที่ต้องการความถูกต้อง (Punyo, 2019) พบว่าความถูกต้องของแผนที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดินเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่เมื่อจุดควบคุมภาคพื้นดินตั้งแต่ 8 ตำแหน่งขึ้นไป

จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมข้างต้น พบว่ามีการใช้ภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับมาช่วยในงานสำรวจลักษณะของลำน้ำ โดยใช้แบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่ได้จากการประมวลผลร่วมกับการใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดว่าหากมีการนำแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศร่วมกับการใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินมาประยุกต์ใช้กับงานสำรวจรูปตัดขวางลำน้ำและทำการตรวจสอบความถูกต้องทาง

ตำแหน่งกับผลสำรวจรูปตัดขวางลำน้ำที่ได้จากการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ดังนั้นจึงทำการคัดเลือกพื้นที่ทดสอบในพื้นที่ตำบลด่านมะขามเตี้ย อำเภอด่านมะขามเตี้ย จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรม และมีแม่น้ำลำภาชีไหลผ่าน เนื่องจากสามารถทำงานในพื้นที่ปฏิบัติงานได้สะดวกรวดเร็ว ทันต่อการนำข้อมูลมาศึกษาวิเคราะห์

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

1. วางแผนการบิน และกำหนดจุดเก็บข้อมูลภาคพื้นดิน

ได้วางแผนการบินโดยใช้โปรแกรม Litchi ในออกแบบแนวบินให้มีส่วนซ้อนระหว่างภาพร้อยละ 80 และ ส่วนเกยระหว่างแนวบิน ร้อยละ 70 ของภาพถ่าย ที่ระดับความสูงในการบินถ่ายภาพที่ระดับ 120 เมตรจากระดับพื้นดิน เนื่องจากเป็นระดับที่ปลอดภัยจากความสูงของสิ่งปลูกสร้าง และสัตว์ปีกบริเวณที่ทำการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ และเวลาที่ใช้ในการบินประมาณ 25 นาที จากนั้นทำการกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน โดยเลือกในพื้นที่โล่งสามารถเห็นจุดควบคุมภาคพื้นดินได้ชัดเจนจากภาพถ่าย และสามารถเข้าไปวางเป้าควบคุมภาคพื้นดิน และจุดเก็บข้อมูลรูปตัดลำน้ำที่จะสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์

2. เก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ และข้อมูลภาคพื้นดิน

ก่อนทำการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศและข้อมูลภาคพื้นดิน เพื่อให้ตำแหน่งที่การรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ และตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายมีตำแหน่งเดียวกัน จึงทำการวางเป้าควบคุมภาคพื้นดิน ขนาด 1 × 1 เมตร ลงบนตำแหน่งที่จะทำการทดสอบ และทำการใช้ตะปูตอกยึดแผ่นเป้าควบคุมภาคพื้นดินให้ติดกับพื้นผิวภูมิประเทศ จากนั้นจึงทำการบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศโดยอากาศยานไร้คนขับในช่วงวันที่ 20 เมษายน 2561 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ปริมาณน้ำในแม่น้ำลำภาชี

ค่อนข้างตื้นเขินมองเห็นท้องน้ำในบางช่วง พร้อมทั้งทำการสำรวจรังวัดข้อมูลจุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวนทั้งหมด 23 ตำแหน่ง ครอบคลุมพื้นที่บริเวณตลิ่งซ้าย และขวาของแม่น้ำด้วยวิธีการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ซึ่งทำการตั้งสถานีหลัก (Base station) บนหมุดที่ทราบค่าของกรมทางหลวง (รหัสหมุด KRI-0086) บริเวณกิโลเมตรที่ 25+100 อำเภอด่านมะขามเตี้ย เพื่อส่งข้อมูลค่าแก้ต่างๆ ไปยังสถานีจร (Rover station) ทำให้ทราบค่าพิกัด (X, Y และ Z) ณ ตำแหน่งที่ต้องการทราบค่า ลักษณะการปฏิบัติงานแสดงดังภาพที่ 2

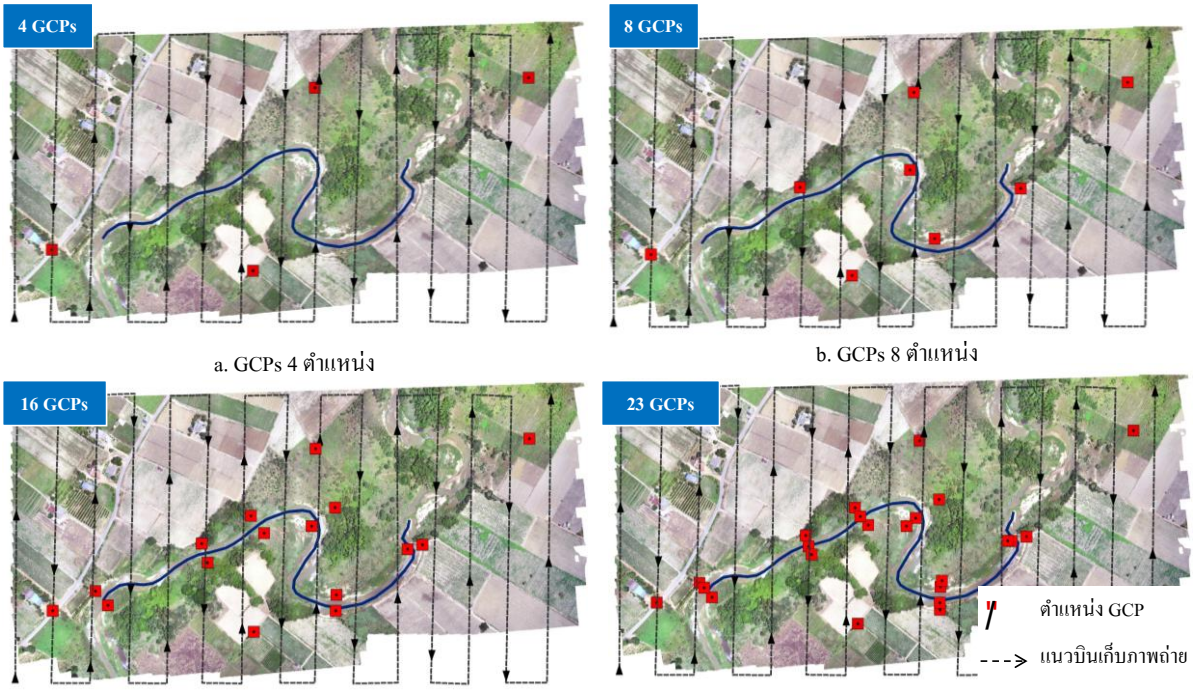
ภาพที่ 2 การเก็บตำแหน่งจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCPs)

3. ประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ

ทำการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ ด้วยโปรแกรม Agisoft Photoscan โดยใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินโดยแบ่งปัน 4 กรณี เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งโดย กรณีที่ 1 ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 4 ตำแหน่ง บริเวณทั้ง 4 มุมของลำน้ำ กรณีที่ 2 ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 8 ตำแหน่ง บริเวณทั้ง 4 มุมของลำน้ำและริมตลิ่งฝั่งขวา หรือ ริมตลิ่งฝั่งซ้ายของแต่ละช่วง กรณีที่ 3 ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 16 ตำแหน่ง บริเวณทั้ง 4 มุมของลำน้ำ และบริเวณริมตลิ่งขวา และ ตลิ่งซ้ายของแต่ละช่วง และ กรณีที่ 4 ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 23 ตำแหน่ง บริเวณทั้ง 4 มุมของลำน้ำ บริเวณริมตลิ่งขวา กลางลำน้ำ และ ตลิ่งซ้ายของแต่ละช่วง ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งแต่ละกรณีทำให้ได้ผลลัพธ์ใน 2 ลักษณะดังนี้

3.1 ภาพดัดแก้เชิงเลข เป็นภาพถ่ายทางอากาศหรือภาพถ่ายจากดาวเทียมในแนวดิ่ง ซึ่งจะขจัดการบิดเบี้ยวที่เกิดจากความสูงต่ำและความลาดเอียงที่แตกต่างกันของภูมิประเทศ เพื่อว่าภาพที่ได้จะแสดงวัตถุต่างๆ เสมือนมองจากด้านบน

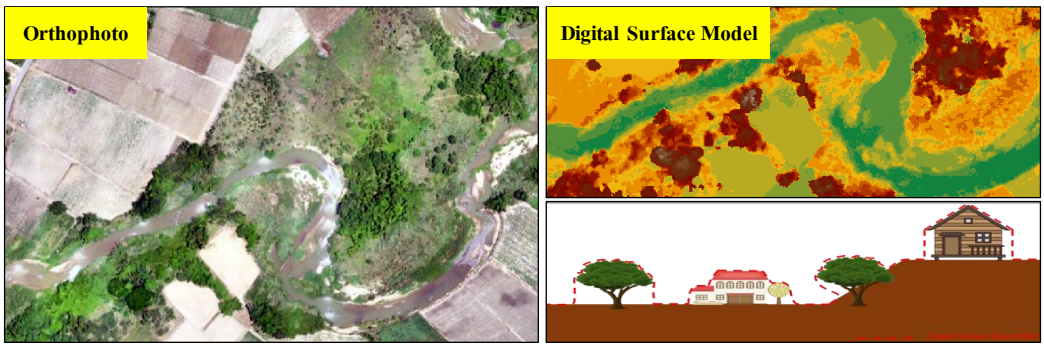
3.2 แบบจำลองพื้นผิวดิจิทัล (Digital Surface Model: DSM) เป็นการจำลองความสูงของภูมิประเทศ และจัดเก็บให้อยู่ในรูปแบบตารางกริดหรือข้อมูลแรสเตอร์ โดยรวมความสูงของสิ่งปกคลุมพื้นผิวทางกายภาพของโลกด้วย เช่น สิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ และพุ่มไม้ เป็นต้น



a. GCPs 4 ตำแหน่ง b. GCPs 8 ตำแหน่ง

c. GCPs 16 ตำแหน่ง d. GCPs 23 ตำแหน่ง

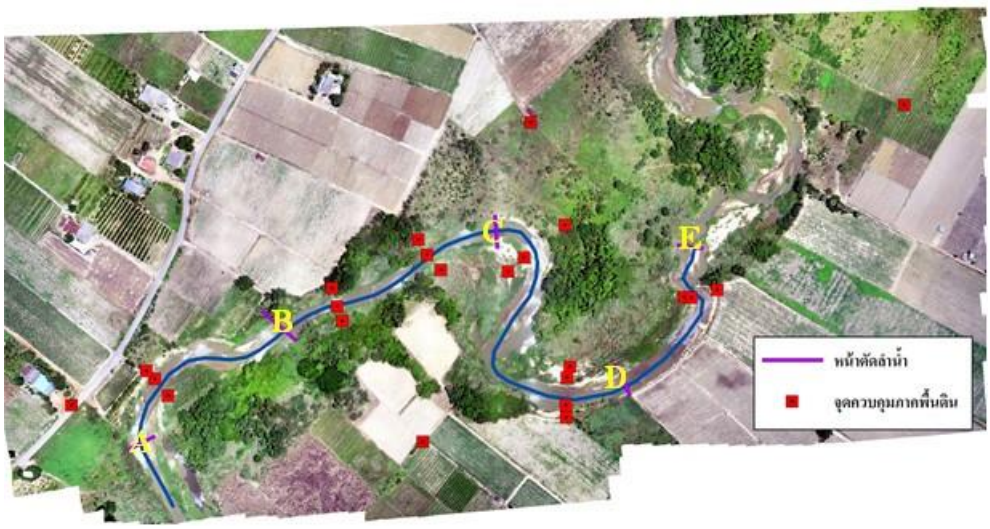
ภาพที่ 3 ตำแหน่งจุดควบคุมภาคพื้นดิน และแนวบินเก็บภาพถ่ายทางอากาศ



ภาพที่ 4 ตัวอย่างผลลัพธ์จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ

4. สำรวจรูปตัดขวางลำน้ำ

ทำการสำรวจรูปตัดลำน้ำในแม่น้ำลำภาชี เป็นระยะทางประมาณ 1 กิโลเมตรตามลำน้ำ จำนวน 5 รูปตัด โดยเลือกช่วงลำน้ำที่มีลักษณะที่แตกต่างกันทางกายภาพ (รูปตัด A และ E ลำน้ำมีลักษณะค่อนข้างแคบมีสันดอนทราย รูปตัด B ลำน้ำมีลักษณะกว้างมีวัชพืชและต้นไม้บริเวณริมตลิ่ง และรูปตัด C และ D บริเวณตลิ่งทั้ง 2 ฝั่งโล่งวัชพืชน้อย) โดยใช้การสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ตำแหน่งรูปตัดลำน้ำและลักษณะการปฏิบัติงานแสดงดังภาพที่ 5 และภาพที่ 6 ตามลำดับ



ภาพที่ 5 ตำแหน่งรูปตัด 5 ตำแหน่ง

ภาพที่ 6 การสำรวจรูปตัดลำน้ำ

5. การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่ง

การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่ง (Punyo, 2019) สามารถอธิบายด้วยค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่แท้จริง ถือว่าเป็นความผิดพลาดทางเรขาคณิตของข้อมูล ซึ่งอาจมีผลมาจากการได้มาซึ่งข้อมูลทั้งจากระบบสำรวจและระบบการประมวลผลภาพ การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลเป็นการสร้างความเชื่อมั่นในการนำข้อมูลไปใช้ ซึ่งค่าความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งสามารถรายงานเป็นระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของตำแหน่งทดสอบ ตัวชี้วัดความถูกต้องทางตำแหน่งสามารถอธิบายด้วยค่าความคลาดเคลื่อนที่หาจากวิธีการทางสถิติ ดังนี้

5.1 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Mean Square Error; MSE)

$$MSE_z = \frac{1}{n}\sum_{0i=1}^{n}(Z_{0i} - Z_{GNSSi})^2 \quad (1)$$

5.2 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสอง (Root Mean Square Error ; RMSE)

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Z_{0i}-Z_{GNSSi})^2}{n}} \quad (2)$$

5.3 ค่าความคลาดถูกต้องแนวดิ่ง

$$\text{Accuracy}_Z = 1.9600 \text{ X } \text{RMSE}_Z \quad (3)$$

โดยที่ Z_{0i} คือ ค่าพิกัดของค่าที่วัดได้

Z_{GNSS} คือ ค่าพิกัดจริงที่ถูกต้อง

n คือ จำนวนค่าที่ทำการสำรวจรังวัด ซึ่งค่าตัวชี้วัดทั้งสาม ควรมีค่ายิ่งน้อย ความถูกต้องทางตำแหน่งยิ่งมากขึ้น

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

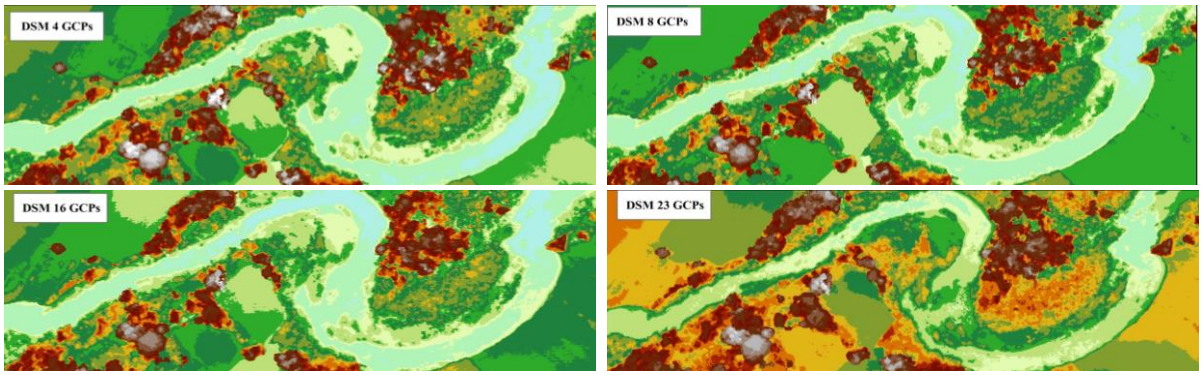
จากการศึกษาสำรวจรังวัดรูปตัดขวางลำน้ำโดยอากาศยานไร้คนขับในแม่น้ำลำภาชี ได้ผลการศึกษาดังนี้

1. การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ

จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ (Nagendran *et al*., 2018) จุดควบคุมภาคพื้นดินมีความสำคัญในการสร้างผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ จึงทำการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 4 กรณี โดยใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน ในการปรับแก้ความถูกต้องของภาพถ่ายทางอากาศด้วยจุดควบคุมภาคพื้นดินที่มีจำนวนที่แตกต่างกัน ทำให้ได้ผลลัพธ์ของแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่มีความแตกต่างกัน โดยในกรณีที่ 1 ที่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน 4 ตำแหน่ง มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสองทางราบ และทางดิ่งเท่ากับ 0.35 มิลลิเมตร และ 0.02 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมีความสูงของพื้นผิวอยู่ระหว่าง 32.91 - 56.19 เมตรเทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง กรณีที่ 2 ที่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน 8 ตำแหน่ง มีค่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสองทางราบ และทางดิ่งเท่ากับ 0.41 มิลลิเมตร และ 0.17 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมีความสูงของพื้นผิวอยู่ระหว่าง 30.23 - 62.16 เมตรเทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง กรณีที่ 3 ที่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน 16 ตำแหน่ง มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสองทางราบ และทางดิ่งเท่ากับ 5.91 และ 3.31 มิลลิเมตร และมีความสูงของพื้นผิวอยู่ระหว่าง 27.85 - 63.37 เมตรเทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง และ กรณีที่ 4 ที่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน 23 ตำแหน่ง มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสองทางราบและทางดิ่งเท่ากับ 6.92 และ 5.27 มิลลิเมตร และ มีความสูงของพื้นผิวอยู่ระหว่าง 20.54 - 64.71 เมตรเทียบกับระดับน้ำทะเลปานกลาง รายละเอียดของแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่ได้ทั้ง 4 กรณี มีค่าความละเอียด 0.13 × 0.13 เมตร ผลลัพธ์แสดงดังภาพที่ 7 และ ภาพถ่ายออร์โธสีมีความละเอียดของภาพถ่ายทางอากาศเท่ากับ 0.33 × 0.33 เมตร

ตารางที่ 1 ผลของแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัล

Case	GCPs	RMSE (mm)			Elevation (m)	
		X	Y	Z	Minimum	Maximum
1	4	0.15	0.31	0.02	32.91	56.16
2	8	0.23	0.34	0.17	30.23	62.16
3	16	4.66	3.63	3.31	27.85	63.37
4	23	5.23	4.53	5.27	20.54	64.71



ภาพที่ 7 แบบจำลองดิจิทัลที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ

2. การสำรวจรูปตัดขวางลำน้ำ

ผลการสำรวจรูปตัดลำน้ำระยะทางประมาณ 1 กิโลเมตร จำนวน 5 รูปตัด โดยแต่ละรูปตัดมีความกว้างของลำน้ำตั้งแต่ตลิ่งขวาถึงตลิ่งซ้ายอยู่ในช่วงประมาณ 23 - 40 เมตร ซึ่งลักษณะรูปตัดขวางลำน้ำที่เลือกบางช่วงของรูปตัดขวางลำน้ำจะมีลักษณะที่ค่อนข้างแคบ และคดงอตามลำน้ำ เพื่อให้เกิดลักษณะที่แตกต่างกันของแต่ละรูปตัด ตำแหน่งรูปตัดลำน้ำที่เลือก และรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2 ตามลำดับ

ภาพที่ 8 ตำแหน่งรูปตัด 5 ตำแหน่ง

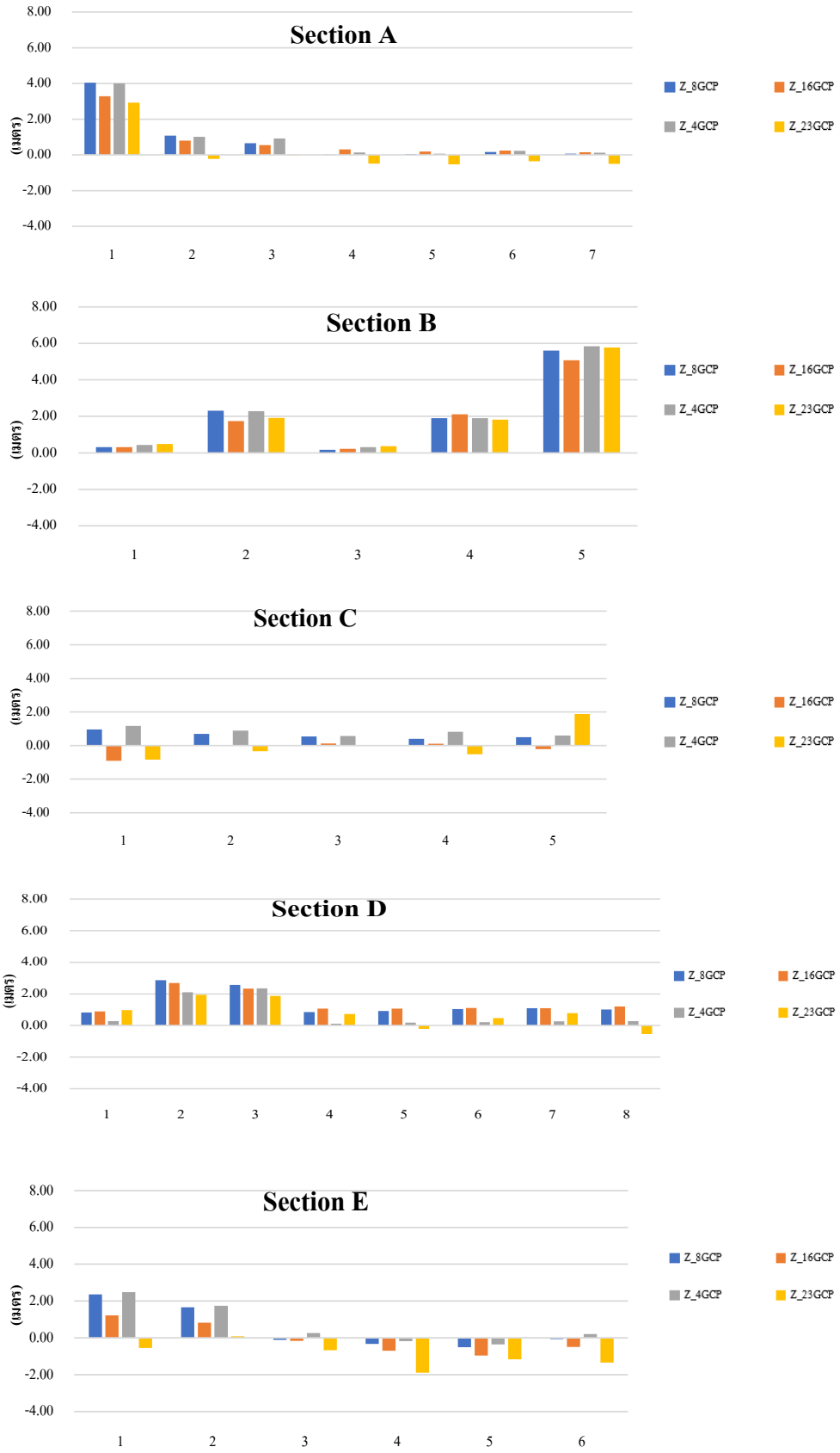
ตารางที่ 2 รายละเอียดตำแหน่งรูปตัดลำน้ำ

Sections	X	Y	Number of check points	Distance (m)
A	541358.85	1532128.91	7	36.7
B	541520.32	1532193.25	5	22.35
C	541657.14	1532261.65	5	31
D	541776.06	1532129.86	8	34
E	541836.50	1532244.31	6	23.7

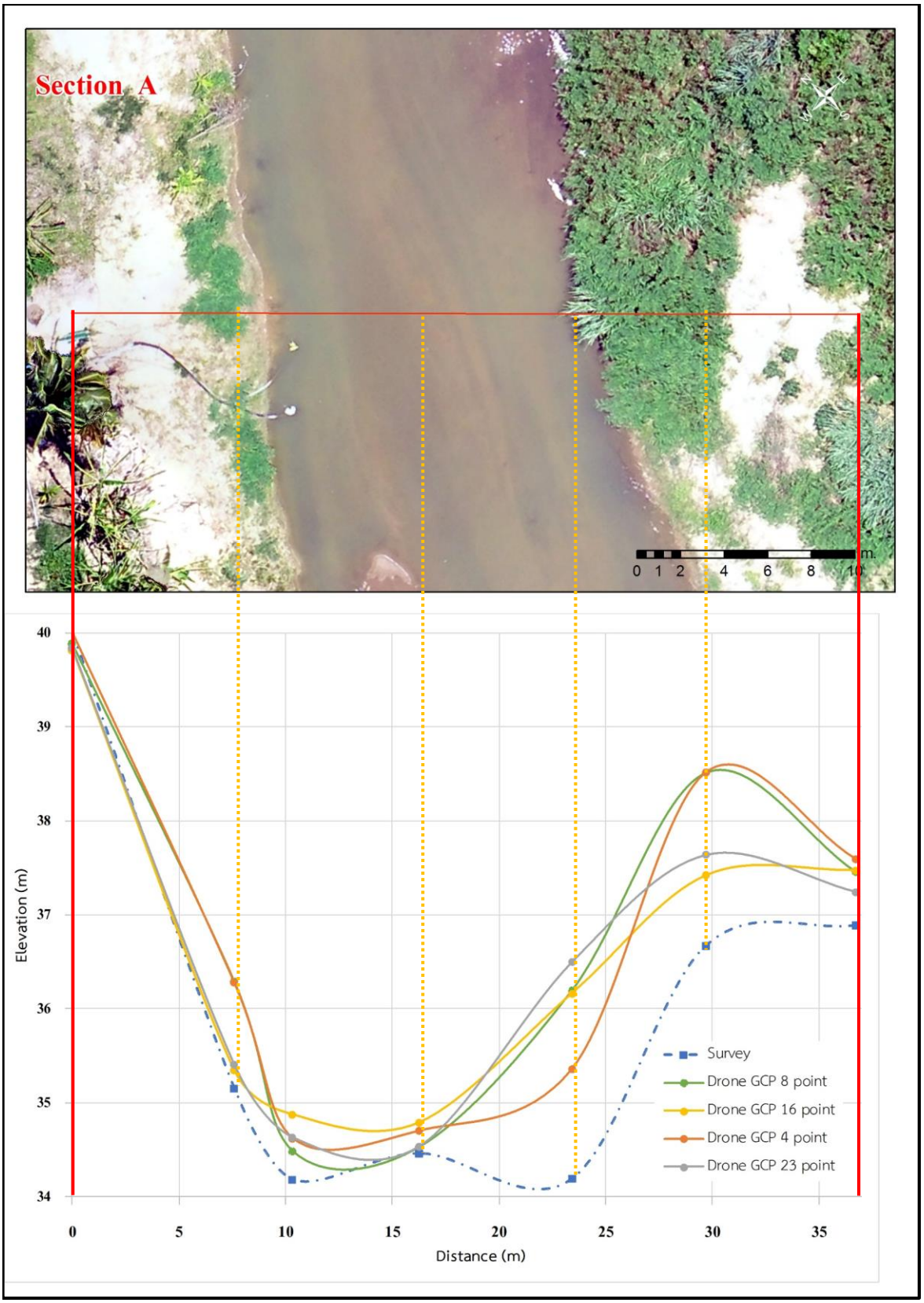
และเมื่อทำการเปรียบเทียบรูปตัดขวางลำน้ำที่ได้จากแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลซึ่งได้จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ กับผลสำรวจรูปตัดลำน้ำที่ได้จากการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ จำนวน 5 รูปตัดลำน้ำ พบว่ากรณีที่ 1 รูปตัดขวางลำน้ำจากแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่ได้จากการผลภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 4 ตำแหน่ง มีผลต่างทางดิ่งแต่ละรูปตัดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง ± 6.64 เมตร ทำให้ค่าคลาดเคลื่อน (error) ของแต่ละรูปตัดอยู่ระหว่าง 4 - 12 เมตร กรณีที่ 2 รูปตัดขวางลำน้ำจากแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่ได้จากการผลภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 8 ตำแหน่ง มีผลต่างทางดิ่งแต่ละรูปตัดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง ± 7.17 เมตร ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนของแต่ละรูปตัดอยู่ระหว่าง 4 - 11 เมตร กรณีที่ 3 รูปตัดขวางลำน้ำจากแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่ได้จากการผลภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 16 ตำแหน่ง มีผลต่างทางดิ่งแต่ละรูปตัดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง ± 6.25 เมตร ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนของแต่ละรูปตัดอยู่ระหว่าง 1 - 11 เมตร และกรณีที่ 4 รูปตัดขวางลำน้ำจากแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่ ได้จากการผลภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 23 ตำแหน่ง มีผลต่างทางดิ่งแต่ละรูปตัดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง ± 6.29 เมตร ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนของแต่ละรูปตัดอยู่ระหว่าง 3 - 10 เมตร ผลต่างของรูปตัดขวางลำน้ำจากแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลแสดงดังตารางที่ 3 และ ภาพที่ 8 และแสดงรูปตัดขวางลำน้ำทั้ง 5 รูปตัดในภาพที่ 9 ถึงภาพที่ 14 ซึ่งเป็นไปตามการศึกษาของ (Agüera-Vega *et al*., 2017) พบว่าการเพิ่มจำนวน จุดควบคุมภาคพื้นดิน มีอิทธิพลต่อความแม่นยำในแนวราบ ส่วนความแม่นยำในแนวดิ่งไม่ได้รับอิทธิพลจากสัณฐานภูมิประเทศ

ตารางที่ 3 ผลต่างของแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลในแต่ละกรณี

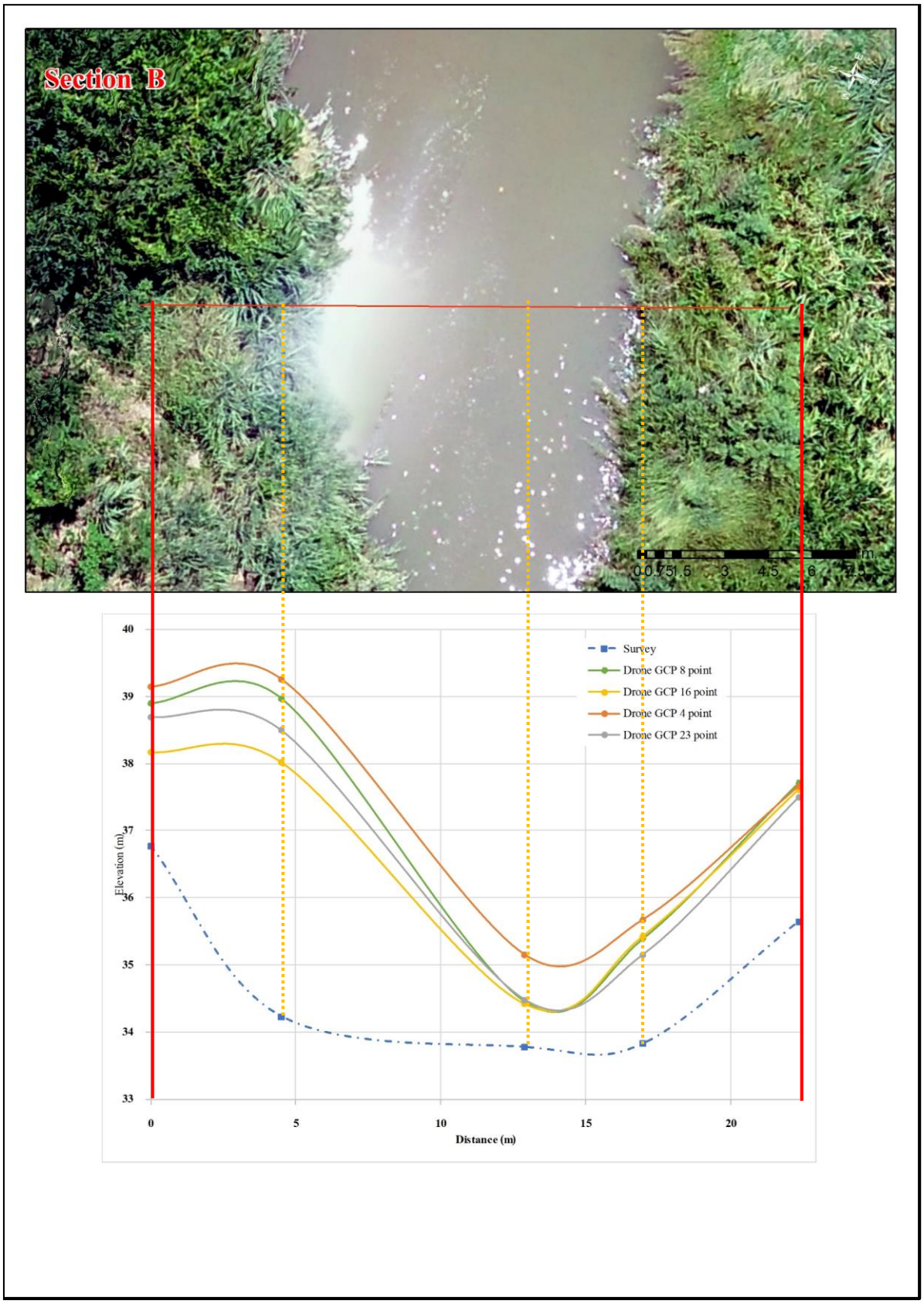
Sections	4 GCPs (m)			8 GCPs (m)			16 GCPs (m)			23 GCPs (m)		
	+ΔZ	-ΔZ	ΔZ	+ΔZ	-ΔZ	ΔZ	+ΔZ	-ΔZ	ΔZ	+ΔZ	-ΔZ	ΔZ
A	5.51	0	5.52	5.94	-0.12	6.05	4.51	-0.19	4.69	4.4	-0.17	4.57
B	12.ก	0	12.64	11.19	0	11.19	9.39	0	9.39	10.08	0	10.08
C	4.04	0	4.04	3.09	0	3.09	0.24	-1.11	1.35	1.89	-1.69	3.58
D	5.78	0	5.78	11.16	0	11.16	11.45	0	11.45	6.75	-0.76	7.5
E	4.69	-0.54	5.23	3.69	-0.68	4.37	2.05	-2.32	4.37	0.08	-5.61	5.69
Average			**6.64**			**7.17**			**6.25**			**6.29**



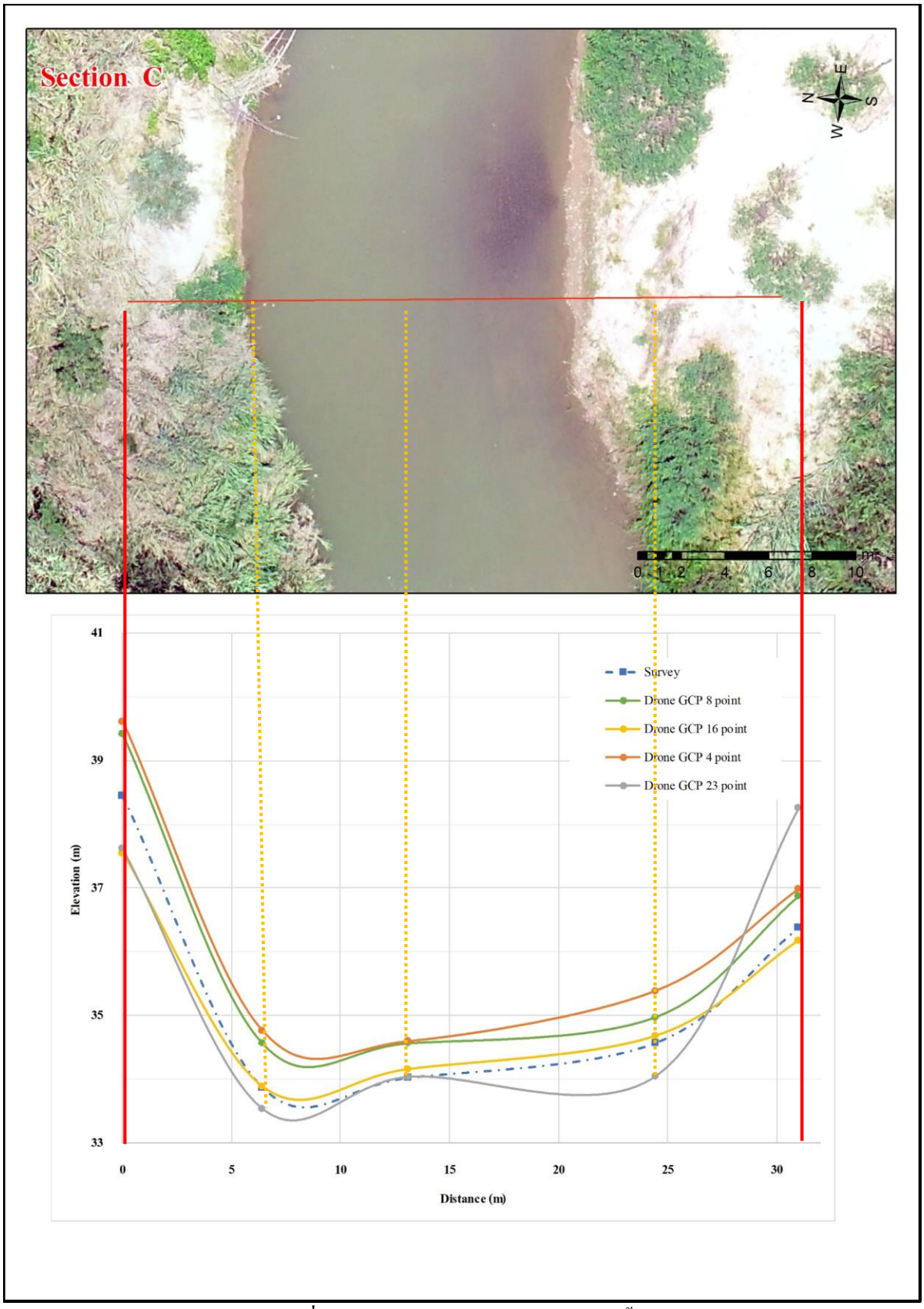
ภาพที่ 9 ผลต่างในแนวดิ่งของแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลเทียบกับรูปตัดลำน้ำที่ได้จากการสำรวจด้วยดาวเทียมแบบจลน์



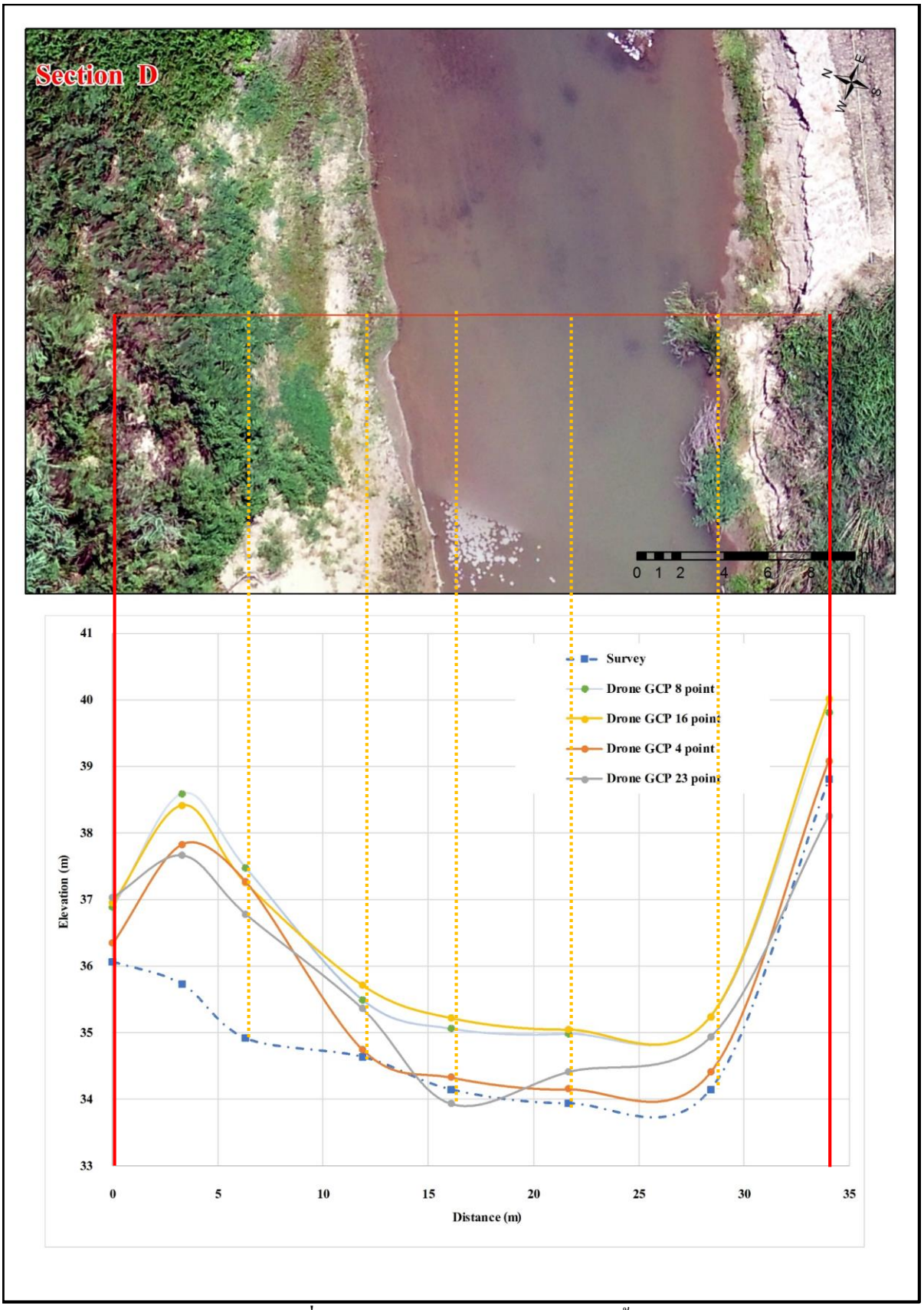
ภาพที่ 10 ผลการสำรวจรังวัดรูปตัดขวางลำน้ำ A



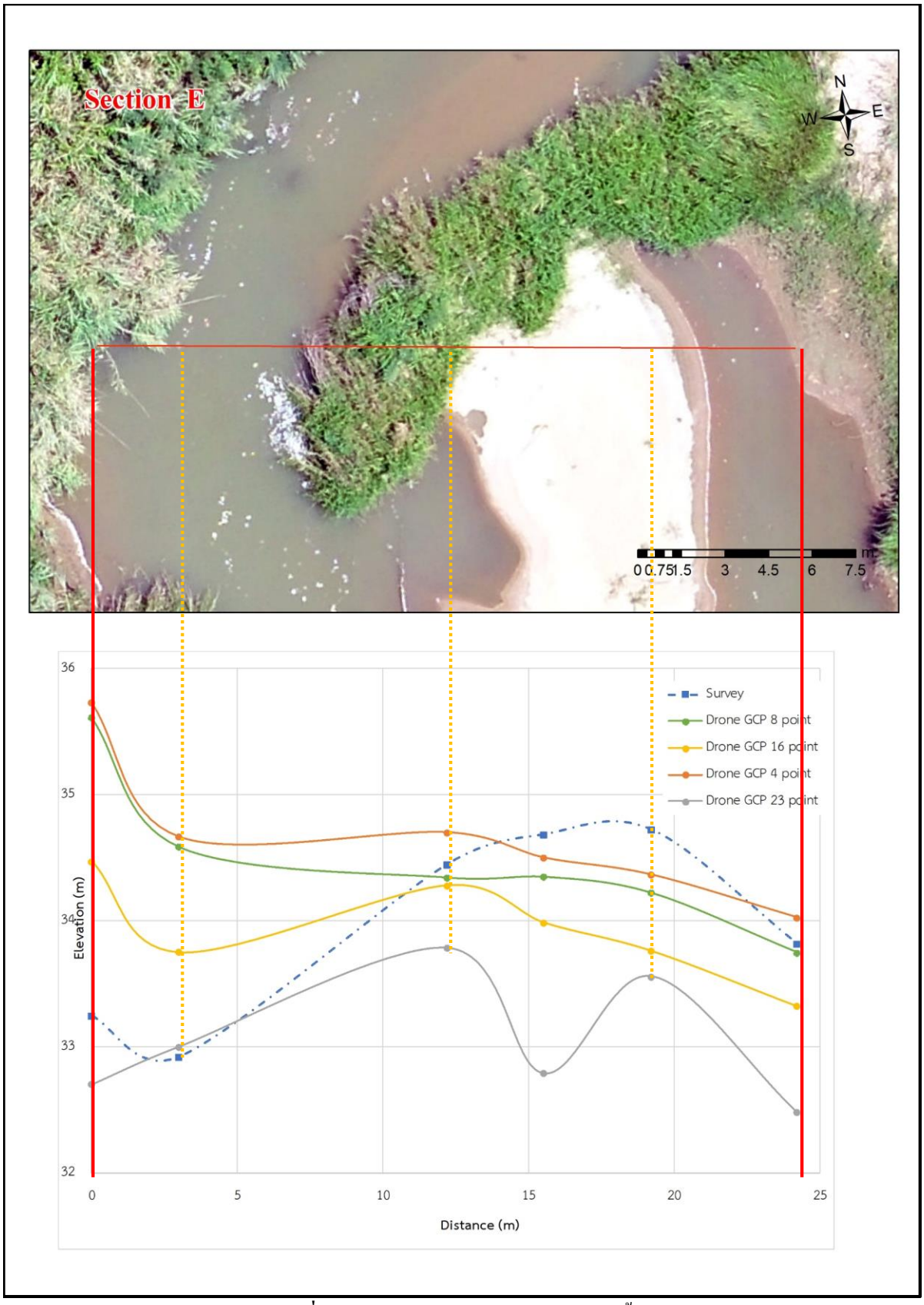
ภาพที่ 11 ผลการสำรวจรังวัดรูปตัดขวางลำน้ำ B



ภาพที่ 12 ผลการสำรวจรังวัดรูปตัดขวางลำน้ำ C



ภาพที่ 13 ผลการสำรวจรังวัดรูปตัดขวางลำน้ำ D



ภาพที่ 14 ผลการสำรวจรังวัดรูปตัดขวางลำน้ำ E

3. การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่ง

การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของรูปตัดขวางลำน้ำจากแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศจำนวน 4 กรณี โดยใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 4, 8, 16, และ 23 ตำแหน่ง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับงานสำรวจรูปตัดขวางของลำน้ำ จึงทำการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งจำนวน 5 รูปตัดลำน้ำ ประกอบด้วย A, B, C, D และ E เมื่อนำผลสำรวจรูปตัดลำน้ำที่ได้จากการสำรวจรังวัดดาวเทียมแบบจลน์ และผลสำรวจรูปตัดลำน้ำที่ได้จากการประมวลผลแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัล ทำการตรวจสอบความถูกต้อง พบว่า

กรณีที่ 1 ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 4 ตำแหน่ง รูปตัด A, B, C,D และ E มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง เท่ากับ 0.79, 2.53, 0.81, 0.72 และ 0.69 เมตร ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าผลสำรวจรูปตัดลำน้ำที่ได้จากการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ และเมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของแต่ละรูปตัดพบว่ามีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสองของแต่ละรูปตัดเท่ากับ 0.98, 2.84, 0.84, 1.13 และ 1.26 เมตร ตามลำดับ หากพิจารณาตามมาตรฐาน NSSDA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าเท่ากับ 1.93, 5.56, 1.64, 2.22 และ 2.47 เมตร ตามลำดับ

กรณีที่ 2 ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 8 ตำแหน่ง รูปตัด A, B, C,D และ E มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง เท่ากับ 0.83, 2.24, 0.62, 1.39 และ 0.50 เมตร ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าผลสำรวจรูปตัดลำน้ำที่ได้จากการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ และเมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของแต่ละรูปตัดพบว่ามีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสองของแต่ละรูปตัดเท่ากับ 1.14, 2.62, 0.65, 1.59 และ 1.21 เมตร ตามลำดับ หากพิจารณาตามมาตรฐาน NSSDA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าเท่ากับ 2.24, 5.13, 1.27, 3.12 และ 2.37 เมตร ตามลำดับ

กรณีที่ 3 ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 16 ตำแหน่ง รูปตัด A, B, และ D มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง เท่ากับ 0.62, 1.88 และ 1.43 เมตร ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าผลสำรวจรูปตัดลำน้ำที่ได้จากการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ส่วนรูปตัด C และ E มีค่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองเท่ากับ -0.17 และ -0.04 เมตร เมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องรูปตัด A, B, C, D และ E พบว่ามีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสอง ของแต่ละรูปตัดเท่ากับ 0.88, 2.15, 0.42, 1.57 และ 0.80 เมตร ตามลำดับ หากพิจารณาตามมาตรฐาน NSSDA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าเท่ากับ 1.73, 4.21, 0.83, 3.07 และ 1.57 เมตร ตามลำดับ

กรณีที่ 4 ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 23 ตำแหน่ง รูปตัด A, B, C และ D มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง เท่ากับ 0.60, 2.02, 0.04 และ 0.75 เมตร ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าผลสำรวจรูปตัดลำน้ำที่ได้จากการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ส่วนรูปตัด E มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองเท่ากับ -0.92 เมตร เมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องรูปตัด A, B, C, D และ E พบว่ามีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสอง ของแต่ละรูปตัดเท่ากับ 0.98, 2.35, 0.96, 1.11 และ 1.12 เมตร ตามลำดับ หากพิจารณาตามมาตรฐาน NSSDA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 มีค่าเท่ากับ 1.91, 4.61, 1.88, 2.18 และ 2.19 เมตร ตามลำดับ

รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4 และ ตารางที่ 5 (Alganci *et al*., 2018) พบว่าการประเมินความแม่นยำของแบบจำลองภูมิประเทศ กรณีที่มีสิ่งปกคลุมดิน PHR และ SPOT DSM มีความแม่นยำสูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสอง อยู่ระหว่าง 4.23 - 5.09 เมตร ALOS DSM มีผลลัพธ์ที่น่าพอใจโดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสองเท่ากับ 5.91 เมตร และ SRTM และ ASTER DSM มี

ความแม่นยำที่แย่ที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสอง อยู่ระหว่าง 6.49 - 6.92 เมตร ซึ่งจะเห็นว่าค่าความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองภูมิประเทศที่ใช่อยู่ในปัจจุบันนั้น มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสอง ที่สูงกว่าแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่ได้จากภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

ตารางที่ 4 การตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งของแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลในแต่ละรูปตัด

Sections	4 GCPs		8 GCPs		16 GCPs		23 GCPs	
	Mean Error(m)	RMSE (m)	Mean Error (m)	RMSE (m)	Mean Error (m)	RMSE (m)	Mean Error (m)	RMSE (m)
A	0.79	0.98	0.83	1.14	0.62	0.88	0.60	0.98
B	2.53	2.84	2.24	2.62	1.88	2.15	2.02	2.35
C	0.81	0.84	0.62	0.65	-0.17	0.42	0.04	0.96
D	0.72	1.13	1.39	1.59	1.43	1.57	0.75	1.11
E	0.69	1.26	0.50	1.21	-0.04	0.80	-0.92	1.12
Mean		**0.57**		**0.53**		**0.56**		**0.42**

ตารางที่ 5 ความถูกต้องของแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลตามมาตรฐาน NSSDA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Sections	NSSDA Vertical Accuracy$_z$ (ACCr) at 95% Confidence Level			
	4 GCPs	8 GCPs	16 GCPs	23 GCPs
A	1.93	2.24	1.73	1.91
B	5.56	5.13	4.21	4.61
C	1.64	1.27	0.83	1.88
D	2.22	3.12	3.07	2.18
E	2.47	2.37	1.57	2.19
Mean	**1.12**	**1.04**	**1.09**	**0.82**

จุดควบคุมภาพพื้นดินมีอิทธิพลต่อความแม่นยำของแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัล (Nagendran *et al*., 2018) พบว่าความแม่นยำที่ดีขึ้นมากจากการกระจายตัวได้ดีของจุดควบคุมภาคพื้นดินในพื้นที่การศึกษา ส่วน (Agüera-Vega *et al*., 2017) พบว่าการเพิ่มจำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดินมีอิทธิพลต่อความแม่นยำ ในแนวราบเมื่อจำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดินเพิ่มขึ้นความแม่นยำก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนความแม่นยำในแนวดิ่งไม่ได้รับอิทธิพลจากสัณฐานภูมิประเทศ (Tangpoomjit *et al*., 2020) ความถูกต้องในแนวดิ่งเริ่มคงที่ตั้งแต่ 8 จุด สอดคล้องกับการวางจุดจุดควบคุมภาคพื้นดินในพื้นที่ศึกษาที่สม่ำเสมอ และ (Mazzoleni *et al*., 2020) ได้กล่าวว่า อย่างไรก็ตามรูปตัดลำน้ำที่ได้จาก LiDAR และอากาศยานไร้คนขับมักมีค่าระดับสูงกว่าค่าระดับจริง ซึ่งจากศึกษาครั้งนี้การเพิ่มจำนวนจุดควบคุมภาพพื้นดินมีผลต่อ

ความแม่นยำเพิ่มที่เพิ่มขึ้น โดยรูปตัดขวางลำน้ำจากแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่มีจุดควบคุมภาพพื้นดินจำนวน 23 ตำแหน่ง ให้ค่าความถูกต้องดีที่สุด และยังพบว่าค่าระดับที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับส่วนใหญ่มีระดับสูงกว่าค่าระดับจริงที่ได้จากการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์

สรุป

การสำรวจรูปตัดลำน้ำด้วยแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่ได้จากอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ โดยใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 4 กรณี ดังกล่าวในหัวข้อข้างต้น เพื่อให้เกิดความแม่นยำของรูปตัดขวางลำน้ำจากแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัล โดยทำการเปรียบเทียบกับผลสำรวจรูปตัดขวางลำน้ำจำนวน 5 รูปตัด ด้วยวิธีการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์

1. จากผลข้างต้นพบว่ากรณีที่ 4 รูปตัดขวางลำน้ำจากแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน 23 ตำแหน่ง ที่มีจุดควบคุมภาคพื้นดินบริเวณ 4 มุมของลำน้ำ ตลิ่งซ้าย-ขวาของลำน้ำ และกลางลำน้ำที่เป็นสันดอนทราย สามารถให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดีกว่ากรณีที่ 2 กรณีที่ 3 และกรณีที่ 1 ตามลำดับ สามารถตรวจสอบได้จากค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสอง

2. การเพิ่มจำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดินช่วยให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นไม่มาก เนื่องจากบริเวณพื้นที่มีสิ่งที่ปกคลุมดินพื้นผิวภูมิประเทศ เช่น วัชพืช ต้นไม้ สิ่งก่อสร้างต่างๆ เป็นต้น ดังจะเห็นได้จากรูปตัด B เมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งของแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลทั้ง 4 กรณี รูปตัด B มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองที่สูงกว่ารูปตัดอื่นๆ

ข้อเสนอแนะ

การใช้แบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับในงานสำรวจรูปตัดลำน้ำยังคงมีข้อจำกัดอยู่หลายอย่าง เช่น ความสูงของต้นไม้บริเวณตลิ่งซ้ายและตลิ่งขวา การสะท้อนของผิวน้ำ เนื่องจากการสำรวจด้วยภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับไม่สามารถถ่ายภาพผ่านทะลุน้ำได้ เป็นต้น นอกจากนี้การสำรวจรังวัดรูปตัดลำน้ำด้วยการสำรวจด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ก็ยังมีค่าความคาดเคลื่อนจากความเป็นจริงอยู่ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสนที่สนับสนุนอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ขอขอบคุณคณะทำงานที่ช่วยในการเก็บข้อมูลภาคสนาม รวมถึงประชาชนในตำบลด่านมะขามเตี้ย พื้นที่ทำวิจัยที่อนุญาตให้ใช้พื้นที่ในการเข้าพื้นที่เก็บข้อมูลสนาม

เอกสารอ้างอิง

Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F. and Martínez-Carricondo, P. 2017. Accuracy of Digital Surface Models and Orthophotos Derived from Unmanned Aerial. **Journal of Surveying Engineering** 143(2): 04016025.

