

วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

คณะกรรมการที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.อุทัยรัตน์ ณ นคร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง จักรใจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.เผด็จศักดิ์ จารยะพันธุ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.สุวัจน์ ธัญรส

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ทองหนู่น้อย

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ มะเห

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สงรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพร ธารางกูร

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุคคณิง ณ ระนอง

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

วารสารวิจัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.อลงกลด แทนอมทอง

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง จุฑาเกตุ

คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Professor Ir. Dr. Anuar Mat Safar

University Malaysia Perlis, Malaysia

Professor Mitsuhiro Sano

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

Professor Qinghua Zhang

Chongqing University of Posts and Telecommunications, China

Professor Zhangyong Li

Chongqing University of Posts and Telecommunications, China

Professor Clarissa Yvonne Domingo

Central Luzon State University, Philippines

Professor Virginia Venturina

Central Luzon State University, Philippines

Professor Noraine Medina

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ravelina Velasco

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ronaldo Alberto

Central Luzon State University, Philippines

Professor Edilyn Lansangan

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ariel Mactal

Central Luzon State University, Philippines

Associate Professor Dr. David Crookall

University of Nice Sophia Antipolis, France

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

Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Indonesia

รองศาสตราจารย์ณัฐวรรธน์ ปภาวสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิ่น จันจุฬา

คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติรี หอมเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริโรตม์ เกตุแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

รองศาสตราจารย์ ดร.พูนสุข อุดม

คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ เกชา คูหา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ ประพฤติ 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 สมวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วัชรม ฉันทรางกูร

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ดร.ทรงสิน ชีระกุลพิศุทธิ์

คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ดร.ทักษิณ ขาวเนียม

คณะคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
ดร.กิตติมา ตันติหาชัย

คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

นางสาวกุลิกา ชนะเสวตร

วิทยาลัยการโรงแรมและการท่องเที่ยว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

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

สารบัญ

ผลของสารละลายบัฟเฟอร์ สารไอโรโพรเทคแทนท์ และอัตราการลดอุณหภูมิ.....	277-291
ที่มีต่อการเคลื่อนที่สเปิร์มปลาตกอุยหลังการแช่แข็ง	
วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย ปญญา อ้นขวัญเมือง ตริรัตน์ สุขสวัสดิ์ และ สุบัณฑิต นิมรัตน์	
การใช้แคลเซียมแลคเตทในการชะลอเกิดสีน้ำตาลและการเสื่อมสภาพ.....	292-306
ของผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภค	
พฤติยา นิลประพุกษ์ จิตพร อุตสาหะ และ ธวินันท์ แก้วแคน	
กำลังอัด การดูดซึมน้ำ และการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตบล็อกใช้.....	307-320
วัสดุประสานกระตุนด้วยต่างจากเถาถ่าน	
อรรคเดช อับดุลมาดิน ปกป้อง รัตนชู เซาฟิร คีอราแม รัตนศักดิ์ หงษ์ทอง และ อภัย เบญจพงศ์	
การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายบริเวณ.....	321-331
ลุ่มน้ำบางปะกง ปี 2559	
เชษฐโชค จินตเศรษฐี วิชญา กันบัว ภัทราวุธ ไทยพิชิตบุรพา จริยวดี สุริยพันธุ์ และ อนุกุล บุรณประทีปรัตน์	
การศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาผสมชาชนิดแห้ง.....	332-347
กมลทิพย์ กรรไพบระ จริยา สุขจันทร์ ฐไธรา มะ และ นรมา สีเต๊ะ	
พฤติกรรมและกำลังของเสาท่อเหล็กหน้าตัดกลมกรอกคอนกรีต.....	348-360
ที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	
นำชัย จ้อยสูงเนิน จักขดา ธำรงวุฒิ เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์ และ สิทธิชัย แสงอาทิตย์	
ผลของสารสกัดหยาบจากสาหร่ายขนาดเล็กต่อการยับยั้งเชื้อราก่อโรคผลเน่าในเงาะ.....	361-372
กิตติวรรณ พรหมมิตร จิดาภา หยั่งกุล มิตี เจียรพันธุ์ วิณา จิรัฐวิธณ์กุล ชัยสาร จิรนนท์ กล่อมมนรา แก้วรักษา และ พชร หลุ่มหม่าน	

การจำแนกภาพสมุนไพรรจีนด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกผ่านแอปพลิเคชัน.....	373-389
บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์	
ณัฐวดี หงษ์บุญมี และ ลดาภาณี วงษ์พา	
ดัชนีที่เหมาะสมสำหรับการสำรวจพื้นที่ชุ่มน้ำด้วยข้อมูลจากระยะไกล.....	390-407
เจนจิรา พิบุญย์ และ ดร.ณรรณ คำธเรศเกียรติ	
การพยากรณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	408-422
จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย	
ณภัฏจันทร์ ด่านสวัสดิ์	
การประเมินปริมาณโลหะหนักในดินชั้นบนและผืนหลังคาใน 4 เขต.....	423-438
ของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรี	
อุทุมพร สมพงษ์	
การพัฒนาวัสดุปลูกพืชจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเชิงการค้า.....	439-450
สามารถ ใจเตี้ย สิวลี รัตนปัญญา จันจิราภรณ์ สท้านไทรภพ	
และ นัตรศิริ วิภาวิน	
การพัฒนาผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลีนจืดน้ำตาลเสริมแคลเซียม.....	451-464
ปาริชาติ สงสนันท์ ทศยาภรณ์ จิตตะปาโด ศิริลักษณ์ เจริญรัตน์	
รุ่งอรุณ ศาสนาญาติ และ กนกพร สัยยะสิทธิพานิชย์	
การผลิตเครื่องดื่มนมกระบอก (<i>Irvingia malayana</i> Oliv. ex A.W. Benn.).....	465-476
กัญญารักษ์ จันทะมาลา ธฤต อภิสิทธิ์วงศ์ และ ขวัญหทัย แซ่ทอง	
การศึกษาอัตราส่วนความหนาและวัสดุชั้นแกนกลางจากเส้นใยไฟเบอร์และพลาสติก.....	477-493
โพลีโพรพิลีนรีไซเคิลต่อสมบัติทางเสียงและทางกลของวัสดุเชิงประกอบแซนด์วิช	
นพณัฐ จาตุรงค์ลักษณ์ และ ธเนศ รัตนวิไล	
ตัวแบบพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.).....	494-510
จิโรจน์ แซ่ฮึง วรฐา มินแสน และ พิมพกา ธานินพงศ์	

ลักษณะทางเคมี กายภาพ จุลชีววิทยา และคุณค่าทางโภชนาการของ..... 511-520

ผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกด้วยหอมทอง

ธีรภาพ ปานคล้าย ชมุก สร้างศรีวงศ์ เอรีย์ ดีโว

และ จีรวัดน์ เจริญอารีย์

การเจริญเติบโตและผลผลิตของดาวเรืองที่ปลูกในจังหวัดสงขลา..... 521-536

พงษ์ศักดิ์ มานสุริวงศ์ วิชัย หวังวโรดม และ สมปอง เตชะโต

Synthesis, Characterization, Photo-Physical Properties, Quenching Reaction..... 537-551

and Anticancer Activity Against Cancer Cell Lines of Ir(III) Complex

Containing PPh₃ Ligand

Rattanyu Kongpan, Saowanit Saithong, Juangjan Wuttiapan,

Avirut Chinkulkijniwat and Nararak Leesakul

การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้จากไม้ไผ่ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิค..... 552-569

การกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคั่นแซ

จุฬาลักษณ์ โรจนานุกุล สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์ ชาตรี หอมเขียว

อภิชาล ทองมั่ง กำเนิดว่า และ ปรีชญา ชุมศรี

ผลของสารละลายบัฟเฟอร์ สารไครโอโพรเทคแทนท์ และอัตราการลดอุณหภูมิ ที่มีต่อการเคลื่อนที่ของสเปิร์มปลาดุกอุยหลังการแช่แข็ง

Effects of Extenders, Cryoprotectants and Freezing Rate on Post-Thaw Sperm Motility of Walking Catfish (*Clarias macrocephalus*)

วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย^{1*} ปริญญญา อุ่นขวัญเมือง¹ ตริรัตน์ สุขสวัสดิ์² และ สุนันจิต นิมรัตน์³

Verapong Vuthiphandchai^{1*}, Patinya Ounkwanmuang¹, Treerat Sooksawat² and Subuntith Nimrat³

Received: 22 June 2021, Revised: 1 January 2022, Accepted: 27 May 2022

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารละลายบัฟเฟอร์ สารไครโอโพรเทคแทนท์ และอัตราการลดอุณหภูมิ ต่อการเคลื่อนที่ของสเปิร์มปลาดุกอุย (*Clarias macrocephalus*) ที่แช่แข็งด้วยวิธีการใช้เครื่องมือแช่แข็งอัตโนมัติ เปรียบเทียบกับวิธีการใช้กล่องโฟม การทดลองที่ 1 น้ำเชื้อสดปลาดุกอุยที่เจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ Calcium-free Hank's Balanced Salt Solution (Ca-F HBSS) ผสมกับสารไครโอโพรเทคแทนท์ 6 ชนิด คือ Dimethyl sulfoxide (DMSO), Methanol, Glycerol, Sucrose, Ethylene glycol และ Propylene glycol ที่ความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 5%, 10% และ 15 % และแช่แข็งด้วยอัตราการลดอุณหภูมิเท่ากับ -3, -5 และ -8 องศาเซลเซียส/นาที่ พบว่าการเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการละลายมีค่าสูงสุด ($p < 0.05$) เมื่อแช่แข็งด้วย 10%DMSO และใช้อัตราการลดอุณหภูมิ -8 องศาเซลเซียส/นาที่ เปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่นที่ใช้สารไครโอโพรเทคแทนท์และอัตราการลดอุณหภูมิต่างกัน การทดลองที่ 2 ทำโดยเจือจางน้ำเชื้อสดปลาดุกอุยในสารละลายบัฟเฟอร์ 3 ชนิด คือ Ca-F HBSS, 0.9% NaCl และ Extender 7 ที่มี 10% DMSO ก่อนแช่แข็งภายในกล่องโฟมที่ระดับความสูงเหนือผิวหน้าในโตรเจนเหลว 2, 4 และ 6 เซนติเมตร เป็นเวลานาน 5, 10 และ 15 นาที พบว่า การแช่แข็งด้วย Ca-F HBSS และ 10%DMSO ที่ความสูง 6 เซนติเมตร เหนือผิวหน้าในโตรเจนเหลวนาน 10 นาที ทำให้การเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการละลายมีค่าสูงสุด ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ ที่ต่างกันทั้งหมด ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็น

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

¹ Department of Aquatic Science, Faculty of Science, Burapha University, Saensuk, Muang, Chon Buri 20131, Thailand.

² โปรแกรมวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

² Biological Science Program, Faculty of Science, Burapha University, Saensuk, Muang, Chon Buri 20131, Thailand.

³ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

³ Department of Microbiology, Faculty of Science, Burapha University, Saensuk, Muang, Chon Buri 20131, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): verapong@buu.ac.th Tel: 0 3810 3093

ว่าวิธีการแช่แข็งโดยใช้กล่องโฟมมีศักยภาพในการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาดุกอุย และยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการเพาะเลี้ยงและการอนุรักษ์พันธุ์สัตว์น้ำชนิดอื่นต่อไป

คำสำคัญ: ปลาดุกอุย, น้ำเชื้อ, สเปิร์ม, สารละลายบัฟเฟอร์, สารโครีโอโพรเทคแทนท์

ABSTRACT

This research was aimed to study the effects of extenders, cryoprotectants, and freezing rate on post-thaw sperm motility of walking catfish (*Clarias macrocephalus*) based on the use of the controlled-rate programmable freezer compared with styrofoam box. In the first experiment, freshly collected semen was diluted in Calcium-free Hank's balanced salt solution (Ca-F HBSS) containing six different cryoprotectants including Dimethyl sulfoxide (DMSO), methanol, glycerol, sucrose, ethylene glycol, and propylene glycol at the final concentrations of 5%, 10% and 15% and the freezing rates of -3, -5, and -8°C/min. The highest post-thaw sperm motility ($p<0.05$) was obtained from the treatment using 10% DMSO and a freezing rate of -8°C/min, compared with other treatments using various combinations of cryoprotectants and freezing rate. The second experiment was performed by diluting fresh semen in one of the three extenders: Ca-F HBSS, 0.9% NaCl, and Extender 7 containing 10% DMSO before freezing within the styrofoam box at 2, 4, and 6 cm above the surface of liquid nitrogen (LN₂) for 5, 10, and 15 minutes. The use of Ca-F HBSS with 10% DMSO and freezing at 6 cm above LN₂ surface for 10 minutes had the highest post-thaw sperm motility ($p<0.05$) compared with other treatments. These results suggested that the styrofoam box method had a potential for cryopreservation of *C. macrocephalus* sperm, which could be applied for aquaculture and conservation of other aquatic animals.

Key words: catfish, semen, sperm, extenders, cryoprotectants

บทนำ

ปลาดุกอุย (*Clarias macrocephalus*) เป็นปลาน้ำจืดพื้นเมืองของไทย และมีราคาจำหน่ายสูงกว่าปลาดุกชนิดอื่นๆ เช่น ดูก้าน ดูกเทศ ดูกลำพัน เป็นต้น โดยในอดีตประมาณ 40 ปีที่ผ่านมา มีการเลี้ยงปลาดุกอุยมากบริเวณภาคกลางของประเทศ เช่น ปทุมธานี สมุทรปราการ ชลบุรี เป็นต้น แต่ในปัจจุบัน ปลาดุกอุยกลับเริ่มหาได้ยากมากในธรรมชาติ เนื่องจากแหล่งที่อยู่อาศัยที่เหมาะสมในธรรมชาติมีน้อยลงจากการขยายตัวของชุมชน และคุณภาพ

สิ่งแวดล้อมในน้ำ ทำให้ประชากรปลาดุกอุยในธรรมชาติหาได้ยากมาก อย่างไรก็ตาม ปลาดุกอุยแม้จะเป็นปลาที่มีรสชาติเป็นที่นิยมของผู้บริโภค แต่โตช้า และมีความต้านทานต่อโรคต่ำ ทำให้การเพาะเลี้ยงปลาดุกอุยเชิงพาณิชย์ในปัจจุบันมีค่อนข้างจำกัด โดยในภาคการผลิตของประเทศไทยนิยมเลี้ยงปลาดุกผสมเชิงพาณิชย์ โดยการผสมเทียมข้ามสายพันธุ์ระหว่างแม่ปลาดุกอุย (*Clarias macrocephalus*) กับพ่อปลาดุกเทศ (*Clarias gariepinus*) ได้ปลาดุกลูกผสม (Hybrid catfish) ที่เรียกว่า ปลาดุกบิ๊กอุย ซึ่งโตเร็ว

และมีความต้านทานโรคสูง ได้รับความนิยมน้อยลงอย่างแพร่หลายทั่วประเทศ โดยมากกว่า 90% ของผู้เพาะเลี้ยงปลาดุกในบ่อดินในประเทศไทยขณะนี้ เป็นปลาดุกบิ๊กอุย ซึ่งสถิติการประมงแห่งประเทศไทยในปี พ.ศ. 2561 ได้รายงานว่าเป็นปลาดุกจัดเป็นปลาน้ำจืดที่มีการเลี้ยงเป็นอันดับ 2 รองจากปลานิล โดยในปี พ.ศ. 2561 ผลผลิตปลาดุกจากการเพาะเลี้ยงมีปริมาณรวม 106,200 ตัน คิดเป็นประมาณ 24.9% ของผลผลิตสัตว์น้ำจืดที่เลี้ยงในประเทศไทย ซึ่งผลผลิตปลาดุกที่ได้นี้มีมูลค่ารวม 4,667.2 ล้านบาท (Fisheries Development Policy and Strategy Division, 2018)

ด้วยเหตุที่แม่ปลาดุกอายุได้ถูกนำไปผสมข้ามพันธุ์กับพ่อพันธุ์ปลาดุกเทศเพื่อผลิตปลาดุกบิ๊กอุยสำหรับการเลี้ยงปลาดุกเชิงการค้าเป็นหลัก ทำให้การพัฒนาสายพันธุ์ปลาดุกถูกยกเลิกเลย แม้ว่าจะยังมีการเลี้ยงปลาดุกอุยในเฉพาะบางพื้นที่ของประเทศ แต่ผลผลิตปลาดุกอุยยังมีน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปลาดุกบิ๊กอุย อย่างไรก็ตาม การรักษาสายพันธุ์ปลาดุกอุยที่มีพันธุกรรมดีให้คงอยู่ ยังเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อประโยชน์การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและการอนุรักษ์สัตว์น้ำ เพราะแม่ปลาดุกอุยที่มีพันธุกรรมที่ดียังคงมีความจำเป็นสำหรับการใช้ในการผลิตปลาดุกบิ๊กอุย แนวทางหนึ่งที่เหมาะสมในการบริหารจัดการสายพันธุ์ปลาดุกอุยให้คงอยู่ สามารถทำได้โดยการนำน้ำเชื้อของปลาดุกอุยมาแช่แข็งและเก็บรักษาไว้ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) ที่มีอุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียสในลักษณะธนาคารน้ำเชื้อ (Sperm bank) โดยเทคโนโลยีการแช่แข็งน้ำเชื้อ (Semen cryopreservation) จัดเป็นเทคโนโลยีชีวภาพแขนงหนึ่งที่สามารถเก็บรักษาน้ำเชื้อให้มีคุณภาพดีได้นานเป็นปี (Gil *et al.*, 2017) จึงมีการนำมาเทคโนโลยีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้การแช่แข็งน้ำเชื้อของมนุษย์ และน้ำเชื้อสัตว์น้ำเศรษฐกิจหลายชนิด รวมทั้งสัตว์น้ำที่หาได้ยากหรือใกล้สูญพันธุ์ เช่น ปลาสวาย (Kwantong and Bart, 2003) ปลา

red seabream (Liu *et al.*, 2006) ปลา brown trout (Rusco *et al.*, 2020) ปลากะรังเสือ (Yang *et al.*, 2020) เป็นต้น เพียงแต่ต้องพัฒนาเทคโนโลยีแช่แข็งน้ำเชื้อสัตว์น้ำแต่ละชนิดให้มีความเหมาะสมแตกต่างกันไป ดังนั้น ถ้าสามารถพัฒนาเทคโนโลยีแช่แข็งน้ำเชื้อปลาดุกอุยที่มีประสิทธิภาพได้ เมื่อต้องการนำน้ำเชื้อปลาดุกอุยแช่แข็งมาใช้ประโยชน์ก็สามารถทำได้โดยนำมาละลาย (Thawing) แล้วนำไปผสมเทียมกับไข่ปลาดุกอุย ซึ่งจะเป็นประโยชน์โดยตรงต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และการอนุรักษ์สายพันธุ์สัตว์น้ำที่ดีมิให้สูญพันธุ์ (Ji *et al.*, 2004; Rusco *et al.*, 2020)

การเพาะขยายพันธุ์ปลาดุกอุย หรือปลาดุกชนิดอื่นๆ ต่างก็ประสบปัญหาที่ไม่สามารถรีดน้ำเชื้อโดยการกดบริเวณส่วนท้องได้เหมือนปลาชนิดอื่นๆ เพราะอวัยวะ (Testis) ของปลาดุกอุยอยู่ลึกในช่องท้อง จึงจำเป็นต้องมีการผ่าตัดนำเอาอวัยวะปลาดุกอุยเพศผู้เพื่อเอามาขยายให้ได้น้ำเชื้อมาใช้ในการผสมเทียม ดังนั้นในการเพาะขยายพันธุ์ปลาดุกอุยแต่ละครั้งจึงควรใช้น้ำเชื้อให้คุ้มค่าที่สุด เนื่องจากน้ำเชื้อสดที่เหลือใช้จะมีคุณภาพลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 1 ชั่วโมง ถ้าเก็บในตู้เย็นธรรมดา น้ำเชื้อสดของปลาดุกอุยอาจมีชีวิตรอดได้อย่างมากประมาณ 1 วันเท่านั้น (Vuthiphandchai *et al.*, 2009) ซึ่งการแช่แข็งและเก็บรักษาน้ำเชื้อปลาจะช่วยทำให้ลดความไม่แน่นอนในการขาดแคลนน้ำเชื้อปลาที่มีคุณภาพดี และยังสามารถนำน้ำเชื้อปลาแช่แข็งมาผสมเทียมกับไข่ปลาได้ตลอดเวลา โดยที่คุณภาพน้ำเชื้อปลาแช่แข็งที่เก็บรักษาไว้ ยังคงมีคุณภาพใกล้เคียงกับน้ำเชื้อสด (Ratanatrivong *et al.*, 2011; Vuthiphandchai *et al.*, 2015) อีกทั้งการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาดุกอุยยังมีค่อนข้างจำกัด เนื่องจากปลาดุกอุยเป็นปลาประจำถิ่นในประเทศเขตเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และการเพาะพันธุ์ปลาดุกอุยหรือปลาดุกชนิดอื่นๆ ของภาคการผลิตยังนิยมเพาะพันธุ์ผสมเทียมด้วยน้ำเชื้อสด แต่การพัฒนาเทคนิควิธีการแช่แข็ง

น้ำเชื้อปลาคูอุยให้มีคุณภาพดี จำเป็นต้องทราบชนิดของสารละลายบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำเชื้อ และชนิดของสารไครโอโพรเทคแทนท์ (Cryoprotectant) ที่เหมาะสมในการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูอุย เนื่องจากสารไครโอโพรเทคแทนท์ ทำหน้าที่ในการป้องกันการเกิดผลึกน้ำแข็ง (Ice crystal) ภายในเซลล์สเปิร์มขณะทำการลดอุณหภูมิน้ำเชื้อให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง นอกจากนี้ การแช่แข็งน้ำเชื้อยังสามารถทำได้ด้วยการใช้เครื่องมือแช่แข็งอัตโนมัติ (Controlled-rate programmable freezer) ซึ่งแม้จะสามารถลดอุณหภูมิของน้ำเชื้อได้อย่างเที่ยงตรงและมีประสิทธิภาพสูง แต่อาจมีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้สำหรับภาคการผลิตขนาดเล็ก เนื่องจากเครื่องมือแช่แข็งอัตโนมัติมีราคาแพงหลายแสนบาท หรือหลายล้านบาท (ขึ้นอยู่กับ specification ของเครื่อง) ซึ่งการลดต้นทุนของเทคโนโลยีแช่แข็งน้ำเชื้อปลาที่ทั่วโลกนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถทำได้โดยการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาในกล่องโฟม (Styrofoam box) ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่สลับซับซ้อนและมีความสะดวกในการบริหารจัดการในฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Yang *et al.*, 2020; Irawan *et al.*, 2010) ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาผลของสารละลายบัฟเฟอร์ สารไครโอโพรเทคแทนท์ และอัตราการลดอุณหภูมิ ที่มีต่อการเคลื่อนที่ของสเปิร์มปลาคูอุยที่แช่แข็งด้วยวิธีการใช้เครื่องมือแช่แข็งอัตโนมัติ เปรียบเทียบกับวิธีการแช่แข็งด้วยการใช้กล่องโฟม เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการนำน้ำเชื้อแช่แข็งของปลาคูอุยไปใช้ประโยชน์ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมปลาทดลอง

พ่อพันธุ์ปลาคูอุยที่สมบูรณ์เพศ (น้ำหนัก 280-360 กรัม) ถูกรวบรวมและลำเลียงจากบริเวณแหล่ง