Alganci, U., Besol, B. and Sertel, E. 2018. Accuracy assessment of different digital surface models. **International Journal of Geo-Information** 7(3): 114.

Chaninchoduek, M. and Taesombat, W. 2020. Accuracy of UAV based photogrammetry for DSM

generation on different flying heights. **Engineering Journal Chiang Mai University** 27(3): 1-14. (in Thai)

Kunii, Y. 2018. Development of UAV Photogrammetry Method by Using Small Number of Vertical Images. **Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information** 2(2): 169-175.

Langhammer, J., Bernsteinová, J. and Mirijovsky, J.J.W. 2017. Building a high - precision 2D hydrodynamic flood model using UAV photogrammetry and sensor network monitoring. **Water** 9(11): 861.

Mazzoleni, M., Paron, P., Reali, A., Juizo, D., Manane, J. and Brandimarte, L. 2020. Testing uav-derived topography for hydraulic modelling in a tropical environment. **Natural Hazards** 103: 139-163.

Nagendran, S.K., Tung, W.Y., Ashraf, M. and Ismail, M. 2018. Accuracy assessment on low altitude UAV-borne photogrammetry outputs influenced by ground control point at different altitude. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** 169: 012031.

Punyo, A. 2019. **Flood area analysis by Unmanned Aerial Vehicle, A case study of the Pasak river basin, Lom Sak district, Phetchabun province.** Report of Hydrologist (professional level), Royal Irrigation Department. (in Thai)

Rinaldi, P., Larrabide, I. and D'Amato, J. 2019. Drone Based DSM Reconstruction for Flood Simulations in Small Areas A Pilot Study, pp. 758-764. *In* **WorldCIST'19 2019.** New Knowledge in Information Systems and Technologies Volume 1. Springer, ed. Cham, Switzerland.

Santitamnont, P. 2012. **Digital Photogrammetry (Revised edition).** 2nd edition. Chulalongkorn University, Bangkok. (in Thai)

Sooahm, R. and Taejung K. 2015. Automated DSM extraction from UAV images and Performance Analysis, pp. 351-354. *In* **International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 30 Aug-02 Sep 2015**. Canadian Institute of Geomatics, Toronto, Canada.

Tangpoomjit, R., Songsang, S., Pasada, A., Wangyao, K. and Lapichayanggul, T. 2020. The Study of UAV-Photogrammetric Accuracy for Mapping Based on Variation of Ground Control Points, pp. 1944-1951. *In* **The 25th National Convention on Civil Engineering.** The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The king's Patronge, Burapha University, Rambhai Barni Rajabhat University, Kasetsart University, Chonburi. (in Thai)

Yutaka, W. and Yoshihisa, K. 2016. UAV photogrammetry for monitoring changes in river topography and vegetation. **Procedia Engineering** 154: 317-325.

ความสัมพันธ์ของวัสดุปลูกที่ต่างกันต่อการเจริญของไมโครกรีนผักบุ้ง

Relation of Different Growing Media on Growth of Morning Glory Microgreens

กัญญารัตน์ เหลืองประเสริฐ และ ไกรยศ แซ่ลิ้ม *

Kanyarat Lueangprasert and Kraiyot Saelim *

Received: 22 December 2020, Revised: 29 March 2021, Accepted: 8 April 2021

บทคัดย่อ

ไมโครกรีนเป็นต้นอ่อนผักและเป็นผลิตภัณฑ์อาหารใหม่ที่อุดมไปด้วยสารพฤกษเคมีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ วิตามิน แร่ธาตุ ฟลาโวนอยด์ และสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งมากกว่าผักชนิดเดียวกันที่โตเต็มที่แล้ว ไมโครกรีนจึงได้รับความนิยมและเป็นที่ต้องการในกลุ่มคนที่รักสุขภาพ อย่างไรก็ตามการศึกษาที่เกี่ยวกับการเพาะปลูกไมโครกรีนยังมีอยู่น้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปลูกไมโครกรีนผักบุ้ง ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงศึกษาการเจริญของไมโครกรีนผักบุ้งในวัสดุปลูกที่ต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ ขุยมะพร้าว แกลบเผา และดินผสม (ดิน : ขุยมะพร้าว: แกลบเผา ในอัตราส่วน 1:1:1) วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ โดยนำเมล็ดพันธุ์ผักบุ้งจีนที่ผ่านการแช่น้ำ 8 ชั่วโมง จำนวน 100 เมล็ด มาหว่านลงในวัสดุปลูกชนิดต่างๆ ในถาดเพาะกล้าขนาด 10×14×6 เซนติเมตร นำไปเพาะในที่มืดเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นนำมาวางให้ได้รับแสงธรรมชาติที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 8 วัน วัดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางสรีรวิทยาที่เกิดขึ้นทุกวันหลังหว่านเมล็ด จากผลการทดลองพบว่า ชนิดของวัสดุปลูกมีความสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ด น้ำหนักของต้น และความสูงของต้น (R^2>0.90) โดยพบว่า การใช้ดินผสมทำให้เปอร์เซ็นต์การงอก น้ำหนักต้น ความสูงของต้น และความกว้างของต้นสูงกว่าการใช้ขุยมะพร้าวและแกลบเผา ตามลำดับ ชุดที่ใช้ดินผสมจะมีเปอร์เซ็นต์การงอกสูงสุดเท่ากับ 74.89 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักต้นเท่ากับ 431.52 มิลลิกรัมต่อต้น ความสูงของต้นเท่ากับ 7.39 เซนติเมตร และความกว้างของต้นเท่ากับ 0.19 เซนติเมตร หลังจากการปลูกเป็นเวลา 7 วัน สรุปผลการทดลองได้ว่าการเลือกชนิดของวัสดุปลูกที่เหมาะสมมีผลต่อประสิทธิภาพของการเจริญเติบโตที่ดีและผลผลิตของไมโครกรีนผักบุ้ง โดยการใช้ดินผสมเป็นวัสดุปลูกดีที่สุดสำหรับการเจริญของต้นอ่อนผักบุ้ง

คำสำคัญ: ไมโครกรีนผักบุ้งจีน, วัสดุปลูก, ขุยมะพร้าว, แกลบเผา

คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตสระแก้ว อำเภอวัฒนานคร จังหวัดสระแก้ว 27160

Faculty of Agricultural Technology, Burapha University, Sakaeo Campus, Watthana Nakhon, Sakaeo 27160, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail) : kriyot@go.buu.ac.th Tel: 0 3726 1559 - 60

ABSTRACT

Microgreens are young green vegetables and are emerging specialty food products. They are packed with more phytonutrients and bioactive compounds such as vitamins, minerals, flavonoids and phenolic compounds than their mature greens. So, microgreens have become popular and highly demanded as a good choice for consumers who concern about their health. However, there are a few research papers on cultivation of microgreens, especially in morning glory microgreens. In this study, the growth of morning glory microgreens on different growing media was investigated. The experiment was conducted as a Completely Randomized Design (CRD) with three different growing media (coconut husk, burnt rice husk, and mixed soil (soil: coconut husk: burnt rice husk in the 1:1:1 ratio). One hundred morning glory seeds that were soaked in water for 8 hours were sown uniformly on a various growing media in plastic trays (10×14×6 cm). Microgreens were grown in the dark for germination for 2 days and then in light at room temperature for 8 days. Physiological characteristics were performed at every day after sowing. The results showed that types of growing media were related to germination and seedling weight and height of morning glory microgreens (R^2>0.90). Application of mixed soil as a growing medium made the germination, seedling weight, seedling height and hypocotyl width higher than coconut husk and burnt rice husk, respectively. The mixed soil gave the highest germination (74.89%), seedling weight (431.52 mg/plant) and height (7.39 cm), and hypocotyl width (0.19 cm) at 7 days after sowing. Therefore, suitable selection of type of growing media proves more effective for the good growth and yield of morning glory microgreens. The mixed soil was the best growing media for the growth of morning glory microgreens.

Key words: morning glory microgreens, growing media, coconut husk, burnt rice husk

บทนำ

ผักบุ้งจีน (Morning glory, water spinach หรือ water convolvulus) เป็นผักที่ปลูกเพื่อบริโภคในส่วนของใบและลำต้น โดยนำมาใช้ประกอบอาหารได้หลากหลาย เช่น ผัดผักบุ้งไฟแดง รับประทานสด แกง ก๋วยเตี๋ยว หรือใช้เป็นผักจิ้มน้ำพริก เป็นต้น ปัจจุบันผักบุ้งจีนได้รับความนิยมสำหรับปลูกเป็นการค้าอย่างแพร่หลายทั้งการปลูกเพื่อบริโภคสด และการผลิตเมล็ดพันธุ์ โดยปัจจุบันมีมูลค่าการส่งออกเมล็ดพันธุ์ผักบุ้งจีนในปี 2561 ปริมาณ 1,632.47 ตัน มีมูลค่า 123.68 ล้านบาท (Thaikasetsart, 2012) ผักบุ้งจีนมีประโยชน์และสรรพคุณในแต่ละส่วนที่หลากหลาย ได้แก่ ส่วนของลำต้นและใบ ช่วยขับปัสสาวะ แก้ปัสสาวะเหลือง แก้ท้องผูก บรรเทาอาการริดสีดวง แก้ถ่ายเป็นมูกเลือด แก้เลือดกำเดาออก แก้ฟกช้ำ แก้โรคหนองใน ช่วยให้เจริญอาหาร และลดความดันโลหิต เป็นต้น ส่วนในรากผักบุ้งช่วยแก้อาการบวม แก้ไอเรื้อรัง และแก้ตกขาวในสตรี เป็นต้น (Thai-thaifood, 2016) ในผักบุ้งจีน 100 กรัม ประกอบด้วย เส้นใย วิตามิน และแร่ธาตุอื่นๆ เช่น วิตามินซี วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 วิตามินบี 3 แคลเซียม ฟอสฟอรัส ธาตุเหล็ก และวิตามินเอ ซึ่งมีสรรพคุณในการช่วยบำรุงสายตา เพิ่มน้ำหล่อเลี้ยงในดวงตา ทำให้ตาไม่แสบ ไม่แห้ง เป็นต้น และสามารถ

ให้พลังงานประมาณ 22 กิโลแคลอรี (Honestdocs editorial staff, 2019)

จากสภาวะการณ์ในปัจจุบันด้วยวิถีในการดำเนินชีวิตของผู้อาศัยในเมืองและผู้สนใจรักสุขภาพมีจำนวนมากขึ้น รวมทั้งพื้นที่การเพาะปลูกที่มีน้อยลง ทำให้มีผู้สนใจนิยมปลูกผักที่มีอายุน้อย (young green vegetables) ไว้รับประทานเองเป็นอย่างมาก ผักที่มีอายุน้อยที่นิยมนำมารับประทานสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ผักงอก (sprouts), ไมโครกรีน (microgreens) หรือที่นิยมเรียกว่า “ต้นอ่อน” และเบบี้ กรีน หรือ เบบี้ ลีฟ (baby greens or baby leave) ซึ่งมีความแตกต่างกันของผักทั้งสามชนิด โดยผักงอกเป็นผักที่งอกจากเมล็ด ปลูกด้วยน้ำหรือวัสดุอื่นๆ ที่ไม่ใช่ดิน ไม่ต้องการแสง สามารถรับประทานได้ทุกส่วนจนถึงราก ระยะการเก็บเกี่ยวก่อนพบใบจริงประมาณ 4-10 วัน เช่น ถั่วงอก และเหรียงงอก เป็นต้น ในขณะที่ไมโครกรีนเป็นผักต้นอ่อนที่ได้จากเมล็ดพัฒนาไปเป็นต้นอ่อนที่มีใบเลี้ยง ปลูกด้วยวัสดุปลูกชนิดต่างๆ ต้องการแสง และธาตุอาหารเล็กน้อย นิยมรับประทานเฉพาะส่วนต้นอ่อนที่อยู่เหนือวัสดุปลูก (seedling hypocotyl) และใบเลี้ยง ระยะการเก็บเกี่ยวประมาณ 7-28 วัน และอาจพบหรือไม่พบใบจริงคู่แรกได้ เช่น ต้นอ่อนผักบุ้ง ทานตะวัน ไควาเระ และโต้วเหมี่ยว เป็นต้น ส่วนเบบี้ ลีฟ เป็นพืชที่ถูกเก็บเกี่ยวก่อนระยะเจริญเต็มที่ (mature plants) ปลูกได้ทั้งในดินและสภาพไร้ดิน ต้องการธาตุอาหารต่างๆ และแสง ระยะการเก็บเกี่ยวนานกว่ากลุ่มต้นอ่อนประมาณ 20-40 วัน ซึ่งพัฒนาไปเป็นใบจริงทั้งหมด เช่น ผักสลัดชนิดต่างๆ ได้แก่ เบบี้ ลีฟ กรีนโอ๊ค เรดโอ๊ค บัตเตอร์เฮด และเรดคอรัล เป็นต้น (Gioia *et al*., 2017; Lenzi *et al*., 2019; Zhang *et al*., 2020)

ในปัจจุบันกลุ่มคนที่รักสุขภาพให้ความสนใจผักต้นอ่อนเนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการมากกว่าผักชนิดเดียวกันที่โตเต็มที่แล้ว และเป็นพืชที่ปลอดภัยจากสารเคมีตกค้างในผลผลิต ทั้งยังสามารถหารายได้เสริมจากการเพาะต้นอ่อนขายโดยใช้พื้นที่น้อยและใช้ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวสั้นกว่าต้นที่โตเต็มที่ ซึ่งวัสดุปลูกที่นิยมใช้มีหลายชนิด ได้แก่ กาบมะพร้าวสับหรือขุยมะพร้าว ขี้เถ้าแกลบ พีทมอส และดินผสม เป็นต้น โดยขุยมะพร้าวเป็นวัสดุที่หาง่ายราคาไม่แพง ทั้งยังเป็นวัสดุปลูกที่โปร่งและร่วนซุย อุ้มน้ำได้ดี ส่วนขี้เถ้าแกลบมีน้ำหนักเบา ราคาถูก เมื่อผสมกับดินทำให้ดินเบา ระบายน้ำดี ส่วนพีทมอสและดินผสมช่วยทำให้เปอร์เซ็นต์การงอก ความสูงของต้นอ่อน และน้ำหนักผลผลิตสดดี แต่พีทมอสยังมีข้อเสียในเรื่องของต้นทุนที่มีราคาสูงและความแน่นของพีทมอสที่อาจทำให้รากเจริญเติบโตได้ไม่ดี และหากความชื้นไม่เหมาะสม จะทำให้พีทมอสไม่สามารถกลับมาอุ้มน้ำได้ดังเดิม รวมทั้งอาจเกิดเชื้อราและตะไคร่น้ำได้ง่าย (Baanlaesuan, 2016.; Sarepoua *et al*., 2018)

นอกจากนี้ปัจจุบันผู้ที่อาศัยอยู่ในเมืองและผู้รักสุขภาพที่มีพื้นที่จำกัดและอยากปลูกผักเพื่อใช้สำหรับทำอาหารรับประทานเอง ลดสารพิษตกค้างจากผักที่พบทั่วไปในตลาด หรือห้างสรรพสินค้า จึงเหมาะกับการเพาะต้นอ่อนผักบุ้งจีนที่ใช้พื้นที่น้อย ใช้ระยะเวลาระหว่างการปลูกสั้น และยังมีคุณค่าทางโภชนาการมากกว่าผักชนิดเดียวกันที่โตเต็มที่ (Thai-thaifood, 2016) อย่างไรก็ตามในการผลิตต้นอ่อนผักบุ้งจีนนั้นยังมีข้อมูลไม่มากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเลือกวัสดุปลูกที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของต้นอ่อนผักบุ้งจีน ซึ่งการศึกษาครั้งนี้สนใจศึกษาความสัมพันธ์ของวัสดุปลูกต่อการเจริญของต้นอ่อนผักบุ้งจีน เพื่อนำไปประเมินหาวัสดุปลูกที่เหมาะสมในการผลิต และสามารถนำไปประยุกต์เพื่อลดต้นทุนในการผลิตและเป็นประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมเมล็ดพืชตัวอย่างและอุปกรณ์ปลูก

คัดเลือกเมล็ดผักบุ้งพันธุ์ทางการค้า จำนวน 3,000 เมล็ด ทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 3 กลุ่มๆ ละ 1,000 เมล็ด ล้างทำความสะอาด ทำการแช่น้ำเป็นเวลา 8 ชั่วโมง และเตรียมวัสดุปลูก 3 ชนิด ได้แก่ ขุยมะพร้าว แกลบเผา และดินผสม (ดิน : ขุยมะพร้าว : แกลบเผา อัตราส่วนเท่ากับ 1: 1: 1) โดยเตรียมตะกร้าปลูกแบ่งออกเป็น 10 ช่อง ขนาด 10×14×6 เซนติเมตรต่อช่อง สำหรับวัสดุปลูกแต่ละชนิด โดยใส่วัสดุปลูกปริมาตร 2/3 ของขนาดช่อง

2. วิธีการทดลอง

นำเมล็ดผักบุ้งที่เตรียมไว้กลุ่มละ 1,000 เมล็ด แบ่งออกเป็น 10 กลุ่มๆ ละ 100 เมล็ด ทำการปลูกลงในตะกร้าที่เตรียมไว้ในแต่ละวัสดุปลูก และให้น้ำปริมาตร 25 มิลลิลิตรต่อช่อง ในช่วงเช้าและเย็น เป็นเวลา 10 วัน โดยทำการคลุมผ้าขาวบางเป็นเวลา 2 วัน และเปิดให้ได้รับแสงธรรมชาติ ทำการวัดผลทางกายภาพด้านต่างๆ ทุกวัน โดยทำการสุ่มวิเคราะห์ต้นอ่อนทุกต้นที่ปลูกจำนวน 30 ต้น ได้แก่ การงอกของต้นอ่อน (เปอร์เซ็นต์), น้ำหนักของต้นอ่อน (วัดน้ำหนักทั้งต้นรวมราก) (มิลลิกรัมต่อต้น), ความสูง (วัดลำต้นส่วนของ hypocotyl) ของต้นอ่อน (เซนติเมตร) และความกว้าง (วัดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้น โดยวัด 1 จุด กึ่งกลางลำต้น) ของต้นอ่อน (มิลลิเมตร)

3. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) ด้วยโปรแกรม SPSS statistic 23 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย (Last significant difference; LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p<0.05) และวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient; R^2) ระหว่างการเจริญด้านต่างๆ ของต้นอ่อนผักบุ้งในวัสดุปลูกชนิดต่างๆ ระหว่างการปลูกทุกวัน เป็นเวลา 10 วัน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การงอกของต้นอ่อน

จากผลการทดลองพบว่าการงอกของต้นอ่อนในทุกวัสดุปลูกมีเปอร์เซ็นต์เพิ่มสูงขึ้นระหว่างการปลูกเป็นเวลา 10 วัน โดยการงอกของต้นอ่อนในวัสดุปลูกที่มีค่าสูงที่สุดในช่วง 7 วันแรกคือ ขุยมะพร้าว รองลงมาคือดินผสม และแกลบเผา ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 78.59, 74.89 และ 68.56 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างขุยมะพร้าวและดินผสม แต่เมื่อสิ้นสุดการปลูกเป็นเวลา 10 วัน พบการงอกมีค่าสูงสุดในดินผสม เท่ากับ 82.67 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือในขุยมะพร้าว เท่ากับ 81.33 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการปลูกในแกลบเผา มีค่าเท่ากับ 76.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (p<0.05) (Figure 1A)

จากการทดลองพบว่าวัสดุปลูกดินผสมและขุยมะพร้าวมีเปอร์เซ็นต์การงอกที่ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของขุยมะพร้าว มีการอุ้มน้ำสูง และมีช่องให้อากาศผ่านได้ดี ทำให้มีความชื้นและปริมาณที่เหมาะสมต่อการงอกของเมล็ด (Samsuddin *et al.*, 2014) และดินผสมมีส่วนประกอบของวัสดุปลูกหลายชนิดที่ช่วยส่งเสริมการงอก คือ ขุยมะพร้าว แกลบเผา และดินที่มีการปลดปล่อยธาตุอาหารให้พืชอย่างต่อเนื่อง ส่วนแกลบเผามีเปอร์เซ็นต์การงอกต่ำเนื่องจากคุณสมบัติของแกลบเผาอุ้มน้ำไม่ดีและเก็บความชื้นได้น้อย ในสภาวะอากาศที่อุณหภูมิสูงทำให้น้ำและความชื้นระเหยได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้แกลบเผายังมีคุณสมบัติเป็นเบสมี pH สูง ก่อนนำมาใช้จึงควรแช่ด้วยกรดอ่อนหรือล้างด้วยน้ำให้ค่า pH ลดต่ำกว่า 6.5 เพื่อป้องกันไม่ให้พืชแสดงอาการ

ใบอ่อนเหลืองจากการขาดธาตุเหล็กในการปลูกช่วงแรก (Fitfarm, 2017; Saranukromthai, 2011)

2. น้ำหนักของต้นอ่อน

จากผลการทดลองพบว่าน้ำหนักของต้นอ่อนในทุกวัสดุปลูกมีค่าเพิ่มขึ้นในระยะการปลูกเป็นเวลา 10 วัน โดยน้ำหนักของต้นอ่อนในวัสดุปลูกที่มีค่ามากที่สุดคือ ดินผสม รองลงมาคือ ขุยมะพร้าว และแกลบเผา ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 420.37, 409.48 และ 393.43 มิลลิกรัมต่อต้น ตามลำดับ และมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในช่วง 6 วันแรกของการปลูก หลังจากนั้นตั้งแต่วันที่ 7 ของการปลูกน้ำหนักของต้นอ่อนในดินผสม และขุยมะพร้าวมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 431.52 และ 433.87 มิลลิกรัมต่อต้น ตามลำดับ (Figure 1B)

จากผลการทดลองในครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sarepoua *et al.* (2018) ในการศึกษาผลของพันธุ์และวัสดุเพาะต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตในการผลิตต้นอ่อนผักบุ้ง โดยพบว่าดินผสมเป็นวัสดุเพาะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตเนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีโดยมีเนื้อละเอียด ระบายน้ำและอากาศได้ดีทำให้ไม่แฉะ และมีธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืชมากกว่าขุยมะพร้าว และแกลบเผา ทำให้น้ำหนักผลผลิตสด และความสูงของต้นอ่อนสูงที่สุด

3. ความสูงของต้นอ่อน

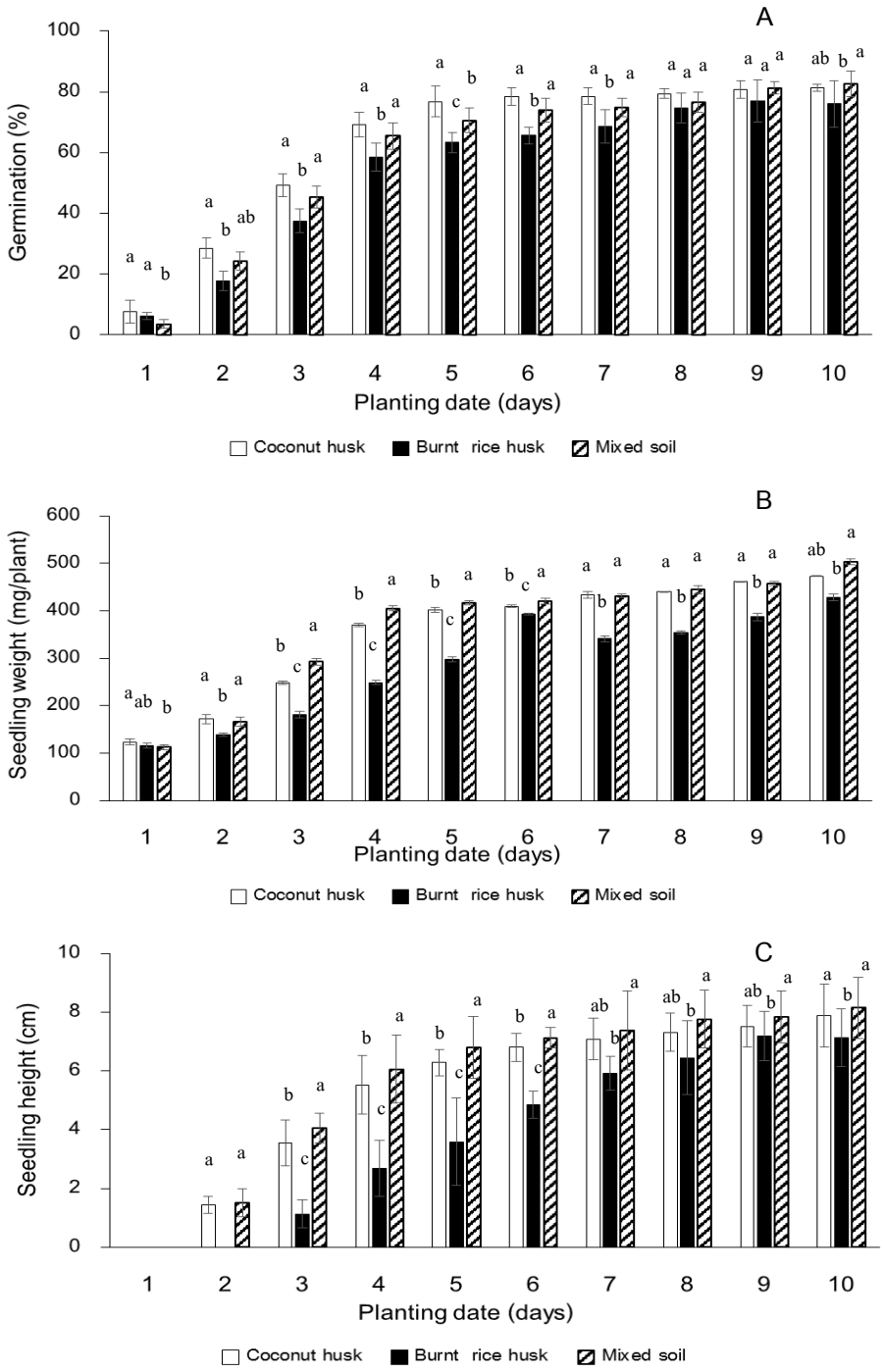
จากผลการทดลองพบว่าความสูงของต้นอ่อนในทุกวัสดุปลูกมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะการปลูกเป็นเวลา 10 วัน โดยพบความสูงของต้นอ่อนในดินผสมและขุยมะพร้าวตั้งแต่วันที่ 2 ของการปลูก ซึ่งความสูงของต้นอ่อนในวัสดุปลูกที่มีค่ามากที่สุดคือ ดินผสม รองลงมาคือ ขุยมะพร้าว และแกลบเผา ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.13, 6.80 และ 4.86 เซนติเมตร ตามลำดับ และมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในช่วง 6 วันแรกของการปลูก หลังจากนั้นตั้งแต่วันที่ 7 ของการปลูกความสูงของต้นอ่อนในดินผสม และขุยมะพร้าวมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.39 และ 7.08 เซนติเมตร ตามลำดับ (Figure 1C) ทั้งนี้ในดินผสมมีองค์ประกอบของธาตุอาหารที่จำเป็นในการเจริญเติบโตมากกว่าวัสดุเพาะชนิดอื่นๆ รวมทั้งมีการผสมวัสดุเพาะชนิดอื่นเพื่อให้อุ้มน้ำ มีโครงสร้างวัสดุที่ไม่แน่นทึบ และระบายอากาศได้ดี ทำให้ต้นอ่อนมีการเจริญในด้านความสูงเป็นอย่างดี (Sarepoua *et al.*, 2018) ส่วนในแกลบเผาเป็นวัสดุปลูกที่อาจทำให้เกิดการอัดตัวแน่น มีช่องว่างสำหรับการแลกเปลี่ยนอากาศของรากน้อย และคุณสมบัติเป็นเบสจึงทำให้เกิดการเจริญที่ไม่ดีในทั้งความสูง จำนวนใบ และน้ำหนักสดสอดคล้องกับการทดลองในต้นกล้าคราม ฝักงอ (Somrug, 2019)

4. ความกว้างของต้นอ่อน

จากผลการทดลองพบว่าความกว้างของต้นอ่อนในทุกวัสดุปลูกมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะการปลูกเป็นเวลา 10 วัน โดยพบความกว้างของต้นอ่อนในดินผสมและขุยมะพร้าวตั้งแต่วันที่ 2 ของการปลูก ซึ่งความกว้างของต้นอ่อนในวัสดุปลูกที่มีค่ามากที่สุดคือ ดินผสม เท่ากับ 2.00 มิลลิเมตร รองลงมาคือ ขุยมะพร้าว เท่ากับ 1.84 มิลลิเมตร และแกลบเผา เท่ากับ 1.70 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในช่วง 9 วันของการปลูก หลังจากนั้นความกว้างของต้นอ่อนในขุยมะพร้าว และแกลบเผา มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ (Figure 1D)

จากผลการทดลองดินผสมทำให้ต้นอ่อนผักบุ้งมีการเจริญเติบโตสูงที่สุด ทั้งน้ำหนักผลผลิต ความสูงและความกว้างของต้นอ่อน ทั้งนี้เนื่องจากดินผสมมีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมสำหรับเป็นที่ยึดเกาะของรากพืช ช่วยยึดลำต้นให้ไม่ให้ล้มเอียง และยังทำหน้าที่เก็บกักน้ำเพื่อการเจริญเติบโตของพืชได้ดี (Land Management Research and Development Division, 2019) รวมทั้งในดินยังมีธาตุอาหารที่เป็น

ประโยชน์ต่อพืชในการส่งเสริมการเจริญเติบโต และมีปริมาณมาก ณ pH ช่วงหนึ่ง ถ้าดินมี pH สูงหรือต่ำกว่าช่วงนั้นๆ ธาตุอาหารจะถูกเปลี่ยนสภาพเป็นรูปที่พืชนำเอาไปใช้ประโยชน์ได้ยาก หากดินมี pH สูงหรือต่ำกว่า 6.0 - 7.0 จะทำให้ธาตุอาหารบางชนิดลดลง เช่น ธาตุฟอสฟอรัส เนื่องจากจะไปทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุต่างๆ เช่น เหล็กและอลูมิเนียมออกไซด์ เป็นต้น และแปรสภาพเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ยาก แต่หากดินมี pH อยู่ระหว่าง 6.0 - 7.0 ทำให้ธาตุฟอสฟอรัสอยู่ในรูปของสารละลายที่พืชดึงดูดไปใช้ได้ง่าย ซึ่งภายในดินยังมีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชอยู่หลากหลายชนิดเช่น ธาตุอาหารพืชพวกจุลธาตุ (micronutrients) ได้แก่ สังกะสี เหล็ก แมงกานีส โบรอน เป็นต้น (Saranukromthai, 2017)



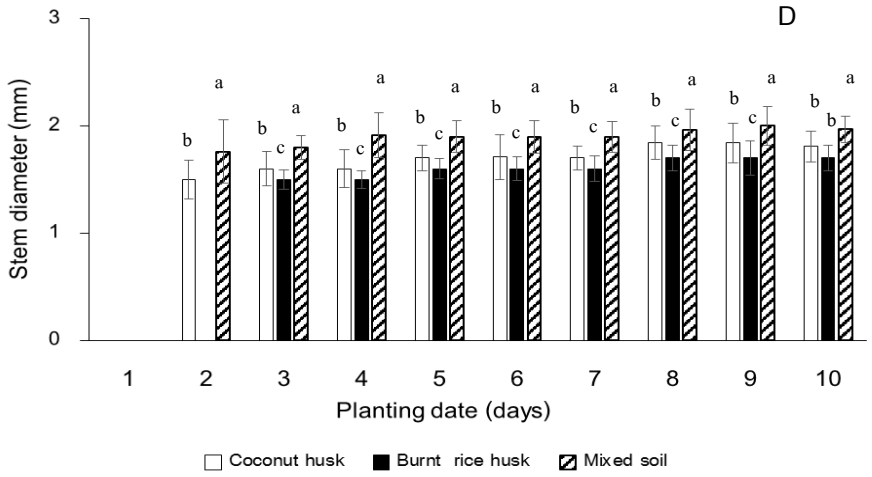


Figure 1 Germination (A), seedling weight (B), seedling height (C) and stem diameter (D) of morning glory microgreens in coconut husk, burnt rice husk and mixed soil at planted for 10 days.

5. ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญด้านต่างๆ ของต้นอ่อนในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการงอกของต้นอ่อนในวัสดุปลูกชนิดต่างๆ ระหว่างการปลูกเป็นเวลา 10 วัน มีค่าความสัมพันธ์สูง (R^2> 0.89) โดยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการงอกของต้นอ่อนในวัสดุปลูกที่มีค่าสูงสุดคือ ดินผสม (R^2 = 0.9847) รองลงมาคือ ขุยมะพร้าว (R^2 = 0.9349) และ แกลบเผา (R^2 = 0.8897) (Figure 2A-C)

จากผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและการงอกของต้นอ่อนในวัสดุปลูกชนิดต่างๆ ระหว่างการปลูกเป็นเวลา 10 วัน มีค่าความสัมพันธ์สูง (R^2> 0.90) โดยความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและการงอกของต้นอ่อนในวัสดุปลูกที่มีค่าสูงสุดคือ ดินผสม (R^2 = 0.9957) รองลงมาคือ ขุยมะพร้าว (R^2 = 0.9744) และ แกลบเผา (R^2 = 0.9009) (Figure 3A-C)

จากผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและน้ำหนักของต้นอ่อนในวัสดุปลูกชนิดต่างๆ ระหว่างการปลูกเป็นเวลา 10 วัน มีค่าความสัมพันธ์สูง (R^2> 0.85) โดยความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและน้ำหนักของต้นอ่อนในวัสดุปลูกที่มีค่าสูงสุดคือ ขุยมะพร้าว (R^2 = 0.9914) รองลงมาคือ ดินผสม (R^2 = 0.9788) และ แกลบเผา (R^2 = 0.8508) (Figure 4A-C)

จากผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างการงอกและความกว้างของต้นอ่อนในวัสดุปลูกชนิดต่างๆ ระหว่างการปลูกเป็นเวลา 10 วัน มีค่าความสัมพันธ์ (R^2) ในช่วง 0.71-0.88 โดยความสัมพันธ์ระหว่างการงอกและความกว้างของต้นอ่อนในวัสดุปลูกที่มีค่าสูงสุดคือ ดินผสม (R^2 = 0.8821) รองลงมาคือ แกลบเผา (R^2 = 0.7752) และขุยมะพร้าว (R^2 = 0.7149) (Table 1)

จากผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างและความสูงของต้นอ่อนในวัสดุปลูกชนิดต่าง ๆ ระหว่างการปลูกเป็นเวลา 10 วัน มีค่าความสัมพันธ์ (R^2) ในช่วง 0.80- 0.87 โดยความสัมพันธ์ ระหว่างความกว้างและความสูงของต้นอ่อนในวัสดุปลูกที่มีค่าสูงสุดคือ แกลบเผา (R^2 = 0.8681) รองลงมาคือ ดินผสม (R^2 = 0.8697) และ ขุยมะพร้าว (R^2 = 0.8094) (Table 2)

และความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างและน้ำหนักของต้นอ่อนในวัสดุปลูกชนิดต่างๆ ระหว่าง

การปลูกเป็นเวลา 10 วัน มีค่าความสัมพันธ์ (R^2) ในช่วง 0.73-0.86 โดยความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างและน้ำหนักของต้นอ่อนในวัสดุปลูกที่มีค่าสูงสุดคือ ดินผสม (R^2 = 0.8642) รองลงมาคือ ขุยมะพร้าว (R^2 = 0.7894) และ แกลบเผา (R^2 = 0.7286) (Table 2)

จากผลของความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญด้านต่างๆ ของต้นอ่อนผักบุ้งในวัสดุปลูกที่แตกต่างกันพบว่าในวัสดุปลูกดินผสมมีการเจริญของต้นอ่อนผักบุ้งในด้านน้ำหนักและความสูงสัมพันธ์กับการงอกของต้นอ่อนมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากดินผสมมีคุณสมบัติที่ดีของหลายวัสดุปลูกรวมกัน โดยดินประกอบด้วยสารอินทรีย์ แร่ธาตุ น้ำ จุลินทรีย์ และสิ่งมีชีวิตขนาดใหญ่จำนวนมาก ซึ่งคุณภาพดินจะขึ้นกับปริมาณสารอินทรีย์และฮิวมัสที่ประกอบกันส่งผลต่อการเพิ่มการเจริญของพืช และโครงสร้างของวัสดุที่เหมาะสมทำให้การถ่ายเทอากาศได้ดี ในขุยมะพร้าวมีประสิทธิภาพในการอุ้มน้ำและระบายอากาศได้ดี และแกลบเผาช่วยรักษาปริมาณคาร์บอนในดิน ส่งผลต่อการตรึงไนโตรเจนด้วยจุลินทรีย์ในดิน การใส่แกลบเผาจะช่วยแก้ไขสภาพดินให้มีความโปร่ง ลดความแน่นของดิน เพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำได้ดี รวมทั้งช่วยส่งเสริมการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของโพแทสเซียมและแคลเซียม (Farhan *et al*., 2017) นอกจากนี้การผสมขุยมะพร้าวในดินผสมจะช่วยส่งผลต่อการเจริญที่เพิ่มขึ้นทั้งน้ำหนักและความสูงโดยมีผลต่อการเพิ่มขนาดของพื้นที่ใบ เนื่องจากส่งผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง ทำให้มีปริมาณสารตั้งต้นในการผลิตอาหารที่เพิ่มสูง และสัมพันธ์กับการเพิ่มปริมาณธาตุโพแทสเซียมและฟอสฟอรัส สอดคล้องกับการศึกษาการเจริญของข้าวโพดในพื้นที่แห้งแล้งของอินโดนีเซียจากการผสมขุยมะพร้าวเผาในดินที่ทำการปลูก (Ichwani and Marlina, 2020) ส่วนวัสดุปลูกที่พบความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญรองลงมาคือ ขุยมะพร้าว เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมโดยมีการอุ้มน้ำได้ดีและมีช่องให้อากาศผ่านได้ง่ายจึงเหมาะสมต่อการงอกของเมล็ด แต่หากมีปริมาณของขุยมะพร้าวในวัสดุปลูกมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลต่อการเจริญของพืช อาจมีผลต่อปริมาณธาตุอาหารไม่เพียงพอสำหรับการดูดซึมของพืช ทำให้อัตราส่วนของ C: N สูง และการตรึงไนโตรเจนด้วยจุลินทรีย์สูง (Samsuddin *et al*., 2014) นอกจากนี้การมีส่วนผสมของขุยมะพร้าวที่เพิ่มขึ้นในวัสดุปลูกที่ไม่มีดินผสมจะส่งผลต่อการขาดธาตุไนโตรเจน สอดคล้องกับการเจริญของมะเขือเทศและต้นดอกไม้ไหว (coreopsis) ลดลง (Wallace and Ridley, 1998)

นอกจากนี้ค่าความสัมพันธ์ในการเจริญด้านอื่นๆ มีค่าความสัมพันธ์กันไม่สูงมากนักในวัสดุปลูกที่แตกต่างกันไป ทำให้ไม่นำมาเป็นปัจจัยในการคาดการณ์การเจริญของต้นอ่อนผักบุ้งในวัสดุปลูกแต่ละชนิดได้

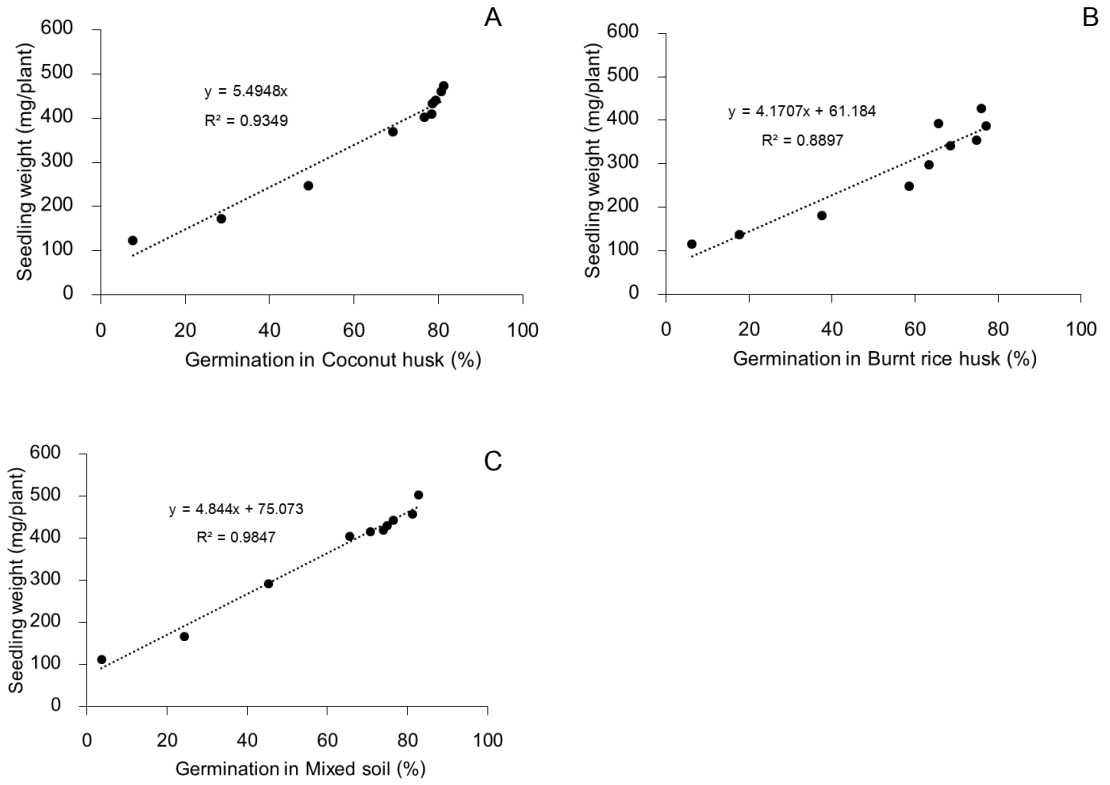


Figure 2 Correlation between seedling weight and germination of morning glory microgreens in coconut husk (A), burnt rice husk (B) and mixed soil (C) at planted for 10 days.

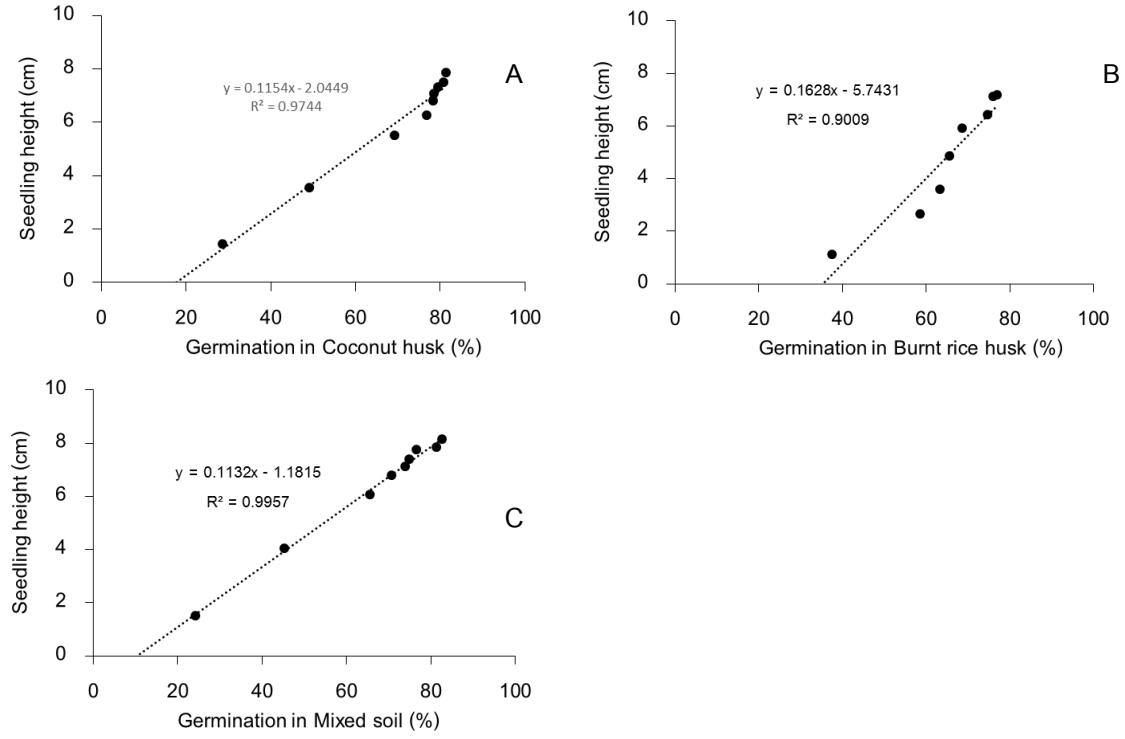


Figure 3 Correlation between seedling height and germination of morning glory microgreens in coconut husk (A), burnt rice husk (B) and mixed soil (C) at planted for 10 days.

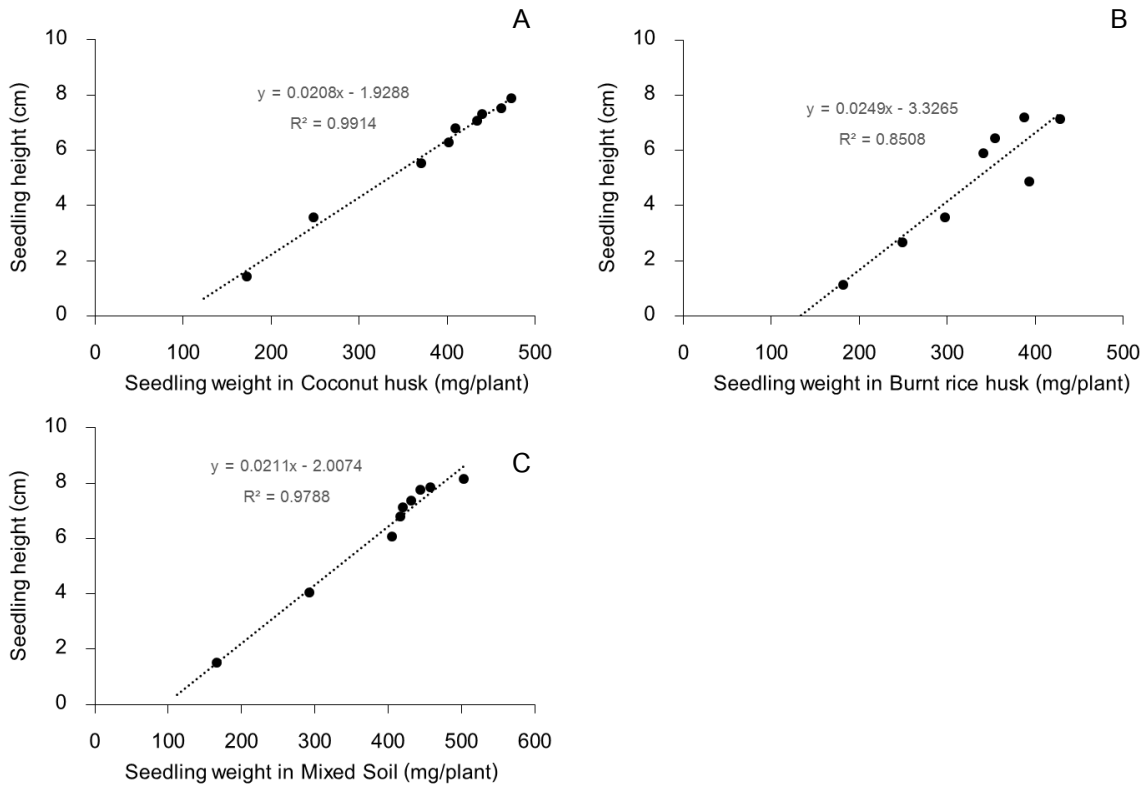


Figure 4 Correlation between seedling height and seedling weight of morning glory microgreens in coconut husk (A), burnt rice husk (B) and mixed soil (C) at planted for 10 days.

Table 1 Linear equations and R^2 values between germination (%) and stem diameter (mm) of morning glory microgreens in coconut husk, burnt rice husk and mixed soil at planted for 10 days.

Treatments	Calibration curve	R^2
coconut husk	y = 1306.4x - 152.96	0.7149
burnt rice husk	y = 1365.3x - 155.01	0.7752
mixed soil	y = 2332.9x - 377.17	0.8821

Table 2 Linear equations and R^2 values between stem diameter (mm) and seedling height (cm), seedling weight (mg/plant) of morning glory microgreens in coconut husk, burnt rice husk and mixed soil at planted for 10 days.

Treatments	seedling height		seedling weight	
	Calibration curve	R^2	Calibration curve	R^2
coconut husk	y = 0.005x + 0.1405	0.8094	y = 0.0001x + 0.1312	0.7894
burnt rice husk	y = 0.0035x + 0.1442	0.8697	y = 0.0001x + 0.1328	0.7286
mixed soil	y = 0.0033x + 0.1692	0.8681	y = 0.0001x + 0.1623	0.8642

สรุป

การเลือกใช้วัสดุปลูกที่เหมาะสมจะมีความสัมพันธ์ต่อการเจริญของต้นอ่อนของผักบุ้ง ในด้านการงอก น้ำหนักต้น และความสูงต้น จากผลการทดลองครั้งนี้พบว่า การใช้ดินผสมเป็นวัสดุปลูกให้การเจริญของต้นอ่อนผักบุ้งดีที่สุด รองลงมาคือ ขุยมะพร้าว และแกลบเผา ตามลำดับ อย่างไรก็ตามยังคงมีอีกหลายปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญของต้นอ่อนของผักบุ้ง เช่น ปริมาณน้ำ ปริมาณแสง ชนิดของแสง อุณหภูมิ เป็นต้น ดังนั้นจึงอาจใช้เป็นแนวทางในการศึกษาพัฒนาเทคนิคการเพาะต้นอ่อนของผักบุ้งหรือผักอื่นๆ เพื่อให้ได้ผลผลิตที่ดีต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตสระแก้ว สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Baanlaesuan. 2016. **The "soil mix" formula is used by yourself, good soil quality, beautiful trees.** Baanlaesuan. Available Source: https://www.baanlaesuan.com/37381/diy/mixed-soil-formular, September 12, 2019. (in Thai)

Farhan, A.F.A., Zakaria, A.J., Mat, P.N. and Mohd, K.S. 2017. Soilless media culture-a propitious auxiliary for crop production. **Asian Journal of Crop Science** 10(1): 1-9.

Fitfarm. 2017. **Planting materials prevalent in Thailand.** Fitfarm. Available Source: https://www.coachnong.com/archives/1375, August 30, 2019. (in Thai)

Gioia, F.D., Renna, M. and Santamaria, P. 2017. Sprouts, microgreens and "baby leaf" vegetables, pp. 403-432. *In* Yildiz, F. and Wiley, R.C., eds. **Minimally Processed Refrigerated Fruits and Vegetables.** Springer, Boston, MA.

Honestdocs editorial staff. 2019. **Benefits of morning glory more than just nourishing the eyes.** Honestdocs. Available Source: https://www.honestdocs.co/morning-glory-benefits, August 22, 2019. (in Thai)

Ichwani, B. and Marlina, M. 2020. Coconut husk biochar application on increasing growth and yield of maize plant, and improvement fertility of ultisol dry land. **Systematic Review Pharmacy** 11(2): 187-192.

Land Management Research and Development Division. 2019. **Soil management information.** Ministry of Agriculture and Cooperatives. Available Source: http://www.ldd.go.th/Web_Soil/Page_02.htm, October 14, 2019. (in Thai)

Lenzi, A., Orlandini, A., Bulgari, R., Ferrante, A. and Bruschi, P. 2019. Antioxidant and mineral composition of three wild leafy species: A comparison between microgreens and baby green. **Foods** 8: 487-505.

Samsuddin, M.F., Saud, H.M., Ismail, M.R., Omar, M.H., Habib, S.H., Bhuitan, M.S.H. and Kausar, H. 2014. Effect of different combinations of coconut coir dust and compost on rice growth under soilless culture. **Journal of**

Food, Agriculture & Environment 12(2): 1280-1283.

Saranukromthai. 2011. **Utilization of sludge or sugarcane sludge.** Saranukromthai. Available Source: http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK5/chapter3/t5-3-infodetail20.html, September 12, 2019. (in Thai)

Saranukromthai. 2017. **The important properties of the soil related to cultivation.** Saranukromthai. Available Source: http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=18&chap=8&page=chap8.htm, October 14, 2019. (in Thai)

Sarepoua, E., Khaengkhan1, P. and Aekaraj, C. 2018. Effects of varieties and seedling medias on growth and yields in water convolvulus sprouts production. **Khon Kaen Agriculture Journal** 46(3): 543-548. (in Thai)

Somrug, K. 2019. Effect of Color Pod and Growing Media on Germination and Growth of Indigo (*Indigofera tinctoria* L.) Seeding. **Prawarun Agriculture Journal** 16(2): 375 - 386.

Thaikasetsart. 2012. **Morning glory.** Thaikasetsart. Available Source: https://www.thaikasetsart.com/?s=ผักบุ้งจีน, August 22, 2019. (in Thai)

Thai-thaifood. 2016. **Morning glory.** Thai-thaifood. Available Source: https://www.thai-thaifood.com/th/?s=ผักบุ้งจีน, August 22, 2019. (in Thai)

Wallace, G.P. and Ridley, K.T. 1998. Growth of tomato and coreopsis in response to coir dust in soilless media. **Technology and Product Reports** 8(3): 401-405.

Zhang, X., Bian, Z., Yuan, X., Chen, X. and Lu, C. 2020. A review on the effects of the light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. **Trends in Food Science & Technology** 99: 203-216.

ระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณี ในจังหวัดลพบุรี แสดงผลด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง สำหรับนักท่องเที่ยวสูงอายุ

The Virtual Reality Information System of Cultural Tourism in Lop Buri Province for Elderly Adults

ไชยพล กลิ่นจันทร์ *

Chaiyapol Klinjan *

Received: 7 January 2021, Revised: 26 March 2021, Accepted: 19 July 2021

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อ 1) จัดทำระบบสารสนเทศด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง เพื่อเผยแพร่ข้อมูลแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีจังหวัดลพบุรี 2) เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์ โดยงานวิจัยได้ดำเนินการ 1) พัฒนาระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรีด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง 2) ประเมินประสิทธิภาพระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี 3) เผยแพร่และสอบถามความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี ในช่วงเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2562 กลุ่มตัวอย่างในงานวิจัย ได้แก่ นักท่องเที่ยวกลุ่มผู้สูงอายุในจังหวัดลพบุรี จำนวน 50 คน

ผลวิจัย โดยผลการวิจัยสรุปได้ว่า 1) ระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรีแสดงผลด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริงมีส่วนประกอบข้อมูลรูปภาพ 2 มิติ ภาพ 3 มิติ, สารคดีเทศกาลและประเพณี ประกอบการท่องเที่ยวและแผนการเดินทางท่องเที่ยวซึ่งสามารถช่วยในการสนับสนุนตัดสินใจสำหรับนักท่องเที่ยวสูงอายุ 2) ระบบสารสนเทศสามารถช่วยเผยแพร่ข้อมูลแหล่งท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์และส่งเสริมจินตนาการในการเรียนรู้ได้เป็นอย่างดี และผลการศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี พบว่า มีความพึงพอใจของผู้ใช้อยู่ในระดับมาก ($\bar{X}$= 4.10) และระบบสามารถช่วยประกอบการตัดสินใจในการเดินทางสำหรับนักท่องเที่ยวสูงอายุได้

คำสำคัญ: เทคโนโลยีเสมือนจริง, แหล่งท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์, นักท่องเที่ยวสูงอายุ, โมบายแอปพลิเคชัน

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี 321 ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000

Faculty of Information Technology, Thepsatri Rajaphut University, 321, Talaychubsorn, Muang, Lop buri 15000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): yod.chaiyapol@lawasri.tru.ac.th

ABSTRACT

The objectives of this present research were to 1) develop information system with virtual reality technology to publicize cultural tourist destinations in Lop Buri, and, 2) to study users' satisfaction after using the information system. The research was conducted as follow: 1) develop the information system of cultural and traditional tourist attractions in Lop Buri, 2) implement quality assessment of the developed information system, and 3) explore satisfaction of the users after using the information system during December 2019. The research participants were 50 elderly tourists in Lop Buri.

The findings revealed as the followings. 1) The information system employed virtual reality technology consisting of 2D and 3D images, documentaries about festivals and tradition, and travel plan. The system could facilitate the elderly tourists' decision making for traveling. 2) The systems can help disseminate information on historical sites and foster imagination in learning. Results from the questionnaire indicated that users' satisfaction was at high level (x= 4.10) and the information system can be used as a facilitation tool for travel decision-making of elderly tourists.

Key words: virtual reality technology, historical tourist attractions, elderly tourists, mobile application

บทนำ

จังหวัดลพบุรีมีประวัติความเป็นมายาวนาน มีการดำรงอยู่ของประชาชนมาหลายยุคสมัยอย่างต่อเนื่อง มีวัฒนธรรมและประเพณีที่สืบทอดกันมาอย่างมีอัตลักษณ์ ตัวอย่างเช่น ประเพณีชักพระศรีอาริย์ ณ วัดไลย์ ในอำเภอท่าวุ้ง งานแผ่นดินสมเด็จพระนารายณ์มหาราชโดยเป็นงานประจำจังหวัดลพบุรี งานประเพณีเขาวงพระจันทร์ ในอำเภอโคกสำโรง งานประเพณีกำฟ้า ของชุมชนพวน ในอำเภอบ้านหมี่ และยังมีชุมชนประเพณีรอบจังหวัดลพบุรีอีกหลายแห่ง เช่น ชุมชนโคกสลุง ชุมชนมอญบางขันหมาก ซึ่งมีวัฒนธรรมที่สืบทอดมาอย่างยาวนานและจากการที่นักท่องเที่ยวจำนวนมากเดินทางไปยังชุมชนวัฒนธรรมเพื่อเยี่ยมชมวัฒนธรรม ประเพณีต่างๆ นักท่องเที่ยวส่วนใหญ่จะได้ชมเพียงสิ่งปลูกสร้างและสถาปัตยกรรมต่างๆ ที่สร้างขึ้นมา บางแห่งก็ยังคงสภาพดี บางแห่งก็อยู่ในสภาพที่ทรุดโทรมอีกทั้งไม่พบข้อมูลรายละเอียดต่างๆ ที่จำเป็นเกี่ยวกับสถานที่นั้นๆ ถึงแม้ว่านักท่องเที่ยวจะได้มีการค้นคว้าข้อมูลในระบบอินเทอร์เน็ตก็ไม่มีข้อมูลรายละเอียดที่ครบถ้วน โดยข้อมูลที่เผยแพร่ส่วนใหญ่เป็นเพียงข้อความและรูปภาพซึ่งไม่เป็นปัจจุบันและนักท่องเที่ยวไม่สามารถเห็นรายละเอียดที่เสมือนจริง ทำให้ยังขาดข้อมูลที่เหมาะสมต่อการตัดสินใจในการเดินทาง และหลายครั้งที่นักท่องเที่ยวเดินทางมายังชุมชนแล้วไม่พบกิจกรรมใดในชุมชน เนื่องจากชุมชนจะจัดกิจกรรมเฉพาะช่วงวันเทศกาล หรือวันงาน (Snaenamahoot, 2015) นักท่องเที่ยวจึงไม่เห็นวัฒนธรรม ประเพณี ทำให้ไม่ทราบถึงวัฒนธรรมประเพณีอันสำคัญของแต่ละสถานที่อย่างถ่องแท้ ประกอบกับ ในปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอายุประชากรเป็นประชากรสูงวัย ซึ่งมีจำนวนมากขึ้นทุกวัน (Sukpaiboonwat, 2017) สถิติสัดส่วนโครงสร้างประชากรวัยเด็กและวัยทำงานมีแนวโน้ม

ลดลง ในขณะที่สัดส่วนของประชากรผู้สูงอายุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากร้อยละ 13.20 ของประชากรในปี พ.ศ. 2553 เป็นร้อยละ 32.10 ในปี พ.ศ. 2583 ทำให้กลุ่มเป้าหมายผู้สูงอายุเป็นกลุ่มที่ไม่ควรมองข้าม และจากภาพรวมของเศรษฐกิจเป็นกลุ่มที่มีความสำคัญเพราะมีเวลาและงบประมาณในการใช้จ่ายที่ไม่จำกัด อีกทั้งยังมีปริมาณผู้สูงอายุเพิ่มมากขึ้นทุกวัน (Watanakmonchai and Yawalak, 2010) และกลุ่มนักท่องเที่ยวผู้สูงอายุนับว่าเป็นกลุ่มตลาดที่มีคุณค่าและเป็นผู้มีประสบการณ์ มักมีพฤติกรรมการท่องเที่ยวเพื่อการพักผ่อนและเพื่อการศึกษาเรียนรู้ (Chiang, 2014) จากแนวโน้มดังที่กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้การท่องเที่ยวสำหรับนักท่องเที่ยวผู้สูงอายุเป็นตลาดหนึ่งที่มีแนวโน้มการเติบโตเพิ่มมากขึ้น รูปแบบการท่องเที่ยวแบบไม่เร่งรีบหรือท่องเที่ยวแบบเนิบช้า โดยไม่สร้างผลกระทบทำลายทรัพยากรแหล่งท่องเที่ยว ส่งผลให้เกิดการท่องเที่ยวอย่างยั่งยืน ดังนั้นการสร้างระบบการท่องเที่ยวสำหรับกลุ่มผู้สูงอายุจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่จะช่วยกระตุ้นเศรษฐกิจของชุมชนได้เป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นกลุ่มที่มีกำลังซื้อ ไม่มีข้อจำกัดด้านเวลาในการเดินทาง และยังมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี (Sungrugsa, 2016)

จากการศึกษาของ Sukit, (2019) พบว่าปัญหาของผู้สูงอายุส่วนใหญ่ คือ ต้องการข้อมูลของสถานที่ท่องเที่ยวเพื่อประกอบการตัดสินใจในการเดินทางให้เกิดการท่องเที่ยวอย่างปลอดภัย และต้องการข้อมูลแสดงถึงสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้สูงอายุที่ต่างจากนักท่องเที่ยวทั่วไป เช่น ทางลาดสำหรับรถเข็น ห้องน้ำ สถานที่ให้นั่งพักผ่อน ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีจำลองสภาพแวดล้อมเสมือนจริงมาประยุกต์ใช้ในเรื่องของการดูแลสุขภาพกับผู้สูงอายุ การสร้างสภาพแวดล้อมเสมือนจริงในการฟื้นฟูสมรรถภาพ การจัดเตรียมสถานการณ์ที่ถูกต้องทางนิเวศวิทยาที่จะกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนไหวและพฤติกรรมตามธรรมชาติ โดยการจำลองสภาพแวดล้อมเสมือนจริงที่มีประสิทธิภาพสามารถปรับเปลี่ยนทัศนคติในแง่ลบ และพฤติกรรมต่อต้านการเคลื่อนไหวร่างกาย หรือการออกกำลังกายของผู้สูงอายุได้ (Bruin *et al*., 2010)

ผู้วิจัยจึงมีความต้องการพัฒนาระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีโดยรวบรวมข้อมูลประวัติแหล่งท่องเที่ยวประเพณี วัฒนธรรมต่างๆให้เป็นหมวดหมู่และสามารถแสดงผลให้นักท่องเที่ยวกลุ่มผู้สูงอายุซึ่งต้องการข้อมูลและรายละเอียดที่แตกต่างจากนักท่องเที่ยวกลุ่มวัยเด็กและวัยกลางคน ให้สามารถเดินทางไปยังสถานที่ท่องเที่ยวและใช้สมาร์ทโฟนที่ติดตั้งแอปพลิเคชัน แสดงผลให้เห็นถึงลักษณะสถานที่ท่องเที่ยว การเดินทาง ความพร้อมของสถานที่และสิ่งที่ต้องเตรียมตัวในการเดินทางในรูปแบบการแสดงผลแบบเสมือนจริง อีกทั้งคำนวณความเหมาะสมของเวลาในการเดินทาง บันทึกและจดจำการเดินทาง และระบบยังช่วยให้สามารถเข้าใจประวัติและความสำคัญของแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีแต่ละแห่งได้อย่างสะดวก อันเป็นการอนุรักษ์และส่งเสริมการท่องเที่ยวในจังหวัดลพบุรีให้แพร่หลายมากยิ่งขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยและพัฒนามีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาระบบสารสนเทศด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง เพื่อเผยแพร่ข้อมูลแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีจังหวัดลพบุรีช่วยในการเดินทางสำหรับนักท่องเที่ยวกลุ่มผู้สูงอายุ 2) เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบสารสนเทศ

แหล่งท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์ โดยมีวิธีการวิจัยดังนี้

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1.1 ประชากร นักท่องเที่ยวกลุ่มผู้สูงอายุในจังหวัดลพบุรี จำนวน 100 คน

1.2 กลุ่มตัวอย่าง นักท่องเที่ยวกลุ่มผู้สูงอายุในจังหวัดลพบุรี ที่เดินทางมาเที่ยวในจังหวัดลพบุรี จำนวน 50 คน โดยคัดเลือกแบบเฉพาะเจาะจงจากประชากร ที่สามารถใช้คอมพิวเตอร์หรือสมาร์ทโฟนได้คล่อง

1.3 กลุ่มตัวอย่าง ที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพจากผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบระบบ จำนวน 5 คน โดยคัดเลือกแบบเฉพาะเจาะจง

2. เครื่องมือการวิจัย

2.1 ระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี แสดงผลด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง 3 มิติ เพื่อช่วยตัดสินใจสำหรับนักท่องเที่ยวสูงอายุในรูปแบบโมบายแอปพลิเคชันเชื่อมโยงกับเว็บแอปพลิเคชัน ที่ประกอบไปด้วยข้อมูลทั่วไป ข้อมูลสถานที่ตั้ง ข้อมูลประวัติ ข้อมูลรูปภาพ 2 มิติ โมเดล 3 มิติ สารคดีท่องเที่ยว ข้อมูลการเดินทาง และข้อมูลสิ่งอำนวยความสะดวก

2.2 แบบประเมินประสิทธิภาพระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี เป็นแบบสอบถามแบบมาตราส่วน 5 ระดับ มีค่าความเชื่อมั่น 0.78

2.3 แบบสอบถามความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี เป็นแบบสอบถามแบบมาตราส่วน 5 ระดับ

3. สถิติที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และแปลความหมายโดยใช้เกณฑ์การแปลความหมายตาม Vongratana (2007)

ระดับความพึงพอใจ	คะแนนเฉลี่ย
มากที่สุด	4.21 - 5.00
มาก	3.41 - 4.20
ปานกลาง	2.61 - 3.40
น้อย	1.81 - 2.60
น้อยที่สุด	1.00 - 1.80

4. ขั้นตอนการวิจัย

การออกแบบและการพัฒนาระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี แสดงผลด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง 3 มิติ เพื่อช่วยตัดสินใจสำหรับนักท่องเที่ยวสูงอายุ ผู้วิจัยใช้แนวคิดวงจรการพัฒนาระบบสารสนเทศแบบวงจรพัฒนาระบบ (Pukdiwatankul and Panitkun, 2003) เป็นแนวคิดในการวิจัยซึ่งเป็นการวิจัยผสมผสาน ขั้นตอนการดำเนินการศึกษาดังนี้

4.1 ศึกษาสืบค้นข้อมูลจริงและถูกต้องของแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรีโดยจัดประชุมวางแผนการดำเนินงานวิจัย กำหนดประเด็นที่ต้องศึกษา สืบค้น ทบทวนวรรณกรรม ทฤษฎีและองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับการดำเนินการวิจัย กำหนดกลุ่มประชากร คัดเลือกกลุ่มตัวอย่างและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องแบบเฉพาะเจาะจง ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีจากแหล่งข้อมูลที่เชื่อถือได้ เก็บข้อมูลวิจัยเชิงคุณภาพจากประชากรกลุ่มเป้าหมายโดยแบบสอบถามที่สร้างขึ้นและสัมภาษณ์เชิงลึก

การออกแบบระบบ เป็นขั้นตอนในการออกแบบการนำข้อมูลเข้าและผลลัพธ์ที่ได้จากระบบ รวมถึงระบุคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ ออกแบบหน้าจอโปรแกรม จากนั้นประเมินเพื่อตรวจสอบความถูกต้องให้เป็นตามความต้องการและวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการวางแผน

4.2 นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์และออกแบบมาพัฒนาระบบสารสนเทศ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.2.1 วิเคราะห์ข้อมูลภาพ 2 มิติ และพัฒนาโมเดล 3 มิติ โดยบันทึกภาพ 2 มิติของสถานที่ท่องเที่ยวและนำมาสร้างโมเดล 3 มิติด้วยโปรแกรมยูนิตี้ โดยมีสถานที่ดำเนินการพัฒนาโมเดล 3 มิติ ได้แก่ ศาลพระกาฬ พระปรางค์สามยอด พระบรมราชานุสาวรีย์สมเด็จพระนารายณ์มหาราช วงเวียนศรีสุริโยทัย วัดนครโกษา และ ประตูเพนียด

ภาพที่ 1 การพัฒนาโมเดล 3 มิติของแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดลพบุรี

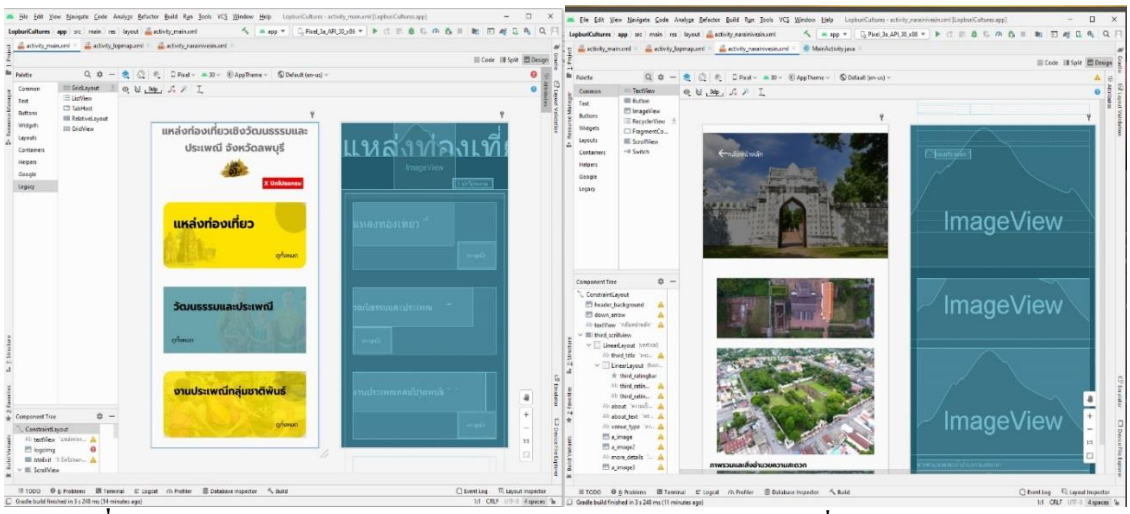
4.2.2 ถ่ายทำสารคดีนำเสนอแหล่งท่องเที่ยววัฒนธรรมและประเพณีแต่ละแห่ง และนำมาพัฒนาระบบสารสนเทศในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน โดยมีแหล่งท่องเที่ยวได้แก่ ประเพณีขึ้นเขาวงพระจันทร์ ,งานแผ่นดินสมเด็จพระนารายณ์มหาราช งานประเพณีแห่พระศรีอาริย์ งานประเพณีทำบุญเมืองลพบุรีและงานประเพณีกลุ่มชาติพันธุ์

ภาพที่ 2 ตัวอย่างการจัดทำสารคดีนำเสนอแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณี

4.2.3 สร้างมาร์คเกอร์และเชื่อมโยงข้อมูลกับภาพ 2 มิติ โมเดล 3 มิติ และสารคดีท่องเที่ยวด้วยโปรแกรมยูนิตี้ให้แสดงข้อมูลผ่านเทคโนโลยีเสมือนจริง ในรูปแบบโมบายแอปพลิเคชัน

ภาพที่ 3 แผนที่ท่องเที่ยวที่นำมาสร้างมาร์คเกอร์เชื่อมโยงข้อมูล

4.2.4 พัฒนาการเชื่อมโยงการนำเสนอข้อมูลผ่านระบบสารสนเทศในรูปแบบของโมบายแอปพลิเคชันและเว็บแอปพลิเคชัน



ภาพที่ 4 การพัฒนาระบบสารสนเทศในรูปแบบของโมบายแอปพลิเคชันเชื่อมโยงเว็บแอปพลิเคชัน

4.3 ประเมินประสิทธิภาพระบบสารสนเทศจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน และทำการทดสอบระบบด้วยหลักการ Object Oriented Software Engineering ปรับปรุงระบบแก้ไขข้อผิดพลาดในการทำงานของระบบและจัดทำคู่มือการใช้งาน รวมถึงเผยแพร่ผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย

4.4 ดำเนินการประเมินการใช้งานระบบสารสนเทศโดยใช้แบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบสารสนเทศ ซึ่งมีผู้ตอบแบบสอบถามจำนวน 50 คน ในช่วงเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2562 สรุปผลการวิจัย และนำเสนองานวิจัย

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการศึกษาการพัฒนาระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี แสดงผลด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง 3 มิติ เพื่อช่วยตัดสินใจสำหรับนักท่องเที่ยวสูงอายุได้ผลดังต่อไปนี้

1. ได้ศึกษาข้อมูลที่จำเป็นต่อการท่องเที่ยวสำหรับนักท่องเที่ยวผู้สูงอายุ เพื่อจัดทำระบบสารสนเทศเพื่อประกอบการตัดสินใจของนักท่องเที่ยวกลุ่มผู้สูงอายุในการท่องเที่ยวต่างๆ

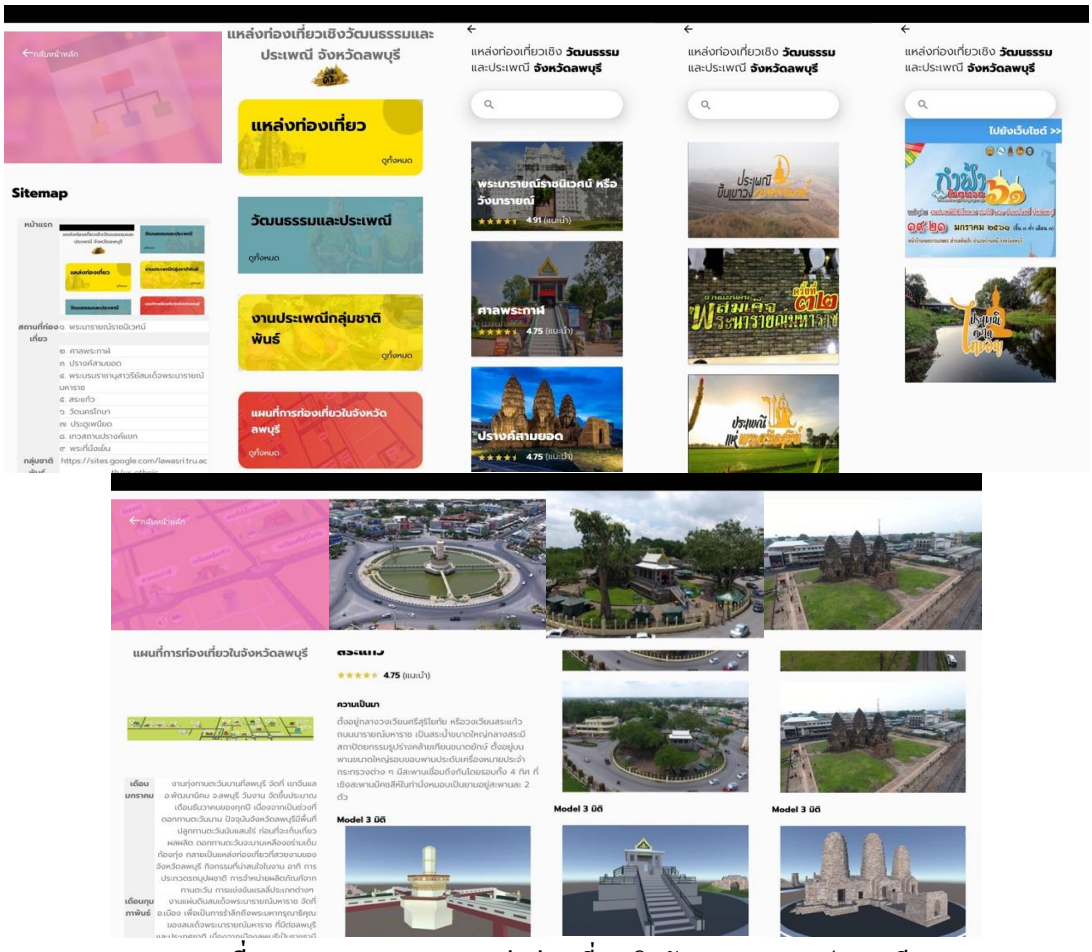
ตารางที่ 1 ข้อมูลที่จำเป็นต่อการอำนวยความสะดวกในสถานที่ท่องเที่ยว

รายการประเมิน	$\bar{x}$	SD.
ป้ายและสัญลักษณ์	3.39	1.068
ทางสัญจร ทางเท้า	3.31	0.977
ทางลาดขอบถนน ทางลาดตัดขอบคันหิน	3.31	1.055
ทางข้ามถนน	3.37	1.115
ที่จอดรถ	3.37	1.030
ทางลาดสำหรับภายนอกอาคาร	3.38	1.049
พื้นที่ภายนอก	3.31	1009
ห้องน้ำ	3.32	1.098
ค่าเฉลี่ย	**3.34**	**1.05**

จากข้อมูลตาม ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลที่จำเป็นต่อการอำนวยความสะดวกในสถานที่ท่องเที่ยว ซึ่งจากข้อมูล ทำให้ทราบว่านักท่องเที่ยวกลุ่มผู้สูงอายุมีความต้องการข้อมูลที่จำเป็นเรียงลำดับได้แก่ 1. ป้ายและสัญลักษณ์ 2. ทางลาดสำหรับภายนอกอาคาร 3. ข้อมูลที่จอดรถและทางข้ามถนน และ 4. ประเด็นสำคัญอีกสิ่งที่จะนำไปใช้ในการจัดทำข้อมูลสารสนเทศ ซึ่งนักท่องเที่ยวกลุ่มผู้สูงอายุมีความจำเป็นสำหรับการท่องเที่ยว คือข้อมูลห้องน้ำของสถานที่ท่องเที่ยวแต่ละแห่ง

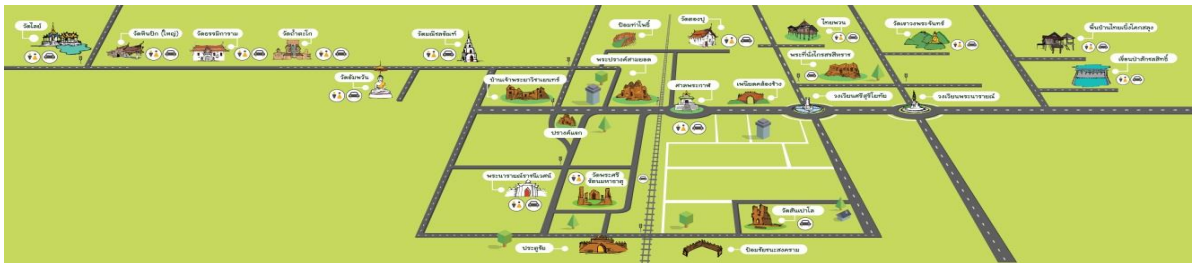
2. ได้ศึกษาและเก็บข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยวในจังหวัดลพบุรี เพื่อให้ได้ข้อมูลประกอบการจัดทำระบบสารสนเทศเพื่อช่วยตัดสินใจในการเดินทางท่องเที่ยว โดยได้สืบค้นข้อมูลจริงและทันสมัยของแหล่งท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์ในจังหวัดลพบุรีจากเอกสารทางวิชาการ หน่วยงานภาครัฐ ภาคเอกชน ได้แก่ สำนักศิลปากรที่ 4 พิพิธภัณฑสถานแห่งชาติสมเด็จพระนารายณ์ สำนักศิลปะและวัฒนธรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ชมรมอนุรักษ์วัตถุสถานและสิ่งแวดล้อมจังหวัดลพบุรี และนักวิชาการในท้องถิ่นและภูมิภาค ศึกษาพฤติกรรมของนักท่องเที่ยวต่อการใช้ระบบสารสนเทศโดยข้อมูลที่ได้จะใช้เพื่อการพัฒนาระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี แสดงผลด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง 3 มิติ เพื่อช่วยตัดสินใจสำหรับนักท่องเที่ยวสูงอายุ

3. ได้ออกแบบและพัฒนาระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีจังหวัดลพบุรี ในรูปแบบโมบายแอปพลิเคชันเชื่อมโยงกับเว็บแอปพลิเคชัน และแสดงผลแบบเสมือนจริง ด้วยโปรแกรมยูนิตีให้แสดงผลได้ในแท็บเล็ตและสมาร์ทโฟน โดยมีรายละเอียดของแอปพลิเคชัน ประกอบไปด้วย ข้อมูลแหล่งท่องเที่ยว งานประเพณีกลุ่มชาติพันธุ์ แผนที่การท่องเที่ยวในจังหวัดลพบุรี โดยแหล่งท่องเที่ยวพัฒนาด้วยระบบเสมือนจริงในรูปแบบโมเดล 3 มิติ ได้แก่ ศาลพระกาฬ พระปรางค์สามยอด พระบรมราชานุสาวรีย์สมเด็จพระนารายณ์มหาราช วงเวียนศรีสุริโยทัย วัดนครโกษา ประตูเพนียด และแหล่งประวัติศาสตร์ในรูปแบบภาพได้แก่ เทวสถานปรางค์แขก, พระที่นั่งเย็น และพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติสมเด็จพระนารายณ์ และสื่อนำเสนองานประเพณี ได้แก่ งานแผ่นดินสมเด็จพระนารายณ์มหาราช งานแห่พระศรีอาริย์ งานทำบุญเมืองลพบุรี งานประเพณีขึ้นเขาวงพระจันทร์ และงานประเพณีกลุ่มชาติพันธุ์ ประกอบไปด้วย งานเทศกาลประจำปีต่างๆ แผนการท่องเที่ยว, เส้นทางการท่องเที่ยว โดยการออกแบบได้คำนึงถึงกลุ่มเป้าหมายผู้สูงอายุ สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Dodd *et al.* (2017) ที่ได้กล่าวไว้ว่า การออกแบบสำหรับผู้ใช้งานที่อายุมาก ให้ใช้รูปแบบข้อความและตัวอักษรที่เหมาะสมและลักษณะการใช้งานให้สม่ำเสมอ การควบคุมที่ใช้ง่ายทั้งโปรแกรม ลดขั้นตอนความยุ่งยากในการจดจำขั้นตอนการใช้งาน โดยมีรายละเอียดของแอปพลิเคชันดังต่อไปนี้



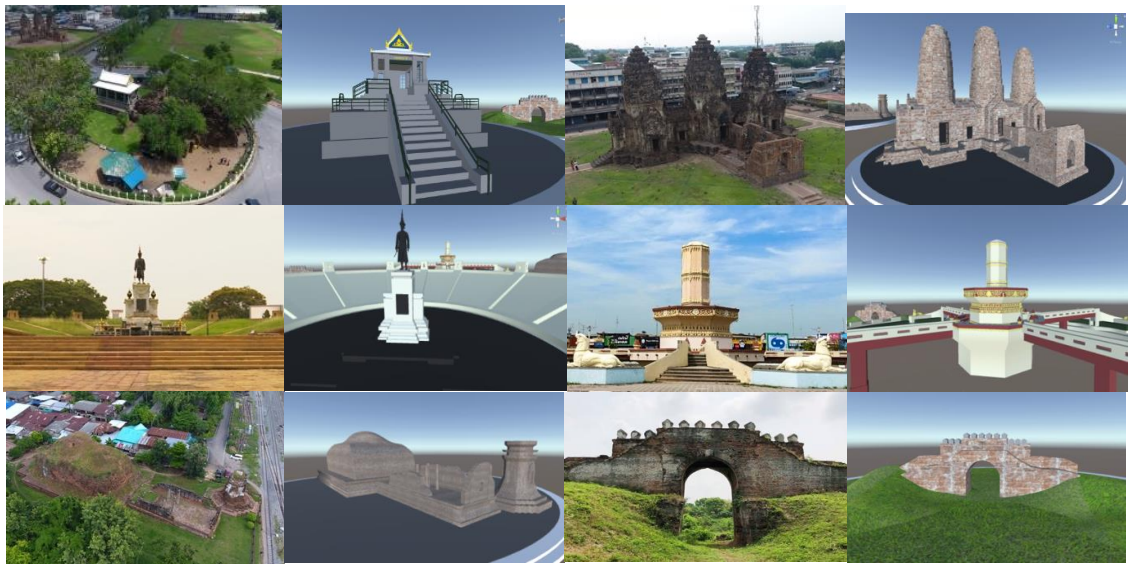
ภาพที่ 5 ระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณี

จากภาพที่ 5 ระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี โดยระบบประกอบไปด้วยเมนูหลัก ข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยว วัฒนธรรมและประเพณี งานประเพณีกลุ่มชาติพันธุ์ งานเทศกาลประจำ และแผนที่เส้นทางการท่องเที่ยวในจังหวัดลพบุรี



ภาพที่ 6 แผนที่ท่องเที่ยวในรูปแบบเสมือนจริง

จากภาพที่ 6 แผนที่ท่องเที่ยวในรูปแบบเสมือนจริงในแอปพลิเคชันช่วยแสดงตำแหน่งสถานที่ท่องเที่ยวในจังหวัดลพบุรี โดยเชื่อมโยงแสดงข้อมูลทั่วไป ประวัติ รูปภาพ วิดีโอและโมเดล 3 มิติ รวมถึงยังมีรายละเอียดบอกถึงสิ่งอำนวยความสะดวกที่ผู้สูงอายุจำเป็นต้องทราบว่าในแต่ละสถานที่ท่องเที่ยวแต่ละแห่ง มีสิ่งอำนวยความสะดวกใดบ้าง เช่น สถานที่จอดรถ ห้องน้ำ และเส้นทางการเดินทาง



ภาพที่ 7 โมเดล 3 มิติแหล่งท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์แสดงผลแบบเสมือนจริง

จากภาพที่ 7 แสดงระบบสารสนเทศในรูปแบบวิดีโอ 3 มิติที่แสดงแหล่งท่องเที่ยวที่เป็นโบราณสถานที่มีสภาพชำรุดทรุดโทรมบางแห่งมีสภาพไม่สมบูรณ์ ไม่สามารถเห็นร่องรอยของสถาปัตยกรรมได้อย่างสมบูรณ์จากภาพโมเดล 3 มิติทำให้นักท่องเที่ยวได้เห็นภาพของสถาปัตยกรรมในอดีตว่ามีรูปลักษณะอย่างไร

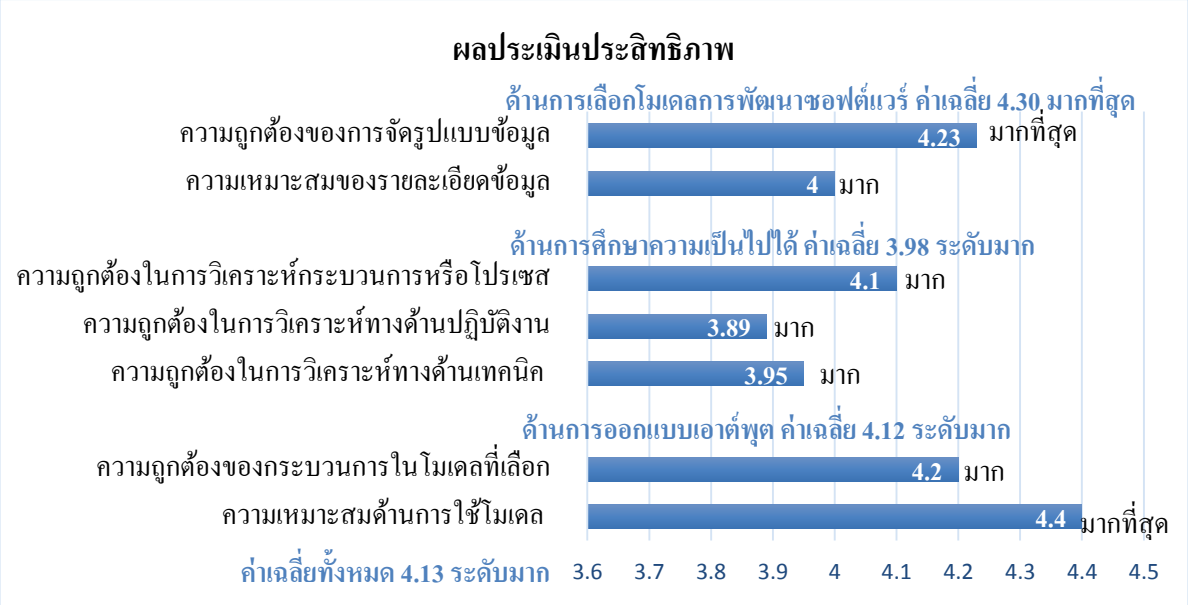
ภาพที่ 8 สิ่งอำนวยความสะดวกในแหล่งท่องเที่ยว เช่น ห้องน้ำ ที่จอดรถ ทางเข้าออก

จากภาพที่ 8 ภาพแหล่งท่องเที่ยวที่สำคัญในจังหวัดลพบุรีในแบบมุมสูง เช่น ศาลพระกาฬ และพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติสมเด็จพระนารายณ์ซึ่งเป็นพระราชวังโบราณสมัยกรุงศรีอยุธยาที่มีความสำคัญและมีคุณค่าทางประวัติศาสตร์ และจากภาพมุมสูงในภาพที่ 8 ทำให้เห็นว่ามีพื้นที่ภายในพระราชวังแบ่งออกเป็น 3 เขต คือ เขตพระราชฐานชั้นนอก เขตพระราชฐานชั้นกลาง และเขตพระราชฐานชั้นใน และตำแหน่งทางเข้าออกรวมถึงที่จอดรถ และตำแหน่งห้องน้ำ ช่วยให้นักท่องเที่ยวผู้สูงอายุสามารถนำข้อมูลจากระบบไปช่วยในการตัดสินใจในการเดินทางได้อย่างถูกต้อง

ภาพที่ 9 สื่อนำเสนอวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี

จากภาพที่ 9 สื่อนำเสนอวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี ในรูปแบบสารคดีท่องเที่ยวที่แสดงถึงประเพณีและวัฒนธรรมของแหล่งท่องเที่ยวในแต่ละช่วงเวลา ประกอบไปด้วยรายละเอียดของแต่ละสถานที่ ตามช่วงเวลาต่างๆ ของแต่ละประเพณี ทำให้นักท่องเที่ยวได้เห็นถึงประเพณีเพื่อเตรียมพร้อมในการเดินทางท่องเที่ยวได้อย่างถูกต้อง ยกตัวอย่างเช่น ประเพณีแห่พระศรีอาริย์ ในอำเภอท่าวุ้ง งานแผ่นดินสมเด็จพระนารายณ์มหาราชซึ่งเป็นงานประจำจังหวัด งานทำบุญเมืองลพบุรี ซึ่งจัดโดยชมรมอนุรักษ์วัตถุสถานและสิ่งแวดล้อมจังหวัดลพบุรี จัดขึ้นในช่วงปลายเดือนธันวาคมของทุกปี ประเพณีขึ้นเขาวงพระจันทร์ ที่จัดขึ้นเพื่อนมัสการรอยพระพุทธบาทบนเขาวงพระจันทร์ โดยจากสื่อนำเสนอช่วยให้นักท่องเที่ยวผู้สูงอายุได้เห็นถึงลักษณะของเส้นทางเดินขึ้นเขาเพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเดินทางได้อย่างถูกต้อง ว่าเหมาะสมกับการท่องเที่ยวหรือไม่ และสื่อนำเสนอยังประกอบด้วยงานประเพณีต่าง ๆ เช่นงานประเพณีกลุ่มไทยมอญ ในอำเภอเมืองจังหวัดลพบุรี

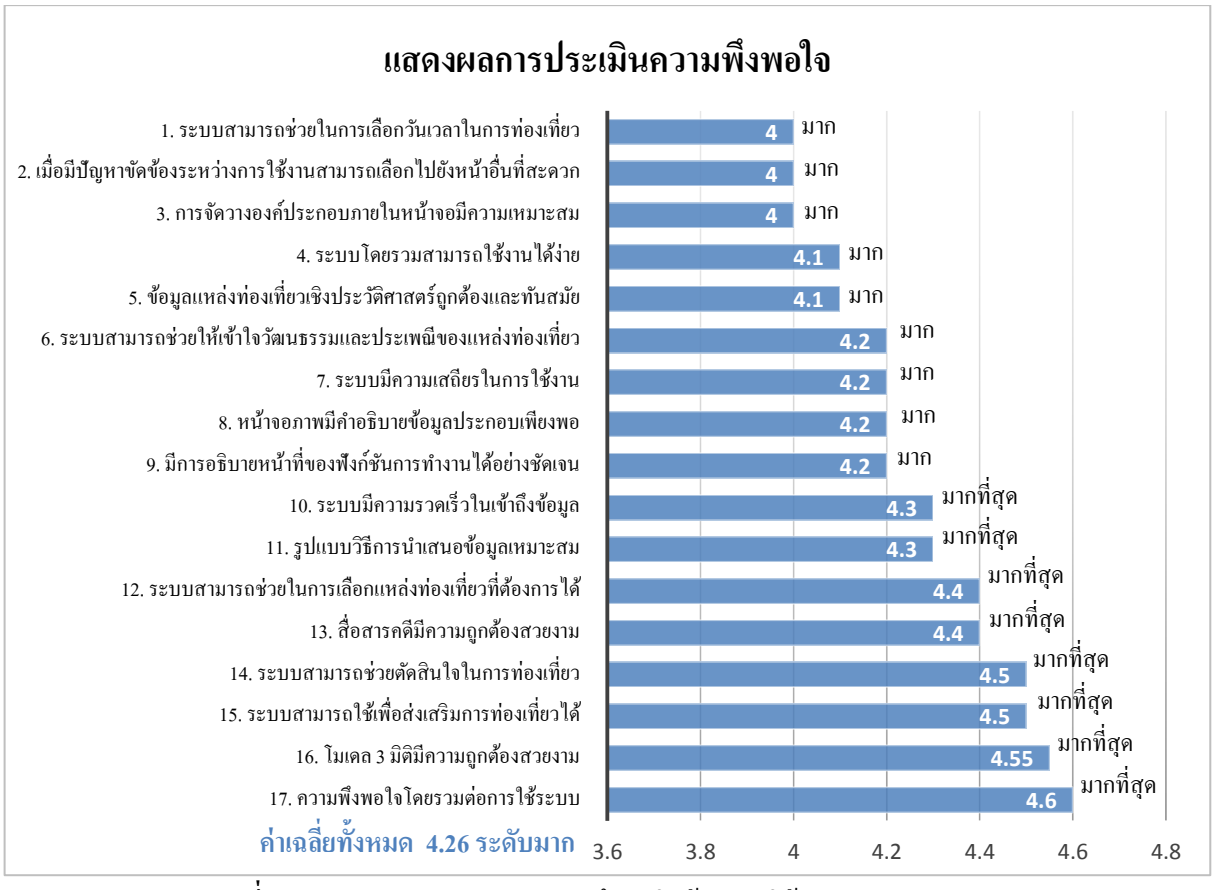
4. ผลการประเมินด้านการวิเคราะห์และออกแบบระบบ หัวข้อในการประเมินตามหลักการวิเคราะห์และออกแบบระบบ (Iaomsiri, 2017) ได้แก่ ด้านการเลือกโมเดลการพัฒนาซอฟต์แวร์ ด้านการศึกษาความเป็นไปได้ และด้านการออกแบบเอาต์พุต



ภาพที่ 10 ผลการประเมินประสิทธิภาพระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณี

จากตารางที่ 10 ผลการการประเมินประสิทธิภาพระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรีจากผู้เชี่ยวชาญอยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ยโดยรวมเท่ากับ 4.13 ประกอบด้วย ด้านการเลือกโมเดลการพัฒนาซอฟต์แวร์อยู่ในระดับมากที่สุด ค่าเฉลี่ยรวม 4.30 ด้านการออกแบบเอาต์พุตอยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ยรวม 4.12 และด้านการศึกษาความเป็นไปได้อยู่ในระดับมากมีค่าเฉลี่ยรวม 3.98 และเมื่อพิจารณาในรายละเอียดแต่ละด้าน ความเหมาะสมด้านการใช้โมเดลได้ค่าคะแนนเฉลี่ยสูงสุด คือ 4.40 อันเนื่องมาจากผู้เชี่ยวชาญคิดเห็นว่าการใช้ภาพทางอากาศ และโมเดล 3 มิติ กับสถานที่ท่องเที่ยวหลายแห่งเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยให้เห็นภาพสถานที่แต่ละแห่งได้อย่างชัดเจน และเหมาะสมกับบางแห่งซึ่งมีสิ่งก่อสร้างซึ่งปรักหักพัง ทำให้เห็นสันฐานของสิ่งก่อสร้างได้อย่างชัดเจน แต่ขณะเดียวกัน ในส่วนของความถูกต้องในการวิเคราะห์ทางด้านปฏิบัติงานได้คะแนนน้อยที่สุด คือมีค่าเฉลี่ย 3.89 เป็นผลมาจากการที่กลุ่มเป้าหมายของงานวิจัยเป็นกลุ่มผู้สูงอายุการใช้งานในทางปฏิบัติจึงยังคงไม่สะดวกมากนักสำหรับกลุ่มตัวอย่าง

5. ได้เผยแพร่ระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรีแสดงผลด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง 3 มิติ เพื่อช่วยตัดสินใจสำหรับนักท่องเที่ยวสูงอายุ และส่งเสริมจินตนาการในการเรียนรู้โดยระบบสามารถเข้าถึงได้ผ่านอินเตอร์เน็ตจากสมาร์ทโฟน และหลังจากเผยแพร่แล้ว ดำเนินการประเมินความพึงพอใจด้านการใช้งานระบบสารสนเทศกับให้กับกลุ่มตัวอย่างนักท่องเที่ยวจำนวน 50 คน โดยผู้ใช้งานสามารถดาวน์โหลดโมบายแอปพลิเคชั่นเพื่อติดตั้งในสมาร์ทโฟนที่ใช้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์จาก https://sites.google.com/lawasri.tru.ac.th/vr-ethnic เลือกแถบเครื่องมือ "Download-MobileApp" แล้วจึงสามารถใช้ระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี แสดงผลด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง 3 มิติ บนสมาร์ทโฟนได้



ภาพที่ 10 แสดงผลการประเมินความพึงพอใจด้านการใช้งานระบบสารสนเทศ

จากภาพที่ 10 ผลการประเมินความพึงพอใจระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี แสดงผลด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง 3 มิติ เพื่อช่วยตัดสินใจสำหรับนักท่องเที่ยวสูงอายุ อยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยโดยรวมเท่ากับ 4.26 ประกอบด้วย ความพึงพอใจโดยรวมต่อการใช้ระบบ อยู่ในระดับมากที่สุด ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.60 รองลงมาคือ โมเดล 3 มิติมีความถูกต้องสวยงาม อยู่ในระดับมากที่สุด ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.55 ระบบสามารถใช้เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยวได้ และระบบสารสนเทศสามารถช่วยตัดสินใจในการท่องเที่ยว อยู่ในระดับมากที่สุด ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.50 และข้ออื่นๆ น้อยลงตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาในรายละเอียดกลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจโดยรวมต่อการใช้ระบบ เพราะระบบสามารถช่วยให้เกิดการส่งเสริมจินตนาการในการเรียนรู้เพราะมีข้อมูลทั้งในรูปแบบภาพ 2 มิติ โมเดล 3 มิติ และข้อมูลประกอบในรูปสารคดีจากแหล่งท่องเที่ยวจริง และระบบสามารถใช้เป็นข้อมูลหลักในการตัดสินใจในการเดินทางท่องเที่ยวได้เป็นอย่างดี แต่มีข้อที่ต้องปรับปรุงเนื่องจากได้คะแนนประเมินน้อย ได้แก่ เมื่อมีปัญหาขัดข้องระหว่างการใช้งานสามารถเลือกไปยังหน้าอื่นได้อย่างสะดวก ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญของระบบคือต้องออกแบบระบบให้ง่ายต่อผู้ใช้งานตั้งแต่ครั้งแรก เพราะผู้ประเมินยังคงไม่คุ้นชินกับลักษณะเมนูและปุ่มต่างๆ ของระบบสอดคล้องกับ Udom (2017) ที่ได้กล่าวไว้ว่าปัญหาของระบบสารสนเทศ คือ การสื่อสารของเมนูในบางคำของปุ่มยังสื่อสารไม่ชัดเจนทำให้ผู้ใช้ไม่เข้าใจถึงระบบว่าต้องดำเนินการไปอย่างไรต่อ

สรุป

การออกแบบและพัฒนาการพัฒนาระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี แสดงผลด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริงเพื่อช่วยตัดสินใจสำหรับนักท่องเที่ยวสูงอายุ

1. จากการวิจัยได้พัฒนาระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี แสดงผลด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง 3 มิติ เพื่อช่วยในการตัดสินใจสำหรับนักท่องเที่ยวสูงอายุที่ถูกต้องและทันสมัย สามารถเข้าถึงได้ด้วยสมาร์ทโฟนของนักท่องเที่ยวที่มีการติดตั้งโปรแกรม และต้องใช้สมาร์ทโฟนที่มีประสิทธิภาพเพื่อให้สามารถรองรับการทำงานของระบบได้ และด้วยระบบเสมือนจริง ทำให้เกิดความน่าสนใจและกระตุ้นเรียนรู้ได้อย่างดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Saekhow and Prasertsaruay (2015) ที่กล่าวว่าการที่ได้เห็นภาพเสมือนจริงที่ปรากฏบนจอ ช่วยกระตุ้นให้นักศึกษา มีความสนใจในการเรียนเพิ่มขึ้น และระบบสามารถให้ความรู้เรื่องสถานที่ท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์ และใช้งานในการส่งเสริมการท่องเที่ยวได้อย่างเหมาะสม มีประสิทธิภาพ เป็นการนำเอาเทคโนโลยีสารสนเทศเข้ามาช่วยให้เกิดความรู้ความเข้าใจในแหล่งท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์แต่ละแห่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kanchanawong and Siri (2018) ที่ได้กล่าวไว้ว่านักท่องเที่ยวมีพฤติกรรมการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารเพื่อการท่องเที่ยวและควรจัดข้อมูลสารสนเทศที่สอดคล้องกับรูปแบบพฤติกรรม เช่น การใช้สื่ออิเล็กทรอนิกส์เพื่อนำเสนอข้อมูลในแหล่งท่องเที่ยว

2. จากผลการประเมินระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณี สามารถนำมาใช้งานในการท่องเที่ยวได้จริง โดยสามารถช่วยทำให้ผู้ใช้เข้าถึงแหล่งท่องเที่ยววัฒนธรรมได้อย่างสะดวกรวดเร็ว แก้ปัญหาในการเสียเวลากับการเดินทางไปยังแหล่งท่องเที่ยววัฒนธรรมต่างๆ สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Caichompoo *et al.* (2018) ที่พบว่าระบบสารสนเทศสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านการท่องเที่ยวประเภทอื่นได้ ช่วยให้นักท่องเที่ยวหรือผู้สนใจมีความสะดวกเรื่องการเข้าถึงข้อมูลสามารถติดต่อได้อย่างรวดเร็ว และนักท่องเที่ยวสามารถเตรียมตัวและเดินทางด้วยตนเองได้ง่ายกว่าเดิมมาก

3. จากผลการวิจัยมีข้อจำกัดด้านการแสดงผลในอุปกรณ์เคลื่อนที่ คือการจัดวางองค์ประกอบภายในหน้าจอไม่มีความเหมาะสม เนื่องจากอุปกรณ์เคลื่อนที่มีขนาดเล็ก เป็นปัญหาต่อการใช้งานของผู้สูงอายุ อีกทั้งหน้าจอที่ฟังก์ชันการทำงานมากเกินไปก็เป็นอุปสรรคต่อการใช้งาน ซึ่งแก้ปัญหาโดยการออกแบบอินเทอร์เฟซของหน้าจอให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และจัดหมวดหมู่เนื้อหาให้มีความเหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยเรื่องการพัฒนาระบบสารสนเทศแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมและประเพณีในจังหวัดลพบุรี แสดงผลด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง 3 มิติ เพื่อช่วยตัดสินใจสำหรับนักท่องเที่ยวสูงอายุ ที่ได้ใช้ส่วนหนึ่งในการจัดทำผลงานในครั้งนี้ และขอขอบคุณ ชุมชนกลุ่มชาติพันธุ์ นักวิชาการ หน่วยงานภาครัฐ และภาคเอกชน ที่ให้ความร่วมมือในการให้ข้อมูลเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

Bruin, E.D., Schoene, D., Pichierri, G. and Smith, S.T. 2010. Use of virtual reality technique for

the training of motor control in the elderly. **Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie** 43(4): 229-234.

Caichompoo, S., Caichompoo, B. and Preechayakul, P. 2018. Tourism Management Information System Of Khung Bangkachao Area, Phrapradaeng District, Samutprakan. **Phranakhon Rajabhat Research Journal (Humanities and Social Sciences)** 12(1): 91-99. (in Thai)

Chiang, L. 2014. A comparative study of generational preferences for trip-planning resources: A case study of international tourists to Shanghai. **Quality Assurance in Hospitality and Tourism** 15(1): 78-99.

Dodd, C., Athauda, R. and Adam, M.T.P. 2017. Designing User Interfaces for the Elderly: A Systematic Literature Review. **Australasian Conference on Information Systems** 17(1): 1-11.

Iaomsiri, O. 2017. **System Analysis and Design.** Se-ed Co., Ltd, Bangkok. (in Thai)

Kanchanawong, P. and Siri, R. 2018. Behavior analysis of information and communication technology usage of chinese tourists in chiang mai. **Journal of Yala Rajabhat University** 13(1): 101-113. (in Thai)

Pukdiwatankul, K. and Panitkun, P. 2003. **Object Oriented Systems Development Scripture with UML and JAVA.** Ktp Comp & Consult Co., Ltd, Bangkok. (in Thai)

Saekhow, N. and Prasertsaruay, S. 2015. Development of Virtual World Model For Interactive Multimedia Instruction On Exploring The Computer World. **Valaya Alongkorn Research and Development Journal under the Royal Patronage (Humanities and Social Sciences)** 10(1): 36-45. (in Thai)

Snaenamahoot, C. 2015. **Tourism Recommendation System in Thailand Using Temporal Ontology and Improvement of Naive-Bayes Algorithm.** Department of Computer Science and Information Technology Faculty of Science, Naresuan University. (in Thai)

Sukit, P. 2019. The Traveling Behavior and Trends of Aging Accommodation, pp. 1-10. *In* **The 4th National RMUTR Conference and The 1st International RMUTR Conference.** Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Bangkok. (in Thai)

Sukpaiboonwat, S. 2017. The Role Population Aging On Economic Growth in Thailand. **Srinakharinwirot Research and Development (Journal of Humanities and Social Sciences)** 9(1): 176-191. (in Thai)

Sungrugsa, N. 2016. Stlyes and behavior in Slow tourism for senior Tourists in the thai western region. **University of the Thai Chamber of Commerce Journal** 36(2): 1-19. (in Thai)

Udom, P. 2017. A development virtual reality technology for tourism Case study of Hua-Hin tourism. Master Thesis of Science, Bangkok University. (in Thai)

Vongratana, S. 2007. **Techniques for using statistics for research.** Taineramitkij Inter Progressive Co.,Ltd., Nonthaburi. (in Thai)

Watanakmonchai, S. and Yawalak, Y. 2010. Senior Tourists: A Market with Potential for the

Tourism in dustry. **Panyapiwat journal**
2(1): 95-103. (in Thai)

การประเมินศักยภาพถิ่นอาศัยที่เหมาะสมของผักหวานป่าตามปัจจัยแวดล้อมบางประการในพื้นที่โครงการพัฒนาบ้านโปงอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่

Assessment of Habitat Suitability of *Meliantha Suavis* Pierre (Opiliaceae) based on some Environmental Factors in Ban Pong Development Project Area of Royal Initiative Project, San Sai District, Chiang Mai Province

มะโนลม วงแสนแก้ว [1,2] สุธีระ เหิมฮึก [1,3*] วิชญ์ภาส สังพาลี [1,3] เกรียงศักดิ์ ศรีเงินยวง [1,4]
และ ขนิษฐา เสถียรพีระกุล [1,5]

Manolom Vongsenekeo [1,2], Sutheera Hermhuk [1,3*], Witchaphart Sungpalee [1,3], Kriangsak Sri-ngernyuang [1,4]
and Kanitta Satienpirakul [1,5]

Received: 9 December 2020, Revised: 2 February 2021, Accepted: 8 April 2021

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพถิ่นอาศัยที่เหมาะสมของผักหวานป่าโดยการระบุปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการกระจายของผักหวานป่า ในพื้นที่ป่าเต็งรัง โครงการพัฒนาบ้านโปงอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ โดยทำการวางแปลงสำรวจชั่วคราว แบบการสุ่มอย่างเป็นระบบ จำนวน 45 แปลง บริเวณที่ทำการศึกษาถิ่นอาศัยของผักหวานป่าร่วมกับการเก็บข้อมูลสภาพภูมิประเทศ และคุณสมบัติดินในแปลงสำรวจ ทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปร่วมกับการประเมินแบบ

---

[1] สาขาวิชาการพัฒนาภูมิสังคมอย่างยั่งยืน คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 50290

[1] Program in Geosocial Based Sustainable Development, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand.

[2] คณะเกษตรศาสตร์และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสะหวันนะเขต แขวงสะหวันนะเขต สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว 13000

[2] Faculty of Agriculture and Environment, Savannakhet University, Savannakhet 13000, Lao People's Democratic Republic.

[3] สาขาวิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 50290

[3] Program in Agronomy, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand.

[4] คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 50290

[4] Faculty of Architecture and Environmental Design, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand.

[5] สาขาเศรษฐศาสตร์เกษตร และสิ่งแวดล้อม คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 50290

[5] Program in Agricultural and Environmental Economics, Faculty of Economics, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand.

[*] ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): h.sutheera@gmail.com

แบบจำลองทางภูมิศาสตร์ ผลการศึกษา

พบว่าในพื้นที่ป่าเต็งรัง โครงการพัฒนาบ้านโปงฯ มีการกระจายของจำนวนต้นกล้าผักหวานป่าทั่วพื้นที่ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบจำนวนกล้าผักหวานป่า 361 ต้นต่อเฮกแตร์ การประเมินถิ่นอาศัยที่เหมาะสมตามปัจจัยแวดล้อมพบว่า พื้นที่ทั้งหมด 589.76 เฮกแตร์ (3,686 ไร่) เป็นพื้นที่เหมาะสมต่อการกระจายของผักหวานป่าในระดับปานกลางมากที่สุดจำนวน 388.76 เฮกแตร์ (2,429.75 ไร่) คิดเป็นร้อยละ 65.92 ของพื้นที่ รองลงมาได้แก่พื้นที่เหมาะสมมากจำนวน 116 เฮกแตร์ (725 ไร่) คิดเป็นร้อยละ 19.67 ของพื้นที่ และพื้นที่เหมาะสมน้อย 85 เฮกแตร์ (532.25 ไร่) คิดเป็นร้อยละ 14.41 ของพื้นที่ ตามลำดับ โดยปัจจัยแวดล้อมที่เป็นตัวกำหนดการกระจายของผักหวานป่าแบ่งเป็นปัจจัยที่มีผลเชิงบวกคืออนุภาคขนาดทราย ทองแดงที่เป็นประโยชน์ และแมงกานีสที่เป็นประโยชน์ และปัจจัยที่มีความสัมพันธ์เชิงลบคือ ความลาดชัน ความห่างไกลจากแหล่งน้ำ และความเป็นกรด-ด่างของดิน นอกจากนี้ยังพบปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ที่มีแนวโน้มสัมพันธ์เชิงบวกกับจำนวนต้นแม่ของผักหวานป่า ก่อแพะ และแข้งกวางดง ที่เป็นชนิดไม้ชั้นเรือนยอดรองของป่าเต็งรังอีกนัยหนึ่ง ผลการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการพื้นที่ป่า และการฟื้นฟูประชากรของผักหวานป่าในพื้นที่ให้เหมาะสมต่อไป

คำสำคัญ: ผักหวานป่า, ปัจจัยแวดล้อม, ป่าเต็งรัง, ถิ่นอาศัยที่เหมาะสม

ABSTRACT

The objective of this research was to assess habitat suitability of *Melientha suavis* (Phak Wan Pa) based on some environmental factors related to *M. suavis* distribution in the study area within deciduous dipterocarp forest (DDF) at Ban Pong development project area of Royal Initiative Project, San Sai district, Chiang Mai province. For this purpose, 45 systematic temporary plots were established and data on topographical conditions and soil properties were collected. The relationship among the collected data were analyzed using a generalized linear model, which were used in combination with an assessment of geographic information system to evaluate the habitat suitability of *M. suavis*. The results indicated that *M. suavis* distributed densely within the DDF. The number of seedlings was not significant different among plots, whereby the number of seedlings found in the study area was 361 individuals/ hectare. Of the 589.76 hectare (3,686 rai) under study, 388.76 hectare (2,429.75 rai) were found to be moderately suitable for *M. suavis* (65.95 % of total area), 116 hectare (725 rai) were classified as highly suitable (19.67 % of total area), and 85 hectare (532.25 rai) were slightly suitable for *M. suavis* distribution (14.41 % of total area). Environmental factors that were positively associated with *M. suavis* distribution consisted of sandy texture, extractable form of manganese (Mn) and extractable form of copper (Cu), while negatively associated factors were slope, distant from natural stream and soil pH. It was also observed that there was a positive trend for mature *M. suavis* to be associated with *Quercus kerii* or *Wendlandia paniculate,* both of which were the co-dominance tree species of the DDF. The results of this study can be applied to forest management and population restoration of *M. suavis* in the area based on habitat suitability.

Key words: *Melientha suavis*, environmental factors, deciduous dipterocarp forest, habitat suitability

บทนำ

ผักหวานป่าเป็นพืชอาหารป่า (Edible plant) ชนิดหนึ่งที่รู้จักกันทั่วไป และถูกใช้ประโยชน์มาเป็นเวลายาวนาน ทั้งเป็นแหล่งอาหาร และแหล่งรายได้ให้แก่ชุมชนที่อยู่ใกล้พื้นที่ป่าไม้ธรรมชาติ (Yotapukdee *et al*., 2015) โดยผักหวานป่าสามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งใบอ่อน ยอดอ่อน และช่อผลมาบริโภค ถิ่นการกระจายตามธรรมชาติของผักหวานป่าพบได้ในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้หรือเอเชียอาคเนย์ (Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 2010) สำหรับประเทศไทยพบผักหวานป่าในทั่วทุกภาค แต่บริเวณที่พบผักหวานป่ากระจายอยู่มากที่สุดคือ ป่าธรรมชาติในภาคเหนือ โดยเฉพาะอย่างยิ่งป่าเต็งรัง และป่าผสมผลัดใบ (Marod and Kutintara, 2009; Semsanthat and Ponoi, 2009) ทั้งนี้พื้นที่ป่าในจังหวัดเชียงใหม่ เช่น ป่าชุมชน ป่าฟื้นฟูตามแนวพระราชดำริ หรือป่าสงวนแห่งชาติถือเป็นพื้นที่หนึ่งที่อนุญาตให้เก็บหาของป่า (Non-forest timber product) (Royal Forest Department, 2019) โดยเฉพาะผักหวานป่าที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก และสร้างรายได้อย่างมากมายในช่วงฤดูการเก็บหาในปัจจุบัน (Pileuk *et al*., 1997; Prathepha, 2000)

ผักหวานป่า (*Melientha suavis* Pierre) จัดอยู่ในวงศ์ Opiliaceae เป็นพืชป่าที่มีนิเวศวิทยาแตกต่างจากพืชป่าชนิดอื่น มักปรากฏหนาแน่นในบริเวณที่ลาดเชิงเขาที่เนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย (Sandy clay loam) เป็นหลัก และมีความสูงจากระดับน้ำทะเลมากกว่า 200 เมตร (Lutteerasuwan *et al*., 2015) หรืออาจพบในบริเวณที่ดอนสูง พื้นที่โคก สภาพดินลูกรังที่มีความสมบูรณ์ต่ำ มีลักษณะกรวดลูกรังและดินดาน ที่ระบายน้ำได้ดี (Semsanthat and Ponoi, 2009) การแตกยอดตามธรรมชาติแตกได้ปีละครั้ง ซึ่งชาวบ้านมักมีกรรมวิธีการเร่งการแตกยอดของผักหวานป่า เช่น การอาศัยไฟป่าช่วยกระตุ้นการแตกยอด (Naruangsri *et al*., 2014) การตัดสาง (Pruning) และตัดลำต้นให้เตี้ยเพื่อสะดวกในการเก็บหาของชุมชนที่อยู่ใกล้พื้นที่ป่า (Lutteerasuwan *et al*., 2015) ในประเทศไทยนั้นการแพร่กระจายของผักหวานป่าที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจะแพร่กระจายด้วยเมล็ด ซึ่งต้องใช้ระยะเวลายาวนานในการขยายพันธุ์ (Naruangsri *et al*., 2014) และในปัจจุบันมีการปลูกผักหวานป่าในพื้นที่เอกชนหรือที่ดินเอกสารสิทธิ์อย่างกว้างขวาง เพื่อรองรับการตลาดของยอดผักหวานป่าที่มีราคาแพง อย่างไรก็ตามพบว่าการปลูกผักหวานป่ายังไม่ค่อยประสบความสำเร็จเนื่องจากค่อนข้างมีอัตราการงอกต่ำหากปัจจัยแวดล้อมไม่เหมาะสม (Pileuk *et al*., 1997) หรือมีการตั้งตัวยากในช่วงต้นของการเติบโต (Lutteerasuwan *et al*., 2015) และยังขาดการวิจัยเชิงลึกเกี่ยวกับคุณสมบัติของปัจจัยแวดล้อมที่ส่งผลต่อการตั้งตัว และกระจายของผักหวานป่า สำหรับพื้นที่โครงการพัฒนาบ้านโปงอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเชียงใหม่ มีสภาพพื้นที่เป็นป่าเต็งรังธรรมชาติที่มีผักหวานป่าปรากฏในสังคมพืชอย่างหนาแน่น อีกทั้งเป็นพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ในการเก็บหาผักหวานป่าเพื่อการบริโภคและจำหน่ายของชุมชนที่อยู่โดยรอบมาเป็นเวลายาวนาน ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาระหว่างการกระจายตามธรรมชาติ ตามความผันแปรของปัจจัยแวดล้อมที่ส่งผลต่อการกระจายของผักหวานป่า โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่าง ปัจจัยชีวภาพ (Biotic factors) และปัจจัยกายภาพ (Abiotic factors) ต่อการปรากฏของผักหวานป่า และการประเมินถิ่นอาศัยที่เหมาะสมของผักหวานป่าในพื้นที่ป่าเต็งรังของพื้นที่โครงการ

พัฒนาบ้านโปงฯ ซึ่งผลการศึกษาสามารถประยุกต์ใช้กับการฟื้นฟูโดยการปลูกผักหวานป่าตามธรรมชาติตามถิ่นอาศัยที่เหมาะสม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมสำหรับผักหวานป่าเพื่อการจัดทำสวนผักหวานป่าของภาคเอกชนหรือผู้ประกอบการต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา

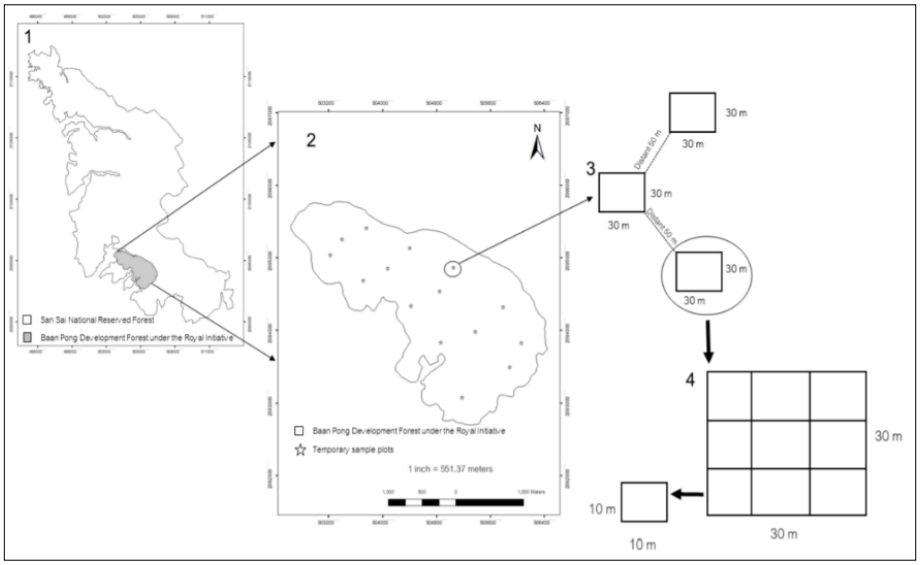
การวิจัยในครั้งนี้ดำเนินการวิจัยในพื้นที่โครงการพัฒนาบ้านโปงอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเชียงใหม่ มีพื้นที่ 3,686 ไร่ (589.76 เฮกแตร์ หรือ 5.90 ตารางกิโลเมตร) ตั้งอยู่ในตำบลป่าไผ่ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ โดยพื้นที่โครงการอยู่ภายใต้พื้นที่ป่าสงวนแห่งชาติป่าสันทราย กรมป่าไม้ (ภาพที่ 1)

2. วิธีการรวบรวมข้อมูลการวิจัย

1) ศึกษาจำนวนของต้นผักหวานป่า โดยวางแปลงชั่วคราวแบบการสุ่มเป็นระบบ (Systematic sampling) จากแผนที่ทางภูมิศาสตร์ ประกอบด้วย 3 แนวสำรวจ (โดยแต่ละแนวสำรวจวางจุดสำรวจห่างกัน 500 เมตร และในแต่ละแนวห่างกัน 200 เมตร) รวมจุดสำรวจทั้งหมด 15 จุด ซึ่งในแต่ละจุดมีการวางแปลงชั่วคราว (Temporary plot) ขนาด 30 เมตร × 30 เมตร จำนวน 3 แปลงสำรวจ แต่ละแปลงสำรวจห่างกัน 50 เมตร ซึ่งทำการแบ่งแปลงย่อยขนาด 10 เมตร × 10 เมตร จำนวน 9 แปลงย่อยใน 1 แปลงสำรวจ เพื่อทำการเก็บข้อมูลองค์ประกอบของชนิดไม้ในแต่ละแปลงย่อย ด้วยการจำแนกชนิดพรรณไม้ และบันทึกจำนวนต้นกล้าของผักหวานป่าในแปลงสำรวจทุกต้น โดยผักหวานป่าที่มีความสูงน้อยกว่า 1.30 เมตร จะระบุว่าเป็นกล้าไม้ของผักหวานป่า และ 1 กอที่มีเหง้าเดียวกันนับเป็น 1 กล้าไม้ (ต้น) (ภาพที่ 1)

2) ทำการรวบรวมข้อมูลปัจจัยด้านแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับลักษณะภูมิประเทศได้แก่ ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง (Elevation) ทิศด้านลาด (Aspect) และความลาดชัน (Slope) จากแผนที่แบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital elevation model, DEM) ที่ความละเอียด 30 เมตร × 30 เมตรของพื้นที่ศึกษา ในส่วนและระยะห่างของแปลงตัวอย่างจากลำน้ำธรรมชาติ (Distance to natural streams) จากข้อมูลเส้นลำน้ำในประเทศไทย โดยองค์กรเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ

3) ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบรบกวนโครงสร้างดินในชั้นบน (Top soil layer) ที่ 0-15 เซนติเมตร เพื่อวิเคราะห์หาข้อมูลสมบัติต่างๆ ของดิน ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่างของดิน (pH) อินทรียวัตถุในดิน (OM) ไนโตรเจนในดิน (N) ฟอสฟอรัสในดิน (P) โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (K) แคลเซียมที่เป็นประโยชน์ (Ca) สังกะสีที่เป็นประโยชน์ (Zn) แมงกานีสที่เป็นประโยชน์ (Mn) ทองแดงที่เป็นประโยชน์ (Cu) แมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์ (Mg) อนุภาคขนาดทราย (Sand) อนุภาคขนาดทรายแป้ง (Silt) และอนุภาคขนาดดินเหนียว (Clay) ในห้องปฏิบัติการสาขาวิชาปฐพีศาสตร์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้



ภาพที่ 1 พื้นที่ศึกษา; (1) ป่าสงวนแห่งชาติป่าสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ (2) พื้นที่โครงการพัฒนาบ้านโปงฯ และการวางจุดสำรวจแบบเป็นระบบ และ (3) แปลงสำรวจ และแปลงย่อยในการสำรวจผักหวานป่า

3. วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

1) การวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของจำนวนกล้าผักหวานป่าที่ปรากฏใน 15 จุดสำรวจ โดยการทดสอบความแตกต่างจำนวนต้นกล้าของผักหวานป่า ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบไม่ปกติ จึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลแบบไม่ใช้พารามิเตอร์ (non-parametric test) ด้วยวิธีการแบบ Kruskal wallis test ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

2) ทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์โดยหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation) ระหว่างจำนวนต้นกล้าผักหวานป่า และปัจจัยสิ่งแวดล้อมชีวภาพ (Biotic factors) คือ จำนวนต้นไม้ทั้งหมด (Total stem density) พื้นที่หน้าตัดรวมทั้งหมดของต้นไม้ในแปลงสำรวจ (Total basal area of trees) และจำนวนต้นไม้ของแต่ละชนิดพันธุ์ไม้ทั้งหมดและปัจจัยกายภาพ (Abiotic factors) คือ ด้านสภาพภูมิประเทศ และด้านสมบัติของดิน โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

3) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการปรากฏของกล้าผักหวานป่า โดยใช้จำนวนกล้าผักหวานป่ากับปัจจัยแวดล้อม ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติการถดถอยพหุคูณ ด้วยวิธีการแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป (Generalized linear model, GLM) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้านสภาพภูมิประเทศสมบัติดินกับการปรากฏของผักหวานป่า (ความสัมพันธ์เชิงลบหรือเชิงบวก) โดยกำหนดให้ตัวแปรอิสระเป็นปัจจัยสภาพภูมิประเทศ และสมบัติดินในแต่ละแปลง (17 ปัจจัยข้างต้น) ตัวแปรตาม เป็นจำนวนกล้าของผักหวานป่าที่พบในแต่ละจุดสำรวจ โดยมีหลักเกณฑ์การคัดเลือกสมการที่สามารถอธิบายแบบจำลองได้อย่างเหมาะสม พิจารณาเลือกจากสมการที่มีค่า Akaike's information criterion (AIC) น้อยที่สุด (Ripley *et al.*, 2020) วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม R version 3.3.1 ดังสมการต่อไปนี้

สมการ Y = <-glm (total seedling of *Melientha suavis* ~ x1 + x2 + ... x17, family = gaussian (link=identity))

โดยที่ x1 = ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง (Elevation), x2 = ทิศด้านลาด (Aspect), x3 = ความลาดชัน (Slope), x4 = ระยะห่างของแปลงตัวอย่างจากลำน้ำธรรมชาติ (Distance to streams), x5 = ความเป็นกรด-ด่างของดิน (pH), x6 = อินทรียวัตถุในดิน (OM), x7 = ไนโตรเจนในดิน (N), x8 = ฟอสฟอรัสในดิน (P), x9 = โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (K) , x10 = แคลเซียมที่เป็นประโยชน์ (Ca), x11 = สังกะสีที่เป็นประโยชน์ (Zn), x12 = แมงกานีสที่เป็นประโยชน์ (Mn), x13 = ทองแดงที่เป็นประโยชน์ (Cu), x14 = แมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์ (Mg), x15 = อนุภาคขนาดทราย (%Sand), x16 = อนุภาคขนาดทรายแป้ง (%Silt) และ x17 = อนุภาคขนาดดินเหนียว (%Clay)

4) การประเมินถิ่นที่อยู่ที่เหมาะสมต่อการปรากฏของผักหวานป่า โดยดำเนินการด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ (Arithmetic operations) โดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปในข้อ 3 มาวิเคราะห์เพื่อหาถิ่นที่อยู่ที่เหมาะสมของผักหวานป่า ด้วยการประเมินค่าช่วง (Interpolation) ด้วยวิธีการ Kriging ซึ่งเป็นวิธีการประเมินค่าโดยการสันนิษฐานจากระยะทางหรือทิศทางระหว่างจุดตัวอย่างแต่ละจุด ให้ทั้งพื้นที่ศึกษามีค่าต่างๆ จากการประเมินค่าจากจุดแปลงที่มีข้อมูลโดยเป็นการเฉลี่ยค่าข้อมูลนั้นๆ ร่วมกับ ระยะทางระหว่างจุดที่มีข้อมูล ซึ่งมักใช้ในการประเมินค่าช่วงของงานทางปฐพีศาสตร์ และธรณีวิทยา (Jirakajohnkool, 2009) โดยการวิเคราะห์ในโปรแกรมสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Arc. GIS) version 10.5 และใช้หลักการของระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์กำหนดพื้นที่การกระจายของผักหวานป่า ในระดับมาก ปานกลาง และน้อย-ไม่พบ โดยวิธีการซ้อนทับชั้นข้อมูล (Overlaying) ระหว่างข้อมูลปัจจัยพื้นฐานต่างๆ ที่อยู่ในรูปแบบของแบบจำลองเชิงภาพที่มีความสำคัญตามสมการที่ได้จากการวิเคราะห์และผลที่ได้จะเป็นการสร้างชั้นข้อมูลใหม่ด้วยกัน เป็นการกำหนดพื้นที่ซึ่งมีโอกาสที่พบการกระจายของผักหวานป่าโดยกำหนดเป็น 3 ระดับ โดยใช้ความเหมาะสมของปัจจัยแวดล้อมร่วมกับความหนาแน่นของการกระจายของกล้าผักหวานป่า กล่าวคือ ศักยภาพเหมาะสมมาก (High potential suitability) เหมาะสมปานกลาง (Moderate potential suitability) และเหมาะสมน้อย (Low potential suitability) และทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการทดสอบกับพื้นที่จริง ซึ่งใช้จุดสุ่มตัวอย่างที่ได้กันไว้ก่อนสร้างแบบจำลอง (ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างทั้งหมด) เพื่อทดสอบความถูกต้อง และนำมาทดสอบภายหลังจากได้แผนที่ถิ่นที่อยู่ที่เหมาะสมต่อการปรากฏของผักหวานป่า จุดที่ปรากฏศักยภาพเหมาะสมมากจะถูกนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เพื่อเป็นตัวชี้วัดว่าแบบจำลองมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใดด้วยสัมประสิทธิ์แคปปา (Kappa coefficient) (Jenness and Wynne, 2005) โดยการวิเคราะห์ในโปรแกรมสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Arc. GIS) version 10.5 และแสดงออกเป็นแผนที่ทางภูมิศาสตร์

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. นิเวศวิทยาของผักหวานป่า และความแตกต่างของกล้าผักหวานป่า

จากการวางแปลงจำนวน 45 แปลงสำรวจในจุดสำรวจทั้งหมด 15 จุด พื้นที่ป่าเต็งรัง โครงการพัฒนาบ้านโปงฯ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ พบชนิดไม้องค์ประกอบที่เป็นนิเวศวิทยาของพื้นที่ที่พบผักหวานป่าตามธรรมชาติทั้งหมด 51 ชนิด 37 สกุล ใน 27 วงศ์ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดในพื้นที่รวม 47.73 ตารางเมตร โดยมีจำนวนต้นที่สำรวจพบทั้งหมด 1,688 ต้น ชนิดพันธุ์ไม้เด่นเป็นกลุ่มไม้วงศ์ยางผลัดใบ (Deciduous Dipterocarpaceae species) เช่น ยางเหียง

(*Dipterocarpus obtusifolius*) รัง (*Shorea siamensis*) และเต็ง (*Shorea obtusa*) ซึ่งในพื้นที่ศึกษาพบกล้าผักหวานป่าจำนวน 488 ต้น คิดเป็น 361 ต้นต่อเฮกแตร์ โดยจุดสำรวจที่ 14 พบจำนวนต้นกล้าของผักหวานป่ามากที่สุดถึง 60 ต้น และจุดสำรวจที่ 7 มีจำนวนต้นกล้าแปลงผักหวานป่าน้อยที่สุดที่ 2 ต้น (ตารางที่ 1) ซึ่งค่าเฉลี่ยเท่ากับ 32.53±18.57 ต้นต่อจุดสำรวจ

เมื่อนำมาทดสอบความแตกต่างในแต่ละแปลงสำรวจ - วิเคราะห์ข้อมูลแบบ Kruskal Wallis Test พบว่า จำนวนต้นของกล้าผักหวานป่าในแต่ละแปลงตัวอย่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 1) เนื่องจากจำนวนต้นกล้าผักหวานป่าใน 15 จุดสำรวจ แต่ละจุดสำรวจมี 3 แปลงนั้น มีจำนวนผักหวานป่าที่ค่อนข้างแตกต่างกันมาก เช่น จุดสำรวจที่ 1 ในแปลงย่อยที่ 1, 2 และ 3 มีจำนวนกล้าผักหวานป่าเท่ากับ 28, 12 และ 4 ต้นตามลำดับ ทำให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard division, SD) มีค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่สูง (ตารางที่ 1)

ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ป่าเต็งรังในจุดสำรวจทั้งหมดมีการจัดการพื้นที่แตกต่างกัน เช่น การป้องกันไฟป่า พฤติกรรมการเก็บหาของป่าที่รบกวนต้นแม่ (Mature tree) ของผักหวานป่าทำให้ขาดช่วงในการกระจายของเมล็ดตามธรรมชาติ ตลอดจนความแตกต่างของปัจจัยแวดล้อมทางธรรมชาติจึงมีผลต่อการปรากฏกล้าผักหวานป่าในพื้นที่ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Naruangsri *et al*. (2014) ที่พบว่าจำนวนผักหวานป่าไม่มีความแตกต่างกันในพื้นที่ป่าเต็งรังที่มี และไม่มีไฟป่าในพื้นที่ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยฮ่องไคร้และเขื่อนแม่กวงอุดมธารา อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นข้อยืนยันว่าไฟป่าไม่ใช่ปัจจัยเร่งการเจริญเติบโต หรือการกระจายพันธุ์ของผักหวานป่าตามธรรมชาติ แต่อาจเกิดจากปัจจัยแวดล้อมด้านอื่นๆ เป็นต้น

ตารางที่ 1 การทดสอบความแปรปรวนด้วยวิธี Kruskal-Wallis method ของความแตกต่างจำนวนต้นกล้าผักหวานป่า (*Melientha suavis)* ในพื้นที่ศึกษา

จุดสำรวจ	จำนวนกล้าผักหวานป่า
1	14.7±10.0
2	1.7 ± 2.4
3	5.7 ± 4.5
4	12.3 ± 2.1
5	5.3 ± 2.1
6	7.3 ± 4.1
7	0.7 ± 0.9
8	13.7 ± 7.8
9	15.0 ± 8.8
10	4.3 ± 4.8
11	11.7 ± 9.4
12	16.7 ± 6.2

ตารางที่ 1 (ต่อ)

จุดสำรวจ	จำนวนกล้าผักหวานป่า
13	15.3 ± 5.2
14	20.0 ± 4.1
15	18.3 ± 11.0
Kruskal-Wallis chi-squared	**24.506^{ns}**
P-value	>0.05

หมายเหตุ: ns ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

2. การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนกล้าผักหวานป่ากับปัจจัยแวดล้อมบางประการ

ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนกล้าผักหวานป่ากับปัจจัยแวดล้อมบางประการทั้งปัจจัยชีวภาพ และกายภาพพบว่า

1) ปัจจัยชีวภาพ (Biotic factors) พบความสัมพันธ์ของจำนวนกล้าผักหวานป่ามีความสัมพันธ์กับชนิดไม้ (Tree species) จำนวน4 ชนิด จาก 51 ชนิดโดยพิจารณาจากความหนาแน่นของจำนวนต้น (Tree density) สามารถแบ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงบวก (Positive correlation) 3 ชนิดคือ จำนวนต้นของผักหวานป่า (*Melientha suavis*) จำนวนต้นของก่อแพะ (*Quercus kerii*) จำนวนต้นของแข้งกวางดง (*Wendlandia paniculata*) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation) ในเชิงบวกระดับปานกลาง (Positive moderate correlation) ค่าสหสัมพันธ์ (r) = 0.55, 0.55 และ 0.64 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามลำดับ (ตารางที่ 2) และมีความสัมพันธ์เชิงลบ (Negative correlation) ร่วมกับชนิดไม้ 1 ชนิดคือ จำนวนต้นกุ๊กหรืออ้อยช้าง (*Lannea coromandelica*) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation) ในเชิงลบระดับค่อนข้างต่ำ (Negative weak correlation) กับการปรากฏของกล้าผักหวานป่า r = -0.18 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 2) ผลการศึกษาข้างต้นกล่าวได้ว่า การปรากฏของต้นกล้าผักหวานป่าสัมพันธ์กับจำนวนไม้ต้นที่เป็นแม่ไม้ของผักหวานป่ามากที่สุด อาจสืบเนื่องจากกการกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติ ที่สามารถให้ส่วนสืบพันธุ์เจริญเติบโตเป็นกล้าไม้หรือต้นไม้ใหญ่ของผักหวานป่าได้ดีในอนาคต อย่างไรก็ตามยังมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับต้นก่อแพะ และแข้งกวางดง ซึ่งเป็นกลุ่มชนิดไม้รอง (co-dominant species) ในป่าเต็งรังผลัดใบที่มักพบในพื้นที่ค่อนข้างแล้ง และมีฤดูกาลผลัดใบที่ชัดเจนในฤดูผลัดใบ (Marod and Kutintara, 2009) อาจอนุมานยืนยันได้ว่ากลุ่มกล้าของผักหวานป่าสัมพันธ์กับกลุ่มไม้ผลัดใบที่เรือนยอดโปร่ง และมีฤดูกาลผลัดใบที่ชัดเจน อย่างไรก็ตามมีความสัมพันธ์เชิงลบกับต้นกุ๊กหรืออ้อยช้างที่เป็นไม้ผลัดใบแต่มีขอบเขตการกระจายที่กว้างถึงป่าผสมผลัดใบ และมักพบตามพื้นที่ค่อนข้างชื้น (BKF Forest herbarium, 2000) อาจอนุมานได้ว่าพื้นที่ที่ปรากฏต้นกุ๊กนั้นอาจไม่เหมาะสมกับการตั้งตัวหรือปรากฏของกล้าผักหวานป่า อย่างไรก็ตามต้องมีการศึกษาวิจัยปัจจัยด้านอื่นๆ เพื่อยืนยันผลการศึกษาต่อไป

2) ปัจจัยกายภาพ (Abiotic factors) พบว่าจำนวนกล้าของผักหวานป่ามีความสัมพันธ์กับปัจจัยด้านกายภาพ 2 ปัจจัย สามารถแบ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงบวก (Positive correlation) 1 ปัจจัยคือ แมงกานีสที่เป็นประโยชน์ (Mn) มีความสัมพันธ์เชิงบวกระดับ

ปานกลาง (Positive moderate correlation) กับการปรากฏของกล้าผักหวานป่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) = 0.45 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และมีความสัมพันธ์เชิงลบ (Negative correlation) 1 ปัจจัยคือ ความลาดชัน (Slope) กล่าวคือ ความลาดชันมีความสัมพันธ์เชิงลบระดับปานกลาง (Negative moderate correlation) กับการปรากฏของกล้าผักหวานป่า r = -0.56 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการศึกษาสามารถระบุถึงการกระจายพันธุ์ของผักหวานป่าที่มีการสืบพันธุ์โดยเมล็ดเป็นหลัก (Lutteerasuwan *et al*., 2015) โดยมีลักษณะของผลเป็นรูปแบบผลเมล็ดเดียวแข็ง (Drupe) ทรงไข่-รี ขนาดกว้าง 1-1.5 เซนติเมตร และยาว 2-3 เซนติเมตร (Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 2010) อาจเกี่ยวของกับรูปแบบการร่วงหล่นของผลสุกที่อาศัยความลาดชันในการนำพาเมล็ดไปในพื้นที่ความลาดชันน้อยๆ หรืออาจเรียกว่ามีการกระจายตามแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษา อย่างไรก็ตามปัจจัยด้านกายภาพอื่นๆ อาจไม่มีความแตกต่างกันมากในพื้นที่ศึกษาและเป็นพื้นที่ป่าเต็งรังผืนเดียวกันหมดสามารถระบุได้ว่าพื้นที่นิเวศวิทยาของผักหวานป่าในพื้นที่ศึกษามีปัจจัยแวดล้อมด้านสภาพภูมิประเทศที่เหมาะสมต่อการกระจายของผักหวานป่าตามธรรมชาติทั่วพื้นที่ แต่ความหนาแน่นของกล้าผักหวานป่านั้นมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับแม่ไม้มันเอง และมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความลาดชันของพื้นที่ศึกษา ในส่วนของธาตุอาหารคือ แมงกานีสที่เป็นประโยชน์ (Mn) เป็นธาตุอาหารรองที่ช่วยในการสังเคราะห์แสงของพืช สังเคราะห์ ควบคุมการทำงานของเอนไซม์ที่จะช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ยิ่งขึ้น โดยปกติแล้วธาตุอาหารรองในดินจะมีน้อยตามดินธรรมชาติ (Osotsapha, 2015)

จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผักหวานป่ากับปัจจัยชีวภาพ พบว่าผักหวานป่าไม่มีความสัมพันธ์กับกลุ่มชนิดไม้วงศ์ยางผลัดใบที่เป็นเรือนยอดชั้นบน ซึ่งแตกต่างกับการศึกษาของ (Martthong *et al*., 2017; Chokthaweepanich *et al*., 2019) ที่กล่าวว่าจำนวนต้นของผักหวานป่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกกับจำนวนต้น และพื้นที่หน้าตัดของไม้รัง (*Shorea siamensis*) ในส่วนของปัจจัยชีวภาพนั้นโดยเฉพาะสภาพภูมิประเทศมีอิทธิพลต่อการกระจายของต้นผักหวานป่า สอดคล้องกับการศึกษา (Lutteerasuwan *et al*., 2015; Fuangpean and Pampasit, 2018) ที่กล่าวว่าผักหวานป่ามักพบในพื้นที่ความสูงจากระดับน้ำทะเลมากกว่า 200 เมตร และในพื้นที่ค่อนข้างราบมากกว่าพื้นที่ลาดชันสูง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการกระจายโดยเมล็ดของผักหวานป่า รวมไปถึงลักษณะสมบัติดินที่เหมาะสมแก่การระบายน้ำ เป็นต้น

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างจำนวนกล้าผักหวานป่า และปัจจัยแวดล้อมบางประการ โดยหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน

ปัจจัยแวดล้อม	Pearson Correlation (R^2)
	ปัจจัยชีวภาพ
จำนวนต้นแม่ไม้ผักหวานป่า	0.55*
จำนวนต้นก่อแพะ	0.55*
จำนวนต้นแข้งกวางดง	0.64*
จำนวนต้นกุ๊กหรืออ้อยช้าง	-0.18*
	ปัจจัยกายภาพ
ความลาดชัน	-0.56*
แมงกานีสที่เป็นประโยชน์	0.45*

หมายเหตุ: * p-value < 0.05

3. การระบุปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการปรากฏของกล้าผักหวานป่า

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนกล้าผักหวานป่ากับปัจจัยแวดแวดล้อม ด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป (Generalized linear model, GLM) พบว่า อนุภาคขนาดทราย (% sand) ทองแดงที่เป็นประโยชน์ (Cu) และแมงกานีสที่เป็นประโยชน์ (Mn) มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญอย่างยิ่ง (p<0.001) กับการปรากฏหรือการตั้งตัวของกล้าผักหวานป่า ความลาดชัน (slope) ระยะห่างจากแหล่งน้ำธรรมชาติ (distant of natural stream) และความเป็นกรด-ด่างของดิน (soil pH) มีความสัมพันธ์เชิงลบกับการปรากฏหรือการตั้งตัวของกล้าผักหวานป่าอย่างมีนัยสำคัญอย่างยิ่ง (p<0.001) (ตารางที่ 3) การมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความลาดชันคือ พื้นที่พบหรือจะส่งเสริมให้มีการปลูกเสริมไม่ควรมีระดับความลาดชันที่สูงมาก (ที่ราบเป็นหลัก) ซึ่งสัมพันธ์กับการระบายน้ำของพื้นที่ปลูก ทั้งนี้ผลการศึกษาสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ปัจจัยชีวภาพในผลการศึกษาข้อที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการปรากฏของกล้าผักหวานป่าที่มีการกระจายหนาแน่นมากนั้น จะอยู่ในพื้นที่ที่มีความลาดชันไม่มากนัก (ร้อยละ 11.5±0.7) ในส่วนของเนื้อดิน (Soil texture) ร้อยละอนุภาคขนาดทราย (Sand texture) ที่ค่อนข้างสูงซึ่งเป็นอนุภาคหลัก พื้นที่ที่ไม่ไกลจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติ และความเป็นกรดของดินค่อนข้างเป็นกรดปานกลางถึงกรดจัด ซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่ที่มีเนื้อดินทรายส่วนใหญ่มักมีความเป็นกรด ซึ่งเป็นปกติของพื้นที่ป่าเต็งรังในประเทศไทยที่มีอนุภาคขนาดทรายมากเกินร้อยละ 50 (BKF Forest herbarium, 2000; Marod *et al*., 2019) ทั้งนี้ยังปรากฏในพื้นที่ที่ธาตุอาหารรองคือ ทองแดง (Cu) และแมงกานีส (Mn) ที่ในพื้นที่มีระดับค่อนข้างต่ำมีผลทางบวกหรือสัมพันธ์กับ 2 ธาตุอาหารรองนี้ ดังมีรายงานว่าความเข้มข้นของทองแดง (Cu) ในดิน มีความสำคัญต่อพืชทางอ้อมในการสร้างส่วนที่เป็นสีเขียวของพืชช่วยเพิ่มโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ และป้องกันการถูกทำลายส่วนสีเขียวทั้งเป็นส่วนประกอบของน้ำย่อยในพืชซึ่งมีผลต่อการปรุงอาหารยังผลต่อการเจริญเติบโตและการติดดอกออกผล นอกจากนี้ยังมี