เลี้ยงในจังหวัดฉะเชิงเทรา มายังโรงเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของภาควิชาวาริชศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา โดยควบคุมอุณหภูมิน้ำ และใส่เกลือแกงและยาเหลือง 1.5% และ 1 ppm ตามลำดับ เพื่อป้องกันความเครียดและการติดเชื้อระหว่างการลำเลียง พ่อพันธุ์ปลาคูอุยถูกนำมาพักไว้ในบ่อเลี้ยงนาน 7 วัน ให้อาหารเม็ด 35% โปรตีน วันละ 1 ครั้ง ในอัตรา 2-3% น้ำหนักตัว/วัน พร้อมกับเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อ 30-40% ทุกๆ 2-3 วัน โดยงดอาหาร 1 วันก่อนการทดลอง พ่อพันธุ์ปลาคูอุยทั้งหมดถูกฉีดกระตุ้นการสร้างน้ำเชื้อด้วยฮอร์โมน GnRH α (Gonadotropin-releasing hormone analogue; GnRH α) ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักปลา และ Motillium (Dopamine antagonist) ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักปลา การนำน้ำเชื้อปลาคูอุยออกมาทดลอง ทำการรวบรวมน้ำเชื้อหลังการฉีดฮอร์โมนกระตุ้นผ่านไปประมาณ 8 ชั่วโมง โดยสลับปลาด้วยน้ำแข็งและน้ำมันกานพลู (80 ppm) ล้างรอบบริเวณท้องให้สะอาดด้วยน้ำจืด เช็ดท้องให้แห้ง ทำการผ่าตัดบริเวณท้อง แล้วทำการรวบรวมอวัยวะเพื่อให้ได้น้ำเชื้อจากพ่อพันธุ์หลายตัวสำหรับนำไปใช้ในการทดลองตามวิธีการของ Vuthiphandchai *et al.* (2009) น้ำเชื้อที่มีเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่ของสเปิร์มที่สูง (มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์) ถูกนำมารวมกันจนแก้ว (Petridish) ที่สะอาดในลักษณะน้ำเชื้อรวม (Pooled semen) เพื่อลดความแปรปรวนคุณภาพน้ำเชื้อของพ่อพันธุ์ (Individual variation) โดยวางจานแก้วที่มีน้ำเชื้อสดไว้บนน้ำแข็งไม่เกิน 30 นาทีก่อนการทดลอง งานวิจัยเรื่องนี้ได้ผ่านการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในสัตว์มีกระดูกสันหลัง มหาวิทยาลัยบูรพา

2. การประเมินคุณภาพสเปิร์มของปลาคูอุย

น้ำเชื้อสดของปลาคูอุยที่มีคุณภาพทางกายภาพที่เหมาะสม ถูกนำมาประเมินความหนาแน่นของสเปิร์ม โดยการเจือจางน้ำเชื้อสดปริมาณ 10 ไมโครลิตร

ด้วย 0.9% NaCl โดยเจือจาง 5,000 เท่า ผสมให้เข้ากัน ใน Vial ด้วยการใช้ Vortexer จากนั้นนำน้ำเชื้อสดที่ถูกเจือจางไปหยดบน Haemocytometer และนับจำนวนสเปิร์มที่พบโดยการใช้อุปกรณ์จุลทรรศน์กำลังขยาย 400 เท่า และคำนวณหาความหนาแน่นของสเปิร์มเป็นจำนวนตัว/มิลลิลิตร โดยทำ 3 ซ้ำ

การประเมินการเคลื่อนที่ของสเปิร์มปลาถูกอุย ทำโดยหยดน้ำเชื้อสดปริมาณ 1 ไมโครลิตรลงบนกระจกสไลด์ที่สะอาดก่อนการหยดน้ำกลั่นลงไป 100 ไมโครลิตรพร้อมกับปิดด้วย Cover glass เบาๆ อย่างรวดเร็วเพื่อกระตุ้นให้สเปิร์มเคลื่อนที่ ทำการประเมินเปอร์เซ็นต์สเปิร์มเคลื่อนที่ (Percentage of motile sperm) ด้วยการใช้อุปกรณ์จุลทรรศน์กำลังขยาย 400 เท่าจากเกณฑ์การเคลื่อนที่ของสเปิร์มที่กำหนดไว้ 6 ระดับ (Subjective estimation) คือ สเปิร์มที่เคลื่อนที่ได้ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ตามวิธีการของ Vuthiphandchai *et al.* (2009, 2015) ทำการประเมิน 3 ซ้ำ โดยในแต่ละสไลด์ประเมินการเคลื่อนที่ของสเปิร์มอีก 3 ซ้าย่อย ภายในเวลาไม่เกิน 15 วินาทีหลังจากสเปิร์มถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ (รวม 9 ซ้าย่อย) สำหรับการประเมินการเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการแช่แข็ง (Post-thaw sperm motility) ของทุกชุดการทดลอง ทำโดยนำหลอดฟางหรือหลอด Cryovial ที่บรรจุน้ำเชื้อแช่แข็งมาละลายในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส หยดน้ำเชื้อแช่แข็งที่ละลายประมาณ 20 ไมโครลิตรลงบนกระจกสไลด์แล้วกระตุ้นสเปิร์มให้เคลื่อนที่ด้วยน้ำกลั่นปริมาณ 80 ไมโครลิตร และทำการประเมินเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่ของสเปิร์มตามวิธีการที่กล่าวมาแล้ว

3. การวางแผนการทดลอง

การวิจัยได้ดำเนินการทดลอง 2 ช่วง โดยในช่วงแรกศึกษาพัฒนาวิธีการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาถูกอุย โดยทำการศึกษา 3 ปัจจัย (ชนิดและความเข้มข้นของสารไครโอโพรเทคแทนท์ และอัตราการลด

อุณหภูมิที่เหมาะสมในการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาถูกอุย) โดยแบ่งเป็น 3 การทดลองย่อย เริ่มจากนำน้ำเชื้อปลาถูกอุยมาเจือจางด้วยสารละลาย Calcium-free Hank's Balanced Salt Solution (Ca-F HBSS; 0.8890 กรัม NaCl, 0.0440 กรัม KCl, 0.0130 กรัม $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0.0390 กรัม NaHCO_3 , 0.0070 กรัม KH_2PO_4 , 0.0220 กรัม $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.1110 กรัม glucose ใน 100 มิลลิลิตรน้ำกลั่น, pH 7.6, (Vuthiphandchai *et al.*, 2009) โดยการทดลองย่อยที่ 1 ใช้อัตราส่วนเจือจางน้ำเชื้อปลาถูกอุยต่อ Ca-F HBSS ปริมาตรเท่ากับ 1:1 จากนั้นนำน้ำเชื้อที่ถูกเจือจางผสมกับสารไครโอโพรเทคแทนท์ 6 ชนิด คือ Dimethyl sulfoxide (DMSO), Methanol, Glycerol, Sucrose, Ethylene glycol และ Propylene glycol ในอัตราส่วนปริมาตร 1:1 เพื่อให้ได้ความเข้มข้นสุดท้ายของไครโอโพรเทคแทนท์ (Final concentrations) ที่ 3 ระดับ (5%, 10% และ 15%) ผสมสารละลายน้ำเชื้อปริมาณ 0.2 มิลลิลิตร ใส่หลอดฟางขนาด 0.25 มิลลิลิตร ปิดหลอดฟางด้วยคีมคั้นไฟ ปลอ่ยให้น้ำเชื้ออยู่ในภาวะสมดุล (Equilibration time) ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 10 นาที ก่อนทำการแช่แข็งด้วยการใช้เครื่องมือแช่แข็งน้ำเชื้ออัตโนมัติ (Cryologic Pty Ltd รุ่น CL3000) โดยใช้อัตราการลดอุณหภูมิที่ -8 องศาเซลเซียส/นาที จากอุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส ถึง 0 องศาเซลเซียส พัก 0.5 นาที และลดอุณหภูมิต่อจากอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ถึง -40 องศาเซลเซียส พัก 0.5 นาที นำหลอดฟางที่บรรจุน้ำเชื้อแช่แข็งของทุกชุดการทดลองไปเก็บรักษาในถังไนโตรเจนเหลว 1 วัน การทดลองย่อยที่ 2 และ 3 ทำการเจือจางน้ำเชื้อและลดอุณหภูมิตามที่กล่าวมาข้างต้นเพียงแต่แช่แข็งด้วยอัตราการลดอุณหภูมิที่ -5 และ -3 องศาเซลเซียส/นาทีตามลำดับ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำน้ำเชื้อแช่แข็งของชุดการทดลองต่างๆ มาละลายในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 5 วินาที และทำการประเมิน

การเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการละลายของชุดการทดลองต่างๆ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (น้ำเชื้อสด)

การวิจัยในช่วงหลังพัฒนาวิธีการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาดุกอยู่ในกล่องโฟม โดยนำน้ำเชื้อปลาดุกออกมาเจือจางในชุดการทดลองที่เป็น Factorial design โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ มี 3 ตัวแปรที่สำคัญคือ 1) สารละลายบัฟเฟอร์ 3 ชนิดได้แก่ Ca-F HBSS), 0.9% NaCl และ Extender 7 (5.780 กรัม NaCl, 2.558 กรัม KCl, 0.103 กรัม $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0.235 กรัม NaHCO_3 , 0.220 กรัม $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 6.0 กรัม Puruvate, 0.100 กรัม Citric acid, 2.380 กรัม HEPES buffer ใน 10 มิลลิลิตร KOH (1.27 กรัม/100 มิลลิลิตร), pH 7.6 (Vuthiphandchai *et al.*, 2009) และ 2) ระดับความสูง (2, 4 และ 6 เซนติเมตร) และ 3) เวลา (5, 10 และ 15 นาที) ในการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาดุกอยู่ในไอโนโตรเจนเหลว การแช่แข็งน้ำเชื้อในกล่องโฟมเริ่มจากเจือจางน้ำเชื้อปลาดุกอยู่ในสารละลายบัฟเฟอร์ทั้ง 3 ชนิดในอัตราส่วนปริมาตร 1:1 และใช้สารไครโอโพรเทคแทนที่ชนิดและความเข้มข้นสุดท้ายที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงแรก (10% DMSO) ผสมลงไปในน้ำเชื้อที่ถูกเจือจาง จากนั้นรวบรวมน้ำเชื้อที่ถูกเจือจางปริมาณ 1.5 มิลลิลิตรใส่ในหลอด Cryovial ขนาด 1.8 มิลลิลิตร ปล่อยให้อยู่ในสถานะสมดุล นาน 10 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และนำหลอด Cryovial ที่มีน้ำเชื้อบรรจุอยู่ไปทำการลดอุณหภูมิเพื่อแช่แข็ง โดยให้หลอด Cryovial สัมผัสกับไอโนโตรเจนเหลวที่ระดับความสูง 2, 4 และ 6 เซนติเมตร เหนือผิวหน้าในไอโนโตรเจนเหลวที่อยู่ในกล่องโฟมขนาดยาว กว้าง สูง = $33.5 \times 22 \times 27$ เซนติเมตร พร้อมกับปิดฝากล่องโฟมให้สนิท เป็นเวลานาน 5, 10 และ 15 นาที นำ Cryovial ทั้งหมดที่ได้แช่แข็งไปเก็บรักษาในถังไนโตรเจนเหลว 7 วัน จึงนำมาประเมินการเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการละลาย โดยนำหลอด Cryovial ออกจากถังไนโตรเจนเหลว

มาแช่ในอ่างน้ำอุ่นอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนน้ำเชื้อละลาย และทำการประเมินจากเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการละลายของชุดการทดลอง เปรียบเทียบกับน้ำเชื้อสด (ชุดควบคุม)

4. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ข้อมูลที่นำเสนอเป็น ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเฉลี่ยความแปรปรวน (Standard error of the mean) นำข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่ของสเปิร์มในแต่ละชุดการทดลอง มาวิเคราะห์หาความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธีการ Analysis of variance (Two- or Three-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อพบมีความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในชุดการทดลองด้วย Duncan's New Multiple Range Test และทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่ของสเปิร์มระหว่างน้ำเชื้อสดกับชุดทดลองแต่ละชุดการทดลองทั้งหมด ด้วยวิธีการวิเคราะห์ Pair simple *t* - test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรมสถิติ GraphPad Version 8.0.1.244

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การแช่แข็งน้ำเชื้อปลาดุกด้วยเครื่องมือแช่แข็งอัตโนมัติ

น้ำเชื้อสดของปลาดุกอยู่ที่รวบรวมมาใหม่ๆ มีความหนาแน่นของสเปิร์ม และการเคลื่อนที่ของสเปิร์มเฉลี่ยเท่ากับ 4.35×10^9 ตัว/มิลลิลิตร และ $82.24 \pm 2.22\%$ การศึกษาผลของสารไครโอโพรเทคแทนที่และอัตราการลดอุณหภูมิที่มีต่อการเคลื่อนที่ของสเปิร์มปลาดุกอยู่ที่แช่แข็งภายในหลอดฟางขนาด 0.25 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องมือแช่แข็งอัตโนมัติ โดยใช้สารไครโอโพรเทคแทนที่ 6 ชนิด ที่ความเข้มข้นสุดท้าย 3 ระดับ ทำการแยกวิเคราะห์ทางสถิติของแต่ละอัตราการลดอุณหภูมิ โดยพบว่า การแช่แข็งน้ำเชื้อปลาดุกอยู่ที่อัตราการลดอุณหภูมิ -8 องศาเซลเซียส/นาาที เมื่อใช้สาร DMSO ที่

ระดับความเข้มข้น 10% ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการละลายเท่ากับ $64.44 \pm 4.44\%$ รองลงมาคือการใช้สาร Methanol ที่ระดับความเข้มข้น 15% และ 10% ทำให้มีเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่ของสเปิร์มเท่ากับ $48.89 \pm 3.51\%$ และ $31.11 \pm 3.51\%$ ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.01$ และ $p < 0.001$ ตามลำดับ (ภาพที่ 1 (a)) การใช้ Ethylene glycol พบการเคลื่อนที่ของสเปิร์มที่ระดับความเข้มข้น 5% โดยมีการเคลื่อนที่ต่ำประมาณ $11.11 \pm 4.01\%$ และ การใช้ Propylene glycol, Glycerol และ Sucrose ที่ทุกระดับความเข้มข้น ไม่ทำให้สเปิร์มมีการเคลื่อนที่ (ภาพที่ 1 (a))

การแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอุยเมื่อใช้อัตราการลดอุณหภูมิ -5 องศาเซลเซียส/นาท พบว่า การใช้ DMSO ที่ระดับความเข้มข้น 10% ยังคงทำให้สเปิร์มมีการเคลื่อนที่สูงเท่ากับ $40.00 \pm 4.71\%$ เช่นเดียวกับการใช้ Methanol ที่ระดับความเข้มข้น 15% ที่มีการเคลื่อนของสเปิร์มเท่ากับ $44.44 \pm 2.94\%$ ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังแสดงในภาพที่ 1 (b) อย่างไรก็ตาม การใช้ Ethylene glycol และ Propylene glycol ทั้งสามความเข้มข้นทำให้สเปิร์มมีการเคลื่อนที่โดยรวมมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า 22% ในขณะที่การแช่แข็งน้ำเชื้อด้วยสาร Glycerol และ Sucrose ทั้งสามความเข้มข้น ไม่พบการเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการละลาย (ภาพที่ 1 (b))

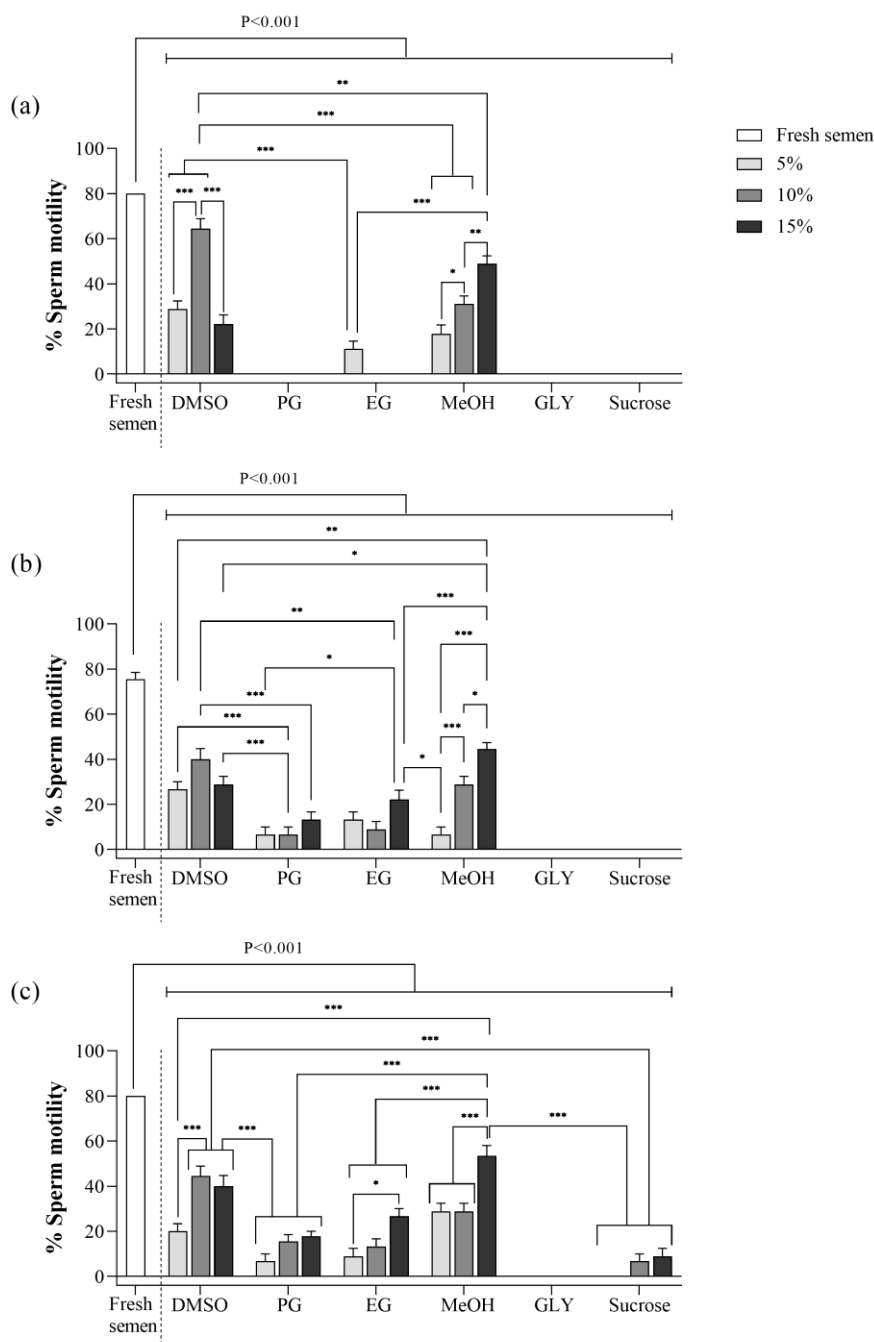
การแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอุยที่อัตราการลดอุณหภูมิ -3 องศาเซลเซียส/นาท เมื่อใช้ DMSO ที่ระดับความเข้มข้น 10% และ 15% ทำให้สเปิร์มมีการเคลื่อนที่สูงเท่ากับ $44.44 \pm 4.44\%$ และ $40.00 \pm 4.71\%$ ตามลำดับซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงในภาพที่ 1 (c) การใช้ Methanol ที่ความเข้มข้น 15% ทำให้สเปิร์มมีการเคลื่อนสูงประมาณ $53.33 \pm 4.71\%$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) เมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้ Methanol 5% และ 10% การใช้

Ethylene glycol และ Propylene glycol ทั้งสามความเข้มข้น ทำให้สเปิร์มมีการเคลื่อนที่หลังการละลายระหว่าง $6.67 \pm 3.33\%$ และ $26.67 \pm 3.33\%$ ในขณะที่ Glycerol ไม่ทำให้สเปิร์มเคลื่อนที่ และสาร Sucrose ที่ความเข้มข้น 10% และ 15% ทำให้สเปิร์มเคลื่อนที่เล็กน้อยเพียง $6.67 \pm 3.33\%$ และ $8.89 \pm 3.51\%$ ตามลำดับ (ภาพที่ 1 (c))

โดยทั่วไปปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จในการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาที่ทำให้สเปิร์มหลังการละลายมีการเคลื่อนที่สูงได้แก่ คุณภาพน้ำเชื้อที่ลักษณะรวบรวมชนิดของสารละลายบัฟเฟอร์ ชนิดและความเข้มข้นของสารไครโอโพรTECTANT อัตราส่วนในการเจือจางน้ำเชื้อ ระยะเวลาสมดุล อัตราการลดอุณหภูมิ และอุณหภูมิที่ใช้ละลายน้ำเชื้อแช่แข็ง (Lim *et al.*, 2021; Irawan *et al.*, 2010) การแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอุยที่เจือจางด้วย Ca-F HBSS ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ -8 องศาเซลเซียส/นาท ทำให้สเปิร์มหลังการละลายมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้อัตราการลดอุณหภูมิ -5 องศาเซลเซียส/นาท และ -3 องศาเซลเซียส/นาท แสดงว่าอัตราการลดอุณหภูมิ -8 องศาเซลเซียส/นาท มีความเหมาะสมในการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอุยแม้ว่าไม่ได้ทดลองในช่วงเวลาเดียวกัน การลดอุณหภูมิที่ช้าเกินไปในระหว่างกระบวนการแช่แข็ง จะทำให้น้ำแพร่ออกจากเซลล์มาก เพราะใช้เวลานานขึ้นกว่าเซลล์แข็งตัว จึงทำให้เซลล์มีขนาดเล็กลงมากเกินไป และความเข้มข้นของสารละลายภายในเซลล์มีค่าสูงขึ้น (Solute effect) ในทางตรงกันข้ามถ้าแช่แข็งเซลล์อัตราการลดอุณหภูมิที่เร็วเกินไป น้ำจะแพร่ออกจากเซลล์ได้น้อย ซึ่งเมื่อเซลล์แข็งตัว จะมีผลคือน้ำแข็งภายในเซลล์มากขึ้น เกิดอันตรายต่อเซลล์ได้ง่าย (Cabrita *et al.*, 2010; Irawan *et al.*, 2010) โดยทั่วไปอัตราการลดอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาแต่ละชนิดแตกต่างกันไป เช่น -20 องศาเซลเซียส/นาท สำหรับปลา red seabream (Liu *et al.*, 2006), -

15 องศาเซลเซียส/นาที่ สำหรับปลากะพงขาวยุโรป (Sansone *et al.*, 2002), -10 องศาเซลเซียส/นาที่ สำหรับปลาซวาย (Kwantong and Bart, 2003) และ ปลาตะเพียน (Nahiduzzaman *et al.*, 2011), และ -5 องศาเซลเซียส/นาที่ สำหรับปลา blue catfish (Hu *et al.*, 2011) เป็นต้น

สาเหตุที่สารไครโอโพรเทคแทนท์ DMSO แช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอยู่ได้ผลดี เนื่องจาก DMSO มีความเป็นพิษต่ำ มีมวลโมเลกุลต่ำ (78.13 กรัม/โมล) และมีความสามารถในการแพร่ซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ ได้ดีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก อุณหภูมิแช่แข็ง ความสำเร็จในการใช้ DMSO แช่แข็งน้ำเชื้อปลาได้มีรายงานในปลาหลายชนิด



ภาพที่ 1 เปอร์เซนต์การเคลื่อนที่ของสเปิร์มปลาอุกอุยหลังการแช่แข็งด้วยเครื่องมือแช่แข็งอัตโนมัติที่อัตราการลดอุณหภูมิ -8 องศาเซลเซียส/นาที่ (a) -5 องศาเซลเซียส/นาที่ (b) และ -3 องศาเซลเซียส/นาที่ (c) มาที่อุณหภูมิต่ำสุดที่ -40 องศาเซลเซียส ก่อนเก็บรักษาในถังไนโตรเจนเหลว

DMSO, Dimethyl sulfoxide; PG, Propylene glycol; EG, Ethylene glycol; MeOH, Methanol; และ GLY, Glycerol

*, **, *** แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$ $p < 0.01$ และ $p < 0.001$ ตามลำดับ ระหว่างค่าเฉลี่ยเปอร์เซนต์การเคลื่อนที่ของสเปิร์มในทุกชุดการทดลองทั้งหมดที่ใช้สารใดโพรเทคแทนที่แตกต่างกัน 6 ชนิด และใช้ระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ระดับ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ Two - way ANOVA ตามด้วยการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยการทดสอบ Duncan's New Multiple Range Test $p < 0.001$ แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างค่าเฉลี่ยเปอร์เซนต์การเคลื่อนที่ของสเปิร์มน้ำเชื้อสดกับชุดทดลองแต่ละชุดการทดลองทั้งหมด ด้วยวิธีการวิเคราะห์ Pair simple t - test