หน้าที่ทำหน้าที่ในการช่วยสร้างสารคลอโรฟิลล์ (สีเขียว) เพิ่มความหวานในผักและผลไม้ กลิ่น ความเข้มของสี เป็นกลไกสำคัญในการสังเคราะห์แสงในระยะการผลิตดอกและผล ผลิตเอนไซม์ที่มีหน้าที่ในการหายใจของพืชและเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ในพืช หากพืชขาดทองแดงมากจะทำให้พืชเติบโตช้า มีข้อใบสั้น ใบไม่เขียวและใบเหี่ยวเฉา โดยเฉพาะในระดับกล้า (Seedling) (Osotsapha, 2015) นอกจากนี้มีการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณทองแดง (Cu) ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชทางสรีรวิทยา เช่น อ้อ หรือ Giant reed (*Arundo donax*) สามารถทนต่อทองแดงได้ถึง 300 ppm โดยไม่มีผลเสียต่อการผลิตชีวมวล แม้ว่าจะปลูกในสภาพกึ่งไฮโดรโปนิกส์ก็ตาม (Pietrini *et al*., 2019) ในส่วนของแมงกานีส (Mn) ก็เป็นองค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์ พืชที่ต้องการในปริมาณเพียงเล็กน้อย แต่ก็มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตเช่นเดียวกับสารอาหารอื่นๆ ในสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์ด้วยแสง ความเกี่ยวข้องของแมงกานีสในฐานะที่เป็นธาตุอาหารรองของพืชนั้นยังคงอยู่ในระดับต่ำ แต่แมงกานีส (Mn) เป็นองค์ประกอบที่จำเป็นในสิ่งมีชีวิตแทบทุกชนิดที่สามารถทำหน้าที่สองอย่างที่แตกต่างกัน กล่าวคือทำหน้าที่เป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์หรือเป็นโลหะที่มีฤทธิ์เร่งปฏิกิริยาในกลุ่มทางชีวภาพ (Andresen *et al*., 2018) อย่างไรก็ตามในสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติในทางการเกษตรความพร้อมของแมงกานีส (Mn) อาจเป็นปัจจัยจำกัดสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งจำเป็นต้องมีการดำเนินการของตัวขนส่งแมงกานีสที่มีความสัมพันธ์กันสูงในรากและกลไกที่มีประสิทธิภาพของการกระจายแมงกานีสในพืช เพื่อรับมือกับการขาดแคลนแมงกานีสพืชที่มีความสามารถในการดูดซับแมงกานีสจะทำให้มีการเติบโตและผลผลิตที่สูงขึ้นภายใต้ความพร้อมใช้งานของแมงกานีสที่ต่ำกว่าปกติ โดยหลักการแล้วการให้แมงกานีสที่เพียงพอต่อปฏิกิริยาใช้แสงที่เกิดขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงระบบแสง II (Photosystem II หรือ PSII หรือ P800) จึงเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงให้กับต้นพืชนั้นๆ โดยเฉพาะในระดับกล้า (Seedling) (Alejandro *et al*., 2020) เช่นเดียวกันกับทองแดง (Cu)

1. การประเมินถิ่นอาศัยที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของผักหวานป่า

ศักยภาพความเหมาะสมของพื้นที่ต่อการกระจายตัวของผักหวานป่ามีความแตกต่างกันไปตามพื้นที่แปลงแบบเป็นระบบ และปัจจัยแวดล้อม การศึกษาครั้งนี้ใช้เพียงปัจจัยที่สำคัญที่สุดจากผลการศึกษาข้อ 3 เท่านั้น ที่นำมาใช้ประยุกใช้ในเทคนิคการซ้อนทับ (Overlay technique) ในระบบภูมิสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ เพื่อหาถิ่นที่อยู่ที่เหมาะสมของผักหวานป่า ทั้งนี้การเลือกตัวแปรทั้งหมดเพื่อวิเคราะห์โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation) ของแต่ละตัวแปร ($r \geq 0.80$) (Dormann *et al*., 2013) เพื่อคัดเลือกปัจจัยที่เหมาะสมในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งจาก 17 ปัจจัยข้างต้นถูกคัดเลือกให้คงเหลือ 6 ปัจจัย ได้แก่ 1) ความลาดชัน 2) ความเป็นกรด-ด่างของดิน 3) อนุภาคขนาดทราย 4) ระยะห่างจากแหล่งน้ำ 5) ทองแดงที่เป็นประโยชน์ และ 6) แมงกานีสที่เป็นประโยชน์ โดยสามารถสร้างแผนที่ถิ่นที่อยู่ที่เหมาะสมของผักหวานป่าได้ มีรายละเอียดความเหมาะสม 3 ช่วงคือ

แบบจำลองการประเมินถิ่นอาศัยที่เหมาะสมของผักหวานป่าในพื้นที่โครงการพัฒนาบ้านโป่งฯ 3,686 ไร่ (589.76 เฮกแตร์) ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการซ้อนทับ ด้วยการใช้สมการที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไปที่มีค่า AIC ต่ำที่สุด (ตารางที่ 3) ได้สมการของถิ่นอาศัยที่เหมาะสมต่อการกระจายคือ

y = 66.216 ~ 0.531 (sand texture) + 35.512 (extractable form copper -Cu) + 0.114 (extractable form manganese - Mn) – 0.0093 (Slope) - 0.014 (distant of natural stream) - 0.113 (soil pH)

และเมื่อตรวจสอบความถูกต้องของโมเดล มีค่าเท่ากับ 82 เปอร์เซ็นต์ พื้นที่อาศัยและการกระจายที่เหมาะสมของผักหวานป่าอยู่ในพื้นที่ที่มีปัจจัยแวดล้อมด้านความลาดชัน (Slope) 11.5±0.7 % ระยะห่างจากแหล่งน้ำธรรมชาติ (Distant of natural stream) 9.5±3.5 เมตร อนุภาคขนาดทราย (Sand texture) 70.1±10.2 % ความเป็นกรด-ด่างของดิน (soil pH) 4.7±0.5 แมงกานีสที่เป็นประโยชน์ (Extractable form manganese -Mn) 0.93±0.14 ppm ทองแดงที่เป็นประโยชน์ (Extractable form copper -Cu) 0.30±0.04 ppm (ตารางที่ 3) และเมื่อนำแบบจำลองมาสร้างเป็นแผนที่ถิ่นที่อยู่ที่เหมาะสมจากพื้นที่ 3,686 ไร่ พบพื้นที่ที่มีศักยภาพเหมาะสมระดับปานกลาง มีขนาดพื้นที่มากที่สุด (2,429.75 ไร่) รองลงมาคือ พื้นที่ที่มีศักยภาพเหมาะสมมาก และพื้นที่ที่มีศักยภาพเหมาะสมน้อย คิดเป็นพื้นที่ 725 ไร่ และ 531.25 ไร่ ตามลำดับ (ตารางที่ 4 และ ภาพที่ 2)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนกล้าผักหวานป่า (*M. suavis*) และปัจจัยแวดล้อมบางประการ ด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป (generalized linear model, GLM) (AIC = 101.77)

ปัจจัยแวดล้อม (ค่าเฉลี่ย)	Coefficients	*P*-value
ความลาดชัน (11.5±0.7 %)	-0.0093	<0.01
ความห่างไกลจากแหล่งน้ำ (9.5±3.5 เมตร)	-0.014	<0.001
อนุภาคขนาดทราย (70.1±10.2 %)	0.531	<0.001
ความเป็นกรด-ด่างของดิน (4.7±0.5)	-0.113	<0.001
ทองแดงที่เป็นประโยชน์ (0.30±0.04 ppm)	35.512	<0.001
แมงกานีสที่เป็นประโยชน์ (0.93±0.14 ppm)	0.114	<0.001

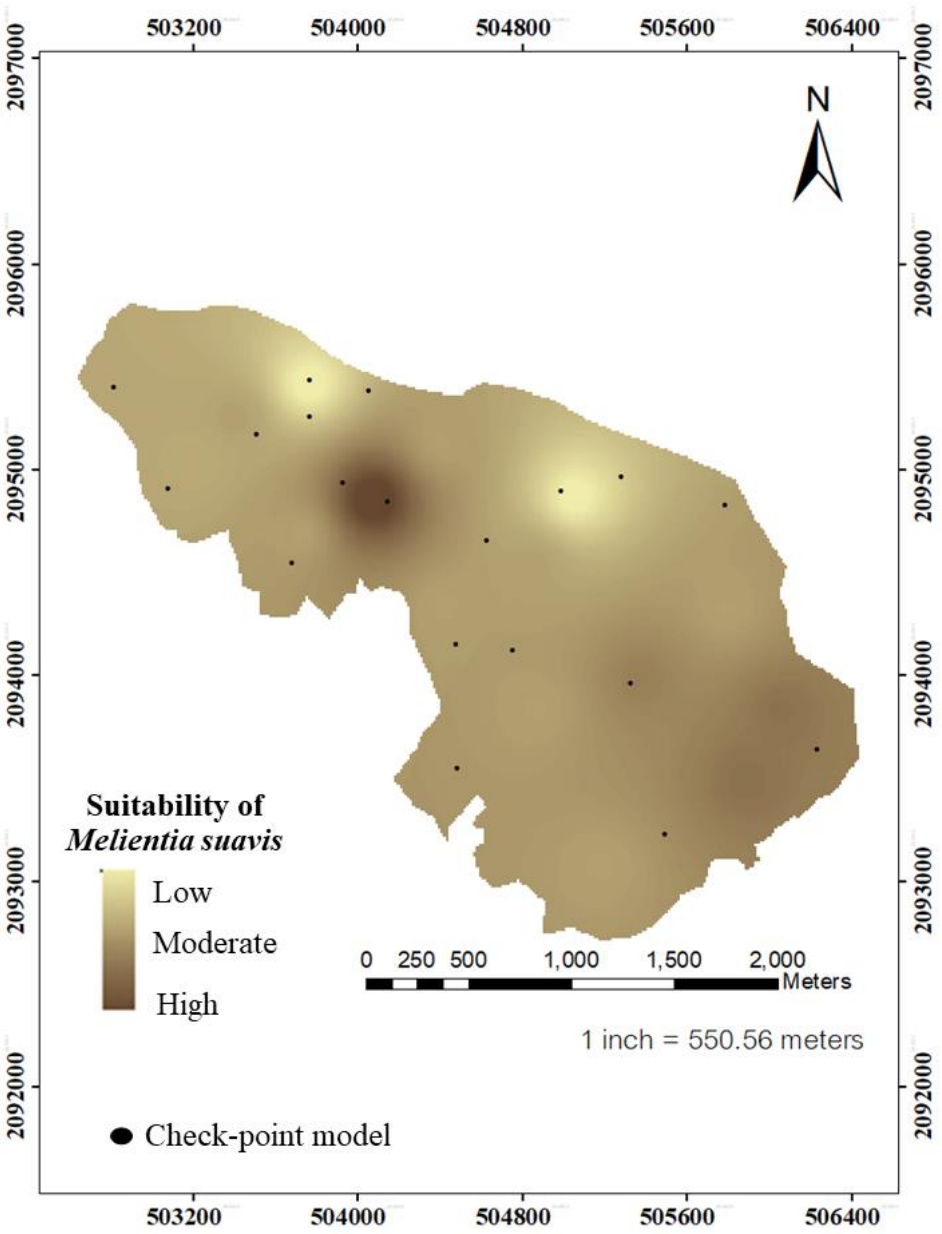
ตารางที่ 4 ระดับการประเมินถิ่นอาศัยที่เหมาะสมของผักหวานป่า ในพื้นที่โครงการพัฒนาบ้านโป่งฯ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่

ระดับแบบจำลองถิ่นอาศัยที่หมาะสม	พื้นที่ (เฮกแตร์)	พื้นที่ (ไร่)	พื้นที่ (ตร. กม.)	ร้อยละการปกคลุม
มาก	116	725	1.16	19.67
ปานกลาง	388.76	2,429.75	3.89	65.92
น้อย	85	531.25	0.85	14.41
รวม	589.76	3,680	5.89	100

ทั้งนี้ในปัจจุบันมีการเริ่มพัฒนาการปลูกผักหวานป่าในพื้นที่เกษตรกรรมโดยพบว่ามีการสนับสนุนคัดเลือกพื้นที่ปลูกในพื้นที่ที่มีฤดูแล้งและฤดูฝนชัดเจน และลักษณะเป็นที่ดอน ความลาดชันต่ำ (Sungpalee, 2015) ในส่วนสมบัติดิน (Soil properties) เนื่องจากพื้นที่ศึกษาไม่ค่อยมีความแตกต่างกันชัดเจนในด้านปัจจัยแวดล้อมต่างๆ ทั้งเนื้อดิน (Soil texture) และธาตุอาหาร (Soil nutrients) ในดินมากนัก แต่มีแนวโน้มความสัมพันธ์ทางบวกกับแมงกานีสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ดังการศึกษาในกล้าไม้เศรษฐกิจต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งยางพารา พบว่าแมงกานีสที่เป็นประโยชน์มีแนวโน้มความสัมพันธ์ต่อการเจริญเติบโตของกล้าไม้มาก เพราะเป็นสารอาหารรองที่เป็นตัวกระตุ้นการทำงานของฮอร์โมนทำให้กล้าไม้แข็งแรงและเติบโตได้ดี (Bueraheng *et al*., 2018; Meunpakdee *et al*., 2020) ซึ่งสามารถอนุมานกับการศึกษาความสัมพันธ์ของกล้าปรากฏของกล้าผักหวานป่าในการวิจัยนี้ได้ด้วย

สรุป

ผลการศึกษาปัจจัยที่ระบุการปรากฏของผักหวานป่าและประเมินถิ่นอาศัยที่เหมาะสมของผักหวานป่าในบริเวณพื้นที่โครงการพัฒนาบ้านโปงอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งมีลักษณะเป็นพื้นที่ป่าเต็งรังที่ระดับความสูงระหว่าง 382.14 ถึง 443 เมตร พบว่า 1) จำนวนต้นกล้าของผักหวานป่าในแต่ละแปลงตัวอย่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% 2) ความสัมพันธ์ของจำนวนกล้าผักหวานป่ามีแนวโน้มความสัมพันธ์กับชนิดไม้ 4 ชนิด โดยแบ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงบวก (Positive correlation) 3 ชนิด และมีความสัมพันธ์เชิงลบ (Negative correlation) 1 ชนิด 3) ปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการปรากฏของผักหวานป่า ได้แก่ อนุภาคขนาดทราย (% sand) ทองแดงที่เป็นประโยชน์ (Cu) และแมงกานีสที่เป็นประโยชน์ (Mn) มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญอย่างยิ่ง ส่วนความลาดชัน (Slope) ระยะห่างจากแหล่งน้ำธรรมชาติ (Distant of natural stream) ความเป็นกรด-ด่างของดิน (Soil pH) มีความสัมพันธ์เชิงลบกับการปรากฏหรือการตั้งตัวของกล้าผักหวานป่าอย่างมีนัยสำคัญอย่างยิ่ง และ 4) การประเมินถิ่นอาศัยที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของผักหวานป่า พบว่าพื้นที่ที่มีศักยภาพปานกลาง มีขนาดพื้นที่มากที่สุด (2,429.75 ไร่) รองลงมาคือพื้นที่ที่มีศักยภาพมาก และพื้นที่ที่มีศักยภาพน้อย คิดเป็นพื้นที่ 725 ไร่ และ 531.25 ไร่ ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษาข้างต้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้าช่วยในการพิจารณาการอนุรักษ์ ใช้ประโยชน์ การฟื้นฟูระบบนิเวศป่าไม้ที่มีผักหวานป่า และเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการจัดการสวนผักหวานป่าของประชาชนในท้องถิ่นให้ประสบความสำเร็จได้ดีขึ้น



ภาพที่ 2 แผนที่แบบจำลองการประเมินถิ่นอาศัยที่เหมาะสมของผักหวานป่า บริเวณพื้นที่โครงการพัฒนาบ้านโปงฯ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้โครงการการประเมินถิ่นอาศัยที่เหมาะสมของผักหวานป่า บริเวณพื้นที่โครงการพัฒนาบ้านโปง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ มจ.2-63-004 และกรมความร่วมมือระหว่างประเทศ กระทรวงการต่างประเทศ

เอกสารอ้างอิง

Alejandro, S., Höller, S., Meier, B. and Peiter, E. 2020. Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation. **Frontiers in Plant Science** 11: 1-23.

Andresen, E., Peiter, E. and Küpper, H. 2018. Trace metal metabolism in plants. **Journal of Experimental Botany** 69(5): 909-954.

BKF Forest herbarium. 2000. **Phachi deciduous dipterocarp forest.** The Agricultural Cooperative Federation of Thailand Publ., Bangkok. (in Thai)

Bueraheng, H., Onthong, J. and Khawmee, K. 2018. Effect of magnesium on manganese uptake and growth of rubber trees. **Journal of Agricultural Research and Extension** 35(1): 12-22. (in Thai)

Chokthaweepanich, H., Tawaitakam. K. and Kaewkumsai, N. 2019. Diversity of indigenous vegetables in Puparn Royal Development Study Centre, Sakon Nakhon Province, Thailand, pp. 77-85. *In* **Proceedings of International Conference on Biodiversity: IBD2019.** Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Bangkok.

Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchman, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J.R.G., Gruber, B., Lafourcade B. and Leitão, P.D. 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. **Ecography** 36: 27-46.

Fuangpean, T. and Pampasit, S. 2018. Plant community characteristics of dry dipterocarp forest for *Melientha suavis* Pierre, pp. 342-353. *In* **University in Disruptive Era 4th.** Naresuan University, Phitsanulok. (in Thai)

Japan International Research Center for Agricultural Sciences. 2010. ***Melientha sauvis* Pierre (Opiliaceae). Local vegetables of Thailand.** Available https://www.jircas.affrc.go.jp/project/value_addition/Vegetables/070.html?fbclid=IwAR3AJGLV0w-9VjcvCdic6Lfo4ME4rW2N14mhQEzlJ2up8rRn8C53d63SpOE, May 22, 2021.

Jenness, J. and Wynne J.J. 2005. **Cohen's Kappa and classification table metrics 2.0: an ArcView 3x extension for accuracy assessment of spatially explicit models.** U.S. Geological Survey Open-File Report OF 2005-1363. U.S. Geological Survey, Southwest Biological Science Center, USA.

Jirakajohnkool, S. 2009. **Arc. GIS 10.1 for Desktop.** 1st ed. S R Printing, Thammasat University, Bangkok. (in Thai)

Lutteerasuwan, T., Sukkhee, S., Jamaree, T., Radta, T., Prawutnan, P., Mungkeeta, W. and Yotapukdee, T. 2015. Soil property and forest structure of *Malientha suavis* pierre at Maejo University Phrae Campus, pp. 153-159. *In* **Proceedings of Thailand forest ecological research network (T-FERN): Ecological knowledge for sustainable management 4th.** Naresuan University, Phitsanulok. (in Thai)

Marod, D. and Kutintara, U. 2009. **Forest ecology.** 1st ed. Aksorn Siam Publ., Bangkok. (in Thai)

Marod, D., Hermhuk, S., Sungkaew, S., Thinkampheang, S., Kamyo T. and Nuipakdee, W. 2019. Species composition and spatial distribution of dominant trees in the forest ecotone of a mountain ecosystem, Northern Thailand. **Environment and Natural Resources Journal** 17(3): 40-49.

Martthong, W., Sungpalee, W., Insalud, N., Atnaseo, C., Hemhuk, S. and Sri-ngernyuang, K. 2017. Plant community structure of *Meliantha suavis* bearing deciduous dipterocarp forest at the Banpong royal-initiated development project, Maejo University, Chiang Mai Province. **Thai Forest Ecological Research Journal** 1(1): 82-91. (in Thai)

Meunpakdee, S., Onthong, J. and Khawmee, K. 2020. Effects of manganese on growth and nutrient uptake in rubber sapling. **Songklanakarin Journal of Plant Science** 7(2): 164-175. (in Thai)

Naruangsri, K., Jampeethong1, K., Meewasana, J. and Chairuangsri, S. 2014. Effects of forest fire on population of *Meliantha suavis* Pierre in Huai Hong Khrai Royal Development Study Center and Mae Kuang Udomthara Dam, Amphoe Doi Saket, Chiang Mai Province. **Thai Journal of Botany** 6(Special Issue): 59-65. (in Thai)

Osotsapha, Y. 2015. **Plant Nutrients.** 4th ed. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)

Pietrini, F., Carnevale, M., Beni, C, Zacchini, M., Gallucci, F. and Santangelo, E. 2019. Effect of different copper levels on growth and morpho-physiological parameters in giant reed (*Arundo donax* L.) in semi-hydroponic mesocosm experiment. **Water2019** 11(9): 1-19.

Pileuk, K., Paisooksantivatana, Y., Babpraserth, C., Jamjumnanja, J., Poonsangwan, P., Chobkua, R. and Karintayakit, P. 1997. **Conservation and domestication of native vegetables.** Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)

Prathepha, P. 2000. Detection of RAPD variation in a forest tree species, *Meliantha suavis* Pierre (Opiliaceae) from Thailand. **Science Asia** 26: 213-218.

Ripley, B., Venables, B., Bates, D.M., Hornik, K., Gebhardt, K. and Firth, D. 2020. **MASS: Support functions and datasets for Venables and Ripley's MASS, R package.** Available https://CRAN.R-project.org/package=MASS, April 13, 2021.

Royal Forest Department. 2019. **National Forest Policy.** 1st ed. Royal Forest Department, Bangkok. (in Thai)

Semsanthat, N. and Ponoi, B. 2009. ***Meliantha suavis* Pierre.** 1st ed. Royal Forest Department, Bangkok. (in Thai)

Sungpalee, W. 2015. **Community forest management AG 462.** Published documents, Faculty of Agricultural Production, Maejo University. (in Thai)

Yotapukdee, T., Kongsubun, N., Lutteerasuwan, T. and Mungkita, W. 2015. Use value of *Maliantha suavis* pierre for conservation forest area of Maejo University Phrea campus, pp. 138-146. *In* **Proceedings of Thailand forest ecological research network (T-FERN): Ecological knowledge for sustainable management 4th.** Naresuan University, Phitsanulok. (in Thai)

ผลของระยะเวลาเก็บรวบรวมต่อคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ยางพาราพันธุ์ดั้งเดิมจากต้นแม่ทาบกิ่ง

Effect of Seed Collection Period on Seed Quality of Grafted-Indigenous Rubber

วิชัย หวังวโรดม* ปัทมาวดี คุณวัลลี สุภาณี ชนะวีรวรรณ นราเดช สุขแก้ว และ นาฏอนงค์ เมืองนาโพธิ์

Vichai Wongvarodom*, Pattamavadee Kunwandee, Suphanee Chanawerawan, Naradat Sukkaew and Natanong Muangnapho

Received: 14 January 2021, Revised: 2 March 2022, Accepted: 14 March 2022

บทคัดย่อ

การผลิตเมล็ดพันธุ์ยางพาราพันธุ์ดั้งเดิมจากต้นแม่ทาบกิ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาการขาดแคลนเมล็ดพันธุ์ดั้งเดิมสำหรับใช้เป็นต้นตอ การศึกษาผลของระยะเวลาเก็บรวมรวบต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์ยางพาราจากต้นแม่พันธุ์ดั้งเดิมที่ได้จากการทาบกิ่ง เก็บรวบรวมเมล็ดพันธุ์ 1) ระยะผลสีเขียวอมเหลือง และระยะผลสีน้ำตาล และ 2) ระยะเมล็ดร่วงจากต้นแม่ ในช่วง 1-7 วัน นำเมล็ดพันธุ์มาทดสอบความงอก และความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ พบว่า เมล็ดพันธุ์ที่เก็บเกี่ยวจากต้นแม่ในระยะผลสีน้ำตาลและผลสีเขียวอมเหลือง มีความชื้น 33.60 เปอร์เซ็นต์ และความงอก 76.00 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเมล็ดพันธุ์ที่ร่วงจากต้นแม่ มีคุณภาพลดต่ำลง โดยมีความชื้น 26.25 เปอร์เซ็นต์ ความงอก 60.00 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งแรงลดลงในทุกพารามิเตอร์ที่ศึกษา แสดงว่า คุณภาพเมล็ดพันธุ์ยางพาราตอบสนองไวต่อช่วงเวลาการเก็บรวบรวม การเก็บเมล็ดพันธุ์จากผลสีเขียวอมเหลืองและผลสีน้ำตาลได้เมล็ดพันธุ์ที่มีความงอกและความแข็งแรงสูงกว่าการเก็บเมล็ดที่ร่วง ข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการผลิตต้นกล้าเพื่อใช้เป็นต้นตอต่อไป

คำสำคัญ: ยางพาราพันธุ์ดั้งเดิม, การทาบกิ่ง, คุณภาพเมล็ดพันธุ์, การผลิตเมล็ดพันธุ์, ต้นตอ

สาขาวิชานวัตกรรมการเกษตรและการจัดการ (วิชาเอกพืชศาสตร์) คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Agricultural Innovation and Management Division (Plant Science), Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Kho Hong, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): vichai.w@psu.ac.th

ABSTRACT

Seed production of grafted-indigenous rubber (*Hevea brasiliensis* Mull-Arg.) is a way to solve seed shortage for rootstock production. The effect of collection period on seed quality of grafted- indigenous rubber was studied. Fruits at yellowish-green and brown stages and seeds at naturally shedding stage during 1-7 days after shedding were collected and tested for seed germination and vigor. The results showed that rubber seeds collected from yellowish-green fruit and brown fruit stage had moisture content and germination of 33.60 and 76.00%, respectively. At the shedding stage, the seeds had lower seed quality with moisture content of 26.25% and germination of 60.00%. In addition, all parameters of seed vigor studied showed a significant decrease. These results indicated that the rubber seeds exhibited high sensitivity to the seed collection period. The fruit collection at the yellowish-green fruit and brown fruit stage gave better seed quality than the shedding stage collection. Therefore, such information would be helpful for further successful rootstock production.

Key words: indigenous rubber, grafting, seed quality, seed production, rootstock

บทนำ

ยางพารา (*Hevea brasiliensis* Mull-Arg.) เป็นพืชอุตสาหกรรมสำคัญที่ให้น้ำยางสำหรับเป็นวัตถุดิบในการทำผลิตภัณฑ์ยางหลากหลายชนิด เช่น ยางรถยนต์ และถุงมือ เป็นต้น การปลูกยางพาราใช้วัสดุปลูกสำคัญ 2 ชนิด ได้แก่ การปลูกด้วยยางชำถุง และ การติดตาในแปลง (RAOT, 2020) ทั้งสองวิธีการนี้ต้องอาศัยเมล็ดพันธุ์จำนวนมากเพื่อให้งอกและเจริญเป็นต้นตอสำหรับการติดตา เมล็ดพันธุ์จึงมีความสำคัญต่อการเพาะปลูกยางพาราเป็นอย่างมาก ปัจจุบัน ต้นตอยางได้จากการปลูกด้วยเมล็ดพันธุ์ยางพาราที่เก็บรวบรวมในสวนของเกษตรกร มักจะเป็นพันธุ์ RRIM 600 ทำให้ต้นตอและกิ่งพันธุ์มีฐานพันธุกรรมแคบ (Nakkanong, 2007) Rubber Research Institute (2014) รายงานว่า ยางพันธุ์แนะนำที่นิยมปลูกในปัจจุบันค่อนข้างอ่อนแอต่อโรครากโดยเฉพาะพันธุ์ RRIM 600 ที่เป็นโรครากขาว โรครากแดง และโรครากน้ำตาล 55, 63.8 และ 51.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้น หากอนาคตมีการระบาดของโรครุนแรง ต้นตอจะถูกทำลาย อาจสร้างความเสียหายต่อยางพาราของประเทศไทยเป็นอย่างมาก แนวทางแก้ไขประการหนึ่งคือ การใช้ต้นตอพันธุ์ดั้งเดิมที่มีความแข็งแรง ระบบรากเจริญเติบโตดี และทนทานต่อโรคและสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ (Prabpree *et al*., 2018) อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันเมล็ดพันธุ์ยางพันธุ์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้เป็นต้นตอหายากและขาดแคลนเป็นอย่างมาก (Wongvarodom and Lerslerwong, 2013) ในอนาคตหากมีการระบาดของโรครากรุนแรงขึ้น ดังนั้น การมีแหล่งของเมล็ดพันธุ์ยางพาราพันธุ์ดั้งเดิมภายใต้การควบคุมสำหรับผลิตเมล็ดพันธุ์ด้วยต้นทาบกิ่ง มีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะเวลาในการเจริญเติบโตและสามารถออกดอกได้เร็ว (Wongvarodom and Lerslerwong, 2013) การประเมินคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ที่ผลิตได้จากต้นแม่ที่ได้จากการทาบกิ่ง จึงเป็นอีกองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการผลิตเมล็ดพันธุ์ยางพาราเพื่อการผลิตต้นตอที่มีคุณภาพในอนาคต Duang-iat *et al*. (2013) รายงานว่าการเก็บเกี่ยวเมล็ด

พันธุ์ยางพาราในระยะผลมีสีน้ำตาล (ระยะสุกแก่ทางสรีรวิทยา) ช่วยให้ได้เมล็ดพันธุ์มีคุณภาพสูงสุด ทั้งนี้ผลยางพารามีลักษณะการทยอยสุกแก่ การรวบรวมเฉพาะผลสีน้ำตาลอาจเป็นข้อจำกัดด้านปริมาณเมล็ดพันธุ์ที่ได้ เพื่อให้การขยายพันธุ์มีประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งการใช้เมล็ดพันธุ์คุณภาพ และขยายพันธุ์ได้ในปริมาณมากในแต่ละครั้ง ง่ายต่อการบริหารจัดการแรงงาน ต้นทุน รวมถึงความสม่ำเสมอของต้นกล้าในการติดตา จึงทำการศึกษานี้ขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรวบรวมต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์ยางพาราพันธุ์ดั้งเดิมที่ได้จากต้นแม่ทาบกิ่ง เพื่อเป็นแนวการปฏิบัติที่เหมาะสมในการเก็บรวมรวมเมล็ดพันธุ์เพื่อการขยายพันธุ์ยางพาราพันธุ์ดั้งเดิมที่มีประสิทธิภาพต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ที่ผลิตจากต้นแม่พันธุ์ดั้งเดิมที่ได้จากการทาบกิ่ง

เก็บรวบรวมผลและเมล็ดพันธุ์ยางพาราพันธุ์ดั้งเดิมที่ปลูกจากกิ่งทาบอายุประมาณ 8 ปี ในแปลงทดลองสาขาวิชานวัตกรรมการเกษตรและการจัดการ (วิชาเอกพืชศาสตร์) คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในช่วงเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม พ.ศ. 2562 โดยเก็บรวบรวมเมล็ดพันธุ์ที่อายุเก็บเกี่ยว 2 ระยะ ได้แก่ 1) ระยะผลสีเขียวอมเหลือง และระยะผลสีน้ำตาล และ 2) ระยะเมล็ดร่วงจากต้นแม่ในช่วง 1-7 วัน จากนั้น แยกเมล็ดพันธุ์ออกจากผล และทดสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์ดังนี้

1) ขนาดเมล็ดพันธุ์ วัดความกว้าง ความยาว และความหนาของเมล็ดพันธุ์ด้วยเครื่องวัดละเอียด จำนวน 10 เมล็ดต่อซ้ำ ทำ 4 ซ้ำ รวม 40 เมล็ด

2) น้ำหนักและความชื้นของเมล็ด สุ่มเมล็ดจำนวน 10 เมล็ดต่อซ้ำ ทำ 4 ซ้ำ รวม 40 เมล็ด มาทุบให้เปลือกเมล็ดแตก ชั่งน้ำหนักสดแล้วนำไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง (ISTA, 2008) ชั่งน้ำหนักแห้ง และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยน้ำหนักสด (wet weight basis) จากสูตร

$$\text{ความชื้นเมล็ดพันธุ์ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักสด} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักสด}} \times 100$$

3) ความงอก สุ่มเมล็ดพันธุ์จำนวน 50 เมล็ดต่อซ้ำ ทำ 4 ซ้ำ รวม 200 เมล็ด เพาะในตะกร้าพลาสติกขนาด 44×35×13.5 เซนติเมตร ที่บรรจุทราย รองด้วยกระดาษหนังสือพิมพ์ โดยวางเมล็ดพันธุ์บนทราย แล้วกดลงเบาๆ กลบทราย ให้น้ำสม่ำเสมอ ประเมินความงอก โดยตรวจนับต้นกล้าที่งอกโผล่พ้นทรายที่มีลักษณะสมบูรณ์แข็งแรง ในวันที่ 30 วันหลังเพาะ (Chin and Roberts, 1980)

4) ความแข็งแรง ประเมินในรูปของความสูงและน้ำหนักแห้งของต้นกล้าอายุ 30 วันหลังเพาะ สุ่มต้นกล้าจำนวน 10 ต้นต่อซ้ำ ทำ 4 ซ้ำ รวม 40 ต้น วัดความสูงต้นกล้าจากโคนต้นถึงจุดเจริญปลายยอด จากนั้นตัดแยกส่วนยอดและรากต้นกล้า และเอาเมล็ดออก นำเฉพาะส่วนยอดและรากไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักแห้ง

วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี T-test

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การศึกษาคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ที่ผลิตจากต้นแม่พันธุ์ดั้งเดิมที่ได้จากการทาบกิ่ง

ผลการทดลอง พบว่า เมล็ดพันธุ์ยางพาราที่ได้จากต้นแม่ทาบกิ่งในระยะเก็บเกี่ยวจากผลบนต้นแม่ที่มีสีเขียวอมเหลืองและผลสีน้ำตาล มีความหนา ความยาว และความกว้าง 16.96 25.20 และ 19.96 มิลลิเมตร ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับความหนา ความยาว และความกว้างของเมล็ดร่วงใต้ต้น 17.21 25.10 และ 20.15 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 1) น้ำหนักสดของเมล็ดพันธุ์แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง โดยเมล็ดพันธุ์ที่ได้จากผลสีเขียวอมเหลือง และผลสีน้ำตาล และจากระยะเมล็ดพันธุ์ร่วงมีน้ำหนักสดเมล็ด 4.55 และ 3.88 กรัมต่อเมล็ด ตามลำดับ แต่มีน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างกันทางสถิติ อยู่ในช่วง 2.85-3.02 กรัมต่อเมล็ด ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ผลของระยะเวลาเก็บรวบรวมต่อขนาดของเมล็ดพันธุ์ยางพาราพันธุ์ดั้งเดิมทาบกิ่ง

ช่วงเวลาการเก็บเมล็ด	ความหนาเมล็ด (มม.)	ความยาวเมล็ด (มม.)	ความกว้างเมล็ด (มม.)
ระยะผลสีเขียวอมเหลือง + ผลสีน้ำตาล	16.96	25.20	19.96
ระยะเมล็ดพันธุ์ร่วงจากต้น	17.21	25.10	20.15
T-test	ns	ns	ns

ns = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 2 ผลของระยะเวลาเก็บรวบรวมต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของเมล็ดพันธุ์ยางพาราพันธุ์ดั้งเดิมทาบกิ่ง

ช่วงเวลาการเก็บเมล็ด	น้ำหนักสดเมล็ด (กรัม/ต้น)	น้ำหนักแห้งเมล็ด (กรัม/ต้น)
ระยะผลสีเขียวอมเหลือง + ผลสีน้ำตาล	4.55	3.02
ระยะเมล็ดพันธุ์ร่วงจากต้น	3.88	2.85
T-test	**	ns

ns, * = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ และ แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ตามลำดับ

เมล็ดพันธุ์ยางพาราที่ได้จากต้นแม่ทาบกิ่งในระยะเก็บเกี่ยวจากผลสีเขียวอมเหลือง และผลสีน้ำตาล มีความชื้น 33.60 เปอร์เซ็นต์ แตกต่างทางสถิติกับเมล็ดพันธุ์ร่วงใต้ต้นมีความชื้นลดลงเหลือ 26.25 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 3) โดยเมล็ดพันธุ์ยางพาราเป็นเมล็ดพันธุ์สด (Chin and Roberts, 1980) มีความชื้นเมล็ดสูงในช่วงสุกแก่ หรือขณะร่วงหล่นจากต้นแม่ (Wongvarodom and Krisornpornsan, 2013) สอดคล้องกับ Duang-iat *et al*. (2013) ที่พบว่าในระยะสุกแก่ (ผลสีน้ำตาล) เมล็ดพันธุ์ยางพาราพันธุ์ RRIM 600 มีความชื้น 34.54 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาในด้านความงอก พบว่าเมล็ดพันธุ์ที่เก็บจากต้นในระยะผลสีเขียวอมเหลือง และผลสีน้ำตาล มีความงอก 76.00 เปอร์เซ็นต์ แตกต่างทางสถิติกับความงอกของเมล็ดพันธุ์ที่ร่วงจากต้น (60.00 เปอร์เซ็นต์) แสดงว่า เมล็ดพันธุ์ยางพารามีความงอกลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อร่วงหล่นจากต้นแม่ (Wongvarodom and Krisornpornsan, 2013; Duang-iat *et al*., 2013) วิธีการเก็บรวบรวมผลทั้งผลสีเขียวอมเหลืองและผลสีน้ำตาลร่วมกันของยางพาราพันธุ์ดั้งเดิมจากต้นแม่ทาบกิ่ง เมล็ดพันธุ์มี

ความงอกต่ำกว่าเมล็ดพันธุ์ยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่เก็บในระยะผลมีสีน้ำตาลซึ่งมีความงอกสูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์ (Duang-iat *et al*., 2013)

ในด้านความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ พบว่า เมล็ดพันธุ์ที่ได้จากผลสีเขียวอมเหลืองและผลสีน้ำตาลมีความสูงต้น น้ำหนักแห้งส่วนยอด น้ำหนักแห้งส่วนราก และน้ำหนักแห้งรวม 27.16 เซนติเมตร 0.88 0.19 และ 1.07 กรัมต่อต้น ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างทางสถิติกับความสูงต้น น้ำหนักแห้งส่วนยอด น้ำหนักแห้งส่วนราก และน้ำหนักแห้งรวมของเมล็ดพันธุ์ที่ร่วงจากต้น (23.22 เซนติเมตร 0.55 0.13 และ 0.69 กรัมต่อต้น ตามลำดับ) (ตารางที่ 3 และ 4) แสดงว่า เมล็ดพันธุ์จากต้นทาบกิ่งที่เก็บรวบรวมในระยะผลสีเขียวอมเหลืองและผลสีน้ำตาลให้ต้นกล้าที่มีสมรรถนะในการเจริญเติบโตได้ดีกว่าต้นที่เกิดจากเมล็ดพันธุ์ร่วงใต้โคนต้น

จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า เมล็ดพันธุ์ที่เก็บรวมรวมในระยะผลร่วง มีความงอกและความแข็งแรงลดลงเนื่องจากการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วจากการแห้งของเนื้อเยื่อที่สูญเสียความชื้นของเมล็ดระหว่างตกอยู่ในสภาพสวนยางที่มีแสงแดดส่องและแห้ง ดังนั้น เมล็ดพันธุ์ยางพาราที่อยู่ในสภาพแห้ง (dehydrate) เซลล์จะเสื่อมสภาพเนื่องจากผนังเซลล์และเซลล์เมมเบรนได้รับความเสียหายและมีการเสื่อมสภาพของออร์แกแนลภายในเซลล์ (Chin *et al*., 1981) ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ลดลง รวมถึงมีเมแทบอลิซึม และมีการย่อยสลายอาหารสะสมน้อยลง ส่งผลต่อการเจริญและพัฒนาของต้นกล้า

ตารางที่ 3 ผลของระยะเวลาเก็บรวบรวมต่อความชื้นเมล็ด ความงอก และความสูงต้นกล้าของเมล็ดพันธุ์ยางพาราพันธุ์ดั้งเดิมทาบกิ่ง

ช่วงเวลาการเก็บเมล็ด	ความชื้นเมล็ด (%)	ความงอก (%)	ความสูงของต้นกล้า (ซม.)
ระยะผลสีเขียวอมเหลือง + ผลสีน้ำตาล	33.60	76.00	27.16
ระยะเมล็ดพันธุ์ร่วงจากต้น	26.25	60.00	23.22
T-test	**	*	**

*, ** = แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ และ แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ผลของระยะเวลาเก็บรวบรวมต่อน้ำหนักแห้งยอด น้ำหนักแห้งราก และน้ำหนักแห้งรวมของต้นกล้าของเมล็ดพันธุ์ยางพาราพันธุ์ดั้งเดิมทาบกิ่ง

ช่วงเวลาการเก็บเมล็ด	น้ำหนักแห้งยอด (กรัม/ต้น)	น้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น)	น้ำหนักแห้งต้นกล้า (กรัม/ต้น)
ระยะผลสีเขียวอมเหลือง + ผลสีน้ำตาล	0.88	0.19	1.07
ระยะเมล็ดพันธุ์ร่วงจากต้น	0.55	0.13	0.69
T-test	**	**	**

** = แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง

จากคุณภาพเมล็ดพันธุ์ที่ได้สะท้อนให้เห็นว่า การผลิตเมล็ดพันธุ์ยางพาราพันธุ์ดั้งเดิมจากต้นแม่ที่ได้จากการทาบกิ่ง สามารถเก็บในระยะผลสีเหลืองอมเขียว และผลสีน้ำตาลได้โดยให้ความงอกและความแข็งแรงสูงกว่าการเก็บรวบรวมเมล็ดพันธุ์ที่ร่วงจากต้นแม่นาน 1-7 วัน ดังนั้น จึงไม่แนะนำการปล่อยให้เมล็ดพันธุ์ตกพื้นแล้วเก็บรวบรวม เนื่องจากมีความเสี่ยงสูงต่อการลดลงของคุณภาพจากกการสูญเสียความชื้นที่เป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมที่มีแสงแดดและอุณหภูมิที่สูง รวมถึงสภาวะอื่น เช่น มีฝนตกสลับกับแดด ยิ่งเป็นการเร่งการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ อย่างไรก็ตาม Duang-iat *et al*. (2013) รายงานว่าการเก็บเกี่ยวในระยะผลมีสีน้ำตาลแห้ง ซึ่งเป็นระยะสุกแก่ทางสรีรวิทยาของเมล็ดพันธุ์ยางพารา ช่วยให้ได้เมล็ดพันธุ์ที่มีคุณภาพสูงที่สุด แต่อาจมีข้อจำกัดด้านปริมาณเมล็ดที่ได้ในแต่ละครั้ง การขยายพันธุ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้นจากการใช้เมล็ดพันธุ์ที่มีคุณภาพ ปฏิบัติงานรวดเร็ว และสามารถขยายพันธุ์ได้ในปริมาณมากในแต่ละครั้ง เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการจัดการและการบริหารต้นทุน จะเห็นว่า ระยะเวลาเก็บรวบรวมเมล็ดพันธุ์ส่งผลต่อความสำเร็จในการขยายพันธุ์หรือการผลิตต้นกล้าเพื่อใช้เป็นต้นตอสำหรับการติดตาด้วยยางพันธุ์ดี ข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่ามีความจำเป็นต้องปรับวิธีการเก็บรวบรวมในระยะที่เหมาะสมและการเพาะกล้าที่ต้องทำทันทีหลังรวบรวมผล เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการขยายพันธุ์ ได้เมล็ดพันธุ์ที่มีสมรรถนะในการงอกและได้ต้นกล้าที่มีการเจริญเติบโตดี เนื่องจากคุณภาพเมล็ดพันธุ์ส่งผลต่อคุณภาพของต้นกล้าในแปลงปลูก (Wongvarodom *et al*., 2014)

สรุป

จากการศึกษาผลของระยะเวลาเก็บรวบรวมผลต่อคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ยางพารา สรุปได้ว่า การผลิตเมล็ดพันธุ์ยางพาราพันธุ์ดั้งเดิมจากต้นแม่ทาบกิ่ง ควรเก็บเกี่ยวในระยะผลผลสีเขียวอมเหลืองและผลสีน้ำตาล โดยยังคงมีความงอกและความแข็งแรงด้านความสูงต้น และน้ำหนักแห้งต้นสูงกว่าการเก็บเมล็ดพันธุ์ที่ร่วงจากต้นแม่ประมาณ 1-7 วัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน แผนบูรณาการวิจัยและนวัตกรรม ปี 2562 สาขาวิชานวัตกรรมการเกษตรและการจัดการ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย และ ศ.ดร.บัญชา สมบูรณ์สุข หัวหน้าชุดโครงการวิจัย ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

Chin, H.F., Aziz, M., Ang, B.B. and Hamzah, S. 1981. The effect of moisture and temperature on the ultrastructure and viability of seeds of *Hevea brasiliensis.* **Seed Science and Technology** 9(2): 411-422.

Chin, H.F. and Roberts, E.H. 1980. Recalcitrant Crop Seeds. Tropical Press SDN. BHD., Kuala Lumpur.

Duang-iat, W, Wongvarodom, V., Santipracha, W. and Sdoodee, S. 2013. Physiological quality and desiccation-sensitivity of rubber (*Hevea brasiliensis*) seeds during fruit maturation.

Kasetsart Journal (Natural Science) 47(6): 818-827.

ISTA. 2008. **International Rules for Seed Testing.** International Seed Testing Association, Basserdorf.

Nakkanong, K. 2007. Genetic analysis in early introduced and recommended clones of rubber tree (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) based on RAPD and microsatellite. Master of Science (Plant Science), Prince of Songkla University. (in Thai)

Prabpree, A., Sangsil, P., Nualsri, C. and Nakkanong, K. 2018. Expression profile of phenylalanine ammonialyase (PAL) and phenolic content during early stages of graft development in bud grafted *Hevea brasiliensis*. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology** 14: 88-95.

RAOT. 2020. Good Agricultural Practices (GAP) for Rubber Plantations. Rubber Authority of Thailand, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)

Rubber Research Institute. 2014. Rubber Research in Thailand during 1994-2003. Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)

Wongvarodom, V. and Krisornpornsan, B. 2013. Effect of desiccation on physiological quality of rubber seeds. **Science and Technology Journal** 21(3): 233-242. (in Thai)

Wongvarodom, V. and Lerslerwong, L. 2013. Research Report on **Preliminary study for development of rubber rootstock seed production techniques.** Department of Plant Science, Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University. (in Thai)

Wongvarodom, V., Duang-iat, W., Santipracha, W. and Sdoodee, S. 2014. Effect of seed quality on field emergence and seedling performance of rubber (*Hevea brasiliensis*). **Kasetsart Journal (Natural Science)** 48(3): 376-382.

การอนุรักษ์พลังงานสำหรับโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย: กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม

Energy Conservation of Traditional Sugar Factory: A Case Study of Rerm-Udom Sugar Factory

ประพนธ์ ชูประเสริฐ[1*] กีรติ สุลักษณ์[1] ปรีชา ทุมมุ[2] และ อุดร นามเสน[3]

Praphon Chooprasert[1*], Kreerati Suluksna[1], Preecha Tummu[2] and Udon Namsaen[3]

Received: 5 November 2020, Revised: 15 January 2021, Accepted: 5 February 2021

บทคัดย่อ

โรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมโดยทั่วไปมักประสบปัญหาด้านประสิทธิภาพการจัดการพลังงาน งานวิจัยนี้จึงสำรวจ ตรวจวัด และวิเคราะห์สาเหตุของการสูญเสียพลังงานในระบบ เพื่อหามาตรการที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาที่สามารถช่วยประหยัดพลังงาน กรณีศึกษาคือโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี ผลจากการวิเคราะห์พบว่าในโรงงานมีการสูญเสียหลักๆ 4 อย่าง และงานวิจัยนี้ได้มีการเสนอมาตรการเพื่อลดการใช้พลังงาน คือ (1) การสูญเสียไปกับก๊าซไอเสียหม้อไอน้ำ มาตรการคือ การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำได้ 3.8% เทียบเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 292,716 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 1,229,409 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 5.86 ปี (2) การสูญเสียไปกับการโบลว์ดาวน์หม้อไอน้ำ มาตรการคือ การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมน้ำโบลว์ดาวน์อัตโนมัติ พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำได้ 0.3% เทียบเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 85,738 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 360,098 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 3.05 ปี (3) การสูญเสียไปกับอุปกรณ์ที่ไม่หุ้มฉนวน มาตรการคือ หุ้มฉนวนถังน้ำคอนเดนเสท สามารถผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น 79,454 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 333,708 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 1.28 ปี และ (4) การสูญเสียเนื่องจากการจัดการการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิต มาตรการคือ การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ไอน้ำในโรงงาน โดยการนำไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้

---

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงานและโลจิสติกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

[1] Energy and Logistics Management Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี 41000

[2] Energy Engineering, Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University, Muang, Udon Thani 41000, Thailand.

[3] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

[3] Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

[*] ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, email): chooprasert@gmail.com Tel: 06 1952 9993, 08 0480 1040

จากหม้อไอน้ำไปใช้ที่กังหันไอน้ำขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก่อน แล้วจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหันไอน้ำไปในกระบวนการผลิต มาตรการนี้จะผลิตไฟฟ้าได้เพิ่ม 820,829 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นเงิน 3,447,481 บาทต่อปี

คำสำคัญ: โรงงานน้ำตาล, หม้อไอน้ำ, การอนุรักษ์พลังงาน

ABSTRACT

The energy efficiency of traditional sugar factories is relatively low. This research aims to explore, measure, and analyze the causes of energy loss in the factory to propose energy conservation measures for Rerm Udom Sugar Factory, Udon Thani Province. The result shows that the most significant loss can be categorized into four sections. Therefore, four energy conservation measures are proposed. (1) The economizer for increasing boiler efficiency was installed due to heat loss through exhaust gas. This can increase boiler efficiency by 3.8% - equivalent to electricity produced of 292,716 kWh/year and corresponding to 1,229,409 Baht per year. The payback period is 5.86 years; (2) The blowdown controller was installed because of heat loss from blowdown. This helps to increase boiler efficiency by 0.3% which equates to the electricity produced of 85,738 kWh/year and corresponding to 360,098 Baht per year. The payback period is 3.05 years; (3) The installation of 2 inches thick insulation around the condensate tank was done due to radiation heat loss from the condensate tank. This helps to increase power generation by 79,454 kWh/year, corresponding to 333,708 Baht/year, and the payback period is 1.28 years; and (4) Heat loss was due to improper steam management in the factory. The measure was to preliminarily use produced steam from the boiler for power generation. After that, the lower temperature steam from the steam turbine was supplied to the production processes. This helps to increase the electricity generation by approximately 820,829 kWh/year, corresponding to 3,447,481 Baht per year.

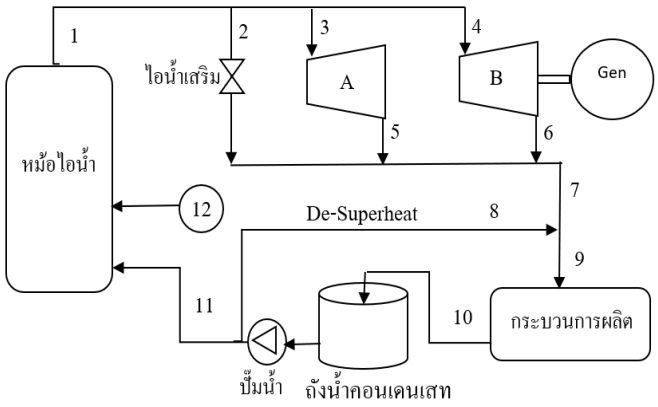
Key words: sugar factory, steam boiler, energy conservation

บทนำ

ประเทศไทยมีชีวมวลเหลือเป็นจำนวนมากหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตที่ยังไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ เช่น ทะลายปาล์ม (Sungkaew, 2015) ฟางข้าว (Ekburanawat and Thongsongyod, 2013; Rahman and Paatero, 2012) ไม้กระถินยักษ์ เหง้ามันสำปะหลัง (Arjharn, 2010) และกากอ้อย (Chooprasert and Limpiteeprakarn, 2011) แต่ละปีมีการเก็บเกี่ยวอ้อยในประเทศไทยประมาณ 8 ล้านตันต่อปี เทียบเท่าเป็นการผลิตไฟฟ้าประมาณ 6,700 จิกะวัตต์-ชั่วโมงต่อปี (The Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE), 2009) แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของไทยระบุว่าสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนสำหรับประเทศไทยอยู่ที่ประมาณ 10% โดยมีเป้าหมายที่จะเพิ่มสัดส่วนดังกล่าวให้เป็น 30% ในอีก 20 ปีข้างหน้า (Department of Renewable Energy Development and Energy Efficiency, 2015) นอกเหนือจากนี้

แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยได้วางแผนเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลให้ได้ 520 เมกะวัตต์ (The Energy Policy and Planning Office (EPPO), 2018) โดยในปัจจุบันมีโรงไฟฟ้าชีวมวลที่จ่ายไฟเข้าระบบแล้วจำนวน 220 แห่ง (The Energy Policy and Planning Office (EPPO), 2020) อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ทำการสำรวจโรงงานน้ำตาลจำนวน 47 แห่งในประเทศไทยชี้ให้เห็นว่าโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลของโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ (Sathitbun-anan *et al*., 2014) เนื่องจากในสมัยก่อนโรงงานถูกออกแบบโดยไม่ได้คำนึงถึงเรื่องการประหยัดพลังงาน ชีวมวลได้แก่ ชานอ้อย หรือ แกลบ เป็นวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรที่ไม่มีมูลค่า เพราะนโยบายรัฐบาลในสมัยนั้นยังไม่ได้รับซื้อไฟฟ้าจากเอกชน ปัจจุบันก็มีความพยายามหามาตรการเพื่อช่วยลดการใช้พลังงานแก่โรงงานน้ำตาล ซึ่งพบว่าบางกระบวนการมีความเป็นไปได้ที่จะลดลงได้กว่า 70% (Gul and Harasek, 2012; Khoodaruth, 2014; Sergeevich *et al*., 2018) ในประเทศไทยเองก็มีมาตรการที่หาความสิ้นเปลืองในการใช้พลังงานของโรงงานน้ำตาลโดยใช้วิธีทำสมดุลพลังงานเพื่อจำลองการใช้พลังงาน ซึ่งสามารถช่วยให้หาสภาวการณ์ทำงานของหม้อไอน้ำที่ดีที่สุดและสร้างอัตราผลตอบแทนภายในประมาณ 25% (Wongrat and Sookkumnerd, 2015) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามาตรการอนุรักษ์พลังงานสำหรับโรงงานนน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทยยังมีน้อยมาก ขณะที่ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานก็ค่อนข้างต่ำมากเช่นกัน

งานวิจัยนี้จึงสนใจสำรวจและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนของโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม (โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จังหวัดอุดรธานี) เพื่อหาศักยภาพของระบบและแนวทางการอนุรักษ์พลังงานที่เป็นไปได้ ในการนี้จะมีการคำนวณผลประหยัดที่ได้ เงินลงทุนโดยประมาณและคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนเพื่อเป็นแนวทางให้แก่โรงงานน้ำตาลดังกล่าวนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จำกัด ตั้งอยู่เลขที่ 11 หมู่ที่ 6 ต.หนองสระปลา อ.หนองหาน จังหวัดอุดรธานี โดยถูกจัดให้อยู่ในประเภทโรงงานควบคุมขนาดใหญ่ ในประเภทอุตสาหกรรมอาหาร ผลิตภัณฑ์หลักของโรงงาน คือ น้ำตาลทรายประมาณ 1,600-1,700 ตันต่อวัน และผลิตไฟฟ้าประมาณ 17-18 MW ต่อวัน โดยในการผลิตไฟฟ้าจะมีการใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงประมาณปีละ 280,000 ตัน เผาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำขนาด 200 ตันต่อชั่วโมง ทำงานที่ความดัน 29 Bar gauge (barg) จำนวน 2 ชุด จากรายงานไอน้ำที่ผลิตได้ทั้งหมดในปี พ.ศ. 2562 มีจำนวนกว่า 660,000 ตันไอน้ำ แบ่งไปใช้ในกระบวนการผลิตบางส่วน ส่วนที่เหลือถูกนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า โดยในปี พ.ศ. 2562 สามารถผลิตไฟฟ้าได้กว่า 72,000 เมกะวัตต์-ชั่วโมง (MWh) เพื่อใช้เองในโรงงานและเพื่อจำหน่ายอย่างละประมาณ 50% การผลิตไอน้ำและการนำไปใช้ในส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 1 ไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้จะถูกส่งไปใช้ในกระบวนการผลิตสำหรับกังหันไอน้ำขับพัดลมของหม้อไอน้ำและปั๊มน้ำป้อนหม้อไอน้ำ กังหันไอน้ำขับลูกหีบ กังหันไอน้ำขับมีดสับอ้อยและเครื่องย่อยอ้อย (ชุดกังหัน A) และใช้ในการผลิตไฟฟ้าโดยส่งไปที่กังหันไอน้ำ (ชุดกังหัน B) ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 12 MW และ 9 MW ตามลำดับ



ภาพที่ 1 สภาวะไอน้ำในโรงงานน้ำตาล

วิธีดำเนินการวิจัย

จากข้อมูลรายงานการจัดการพลังงานของโรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม ฤดูหีบอ้อย พ.ศ. 2562 โดยมีระยะเวลาเดินเครื่อง 110 วัน พบว่าพลังงานความร้อนเป็นรูปแบบที่ใช้ในโรงงานมากที่สุดกว่า 90% การวิเคราะห์การใช้พลังงานจึงมุ่งเน้นการใช้พลังงานความร้อนเป็นหลัก โดยแบ่ง 2 ส่วน ได้แก่ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำ และการสูญเสียความร้อนในกระบวนการผลิต สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำนั้นตัวแปรต้นที่ตรวจวัดค่าต่างๆ เพื่อนำไปคำนวณประสิทธิภาพดังตารางที่ 1 ในส่วนการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนในกระบวนการผลิต พิจารณาจากการสูญเสียความร้อนของอุปกรณ์ใช้ไอน้ำที่ไม่ได้หุ้มฉนวน ซึ่งโรงงานแห่งนี้มีถังเก็บน้ำคอนเดนเสทขนาดใหญ่ มีตัวแปรต้นที่ต้องตรวจวัดค่า คือ อุณหภูมิผิวของถังน้ำคอนเดนเสท เพื่อใช้คำนวณความร้อนสูญเสีย และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในโรงงานโดยการทำสมดุลพลังงานและมวลของกระบวนการผลิตน้ำตาลและผลิตไฟฟ้า เพื่อให้ทราบถึงอัตราการใช้ไอน้ำของระบบ

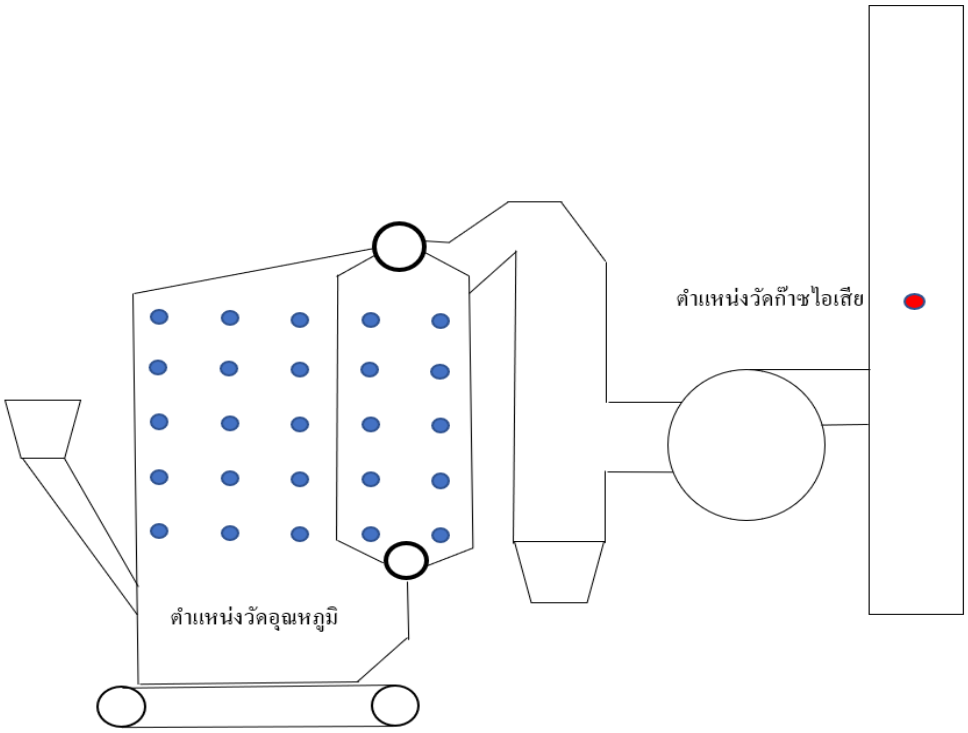
ตารางที่ 1 ค่าที่ทำการตรวจวัดเพื่อใช้คำนวณหาประสิทธิภาพพลังงานของหม้อไอน้ำ

ลำดับ	ค่าที่ทำการตรวจวัด	เครื่องมือหรือวิธีการที่ใช้
1	ปริมาณก๊าซ O_2, CO, CO_2	เครื่องวัดการเผาไหม้ ยี่ห้อ Testo รุ่น 330
2	อุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ (Flue gas)	เครื่องวัดการเผาไหม้ ยี่ห้อ Testo รุ่น 330
3	อุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำ	กล้องถ่ายภาพความร้อน ยี่ห้อ Testo รุ่น 865
4	การโบลว์ดาวน์ (Blowdown)	เอกสารตรวจสอบรายวัน
5	คาร์บอนจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Unburned carbon)	ส่งวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ

1. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำ

การตรวจวัดประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้ทำในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ของปี พ.ศ. 2563 เป็นการตรวจวัดด้วยวิธีทางอ้อมที่เรียกว่า “Heat-loss method” ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย (Association, 1993; Chooprsert *et al*., 2020) วิธีดังกล่าวนี้เป็นการใส่พลังงานเข้าหม้อไอน้ำ 100% แล้วหักลบการสูญเสียพลังงานต่างๆที่เกิดขึ้นออก โดยใช้เครื่องมือตรวจวัด ได้แก่ กล้องถ่ายภาพความร้อน ยี่ห้อ Testo รุ่น 865 ช่วงการวัด -20 ถึง 280 °C ความถูกต้อง ± 2% ตรวจวัดองค์ประกอบและอุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ (ปริมาณก๊าซ O_2, CO และ CO_2) โดยใช้เครื่องวัดการเผาไหม้ยี่ห้อ Testo รุ่น 330, โดย O_2 ช่วงการวัด 0 ถึง 21 %vol. ความถูกต้อง ±0.2% และ CO ช่วงการวัด 0 ถึง 8000 ppm ความถูกต้อง ±10 ppm ส่วนค่า CO_2 เครื่องวัดการเผาไหม้จะนำค่า O_2 ที่วัดได้มาคำนวณและทำการวัดคาร์บอนที่เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (เก็บตัวอย่างขี้เถ้า) โดยการส่งวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ เป็นการตรวจวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพตามมาตรฐาน JIS B8222: 1993 (Association, 1993) ซึ่งวัดอุณหภูมิผิวผนังหม้อไอน้ำ ทั้ง 4 ด้าน คือ ด้านหน้า ด้านข้างทั้งสอง และด้านหลัง จำนวน 3 ซ้ำ จุดวัดเป็นกริด ระยะห่างจุดละ 2 เมตร นำค่าเฉลี่ยมาใช้คำนวณ การวัดองค์ประกอบและอุณหภูมิก๊าซเผาไหม้นั้น โดยการนำเครื่องวัดการเผาไหม้ วัดที่ปล่องควันของหม้อไอน้ำซึ่งผู้ผลิตกำหนดตำแหน่งจุดวัดมาให้ ทำการวัดจำนวน 3 ซ้ำ และนำค่าเฉลี่ยมาใช้ ตัวอย่างจุดวัดแสดงในภาพที่ 2

สำหรับขี้เถ้าจะเก็บตัวอย่างที่บริเวณใต้ยุ้งขี้เถ้าใต้ห้องเผาไหม้ ใส่ถุงซิบ 0.5 กิโลกรัม จำนวน 10 ถุง ส่งไปวิเคราะห์ตามมาตรฐาน EN 14774 และ EN 14775 ที่ห้องปฏิบัติการ บจก. เอสจีเอส (ประเทศไทย)



ภาพที่ 2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ผนังหม้อไอน้ำและวัดก๊าซไอเสียที่ปล่องควัน

เมื่อได้ค่าตรวจวัดแล้วก็จะนำผลไปคำนวณหาความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นได้แก่ การสูญเสียจากก๊าซไอเสีย (L1) การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (L2) การสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่หมด (L3) การสูญเสียจากการแผ่รังสี (L4) และ การสูญเสียจากการโบลว์ดาวน์ (L5) คำนวณได้ตามสมการที่ (1)-(5) ตามลำดับ (Gul and Harasek, 2012; Sathitbun-anan *et al*., 2014) และประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำคำนวณได้ตามสมการที่ (6)

$$L_1 = G \cdot C_g \left(t_g - t_o \right) \tag{1}$$

$$L_2 = 126.1\left[G_o + \left(m-1 \right) A_o \right]\left(CO \right) \tag{2}$$

$$L_3 = 339 C_2 \tag{3}$$

$$L_4 = \frac{1}{100} l_r H_l \tag{4}$$

$$L_5 = \dot{m}_{bd} \frac{\left(h_{bd} - h_{FW} \right)}{\dot{m}_f} \tag{5}$$

$$\eta_b = \left[1 - \left(\frac{L_l}{H_l + Q} \right) \right] \times 100\% \tag{6}$$

โดย G คือ ปริมาณก๊าซไอเสียต่อ 1 kg. ของเชื้อเพลิง, m^3/kg เชื้อเพลิง

C_g คือ ค่าความจุความร้อนของก๊าซไอเสีย, 1.38 kJ-K/m^3

t_g คือ อุณหภูมิก๊าซไอเสีย, °C

t_o คือ อุณหภูมิอากาศ, °C

G_o คือ ปริมาณไอเสีย (แห้ง) ตามทฤษฎี, m^3/kg

m คือ อัตราส่วนอากาศส่วนเกิน

A_o คือ ปริมาณอากาศ (แห้ง) ตามทฤษฎีอากาศ, m^3/kg

C_2 คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (%โดยมวล)

l_r คือ %การสูญเสียเนื่องจากการแผ่รังสีจากผนังหม้อไอน้ำ

$\dot{m}_{bd}$ คือ อัตราการโบลว์ดาวน์, kg/h

h_{bd} คือ ค่าเอนทัลปีของน้ำโบลว์ดาวน์, kJ/kg

h_{FW} คือ ค่าเอนทัลปีของน้ำป้อน, kJ/kg

L_l คือ ผลรวมของความสูญเสียทั้งหมด, kJ/kg

$Hl + Q$ คือ ผลรวมของความร้อนป้อนเข้าสู่ระบบ, kJ/kg

2. การสำรวจพลังงานสูญเสียและการทำสมดุลพลังงาน

งานวิจัยนี้ได้สำรวจหาความสูญเสียของระบบบนหัวข้อแสดงดังตารางที่ 2 จากนั้นจึงนำเอาข้อมูลที่ได้จากการสำรวจมาวิเคราะห์สมดุลพลังงานดังที่แสดงในภาพที่ 3 ตามสมการที่ (7)-(8) (Association, 1993; Department of Industrial Works, 2018)

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{loss} \tag{7}$$

$$m_i h_i + m_i Cp_i T_i = m_o h_o + m_o Cp_o T_o + Q_{loss} \tag{8}$$

โดย Q คือ อัตราความร้อนไหลผ่านระบบ, kW

m_i คือ อัตราการไหลเชิงมวลเข้าระบบ, kg/s

m_o คือ อัตราการไหลเชิงมวลออกจากระบบ, kg/s

h_i คือ เอนทัลปีของไหลเข้าระบบ, kJ/kg

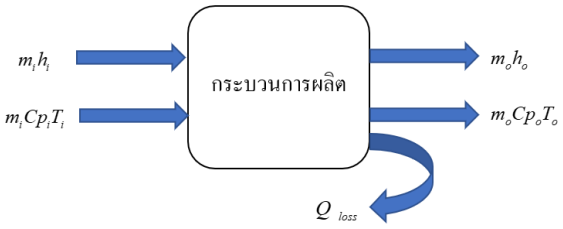
h_o คือ เอนทัลปีของไหลออกจากระบบ, kJ/kg

Cp_i คือ ค่าความจุความร้อนของไหลเข้าระบบ, kJ/(kg°C)

Cp_o คือ ค่าความจุความร้อนของไหลออกจากระบบ, kJ/(kg°C)

ตารางที่ 2 หัวข้อการสำรวจเพื่อหาความสูญเสียในกระบวนการผลิต

ลำดับ	หัวข้อ	เครื่องมือหรือวิธีการที่ใช้
1	การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่	ตรวจวัดอุณหภูมิความร้อนทิ้งและทำสมดุลพลังงาน
2	ความร้อนสูญเสียในระบบท่อ	ตรวจวัดอุณหภูมิความร้อนและคำนวณ
3	ความร้อนสูญเสียในอุปกรณ์ต่างๆ	ตรวจวัดอุณหภูมิความร้อนและคำนวณ
4	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของอุปกรณ์	ตรวจวัดประสิทธิภาพ

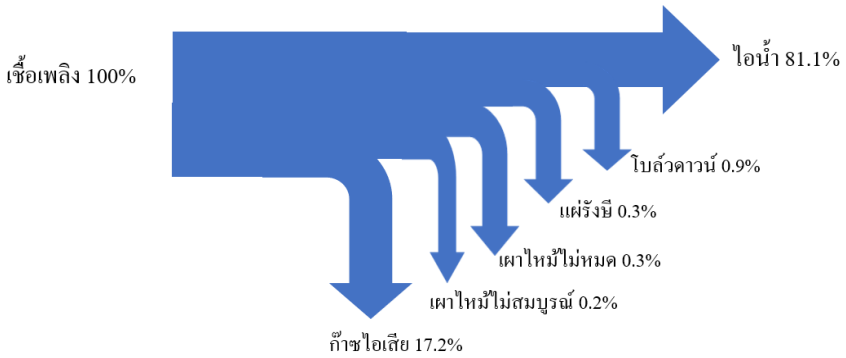


ภาพที่ 3 แนวคิดในการทำสมดุลพลังงาน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพพลังงานของหม้อไอน้ำ

ผลการสำรวจและตรวจวัดประสิทธิภาพหม้อไอน้ำของโรงงาน และการนำเสนอมาตรการอนุรักษ์พลังงานได้มีการนำเสนอผลการศึกษาแล้วใน (Chooprsert *et al*., 2020) พร้อมทั้งคำนวณหาความสูญเสียต่างๆ ในขั้นตอนที่ 1 พบว่า L_1, L_2 , L_3 , L_4 และ L_5 มีค่าเท่ากับ 17.2, 0.2, 0.3, 0.3, 0.9 % ตามลำดับ และประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเท่ากับ 81.1 % สามารถเขียนในรูปแผนผังพลังงานความร้อนของหม้อไอน้ำ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนผังการสูญเสียความร้อนและประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเดิม

2. ความร้อนสูญเสียในกระบวนการผลิต

จากการสำรวจพลังงานสูญเสียและการทำสมดุลพลังงานในขั้นตอนที่ 2 พบว่า มีพลังงานความร้อนที่สูญเสียอย่างเห็นได้ชัด 2 ส่วน คือ

2.1 ความร้อนสูญเสียจากอุปกรณ์ที่ไม่ได้หุ้มฉนวน (ถังเก็บน้ำคอนเดนเสท)

ความร้อนสูญเสียส่วนนี้แสดงการตรวจวัดในภาพที่ 5 ถังเก็บน้ำคอนเดนเสทยังไม่มีการหุ้มฉนวน พบว่า มีอุณหภูมิผิวเฉลี่ยเท่ากับ 45 °C อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเท่ากับ 35 °C ความร้อนสูญเสียจากถังเก็บน้ำคอนเดนเสทโดยการแผ่รังสีและการพาความร้อนสามารถคำนวณด้วยสมการที่ได้จากการทดลอง (Empirical equation) ตามมาตรฐาน IS8753 ดังสมการที่ 9 (Department of Industrial Works, 2018) พบว่า มีค่าเท่ากับ 515.1 kW ซึ่งนับว่ามีปริมาณความร้อนสูญเสียค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณพลังงานที่ผลิตจากหม้อไอน้ำ

ภาพที่ 5 วัดความร้อนของถังเก็บน้ำคอนเดนเสท

$$Q_{loss} = 0.548\left[\left(\frac{T_s}{55.55}\right)^4 - \left(\frac{T_a}{55.55}\right)^4\right] + 1.957(T_s - T_a)^{1.25}\sqrt{\frac{196.85V_m + 68.9}{68.9}} \quad (9)$$

โดย

Q_{loss} คือ ความร้อนสูญเสียจากถังเก็บน้ำคอนเดนเสท, W/m^2

T_s คือ อุณหภูมิผิวของถังน้ำคอนเดนเสท, K

T_a คือ อุณหภูมิอากาศ, K

V_m คือ ความเร็วลมของอากาศ, m/s (ในการคำนวณนี้ใช้ 2 m/s)

2.2 ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการใช้ไอน้ำในโรงงาน (ใช้ไอน้ำเสริมส่งตรงจากหม้อไอน้ำ) เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิต

โดยปกติแล้วไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตจะเป็นไอน้ำความดันต่ำ (Sat. steam) ที่ออกจากกังหันไอน้ำ (สภาวะที่ 5-6) ในภาพที่ 1 อย่างไรก็ตาม กรณีโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมนี้มีการผลิตและส่งจ่ายไอน้ำส่งตรงเข้าไปในกระบวนการผลิต เนื่องจากมีความสะดวกสบายในการใช้งาน โดยหลักถือว่าเป็นพฤติกรรมการใช้ไอน้ำที่เกินความจำเป็น จึงต้องนำไอน้ำจากหม้อไอน้ำ (Superheated steam) ไปลดอุณหภูมิ (Desuperheater) (สภาวะที่ 2) เพื่อนำไปใช้เสริมในกระบวนการผลิต ถือเป็นการสูญเสียพลังงานโดยไม่จำเป็นอย่างมาก จากการทำสมดุลพลังงานตามขั้นตอนที่ 2 สำหรับการใช้ไอน้ำที่กระบวนการต่างๆ ตามภาพที่ 1 จะได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 3-4 ซึ่งพบว่ากระบวนการผลิตต้องการใช้ไอน้ำจริงเพียง 327 ton/hr (สภาวะที่ 9) ในความเป็นจริงแล้วไอน้ำทั้งหมดที่ออกจากหม้อไอน้ำควรนำไปใช้ที่กังหันขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากนั้นจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหันไปใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานเป็นอย่างมาก

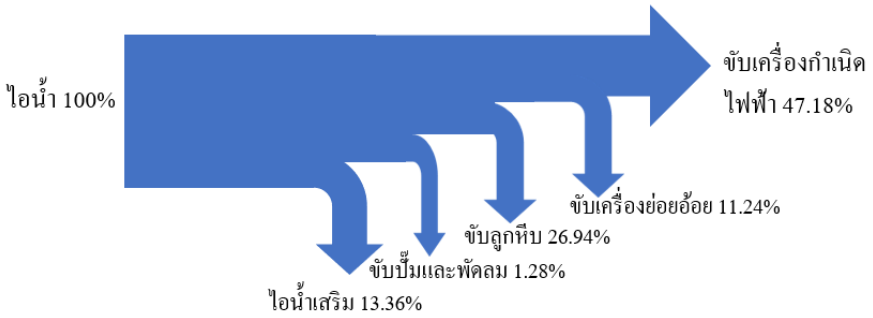
ตารางที่ 3 ผลการทำสมดุลพลังงานด้านแรงดัน 29 bar_g ของโรงงาน

สภาวะ	อัตราการไหล/อัตราการป้อน (ton/hr)	ความดัน (bar_g)	อุณหภูมิ (°C)	เอนทัลปี (kJ/kg)
1	314.37	29	380	3,185.8
2	42.00	29	380	3,185.8
3	125.5	29	380	3,185.8
4	149.59	29	380	3,185.8

ตารางที่ 4 ผลการทำสมดุลพลังงานด้านความดันต่ำของโรงงาน

สภาวะ	อัตราการไหล/อัตราการป้อน (ton/hr)	ความดัน (bar_g)	อุณหภูมิ (°C)	เอนทัลปี (kJ/kg)
5	125.5	2.5	269	2,821.6
6	149.59	2.5	180	2,821.6
7	272.37	2.5	180	2,821.6
8	12.98	3.0	105	440.2
9	327	1.0	130	2,727.1
10	311	2.21	114	477.9
11	319.4	35.0	105	440.2
12	146.59	-	-	-

จากการทำสมดุลพลังงาน สามารถนำมาสร้างแผนผังการใช้ไอน้ำของโรงงานดังที่แสดงในภาพที่ 6 โดยพลังงานความร้อนในรูปไอน้ำทั้งหมดถูกส่งไปยังกังหันขับปั๊มน้ำและพัดลม 1.28% ขับลูกหีบ 26.94% ขับเครื่องย่อยอ้อย 11.24% ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้า 47.18% และส่งจ่ายไอน้ำเสริมให้กระบวนการผลิต 13.36%



ภาพที่ 6 แผนผังการใช้ไอน้ำของโรงงานในปัจจุบัน

มาตรการอนุรักษ์พลังงานที่เสนอแนะ

1. การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน (Economizer)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่ามาตรการนี้ได้นำเสนอใน (Chooprsert *et al*., 2020) โดยผลการศึกษาความ

ร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ พบว่าความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียสูงสุด 17.2% และยังพบว่าก๊าซไอเสียที่ปล่องมีอุณหภูมิสูงถึง 196°C ดังนั้น การติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนเพื่อนำเอาความร้อนทิ้งมาแลกเปลี่ยนให้กับน้ำป้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 105 °C เป็น 135 °C ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำจะเพิ่มขึ้น สามารถผลิตไอน้ำเพิ่มด้วย โดย ความร้อนที่ประหยัดได้ ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำหลังปรับปรุง อัตราการใช้เชื้อเพลิง และอัตราการผลิตไอน้ำที่ผลิตได้ สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Q_{save} = m_w Cp_w (\Delta T) \tag{10}$$

$$\eta = \frac{m_s (h_s - h_w) + Q_{save}}{\dot{m}_f \times LHV} \tag{11}$$

$$m_f = \frac{Q_{save}}{LHV} \tag{12}$$

$$m_s = \eta \times \left(\frac{m_f \times LHV}{h_s - h_w} \right) \tag{13}$$

โดย Q_{save} คือ ความร้อนที่ได้, kW

η คือ ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำหลังปรับปรุง , %

m_w คือ อัตราการน้ำป้อน, kg/s

m_f คือ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (ชานอ้อย), kg/s

m_s คือ อัตราการการผลิตไอน้ำ, kg/s

Cp_w คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำป้อน, kJ/kg

ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิน้ำป้อนระหว่างเข้าและออก, °C

LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (ชานอ้อย), kJ/kg

h_s คือ เอนทัลปีของไอน้ำ, kJ/kg

h_w คือ เอนทัลปีของน้ำป้อน, kJ/kg

สำหรับไฟฟ้าที่ผลิตได้เมื่อส่งจ่ายไอน้ำเข้ากังหันขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการสมรรถนะของกังหันที่ติดตั้งในโรงงาน ยี่ห้อ SHINKO ขนาด 9 MW (Chooprsert *et al*., 2020)

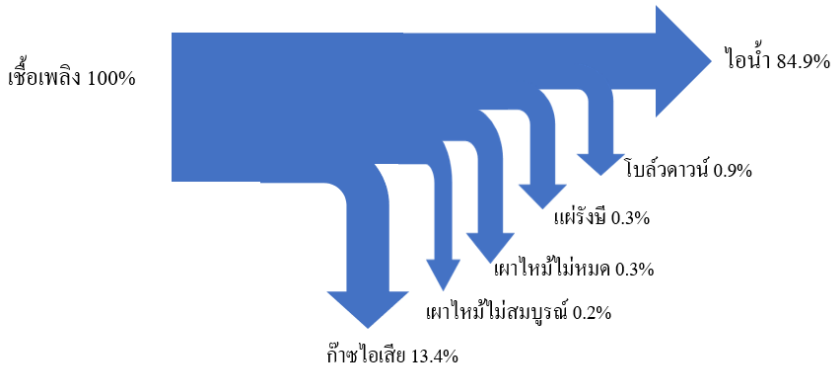
$$P_e = 27 + 6.76(\dot{m}_s) \tag{14}$$

โดย P_e คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้, MW

m_s คือ อัตราการไหลของไอน้ำ, Ton/hr

การประเมินทางเศรษฐศาสตร์เริ่มจากคำนวณปริมาณความร้อนและเชื้อเพลิงที่ประหยัด (สมการที่ 10 และ 11) จากนั้นคำนวณหาปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิง (สมการที่ 12) นำค่าไอน้ำที่ผลิตได้ไปประเมินหาปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ (สมการที่ 13) (Chooprsert *et al*., 2020) ราคาขาย

ไฟฟ้า ณ วันที่เก็บข้อมูลหน่วยละ 4.2 บาท (The Energy Policy and Planning Office (EPPO), 2020) ไปคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ดังแสดงในตารางที่ 5 และ แสดงแผนผังประสิทธิภาพและการสูญเสียความร้อนได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แผนผังประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเมื่อติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน

2. การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอัตราน้ำโบลว์ดาวน์ (Blowdown)

การโบลว์ดาวน์ เป็นการสูญเสียพลังงานหม้อไอน้ำที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง รองจากการสูญเสียไปกับก๊าซไอเสีย จากผลการศึกษาประสิทธิภาพหม้อไอน้ำของโรงงาน พบว่า สามารถลดความร้อนสูญเสียจากการโบลว์ดาวน์ (L_5) การควบคุมการโบลว์ดาวน์ทำได้โดยการควบคุมค่า TDS (Total Dissolved Solids) หรือ ควบคุมค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของน้ำในหม้อไอน้ำ สามารถคำนวณจากสมการที่ 14-15 (Eiamworawutthikul, 2018)

$$R_{BD} = \frac{Con_W}{Con_B - Con_W} \quad (15)$$

$$m_{BD} = m_W \times \frac{R_{BD}}{1 + R_{BD}} \quad (16)$$

โดย

m_{BD} คือ อัตราน้ำโบลว์ดาวน์, Ton/hr

m_W คือ อัตราน้ำป้อน, Ton/hr

R_{BD} คือ สัดส่วนการโบลว์ดาวน์

Con_W คือ ค่า Conductivity ของน้ำป้อน, μs/cm

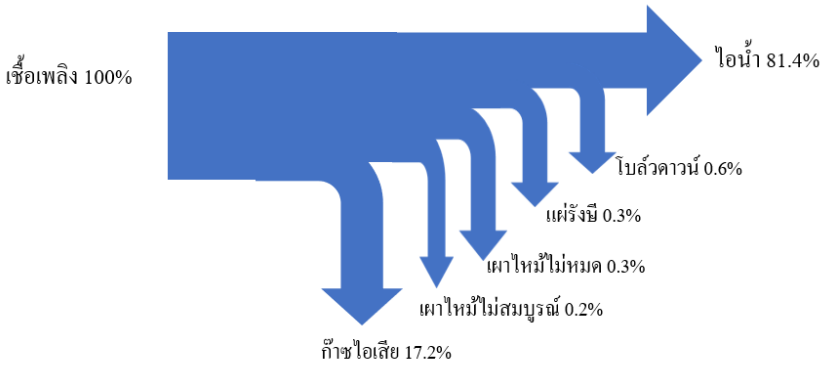
Con_B คือ ค่า Conductivity ของน้ำในหม้อไอน้ำ, μs/cm

จากการเก็บข้อมูลน้ำป้อนทุก 2 ชั่วโมง จำนวน 5 วัน พบว่า Conductivity เฉลี่ย 42.8 μs/cm กรณีความดัน 29 bar_g ค่าควบคุมคุณภาพน้ำโบลว์ดาวน์ เท่ากับ 6,000 μs/cm (Ahmed and Babiker, 2017) ซึ่งคำนวณสัดส่วนการโบลว์ดาวน์ จากสมการที่ (14) ได้เท่ากับ 0.007 และอัตราน้ำโบลว์ดาวน์ที่เหมาะสม เท่ากับ 2.28 Ton/hr แต่ปัจจุบันโรงงานมีการโบลว์ดาวน์อยู่ที่ 5.0 Ton/hr ซึ่งโบลว์ดาวน์เกิน

2.72 Ton/hr (m_{NBD}) เนื่องจากการโบลว์ดาวน์นี้เป็นการปล่อยน้ำเดือดทิ้ง ความร้อนที่ประหยัดสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$Q_{save} = m_{NBD}(h_f) \quad (17)$$

ความดัน 29 bar-g จะได้ h_f เท่ากับ 1007.8 kJ/kg คำนวณตามสมการที่ 16 ได้ความร้อนเท่ากับ 761.4 kW_t และคำนวณตามสมการที่ 11-14 จะได้พลังงานไฟฟ้าเพิ่ม 85,747 kWh/ปี คิดเป็นเงิน 360,137 บาทต่อปี ต้นทุนติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมน้ำโบลว์ดาวน์อัตโนมัติเท่ากับ 1,100,000 บาท จึงได้ระยะเวลาคืนทุนเป็น 3.05 ปี ดังรายละเอียดใน ตารางที่ 5 และ แสดงแผนผังประสิทธิภาพและการสูญเสียความร้อนได้ดังภาพที่ 8



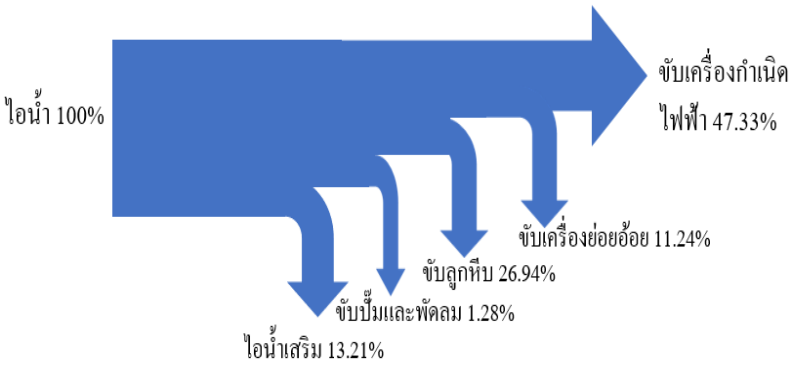
ภาพที่ 8 แผนผังประสิทธิภาพหม้อไอน้ำเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมน้ำโบลว์ดาวน์อัตโนมัติ

ตารางที่ 5 ผลประเมินตามมาตรการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนและติดตั้งโบลว์ดาวน์อัตโนมัติ

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อน	ติดตั้งโบลว์ดาวน์อัตโนมัติ
ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำหลังปรับปรุง	η	%	84.9	81.4
ความร้อนที่ได้	Q_{save}	kW_t	11,140.0	761.4
ปริมาณเชื้อเพลิง	m_f	T/hr	5.5	0.37
ปริมาณไอน้ำส่งเข้ากังหัน	m_s	T/hr	12.4	0.81
ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิด	P_e	kW	110.88	32.48
ระยะเวลาเดินเครื่อง (110 วัน)	-	Hr/year	2,640	2,640
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มเติม	-	kWh/year	292,723	85,747
จำหน่ายไฟฟ้าได้เพิ่ม (ราคา 4.2 บาท/kWh)	-	บาทต่อปี	1,229,437	360,137
เงินลงทุน	-	บาท	7,200,000	1,100,000
ระยะเวลาคืนทุน	PB	ปี	5.86	3.05

3. การหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำคอนเดนเสท

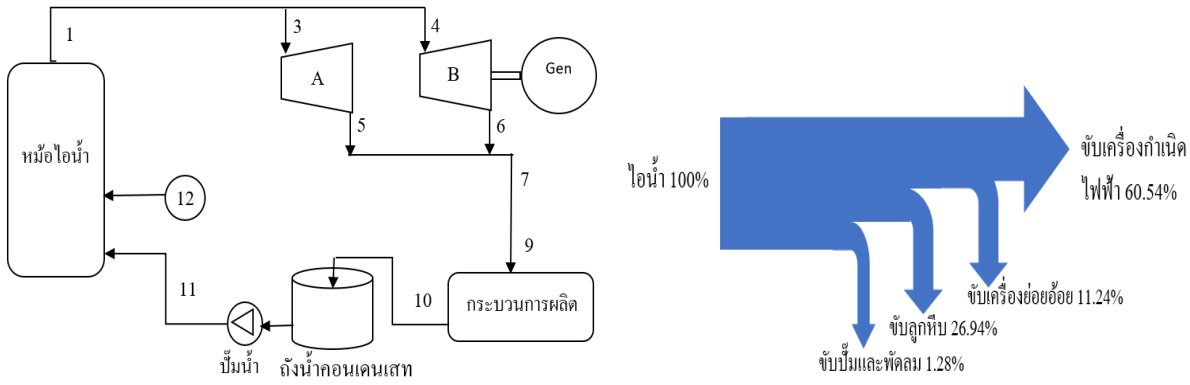
จากข้อมูลในหัวข้อ 3.2.1 ความร้อนสูญเสียที่ถังน้ำคอนเดนเสทเท่ากับ 515.1 kW หากหุ้มฉนวนหนา 50 mm ชนิดใยหินทนไฟ (Rockwool) ค่าการนำความร้อน (k) 0.034 W/mK จะลดการสูญเสียลงได้ 430.5 kW คำนวนโดยใช้สมการที่ 10-14 ได้ไฟฟ้าที่ผลิตเพิ่ม 79,464 kWh/ปี คิดเป็นเงิน 333,749 บาทต่อปี ต้นทุน 426,600 บาท ระยะเวลาคืนทุน 1.28 ปี ดังรายละเอียดใน ตารางที่ 7 แผนผังการใช้ไอน้ำดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แผนผังการใช้ไอน้ำของโรงงานเมื่อหุ้มฉนวนถังคอนเดนเสท

4. การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในโรงงาน

ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.2.2 ว่าไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำควรนำไปใช้ที่กังหันไอน้ำเพียงอย่างเดียว จากนั้นจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหันไปใช้ในกระบวนการผลิต จึงจะเป็นการจัดการพลังงานที่เหมาะสม หากพิจารณาว่าไอน้ำที่นำไปลดอุณหภูมิไอน้ำในสภาวะที่ 2 (รูปที่ 1) อยู่ที่ 42 Ton/hr (ตารางที่ 3) หากนำไอน้ำนี้ไปใช้ในการผลิตไฟฟ้า คำนวณตามสมการที่ 10-14 พบว่าจะผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นปีละ 820,829 kWh คิดเป็นเงิน 3,477,482 บาทต่อปี โดยไม่ต้องมีเงินลงทุนเพิ่มแต่อย่างใด ดังรายละเอียดใน ตารางที่ 7 หลังใช้มาตรการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำแล้ว ไอน้ำจะถูกส่งไปขับกังหันผลิตไฟฟ้าเพิ่มเป็น 60.54% เนื่องจากไม่ส่งไอน้ำเสริมไปยังกระบวนการผลิต ซึ่งกระบวนการผลิตยังคงได้รับไอน้ำในปริมาณเท่าเดิม แต่เป็นการรับไอน้ำความดันต่ำจากกังหันทุกตัวในโรงงาน ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แผนผังการใช้ไอน้ำของโรงงานเมื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน

ตารางที่ 7 ผลประเมินตามมาตรการหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำคอนเดนเสทและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในโรงงาน

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	หุ้มฉนวนถังน้ำคอนเดนเสท	เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำ
ลดการสูญเสียความร้อน	Q_{save}	kW_t	430.5	-
ปริมาณเชื้อเพลิง	m_f	T/hr	0.21	-
ปริมาณไอน้ำส่งเข้ากังหัน	m_s	T/hr	0.46	42.0
ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิด	P_e	kW	30.10	310.92
ระยะเวลาเดินเครื่อง (110 วัน)	-	Hr/year	2,640	2,640
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มเติม	-	kWh/year	79,464	820,829
จำหน่ายไฟฟ้าได้เพิ่ม (ราคา 4.2บาท/kWh)	-	บาทต่อปี	333,749	3,447,482
เงินลงทุน	-	บาท	426,600	-
ระยะเวลาคืนทุน	PB	ปี	1.28	-

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการสำรวจ ตรวจวัด และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิม เพื่อใช้เป็นแนวทางแก่โรงงานอื่นๆ ในประเทศไทย ผลจากการศึกษาพบว่ามีการสูญเสียหลักๆ ได้แก่ การสูญเสียไปกับก๊าซไอเสียของหม้อไอน้ำ การสูญเสียไปกับการโบลว์ดาวน์ของหม้อไอน้ำ การสูญเสียไปกับถังเก็บน้ำคอนเดนเสทไม่หุ้มฉนวน และ การสูญเสียเนื่องจากการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิตไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ผลการศึกษานำไปสู่ข้อเสนอ 4 มาตรการ ดังนี้

(1) มาตรการติดตั้งเครื่องอุ่นน้ำป้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ พบว่า สามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนได้ 30 °C ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ 3.8% คิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 292,723 kWh/year คิดเป็นเงิน 1,229,437 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 5.86 ปี

(2) มาตรการติดตั้งชุดควบคุมการโบลว์ดาวน์อัตโนมัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ พบว่า สามารถลดน้ำโบลว์ดาวน์ที่เกิน 2.72 Ton/hr ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ 0.3% คิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 85,747 kWh/year คิดเป็นเงิน 360,137 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 3.05 ปี

(3) มาตรการหุ้มฉนวนถังเก็บน้ำคอนเดนเสท โดยการหุ้มฉนวนหนา 50 mm รอบถังน้ำคอนเดนเสท คิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ 79,464 kWh/year คิดเป็นเงิน 333,749 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 1.28 ปี

(4) มาตรการการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไอน้ำในโรงงาน โดยการนำไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำไปใช้ที่กังหันไอน้ำขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว จากนั้นจึงนำไอน้ำที่ออกจากกังหันไปใช้ในกระบวนการผลิต คิดเป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่ม 820,829 kWh/year คิดเป็นเงิน 3,447,482 บาทต่อปี

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยความกรุณาอย่างสูงจาก บริษัท โรงงานน้ำตาลทรายขาวเริ่มอุดม จำกัด จ.อุดรธานี ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ให้เสร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

Ahmed, M. and Babiker, M. 2017. Effect of Boiler Feed Water Quality in Textile and Other Industries. **Gezira Journal of Engineering & Applied Science** 12(1): 16-30.

Arjharn, W. 2010. **Research Report on Study of a biomass feedstock production plant for rural.** Suranaree University of Technology. (in Thai)

Association, J.S. 1993. **Land boilers-Heat balancing.** JIS B8222:1993, Tokyo, Japan.

Chooprasert, P. and Limpiteeprakarn, T. 2011. Potential Assessment for Bagasse Drying using Heat Recovery in Sugar Factory, pp. 508-514. *In* **Proceedings of the 7th Conference On Energy Network of Thailand (E-NETT); 2011.** Phuket. (in Thai)

Chooprasert, P. Suluksna, K. and Tummu, P. 2020. Improvement of boiler efficiency for Rerm-Udom sugar factory. pp. 1-8. *In* **Proceeding of the 13th International Conferences Thai Society of Agricultural Engineering (TSAE2020).** Nakhon Ratchasima, Thailand.

Department of Industrial Works. 2018. **Guide to improving the efficiency of very small biomass power plants.** The Energy Policy and Planning Office (EPPO), Bangkok. (in Thai)

Department of Renewable Energy Development and Energy Efficiency. 2015. **Alternative Energy Development Plan: AEDP2015.** The Energy Policy and Planning Office (EPPO), Bangkok. (in Thai)

Eiamworawutthikul, C. 2018. **Energy Saving Estimation Template (EnSET).** Available Source: https://WWW.sites.google.com/spu.ac.th/enset/home, November 17, 2018. (in Thai)

Ekburanawat, J. and Thongsongyod, C. 2013. **Mixed straw biomass electrical power generation system by using gasification technology.** Available Source: https://WWW.repository.rmutr.ac.th/bitstream/handle/123456789/503/ Fulltext.pdf?sequence=1 &isAllowed=y, August 23, 2013. (in Thai)

Gul, S. and Harasek, M. 2012. Energy saving in sugar manufacturing through the integration of environmental friendly new membrane processes for thin juice pre-concentration. **Applied Thermal Engineering** 43: 128-133.

Khoodaruth, A. 2014. Optimisation of a Cogenerated Energy Systems, The Cane Biomass Flexi-factory Case Study. **Energy Procedia** 62: 656-665.

Rahman, M.M. and Paatero, J.V. 2012. A methodological approach for assessing potential of sustainable agricultural residues for electricity generation, South Asian perspective. **Biomass and Bioenergy** 47: 153-163.

Sathitbun-anan, S., Fungtammasan, B., Barz, M., Sajjakulnukit, B. and Pathumsawad, S. 2014. Energy efficiency and greenhouse gas emission reduction potentials in sugar production processes in Thailand. **Energy for Sustainable Development** 23: 266-274.

Sergeevich, K.L., Valerevna, K.O. and Dmitrievna, T.A. 2018. A Method for Steam Boilers

Load Optimization. **IFAC-PapersOnLine** 51(32): 765-769.

Sungkaew, W. 2015. Potential of Oil Palm Biomass Residues for Electricity Generation in Southern Thailand. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Prince of Songkla University. (in Thai)

The Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE). 2009. **Biomass Database Potential in Thailand.** Available Source: http://WWW.dede.go.th, October 15, 2009. (in Thai)

The Energy Policy and Planning Office (EPPO). 2018. **Thailand Power Development Plan 2018.** Available Source: http://WWW.eppo.go.th, March 30, 2018. (in Thai)

The Energy Policy and Planning Office (EPPO). 2020. **Renewable Energy Power Plant Information.** Available Source: https://www.dede.go.th, August 1, 2020. (in Thai)

Wongrat, W. and Sookkumnerd, C. 2015. A Model of System Improvement for Electricity Cogeneration Sugar Factories. **Farm Engineering and Automation Technology Journal** 1(1): 33-41. (in Thai)

วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบการถดถอยพหุคูณที่แกร่งปรับใหม่

Modified Robust Method for Parameter Estimation of Multiple Regression Models

นิธิภัทร กมลสุข*

Nithipat Kamolsuk*

Received: 22 October 2020, Revised: 13 October 2021, Accepted: 22 November 2021

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ พัฒนาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ปรับแก้จากวิธีตัวประมาณค่า S และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวประมาณค่าพารามิเตอร์นี้จากค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error: *MSE*) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการพยากรณ์จากค่าร้อยละเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error: *MAPE*) ภายใต้สถานการณ์จำลอง 81 สถานการณ์ ประกอบด้วย 1) การแจกแจงความคลาดเคลื่อนแบบปรกติมาตรฐาน แกมมา และไวบูล 2) ขนาดตัวอย่าง 20, 60 และ 100 3) ร้อยละของค่านอกเกณฑ์จากค่าสังเกตของตัวแปรอิสระ ได้แก่ ร้อยละ 5, 25 และ 40 และ 4) จำนวนพารามิเตอร์ ได้แก่ 2 3 และ 4 ผลการวิจัยพบว่า 1) ค่าประมาณของพารามิเตอร์ที่ปรับแก้จากวิธีตัวประมาณค่า S แทนด้วย ($\underline{\hat{\beta}}_Q$) เป็นตัวประมาณค่าที่ไม่เอนเอียงของค่าพารามิเตอร์ $\underline{\beta}$ 2) ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ปรับแก้จากวิธีตัวประมาณค่า S ให้ค่า *MSE* น้อยกว่าวิธีตัวประมาณค่า S 59 สถานการณ์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสถานการณ์ที่จำนวนพารามิเตอร์เท่ากับ 2 และ 3 และ 3) สมการถดถอยจากค่าประมาณของพารามิเตอร์ที่ปรับแก้จากวิธีตัวประมาณค่า S มีค่า *MAPE* น้อยกว่าวิธีตัวประมาณค่า S 41 สถานการณ์ ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในสถานการณ์ที่ความคลาดเคลื่อนแจกแจงไวบูล ทั้งนี้ผลการวิจัยสามารถนำไปเป็นแนวทางการใช้เลือกวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่แกร่งของตัวแบบการถดถอยพหุคูณเมื่อมีค่านอกเกณฑ์เกิดขึ้นกับตัวแปรอิสระ

คำสำคัญ: การถดถอยพหุคูณ, การถดถอยที่แกร่ง, วิธีตัวประมาณค่า S

สำนักการศึกษาทั่วไป สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ จังหวัดนนทบุรี 11120

Office of General Education, Panyapiwat Institute of Management, Nonthaburi 11120, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อีเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): nitipatkam@pim.ac.th

ABSTRACT

This research aimed to develop the parameter estimation by applying adjusted S-estimator and to compare the efficiency of parameter estimation by Mean Square Error (*MSE*) and the efficiency of forecasting by Mean Absolute Percentage Error (*MAPE*). The situations were simulated under 81 situations including 1) the error distributions are Standard Normal, Gamma and Weibull distribution, 2) the sample sizes are 20 60 and 100, 3) the percentage of outliers is 5, 25 and 40, and 4) the number of parameters is 2, 3 and 4. The research results demonstrated that: 1) the estimated parameters obtained from adjusted S-estimator are $\underline{\hat{\beta}_Q}$ and unbiased parameters estimation of $\underline{\beta}$ 2) The method of parameters estimation through adjusted S-estimator provided the value of *MSE* less than S-estimator from 59 situations. In most situations, the number of parameters is equal to 2 and 3 parameters. 3) The forecasting equation from the parameter estimation using adjusted S-estimator has the level of *MAPE* less than the level of *MAPE* of S-estimator from 41 situations which are mostly the Weibul distribution. The results of this research can be used as a guideline for selecting a robust parameter estimation of the multiple regression model when outliers occur with independent variables.