เช่น ปลากะรังเสือ (Yang *et al.*, 2020) ปลา Sea Perch (Ji *et al.*, 2004) ปลาไน (Irawan *et al.*, 2010) ปลาตะเพียน (Nahiduzzaman *et al.*, 2011) ปลาจืดและปลาคูก้าน (Lal *et al.*, 2009) ปลาสาวย (Kwantong and Bart, 2003) เป็นต้น ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าการใช้ 15% Methanol เพื่อแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอยที่อัตราการลดอุณหภูมิ -3 องศาเซลเซียส/นาที ทำให้การเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการละลายอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเนื่องจาก Methanol มีมวลโมเลกุลขนาดเล็กที่สุด (32.04 กรัม/โมล) เมื่อเปรียบเทียบกับสารไครโอโพรเทคแทนท์ทั่วไป จึงแพร่เข้าเซลล์ได้เร็วที่สุด เช่นเดียวกับการศึกษาการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาตะเพียน (*Puntius sarana*) ที่พบว่าการใช้ 10% DMSO แช่แข็งน้ำเชื้อปลาตะเพียน ทำให้สเปิร์มมีการเคลื่อนที่สูงกว่าการใช้ 10% หรือ 15% Methanol (Nahiduzzaman *et al.*, 2011) โดยทั่วไป Methanol นิยมนำมาใช้แช่แข็งในปลาตระกูล Catfish เช่น Bagrid catfish (Ratanatrivong *et al.*, 2011), ปลาคูกเทศ (Viveiros *et al.*, 2000), Yellow catfish (Pan *et al.*, 2008), Blue catfish (Hu *et al.*, 2011) รวมทั้งปลาชนิดอื่นเช่น ปลายี่สก (Pewnane *et al.*, 2010) ปลา Brown trout (Rusco *et al.*, 2020) เป็นต้น สำหรับ Propylene glycol ได้มีรายงานถึงความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการแช่แข็งน้ำเชื้อปลา Winter flounder (Rideout *et al.*, 2003) ในขณะที่ Ethylene glycol ให้ผลดีในการแช่แข็งน้ำเชื้อปลากะพงขาวยุโรป (Sansone *et al.*, 2002) ปลา Far Eastern catfish (Gil *et al.*, 2017) ปลา Yellow croaker (Lim *et al.*, 2021) และปลา red seabream (Liu *et al.*, 2006) การใช้ Glycerol แช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอยในการศึกษาครั้งนี้ไม่ทำให้สเปิร์มเคลื่อนที่หลังการละลาย แต่ได้ผลดีในการแช่แข็งน้ำเชื้อปลา Summer whiting (Young *et al.*, 1992) ในขณะที่การใช้ Glycerol แช่แข็งน้ำเชื้อปลา Yellow catfish และปลา Sea Perch ทำให้การเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการละลายมีค่าไม่ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ (Pan *et al.*, 2008)

และไม่เคลื่อนที่ (Ji *et al.*, 2004) ตามลำดับ การใช้ Sucrose แช่แข็งน้ำเชื้อปลายังมีการศึกษาค่อนข้างน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม โดย Sucrose เป็นสารไครโอโพรเทคแทนท์ที่ออกฤทธิ์ภายนอกเซลล์ (Non-permeating cryoprotectant) ที่สามารถนำมาแช่แข็งน้ำเชื้อปลาแรด (*Osphronemus goramy*) ให้มีคุณภาพดี (Abinawanto and Lestari, 2012)

2. การแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอยด้วยไอโซโพรเจนเหลวในกล่องโฟม

น้ำเชื้อสดปลาคูกอยที่รวบรวมมามีค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นสเปิร์ม และการเคลื่อนที่ของสเปิร์มเท่ากับ 3.85×10^9 ตัว/มิลลิลิตร และ $77.89 \pm 2.21\%$ ตามลำดับ การแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอยในหลอด Cryovial ขนาด 1.8 มิลลิลิตรหลังการเจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ 3 ชนิดที่มี 10% DMSO ที่ระดับความสูงเหนือผิวหน้าในโตรเจนเหลว 2, 4 และ 6 เซนติเมตร นาน 5, 10 และ 15 นาที เก็บรักษาในถังไนโตรเจนเหลวแล้วนำมาละลาย พบว่าน้ำเชื้อปลาคูกอยที่แช่แข็งด้วย Ca-F HBSS มีการเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการละลายสูงกว่าน้ำเชื้อที่แช่แข็งด้วย 0.9% NaCl หรือ Extender 7 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 1) นอกจากนี้ระยะความสูงที่ใช้แช่แข็งน้ำเชื้อ และระยะเวลาที่ใช้แช่แข็งน้ำเชื้อในกล่องโฟม ต่างก็มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการละลายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 1)

การแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอยด้วย Ca-F HBSS ที่ระดับความสูงเหนือผิวหน้าในโตรเจนเหลว 2, 4 หรือ 6 เซนติเมตรในกล่องโฟมนาน 10 นาที ทำให้สเปิร์มหลังการละลายมีค่าสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) มีค่าเท่ากับ $44.44 \pm 4.44\%$, $48.89 \pm 3.51\%$ และ $75.56 \pm 2.94\%$ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับ การแช่แข็งนาน 5 หรือ 15 นาที โดยการเคลื่อนที่ของสเปิร์มที่แช่แข็งที่ระดับความสูง 6 เซนติเมตร มีค่าสูง

กว่า ($p < 0.05$) การแช่แข็งที่ระดับ 4 เซนติเมตร หรือ 2 เซนติเมตร (ตารางที่ 1) อย่างไรก็ตาม การแช่แข็งน้ำเชื้อปลาถูกอุณหภูมิต่ำด้วย 0.9% NaCl โดยรวมทั้ง 3 ระดับความสูงและ 3 ระยะเวลาแช่แข็ง ทำให้สเปิร์มมีการ

เคลื่อนที่หลังการละลายมีค่าเฉลี่ยระหว่าง $6.7 \pm 1.7\%$ และ $35.56 \pm 2.94\%$ และเมื่อใช้ Extender 7 สเปิร์มหลังการละลายมีการเคลื่อนที่เฉลี่ยระหว่าง 0% และ $36.56 \pm 2.94\%$

ตารางที่ 1 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่ของสเปิร์มปลาถูกอุณหภูมิต่ำที่เจือจางในสารละลายบัฟเฟอร์ 3 ชนิดหลังการแช่แข็งในไอโนโตรเจนเหลวที่ระดับความสูงเหนือผิวหน้าในโตรเจนเหลวในระยะเวลาต่างๆ กัน

ชนิดสารละลาย	ระยะเวลา (นาทีก)	ความสูงเหนือผิวหน้าในโตรเจนเหลว		
		2 เซนติเมตร	4 เซนติเมตร	6 เซนติเมตร
Ca-F HBSS	5	$8.89 \pm 2.61^{c,3}$	$24.44 \pm 2.94^{b,45}$	$35.67 \pm 4.1^{a,2}$
	10	$44.44 \pm 4.44^{b,1}$	$48.89 \pm 3.51^{b,1}$	$75.56 \pm 2.94^{a,1}$
	15	$28.89 \pm 3.51^{b,2}$	$42.78 \pm 2.9^{a,12}$	$26.67 \pm 3.89^{b,23}$
0.9% NaCl	5	$7.78 \pm 2.78^{c,3}$	$13.33 \pm 2.36^{b,6}$	$35.56 \pm 2.94^{a,2}$
	10	$31.11 \pm 3.51^{a,2}$	$22.22 \pm 2.22^{b,45}$	$16.70 \pm 4.2^{b,4}$
	15	$13.33 \pm 2.36^{a,3}$	$17.78 \pm 1.47^{a,56}$	$6.70 \pm 1.7^{b,5}$
Extender 7	5	$8.89 \pm 3.51^{b,3}$	$27.78 \pm 3.09^{a,4}$	$13.33 \pm 1.92^{b,4}$
	10	$6.67 \pm 3.33^{b,3}$	$36.56 \pm 2.94^{a,23}$	$6.67 \pm 3.33^{b,5}$
	15	$0^{b,4}$	$16.67 \pm 1.92^{a,6}$	$0^{b,6}$

หมายเหตุ ตัวอักษร Superscript ที่เหมือนกันตามแนวนอน แสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตัวเลข Superscript ที่เหมือนกันตามแนวตั้ง แสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

การเลือกใช้นิพจน์ของสารละลายบัฟเฟอร์ระดับความสูง และระยะเวลาที่เหมาะสมในการแช่แข็งในไอโนโตรเจนเหลว จัดเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จในการแช่แข็งน้ำเชื้อปลา เนื่องจากสารละลายบัฟเฟอร์ทำหน้าที่ในการควบคุมค่าแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) และพีเอช (pH) น้ำเชื้อไม่ให้เปลี่ยนแปลง ทำให้สเปิร์มไม่ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ และองค์ประกอบต่างๆ ของน้ำเชื้อขณะถูกเจือจางไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่การแช่แข็งน้ำเชื้อในไอโนโตรเจนเหลวอย่างเหมาะสมจะป้องกันการเกิดผลึกน้ำแข็งในเซลล์สเปิร์ม (Lim *et al.*, 2021) การใช้ Ca-F HBSS แช่แข็งน้ำเชื้อปลาถูกอุณหภูมิต่ำที่ 2, 4 หรือ 6 เซนติเมตรนาน 10 นาทีทำให้สเปิร์มหลังการ

ละลายมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่นที่ใช้ 0.9% NaCl หรือ Extender 7 แช่แข็งนาน 5 หรือ 15 นาที แสดงว่า ชนิดของสารละลายบัฟเฟอร์ และระดับความสูงในการแช่แข็งเหนือผิวหน้าในโตรเจนเหลวที่เวลาต่างกัน มีผลต่อการเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการละลาย

สาเหตุที่น้ำเชื้อปลาถูกอุณหภูมิต่ำแช่แข็งด้วย Ca-F HBSS ได้ผลดีกว่าการใช้ 0.9% NaCl หรือ Extender 7 อาจมีความเกี่ยวข้องกับอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดของสารละลายบัฟเฟอร์ และอัตราการลดอุณหภูมิที่ใช้ไอโนโตรเจนเหลวที่แต่ละระดับความสูงในเวลาต่างกัน เนื่องจากในทุกชุดการทดลองนี้ใช้สารโครีโอโพรเทกแทนท์ 10% DMSO เหมือนกัน ซึ่งอิทธิพล

ร่วมของชนิดสารละลายบัฟเฟอร์ และอัตราการลดอุณหภูมิที่มีต่อความสำเร็จในการแช่แข็งน้ำเชื้อปลา ได้มีรายงานในการศึกษาแช่แข็งน้ำเชื้อปลาหลายชนิด เช่น Ratanatrivong *et al.* (2011) แช่แข็งน้ำเชื้อปลากดกด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ 3 ชนิด (6% Fructose, 5% Glucose และ Ginsberg Fish's Ringer; GFR) ที่มี 10% Methanol โดยลดอุณหภูมิแช่แข็งในกล่องโฟมที่ 3 ระดับ (-2, -5 และ -10 องศาเซลเซียส/นาทิต) พบว่าการใช้ 6% Fructose และ 5% Glucose แช่แข็งน้ำเชื้อปลากดกทั้ง 3 ระดับ อัตราการลดอุณหภูมิ ทำให้สเปิร์มหลังการละลายมีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้ GFR ในทำนองเดียวกัน Pewnane *et al.* (2010) ได้แช่แข็งน้ำเชื้อปลาตะกวด โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ 3 สูตร (Milk powder glucose; MPG, Modified Zhang and Liu; MZL และ 5% glucose) ที่ผสม 10% Methanol ด้วยการใช้อัตราการลดอุณหภูมิ -4.55, -5.04 และ -5.76 องศาเซลเซียส/นาทิต พบว่า การเคลื่อนที่ของสเปิร์มปลาตะกวดหลังการละลายในสารละลายบัฟเฟอร์ทั้ง 3 สูตรที่ใช้อัตราการลดอุณหภูมิ -4.55 และ -5.76 องศาเซลเซียส/นาทิต มีค่าต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้อัตราการลดอุณหภูมิ -5.04 องศาเซลเซียส/นาทิต Kwantong and Bart (2003) แช่แข็งน้ำเชื้อปลาด้วยการใช้สารไครโอโพรเทคแทนท์ 4 ชนิด (DMSO, methanol, Dimethylacetamide; DMA และ Ethylene glycol) เจือในสารละลายบัฟเฟอร์ 3 ชนิด (Ca-F HBSS, HBSS และ 0.9% NaCl) ก่อนการแช่แข็งในอัตราการลดอุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส/นาทิต พบว่า น้ำเชื้อปลาสดที่มีคุณภาพดีหลังการแช่แข็งได้มาจากการแช่แข็งน้ำเชื้อด้วยการใช้ DMSO หรือ DMA ที่เจือจางใน 0.9% NaCl หรือ Ca-F HBSS เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากน้ำเชื้อปลาสดที่แช่แข็งด้วย 0.9% NaCl ร่วมกับ 12% DMSO หรือ 5% Methanol สามารถปฏิสนธิไข่ปลาสดได้ประมาณ 41% และ 18% ตามลำดับ ในขณะที่น้ำเชื้อปลาสดที่แช่แข็ง

ด้วย Ca-F HBSS ร่วมกับ 10% DMA และ 10% Ethylene glycol สามารถปฏิสนธิไข่ปลาสดได้ประมาณ 30% และ 8% ตามลำดับแม้ว่าค่าเหล่านี้จะต่ำกว่าอัตราการปฏิสนธิของน้ำเชื้อสด แสดงให้เห็นว่า การแช่แข็งน้ำเชื้อปลาหลายชนิดให้มีคุณภาพที่ดีหลังการละลายมีความเกี่ยวข้องกับการเลือกใช้ชนิดของสารละลายบัฟเฟอร์ ชนิดและความเข้มข้นของสารไครโอโพรเทคแทนท์ และอัตราการลดอุณหภูมิ

การแช่แข็งน้ำเชื้อปลาดุกอุยด้วยการสัมผัสไอน์โตรเจนเหลวที่ระดับความสูง 6 เซนติเมตรเหนือผิวหน้าไอน์โตรเจนเหลว นาน 10 นาที ทำให้สเปิร์มหลังการละลายมีค่าสูงกว่าการแช่แข็งที่ระดับความสูง 2 หรือ 4 เซนติเมตรเมื่อใช้ Ca-F HBSS และ 10% DMSO อีกทั้งชุดการทดลองที่แช่แข็งน้ำเชื้อปลาดุกอุยด้วย Ca-F HBSS และ 10% DMSO ที่ความสูง 6 เซนติเมตร เหนือผิวหน้าไอน์โตรเจนเหลว นาน 10 นาที ยังมีการเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการละลายยังมีค่าสูง ($75.56 \pm 2.94\%$) ใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่ของสเปิร์มในน้ำเชื้อสด ($77.89 \pm 2.21\%$) แสดงว่า Protocol การแช่แข็งดังกล่าวมีความเหมาะสมในการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาดุกอุยในหลอด Cryovial ขนาด 1.8 มิลลิลิตร การแช่แข็งน้ำเชื้อปลาด้วยการใช้ไอน์โตรเจนเหลวภายในกล่องโฟมเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับแช่แข็งด้วยเครื่องมือแช่แข็งอัตโนมัติ โดยอาศัยหลักการปล่อยไอน์โตรเจนเหลว (ที่มีอุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส) ระเหยออกมาเป็นไอน์โตรเจนเหลวในกล่องโฟมซึ่งเป็นภาชนะปิด ดังนั้น ถ้านำน้ำเชื้อปลามาให้สัมผัสไอน์โตรเจนเหลวที่ระดับความสูงเหนือผิวหน้าไอน์โตรเจนเหลวต่างกัน หรือใช้ระยะเวลาให้สัมผัสไอน์โตรเจนเหลวต่างกัน จะทำให้น้ำเชื้อปลาแข็งตัวในอัตราการลดอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความสูงและเวลาที่เลือกใช้ ซึ่งความสำเร็จในการพัฒนาการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาด้วยไอน์โตรเจนเหลวภายในกล่องโฟมมีความแตกต่างกันไปในปลาแต่ละ

ชนิด เช่น Ji *et al.* (2004) แช่แข็งน้ำเชื้อปลา Sea perch ด้วยการใส่สารละลาย Extender 3 ชนิดคือ modified plaice Ringer solution (MPRS), D-15 และ modified Mounib's medium (MMM) ในการเจือจางน้ำเชื้อ แล้วใส่สารไครโอโพรเทกแทนท์ DMSO ความเข้มข้น 6%, 10% และ 14% ทำการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาที่ระดับความสูง 2, 6 และ 13 เซนติเมตร เนื้อผิวหน้าในโตรเจนเหลว เป็นเวลา 10 นาที จึงนำน้ำเชื้อไปเก็บรักษาในไนโตรเจนเหลว พบว่า การแช่แข็งน้ำเชื้อปลา Sea perch ด้วย 10% DMSO ที่ความสูงเนื้อผิวหน้าในโตรเจนเหลว 6 เซนติเมตร ทำให้สเปิร์มมีการเคลื่อนที่หลังการละลายมีค่าสูงที่สุดในขณะที่การแช่แข็งน้ำเชื้อที่ระดับความสูง 2 เซนติเมตร มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่ของสเปิร์มมีค่าต่ำสุด Rusco *et al.* (2020) รายงานถึงความสำเร็จในการแช่แข็งน้ำเชื้อปลา Brown trout ด้วยไอไนโตรเจนเหลวที่ระดับความสูงเนื้อผิวหน้าในโตรเจนเหลว 3 เซนติเมตรนาน 5 นาที ความสำเร็จในการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอยู่ด้วยการใช้ไอไนโตรเจนเหลวในกล่องโฟมของการศึกษารั้งนี้ ยังสามารถแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอยู่ได้ในปริมาณที่มากขึ้นภายในหลอด Cryovial ซึ่งการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอยู่ด้วยไอไนโตรเจนเหลวภายในกล่องโฟม เป็นเทคโนโลยีการแช่แข็งที่เหมาะสมสำหรับผู้ประกอบการเพาะพันธุ์สัตว์น้ำที่ต้องการนำเอาเทคนิคการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอยู่มาใช้ในการเพาะพันธุ์ปลาในโรงเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และยังช่วยทำให้การบริหารจัดการธนาคารน้ำเชื้อสัตว์น้ำ (Sperm bank) มีความสะดวกขึ้น (Ji *et al.*, 2004) อย่างไรก็ตาม การพัฒนาเทคนิคการวิจัยให้สามารถแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอยู่ให้ได้ในปริมาณมากขึ้นสำหรับการแช่แข็งภายในแต่ละหลอด เช่น แช่แข็งในหลอด cryovial ขนาด 4 มิลลิลิตรเป็นต้น แล้วทำให้คุณภาพน้ำเชื้อแช่แข็งหลังการละลายไม่แตกต่างจากน้ำเชื้อสดไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการละลาย หรือ

ความสามารถในการปฏิสนธิไข่น้ำเชื้อแช่แข็ง ควรจะมีการวิจัยต่อยอดในอนาคต เพื่อให้มีธนาคารน้ำเชื้อปลาคูกอยู่สำหรับการใช้ประโยชน์ด้านการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเชิงพาณิชย์ และ/หรือการอนุรักษ์พันธุ์สัตว์น้ำที่เริ่มหาได้ยากต่อไปแม้ว่าการนำเทคโนโลยีการแช่แข็งน้ำเชื้อสัตว์น้ำมาประยุกต์ใช้ในปัจจุบัน จะได้รับความนิยมน้อยกว่าการนำเทคโนโลยีการแช่แข็งน้ำเชื้อมาใช้กับสัตว์บก (Hu *et al.*, 2011)

สรุป

การศึกษารั้งนี้ ได้พัฒนาวิธีการแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอยู่ทั้งด้วยวิธีการใช้เครื่องมือแช่แข็งอัตโนมัติ และวิธีการแช่แข็งในกล่องโฟม การแช่แข็งน้ำเชื้อปลาคูกอยู่ที่เจือจางในสารละลายบัฟเฟอร์ Ca-F HBSS และ 10% DMSO ทั้งด้วยการใช้เครื่องมือแช่แข็งอัตโนมัติ และการใช้กล่องโฟม ต่างก็ทำให้สเปิร์มมีการเคลื่อนที่หลังการละลายสูงสุด น้ำเชื้อปลาคูกอยู่ที่แช่แข็งในหลอดฟางขนาด 0.25 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องมือแช่แข็งอัตโนมัติในอัตรา -8 องศาเซลเซียส/นาาที มีการเคลื่อนที่ของสเปิร์มหลังการละลายที่มีค่าสูงใกล้เคียงกับน้ำเชื้อปลาคูกอยู่ในหลอด Cryovial ขนาด 1.8 มิลลิลิตร ที่แช่แข็งภายในกล่องโฟม ที่ความสูง 6 เซนติเมตรเนื้อผิวหน้าในโตรเจนเหลว นาน 10 นาที ซึ่งมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปทางการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและการอนุรักษ์พันธุ์สัตว์น้ำ

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 จากมหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (สัญญาเลขที่ 38/2561) ขอขอบคุณ ภาควิชาวาริชศาสตร์และภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย

บูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและสถานที่ทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- Abinawanto, K.N. and Lestari R. 2012. The Effect of sucrose on sperm quality of *Osphronemus goramy* two days post-cryopreservation. **Journal of Agricultural Science and Technology** B2: 204-207.
- Cabrita, E., Sarasquete, C., Martinez-Paramo, S., Robles, V., Beirao, J., Perez-Cerezales, S. and Herraiz, M.P. 2010. Cryopreservation of fish sperm: applications and perspectives. **Journal of Applied Ichthyology** 26: 623-635.
- Fisheries Development Policy and Strategy Division. 2018. **Fisheries Statistics of Thailand 2018. No. 10/ 2020**. Published documents, Department of Fisheries, Bangkok. (in Thai)
- Gil, H.W., Lee, T.H. and Park, I.S. 2017. Effects of cryoprotectants and diluents on the cryopreservation of spermatozoa from Far Eastern Catfish, *Silurus asotus*. **Development & Reproduction** 21(1): 79-91.
- Hu, E., Yang, H. and Tiersch, T.R. 2011. High-throughput cryopreservation of spermatozoa of blue catfish (*Ictalurus furcatus*): establishment of an approach for commercial-scale processing. **Cryobiology** 62: 74-82.
- Irawan, H., Vuthiphandchai, V. and Nimrat, S. 2010. The effect of extenders, cryoprotectants and cryopreservation methods on common carp (*Cyprinus carpio*) sperm. **Animal Reproduction Science** 122: 236-243.
- Ji, X.S., Chen, S.L., Tian, Y.S., Yu, G.C., Sha, Z.X., Xu, M.Y. and Zhang, S.C. 2004. Cryopreservation of sea perch (*Lateolabrax japonicus*) spermatozoa and feasibility for production-scale fertilization. **Aquaculture** 241: 517-528.
- Kwantong, S. and Bart, A.N. 2003. Effect of cryoprotectants, extenders and freezing rates on the fertilization rate of frozen striped catfish, *Pangasius hypophthalmus* (Sauvage), sperm. **Aquaculture Research** 34: 887-893.
- Lal, K.K., Barman, A.S., Punia, P., Khare, P., Mohindra, V., Lal, B., Gopalakrishnan, A., Sah, R.S. and Lakra, W. 2009. Effect of extender composition on sperm cryopreservation of Asian catfish *Heteropneustes fossilis* (Bloch) and *Clarias batrachus* (Linnaeus). **Asian Fisheries Science** 22: 137-142.
- Lim, H.K., Irfan, Z., Lee, H.B., Song, J.H. and Lee, Y.H. 2021. Effect of diluent variation on cryopreservation of large yellow croaker *Larimichthys crocea*. **Fisheries and Aquatic Sciences** 24(2): 63-77.
- Liu, Q., Li, J., Zhang, S., Ding, F., Xu, X., Xiao, Z. and Xu, S. 2006. An efficient methodology for cryopreservation of spermatozoa of red seabream, *Pagrus major*, with 2-mL cryovials. **Journal of the World Aquaculture Society** 37(3): 289-297.
- Nahiduzzaman, M., Hassan, M.M., Khanam, U.H., Mamuna, S.N.A., Hossain M.A.R. and Tiersch, T.R. 2011. Sperm cryopreservation of the critically endangered olive barb (Sarpunti) *Puntius sarana* (Hasemenon, 1822). **Cryobiology** 62: 62-67.