Key words: multiple regression, robust regression, S-estimator

บทนำ

วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยที่แกร่ง (Robust Regression) เมื่อมีจุดแบ่งข้อมูล (Break Down Point: BDP) จำนวน 50% ที่นิยมใช้วิธีการหนึ่งคือ วิธีตัวประมาณค่า S (S-estimator) (Montgomery *et al*., 2006) ที่พัฒนาขึ้นโดย Rousseeuw และ Yohai ในปี ค.ศ. 1984 (Rousseeuw and Yohai, 1984) และพัฒนาต่อเนื่องโดย Rousseeuw และ Leroy ในปี ค.ศ. 1987 (Rousseeuw and Leroy, 1987) โดยใช้หลักการประมาณค่าพารามิเตอร์จากค่าประมาณของการแปรผันของส่วนเหลือ (Residual) หรือ $\hat{\sigma}$ น้อยที่สุด แทนด้วย $min_{\beta}\ \hat{\sigma}_s(\hat{e}_1, \hat{e}_2, \dots, \hat{e}_n)$ เมื่อ $\hat{\sigma}_s = s\,(\hat{e}_1, \hat{e}_2, \dots, \hat{e}_n) = s$ โดยที่ s เป็นค่าประมาณของส่วนเหลือ (Kamolsuk, 2020)

ถึงแม้ว่าวิธีตัวประมาณค่า S เป็นวิธีการที่แกร่ง (Robust Method) ที่นิยมใช้วิธีหนึ่ง แต่ผู้วิจัยพบว่าวิธีการนี้ใช้มัธยฐานส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ (Median Absolute Deviation: *MAD*) มาเป็นค่าเบี่ยงเบนของส่วนเหลือ ที่มีประสิทธิภาพประมาณ 37% เมื่อใช้กับความคลาดเคลื่อนที่แจกแจงแบบเกาส์เซียน (Gaussian Distribution) หรือการแจกแจงที่เบ้มากๆ (Rousseeuw and Croux, 1993)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้หาแนวทางการพัฒนาวิธีตัวประมาณค่า S ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการพัฒนาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ปรับแก้จากวิธีตัวประมาณค่า S (Adjusted S-estimator) หรือ AS ที่นำค่าสถิติที่มีประสิทธิภาพมากกว่า *MAD* มาใช้คำนวณค่าเบี่ยงเบนของส่วนเหลือในขั้นตอนแรกของการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีตัวประมาณค่า S จากวิธีการหาคำตอบด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ถูกถ่วงน้ำหนักอย่างซ้ำ (Iteratively Re-weighted Least Squares: IRLS) เพื่อให้ได้ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ที่พิจารณาจากค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error: *MSE*) โดยพบว่า

ถ้าค่า *MSE* ที่คำนวณจากตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ใดมีค่าต่ำกว่า ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์นั้นจะมีประสิทธิภาพมากกว่า และให้ได้สมการถดถอยที่มีประสิทธิภาพของการพยากรณ์ ซึ่งพิจารณาจากร้อยละเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error: *MAPE*) ถ้าพบว่า ค่า *MAPE* ที่คำนวณจากสมการถดถอยของตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ใดมีค่าน้อยกว่า แสดงว่าสมการถดถอยหรือสมการพยากรณ์นั้นจะมีประสิทธิภาพของการพยากรณ์มากกว่า ซึ่งสามารถนำไปเป็นแนวทางการเลือกใช้วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่แกร่งของตัวแบบการถดถอยพหุคูณกรณีที่มีค่านอกเกณฑ์จากค่าสังเกตของตัวแปรอิสระได้

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนได้แก่ 1) การพัฒนาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์วิธี AS และ 2) การจำลองสถานการณ์ ดังนี้

1. การพัฒนาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์วิธี AS

จากการประมาณค่าพารามิเตอร์วิธีตัวประมาณค่า S ที่หาคำตอบหรือค่าประมาณของพารามิเตอร์จากวิธี IRLS ที่คำนวณค่าเบี่ยงเบนของส่วนเหลือจากค่า *MAD* ซึ่ง Rousseeuw and Croux (1993) และ Dave and Nakrani (2014) แสดงให้เห็นว่า Q_n เป็นสถิติที่มีสมบัติคล้ายกับ *MAD* แต่มีประสิทธิภาพมากกว่า *MAD* เมื่อใช้กับข้อมูลมีการแจกแจงแบบเกาส์เซียน หรือแจกแจงแบบเบ้มากๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำ Q_n มาใช้แทน *MAD* เพื่อนำมาคำนวณค่าเบี่ยงเบนของส่วนเหลือในกรณีที่ส่วนเหลือมีการแจกแจงแบบปรกติมาตรฐาน แกมมา และไวบูล ซึ่งเป็นลักษณะการแจกแจงแบบเกาส์เซียนหรือแจกแจงแบบเบ้ จึงนำไปสู่การพัฒนาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ใหม่ ที่มีค่าประมาณของพารามิเตอร์แทนด้วย $\hat{\beta}_Q$ ดังนี้

$$\underline{\hat{\beta}_Q} = \left(\underline{X}'\underline{W_Q}\underline{X}\right)^{-1}\left(\underline{X}'\underline{W_Q}\underline{Y}\right)$$

เมื่อ $\underline{\hat{\beta}_Q}$ แทนค่าประมาณของพารามิเตอร์วิธี AS โดยที่ $\underline{W_Q}$ แทนเมทริกซ์ถ่วงน้ำหนัก $\underline{X}$ แทนเมทริกซ์ค่าสังเกตของตัวแปรอิสระ $\underline{X}'$ แทนเมทริกซ์สลับเปลี่ยนของค่าสังเกตจากตัวแปรอิสระและ $\underline{Y}$ แทน เมทริกซ์ค่าสังเกตของตัวแปรตาม

2. การจำลองสถานการณ์

ขั้นตอนนี้เป็นการจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวประมาณค่าพารามิเตอร์และประสิทธิภาพของการพยากรณ์จากสมการถดถอยที่ประมาณค่าพารามิเตอร์จากวิธี AS และวิธีตัวประมาณค่า S ด้วยวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) จากการทดลองซ้ำ จำนวน 1,000 รอบ (Roelant *et al*., 2009) ประกอบด้วย 81 สถานการณ์ ที่เป็นผลประกอบของขนาดตัวอย่าง (n) 3 จำนวน ได้แก่ 20, 60 และ 100 ร้อยละของค่านอกเกณฑ์จากค่าสังเกตของตัวแปรอิสระ (δ) 3 จำนวน ได้แก่ ค่านอกเกณฑ์ร้อยละ 5, 25 และ 40 (Tabatabai *et al*., 2012) และจำนวนพารามิเตอร์ (p) 3 จำนวน ได้แก่ p = 2 3 และ 4 ซึ่งแบ่งการดำเนินงานเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการสร้าง (Generate) ข้อมูล ขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ และขั้นตอนการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวประมาณค่าพารามิเตอร์

2.1 ขั้นตอนการสร้างข้อมูล

การสร้างข้อมูลและความคลาดเคลื่อนที่นำมาใช้ในการจำลองสถานการณ์ ภายใต้ตัวแบบถดถอยที่กำหนด มีขั้นตอน ดังนี้

2.1.1 สร้างความคลาดเคลื่อน ε_i ที่แจกแจงปรกติมาตรฐาน $(N(0,1))$ เมื่อ $i = 1,2,\ldots,n$

2.1.2 สร้างค่าสังเกตจากตัวแปรอิสระ X_{ij} ที่แจกแจงปรกติที่มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และ

ความแปรปรวน 100 หรือ $N(0,100)$ เมื่อ $i = 1,2,\dots,n$ โดย $j = 1,2,\dots,p$ ทั้งนี้กำหนดให้ตัวแปรอิสระไม่เกิดปัญหาความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบพหุ (Multicollinearity)

2.1.3 สร้างร้อยละของค่านอกเกณฑ์จากตัวแปรอิสระ X_{ij} หรือ $(100n\delta)$ % ที่มีการแจกแจงปรกติมีค่าเฉลี่ยเป็น 10 และความแปรปรวน 100 หรือ $N(10,100)$ เมื่อ $i = (n - n\delta) + 1, (n - n\delta) + 2, \dots, n$ โดย $j = 1,2,\dots,p$ และ δ แทนร้อยละค่านอกเกณฑ์ของจำนวนค่าสังเกตจากตัวแปรอิสระ X_{ij} เมื่อค่านอกเกณฑ์นี้มีระดับไม่รุนแรงตามเงื่อนไขของการตรวจสอบค่านอกเกณฑ์โดยใช้แผนภาพกล่อง (Box Diagram) และหนวด (Whisker) ที่เป็นค่าที่อยู่นอกช่วง $[Q_1 - 3(IQR), Q_1 - 1.5(IQR)]$ หรือ $[Q_3 + 1.5(IQR), Q_3 + 3(IQR)]$ เมื่อ Q_1 แทนควอร์ไทล์ (Quartile) ที่ 1 Q_3 แทนควอร์ไทล์ที่ 3 และ IQR แทนพิสัยระหว่างควอร์ไทล์ (Interquartile Range) (Tantrakul *et al*., 2012)

สำหรับความคลาดเคลื่อนที่แจกแจงแกมมาและแจกแจงไวบูลนั้น จะทำในลักษณะเดียวกันโดยเปลี่ยนแปลงขั้นตอนที่ 2.1.1 เป็นการแจกแจงแกมมาที่มีพารามิเตอร์รูปร่าง (Shape Parameter) (α) = 2 และพารามิเตอร์บ่งขนาด (Scale Parameter) (β) = 1 และแจกแจงไวบูล ที่มีค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (α) = 2 และค่าพารามิเตอร์บ่งขนาด (β) = 1 (Ampanthong and Suwattee, 2010)

2.1.4 ทดสอบค่านอกเกณฑ์จากตัวแปรอิสระด้วยแฮทเมทริกซ์ (Hat Matrix) และทดสอบอิทธิพลของค่านอกเกณฑ์ที่มีต่อค่าประมาณของพารามิเตอร์จากระยะห่างกำลังสองของคุ้ก (Cook's Square Distance) ขนาดอิทธิพลของค่าสังเกตจากความแตกต่างมาตรฐานของบีตา (Standardized Difference of the Beta: DFBETAS) และความแตกต่างของค่ามาตรฐานที่กำหนด (Difference in the Fitted Value Standardized: DFFITS)

2.1.5 นำความคลาดเคลื่อนและค่าสังเกตจากตัวแปรอิสระตั้งแต่ 1 ถึง 3 ตัวแปรที่ได้แทนลงในตัวแบบถดถอยตามสมการที่ 1 เมื่อ $\underline{\beta}_0 = \underline{\beta}_1 = \underline{\beta}_2 = \underline{\beta}_3 = 1$ (Tantrakul *et al*., 2012)

$$\underline{Y}_i = \underline{\beta}_0 + \underline{\beta}_1 X_{i1} + \underline{\beta}_2 X_{i2} + \underline{\beta}_3 X_{i3} + \varepsilon_i \quad (1)$$

2.2 ขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์

ขั้นตอนนี้เป็นการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีตัวประมาณค่า S และวิธี AS แสดงตามภาพที่ 1 ที่มีขั้นตอน ดังนี้

2.2.1 ประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี LS แทนด้วย $\underline{\hat{\beta}}_0$ เพื่อนำมาเป็นค่าเริ่มต้น

2.2.2 นำ $\underline{\hat{\beta}}_0$ มาคำนวณหาค่าส่วนเหลือ (e_i)

2.2.3 คำนวณค่าเบี่ยงเบนของส่วนเหลือ (s) จากค่า *MAD*

2.2.4 นำส่วนเหลือใน 2.2.2 มาคำนวณส่วนเหลือมาตรฐาน (u_i) จาก $u_i = \frac{e_i}{s}$

2.2.5 นำส่วนเหลือมาตรฐานมาคำนวณค่าน้ำหนักจากฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก W ตามสมการที่ 2

$$W = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{u_i}{1.547}\right)^2\right]^2 & ; \ |u_i| \le 1.547 \\ 0 & ; \ |u_i| > 1.547 \end{cases} \quad (2)$$

เมื่อใช้ฟังก์ชันส่วนเหลือของทูกี (Turky) หรือ $\rho(u_i)$ ดังนี้

$$\rho(u_i) = \begin{cases} \frac{u_i^2}{2} - \frac{u_i^4}{2c^2} + \frac{u_i^6}{6c^4} & ; \ |u_i| \le c \\ \frac{c^6}{6} & ; \ |u_i| > c \end{cases}$$

เมื่อ $u_i = \frac{e_i}{s}$ โดยที่ e_iแทนส่วนเหลือที่ i และ s ค่าเบี่ยงเบนของส่วนเหลือ ที่มี c เป็นค่าคงมีค่าเท่ากับ 1.547 ซึ่งใช้กับสถานการณ์ที่มีจุดแบ่งข้อมูลเท่ากับ 50% (Rousseeuw and Leroy, 2003)

$$\underline{\hat{\beta}}_1 = \left(\underline{X}'W\underline{X}\right)^{-1}\underline{X}'W\underline{Y} \quad (3)$$

2.2.6 นำค่าน้ำหนักจากฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก ใน 2.2.5 มาคำนวณค่าประมาณของค่าพารามิเตอร์ในรอบที่ 1 แทนด้วย $\underline{\hat{\beta}}_1$ ได้ตามสมการที่ 3

2.2.7 เปรียบเทียบค่าประมาณของพารามิเตอร์ในรอบที่ 1 หรือ $\underline{\hat{\beta}}_1$ กับค่า $\underline{\hat{\beta}}_0$ จาก $\Delta = \frac{|\underline{\hat{\beta}}_1 - \underline{\hat{\beta}}_0|}{\underline{\hat{\beta}}_0}$ ถ้าพบว่า ค่า Δ ที่ได้นี้น้อยกว่า 0.001 ให้หยุดคำนวณ (Panik, 2009) แต่ถ้าไม่เป็นไปตามนี้ให้ทำขั้นตอนต่อไป

2.2.8 ทำซ้ำในรอบที่ 2 โดยนำ $\underline{\hat{\beta}}_1$ จาก 2.2.6 มาเป็นค่าเริ่มต้นของการคำนวณโดยในรอบนี้ให้คำนวณส่วนเหลือและค่าเบี่ยงเบนของส่วนเหลือ จากสมการที่ 4

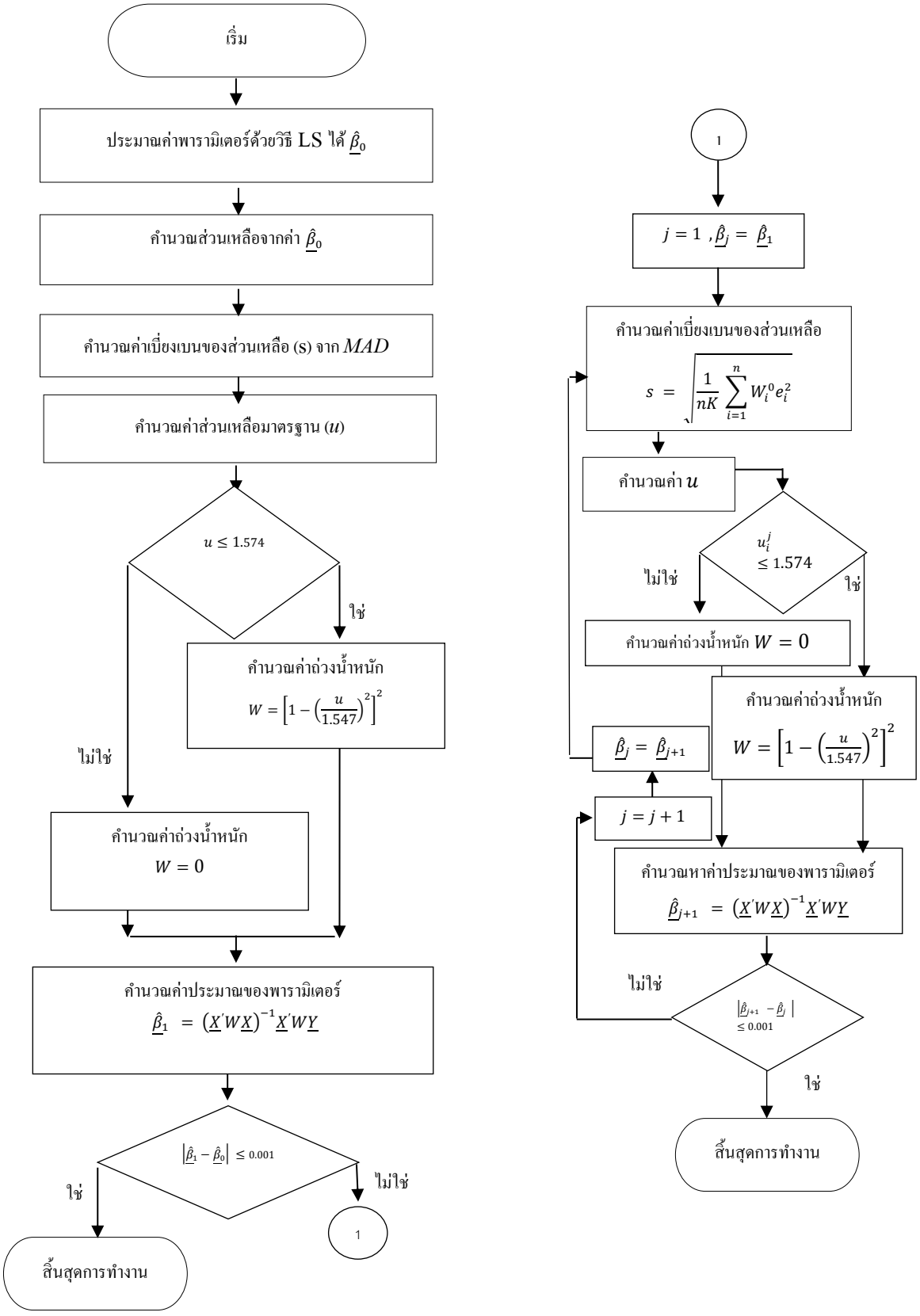
$$s = \sqrt{\frac{1}{nK}\sum_{i=1}^{n} We_i^2} \quad (4)$$

2.2.9 ทำซ้ำใน 2.2.4 และนำค่าที่ได้ไปใช้คำนวณค่าถ่วงน้ำหนักใน 2.2.5

2.2.10 ประมาณค่าพารามิเตอร์ในรอบที่ 2 หรือ $\underline{\hat{\beta}}_2$ จากค่าน้ำหนักที่ได้

2.2.11 คำนวณค่า $\Delta = \frac{|\underline{\hat{\beta}}_2 - \underline{\hat{\beta}}_1|}{\underline{\hat{\beta}}_1}$ ถ้าพบว่าค่า Δ น้อยกว่า 0.001 ให้หยุดคำนวณ แต่ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขนี้ให้ทำซ้ำต่อไปตั้งแต่ 2.2.4 ถึง 2.2.10 จนกระทั่งค่า $\Delta = \frac{|\underline{\hat{\beta}}_{j+1} - \underline{\hat{\beta}}_j|}{\underline{\hat{\beta}}_j}$ มีค่าน้อยกว่า 0.001 ซึ่งจะได้ค่าประมาณของพารามิเตอร์เป็น $\underline{\hat{\beta}}_{j+1}$

สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์วิธี AS ให้คำนวณค่าเบี่ยงเบนของส่วนเหลือในขั้นตอนที่ 2.2.3 ด้วยค่า Q_n



ภาพที่ 1 ขั้นตอนวิธีตัวประมาณค่า S

2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวประมาณค่าพารามิเตอร์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 วิธีจาก *MSE* ตามสมการที่ 5 โดยพบว่าถ้าค่า *MSE* จากตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ใดน้อยกว่า แสดงว่าตัวประมาณค่าพารามิเตอร์นั้นมีประสิทธิภาพมากกว่า

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2 \quad (5)$$

สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการพยากรณ์ พิจารณาจากค่า *MAPE* ตามสมการที่ 6 โดยพบว่า ถ้าค่า *MAPE* จากสมการถดถอยใดมีค่าน้อยกว่าแล้วสมการถดถอยนั้นจะมีประสิทธิภาพของการพยากรณ์มากกว่า

$$MAPE = \frac{100_{\%}}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i}\right| \quad (6)$$

เมื่อ Y_i แทนค่าสังเกตที่ i ที่ได้จากตัวแปรตาม โดยที่ $\hat{Y}_i$ แทนค่าสังเกตที่ i ที่ประมาณขึ้นจากสมการถดถอย และ n แทนค่าสังเกตทั้งหมด

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการพัฒนาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์วิธี AS

จากการนำ Q_n มาแทน *MAD* ทำให้ได้ค่าประมาณพารามิเตอร์ใหม่ คือ $\underline{\hat{\beta}}_Q = \left(\underline{X}'\underline{W}_Q\underline{X}\right)^{-1}\left(\underline{X}'\underline{W}_Q\underline{Y}\right)$ โดย $\underline{\hat{\beta}}_Q$ เป็นตัวประมาณค่าที่ไม่เอนเอียงของค่าพารามิเตอร์ $\underline{\beta}$ ที่มีความแปรปรวนเป็น $V\left(\underline{\hat{\beta}}_Q\right) = \sigma^2\left(\underline{X}'\underline{W}_Q\underline{X}\right)^{-1}$ พิสูจน์ได้ดังนี้

$$E\left(\underline{\hat{\beta}}_Q\right) = E[\left(\underline{X}'\underline{W}_Q\underline{X}\right)^{-1}\underline{X}'\left(\underline{W}_Q\right)^{-1}\underline{Y}] = \left(\underline{X}'\left(\underline{W}_Q\right)^{-1}\underline{X}\right)^{-1}\underline{X}'\left(\underline{W}_Q\right)^{-1}\underline{X}\beta = \beta$$

จาก $\underline{\hat{\beta}}_Q = \left(\underline{X}'\underline{W}_Q\underline{X}\right)^{-1}\left(\underline{X}'\underline{W}_Q\underline{Y}\right)$ จะได้ $V\left(\underline{\hat{\beta}}_Q\right) = V\left(\left(\underline{X}'\underline{W}_Q\underline{X}\right)^{-1}\left(\underline{X}'\underline{W}_Q\underline{Y}\right)\right)$

ดังนั้น $V\left(\underline{\hat{\beta}}_Q\right) = \left(\underline{X}'\underline{W}_Q\underline{X}\right)^{-1}\left(\underline{X}'\underline{W}_Q\right)V\left(\underline{Y}\right)\left(\underline{W}_Q\underline{X}'\right)\left(\underline{X}'\underline{W}_Q\underline{X}\right)^{-1}$

เมื่อ $V\left(\underline{Y}\right) = \sigma^2$ แล้ว $V\left(\underline{\hat{\beta}}_Q\right) = \left(\underline{X}'\underline{W}_Q\underline{X}\right)^{-1}\left(\underline{X}'\underline{W}_Q\right)\sigma^2\left(\underline{W}_Q\right)^{-1}\left(\underline{W}_Q\underline{X}'\right)\left(\underline{X}'\underline{W}_Q\underline{X}\right)^{-1} = \sigma^2\left(\underline{X}'\underline{W}_Q\underline{X}\right)^{-1}$

2. การจำลองสถานการณ์

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ ที่พิจารณาจากค่า *MSE* และประสิทธิภาพของการพยากรณ์จากสมการถดถอยที่ประมาณค่าพารามิเตอร์จากวิธี AS และวิธีตัวประมาณค่า S ภายใต้สถานการณ์จำลอง เมื่อ n แทนขนาดตัวอย่าง δ แทนร้อยละของค่านอกเกณฑ์ และ p แทนจำนวนพารามิเตอร์ เมื่อความคลาดเคลื่อนแจกแจงปรกติ แจกแจงแกมมา และแจกแจงไวบูล แสดงได้ตาม ตารางที่ 1 ถึงตารางที่ 3 ตามลำดับ ดังนี้

ตารางที่ 1 ค่า *MSE* และ *MAPE* เมื่อความคลาดเคลื่อนแจกแจงปรกติมาตรฐาน

n	δ	วิธีการ	p	ค่าประมาณของพารามิเตอร์				***MSE***	***MAPE***
				β_0	β_1	β_2	β_3		
20	5%	AS	2	1.00000	2.00000			**2.52870**	0.05451
			3	2.18270	1.00248	0.99942		1.28138	**0.03194**
			4	2.58750	0.99619	0.99992	1.01204	1.11211	0.00801
		S	2	1.00000	2.00000			2.52871	0.05451
			3	2.20609	0.99736	1.00414		1.28091	0.03201
			4	1.74667	1.00249	1.00111	0.99869	1.11206	0.00801
20	25%	AS	2	0.48331	0.99902			**1.00233**	**0.00942**
			3	2.19041	0.99673	1.00379		1.39015	**0.01103**
			4	2.17379	1.00184	0.99940	1.00102	4.75117	0.09657
		S	2	0.48329	0.99903			1.00419	0.00951
			3	2.12882	1.00008	1.00149		1.16808	0.01108
			4	1.85449	1.00271	1.00037	0.99944	4.75117	0.09657
20	40%	AS	2	0.36693	1.00045			**1.22764**	**0.00657**
			3	2.26523	0.99654	1.00418		1.33176	0.01078
			4	1.93755	1.00315	0.99828	0.99918	1.46455	**0.01672**
		S	2	1.03500	0.98390			2.12084	0.00672
			3	2.19823	1.00059	0.99857		1.22870	0.01016
			4	1.50693	1.00542	0.99880	0.99722	1.26488	0.01685
60	5%	AS	2	0.61897	1.00008			**0.85233**	0.03901
			3	0.86201	0.99817	1.00159		**0.00852**	**0.00039**
			4	0.69369	1.00041	1.00049	0.99877	**0.81598**	**0.01622**
		S	2	0.62203	0.99899			0.87779	0.03887
			3	1.05534	0.99627	1.00170		0.85690	0.01093
			4	0.80684	1.00122	0.99988	0.99770	0.82045	0.01641
60	25%	AS	2	0.58211	1.00038			**0.85676**	**0.03501**
			3	1.05280	0.99655	1.00196		1.35264	**0.02350**
			4	0.92067	1.00222	1.00080	0.99890	**1.29842**	**0.01525**
		S	2	0.57683	1.00036			0.85760	0.03512
			3	1.11614	0.99727	1.00229		1.17484	0.02457
			4	0.91667	1.00063	0.99767	0.99789	2.36618	0.01595
60	40%	AS	2	0.61969	1.00047			0.90451	0.01142
			3	0.99757	0.99866	1.00110		**1.14575**	**0.02141**
			4	0.57857	1.00175	1.00220	1.00265	**0.653999**	0.159794
		S	2	0.84692	0.99931			0.86426	0.01106

ตารางที่ 1 (ต่อ)

n	δ	วิธีการ	p	ค่าประมาณของพารามิเตอร์				*MSE*	*MAPE*
				β_0	β_1	β_2	β_3		
60	40%	S	3	0.99030	0.99972	1.00029		1.16087	0.02304
			4	0.57361	1.00174	1.00235	1.00236	0.654017	0.159767
100	5%	AS	2	2.57780	1.00081			**1.15613**	**0.05032**
			3	2.25596	0.99910	1.00093		1.14599	0.02294
			4	2.68308	0.99876	0.99988	1.00135	1.18249	**0.03396**
		S	2	2.34836	1.00099			1.16201	0.05032
			3	2.78953	1.00043	0.99923		1.14470	0.02262
			4	2.36507	1.00101	1.00117	0.99786	1.17379	0.03405
100	25%	AS	2	2.67029	0.99989			**1.18284**	0.02744
			3	2.76974	1.00089	0.99692		1.35264	**0.02350**
			4	2.45635	1.00091	0.99991	1.00250	5.92755	**0.02979**
		S	2	2.39809	0.99958			1.25415	0.02711
			3	2.54061	1.00248	0.99788		1.17484	0.02457
			4	2.48012	1.00036	1.00103	0.99659	2.17614	0.03091
100	40%	AS	2	2.41738	1.00107			**1.24554**	0.02400
			3	2.65386	1.00247	1.00262		1.78586	0.05539
			4	2.70620	1.00172	1.00201	0.99843	8.45496	0.02389
		S	2	2.44536	0.99981			1.30925	0.02354
			3	2.68917	1.00323	1.00256		1.47759	0.02035
			4	2.71529	1.00114	1.00256	1.00172	5.60174	0.01871

จากตารางที่ 1 พบค่า *MSE* ของวิธี AS น้อยกว่าค่า *MSE* จากวิธีตัวประมาณค่า S ทั้งหมด 13 สถานการณ์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสถานการณ์ที่มีจำนวนพารามิเตอร์เท่ากับ 2 และ *MAPE* จากสมการถดถอยที่ประมาณค่าพารามิเตอร์จากวิธี AS มีค่าน้อยกว่าวิธีตัวประมาณค่า S ทั้งหมด 15 สถานการณ์ ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่มีจำนวนพารามิเตอร์เท่ากับ 2 3 และ 4 ในขนาดตัวอย่างและร้อยละของค่านอกเกณฑ์บางจำนวน

ตารางที่ 2 ค่า *MSE* และ *MAPE* เมื่อความคลาดเคลื่อนแจกแจงแกมมา

n	δ	วิธีการ	p	ค่าประมาณของพารามิเตอร์				***MSE***	***MAPE***
				β_0	β_1	β_2	β_3		
20	5%	AS	2	1.00000	2.00000			**1.97043**	0.04401
			3	2.18270	1.00248	0.99942		**2.03581**	**0.01929**
			4	2.58750	0.99619	0.99992	1.01204	**2.70618**	0.01390
		S	2	1.00000	2.00000			1.97044	0.04401
			3	2.20609	0.99736	1.00414		2.25570	0.01948
			4	1.74667	1.00249	1.00111	0.99869	3.15000	0.01120
20	25%	AS	2	0.48331	0.99902			**1.00734**	0.00936
			3	2.19041	0.99673	1.00379		**1.88404**	**0.00634**
			4	2.17379	1.00184	0.99940	1.00102	**1.28448**	0.07788
		S	2	0.48329	0.99903			1.00810	0.00936
			3	2.12882	1.00008	1.00149		1.89239	0.00707
			4	1.85449	1.00271	1.00037	0.99944	1.28673	0.07785
20	40%	AS	2	0.36693	1.00045			**1.60177**	**0.00579**
			3	2.26523	0.99654	1.00418		**1.91241**	**0.00573**
			4	1.93755	1.00315	0.99828	0.99918	**2.31473**	1.16271
		S	2	1.03500	0.98390			3.80814	0.01983
			3	2.19823	1.00059	0.99857		2.90526	0.00632
			4	1.50693	1.00542	0.99880	0.99722	2.72619	1.16255
60	5%	AS	2	2.77060	0.99954			**1.13658**	0.18367
			3	2.79949	1.00031	0.99916		**1.13869**	0.01328
			4	2.82780	0.99829	1.00070	1.00147	**1.10956**	0.12077
		S	2	2.26607	1.00010			1.26030	0.11200
			3	2.14977	1.00183	1.00072		1.30885	0.01219
			4	2.66493	0.99693	1.00351	1.00110	1.23734	0.06944
60	25%	AS	2	2.78212	0.99970			**1.13674**	0.18248
			3	2.83606	1.00028	0.99944		**1.11298**	**0.00337**
			4	2.43925	1.00145	1.00180	1.00039	2.27818	0.05356
		S	2	2.32699	1.00064			1.20066	0.11804
			3	2.37398	1.00002	0.99975		1.24150	0.00323
			4	2.34978	1.00012	0.99996	0.99926	1.36874	0.04802
60	40%	AS	2	2.78218	0.99950			**1.15607**	**0.00772**
			3	2.38342	1.00120	0.99881		**1.15234**	**0.00931**
			4	2.81337	0.99880	1.00180	1.00129	1.70512	0.02186

ตารางที่ 2 (ต่อ)

n	δ	วิธีการ	p	ค่าประมาณของพารามิเตอร์				***MSE***	***MAPE***
				β_0	β_1	β_2	β_3		
60	40%	S	2	2.18594	0.99984			1.35100	0.00824
			3	2.32594	1.00073	0.99957		1.17883	0.00897
			4	2.32586	0.99903	0.99923	1.00077	1.50701	0.02294
100	5%	AS	2	2.57780	1.00081			**1.61289**	0.17418
			3	2.78953	1.00043	0.99923		1.59494	**0.02516**
			4	2.68308	0.99876	0.99988	1.00135	1.59492	0.11279
		S	2	2.34836	1.00099			1.74224	0.13922
			3	2.25596	0.99910	1.00093		1.86455	0.02953
			4	2.36507	1.00101	1.00117	0.99786	1.84644	0.03514
100	25%	AS	2	2.67029	0.99989			**1.60753**	0.02747
			3	2.54061	1.00248	0.99788		**1.58649**	0.02325
			4	2.48012	1.00036	1.00103	0.99659	**2.91693**	**0.02757**
		S	2	2.39809	0.99958			1.76951	0.02430
			3	2.76974	1.00089	0.99692		2.53899	0.02191
			4	2.45635	1.00091	0.99991	1.00250	3.44525	0.02925
100	40%	AS	2	2.44536	0.99981			**1.66994**	0.02183
			3	2.65386	1.00247	1.00262		**1.07048**	0.02150
			4	2.70620	1.00172	1.00201	0.99843	**2.67907**	0.00857
		S	2	2.41738	1.00107			2.18050	0.02166
			3	2.68917	1.00323	1.00256		1.38081	0.02129
			4	2.71529	1.00114	1.00256	1.00172	8.08371	0.00843

จากตารางที่ 2 พบค่า *MSE* ของวิธี AS น้อยกว่าค่า *MSE* จากวิธีตัวประมาณค่า S ทั้งหมด 23 สถานการณ์ จาก 27 สถานการณ์ และ *MAPE* จากสมการถดถอยที่ประมาณค่าพารามิเตอร์จากวิธี AS มีค่าน้อยกว่าวิธีตัวประมาณค่า S ทั้งหมด 9 สถานการณ์

ตารางที่ 3 ค่า *MSE* และMAPE เมื่อความคลาดเคลื่อนแจกแจงไวบูล

n	δ	วิธีการ	p	ค่าประมาณของพารามิเตอร์				*MSE*	*MAPE*
				β_0	β_1	β_2	β_3		
20	5%	AS	2	1.74996	1.00120			**0.39008**	**0.01554**
			3	2.02346	0.99840	1.00205		**0.38849**	0.01706
			4	1.98659	0.99603	1.00290	1.00173	**0.33137**	**0.00663**
		S	2	1.45226	1.00162			0.56902	0.01792
			3	1.63617	1.00067	1.00061		0.43310	0.01680
			4	1.98753	0.99606	1.00290	1.00171	0.33163	0.00665
20	25%	AS	2	1.63414	0.99982			**0.43986**	**0.00470**
			3	2.02068	0.99793	1.00189		**0.27941**	0.00464
			4	1.99065	0.98988	1.00780	1.00127	**1.25688**	0.07729
		S	2	1.61891	0.99970			0.44382	0.00472
			3	1.97640	0.99858	1.00199		0.50993	0.00460
			4	1.65045	1.00035	0.99993	1.00019	1.28260	0.07712
20	40%	AS	2	1.87643	0.99999			**0.37292**	**0.00426**
			3	2.01884	0.99811	1.00201		**0.39467**	0.00415
			4	1.47273	1.00554	0.99610	0.99976	**0.30948**	0.01156
		S	2	1.87299	0.99916			1.10507	0.00438
			3	1.84585	0.99872	1.00208		0.78022	0.00352
			4	1.64350	1.00098	0.99952	0.99995	0.32463	0.01153
60	5%	AS	2	1.79512	0.99913			**0.11743**	**0.01228**
			3	1.75649	0.99992	0.99941		0.14119	0.00479
			4	1.85773	1.00023	1.00032	0.99909	**0.13449**	**0.01176**
		S	2	1.79077	0.99925			0.11800	0.01233
			3	1.77262	0.99935	1.00016		0.13773	0.00458
			4	1.82959	1.00059	0.99967	0.99892	0.14245	0.01190
60	25%	AS	2	1.77844	1.00011			**0.14113**	**0.01138**
			3	1.83196	1.00002	0.99987		**0.13595**	**0.00388**
			4	1.85604	1.00016	1.00070	1.00090	**0.52663**	**0.01192**
		S	2	1.75639	0.99964			0.15467	0.01163
			3	1.76317	0.99900	0.99946		0.34891	0.00386
			4	1.85535	1.00035	1.00058	1.00110	0.63182	0.01208
60	40%	AS	2	1.80416	1.00012			**0.14373**	0.00356
			3	1.85593	1.00004	1.00031		**0.17765**	**0.00318**
			4	1.92445	1.00105	1.00105	1.00163	**2.24518**	**0.00473**

ตารางที่ 3 (ต่อ)

n	δ	วิธีการ	p	ค่าประมาณของพารามิเตอร์				*MSE*	*MAPE*
				β_0	β_1	β_2	β_3		
60	40%	S	2	1.78549	0.99952			0.15837	0.00344
			3	1.90575	1.00062	0.99988		0.24275	0.00344
			4	1.91715	0.99832	0.99828	0.99787	3.80477	0.00518
100	5%	AS	2	1.81593	0.99953			**0.17845**	**0.01580**
			3	1.79638	0.99953	1.00005		0.19958	**0.01436**
			4	1.75431	1.00008	0.99985	1.00023	**0.20045**	**0.01708**
		S	2	1.73211	0.99937			0.18479	0.01762
			3	1.72195	0.99925	1.00098		0.21068	0.01566
		S	4	1.74583	0.99993	0.99955	1.00024	0.20230	0.01729
100	25%	AS	2	1.78183	1.00017			**0.20020**	**0.00787**
			3	1.76106	0.99991	1.00103		**0.49994**	**0.01360**
			4	1.82725	1.00083	1.00075	1.00334	5.27378	**0.01086**
		S	2	2.39809	0.99958			1.76951	0.02430
			3	2.76974	1.00089	0.99692		2.53899	0.02191
			4	2.45635	1.00091	0.99991	1.00250	3.44525	0.02925
100	40%	AS	2	2.44536	0.99981			1.66994	0.02183
			3	2.65386	1.00247	1.00262		**1.07048**	0.02150
			4	2.70620	1.00172	1.00201	0.99843	**2.67907**	0.00857
		S	2	1.79367	0.99948			0.28098	0.00635
			3	1.85060	0.99769	0.99800		6.72410	0.01261
			4	1.85879	0.99932	1.00126	1.00332	3.92437	0.00746

จากตารางที่ 3 พบค่า *MSE* ของวิธี AS น้อยกว่าค่า *MSE* จากวิธีตัวประมาณค่า S ทั้งหมด 23 สถานการณ์ จาก 27 สถานการณ์ และ *MAPE* จากสมการถดถอยที่ประมาณค่าพารามิเตอร์จากวิธี AS มีค่าน้อยกว่าวิธีตัวประมาณค่า S ทั้งหมด 17 สถานการณ์

ทั้งนี้จากผลการวิจัยเมื่อพิจารณาการแจกแจงของความคลาดเคลื่อนแบบไวบูลและแกมมา ซึ่งเป็นการแจกแจงที่มีลักษณะการแจกแจงแบบเบ้ ค่า *MSE* ของตัวประมาณค่าพารามิเตอร์วิธี AS น้อยกว่าค่า *MSE* ของวิธีตัวประมาณค่า S อยู่ 23 กรณี จาก 27 กรณี ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์วิธี AS มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีตัวประมาณค่า S แต่เมื่อพิจารณาการแจกแจงของความคลาดเคลื่อนแบบปรกติมาตรฐานซึ่งเป็นการแจกแจงแบบไม่เบ้ค่า *MSE* ของตัวประมาณค่าพารามิเตอร์วิธี AS น้อยกว่าค่า *MSE* ของวิธีตัวประมาณค่า S 13 สถานการณ์จาก 27 สถานการณ์ แสดงให้เห็นว่าตัวประมาณค่าพารามิเตอร์วิธี AS มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีตัวประมาณค่า S เพียง 13 สถานการณ์ ดังนั้นจากผลวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นว่า การแจกแจงของความคลาดเคลื่อนที่มีลักษณะการแจกแจงแบบเบ้ คือ แบบไวบูลและแกมมา การนำ Q_n มาใช้แทน *MAD* เพื่อมา

คำนวณค่าเบี่ยงเบนของส่วนเหลือในขั้นตอนแรกของการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีตัวประมาณค่า S จากวิธี IRLS จะให้แนวโน้มของตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rousseeuw and Croux (1993) และ Dave and Nakrani (2014) ที่กล่าวถึงประสิทธิภาพของ Q_n ที่มีมากกว่า *MAD* เมื่อมีการแจกแจงแบบเบ้มากๆ และสอดคล้องกับการพิจารณาประสิทธิภาพของการพยากรณ์จากค่า *MAPE* โดยพบว่าความคลาดเคลื่อนที่แจกแจงไวบูลมีจำนวนกรณีที่ *MAPE* ของสมการพยากรณ์จากสมการถดถอยที่ประมาณค่าพารามิเตอร์จากวิธี AS น้อยกว่าวิธีตัวประมาณค่า S อยู่ 17 กรณี ซึ่งมากกว่าหรือให้ผลประสิทธิภาพการพยากรณ์ที่ดีกว่าความคลาดเคลื่อนที่แจกแจงปรกติมาตรฐาน แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของการพยากรณ์จากสมการถดถอยที่ประมาณค่าพารามิเตอร์จากวิธี AS ยังไม่ดีกว่าวิธีตัวประมาณค่า S เนื่องจากมีหลายกรณีที่ *MAPE* ของวิธีตัวประมาณค่า S น้อยกว่าวิธี AS

นอกจากนี้การที่ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์วิธี AS ให้ค่า *MSE* น้อยกว่า 59 สถานการณ์จาก 81 สถานการณ์ แสดงว่าวิธีการนี้มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีตัวประมาณค่า S ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสถานการณ์ที่จำนวนพารามิเตอร์เท่ากับ 2 และ 3 ที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tharmaratnam *et al*. (2010); Smirnov and Shevlyakov (2014) ที่แสดงให้เห็นว่า Q_n สามารถนำมาใช้แทน *MAD* ในวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Oller *et al*. (2016) ที่ได้ปรับแก้วิธีตัวประมาณค่า S โดยการปรับแก้ฟังก์ชันส่วนเหลือของทูกีและฮูเบอร์ เพื่อนำมาใช้หาค่าประมาณของสัมประสิทธิ์การถดถอยด้วยวิธี IRLS พบว่า วิธีการใหม่นี้มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีตัวประมาณค่า S เมื่อมีตัวแปรทำนายจำนวน 2 ตัวแปรหรือมีจำนวนพารามิเตอร์ 3 ค่า ดังนั้นจากผลการวิจัยสามารถนำไปเป็นแนวทางการใช้เลือกวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่แกร่งของตัวแบบการถดถอยพหุคูณเมื่อมีค่านอกเกณฑ์เกิดขึ้นกับตัวแปรอิสระ เมื่อความคลาดเคลื่อนแจกแจงแบบไวบูลและมีจำนวนพารามิเตอร์ 3 ค่าได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกพัฒนาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ปรับแก้จากวิธีตัวประมาณค่า S หากนักวิจัยต้องการยืนยันผลประสิทธิภาพของการประมาณค่าพารามิเตอร์วิธีการนี้ให้ชัดเจนมากขึ้น สามารถนำมาเปรียบเทียบผลการประมาณค่าพารามิเตอร์วิธีอื่น เช่น วิธีกำลังสองของส่วนเหลือที่ถูกตัดค่าน้อยที่สุด (Least Trimmed Square) วิธีตัวประมาณค่า MM (MM-estimator) เป็นต้น

สรุป

1. ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์วิธี AS หรือ $\underline{\hat{\beta}}_Q$ ซึ่งเป็นตัวประมาณค่าที่ไม่เอนเอียงของค่าพารามิเตอร์ $\underline{\beta}$ ที่มีความแปรปรวนเป็น $V\left(\underline{\hat{\beta}}_Q\right) = \sigma^2\left(\underline{X}'\underline{W}_Q\underline{X}\right)^{-1}$

2. ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์วิธี AS มีประสิทธิภาพมากกว่าตัวประมาณค่าพารามิเตอร์วิธีตัวประมาณค่า S จำนวน 59 สถานการณ์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสถานการณ์ที่จำนวนพารามิเตอร์เท่ากับ 2 และ 3

3. สมการถดถอยที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี AS ให้ค่า *MAPE* น้อยกว่าวิธีตัวประมาณค่า S จำนวน 41 สถานการณ์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสถานการณ์ที่ความคลาดเคลื่อนแจกแจงแบบไวบูล

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ที่สนับสนุนทุนการวิจัย และให้การสนับสนุนผู้ทรงคุณวุฒิมาช่วยเป็นที่ปรึกษางานวิจัย ที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

Ampanthong, P. and Suwattee, P. 2010. Robust estimation of regression coefficients with outliers. **Thailand Statistician** 8(2): 183-205. (in Thai)

Dave, M. B. and Nakrani, M. 2014. Malicious user detection in spectrum sensing for WRAN using different outliers detection techniques. **Engineering Trends and Technology** 9(7): 326-320.

Kamolsuk, N. 2020. Parameter Estimation for Robust Regression with Maximum Likelihood Estimation and S-estimation. **Sripatum Review of Science and Technology** 12(1): 190-203. (in Thai)

Montgomery, D., Peck, E. and Vining, G. 2006. **Introductions to Linear Regression Analysis.** 4th ed. John Wiley & Sons, NewYork.

Oller, V., Alfons, A. and Croux, C. 2016. The shooting S-estimator for robust regression. **Computational Statistical** 31(3): 829-844.

Panik, M. 2009. **Regression Modeling Methods, Theory, and Computation with SAS.** Taylor & Francis Group, New York.

Roelant, E., Aelst, S. and Croux, C. 2009. Multivariate generalized S-estimators. **Multivariate Analysis** 100(5): 876-887.

Rousseeuw, P.J. and Croux, C. 1993. Alternatives to the median absolute deviation. **American Statistical Association** 88(424): 1273-1283.

Rousseeuw, P.J. and Yohai, V. 1984. Robust Regression by Means of S-estimators, pp. 256-272. *In* **Proceedings of Stochastische Mathematische Modelle.** Heidelberg: University, Heidelberg.

Rousseeuw, P.J. and Leroy, A.M. 1987. **Robust Regression and Outlier Detection.** John wiley & sons, NewYork.

Rousseeuw, P.J. and Leroy, A. M. 2003. **Robust Regression and Outlier Detection.** John wiley & sons, New York.

Smirnov, P.O. and Shevlyakov, G.L. 2014. Fast highly efficient and robust one-step M-estimators of scale based on Q_n. **Computational Statistics and Data Analysis** 78(4): 153-158.

Tabatabai, M., Ebay, H., Bae, S. and Singh, K. 2012. TELBS robust linear regression method. **Open Access Medical Statistics** 2(5): 65-84.

Tantrakul, O., Payakkapong, P. and Chomtee, B. 2012. Comparison of Robust Regression Methods in Multiple Linear Regression Model, pp. 291-300. *In* **Proceeding of The 13th Graduate Research Conference.** Khon Kan University, Khon Kan. (in Thai)

Tharmaratnam, K., Claeskens, G., Croux, C. and Salibián-Barrera, M. 2010. S-estimation for penalized regression splines. **Computational and Graphical Statistics** 19(3): 609-625.

การพัฒนาระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง

Development of Decision-Making for Selection Splitter Distribution Points for the Optical Fiber Networks

ราธส จิรวัฒน์สถิต [1] นัฐพงศ์ ส่งเนียม [2*] ดุษณี ศุภวรรธนะกุล [3] และ วรภัทร ไพรีเกรง [3]

Ratoes Jirawatsatid [1], Nattapong Songneam [2*], Dusanee Supawantanakul [3] and Worapat Paireekreng [3]

Received: 22 May 2020, Revised: 5 November 2020, Accepted: 4 March 2021

บทคัดย่อ

การคัดเลือกจุดกระจายสัญญาณที่เหมาะสมในการติดตั้งอินเตอร์เน็ตสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง (FTTx) เป็นขั้นตอนที่สำคัญซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของการบริการอินเตอร์เน็ต การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อ 1) พัฒนาระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง 2) เปรียบเทียบวิธีการจำแนกประเภทของข้อมูล 3) ประเมินความพึงพอใจของระบบ จากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 100 คน โดยใช้วิธีคัดเลือกตัวอย่างแบบเฉพาะเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือ โปรแกรมประยุกต์บนเว็บสำหรับการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง โดยใช้วิธีเคเนียเรสเนเบอร์ (K-Nearest Neighbors: K-NN) สำหรับแบ่งกลุ่มข้อมูล โดยข้อมูลที่นำมาใช้วิเคราะห์ประกอบไปด้วย ค่าลอส แบนด์วิชท์ แพ็กเกจ ระยะทาง และคลาส สถิติที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า การพัฒนาระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง ทำให้ได้เครื่องมือที่ช่วยในการเลือกจุดกระจายสัญญาณในหน่วยงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิคเคเนียเรสเนเบอร์สำหรับเป็นตัวแบบ

---

[1] สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร อนุสาวรีย์ บางเขน กรุงเทพ 10220

[1] Department of Technology Management, Faculty of Industrial Technology, Phranakhon Rajabhat University, Anusawari, Bangkhen, Bangkok 10220, Thailand.

[2] สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร อนุสาวรีย์ บางเขน กรุงเทพ 10220

[2] Department of Computer Science, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajaphat University, Anusawari, Bangkhen, Bangkok 10220, Thailand.

[3] สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ ทุ่งสองห้อง หลักสี่ กรุงเทพ 10210

[3] Department of Information Technology, College of Innovative Technology and Engineering, Dhurakij Pundit University, Thung Song Hong, Laksi, Bangkok 10210, Thailand

[*] ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): xnattapong@hotmail.com Tel: 09 9087 4433

การตัดสินใจเลือกจุดกระจายสัญญาณ จากการเปรียบเทียบวิธีการจำแนกประเภทของข้อมูลทั้ง 3 วิธี ได้แก่ เคเนียเรสเนเบอร์ นิวรอลเน็ตเวิร์ก และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ผลการทำลองพบว่า วิธีเคเนียเรสเนเบอร์ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุดที่ 97.88% ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบแบ่งเป็น 3 ด้าน ได้แก่ 1) ความพึงพอใจของผู้ปฏิบัติงานต่อข้อมูลนำเข้าอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.65, S.D. = 0.45) 2) ความพึงพอใจของผู้ปฏิบัติงานต่อกระบวนการทำงานของระบบอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.68, S.D. = 0.51) และ 3) ความพึงพอใจของผู้บริหารต่อผลลัพธ์อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.77, S.D. = 0.42)

คำสำคัญ: โครงข่ายใยแก้วนำแสง, จุดกระจายสัญญาณ, เคเนียเรสเนเบอร์, นิวรอลเน็ตเวิร์ก, ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

ABSTRACT

The appropriate selection of the distribution point on the internet for the fiber-optic network (FTTx) is an important step that affects the efficiency of Internet service. The purposes of this research were to (1) develop a decision-making system for selecting the Splitter Distribution Points for fiber optic networks, (2) compare data classification methods, and (3) analyze the satisfaction evaluation results of system. The sample group consisted of 100 people, using a specific sample selection method. The research methods were web-based applications for deciding on the selection of the Splitter Distribution Points for fiber-optic networks through K-Nearest Neighbors: K-NN. The feature used consisted of Loss Bandwidth Package Dist and Class. The statistics applied in the study were means and standard deviations. The results of the research were as follows: the development of a decentralized decision-making system for fiber-optic networks made it an effective tool for selecting Splitter Distribution Points in the department. The research used K-Nearest Neighbors (K-NN) technique for decision-making in selecting Splitter Distribution Points model from three comparing methods of data segmentation, which were K-Nearest Neighbors (K-NN), Neural Network, and Support Vector Machine. The result of the experiment showed that K-Nearest Neighbors (K-NN) had the highest accuracy at 97.88%. The results of the system user satisfaction evaluation were divided into 3 areas: the operators' satisfaction toward imported data was found at the highest level ($\bar{x}$ = 4.65, S.D. = 0.45); the workers' satisfaction toward the work processes of the system was perceived at the highest level ($\bar{x}$ = 4.68, S.D. = 0.51); and the satisfaction of the executives toward the results was observed at the highest level ($\bar{x}$ = 4.77, S.D. = 0.42).