- Pan, J., Ding, S., Ge, J., Yan, W., Hao, C., Chen, J. and Huang, Y. 2008. Development of cryopreservation for maintaining yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* sperm. **Aquaculture** 279: 173-176.
- Pewnane, P., Kongtarattana, S., Sodsuk, P.K. and Sodsuk, S. 2010. Cryopreservation of Julien's golden java carp (*Probarbus jullieni*) spermatozoa. **Journal of Fisheries Technology Research** 4(1): 1-14. (in Thai)
- Ratanatrivong, W., Taparhudee, W., Yoonpundh, R. and Srisapoome, P. 2011. Cryopreservation of bagrid catfish *Hemibagrus wyckioides* spermatozoa. **Kasetsart University Fisheries Research Bulletin** 35(2): 33-43.
- Rideout, R.M., Litvak, M.K. and Trippel, E.A. 2003. The development of sperm cryopreservation protocol for winter flounder *Pseudopleuronectes americanus* (Walbaum): evaluation of cryoprotectants and diluents. **Aquaculture Research** 34 (8):653-659.
- Rusco, G., Iorio, M.D., Iampietro, R., Esposito, S., Gibertoni, P.P., Penserini, M., Roncarati, A. and Iaffaldano, N. 2020. A simple and efficient semen cryopreservation method to increase the genetic variability of endangered Mediterranean brown trout inhabiting Molise Rivers. **Animals** 10(403): doi:10.3390/ani10030403.
- Sansone, G., Fabbrocini, A., Ieropoli, S., Langellotti, A.L., Occidente, M. and Matassino, D. 2002. Effects of extender composition, cooling rate, and freezing on the motility of sea bass (*Dicentrarchus labrax*, L.) spermatozoa after thawing. **Cryobiology** 44(3): 229-239.
- Viveiros, A.T.M., So, N. and Koman, J. 2000. Sperm cryopreservation of African catfish *Clarias gariepinus*: cryoprotectants, freezing rate and sperm: egg dilution ratio. **Theriogenology** 54: 1395-1408.
- Vuthiphandchai, V., Thadsri, I. and Nimrat, S. 2009. Chilled storage of walking catfish (*Clarias macrocephalus*) semen. **Aquaculture** 296: 58-64.
- Vuthiphandchai, V., Wilairattanadilok, K., Chomphuthawach, S., Sooksawat, T. and Nimrat, S. 2015. Sperm cryopreservation of silver barb (*Barbodes gonionotus*): cryoprotectants, cooling rate and storage time on sperm quality. **Aquaculture Research** 46: 2443-2451.
- Yang, S., Fan, B., Chen, X. and Meng, Z. 2020. Cryopreservation of sperm in brown-marbled grouper (*Epinephelus fuscoguttatus*). **Aquaculture International** 28: 1501-1516.
- Young, J.A., Capra, M.F. and Blackshaw, A.W. 1992. Cryopreservation of summer whiting (*Sillago ciliata*) spermatozoa. **Aquaculture** 102: 155-160.

การใช้แคลเซียมแลคเตทในการชะลอเกิดสีน้ำตาลและการเสื่อมสภาพ ของผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภค

Calcium Lactate Application for Delay Browning and Deterioration of Fresh-Cut Romaine Lettuce

พฤติยา นิลประพุกษ์* จูติพร อุสสาหะ และ ชวินันท์ แก้วแกน

Phrutiya Nilprapruck*, Thitiporn Usaha and Tawinan Kaokaen

Received: 15 October 2020, Revised: 28 October 2021, Accepted: 20 December 2021

บทคัดย่อ

การเกิดสีน้ำตาลในผักกาดแปรรูปพร้อมบริโภคเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพและการยอมรับของผู้บริโภค งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการใช้แคลเซียมแลคเตทที่ระดับความเข้มข้น 1.5% ในการชะลอการเกิดสีน้ำตาลและการเสื่อมสภาพของผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภค จากการทดลองพบว่าผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่มีการแช่สารละลายแคลเซียมแลคเตท เป็นเวลา 10 นาที มีประสิทธิภาพการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลเมื่อเทียบกับผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่ไม่มีการแช่สารละลายแคลเซียมแลคเตท (ชุดควบคุม) ค่าคะแนนการเกิดสีน้ำตาล (Browning index) ที่ต่ำมีความสัมพันธ์กับการลดลงของการสังเคราะห์สารประกอบฟีนอล และกิจกรรมของเอนไซม์ Phenylalanine ammonialyase (PAL), Polyphenol oxidase (PPO) และ Peroxidase (POD) เมื่อเทียบกับชุดควบคุม นอกจากนี้การเสื่อมสภาพของเซลล์เมมเบรน พิจารณาการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมของเอนไซม์ Lipoxxygenase (LOX), ปริมาณ Hydrogen peroxide (H_2O_2) และ Malondialdehyde (MDA) มีการเพิ่มสูงขึ้น จากการทดลองพบว่า การใช้สารละลายแคลเซียมแลคเตทสามารถลดการสะสมของปริมาณ MDA, Hydrogen peroxide และกิจกรรมของเอนไซม์ LOX ดังนั้นการใช้แคลเซียมแลคเตทสามารถชะลอการเกิดสีน้ำตาลและเสื่อมสภาพของผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคได้

คำสำคัญ: ผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภค, แคลเซียมแลคเตท, ปฏิกริยาการเกิดสีน้ำตาล, การเสื่อมสภาพ

ABSTRACT

Browning symptom in fresh-cut romaine lettuce is an important problem, affecting quality and consumer acceptance. This research is to study the effects of 1.5% calcium lactate delay browning and deterioration of fresh-cut romaine lettuce. These results showed that the fresh-cut romaine lettuce immersed in calcium lactate for 10 minutes had inhibited browning efficiency compared to non-treated calcium lactate (Control). Lower browning index was directly associated with a decrease in phenolic compounds, enzyme activities of Phenylalanine ammonialyase (PAL), Polyphenol oxidase (PPO) and Peroxidase (POD) in contrast with the control. Additionally, deterioration of membrane cells can investigate the increase of enzyme activity of Lipoxigenase (LOX), content of Hydrogen peroxide (H_2O_2) and Malondialdehyde (MDA). This research showed that the use of calcium lactate solution can reduce the accumulation of MDA content, hydrogen peroxide and enzyme activity of LOX. Hence, the use of calcium lactate in fresh-cut romaine lettuce can delay browning and deterioration.

Key words: fresh-cut romaine lettuce, calcium Lactate, browning reaction, deterioration

บทนำ

ผักกาดหวานเป็นผลิตภัณฑ์อีกประเภทหนึ่งที่คนนิยมปลูกและบริโภคกันมากขึ้น เนื่องจากมีคุณค่าทางอาหารสูง ส่วนใหญ่ถูกนำมาแปรรูปเป็นผักสลัดพร้อมบริโภค แต่ปัญหาสำคัญที่พบ คือ มีการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเซลล์ของผักกาดหวานถูกทำลายจากกระบวนการแปรรูป ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านชีวเคมีต่างๆ เช่น การสลายตัวของคลอโรฟิลล์ การสูญเสีย น้ำ การสูญเสียวิตามินซี และกระบวนการเกิดสีน้ำตาล (He and Luo, 2007) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลต่อคุณภาพของผักกาดหวานและการยอมรับของผู้บริโภค โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเป็นสิ่งที่ผู้บริโภคสามารถมองเห็นได้ โดยทั่วไปผักกาดที่ผ่านการตัดแต่งจะเกิดสีน้ำตาลบริเวณบาดแผล และมีอัตราการหายใจที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาสั้น การเกิดสีน้ำตาลในผักและผลไม้มีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลิก

โดยมีเอนไซม์ Polyphenol oxidase (PPO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้สารประกอบฟีนอลิกเปลี่ยนเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีน้ำตาล (Moon *et al.*, 2020) นอกจากนี้ในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงและเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นตลอดเวลา การเสื่อมสภาพสามารถวัดได้จากการกระบวนการเกิด Lipid peroxidation โดยการเกิด Lipid peroxidation ในสิ่งมีชีวิตเกิดจากสภาวะความเครียด ส่งผลให้เกิดความเสียหายทางชีวโมเลกุลเรียกว่า Oxidative damage ซึ่งปกติพืชมีการปรับสมดุลระหว่างสารอนุมูลอิสระและสารต้านอนุมูลอิสระ หากเกิดการสะสมของสารอนุมูลอิสระภายในเซลล์มากเกินไปส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพและการตายของเซลล์ในที่สุด (Baysal and Demirdoven, 2007)

ปัจจุบันมีวิธีการเก็บรักษาและยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลและการเสื่อมสภาพของผักแปรรูปพร้อมบริโภค ได้แก่ การใช้วิตามินซี (Ascorbic acid), การลดอุณหภูมิ (Pre-cooling) และการดัดแปลงสภาพบรรยากาศ (Modified atmosphere) เป็นวิธีการปรับปรุง

คุณภาพของผักกาดแปรรูปพร้อมบริโภคให้มีลักษณะคุณภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์เดิมและสามารถเก็บรักษาได้ยาวนานมากขึ้น มีความพยายามในการศึกษาหาชนิดของสารเคมีที่มีความปลอดภัยต่อการบริโภค มีประสิทธิภาพในการควบคุมคุณภาพและอายุการเก็บรักษา ดังนั้นแคลเซียมแลคเตทซึ่งเป็นสารเคมีที่อนุญาตให้ใช้ได้กับอาหารและมีความปลอดภัย จึงมีการนำมาศึกษาเพื่อชะลอการเกิดสีน้ำตาลและการเสื่อมสภาพ

เกลือแคลเซียม (Calcium salt, Ca^{2+}) ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส (Texture properties) ของผักและผลไม้ ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อเยื่อ โดยไฮดรอกไซด์ของแคลเซียมเข้าไปเชื่อมโมเลกุลของ Pectin ที่กลุ่ม Carboxyl ที่ว่างอยู่ และลดอัตราการสลายตัวของเซลล์ การใช้แคลเซียมแลคเตทในผักและผลไม้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงและรักษาคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส โดยไปมีผลในการยับยั้งการอ่อนนุ่มของผักและผลไม้ เมื่อโครงสร้างเซลล์แข็งแรงทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านอื่นๆ ตามมา เช่น ลดการเข้าทำลายของจุลินทรีย์ ยับยั้งกระบวนการเกิดสีน้ำตาลเป็นต้น (Alandes *et al.*, 2009) มีการศึกษาผลของการใช้แคลเซียมแลคเตทในการล้างผักกาดแก้ว (Iceberg lettuce) พร้อมบริโภค พบว่าการใช้แคลเซียมแลคเตทความเข้มข้น 1.5% สามารถยับยั้งกระบวนการเกิดสีน้ำตาล และกิจกรรมของเอนไซม์ PPO นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความแน่นเนื้อ ในขณะที่แคลเซียมแลคเตทความเข้มข้น 3.0% สามารถยับยั้งกระบวนการหายใจได้ (Martin-Diana *et al.*, 2005) นอกจากนี้มีรายงานการใช้แคลเซียมแลคเตทที่ความเข้มข้น 15 กรัม/ลิตร ร่วมกับการใช้ไอโซน 1 มิลลิกรัม/ลิตร ในผักกาดตัดแต่งพร้อมบริโภค พบว่าสามารถลดการเกิดสีน้ำตาลได้ โดยไปมีผลในการยับยั้งกิจกรรมของ Polyphenol oxidase (PPO) ที่เป็นสาเหตุของกระบวนการ

เกิดสีน้ำตาล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับการลดลงของกิจกรรม PME (Rico *et al.*, 2007) จากการศึกษาพบว่าแคลเซียมมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของเซลล์ ดังนั้นจึงมีการศึกษาความแข็งแรงของเซลล์จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ Malondialdehyde (MDA), Hydrogen peroxide และกิจกรรมของเอนไซม์ Lipoxigenase (LOX) ที่เพิ่มสูงขึ้น โดย เอนไซม์ LOX ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Lipid peroxidation) บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ส่งผลให้เกิดปริมาณของ Hydrogen peroxide และ MDA เพิ่มขึ้นภายในเซลล์ (Babenko *et al.*, 2017)

ดังนั้น การศึกษาผลของแคลเซียมแลคเตทจึงมีความน่าสนใจในการนำมาศึกษาและวิจัย เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการยืดอายุการเก็บรักษา และคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการเก็บเกี่ยว โดยมีสมมุติฐานที่ว่าสารแคลเซียมแลคเตทเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของโครงสร้างเซลล์ และส่งผลต่อการยับยั้งกระบวนการเกิดสีน้ำตาลและการเสื่อมสภาพของผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคได้

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมผลิตผล

นำผักกาดหวาน (Romaine lettuce) ที่เก็บเกี่ยวในระยะความแก่ทางการค้า ปราศจากโรคและตำหนิ มีขนาดใกล้เคียงและสม่ำเสมอ นำมาหั่นให้เป็นสี่เหลี่ยมขนาด 4×3 เซนติเมตร จากนั้นนำไปล้างในสารละลาย Sodium hypochlorite (Chlorox®) ที่ระดับความเข้มข้น 100 ppm นาน 5 นาที ทำการล้างด้วยน้ำเปล่า เป็นเวลา 10 นาที เพื่อล้างสารละลาย Sodium hypochlorite ที่ตกค้างออก นำตัวอย่างผักกาดหวานที่ได้ไปแช่ในน้ำกลั่น (Control) และสารละลาย 1.5% แคลเซียมแลคเตทเป็นเวลา 10 นาที ทำการสลัดน้ำออกให้แห้ง จากนั้นบรรจุลงในกล่องพลาสติก Polypropylene (ขนาด 12×15×6 เซนติเมตร) น้ำหนัก 55-60 กรัม จำนวน 48 กล่อง

โดยแบ่งออกเป็นกลุ่มการทดลองกลุ่มละ 24 กลุ่ม นำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 6 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85% วิเคราะห์ค่าการเกิดสีน้ำตาล (Browning index), สารประกอบฟีนอล, กิจกรรมของเอนไซม์ Phenylalanine ammonia lyase (PAL), Polyphenol oxidase (PPO) และ Peroxidase (POD) ในระหว่างเก็บรักษาเป็นเวลา 0, 2, 5, 10 และ 15 วัน ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีจะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยไนโตรเจนเหลว จากนั้นนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

1. ค่า Browning index (BI) และการเปลี่ยนแปลงสีบริเวณเส้นกลางใบ (ดัดแปลงจาก Pen and Jiang, 2003)

การวัดค่า BI และสีที่บริเวณรอยตัดมีการนำตัวอย่างมาหั่น 10 ชิ้น จำนวน 3 ซ้ำ ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 30 ชิ้น การวัดค่า BI เป็นการให้คะแนนการเกิดสีน้ำตาลในแต่ละชิ้น เกณฑ์การให้คะแนนการเกิดสีน้ำตาลแบ่งเป็น 5 คะแนน ได้แก่ 5 = เกิดสีน้ำตาลรุนแรงมาก, 4 = เกิดสีน้ำตาลรุนแรง, 3 = เกิดสีน้ำตาลปานกลาง, 2 = เกิดสีน้ำตาลน้อย, 1 = เกิดสีน้ำตาลน้อยมาก และ 0 = ไม่เกิดสีน้ำตาล และการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีบริเวณเส้นกลางใบ ใช้เครื่อง Chroma meter (HunterLab, MiniScan EZ)

2. ปริมาณสารประกอบ Phenolic compounds (Ketsa and Atantee, 1998)

ตัวอย่างบดละเอียด 0.50 กรัม เติมน้ำตาลละลาย 80% Ethanol ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร นำของเหลวที่ได้ไปเหวี่ยงที่ความเร็ว 15,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ควบคุมอุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส ดูดสารละลายส่วนใสที่ได้มา 60 ไมโครลิตร จากนั้นเติมน้ำตาลละลาย 10% Folin-ciocalteu reagent ปริมาตร 300 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 8 นาที เติมน้ำตาลละลาย ความเข้มข้น Sodium carbonate 7.5% จำนวน 450 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ได้นำไป

วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer โดยเปรียบเทียบกับกราฟสารละลายมาตรฐาน Gallic acid (มิลลิกรัมต่อกรัม)

3. กิจกรรมของเอนไซม์ Phenylalanine ammonia lyase (PAL) (ดัดแปลงจาก Ke and Saltveit, 1989)

ตัวอย่างบดละเอียด 0.50 กรัม เติมน้ำตาลละลาย 0.05M Sodium borate buffer pH 8.8 ที่เย็นลงไป 1 มิลลิลิตร นำไป Homogenizer ที่ 15,000 รอบนาที เป็นเวลา 30 นาที ควบคุมอุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส วิเคราะห์หาอัตราปฏิกิริยาต่อไปทันที โดยแบ่งออกเป็น 2 หลอดทดลอง หลอดที่ 1 (Blank) เติมน้ำตาลละลาย 0.05M Sodium borate buffer pH 8.8 จำนวน 1.5 มิลลิลิตร สารละลายเอนไซม์ 1 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร หลอดที่ 2 เติมน้ำตาลละลาย 0.05M Sodium borate buffer pH 8.8 จำนวน 1.5 มิลลิลิตร สารละลายเอนไซม์ 1 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร และฟีนอลอะลานีน (10 มิลลิกรัม: น้ำ 1 มิลลิลิตร) จำนวน 1 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าส่วนผสมในแต่ละหลอดทดลองด้วยเครื่องเขย่า แล้วนำไปบ่มในน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง หยุดปฏิกิริยาโดยการเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5N ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตรต่อหลอด จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 290 นาโนเมตร ผลหรือค่าดูดกลืนแสงที่ได้ แสดงออกมาในรูปอัตราปฏิกิริยาเอนไซม์ PAL เมื่อเปรียบเทียบกับ Blank โดย 1 หน่วยปฏิกิริยา คือ ปริมาณของเอนไซม์ PAL ที่ทำให้เกิด Cinnamic acid 1 โมล ในเวลา 1 ชั่วโมง

4. กิจกรรมของเอนไซม์ Polyphenol oxidase (PPO activity) และ Peroxidase (POD activity)

ซึ่งตัวอย่างบดละเอียด 0.50 กรัม เติมน้ำตาลละลาย 0.5M potassium phosphate buffer 6.5 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายส่วนใสเข้าเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 15,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ควบคุมอุณหภูมิ

ที่ 4 องศาเซลเซียส นำสารสกัดละลายเอนไซม์ไปวิเคราะห์หาค่ากิจกรรมของเอนไซม์ต่อปริมาณโปรตีน (Bradford, 1976)

กิจกรรมของเอนไซม์ PPO ประกอบด้วยสารละลาย 0.5M Sodium phosphate buffer 6.5 และ 0.25M Catachol ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 480 นาโนเมตร โดยวัดทุกๆ 30 วินาที เป็นเวลา 5 นาที กำหนดให้ 1 unit ของ PPO หมายถึง ปริมาณเอนไซม์ซึ่งทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร เพิ่มขึ้น 0.001 หน่วยในเวลา 1 นาที (Galeazzi and Sgarbieri, 1981)

กิจกรรมของเอนไซม์ POD ประกอบด้วย 0.2M Sodium phosphate buffer 6.5, 16mM Guaiacol, 2mM Hydrogen peroxide ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 470 นาโนเมตร เป็นเวลา 3 นาที กำหนดให้ค่า Extinction coefficient 26.6 mM⁻¹.cm⁻¹ (Castillo *et al.*, 1984)

5. Lipoxigenase (LOX activity) (Maalekuu *et al.*, 2006)

ซึ่งตัวอย่างบดละเอียด 0.50 กรัม เติมสารละลาย 0.5M Sodium phosphate buffer 7.0 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายส่วนใส่เข้าเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 15,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ควบคุมอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นำสารสกัดละลายเอนไซม์ไปวิเคราะห์หาค่ากิจกรรมของเอนไซม์ต่อปริมาณโปรตีน โดยกิจกรรมของเอนไซม์ LOX ประกอบด้วยสารละลาย 7mM linoleic acid และ 0.2M Sodium phosphate buffer 6.5 ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 234 นาโนเมตร เป็นเวลา 2 นาที กำหนดให้ค่า Extinction coefficient 25.0mM⁻¹.cm⁻¹

6. การวิเคราะห์ Malondialdehyde (MDA) (Hodges *et al.*, 1999)

ซึ่งตัวอย่างบดละเอียด 0.50 กรัม เติม 80% Ethanol ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลาย

ส่วนใส่เข้าเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 15,000 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที นำตัวอย่างมา 200 ไมโครลิตร เติม 0.65% Thiobarbituric acid (TBA) ที่ประกอบไปด้วย 20% Trichloroacetic acid (TCA) และ 0.01% Butylated hydrotolene (BHT) นำตัวอย่างผสมให้เข้ากันและนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที ทั้งสารละลายให้เย็นในถ้ำน้ำแข็ง จากนั้นนำไปทำการเหวี่ยงตกตะกอนที่ความเร็วรอบ 15,000 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 440, 532 และ 600 นาโนเมตร นำค่าที่ได้ไปคำนวณ

$$A = (Abs\ 532_{+TBA}) - (Abs\ 600_{+TBA}) - (Abs\ 532_{-TBA} - Abs\ 600_{-TBA})$$

$$B = (Abs\ 440_{+TBA} - Abs\ 600_{+TBA}) \times 0.0571$$

$$MDA\ (nmol\ mL^{-1}) = (A - B / 157000) / 10^6$$

$$-TBA = 20\% TCA + 0.01\% BHT$$

$$+TBA = \text{มีการเติมสารละลาย TBA}$$

7. การวิเคราะห์หา Hydrogen peroxide (Velikova *et al.*, 2000)

ซึ่งตัวอย่างบดละเอียด 0.5000 กรัม เติมสารละลาย 1.0% Trichloroacetic acid (1.0% TCA) ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 15,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นำสารละลายตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณอนุมูลอิสระในรูป Hydrogen peroxide โดยนำสารละลายตัวอย่างปริมาตร 400 ไมโครลิตร เติมสารละลาย 0.5M Sodium phosphate buffer 7.0 ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร และเติมสารละลาย 1M Potassium iodide ปริมาตร 40 ไมโครลิตร นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 390 นาโนเมตร โดยเปรียบเทียบกับกราฟสารละลายมาตรฐาน Hydrogen peroxide (ไมโครโมล

8. การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ การวิเคราะห์ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey's Honesty Significant Difference (HSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ($p \leq 0.01$) โดยใช้ R Program version 2.15.1

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การเกิดสีน้ำตาลเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่บริเวณรอยตัด และบาดแผล การเกิดสีน้ำตาลเกิดขึ้นเมื่อเซลล์ถูกทำลาย เช่น จากการตัด หั่น ทำให้เกิดการออกซิเดชันของสารประกอบไดฟีนอลิก (Diphenolic compound) โดยมีเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในสภาวะที่มีอากาศ เกิดเป็นสาร o-diphenol จากนั้น o-diphenol จะถูกออกซิไดซ์ต่อไปเป็นสารควิโนน (o-quinone) แล้วจึงเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Polymerization) ของสารควิโนนกับกรดอะมิโนหรือโปรตีนต่อไปได้เป็นสารสีน้ำตาลที่ไม่ละลายน้ำ ที่เรียกว่า Melanin (Martinez and Whitaker, 1995) การเกิดสีน้ำตาลของผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคสามารถวิเคราะห์ได้จากคะแนนการเกิดสีน้ำตาล (Browning index, BI) (Figure 1) และการเปลี่ยนแปลงสีบริเวณรอยตัด

ได้แก่ Hue, Chroma และ ΔE (Figure 2) โดยค่า Chroma คือ ค่าความเข้มของสี, Hue คือ ค่าเฉดสี และค่า ΔE คือ ค่าความแตกต่างของสี จากผลการทดลองพบว่าค่า BI ในผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่แช่และไม่ได้แช่สารละลายแคลเซียมแลคเตทมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย และไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในวันที่ 2 ของการเก็บรักษา โดยค่า BI มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตั้งแต่วันที่ 5 ของการเก็บรักษาจนกระทั่งวันสุดท้ายของการเก็บรักษา การใช้แคลเซียมแลคเตทที่ระดับความเข้มข้น 1.5% สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงการเกิดสีน้ำตาลได้ เมื่อตรวจสอบการเกิดสีน้ำตาลบริเวณรอยตัด พบว่ามีความสัมพันธ์กับค่าการเกิดสีน้ำตาล ผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่แช่แคลเซียมแลคเตท มีค่า Chroma สูง และ Hue และ ΔE ต่ำกว่าไม่ได้แช่แคลเซียมแลคเตท โดยค่า Hue ที่ 0 องศา แสดงค่าสีแดง และค่า Hue 90 องศา แสดงค่าสีเหลือง นั้นแสดงให้เห็นว่าผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่แช่แคลเซียมแลคเตทมีค่าออกสีแดงหรือสีน้ำตาลน้อยกว่าผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่ไม่ได้แช่แคลเซียมแลคเตท สอดคล้องกับการทดลองของ Martin-Diana *et al.* (2005) ที่มีการศึกษาผลของการใช้ 1.5% แคลเซียมแลคเตทในการล้าง Iceberg lettuce พร้อมบริโภค พบว่าการใช้แคลเซียมแลคเตทสามารถยับยั้งกระบวนการเกิดสีน้ำตาลได้

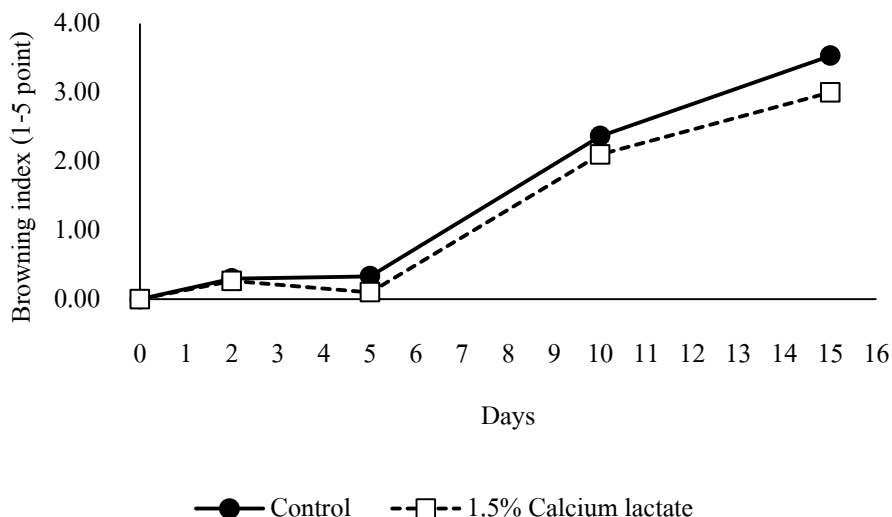


Figure 1 The Browning index (BI) in fresh-cut romaine lettuce was not treated with calcium lactate (control) and treated with 1.5% calcium lactate stored at 6 ± 1 °C, RH 85%. Error bars represent $\pm$ standard error (SE) (n=30).