Keywords: fiber optic network, splitter distribution points, k-nearest neighbors, neural network, support vector machine

บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านอินเทอร์เน็ตมีความเจริญก้าวหน้าขึ้นเป็นอย่างมาก และเกี่ยวข้องในชีวิตประจำวันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งแผนยุทธศาสตร์ของประเทศไทย (Royal Thai Government Gazette, 2018) ได้รับการพัฒนายกระดับไปสู่การใช้เทคโนโลยีและนวัตกรรมในการสร้างมูลค่าเพิ่มและพัฒนากลไกให้ก้าวหน้า ในการให้บริการอินเทอร์เน็ตในอดีตเป็นการให้บริการบนคู่สายทองแดง ซึ่งมีข้อจำกัดในด้านความเร็วของอินเทอร์เน็ตที่ไม่ตอบสนองต่อผู้ใช้งานของการเปลี่ยนแปลงในยุคปัจจุบันที่ต้องการ ความรวดเร็ว และความถูกต้องให้มากที่สุดเพื่อการวางแผน และการแก้ปัญหาที่เกิดจากความล่าช้า ไม่ทันเวลา การใช้งานอินเทอร์เน็ตบนสายทองแดงจึงไม่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน ถึงกระนั้นก็ตามยังมีบางพื้นที่ก็ยังมีการใช้งานสายทองแดงอยู่บ้าง อันได้แก่ พื้นที่ต่างจังหวัด และบางพื้นที่ของจังหวัดกรุงเทพมหานคร และชุมชนต่างๆ ยังมีการใช้ความเร็วของอินเทอร์เน็ตที่อยู่ในระดับที่ต่ำ เสื่อมพังได้ง่าย ทำให้เกิดปัญหาความล่าช้าของอินเทอร์เน็ต มีอาการกระตุก และเกิดปัญหาอินเทอร์เน็ตตัดอยู่บ่อยครั้งในระหว่างที่มีผู้ใช้งาน จะเห็นได้ว่าอินเทอร์เน็ตที่เป็นสายทองแดง มีข้อจำกัดทางด้านความเร็วอยู่ทำให้ไม่สามารถขยายเพื่อเพิ่มความเร็วอินเทอร์เน็ตให้ตอบสนองต่อผู้ใช้ได้ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการทำงานที่ล่าช้าและไม่ทันการเปลี่ยนแปลง

ผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ต (ISP: Internet Service Provider) จึงได้มีการพัฒนาให้มีการนำเคเบิลใยแก้วนำแสง (Fiber Optic) มาใช้แทนสายทองแดง ซึ่งสอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์ประเทศไทย 4.0 ที่ได้มุ่งเน้นในการพัฒนาในด้านเทคโนโลยีและนวัตกรรม ซึ่งเคเบิลใยแก้วนำแสงนั้นจะมีการส่งความเร็วที่สูงขึ้นมากกว่าสายทองแดง ทำให้ตอบสนองต่อผู้ใช้งานทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศมากยิ่งขึ้น การได้รับความเร็วอินเทอร์เน็ตที่สูง และมีประสิทธิภาพ ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อผู้ใช้งาน สอดคล้องกับรัฐบาลมีนโยบายในการขยายอินเทอร์เน็ตให้เข้าถึงทุกครัวเรือน โดยมีโครงการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงในพื้นที่ชายขอบ ช่วยลดความเหลื่อมล้ำ กระจายความเจริญสู่ชนบท แต่พบว่ายังเป็นอุปสรรคต่อครัวเรือนที่มีรายได้น้อยในการเข้าถึงบริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง เพื่อเป็นการลดความเหลื่อมล้ำของประชาชน ตลอดจนเป็นการขยายโอกาสให้ครัวเรือนที่มีรายได้น้อยสามารถเข้าถึงและใช้งานบริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงได้อย่างทั่วถึงและเท่าเทียมกัน เพื่อสามารถเข้าถึงบริการต่างๆ ที่รัฐบาลได้จัดเตรียมไว้ให้ เช่น การศึกษาทางไกล การรักษาสุขภาพทางไกล เพื่อเป็นการคืนความสุขให้แก่ประชาชนตามนโยบายของรัฐบาล (Sasilawan, 2019) ด้วยคุณสมบัติใยแก้วนำแสงมีการใช้งานที่รวดเร็วและมีความคล่องตัวในการส่งข้อมูลสูง (Wang, 2017) โดยใยแก้วนำแสงนั้นจะใช้จุดติดตั้งเป็นตัวกระจายสัญญาณไปยังบ้านลูกค้า ซึ่งปัญหาการเลือกจุดกระจายสัญญาณ ค่าใช้จ่าย และจำนวนแบนด์วิชท์ (Bandwidth) เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงการให้บริการอย่างมีคุณภาพ Ding *et al*. (2017) ได้กล่าวว่าการใช้งานสายใยแก้วทำให้ลดงบประมาณลงได้เฉลี่ยประมานที่ 20 วินาที เมื่อเทียบกับสายชนิดอื่นในระยะเวลาเท่ากัน โดยเปลี่ยนมาใช้มาตรฐาน FTTx (Fiber to The Home) ซึ่งเป็นโครงข่ายบรอดแบนด์ (Broadband) ความเร็วสูง โดยจะขยายให้ครอบคลุมในส่วนของมาตรฐาน Optical Distribution Network (ODN) แต่เนื่องจากการสร้างข่ายสายของ ODN ยังไม่มีรูปแบบการดำเนินงานที่ชัดเจน ซึ่งอาจเป็นปัญหาที่ก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพการให้บริการในอนาคต และมีต้นทุนที่สูงเกินความจำเป็น หน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงได้ทำการกำหนดแนวทางรูปแบบ

เพื่อที่จะนำมาใช้แก้ไขปัญหาดังกล่าว (TOT public company limited, 2017)

จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้ศึกษาค้นคว้าปัญหาเกี่ยวเนื่องจากการสร้างเครือข่ายไร้สายของ ODN ที่ยังไม่มีรูปแบบการดำเนินงานที่ชัดเจน ที่ก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพการให้บริการในอนาคตของหน่วยงานและเป็นการลดต้นทุนที่สูงเกินความจำเป็น และเพื่อเป็นการสนองนโยบายด้านการศึกษาค้นคว้า วิจัย เพื่อหารูปแบบมาเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาการให้บริการที่มีคุณภาพยิ่งขึ้น ผู้วิจัยพบว่า ความเร็วของอินเทอร์เน็ตที่เกิดจากจุดกระจายสัญญาณเป็นปัญหาสำคัญ จึงจำเป็นต้องแก้ปัญหาและหาแนวทางในการพัฒนาการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับการให้บริการโครงข่ายใยแก้วนำแสงจึงมีความจำเป็นต่อการนำมาใช้เพื่อพัฒนาระบบให้ได้คุณภาพ ลดค่าใช้จ่ายและมีประสิทธิภาพต่อการนำไปใช้งานในกระบวนการคัดเลือกจุดกระจายสัญญาณอย่างดี โดยผู้วิจัยได้พัฒนาระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง ที่เป็นโปรแกรมประยุกต์บนเว็บ โดยใช้วิธีเคเนียเรสเนเบอร์ (K-Nearest neighbors: K-NN) ซึ่งเป็นเทคนิคเหมืองข้อมูลชนิดหนึ่งสำหรับการแบ่งประเภทหรือแยกหมวดหมู่ (Classification) ซึ่งได้มีงานวิจัยของ Akdeniz and Becerikli (2019) ที่ได้ทำงานวิจัยในการจำแนกเพศจากเสียงซึ่งได้มีการนำวิธีเคเนียเรสเนเบอร์มาใช้งาน และมีค่าความถูกต้องมากที่สุด นอกจากนี้มีข้อมูลที่นำมาใช้ประกอบด้วย ค่าลอส (Loss) แบนด์วิชท์ (Bandwidth) แพ็กเกจ (Package) ระยะทาง (Distance) และคลาส (Class) ซึ่งผ่านกระบวนการทำเหมืองข้อมูลทั้งหมด 7 ขั้นตอน ได้แก่ 1) Data Cleaning เป็นขั้นตอนการทำความสะอาดข้อมูล 2) Data Integration เป็นขั้นตอนการรวมข้อมูลให้เป็นชุดเดียวกัน 3) Data Selection เป็นขั้นตอนการคัดเลือกข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ 4) Data Transformation เป็นขั้นตอนการแปลงข้อมูลให้เหมาะสมจากชุดข้อมูลการสอน และชุดข้อมูลทดสอบ 5) Data Mining เป็นขั้นตอนการหารูปแบบของข้อมูล 6) Pattern Evaluation เป็นขั้นตอนประเมินรูปแบบจากการทำเหมืองข้อมูล และ 7) Knowledge Representation เป็นขั้นตอนการนำเสนอข้อมูลที่ได้โดยใช้เทคนิคในการนำเสนอเพื่อให้เข้าใจ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะนำไปใช้เป็นตัวแบบการตัดสินใจในการคัดเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1. ประชากร คือ ผู้บริหาร และผู้ปฏิบัติงาน บริษัท ทีโอที จำกัด มหาชน

2. กลุ่มตัวอย่าง คือ ผู้บริหาร และผู้ปฏิบัติงาน บริษัท ทีโอที จำกัด มหาชน จำนวน 100 คน

2. สถิติที่ใช้ในการประเมินความพึงพอใจ

ในการดำเนินการวิจัยได้มีสถิติที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยมีเกณฑ์ดังนี้

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.50 - 5.00 หมายความว่า อยู่ในระดับมากที่สุด

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.50 - 4.49 หมายความว่า อยู่ในระดับมาก

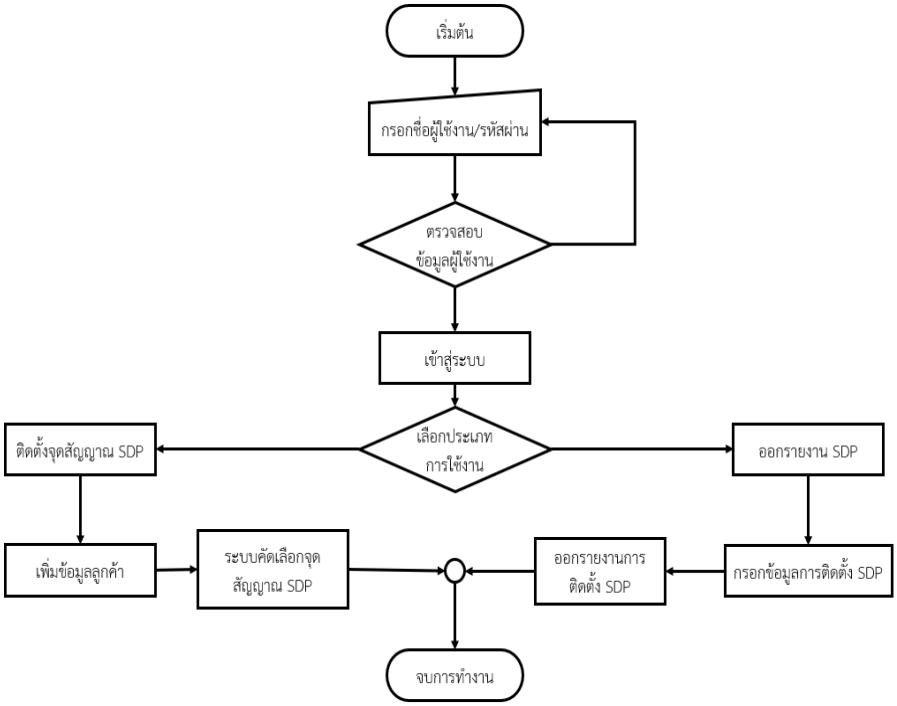
ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.50 - 3.49 หมายความว่า อยู่ในระดับปานกลาง

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.50 - 2.49 หมายความว่า อยู่ในระดับน้อย

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.00 - 1.49 หมายความว่า อยู่ในระดับน้อยมาก

3. การวิเคราะห์ระบบและออกแบบระบบ

การพัฒนาระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง ได้มีการวิเคราะห์ และออกแบบระบบแสดงเป็นผังงาน (Flow Chart) ระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง มีรายละเอียดลำดับขั้นตอนของผังงาน แสดงดังภาพที่ 1



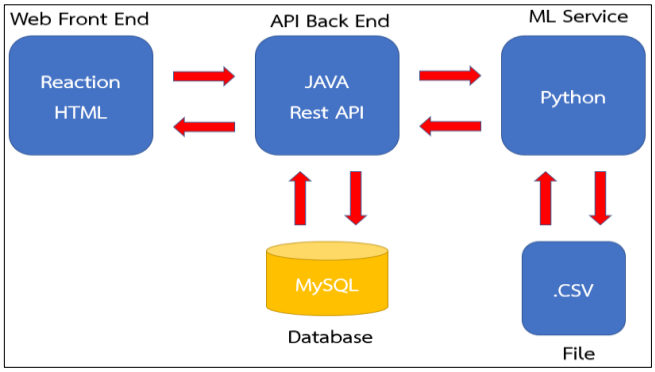
ภาพที่ 1 ผังงานระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง

4. ภาษาและฐานข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนา

การพัฒนาระบบส่วนผู้ใช้งานได้ใช้ภาษาจาวา (JAVA) และเจเอสพี (JSP: Java Server Page) ในการพัฒนา ส่วนการเรียนรู้ของเครื่องได้นำภาษาไพทอน (Python) มาใช้ในการพัฒนาอัลกอริทึ่ม และฐานข้อมูลที่ใช้ คือ มายเอสคิวแอล (MySQL)

5. การทำงานของโปรแกรม ผู้วิจัยได้มีการสรุปลำดับขั้นตอนในการทำงาน ดังนี้

1. การทำงานของระบบ มีขั้นตอนในการทำงาน โดยมีการแสดงถึงความสัมพันธ์ของภาษาที่ใช้ในการพัฒนา และฐานข้อมูล แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กระบวนการทำงานของระบบ

จากภาพที่ 2 กระบวนการทำงานของระบบมีขั้นตอนในการทำงานโดยมีหน้าจอของเว็บแอปพลิเคชันไว้สำหรับให้ผู้ใช้งาน เข้ามาใช้งานระบบโดยมีการเขียนด้วยภาษา HTML และมีการทำงานเบื้องหลังด้วยภาษา JAVA โดยมีหน้าที่ในการติดต่อกับฐานข้อมูล MySQL และติดต่อกับภาษา Python ที่ใช้ในการทำ Machine Learning Service ที่ใช้ในการคัดเลือกจุดกระจายสัญญาณโครงข่ายใยแก้วนำแสง

2. การวิเคราะห์ข้อมูล มีชุดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าบริการความเร็วอินเทอร์เน็ต ข้อมูลค่า Loss จากนั้นนำชุดข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

ลำดับที่	ความเร็ว Download/Upload	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
1	100/100	590
2	200/200	700
3	300/300	900
4	500/100	1,200
5	1000/500	1,590

(ก)

ลำดับที่	ค่า Loss
1	1 – 5
2	6 – 10
3	11 – 15
4	16 – 20
5	21 - 25

(ข)

ภาพที่ 3 (ก) ค่าบริการความเร็วอินเทอร์เน็ต (ข) ข้อมูลค่า Loss

2.1 การทำ Data Cleaning ทำการจัดการข้อมูลที่ไม่ต้องการ และข้อมูลที่ไม่จำเป็นหรือไม่เป็นประโยชน์ต่อการนำมาใช้งานออก เพื่อให้เหลือเพียงข้อมูลที่ต้องการนำมาใช้งานกับระบบ ดังภาพที่ 4

ลำดับที่	ความเร็ว Download/Upload	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
1	100/100	590
2	~~200/200~~	~~700~~
3	300/300	900
4	500/100	1,200
5	~~1000/500~~	~~1,590~~

ภาพที่ 4 การทำ Data Cleaning

2.2 การทำ Data Integration ทำการรวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูลมาไว้รวมกัน ดังภาพที่ 5

ลำดับที่	ความเร็ว Download/Upload	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
1	100/100	590
2	200/200	700
3	300/300	900
4	500/100	1,200
5	1000/500	1,590

ลำดับที่	ค่า Loss
1	1 – 5
2	6 – 10
3	11 – 15
4	16 – 20
5	21 - 25

ลำดับที่	ความเร็ว Download/Upload	ค่าบริการ (บาท/เดือน)	ค่า Loss
1	100/100	590	1 – 5
2	200/200	700	6 – 10
3	300/300	900	11 – 15
4	500/100	1,200	16 – 20
5	1000/500	1,590	21 - 25

ภาพที่ 5 การทำ Data Integration

2.3 การทำ Data Selection ทำการคัดเลือกข้อมูลที่สำคัญเพื่อนำข้อมูลนั้นมาวิเคราะห์ ดังภาพที่ 6

ลำดับที่	ความเร็ว Download/Upload	ค่าบริการ (บาท/เดือน)	ค่า Loss
1	100/100	590	1 – 5
2	200/200	700	6 – 10
3	300/300	900	11 – 15
4	500/100	1,200	16 – 20
5	1000/500	1,590	21 - 25

ลำดับที่	ความเร็ว Download/Upload	ค่าบริการ (บาท/เดือน)	ค่า Loss
4	500/100	1,200	16 – 20

ภาพที่ 6 การทำ Data Selection

2.4 การทำ Data Transformation ทำการจัดภาพแบบข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนการคัดเลือกข้อมูลให้มีความเหมาะสม โดยสามารถแบ่งการทำได้ 2 แบบได้แก่ 1) ชุดข้อมูลการสอน โดยการนำข้อมูลจากทุกแถวมาทำการวิเคราะห์ และหาผลลัพธ์ ดังภาพที่ 9 (ก) 2) ชุดข้อมูลการทดสอบ โดยการนำข้อมูลแอตทริบิวต์ ยกเว้น Class ทำการวิเคราะห์ และหาผลลัพธ์ ดังภาพที่ 9 (ข)

Loss	bandwidth	package	dist	class
1	3	3	1	A
1	2	2	4	B
1	1	1	0	A
1	2	2	3	B
2	2	2	0	A
1	1	1	3	B

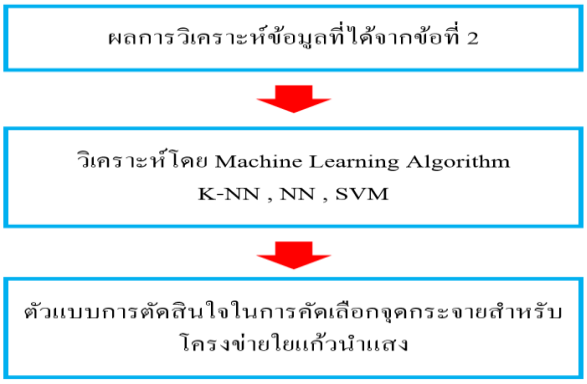
(ก)

Loss	bandwidth	package	dist
1	3	3	1
2	3	3	1
1	2	2	4
1	1	1	0
1	2	2	3
2	2	2	0

(ข)

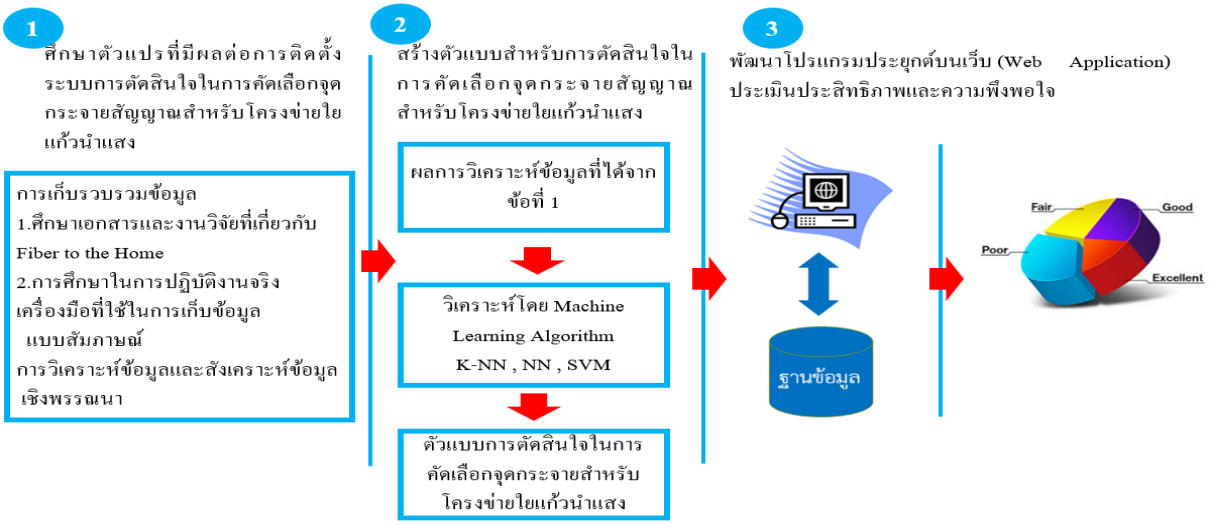
ภาพที่ 7 (ก) ชุดข้อมูลการสอน (Training Dataset) (ข) ชุดข้อมูลทดสอบ (Testing Dataset)

3. ขั้นตอนการพัฒนาระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง มีขั้นตอนในการพัฒนาตัวแบบการตัดสินใจโดยนำผลของข้อมูลออกมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง มีการเปรียบเทียบวิธีการแบ่งกลุ่มข้อมูลทั้ง 3 วิธี ได้แก่ 1) เคเนียเรสเนเบอร์ 2) นิวรอลเน็ตเวิร์ก และ 3) ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Sriurai, 2014) มีขั้นตอนการพัฒนาดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ขั้นตอนการพัฒนาระบบการตัดสินใจ

4. การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนเว็บ (Web Application) มีการติดต่อกับฐานข้อมูล โดยมีขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรมคือ 1) ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อระบบ 2) สร้างระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง 3) พัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนเว็บและประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจแสดงดังภาพที่ 9

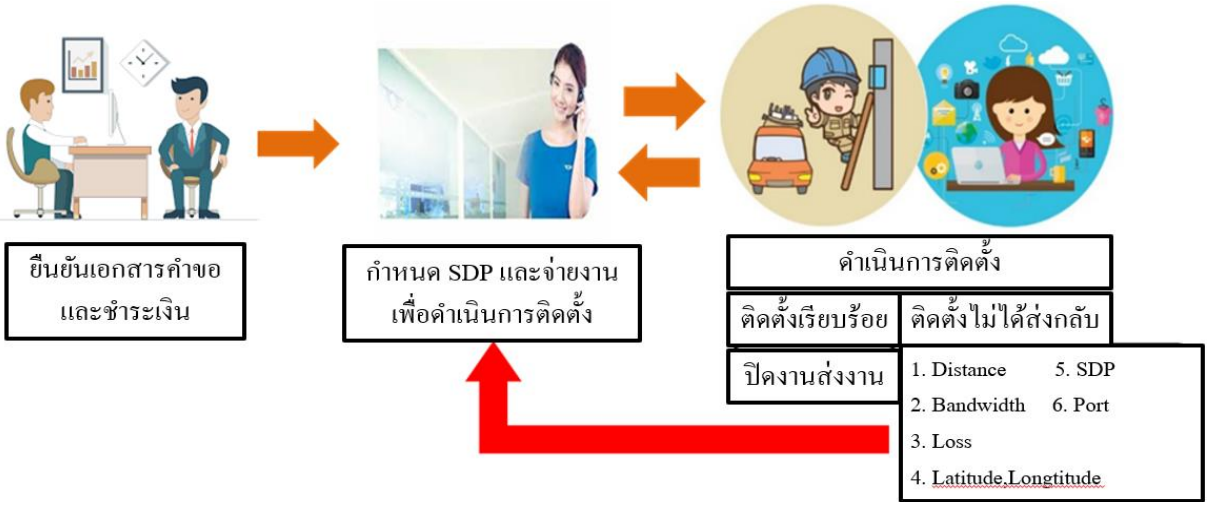


ภาพที่ 9 ขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรม

5. การศึกษาและพัฒนาระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง มีการประยุกต์สร้างโปรแกรม ดังนี้

5.1 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการติดตั้งระบบการตัดสินใจในการคัดเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง

5.2 การเตรียมข้อมูล (Training set Data) ในการจำแนกข้อมูลของระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง ชุดข้อมูลที่ใช้ในการสอน คือ การนำชุดของข้อมูลที่ใช้ในการปฏิบัติงานจริง

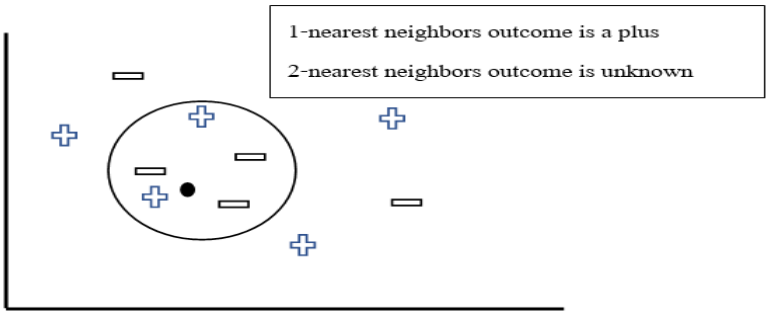


ภาพที่ 10 ขั้นตอนการให้บริการ

6. การจำแนกประเภทของข้อมูล

1. เคเนียเรสเนเบอร์ (K-NN: K-Nearest Neighbor)

วิธีเคเนียเรสเนเบอร์เป็นวิธีที่ใช้ในการจำแนกประเภทข้อมูลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยอัลกอริทึมแบบเคเนียเรสเนเบอร์ ได้แก่ 1-NN, 2-NN, 3-NN,... K-NN อีกกรณี คือ 2-KNN คือ อัลกอริทึมที่ค้นหา 2 กรณีที่มีความใกล้เคียงกับกรณีใหม่ ดังนี้ 1) การนำสมาชิกมาเรียงกันตามระยะทางจากน้อยไปหามาก และเลือกสมาชิกที่มีระยะทางสั้นที่สุด 2) การวัดความห่างของสมาชิก ถ้ามีระยะห่างที่น้อยแสดงว่ามีความคล้ายกันมาก ถ้าระยะห่างมากแสดงว่ามีความคล้ายกันน้อย (Teerarassamee, 2015)



ภาพที่ 11 วิธีเคเนียเรสเนเบอร์

2. นิวรอลเน็ตเวิร์ก (NN: Neuron Network)

วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neuron Network) เป็นแนวคิดที่ลอกเลียนแบบมาจากจากการทำงานของเซลล์สมองของมนุษย์ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยสมองมนุษย์ประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลเรียกว่า นิวรอน เซลล์ประสาท หรือ Neuron เป้าหมายการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมคือ ต้องการให้คอมพิวเตอร์นั้นมีความสามารถที่คล้ายกับมนุษย์ที่สามารถเรียนรู้ และฝึกฝนได้ด้วยตนเอง เพื่อใช้ในการทำ Classification, Clustering และ Regression โดยเรียกว่าเทคนิค Black Box (Thamsiri and Meesad, 2011)

การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำได้ด้วยวิธีการส่งข้อมูลมาที่เพอร์

เซ็ปตรอน (Perceptron) ที่เป็นเหมือนเซลล์สมองของมนุษย์ โดยเพอร์เซ็ปตรอนทำการรับข้อมูลที่เป็นตัวเลขเพื่อนำมาคำนวณ สำหรับฟังก์ชันผลรวมมีการทำงานดังสมการ (Thamsiri and Meesad, 2011)

$$n = \sum_{i=1}^{z} x_i w_i + b \quad (1)$$

เมื่อ n คือ ผลรวมที่ได้จากฟังก์ชันผลรวม
xi คือ ค่าข้อมูลเข้าตัวที่ i
wi คือ ค่าน้ำหนักของนิวรอนตัวที่ i
z คือ จำนวนนิวรอนชั้นข้อมูลเข้า
b คือ ค่าความโน้มเอียง
i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง z

3. ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (SVM: Support Vector Machine)

วิธีซับพอร์ทเวกเตอร์แมชชีน คือ วิธีที่ใช้ในการหาระนาบการตัดสินใจของการแบ่งข้อมูลเป็น 2 ส่วน โดยการใช้สมการเส้นตรงในการแบ่งข้อมูล 2 กลุ่มออกจากกัน เพื่อลดการเกิดข้อผิดพลาดในการทำนายลง และเพิ่มระยะแยกแยะให้มากที่สุด โดยมีสมการ ดังนี้ (Ngernmoon *et al*., 2017) กำหนดให้ (xi, yi),…(xn, yn) เป็นตัวอย่างที่ใช้สำหรับการสอน n คือ จำนวนข้อมูลตัวอย่าง m คือ จำนวนมิติข้อมูลเข้า y คือ ผลลัพธ์มีค่า + 1 หรือ - 1

$$(xi, yi),...(xn, yn) \text{ เมื่อ } x \in Rm, y \in \{+1,-1\} \quad (2)$$

ปัญหาเชิงเส้น มิติข้อมูลขนาดสูง แบ่งเป็น 2 กลุ่ม โดยระนาบตัดสินใจ คำนวณได้ดังสมการ เมื่อ w คือ ค่าน้ำหนัก b คือ ค่า bias สมการ ใช้สำหรับจำแนกประเภทของข้อมูล (w*x)+b=0

$$(w*x)+b>0 \text{ ถ้า } yi = +1 \text{ และ } (w*x)+b<0 \text{ ถ้า } yi = -1 \quad (3)$$

ซัพพอร์ทเวกเตอร์แมชชีนมีเคอร์เนลฟังก์ชัน (Kernel Function) ที่สามารถประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาได้หลายวิธี โดยผู้วิจัยต้องเลือกเคอร์เนลให้เหมาะสมกับลักษณะข้อมูล

7. การวัดค่าความถูกต้อง

ในการหาค่าความถูกต้องของการใช้เทคนิคเหมืองข้อมูลสำหรับการแบ่งกลุ่มข้อมูล ได้มีการใช้คอนฟิวส์ชั่นเมตริกซ์ในการประเมินผลลัพธ์ของการทำนาย และหาสัดส่วนของผลลัพธ์ในการทำนายของโมเดลที่นำมาใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 1 คอนฟิวส์ชั่นเมตริกซ์

	Actual value	Total		
	p'	*p*	*n*	
Prediction outcome		True Positive: TP	False Positive: FP	P'
	n	False Negative: FN	True Negative: TN	N'
	Total	P	N	

โดยกำหนดความหมายดังนี้

True Positive (TP) = จำนวนตัวอย่างที่เป็นจริง และตัวจำแนกทำนายว่าเป็นจริง

False Positive (FP) = จำนวนตัวอย่างที่ไม่เป็นจริง และตัวจำแนกทำนายว่าจริง

False Negative (FN) = จำนวนตัวอย่างที่เป็นจริง และตัวจำแนกทำนายว่าไม่เป็นจริง

True Negative (TN) = จำนวนตัวอย่างที่ไม่เป็นจริงและตัวจำแนกทำนายว่าไม่จริง

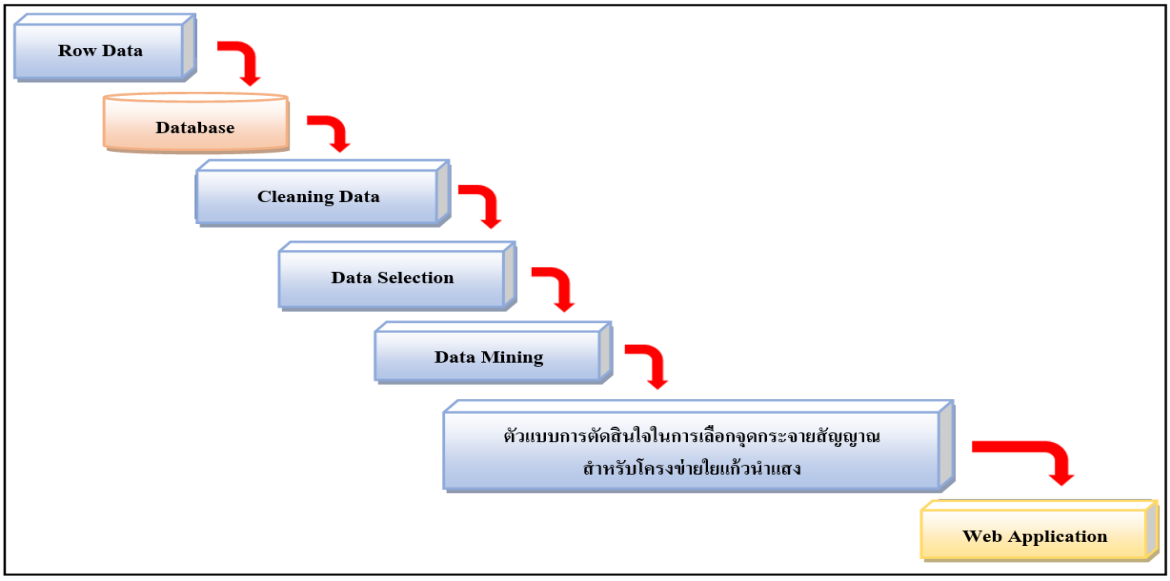
ค่าความถูกต้อง (Accuracy) สมการที่ใช้

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (4)$$

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการออกแบบการทำเหมืองข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ได้มีผลของการออกแบบการทำเหมืองข้อมูล โดยสามารถสรุปออกเป็น 7 ได้แก่ 1) การนำข้อมูลมาเตรียมประมวลผล 2) ออกแบบและสร้างฐานข้อมูลจากชุดข้อมูล 3) ทำการกรองข้อมูลที่มีการเก็บเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะต้องผ่านการกรองข้อมูล เพื่อทำการเลือกข้อมูลที่ตรงประเด็น กับกระบวนการที่กำลังจะดำเนินการ 4) ทำการคัดเลือกข้อมูลที่จะนำมาเข้าสู่กระบวนการทำเหมืองข้อมูล รวมไปถึงข้อมูลที่ต้องการนำออกจากฐานข้อมูล เพื่อสร้างกลุ่มของข้อมูลขึ้นมาใหม่ จัดให้อยู่ในรูปแบบเดียวกัน และมาตรฐานที่เหมาะสม 5) เหมืองข้อมูลโดยการนำข้อมูลที่ผ่านขั้นตอนข้างต้นเข้าสู่กระบวนการเรียนรู้ด้วยเครื่อง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง 6) การประมวลผลที่ผ่านการทำเหมืองข้อมูลทำให้ได้ระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง และ 7) ได้เว็บแอปพลิเคชันระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง เพื่อนำไปใช้งาน



ภาพที่ 12 การออกแบบเหมืองข้อมูล

2. ผลการเปรียบเทียบวิธีการจำแนกประเภทของข้อมูล

ผลการเปรียบเทียบวิธีการจำแนกประเภทของข้อมูล มีการเปรียบเทียบวิธีการจำแนกประเภทของข้อมูลทั้ง 3 วิธี ได้แก่ เคเนียเรสเนเบอร์ นิวรอลเน็ตเวิร์ก และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน โดยมีชุดข้อมูลที่นำมาทดสอบจำนวน 21,000 แถว และนำมาเปรียบเทียบความแม่นยำในการเลือกจุดกระจายสัญญาณของโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่คัดเลือกด้วยคน ซึ่งวัดความแม่นยำจากระยะของตำแหน่งการติดตั้งจุดกระจายสัญญาณไปที่บ้านลูกค้า ผลการทดลองพบว่า วิธี เคเนียเรสเนเบอร์ ให้ค่าความแม่นยำมากที่สุด เท่ากับ 97.88% จึงเหมาะแก่การนำมาใช้ในการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง แทนคนเลือก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Akdeniz and Becerikli (2019) ที่ได้ทำการศึกษา Performance Comparison of Support Vector Machine, K-Nearest-Neighbor, Artificial Neural Networks, and Recurrent Neural networks in Gender Recognition from Voice Signals ผลการวิจัยพบว่า การจำแนกเพศจากเสียงด้วยวิธี เคเนียเรสเนเบอร์ ให้ประสิทธิภาพมากที่สุดค่าความถูกต้องเท่ากับ 87.04 ดังนั้นวิธีการจำแนกปนะเภทของข้อมูลแบบเคเนียเรสเนเบอร์ที่ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุด จึงเหมาะแก่การนำไปใช้งาน

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบวิธีการจำแนกประเภทของข้อมูล

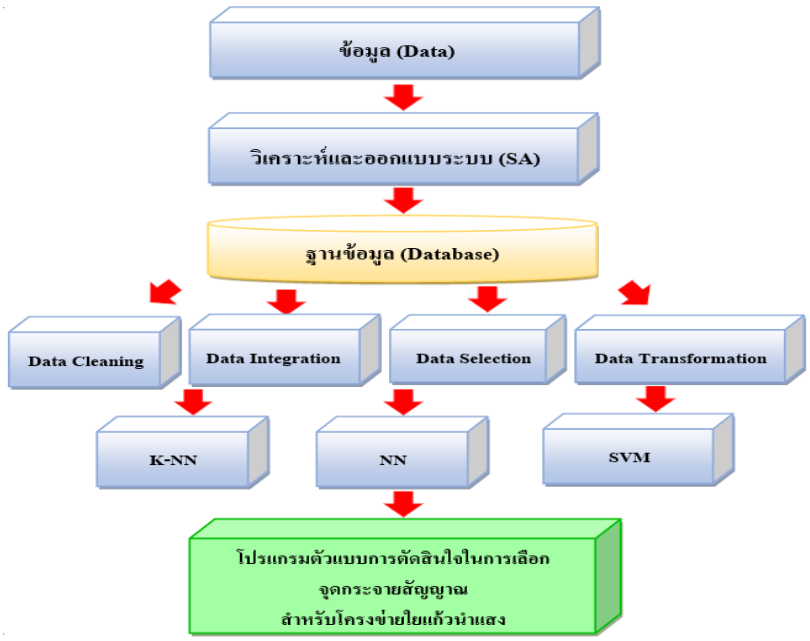
ข้อมูล	วิธีเคเนียเรสเนเบอร์ (K-NN)	วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (NN)	วิธีซัพพอร์ตเวกเตอร์เมชชีน (SVM)
Kappa statistic	0.92	0.88	0.92
Mean Absolute Error	0.03	0.02	0.23
TPR	0.97	0.93	0.95
FPR	0.02	0.09	0.03
Precision	0.96	0.62	0.96
Recall	0.97	0.93	0.95
F-measure	0.96	0.64	0.95
Accuracy	97.88%	93.71%	95.74%

ผลการเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธี ค่าความถูกต้องของวิธี K-NN มีค่าความถูกต้องสูงที่สุดในทั้งหมด 3 วิธี เนื่องจากลักษณะของชุดข้อมูลในการคัดเลือกจุดกระจายสัญญาณเป็นการดูจากลักษณะของเพื่อนบ้าน ซึ่งเป็นหลักการเดียวกันกับวิธี K-NN ที่ดูจากเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จึงมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 97.88% ซึ่งสูงกว่าวิธี NN และ SVM

3. ผลการออกแบบระบบสถาปัตยกรรม (System Architecture)

ในงานวิจัยนี้ได้มีผลการออกแบบสถาปัตยกรรม (System Architecture) ของระบบที่แสดงถึงลำดับของขั้นตอนในการประมวลผลของข้อมูล เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้อง และแม่นยำมากที่สุด ด้วยวิธีการเรียนรู้ของเครื่อง ซึ่งมีลำดับขั้นตอนในการทำงาน ดังนี้ 1) การจัดเตรียมข้อมูล เพื่อทำการ

วิเคราะห์ และออกแบบ 2) นำข้อมูลที่เตรียมไว้เข้าสู่การวิเคราะห์ และออกแบบ 3) ออกแบบฐานข้อมูลของ 4) การทำ Data Cleaning 5) การทำ Data Integration 6) การทำ Data Selection 7) การทำ Data Transformation 8) ทำการคัดเลือกขั้นตอนการติดตั้งที่ดีที่สุดด้วยวิธีเคเนียเรสเนเบอร์ นิวรอลเน็ตเวิร์ก และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง และ 9) ได้โปรแกรมตัวแบบการตัดสินใจในการคัดเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง เพื่อนำไปใช้งาน แสดงดังภาพที่ 13

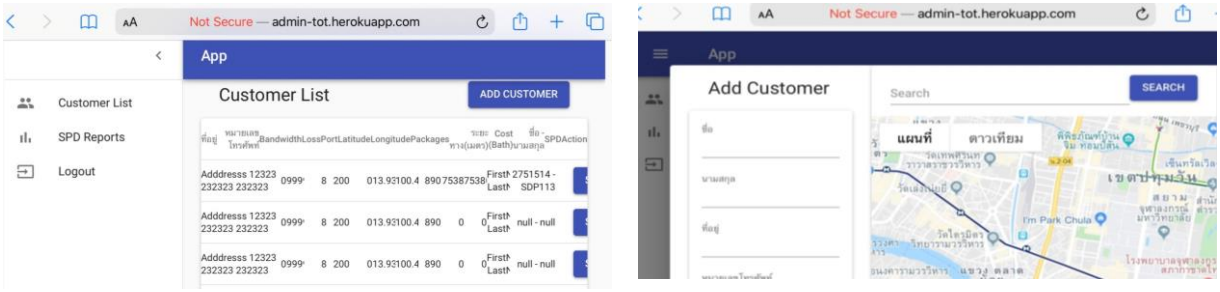


ภาพที่ 13 สถาปัตยกรรมของระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง

4. ผลการพัฒนาระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง

ผลการพัฒนาระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง พบว่า การพัฒนาระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง ทำให้ได้เครื่องมือที่ช่วยในการเลือกจุดกระจายสัญญาณในหน่วยงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการนำโครงข่ายใยแก้วนำแสงมาใช้เพื่อให้ได้รับความเร็วมากยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ นัฐพงศ์ ส่งเนียม ที่ได้ทำการศึกษาเรื่อง การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการขยะสาหรับศูนย์เรียนรู้การจัดการขยะแบบครบวงจร ผลการวิจัยพบว่า ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Songneam, 2020)

1. หน้าจอเมนูหลัก ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการใช้งานของผู้ใช้งาน เพื่อเข้าไปใช้งานฟังก์ชันต่างๆ ของเว็บไซต์ โดยสามารถเพิ่มข้อมูลลูกค้าได้ด้วยปุ่ม ADD CUSTOMER และมีการแสดงรายละเอียดของลูกค้าที่อยู่ในระบบ แสดงดังภาพที่ 14 (ก)



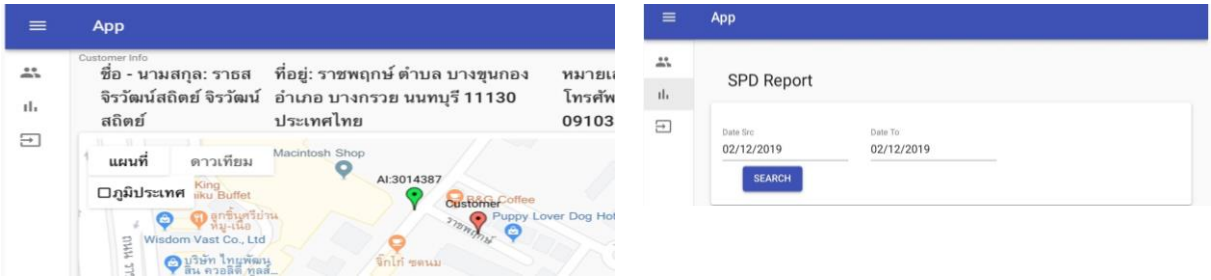
(ก) (ข)

ภาพที่ 14 (ก) หน้าจอเมนูหลัก (ข) หน้าจอการเพิ่มข้อมูลลูกค้าที่ต้องการค้นหาตำแหน่งจุดกระจายสัญญาณ (SDP)

2. หน้าจอเพิ่มข้อมูลลูกค้า ทำหน้าที่ในการเพิ่มข้อมูลของลูกค้าหลังจากกดปุ่ม ADD CUSTOMER จะมีช่องว่างให้ผู้ใช้งานได้ป้อนข้อมูลของลูกค้าเพื่อทำการคัดเลือกจุดจุดกระจายสัญญาณ แสดงดังภาพที่ 14 (ข)

3. หน้าจอแสดงจุดการยืนยันจุดกระจายสัญญาณ ทำหน้าที่แสดงจุด และตำแหน่งต่างๆ ของจุดกระจายสัญญาณ ในแผนที่ที่แสดงผ่านหน้าจอเว็บไซต์ โดยมีรายละเอียด แสดงดังภาพที่ 15 (ก)

4. หน้าจอแสดงการออกรายงาน ทำหน้าที่ให้ผู้ใช้งานออกแบบรายงานของแต่ละจุดติดตั้งจุดกระจายสัญญาณของระบบ โดยทำการกำหนดชนิดของข้อมูลที่ต้องการในการออกแบบรายงานจุดกระจายสัญญาณในช่วงนั้นๆ โดยเลือกข้อมูลที่ต้องการพิมพ์รายงานผ่านเว็บไซต์ 15 (ข)



(ก) (ข)

ภาพที่ 15 (ก) หน้าจอแสดงจุดการยืนยันตำแหน่งของจุดกระจายสัญญาณ (SDP)
(ข) หน้าจอแสดงการออกรายงาน

5. ผลการประเมินความพึงพอใจ

ผลการประเมินความพึงพอใจ ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้จากกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 100 คน โดยแบ่งเป็น 3 ด้าน ได้แก่ 1) ความพึงพอใจของผู้ปฏิบัติงานต่อข้อมูลนำเข้าอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.65, S.D. = 0.45) 2) ความพึงพอใจของผู้ปฏิบัติงานต่อกระบวนการทำงานของระบบอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.68, S.D. = 0.51) และ 3) ความพึงพอใจของผู้บริหารต่อผลลัพธ์อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.77, S.D. = 0.42) ภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.7, S.D. = 0.46) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เสกสรร วิลัยลักษณ์ และคณะ ได้ทำการศึกษา การใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูลเพื่อพยากรณ์ผลการเรียนของนักเรียนโรงเรียนสาธิตแห่ง

มหาวิทยาลัยเกษตร์ศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ศูนย์วิจัยและพัฒนาการศึกษา ผลการวิจัยพบว่า 1) ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.06 อยู่ในระดับดี 2) ผลการประเมินความเชื่อมั่นของผู้ใช้งานระบบพยากรณ์ ค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.27 อยู่ในระดับดี ดังนั้นระบบที่พัฒนาขึ้นจึงเหมาะแก่การนำไปใช้งาน (Vilailuck *et al*., 2015)

ตารางที่ 3 ผลการประเมินความพึงพอใจ

ลำดับที่	หัวข้อ	$\bar{x}$	S.D.	หมายเหตุ
1	ความพึงพอใจของผู้ปฏิบัติงานต่อข้อมูลนำเข้า	4.65	0.45	มากที่สุด
2	ความพึงพอใจของผู้ปฏิบัติงานต่อกระบวนการทำงานของระบบ	4.68	0.51	มากที่สุด
3	ความพึงพอใจของผู้บริหารต่อผลลัพธ์	4.77	0.42	มากที่สุด
	รวม	4.7	0.46	มากที่สุด

สรุป

การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนเว็บ ระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง ผลการวิจัยพบว่า 1) ระบบการตัดสินใจในการเลือกจุดกระจายสัญญาณสำหรับโครงข่ายใยแก้วนำแสง โปรแกรมมีการทำงานได้ครบทุกฟังก์ชันของการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ 2) ผลการเปรียบเทียบวิธีการจำแนกประเภทของข้อมูลทั้ง 3 วิธี จากชุดข้อมูลที่นำมาทดสอบจำนวน 21,000 แถว พบว่าวิธีเคเนียเรสเนเบอร์ ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุด เท่ากับ 97.88% ซึ่งมีความแม่นยำที่สูง 3) ผลการประเมินความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่าง 100 คน ภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x}$ = 4.7, S.D. = 0.46) โดยต่อไปจะทำการพัฒนาเป็นรูปแบบ โมบายแอปพลิเคชัน เพื่อความสะดวกสบายต่อการใช้งาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร ที่ได้จัดทำหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาการจัดการเทคโนโลยี ทำให้นักศึกษาสามารถนำความรู้ไปใช้ในการจัดทำงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Akdeniz, F. and Becerikli, Y. 2019. Performance Comparison of Support Vector Machine, K-Nearest-Neighbor, Artificial Neural Networks, and Recurrent Neural networks in Gender Recognition from Voice Signals, pp. 1-4. *In* **2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT).** IEEE, Ankara, Turkey.

Ding, Z., Yang, D., Liu, K., Jiang, J., Du, Y., Li, B., Shang, M. and Liu, T. 2017. Long-Range OFDR-Based Distributed Vibration Optical Fiber Sensor by Multicharacteristics of Rayleigh Scattering. **IEEE Photonics Journal** 9(5): 1-11.

Ngernmoon, T., Moeikham, P. and Tippachon, W. 2017. Strawberry Ripeness Classification by Support Vector Machine. **Naresuan**

University Engineering Journal 12(2): 55-62. (in Thai)

Royal Thai Government Gazette. 2018. **National strategy announcement (A.D. 2018 - 2037).** Royal Thai Government Gazette. Available Source: http://nscr.nesdb.go.th/wp-content/uploads/2019/10/National-Strategy-Eng-Final-25-OCT-2019.pdf, January 30, 2019.

Sasilawan, K. 2019. **The Office of the National Broadcasting and Telecommunications Commission responded to the government's policy of sending 3-year free internet access to low-income households.** Office of The National Broadcasting and Telecommunications Commission. Available Source: https://www.nbtc.go.th/Home.aspx?lang=en-us, January 30, 2019. (in Thai)

Songneam, N. 2020. Development of Waste Management Information System for One-stop Waste Management Learning Center. **RMUTSV Research Journal** 12(3): 506-521. (in Thai)

Sriurai, W. 2014. Patients Classification of Metabolic Syndrome Using Feature Selection and Artificial Neural Network. **Srinakharinwirot Science Journal** 30(1): 91-102. (in Thai)

Teerarassamee, P. 2015. The Methodology to Find Appropriate K for K-Nearest Neighbor Classification with Medical Datasets. Degree of Master of Engineering in Computer Engineering, Suranaree University of Techonology. (in Thai)

Thamsiri, D. and Meesad, P. 2011. Ensemble Data Classification Based on Decision Tree, Artificial Neuron Network and Support Vector Machine Optimized by Genetic Algorithm. **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok** 21(2): 293-303. (in Thai)

TOT public company limited. 2017. **Optical Fiber Termination Kit.** tot public company limited. Available Source: https://www.tottcal.com/docs/PublicArticle/OFTK%20(Full%20article).pdf, January 30, 2019. (in Thai)

Vilailuck, S., Jaroenpuntaruk, V. and Wichadakul, D. 2015. Utilizing Data Mining Techniques to Forecast Student Academic Achievement of Kasetsart University Laboratory School Kamphaeng Saen Campus Educational Research and Development Center. **Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University** 2(2): 1-17. (in Thai)

Wang, Z. 2017. **Dual-polarization two-port fiber-optic gyroscope.** Springer Theses book series (Springer Theses), Singapore.