ปริมาณสารประกอบฟีนอลเป็นตัวบ่งบอกถึงกระบวนการเกิดสีน้ำตาลในผักและผลไม้ เมื่อเซลล์ของผลผลิตถูกทำลาย สารต่างๆ ภายในเซลล์เกิดการรั่วไหลออกมาทำให้สารประกอบฟีนอลสัมผัสกับอากาศ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการเกิดสีน้ำตาลอันเนื่องมาจากเอนไซม์ (Enzymatic browning) โดยมี Polyphenol oxidase (PPO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดกระบวนการ Polymerization เกิดเป็นสารประกอบสีน้ำตาล ดังนั้นการสะสมหรือการเพิ่มขึ้นของสารประกอบฟีนอลในเซลล์มีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของการเกิดสีน้ำตาลจากการทดลองพบว่าผักกาดหวานแปรรูปพร้อม

บริโภคที่ไม่มีการแช่สารละลายแคลเซียมแลคเตทมีปริมาณสารประกอบฟีนอลสูงกว่าการแช่สารละลายแคลเซียมแลคเตท (Figure 3) การใช้สารละลายแคลเซียมแลคเตทส่งผลให้ปริมาณของสารประกอบฟีนอลต่ำกว่าไม่ใช้เนื่องจากแคลเซียมมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อเยื่อภายในเซลล์ ดังนั้นเมื่อเซลล์เกิดความแข็งแรงเอนไซม์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสีน้ำตาลภายในเซลล์จึงลดลง นอกจากนี้ พบว่าการลดลงของสารประกอบฟีนอลสัมพันธ์กับกิจกรรมของเอนไซม์ PAL ที่ลดลง ซึ่งเอนไซม์ PAL มีหน้าที่กระตุ้นการสังเคราะห์สารประกอบฟีนอลในพืช

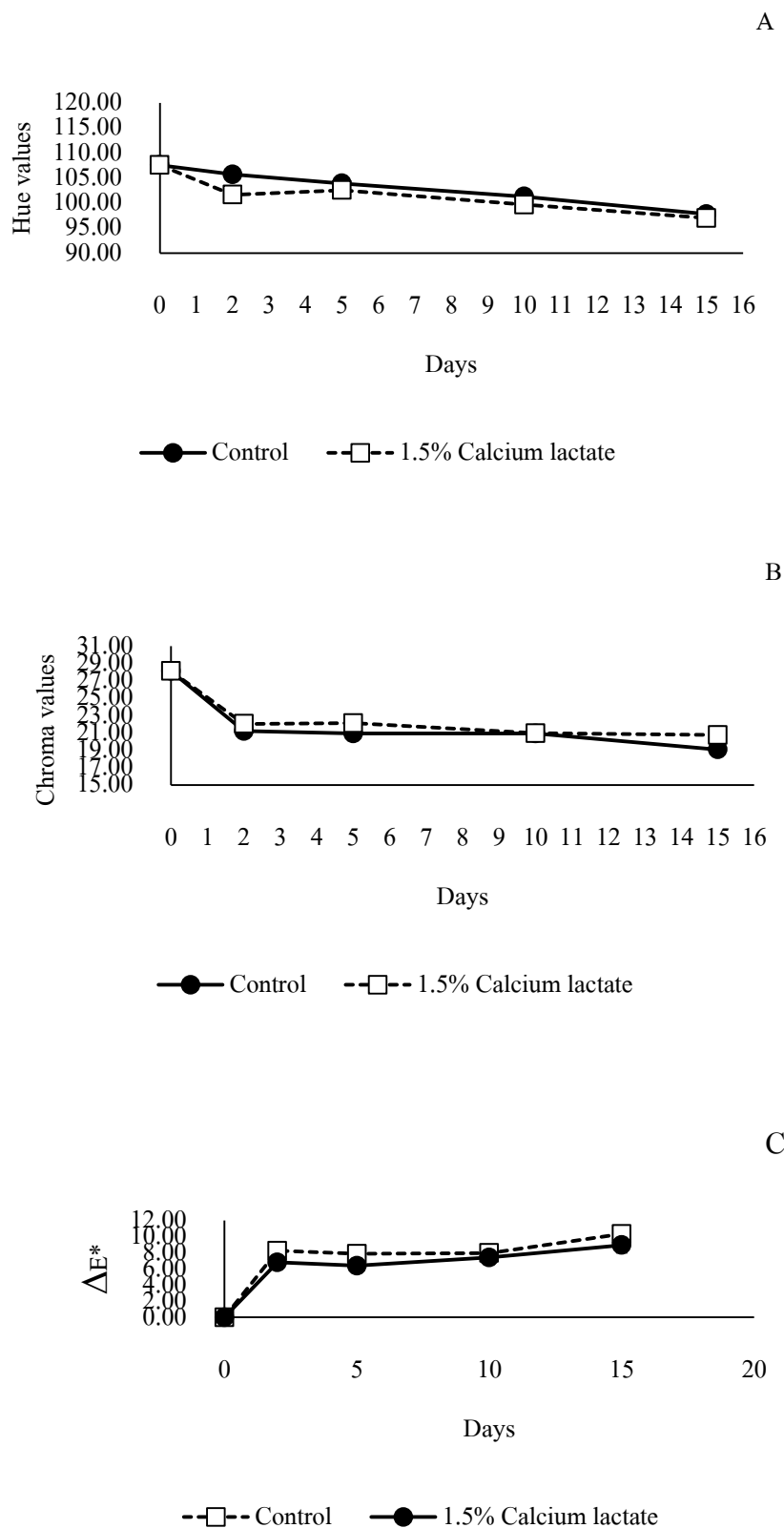


Figure 2 Change of midrib color in fresh-cut romaine lettuce was not treated with calcium lactate (control) and treated with 1.5% calcium lactate stored at $6 \pm 1^\circ\text{C}$, RH 85%. A: Hue values, B: Chroma value and C: ΔE . Error bars represent $\pm$ standard error (SE) (n=30).

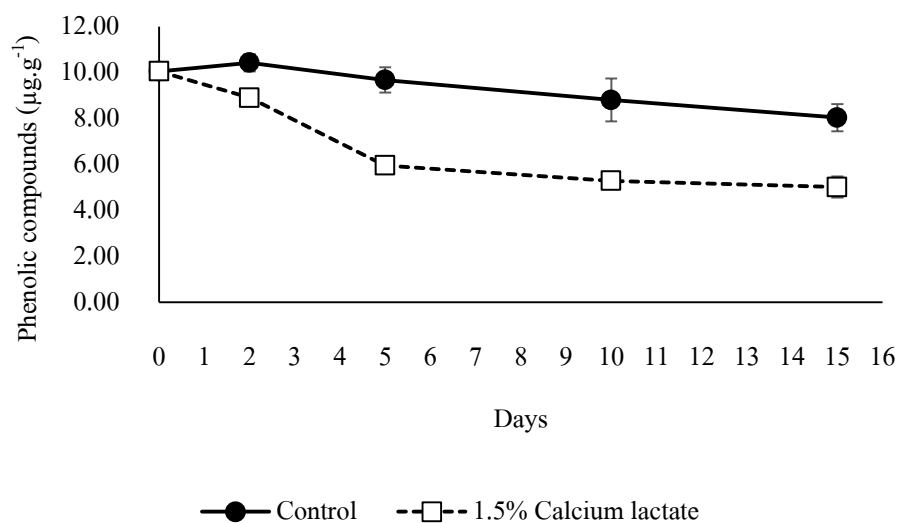


Figure 3 Change of phenolic compounds in fresh-cut romaine lettuce was not treated with calcium lactate (control) and treated with 1.5% calcium lactate stored at 6 ± 1 °C, RH 85%. Error bars represent $\pm$ standard error (SE) (n=3).

นอกจากนี้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมของเอนไซม์ Phenylalanine ammonialyase (PAL) Polyphenol oxidase (PPO) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่มีความเกี่ยวข้องกับการเกิดสีน้ำตาล (Figure 4 และ Figure 5) จากการทดลอง พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ PAL และ PPO ในผักกาดหวานที่มีการแช่สารละลายแคลเซียม แลคเตตต่ำกิจกรรมของเอนไซม์ต่ำกว่าผักกาดหวานที่ไม่มีการแช่สารละลาย โดยทั่วไปเนื้อเยื่อพืชมีการสร้างกิจกรรมของเอนไซม์ PAL และ PPO เมื่อพืชเกิดความเครียดหรือบาดเจ็บ (Peiser *et al.*, 1998; Chutichudet *et al.*, 2011) โดยมีเอนไซม์ PAL กระตุ้นให้มีการสังเคราะห์สารประกอบฟีนอล และมีเอนไซม์ PPO เร่งกระบวนการเกิดสีน้ำตาล จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมแลคเตต

มีผลต่อการลดลงของสารประกอบฟีนอล กิจกรรมของเอนไซม์ PAL และ PPO ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของการเกิดสีน้ำตาลของผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภค มีรายงานว่า การยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ PAL ในผักกาดสามารถยับยั้งความรุนแรงจากการเกิดสีน้ำตาลได้ (Peiser *et al.*, 1998) กิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสีน้ำตาลมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของเซลล์ สามารถพิจารณาได้จากผักกาดหวานที่มีการแช่สารละลายแลคเตตที่มีปริมาณของ MDA และกิจกรรมของเอนไซม์ LOX ต่ำกว่าที่ไม่ได้แช่สารละลาย โดยปริมาณของ MDA และกิจกรรมของเอนไซม์ LOX ที่สูงบ่งบอกถึงการเสื่อมสภาพของเนื้อเยื่อเซลล์ที่มากขึ้น

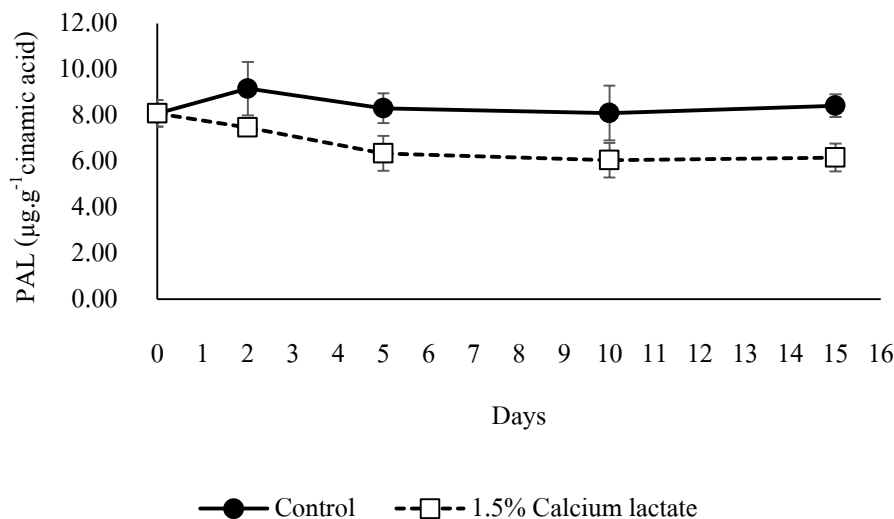


Figure 4 Change of Phenylalanine ammonia-lyase (PAL) activity in fresh-cut romaine lettuce was not treated with calcium lactate (control) and treated with 1.5% calcium lactate stored at 6 ± 1 °C, RH 85%. Error bars represent $\pm$ standard error (SE)(n=3).

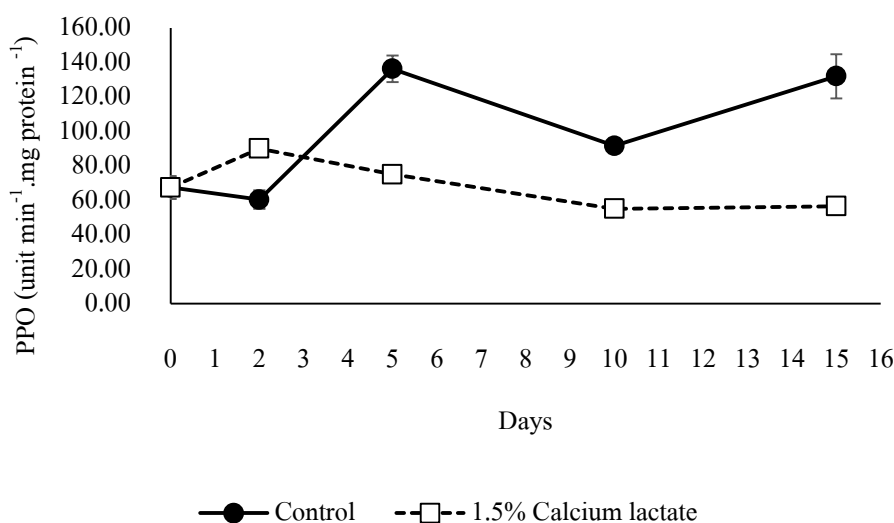


Figure 5 Change of Polyphenol oxidase (PPO) activity in fresh-cut romaine lettuce was not treated with calcium lactate (control) and treated with 1.5% calcium lactate stored at 6 ± 1 °C, RH 85%. Error bars represent $\pm$ standard error (SE) (n=3).

การเปลี่ยนแปลงกิจกรรมของเอนไซม์ POD ในผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่ไม่มีการแช่สารละลายแคลเซียมแลคเตทและแช่สารละลาย มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (Figure 6) จากการทดลอง พบว่าผักกาดหวานแปรรูปพร้อม

บริโภคที่มีการแช่สารละลายแคลเซียมแลคเตทมีกิจกรรมของเอนไซม์ POD น้อยกว่าผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่ไม่มีการแช่สาร กิจกรรมของเอนไซม์ POD มีความสัมพันธ์กับการเกิดสีน้ำตาลในพืชบางชนิดและมีบทบาทเกี่ยวข้องกับการยับยั้ง

ความเครียดในพืช (Razzoli *et al.*, 2015) การที่กิจกรรมของ POD ต่ำอาจแสดงให้เห็นว่าผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่มีการแช่สารละลายแคลเซียมแลคเตทมีความเครียดน้อยในระหว่างการเก็บรักษา แคลเซียมแลคเตทสามารถเพิ่มความแน่นเนื้อให้กับพืชได้ โดยแคลเซียมสามารถจับกับเพกทิน (Pectin) ภายในเซลล์ทำให้เซลล์เกิดความ

แข็งแรงเพิ่มขึ้น และส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์ POD ลดลง เนื่องจากเอนไซม์ POD จะถูกกระตุ้นเมื่อพืชได้รับความเครียดหรือเกิดชราภาพในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งสอดคล้องกับกิจกรรมของ LOX, ปริมาณ MDA และ Hydrogen peroxide (Figure 7-9) ที่มีค่าต่ำกว่าว่าผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่ไม่มีการแช่สารละลาย

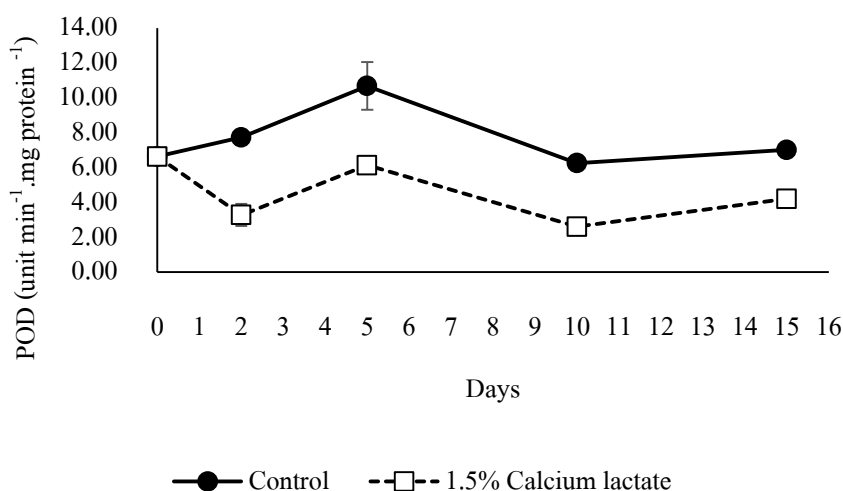


Figure 6 Change of Peroxidase (POD) activity in fresh-cut romaine lettuce was not treated with calcium lactate (control) and treated with 1.5% calcium lactate stored at 6 ± 1 °C, RH 85%. Error bars represent $\pm$ standard error (SE) (n=3).

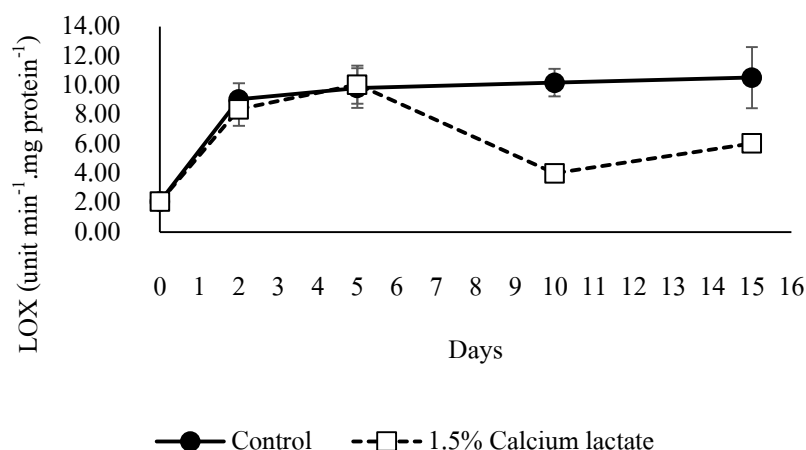


Figure 7 Change of lipoxigenase (LOX) activity in fresh-cut romaine lettuce was not treated with calcium lactate (control) and treated with 1.5% calcium lactate stored at 6 ± 1 °C, RH 85%. Error bars represent $\pm$ standard error (SE) (n=3).

การตรวจสอบการเสื่อมสภาพของเซลล์สามารถวิเคราะห์จากกิจกรรมของเอนไซม์ LOX (Figure 7) เนื่องจาก LOX เป็นเอนไซม์ที่กระตุ้นการสร้างอนุมูลอิสระในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ส่งผลต่อความเสียหายของเซลล์ (Schmidt and Kunert, 1986) จากการทดลองพบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ LOX มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนในวันที่ 2 ของการเก็บรักษา และมีค่าคงที่จนกระทั่งวันที่ 5 ของการเก็บรักษา เมื่อมีการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ LOX ในผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่มีการแช่สารละลายแคลเซียมแลคเตทมีค่าลดลง ในขณะที่ผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่ไม่มีการแช่สารละลายแคลเซียมแลคเตทมีค่าคงที่ แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมแลคเตทมีผลต่อการลดลงการทำงานของเอนไซม์ LOX ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สำคัญในการสร้างอนุมูลอิสระ นอกจากนี้มีการศึกษาปริมาณ MDA ในผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภค พบว่าผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่มีการแช่

สารละลายแคลเซียมแลคเตทมีปริมาณ MDA น้อยกว่าผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่ไม่มีการแช่สารละลายแคลเซียมแลคเตท (Figure 8) โดยค่า MDA เป็นค่าที่บ่งบอกถึงกระบวนการเกิด Lipid peroxidation (Shewfelt and Rosario, 2000) ซึ่งสอดคล้องกับกิจกรรมของเอนไซม์ LOX ที่ลดลง จากการทดลองพบว่าการใช้แคลเซียมแลคเตทสามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ LOX และลดปริมาณ MDA เนื่องจากแคลเซียมมีบทบาทในการควบคุมโครงสร้างและการทำงานของเซลล์เมมเบรน โดยทำหน้าที่เชื่อมต่อโปรตีนและไขมัน ทำให้เซลล์เกิดความแข็งแรง (Demidchik *et al.*, 2018) หากความแข็งแรงของเซลล์ลดลงทำให้กรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น กรดไขมันเหล่านี้ถูกออกซิไดส์ด้วยเอนไซม์ LOX ทำให้เกิดสารอนุมูลอิสระ โดยการเกิดปฏิกิริยาของกรดไขมันแสดงในรูปของปริมาณ MDA ดังนั้น จึงแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมแลคเตทสามารถเพิ่มแข็งแรงให้กับเซลล์เมมเบรน

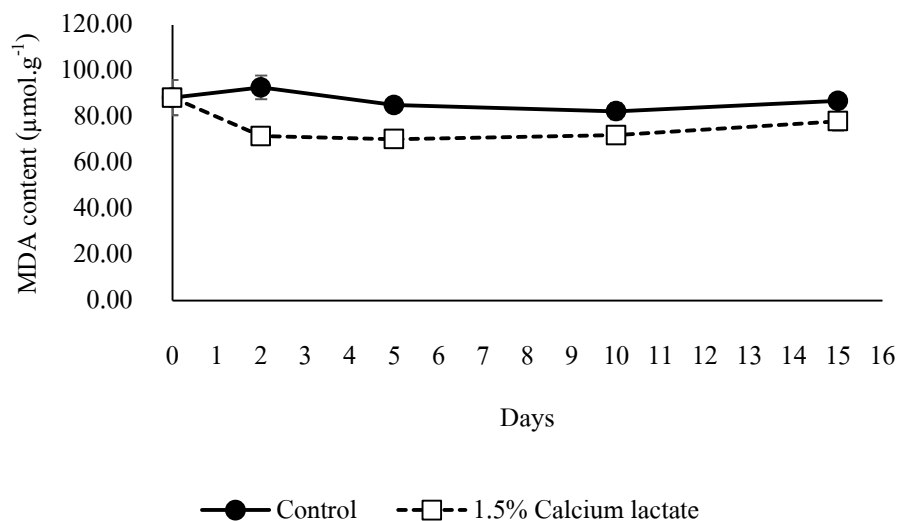


Figure 8 Change of Malondialdehyde content (MDA) in fresh-cut romaine lettuce was not treated with calcium lactate (control) and treated with 1.5% calcium lactate stored at 6 ± 1 °C, RH 85%. Error bars represent $\pm$ standard error (SE) (n=3).

มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ Hydrogen peroxide (Figure 9) โดยปริมาณ Hydrogen peroxide ที่สูงขึ้นแสดงถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเยื่อหุ้มเซลล์หรือการเสื่อมสภาพของพืช เนื่องจากในสถานะที่เซลล์เสื่อมสภาพชักนำให้เกิด Reactive oxygen species (ROS) เช่น Singlet oxygen (O_2^1), Hydrogen peroxide (H_2O_2), Superoxide (O_2^-) เป็นต้น (Sharma *et al.*, 2012) จากการเปรียบเทียบปริมาณ Hydrogen peroxide ในผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่ไม่มีการแช่และมีการแช่สารละลายแคลเซียมแลคเตทพบว่าผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคที่มีการแช่สารละลายแคลเซียมแลคเตทที่มีปริมาณ Hydrogen peroxide น้อยกว่าที่ไม่ได้แช่สารละลาย (Figure 8)

แสดงให้เห็นว่าสารแคลเซียมแลคเตทสามารถชะลอการเสื่อมสภาพของเซลล์ทำให้เซลล์เกิดความแข็งแรงส่งผลให้การสังเคราะห์ H_2O_2 ลดลง โดยปกติเมื่อพืชเกิดการชราภาพหรือเกิดการตายของเซลล์ (Programmed cell death; PCD) พบว่ามีปริมาณ Hydrogen peroxide เพิ่มขึ้น (Iakimova and Woltering, 2018) ซึ่งเป็นสัญญาณบ่งบอกถึงการชราภาพและการเสื่อมสภาพของเซลล์ ดังนั้น การใช้สารละลายที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบส่งผลให้เซลล์มีความแข็งแรงและชะลอการเสื่อมสภาพของเซลล์ได้ โดยแคลเซียมสามารถรวมตัวกับสารเพกทินภายในเซลล์เกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงที่เรียกว่า Egg-box model

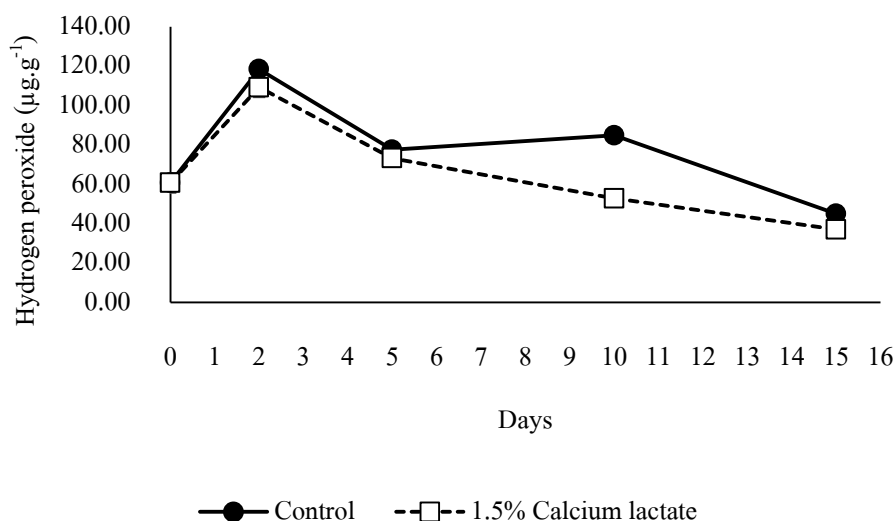


Figure 9 Change of hydrogen peroxide in fresh-cut romaine lettuce was not treated with calcium lactate (control) and treated with 1.5% calcium lactate stored at 6 ± 1 °C, RH 85%. Error bars represent $\pm$ standard error (SE) (n=3).

สรุป

การเกิดสีน้ำตาลในผักกาดหวานแปรรูปพร้อมบริโภคเป็นดัชนีชี้วัดด้านคุณภาพ และการยอมรับของผู้บริโภค จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้แคลเซียมแลคเตทที่ระดับความเข้มข้น 1.5%

สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงการเกิดสีน้ำตาลได้ การลดลงของการเกิดสีน้ำตาลสัมพันธ์การลดลงของสารประกอบฟีนอล กิจกรรมของเอนไซม์ PAL, PPO และ POD นอกจากนี้ยังพบว่าสารละลายแคลเซียมแลคเตทมีผลในการลดการเสื่อมสภาพของผักกาด

หวานแปรรูปพร้อมบริโภค โดยสอดคล้องกับการลดลงปริมาณ MDA, Hydrogen peroxide และกิจกรรมของเอนไซม์ LOX

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยครั้งนี้ได้รับเงินสนับสนุนจากสำนักงานบริหารการวิจัย นวัตกรรมและการสร้างสรรค์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

เอกสารอ้างอิง

- Alandes, L., Pérez-Munuera, I., Llorca, E., Quiles, A. and Hernando, I. 2009. Use of calcium lactate to improve structure of “Flor de Invierno” fresh-cut pears. **Postharvest Biology and Technology** 53: 145-151.
- Babenko, L.M., Shcherbatiuk, M.M., Skaterna, T.D. and Kosakivska, I.V. 2017. Lipxygenases and their metabolites in formation of plant stress tolerance. **The Ukrainian Biochemical Journal** 89: 1-211.
- Baysal, T. and Demirdoven, A. 2007. Lipxygenase in fruits and vegetables: A review. **Enzyme and Microbial Technology** 40(4): 491-496.
- Bradford, M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry** 72: 248-254.
- Castillo, F.I., Penel, I. and Greppin, H. 1984. Peroxidase release induced by ozone in *Sedum album* leaves: involvement of Ca^{2+} . **Plant Physiology** 74: 846-851.
- Chutichudet, B., Chutichudet, P. and Kaewsit, S. 2011. Influence of developmental stage on activities of polyphenol oxidase, internal characteristics and color of lettuce cv. Grand Rapids. **American Journal of Food Technology** 6(3): 215-225.
- Demidchik, V., Shabala, S., Isayenkov, S., Cuin, T.A. and Pottosin, I. 2018. Calcium transport across plant membranes: mechanisms and functions. **New Phytologist** 220: 49-69.
- Galeazzi, M.A.M. and Sgarbieri, V.C. 1981. Substrate specificity and inhibition of polyphenol oxidase (PPO) from a dwarf variety of banana (*Musa cavendishii* L.). **Journal of Food Science** 46: 1404-1406.
- He, Q. and Luo, Y. 2007. Enzymatic browning and its control in fresh-cut produce. **Stewart Postharvest Review** 3(6): 1-7.
- Hodges, D.M., DeLong, J.M., Fomey, C.F. and Prange, R.K. 1999. Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds. **Planta** 207: 604-611.
- Iakimova, E.T. and Woltering, E.J. 2018. The wound response in fresh-cut lettuce involves programmed cell death events. **Protoplasma** 255: 1225-1238.
- Ke, D. and Saltveit, M.E. 1989. Wound-induced ethylene production, phenolic metabolism and susceptibility to russet spotting in iceberg lettuce. **Physiological Plant** 76: 412-418.

- Ketsa, S. and Atantee, S. 1998. Phenolics, lignin, peroxidase activity and increased firmness of damaged pericarp of mangosteen fruit after impact. **Postharvest Biology and Technology** 14: 117-124.
- Maalekuu, K., Elkind, Y., Leikin-Frenkel, A., Lurie, S. and Fallik, E. 2006. The relationship between water loss, lipid content, membrane integrity and LOX activity in ripe pepper fruit after storage. **Postharvest Biology and Technology** 42: 248-255.
- Martin-Diana, A.B., Rico, D., Frias, J.M., Barat, J.M., Henahan, G.T.M. and Barry-Ryan, C. 2005. Calcium for extending the shelf life of fresh whole and minimally processed fruits and vegetables: a review. **Trends in Food Science and Technology** 18: 210-218.
- Martinez, M.V. and Whitaker, J.R. 1995. The biochemistry and control of enzymatic browning. **Trends in Food Science and Technology** 6(6): 195-200.
- Moon, K.M., Kwon, E.B., Lee, B. and Kim, C.Y. 2020. Recent trends in controlling the enzymatic browning of fruit and vegetable products. **Molecules** 25: 1-15.
- Peiser, G., López-Gálvez, G., Cantwell, M. and Saltveit, M.E. 1998. Phenylalanine ammonia lyase inhibitors control browning of cut lettuce. **Postharvest Biology and Technology** 14: 171-77.
- Pen, L.T. and Jiang, Y.M. 2003. Effects of chitosan coating on shelf life and quality of fresh-cut Chinese water chestnut. **LWT-Food Science and Technology** 36: 359-364.
- Razzoli, M., Frontini, A., Gurney, A., Mondini, E., Cubuk, C., Katz, L.S., Cero, C., Bolan, P.J., Dopazo, J., Vidal-Puig, A., Cinti, S. and Bartolomucci, A. 2015. Stress-induced activation of brown adipose tissue prevents obesity in conditions of low adaptive thermogenesis. **Molecular Metabolism** 5(1): 1-15.
- Rico, D., Martin-Diana, A.B., Henahan, G.T.M., Frias, J., Barat, J.M. and Barry-Ryan, C. 2007. Improvement in texture using calcium lactate and heat-shock treatments for stored ready-to-eat carrots. **Journal of Food Engineering** 79: 1196-1206.
- Schmidt, A. and Kunert, K.J. 1986. Lipid peroxidation in higher plants: the role of glutathione reductase. **Plant Physiology** 82: 700-702.
- Sharma, P., Jha, A.B., Dubey, R.S. and Pessarakli, M. 2012. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany** 217037: 1-26.
- Shewfelt, R.L. and Rosario, B.A.D. 2000. The role of lipid peroxidation in storage disorders of fresh fruits and vegetables. **HortScience** 35(4): 575-579.
- Velikova, V., Yordanov, I. and Edreva, A. 2000. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: Protective role of exogenous polyamines. **Plant Science** 151:59-66.

กำลังอัด การดูดซึมน้ำ และการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตบล็อกใช้ วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าถ่านหิน

Compressive strength, Water Absorption and Length Change of Concrete Block Made from Alkali Activated Fly Ash

อรรคเดช อับดุลมาติน¹ ปกป้อง รัตนชู¹ เซาฟีร์ ดือราแม^{2*} รัตนศักดิ์ หงษ์ทอง² และ อภัย เบญจพงศ์²

Akkadath Abdulmatin¹, Pokpong Rattanachu¹, Saofee Dueramae^{2*}, Rattanasak Hongthong²

and Apai Benchaphong²

Received: 8 October 2021, Revised: 15 November 2021, Accepted: 22 November 2021

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าถ่านหินโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยส่วนผสมของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างที่ทำจากเถ้าถ่านหิน โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลายต่าง ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ทดสอบการดูดซึมน้ำพร้อมทั้งทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาวเมื่อแช่ในน้ำของคอนกรีตบล็อกที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอายุการบ่ม โดยวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างที่ทำจากเถ้าถ่านหิน และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (คอนกรีต FA-6M-NS) สามารถรับกำลังอัดได้สูงสุด ซึ่งสามารถพัฒนาความแข็งแรงได้ถึง 249 กก./ซม² ที่อายุ 28 วัน คอนกรีตบล็อกที่ทำจากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 9.4 - 10.1 และมีค่าการเปลี่ยนแปลงของความยาวมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.12 - 0.33 นอกจากนี้ คอนกรีตบล็อกที่ทำจากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างทุกส่วนผสมมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าการใช้วัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบกับจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากวัตถุดิบ

คำสำคัญ: คอนกรีตบล็อก, วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่าง, เถ้าถ่านหิน, การดูดซึมน้ำ, การเปลี่ยนแปลงความยาว

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์นครินทร์ จังหวัดนครราชสีมา 96000

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Naradhiwas 96000, Thailand.

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10120

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok 10120, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): saofee.d@mail.rmuk.ac.th

ABSTRACT

This research aims to study the properties of concrete block made from alkali activated fly ash to use as cementitious material without Portland cement. Sodium hydroxide and sodium silicate solutions were used as an alkaline solution in the mixture of alkali activated fly ash. The compressive strength of concrete block was determined at 7, 14 and 28 days. The water absorption and change in length after immersed in water were also investigated at 28 days. The result found that the compressive strength of concrete block made from alkali activated as a cementitious material was increased with curing age. The using of sodium hydroxide combined with sodium silicate solution (FA-6M-NS concrete) was achieved the highest compressive strength, which could be developed compressive strength up to 249 kg/cm^2 at 28 days. The test results of water absorption and length change when immersed in water of concrete block made from alkali activated fly ash were ranging from 9.4 - 10.5 % and 0.12 - 0.33 %, respectively. Moreover, the concrete block made from alkali activated fly ash had significantly less release CO_2 emission than that of concrete using Portland cement as binder, which was eco-friendly material when compared with CO_2 emission obtained from raw materials.

Key words: concrete block, alkali activated, fly ash, water absorption, length change

บทนำ

คอนกรีตบล็อกเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยส่วนใหญ่คอนกรีตบล็อกผลิตขึ้นจากส่วนผสมของปูนซีเมนต์เป็นวัสดุหลักในการเชื่อมประสานส่วนผสมอื่นเข้าด้วยกัน เนื่องจากปูนซีเมนต์เป็นวัตถุดิบที่สามารถหาได้ง่าย สะดวกในด้านการใช้งาน อย่างไรก็ตาม การใช้ปูนซีเมนต์อาจส่งผลกระทบต่างๆ มากมายต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีทั้งด้านการทำลายทรัพยากรธรรมชาติและด้านการทำลายสิ่งแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันความต้องการใช้ปูนซีเมนต์มีปริมาณมาก และมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามการเติบโตของเศรษฐกิจ โดยในปี 2563 ประเทศไทยมีการผลิตปูนซีเมนต์ 39.87 ล้านตัน (The Office of Industrial Economics, 2020)

ในปัจจุบันปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) ถือเป็นปัญหาที่มีความสำคัญ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สู่ชั้นบรรยากาศเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูงโดยการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้พลังงานในการเผาสูงถึง $1,500^\circ\text{C}$ และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณที่สูงถึงประมาณ 0.9 ตัน ต่อการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน (Mehta, 2009; Turner and Collins, 2013)

จากปัญหาข้างต้น ทำให้มีงานวิจัยที่มีการใช้วัสดุปอซโซลานซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าขานอ้อย เถ้าแกลบ และเถ้าปาล์มน้ำมัน ใช้แทนที่ในส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม การ

ใช้วัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์นั้นสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้เพียงบางส่วน โดยแทนที่ในอัตราที่ต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน) ปูนซีเมนต์จึงยังเป็นวัสดุประสานหลักที่ใช้ในการผลิตคอนกรีต ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาวัสดุประสานที่ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์โดยใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง (alkali activated material) โดยไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ วัสดุประสานที่ทำการกระตุ้นด้วยด่างเป็นวัสดุที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นและมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานคล้ายกับปูนซีเมนต์ ประกอบไปด้วยสารตั้งต้นหลัก คือ แคลเซียม ซิลิกา และอลูมินา โดยมีสารละลายด่างได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (Nadoushan and Ramezaniapour, 2016; Najimi and Ghafoori, 2019) ที่มีหน้าที่กระตุ้นและชะละลายออกไซด์จากวัสดุตั้งต้น ทำปฏิกิริยากันเป็นโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) และโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (NASH) (Puertas *et al.*, 2000) ทั้งนี้ผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสารละลายด่างที่ใช้ นอกจากนั้นการใช้โซเดียมซิลิเกตเป็นการเพิ่มสารประกอบของซิลิกาในสารตั้งต้น ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาและทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้น (Singh and Subramaniam, 2017) จากงานวิจัยของ Gavalı *et al.* (2019) พบว่า การใช้สารละลายด่างในกลุ่มที่มีโซเดียมในส่วนประกอบทั้งโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกต มีความเหมาะสมกับการนำใช้งานการผลิตคอนกรีตบล็อก

มากกว่าสารละลายด่างกลุ่มโพแทสเซียม ทั้งในด้านสมบัติทางกลและความเหมาะสมทางด้านต้นทุน

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหิน (alkali activated fly ash) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นสารละลายด่าง เพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์ โดยทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการกระตุ้นและการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยศึกษาสมบัติด้านการรับกำลังอัด อัตราการดูดซึมน้ำและการเปลี่ยนแปลงความยาวเนื่องจากการดูดซึมน้ำ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานสำหรับคอนกรีตควบคุมปูนซีเมนต์ที่ใช้มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 และใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง โดยเถ้าถ่านหินที่เป็นวัสดุประสานสำหรับกลุ่มของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงงานโดยตรงซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.26 มีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 28.7 ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตและประเภทที่ 1 มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์เป็นหลัก เท่ากับร้อยละ 69.00 ส่วนเถ้าถ่านหินที่ใช้มีผลรวมของซิลิกอนออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ เท่ากับ 57.02 มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ เท่ากับ 29.56 จัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 (2019)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Oxide (%)	Ordinary Portland cement (OPC)	Fly Ash
Silicon Dioxide (SiO ₂)	16.10	24.25
Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃)	3.82	14.43
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	3.59	18.34
Calcium Oxide (CaO)	69.00	29.56
Sulfur Trioxide (SO ₃)	4.70	6.46
Magnesium Oxide (MgO)	0.93	2.44
Sodium Oxide (Na ₂ O)	0.36	2.09
Potassium Oxide (K ₂ O)	0.78	0.26
Loss on Ignition (LOI)	0.40	0.60

2. การทดสอบสมบัติทางกลพื้นฐานของวัสดุ

การวิเคราะห์สารประกอบและสมบัติทางกลพื้นฐานของวัสดุประสานที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหิน โดยทดสอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ซึ่งใช้เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

3. อัตราส่วนผสม

ส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสาน กระตุ้นด้วยด่างจากเถ้าถ่านหินใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) เป็นสารละลายต่างเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ส่วนผสมของคอนกรีตบล็อก มีอัตราส่วนวัสดุประสาน : ทราย : หิน เท่ากับ 1 : 1.5 : 1.75 ใช้ทรายที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.1 และหินที่มีค่า

โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 5.2 โดยอัตราส่วนผสมของหินและทรายที่แสดงดังตารางที่ 2 เป็นน้ำหนักของมวลรวมที่มีสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/B) เท่ากับ 0.67 และใช้สารลดน้ำพิเศษประเภท (Type) F เพื่อควบคุมค่าการยุบตัวให้อยู่ระหว่าง 5 - 10 เซนติเมตร โดยทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการกระตุ้น (ส่วนผสม FA-4M ใช้ NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 4 โมลาร์ และส่วนผสม FA-6M ใช้ NaOH ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 6 โมลาร์) นอกจากนั้นศึกษาผลของการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก (ส่วนผสม FA-6M-NS)

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตบล็อก

Sample	Mix proportion (kg/m ³)							L/B	Super Plasticizer (%)
	OPC	Fly ash	Fine aggregate	Coarse aggregate	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Water		
CT	525	-	735	920	-	-	352	0.67	-
FA-4M	-	525	735	920	53	-	352	0.67	0.39
FA-6M	-	525	735	920	85	-	352	0.67	0.39
FA-6M-NS	-	525	735	920	85	85	352	0.67	0.39

4. การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบหาลำดั้ด้านทานแรงอัดของคอนกรีตบดลือกใช้ตัวอย่างทดสอบรูปลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10$ เซนติเมตร³ โดยหลังจากผสมและหล่อตัวอย่างลงในแบบหล่อทำการเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องและแกะแบบหลังจากหล่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำจนกว่าจะถึงอายุการทดสอบ ซึ่งทำการทดสอบที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน แต่ละอายุใช้ 3 ตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย

5. การทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำ

การทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบดลือกใช้ตัวอย่างขนาด $4 \times 4 \times 16$ เซนติเมตร³ โดยการ

ทดสอบหาลำดั้การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักขึ้นตัวอย่างเมื่อแช่น้ำ โดยใช้ตัวอย่างที่มีอายุ 28 วัน ซึ่งเตรียมตัวอย่างโดยการอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส ไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จากนั้นวางทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง ทำการชั่งน้ำหนักของแต่ละตัวอย่างหลังจากแช่น้ำให้ท่วมเป็นเวลา 0, 1, 3, 6, 24, 72 และ 168 ชั่วโมง ในการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแต่ละครั้ง ใช้ผ้าเช็ดที่ผิวขึ้นทดสอบแต่ละก้อนและทำการชั่งตัวอย่างให้เสร็จภายในเวลา 3 นาที ทำการคำนวณหาลำดั้การดูดซึมน้ำได้โดยใช้สมการที่ (1)

$$\text{Water Absorption} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

เมื่อ	Water Absorption	คือ การดูดซึมน้ำ ณ เวลาใดๆ	
	W_1	คือ น้ำหนักตัวอย่างที่สภาพอบแห้ง (เริ่มต้น)	(กรัม)
	W_2	คือ น้ำหนักตัวอย่าง ณ อายุการทดสอบ	(กรัม)

6. การทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาวเมื่อแช่น้ำ

การทดสอบอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตบดลือกจากการดูดซึมน้ำ โดยใช้ตัวอย่างขนาด $4 \times 4 \times 16$ เซนติเมตร³ ที่มีอายุ 28 วัน ซึ่งเตรียมตัวอย่างโดยการอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส ไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จากนั้นวาง

ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง ในการทดสอบทำโดยการวัดความยาวของตัวอย่างที่แช่ให้จมอยู่ในน้ำเป็นเวลา 0, 1, 3, 6, 24, 72 และ 168 ชั่วโมง ซึ่งสามารถคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของความยาวได้ดังสมการที่ (2)

$$\text{Length change} = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

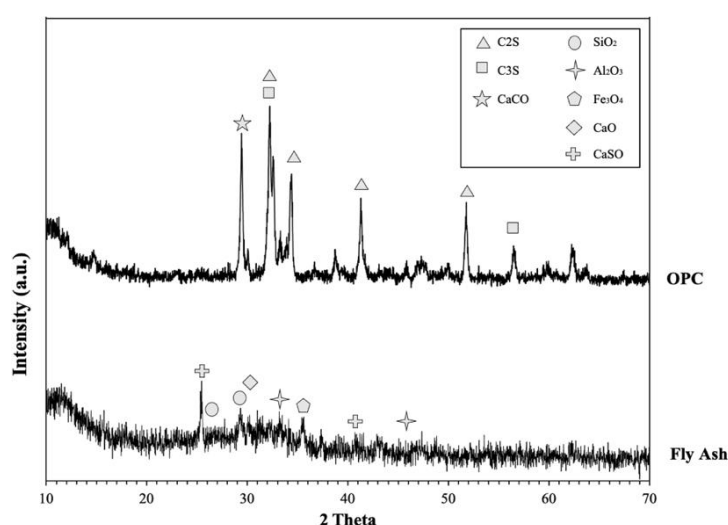
เมื่อ	Length change	คือ การเปลี่ยนแปลงของความยาวจากการดูดซึมน้ำ ณ เวลาใดๆ	
	L_1	คือ ความยาวตัวอย่างที่สภาพอบแห้ง (เริ่มต้น)	(มิลลิเมตร)
	L_2	คือ ความยาวของตัวอย่าง ณ อายุการทดสอบ	(มิลลิเมตร)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. สมบัติทางสัณฐานวิทยาของวัสดุ

สมบัติทางสัณฐานวิทยาของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) และเถ้าถ่านหิน (FA) แสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งแสดงอยู่ในรูปจุดยอด (peak) โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีของวัสดุ ณ ตำแหน่งต่างๆ ผลการทดสอบพบว่าองค์ประกอบของหลักปูนซีเมนต์ ได้แก่ ไคแคลเซียม

ซิลิเกต (C2S) และไตรแคลเซียมซิลิเกต (C3S) ส่วนเถ้าถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถตรวจพบ ได้แก่ ควอตซ์ (SiO_2), แคลเซียมออกไซด์ (CaO), อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3), เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และแอนไฮไดรต์ (CaSO_4) และสามารถพบสารประกอบที่ไม่เป็นผลึกอยู่ในช่วงระหว่าง $20 - 40^\circ 2\text{-Theta}$ ซึ่งความไม่เป็นผลึกหรือความเป็นอสัณฐานของเถ้าถ่านหินนั้นแสดงให้เห็นว่าวัสดุมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา



ภาพที่ 1 XRD ของวัสดุประสาน

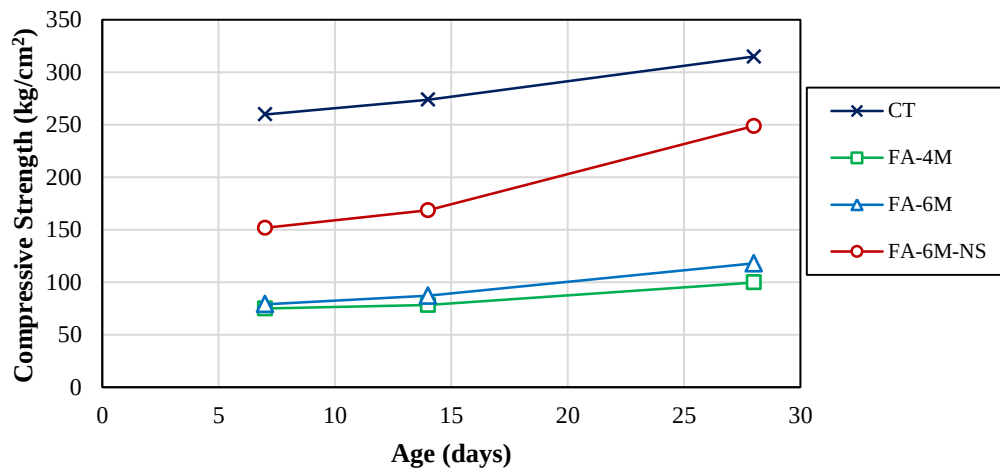
2. กำลังอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหิน ซึ่งมีการใช้สารละลายด่างที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกควบคุมซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานแสดงไว้ดังภาพที่ 2 จากผลการทดสอบพบว่าการพัฒนากำลังของคอนกรีตที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างมีแนวโน้มการพัฒนา กำลังไปในทิศทางเดียวกับปูนซีเมนต์ กล่าวคือมีการพัฒนา กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีอายุการบ่มที่นานขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังอัดของกลุ่มคอนกรีตซึ่งใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยด่าง พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นจาก 4 โมลาร์เป็น 6 โมลาร์

สามารถกระตุ้นการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตบล็อกได้มากขึ้น โดยคอนกรีต FA-4M มีกำลังอัดเท่ากับ 75, 78 และ 100 กก/ซม² ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ส่วนคอนกรีต FA-6M มีกำลังอัดเท่ากับ 79, 87 และ 118 กก/ซม² ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่ใช้การชะละลายออกไซด์ของเถ้าถ่านหินออกมา ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยามากขึ้น จึงมีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้น (Rifaai *et al.*, 2019; Dueramac *et al.*, 2019) นอกจากนี้พบว่า คอนกรีตบล็อกที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างที่ใช้การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (คอนกรีต FA-6M-NS) สามารถพัฒนา กำลังได้ดียิ่งขึ้น โดยมีกำลัง

อัดที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน เท่ากับ 152, 169 และ 249 กก/ชม² ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Singh and Subramaniam (2017) พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นการเพิ่มสารประกอบของซิลิกาในสารตั้งต้น ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาและทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เพิ่มขึ้น

นอกจากนั้นยังทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (NASH) ซึ่งส่งผลต่อการรับกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของกำลังอัด พบว่า คอนกรีตบล็อกทุกส่วนผสมสามารถนำไปใช้งาน เนื่องจากมีค่ากำลังอัดมากกว่า 5.5 เมกะพาสคัล หรือ 55 กก/ชม² ตามมาตรฐาน มอก. (TIS 57, 1990)

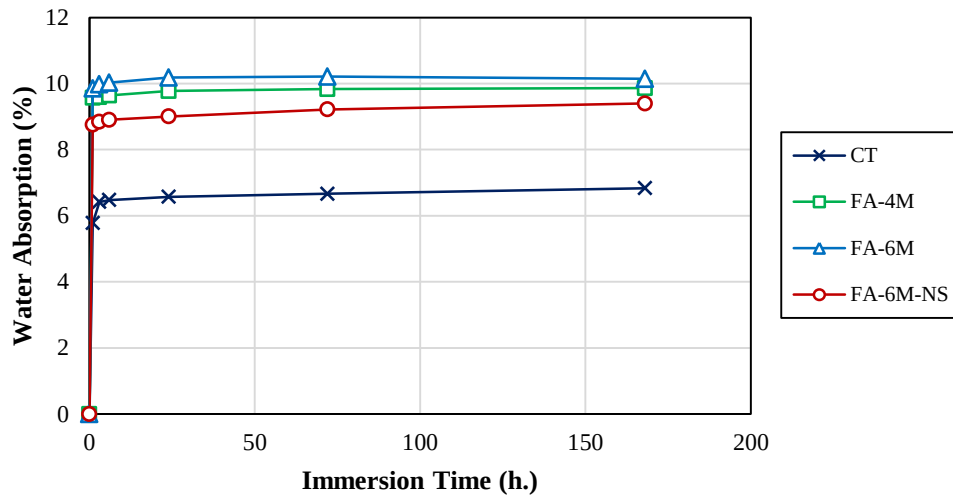


ภาพที่ 2 กำลังอัดของคอนกรีตบล็อก

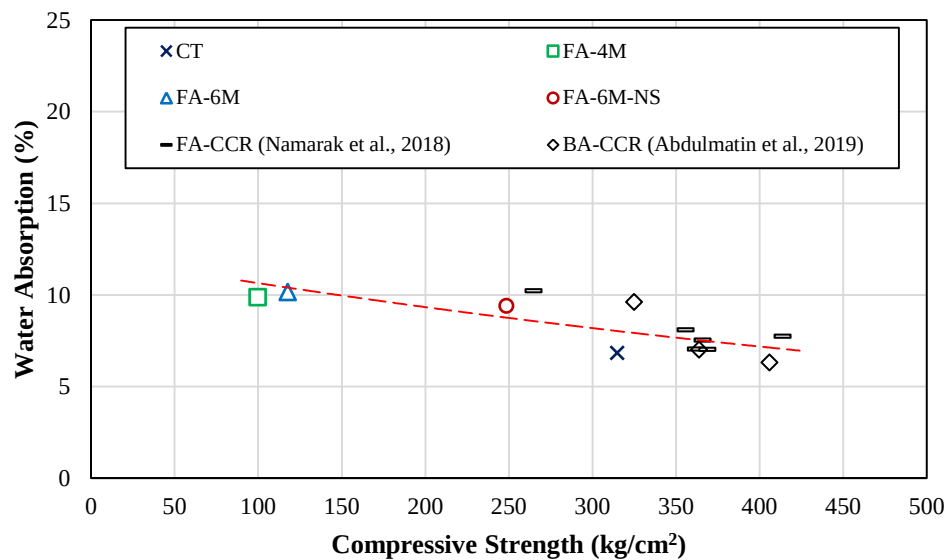
3. การดูดซึมของน้ำ

การทดสอบการดูดซึมของน้ำทดสอบโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตบล็อกเมื่อแช่ในน้ำซึ่งทำการทดสอบโดยการชั่งน้ำหนักของคอนกรีตหลังจากแช่น้ำเป็นระยะเวลา 168 ชั่วโมง จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตบล็อกที่ใช้เถาถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างมีค่าอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 9.4 - 10.1 ขณะที่คอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์มีค่าการดูดซึมของน้ำเท่ากับร้อยละ 6.8 (แสดงดังภาพที่ 3) เห็นได้ชัดเจนว่า คอนกรีตบล็อกทุกส่วนผสมมีค่าการดูดซึมน้ำอย่างรวดเร็วในช่วงต้น หลังจากนั้น

การดูดซึมของน้ำมีแนวโน้มคงที่หลังจากแช่น้ำเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดสอบพบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถลดค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อก ที่ใช้วัสดุประสานจากเถาถ่านหินกระตุ้นด้วยด่าง เนื่องจากการเพิ่มของสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถลดความพรุนภายในโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง ส่งผลต่อการดูดซึมของน้ำที่ลดลง (Liew *et al.*, 2012)



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมของน้ำและระยะเวลาในการแช่



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 28 วันและการดูดซึมของน้ำที่ระยะเวลา 168 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการดูดซึมของน้ำ พบว่า การดูดซึมของน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเกิดจากผลผลิตจากปฏิกิริยาซึ่งจับตัวกันเป็นโครงสร้างที่รับกำลังที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการเพิ่มผลผลิตยังส่งผลต่อความพรุนของโครงสร้างทางจุลภาพที่ลดลง การที่ช่องว่างหรือความพรุนภายในเนื้อของซีเมนต์เพสต์ลดลงแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของเนื้อซีเมนต์เพสต์

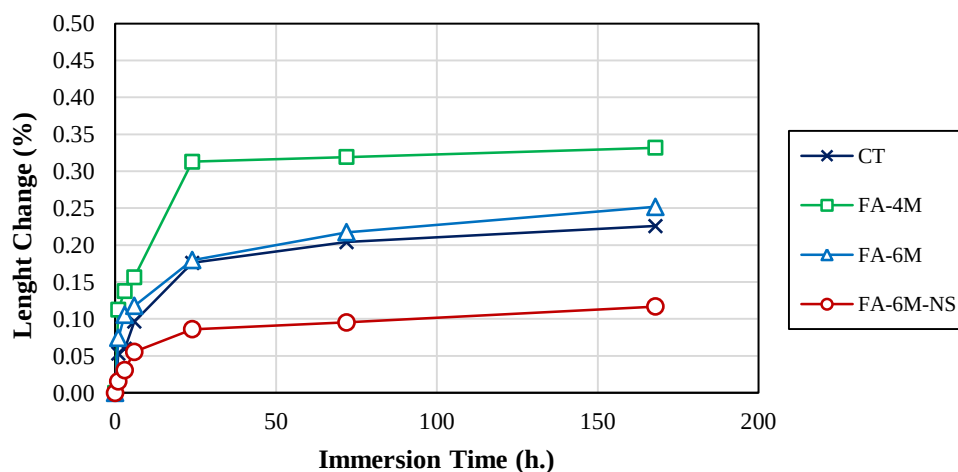
เพิ่มขึ้นและส่งผลให้มีอัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง (Pangdaeng *et al.*, 2014) โดยจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลของความที่บ้น้ำของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีตเช่นเดียวกับคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ เมื่อพิจารณาผลของการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างในงานวิจัยนี้ เปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Namarak *et al.*, 2018)

และทำจากเถาขานอ้อยและกากเคลเซียมคาร์ไบด์ (Abdulmatin *et al.*, 2019) ซึ่งไม่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน พบว่า มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำลดลงตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นและผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบจากงานวิจัยนี้

4. อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวเนื่องจากการดูดซึมน้ำ

ผลการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตบล็อกเนื่องจากการดูดซึมน้ำแสดงดังภาพที่ 5 พบว่า คอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานมีค่าการเปลี่ยนแปลงของความยาวเท่ากับร้อยละ 0.23 หลังจากแช่น้ำเป็นระยะเวลา 168 ชั่วโมง ส่วนกลุ่มของคอนกรีตบล็อกที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยค่าต่างมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.12 ถึง 0.33 หลังจากแช่น้ำเป็นระยะเวลา 168 ชั่วโมง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นและการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลาย

โซเดียมซิลิเกต ส่งผลต่อการแปลงเปลี่ยนของความยาวที่น้อยลง ผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบของ Matalkah and Soroushian (2018) ซึ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความยาวของมอร์ตาร์ที่แช่น้ำปูนขาวอิมตัว พบว่า มอร์ตาร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยค่าต่างมีการขยายตัวต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ นอกจากนี้เห็นได้ว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (FA-6M-NS) สามารถลดการเปลี่ยนแปลงของความยาวอย่างเห็นได้ชัด โดยการเพิ่มสารละลายโซเดียมซิลิเกตในส่วนผสมของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยค่าต่างเป็นการเพิ่มอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ส่วนผสมซึ่งมีผลต่อการเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุประสาน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรที่ลดลง (Lee *et al.*, 2020; Abdel-Gawwad *et al.*, 2020)



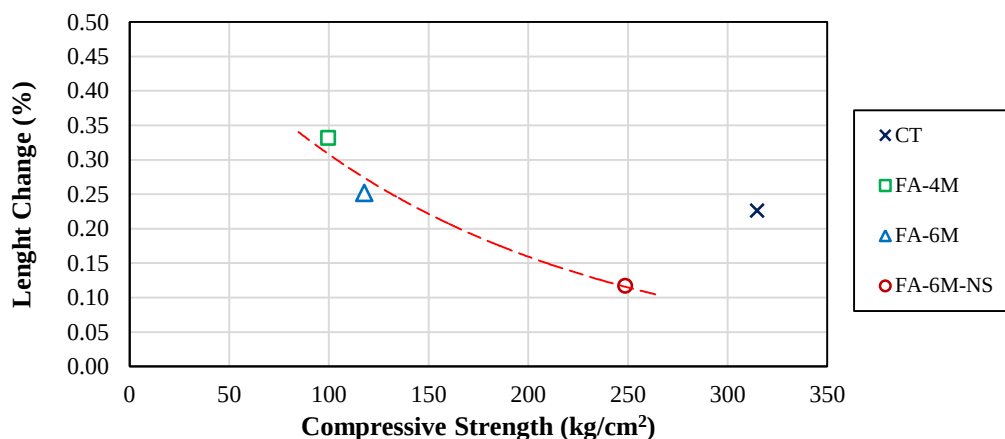
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความยาวเนื่องจากการดูดซึมน้ำและระยะเวลาในการแช่

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและการเปลี่ยนแปลงของความยาวเมื่อแช่น้ำซึ่งแสดงในภาพที่ 6 เห็นได้ชัดเจนว่าคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยค่าต่างที่ใช้เถาขานอ้อยทั้งที่ใช้สารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ และการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลายค่าต่าง มีค่าการเปลี่ยนแปลงของความยาวลดลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น

เนื่องจากการที่คอนกรีตบล็อกมีกำลังอัดมากขึ้นเป็นผลมาจากการจับตัวของโครงสร้างหรือการยึดโยงกันของวัสดุเชื่อมประสานที่ดี โครงสร้างมีความแน่นขึ้น

ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของความยาวหรือปริมาตรที่ดีขึ้น (Ryu *et al.*, 2013; Abdel-Gawwad *et al.*, 2020)



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และการเปลี่ยนแปลงความยาวเนื่องจากการดูดซึมน้ำที่ระยะเวลา 168 ชั่วโมง

5. ผลของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุแต่ละชนิด (Turner and Collins, 2013) โดยแสดงค่าปริมาณของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในหน่วยกิโลกรัมต่อปริมาณวัสดุ 1 กิโลกรัม พบว่า ปูนซีเมนต์มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงถึง 0.9 ตันต่อการผลิตปูนซีเมนต์หนึ่งตัน โดยมาจากกระบวนการสลายตัวของหินปูน และการใช้ความร้อนในเตาเผาปูนซีเมนต์ หากเปรียบเทียบกับเถาถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการใช้ถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากวัตถุดิบดังกล่าวจึงพิจารณาเป็นศูนย์ แต่เถาถ่านหินยังมีค่าการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วน ซึ่งมาจากการใช้พลังงานในกระบวนการดักจับเถาถ่านหิน จากนั้นนำมาคำนวณค่าประมาณของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากวัสดุประสานที่ใช้ในแต่ละส่วนผสมต่อการผลิตคอนกรีตบล็อก 1 ลูกบาศก์เมตรเปรียบเทียบกับ

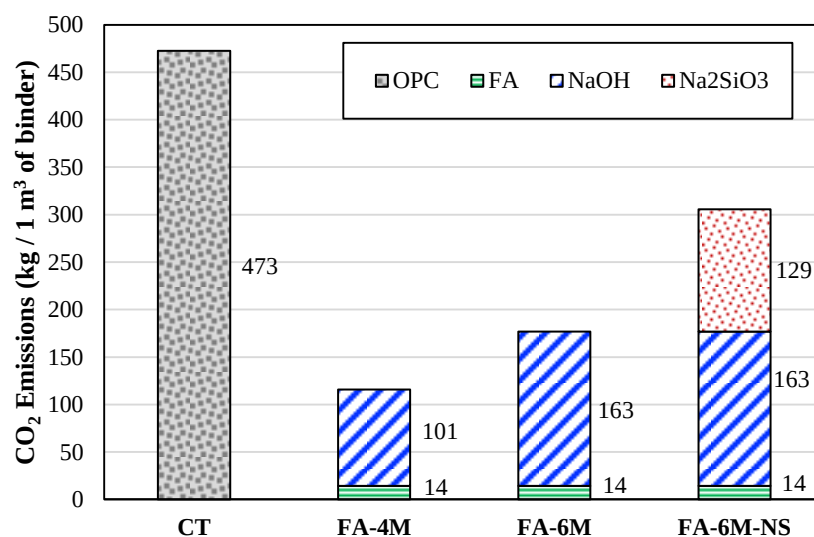
ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ซึ่งใช้วัสดุประสานเท่ากับ 525 กิโลกรัมต่อผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร โดยผลการเปรียบเทียบแสดงในภาพที่ 7 พบว่า คอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 473 กิโลกรัมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ส่วนกลุ่มของคอนกรีตบล็อกที่ใช้วัสดุประสานที่ทำจากเถาถ่านหิน กระตุ้นด้วยค่าสามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมาก โดยส่วนผสม FA-4M, FA-6M และ FA-6M-NS มีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 116, 177 และ 306 กิโลกรัมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ โดยการใช้วัสดุประสานจากเถาถ่านหินและใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารกระตุ้นกำลัง (คอนกรีตบล็อก FA-4M, FA-6M) สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงถึงร้อยละ 62 - 75 เมื่อเทียบกับวัสดุประสานที่ทำจากปูนซีเมนต์ แม้ว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารละลาย

โซเดียมซิลิเกต (คอนกรีตบล็อก FA-6M-NS) ส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีผลรวมของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์ ซึ่งยังคงสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 35 เมื่อเทียบกับวัสดุประสานที่ทำจากปูนซีเมนต์ แสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุประสานจากเถ้าถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยังอาจช่วยลดปัญหาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่

บรรยากาศเนื่องจากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบเฉพาะการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อก ได้แก่ เถ้าถ่านหิน สารละลายด่างและปูนซีเมนต์ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังเกิดขึ้นได้จากปัจจัยอื่นๆ เช่น การขนส่ง ซึ่งส่งผลให้ค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากวัสดุทั้งสองอาจมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางในการขนส่ง

ตารางที่ 3 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Turner and Collins, 2013)

Material	CO ₂ Emissions (kg CO ₂ -e per kg of material weight)
OPC	0.900
FA	0.027
NaOH	1.915
Na ₂ SiO ₃	1.514



ภาพที่ 7 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละส่วนผสม

สรุป

1. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของบล็อกคอนกรีตที่ทำเถ้าถ่านหิน และการ

ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตส่งผลอย่างมากต่อการพัฒนากำลังอัด ซึ่งเห็นว่า ตัวอย่างคอนกรีตบล็อกที่ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (คอนกรีต F-6M-NS) พบว่ามีกำลังอัดเท่ากับ

152, 169 และ 249 กก/ชม² ที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

2. จากการทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำ พบว่า คอนกรีตบล็อกที่ทำจากเถ้าถ่านหินกระเด็นด้วยค่ามีค่าอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 9.4 - 10.1 ขณะที่ คอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์มีค่าการดูดซึมของน้ำ เท่ากับร้อยละ 6.8 นอกจากนั้น พบว่า อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีต กล่าวคือ การดูดซึมของน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น

3. จากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตบล็อกเนื่องจากการดูดซึมของน้ำ พบว่า คอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าถ่านหินกระเด็นด้วยค่ามีค่าการเปลี่ยนแปลงของความยาวมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.12 ถึง 0.33 หลังจากแช่เป็นระยะเวลา 168 ชั่วโมง และคอนกรีตบล็อกที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานมีค่าการเปลี่ยนแปลงของความยาว เท่ากับร้อยละ 0.23 หลังจากแช่เป็นระยะเวลา 168 ชั่วโมง

4. เมื่อพิจารณาผลของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการใช้วัสดุประสานแต่ละชนิด พบว่า คอนกรีตบล็อกที่ทำจากเถ้าถ่านหินกระเด็นด้วยค่าทุกส่วนผสมมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าการใช้วัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเห็นได้ชัดเจน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ภายใต้เงินงบประมาณเงินรายได้ พ.ศ. 2563 ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้อำนวยความสะดวก ในการใช้พื้นที่และเครื่องมือต่างๆ สำหรับ

การศึกษาวิจัย นอกจากนั้นขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

เอกสารอ้างอิง

- Abdel-Gawwad, H.A., Mohammed, M.S. and Zakey, S.E. 2020. Preparation, performance, and stability of alkali-activated-concrete waste-lead-bearing sludge composites. **Journal of Cleaner Production** 259: 120924.
- Abdulmatin, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. 2019. Environmentally friendly interlocking concrete paving block containing new cementing material and recycled concrete aggregate. **European Journal of Environmental and Civil Engineering** 23(12): 1467-1484.
- ASTM C618. 2019. **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Dueramae, S., Tangchirapat, W., Sukontasukkul, P., Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C. 2019. Investigation of compressive strength and microstructures of activated cement free binder from fly ash-calcium carbide residue mixture. **Journal of Materials Research and Technology** 8(5): 4757-4765.
- Gavali, H.R., Bras, A., Faria, P. and Ralegaonkar, R.V. 2019. Development of sustainable alkali-activated bricks using industrial wastes. **Construction and Building Materials** 215: 180-191.

- Lee, W.H., Cheng, T.W., Lin, K.Y., Lin, K.L., Wu, C.C. and Tsai, C.T. 2020. Geopolymer technologies for stabilization of basic oxygen furnace slags and sustainable application as construction materials. **Sustainability** 12(12): 5002.
- Liew, Y.M., Kamarudin, H., Al Bakri, A.M., Bnhussain, M., Luqman, M., Nizar, I.K., Ruzaidi C.M. and Heah, C.Y. 2012. Optimization of solids-to-liquid and alkali activator ratios of calcined kaolin geopolymeric powder. **Construction and Building Materials** 37: 440-451.
- Matakah, F. and Soroushian, P. 2018. Synthesis and characterization of alkali aluminosilicate hydraulic cement that meets standard requirements for general use. **Construction and Building Materials** 158: 42-49.
- Mehta, P.K. 2009. Global concrete industry sustainability. **Concrete International** 33(2): 45-48.
- Nadoushan, M.J. and Ramezaniapour, A.A. 2016. The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers. **Construction and Building Materials** 111: 337-347.
- Najimi, M. and Ghafoori, N. 2019. Engineering properties of natural pozzolan/slag based alkali-activated concrete. **Construction and Building Materials** 208: 46-62.
- Namarak, C., Bumrungsri, C., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C. 2018. Development of concrete paving blocks prepared from waste materials without portland cement. **Materials Science** 24(1): 92-99.
- Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V. and Chindaprasit, P. 2014. Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. **Materials & Design** 53: 269-274.
- Puertas, F., Martínez-Ramírez, S., Alonso, S. and Vazquez, T. 2000. Alkali-activated fly ash/slag cements: Strength behavior and hydration products. **Cement and Concrete Research** 3(10): 1625-1632.
- Rifaai, Y., Yahia, A., Mostafa, A., Aggoun, S. and Kadri, E.H. 2019. Rheology of fly ash-based geopolymer: effect of NaOH concentration. **Construction and Building Materials** 223: 583-594.
- Ryu, G.S., Lee, Y.B., Koh, K.T. and Chung, Y.S. 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. **Construction and Building Materials** 47: 409-418.
- Singh, G.B. and Subramaniam, K.V. 2017. Evaluation of sodium content and sodium hydroxide molarity on compressive strength of alkali activated low-calcium fly ash. **Cement and Concrete Composites** 81: 122-132.
- The Office of Industrial Economics. 2020. **Industrial Economic Summary Report 2020 and Industrial Economic Trend 2021**. Industrial Situations. Available Source: <http://www.oie.go.th/assets/portals/1/fileups/2/files/Industry%20conditions/annual2020trends2021.pdf>, September 10, 2021. (in Thai)

- TIS 57. 1990. **Hollow Loadbearing Concrete Masonry Units**. Thai industrial standards institute, Thailand. (in Thai)
- Turner, L.K. and Collins, F.G. 2013. Carbon dioxide equivalent ($\text{CO}_2\text{-e}$) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. **Construction and Building Materials** 43: 125-130.

การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายบริเวณ ลุ่มน้ำบางปะกง ปี 2559

Seasonal Variation of Dissolved Inorganic Nitrogen in Bangpakong Watersheds in 2016

เพชฌุโชค จินตเสรีณี* วิชญา กันบัว ภัทราวุธ ไทยพิชิตบุรพา จริยวดี สุริยพันธุ์ และ อนุกูล บุรณประทีปรัตน์

Pachoenchoke Jintaseraanee*, Vichaya Gunbua, Patrawut Thaipichitburapa, Jariyavadee Suriyaphan
and Anukul Buranapratheprat

Received: 6 July 2021, Revised: 3 October 2021, Accepted: 27 May 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของสารไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายในแม่น้ำบางปะกงและเอส
ทურიของแม่น้ำบางปะกงในรอบปี พ.ศ. 2559 โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 16 สถานี ที่ผิวหน้าน้ำและพื้นท้องน้ำ ผลการศึกษา
พบว่าปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์และไนเตรทมีค่าอยู่ในช่วง 9.22-75.78 $\mu\text{g-at N/L}$, 0.03-20.69 $\mu\text{g-at N/L}$ และ
0.11-100.39 $\mu\text{g-at N/L}$ ตามลำดับ และปริมาณสารไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล โดย
การศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดในช่วงเปลี่ยนจากฤดูแล้งเป็นฤดูน้ำมากในเดือนกรกฎาคม โดย
แอมโมเนียที่ผิวน้ำลดลงและเปลี่ยนไปเป็นไนไตรท์และไนเตรทซึ่งมีเพิ่มปริมาณขึ้นจากฤดูแล้งในเดือนเมษายน
และในช่วงฤดูน้ำมากในเดือนกันยายน ในขณะที่ปริมาณไนเตรทที่พบที่พื้นท้องน้ำอาจถูกแบคทีเรียบางชนิด
เปลี่ยนไปเป็นไนไตรท์และกลับเป็นแอมโมเนีย การทดสอบทางค่าสถิติแสดงว่าปริมาณสารไนโตรเจนอนินทรีย์
ละลายมีความแตกต่างกันระหว่างช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

คำสำคัญ: ไนโตรเจนอนินทรีย์ละลาย, แม่น้ำบางปะกง, บางปะกงเอสทური, การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

ABSTRACT

This study aimed at investigating seasonal variations of dissolved inorganic nitrogen in Bangpakong River and its estuary in 2016. Water samples from the surface and the bottom from 16 stations were taken. The results showed that ammonia, nitrite and nitrate were 9.22-75.78 $\mu\text{g-at N/L}$, 0.03-20.69 $\mu\text{g-at N/L}$ and 0.11-100.39 $\mu\text{g-at N/L}$, respectively. All these dissolved inorganic nitrogens varied seasonally with the greatest change occurring during the transition from dry season to wet season in July. Notably, ammonia in surface water decreased and was likely transformed into other N species during dry season in April and wet season in September, while nitrate in bottom water might be reduced to nitrite and ammonia by bacterial activities. The statistical analyses confirmed that the dissolved inorganic nitrogen concentrations differed significantly between wet and dry seasons ($p < 0.05$).

Keywords: dissolved inorganic nitrogen, Bangpakong River, Bangpakong estuary, seasonal variations

บทนำ

แม่น้ำบางปะกงเป็นหนึ่งในแม่น้ำสายสำคัญที่ไหลลงสู่อ่าวไทยตอนบน เมื่อแบ่งตามการใช้ประโยชน์ เป็นแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 โดยที่ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำกำหนดให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนเตรทในแหล่งน้ำประเภทนี้ต้องมีค่าไม่เกิน 35 และ 357 $\mu\text{g-at N/L}$ ตามลำดับ หากมีค่าเกินกว่านี้แสดงว่าแหล่งน้ำนั้นเริ่มมีความเสื่อมโทรม (Announcement of the National Environment Board, 2007) สารประกอบไนโตรเจนมีความสำคัญและเป็นหนึ่งในปัจจัยจำกัดความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งน้ำ (Limiting factor) โดยในช่วงฤดูฝนน้ำชะล้างตะกอนและสารอาหารจากแผ่นดินลงสู่แม่น้ำและไหลออกสู่ปากแม่น้ำ จึงมักพบว่าบริเวณปากแม่น้ำมีสารอาหารเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูนี้ โดยที่ Kijkomhaeng (2000) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและสถานที่ของปริมาณสารอนินทรีย์ละลายน้ำบริเวณปากแม่น้ำบางปะกงในช่วงฤดูฝน (พฤษภาคม - ตุลาคม พ.ศ. 2541) และช่วงฤดูแล้ง (พฤศจิกายน พ.ศ. 2541 - เมษายน พ.ศ. 2542) พบว่าในฤดูฝนปริมาณแอมโมเนีย

ไนไตรท์ และไนเตรทมีค่าอยู่ในช่วง 6.50-24.05 $\mu\text{g-at N/L}$, 1.05-20.24 $\mu\text{g-at N/L}$ และ 1.82-223.39 $\mu\text{g-at N/L}$ ส่วนในฤดูแล้งปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรทมีค่าอยู่ในช่วง 2.20-2.99 $\mu\text{g-at N/L}$, 0.13-24.05 $\mu\text{g-at N/L}$ และ 0.00-108.20 $\mu\text{g-at N/L}$ ตามลำดับโดยพบว่าแอมโมเนียและไนเตรทพบปริมาณสูงในฤดูฝนและลดลงเมื่อเข้าสู่ฤดูแล้งขณะที่ไนไตรท์บริเวณปากแม่น้ำบางปะกงมีปริมาณเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาจึงไม่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและพบว่าปริมาณแอมโมเนียไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามสถานที่ ในขณะที่ปริมาณไนไตรท์และไนเตรทพบมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามสถานที่โดยลดลงตามระยะทางจากปากแม่น้ำออกสู่ทะเล

หนึ่งในสาเหตุที่ไนโตรเจนทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของแหล่งน้ำ เนื่องจากในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันนั้นต้องการออกซิเจนในการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนเตรท ดังนั้นออกซิเจนในแหล่งน้ำส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันนี้ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนออกซิเจนละลายน้ำ แม้ว่า

ในแหล่งน้ำจะมีออกซิเจนเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน สารอาหารไนโตรเจนสำคัญสำหรับพืช น้ำเกิดการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว (Bloom) และการเจริญเติบโตของพืชน้ำอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความโปร่งใสของน้ำลดลง เมื่อการเพิ่มจำนวนของสาหร่ายและการเจริญเติบโตของพืชน้ำเกินศักยภาพของแหล่งน้ำที่สามารถรองรับได้ จะเกิดการแก่งแย่งสารอาหารและออกซิเจนในน้ำ ทำให้สารอาหารและออกซิเจนในน้ำถูกใช้หมดไปอย่างรวดเร็ว เมื่อเกิดสภาวะที่ขาดแคลนออกซิเจนละลายน้ำ ส่งผลให้สาหร่ายและพืชน้ำตายอย่างรวดเร็วจึงเป็นการเพิ่มสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำและทำให้น้ำเน่าเสีย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจศึกษาปริมาณไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายและการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายในแม่น้ำบางปะกงและเอสทูรีของแม่น้ำบางปะกง

วิธีดำเนินการวิจัย

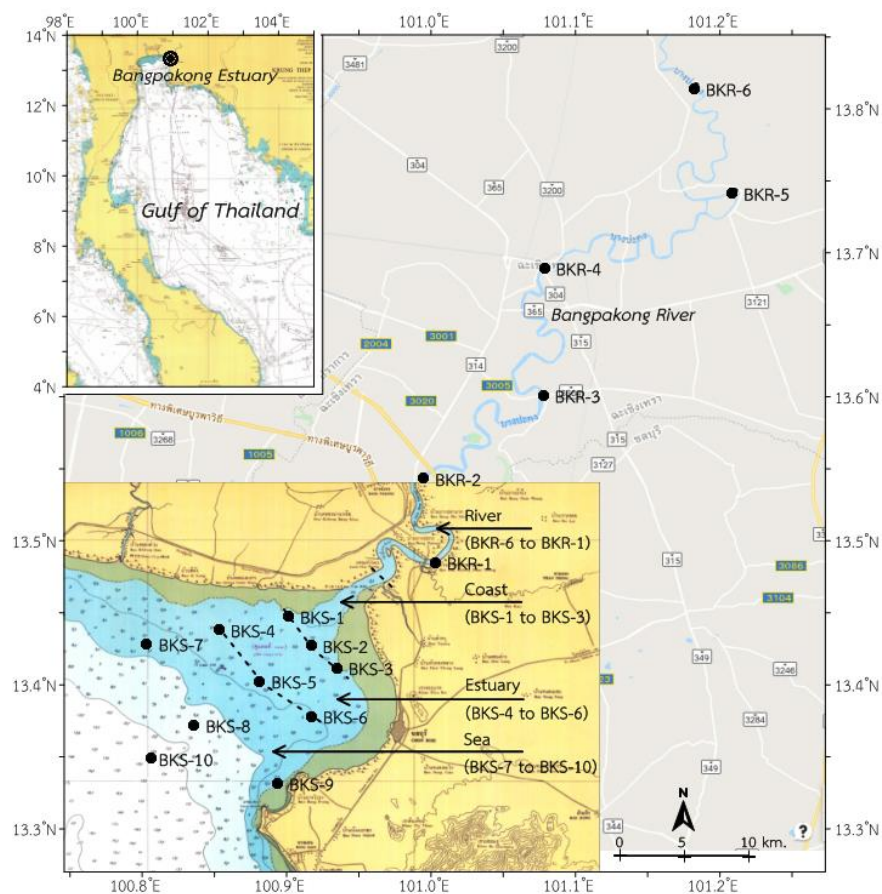
ศึกษาการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลของไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายในรูปของแอมโมเนีย (Ammonia, NH_3) ไนไตรท์ (Nitrite, NO_2^-) และไนเตรท (Nitrate, NO_3^-) ในรอบปี พ.ศ. 2559 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำในเวลาน้ำลงต่ำที่สุดโดยใช้กระบอกลอยเก็บตัวอย่างน้ำทั้งสิ้น 16 สถานี แบ่งเป็นสถานีเก็บตัวอย่างน้ำในแม่น้ำบางปะกง (River) พื้นที่จังหวัดฉะเชิงเทรา จำนวน 6 สถานี ได้แก่ สถานีที่ 6 (BKR-6) วัดบางกระเจ็ด ตำบลบางกระเจ็ด อำเภอบางคล้า สถานีที่ 5 (BKR-5) วัดปากน้ำโจ้โล้ ตำบลปากน้ำ อำเภอบางคล้า สถานีที่ 4 (BKR-4) อำเภอมืองฉะเชิงเทรา ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมือง สถานีที่ 3 (BKR-3) วัดสนามจันทร์ ตำบลบ้านโพธิ์ อำเภอบ้านโพธิ์ สถานีที่ 2 (BKR-2) เทศบาลบางปะกง ตำบลท่าสะอ้าน อำเภอบางปะกง และสถานีที่ 1 (BKR-1)

สะพานเทพหัสดิน ตำบลท่าข้าม อำเภอบางปะกง และสถานีเก็บตัวอย่างน้ำบริเวณเอสทูรีของแม่น้ำบางปะกง จำนวน 10 สถานี แบ่งเป็นสถานีเก็บตัวอย่างน้ำบริเวณชายฝั่งใกล้ปากแม่น้ำ (Coast) ระหว่างสถานี BKS-1 ถึง BKS-3 เอสทูรี (Estuary) ระหว่างสถานี BKS-4 ถึง BKS-6 และทะเล (Sea) ระหว่างสถานี BKS-7 ถึง BKS-10 ตามลำดับ (ตารางที่ 1 และภาพที่ 1)

การเก็บตัวอย่างน้ำสำหรับสถานีที่ลึกมากกว่า 5 เมตร จะเก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับ 1 เมตร จากผิวน้ำ และ 1 เมตร จากพื้นท้องน้ำ รวมจำนวน 2 ระดับ ส่วนสถานีที่ลึกน้อยกว่า 5 เมตร จะเก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับ 1 เมตร จากผิวน้ำเพียงระดับเดียว โดยเก็บตัวอย่างน้ำสถานีละ 3 ตัวอย่าง โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 4 ครั้ง ในแต่ละช่วงเวลาของปีคือ ครั้งที่ 1 (Cruise1) ช่วงฤดูแล้งระหว่าง 18-21 เมษายน พ.ศ. 2559 ครั้งที่ 2 (Cruise2) ช่วงเปลี่ยนฤดูแล้งเป็นฤดูน้ำมากระหว่าง 5-8 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 ครั้งที่ 3 (Cruise3) ช่วงฤดูน้ำมากระหว่าง 19-22 กันยายน พ.ศ. 2559 และครั้งที่ 4 (Cruise 4) ช่วงเปลี่ยนฤดูน้ำมากเป็นฤดูแล้งระหว่าง 14-18 พฤศจิกายน พ.ศ. 2559 ตามลำดับ การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายทั้งหมดดำเนินการในห้องปฏิบัติการภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา โดยนำตัวอย่างน้ำมากรองผ่านกระดาษกรอง GF/F แล้วนำน้ำที่ผ่านการกรองแล้วไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแอมโมเนียตามวิธีของ Grasshoff *et al.* (1999) ส่วนไนไตรท์และไนเตรทได้วิเคราะห์ตามวิธีของ Strickland and Parsons (1972) จากนั้นวิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายในแต่ละฤดูกาลโดยการทดสอบความแปรปรวน (one-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในแต่ละฤดูกาล

ตารางที่ 1 พิกัดสถานีเก็บตัวอย่างน้ำในแม่น้ำบางปะกงและเอสทูรีของแม่น้ำบางปะกงที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

Station	Latitude	Longitude	Station	Latitude	Longitude
BKR-1	13° 29' 06.15"	101° 00' 11.37"	BKS-1	13° 26.86'	100° 54.07'
BKR-2	13° 32' 35.68"	100° 59' 41.52"	BKS-2	13° 25.63'	100° 55.01'
BKR-3	13° 36' 03.90"	101° 04' 39.93"	BKS-3	13° 24.70'	100° 56.08'
BKR-4	13° 41' 22.44"	101° 04' 42.72"	BKS-4	13° 22.68'	100° 55.02'
BKR-5	13° 44' 29.40"	101° 12' 30.84"	BKS-5	13° 24.15'	100° 52.88'
BKR-6	13° 48' 50.57"	101° 10' 56.38"	BKS-6	13° 26.29'	100° 51.18'
			BKS-7	13° 25.71'	100° 48.20'
			BKS-8	13° 22.32'	100° 50.15'
			BKS-9	13° 19.89'	100° 53.62'
			BKS-10	13° 20.93'	100° 48.39'



ภาพที่ 1 ตำแหน่งสถานีเก็บตัวอย่างน้ำในแม่น้ำบางปะกงและเอสทูรีของแม่น้ำบางปะกงที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ปริมาณไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายในแม่น้ำ
บางปะกงและเอสทรีของแม่น้ำบางปะกงที่วัดได้มีค่า
พิสัยและค่าเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 2 และมีการกระจายตัว

ตามช่วงเวลาและความลึกดังที่ในภาพที่ 2 (สำหรับ
แอมโมเนีย) ภาพที่ 3 (สำหรับไนไตรท์) และภาพที่ 4
(สำหรับไนเตรท)

ตารางที่ 2 ค่าต่ำสุด-สูงสุด (Min-Max) และค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean±Standard Deviation; $\bar{X} \pm SD$)
ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรทละลายที่ผิวน้ำและพื้นท้องน้ำ ($\mu\text{g-at N/L}$) ในแม่น้ำบางปะกง
และเอสทรีของแม่น้ำบางปะกงตามฤดูกาลในรอบปี 2559 (ND หมายถึง ไม่มีข้อมูลเนื่องจากความลึกน้อยกว่า
5 เมตร จึงเก็บตัวอย่างน้ำที่เฉพาะผิวน้ำเพียงระดับเดียว)

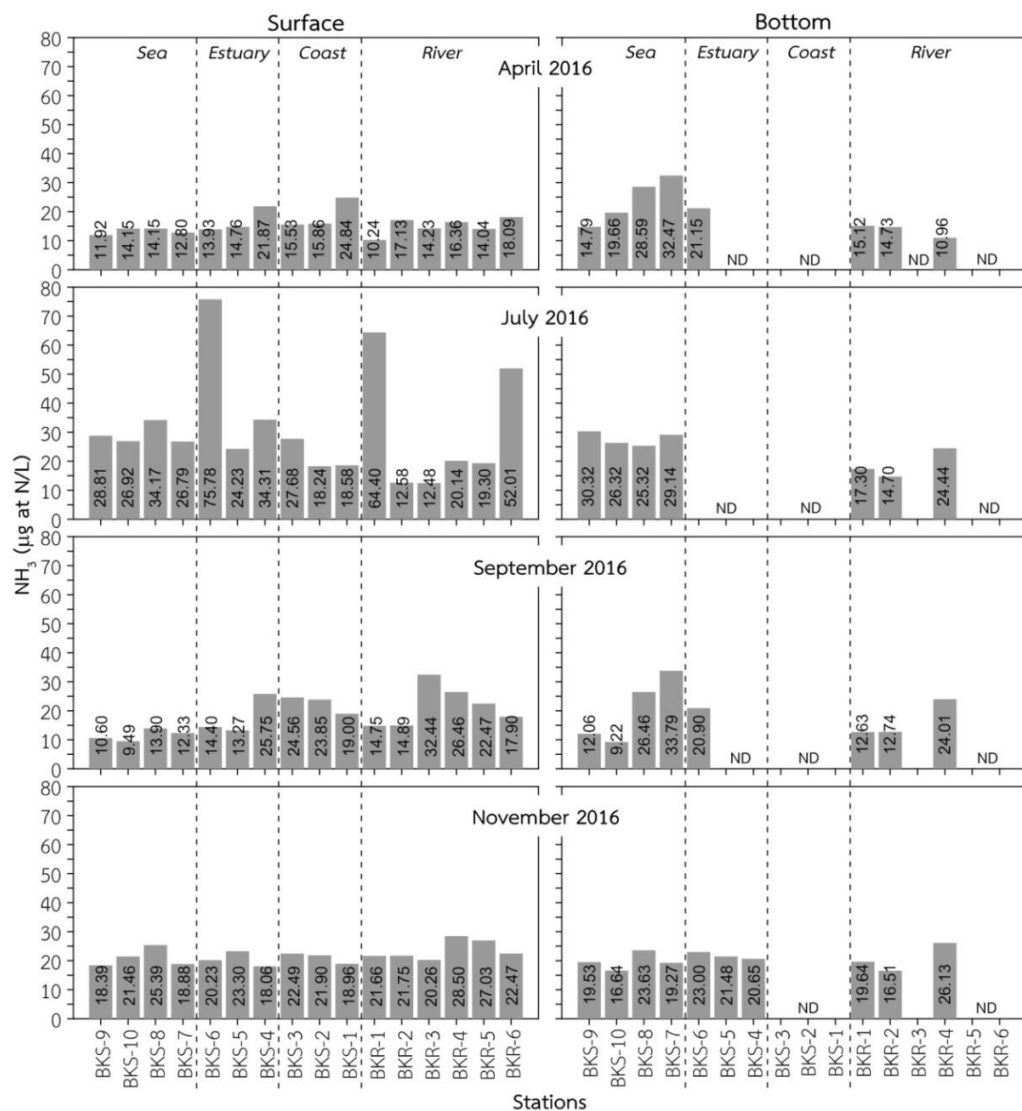
Station	NH ₃ ($\mu\text{g-at N/L}$)		NO ₂ ($\mu\text{g-at N/L}$)		NO ₃ ($\mu\text{g-at N/L}$)	
	Min-Max	$\bar{X} \pm SD$	Min-Max	$\bar{X} \pm SD$	Min-Max	$\bar{X} \pm SD$
BKR-6	ND-52.01	27.62±16.40	ND-11.51	3.41±5.41	ND-41.43	25.79±15.65
BKR-5	ND-27.03	20.71±5.46	ND-20.69	6.34±9.62	ND-76.36	41.05±28.53
BKR-4	10.96-28.50	20.55±7.41	1.23-9.21	3.79±2.82	22.92-84.87	38.39±22.29
BKR-3	ND-32.44	19.85±9.03	ND-4.72	2.25±1.84	ND-100.39	44.63±37.48
BKR-2	12.58-21.75	14.55±4.56	0.32-3.95	1.66±1.29	23.65-85.17	42.51±22.10
BKR-1	10.24-64.40	22.84±15.58	0.63-6.77	2.64±1.79	13.00-63.78	37.85±17.33
BKS-1	ND-24.84	20.35±3.00	ND-2.66	1.24±1.18	ND-26.99	8.87±12.22
BKS-2	ND-23.85	19.96±3.59	ND-4.37	2.03±1.75	ND-23.75	14.42±10.69
BKS-3	ND-27.68	22.57±5.15	ND-6.60	2.66±2.70	ND-21.50	13.42±7.17
BKS-4	ND-34.31	25.00±6.96	0.49-10.27	3.97±3.10	1.01-32.23	12.09±10.45
BKS-5	ND-24.23	18.89±5.68	0.13-6.13	2.37±1.98	2.21-23.30	12.16±7.55
BKS-6	13.93-75.78	27.82±18.91	0.51-6.56	2.57±1.85	0.64-18.31	8.23±6.02
BKS-7	12.33-33.79	20.99±9.18	0.04-7.45	2.28±2.27	0.42-18.49	6.13±5.69
BKS-8	13.90-34.17	22.33±7.54	0.06-5.58	1.22±1.68	0.11-9.86	3.64±3.36
BKS-9	10.60-30.32	17.22±7.43	0.08-2.65	1.20±0.90	1.48-10.08	4.29±2.84
BKS-10	9.22-26.92	16.96±6.87	0.03-4.00	0.63±1.20	0.34-8.18	2.10±3.13

ปริมาณแอมโมเนียมีค่าอยู่ในช่วง 9.22-75.78
 $\mu\text{g-at N/L}$ โดยพบค่าสูงสุดที่ผิวน้ำบริเวณเอสทรีที่
สถานี BKS-6 ในช่วงเปลี่ยนจากฤดูแล้งเป็นฤดูน้ำมาก
ในเดือนกรกฎาคม และค่าสุดที่พื้นท้องน้ำที่สถานี BKS-10
ในช่วงฤดูน้ำมากในเดือนกันยายน โดยพบมีปริมาณ
สูงในแม่น้ำและปากแม่น้ำและพบค่าสูงสุดบริเวณ

เอสทรี โดยเฉพาะในช่วงเปลี่ยนจากฤดูแล้งเป็นฤดู
น้ำมากในเดือนกรกฎาคม และลดลงในฤดูน้ำมากใน
เดือนกันยายน (ภาพที่ 2) ซึ่งในช่วงเปลี่ยนฤดูแล้ง
เป็นฤดูน้ำมากมีปริมาณน้ำท่าและการชะล้างพัดพา
ตะกอนและสารอินทรีย์ปริมาณมากจากแม่น้ำลงสู่
เอสทรีและกระจายในทะเลในช่วงฤดูน้ำมาก ส่วน

หนึ่งของปริมาณแอมโมเนียที่ในทะเลบนน้ำจะมาจาก การปลดปล่อยแอมโมเนียจากตะกอนดินจากพื้นทะเลในรอบปี (BKS-7 ถึง BKS-10) ค่าอยู่ในช่วง 9.49-75.78 $\mu\text{g-at N/L}$ รวมทั้งการย่อยสลายสารไนโตรเจนอินทรีย์ไปเป็นแอมโมเนียโดยกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน สอดคล้องกับการศึกษาของ Kijkomhaeng (2000) ที่พบว่าอาจจะเกิดจากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันของตะกอนดินที่พื้นท้องน้ำมีส่วนสำคัญในการเปลี่ยนไนโตรเจนอินทรีย์ไปเป็นแอมโมเนียในบริเวณ

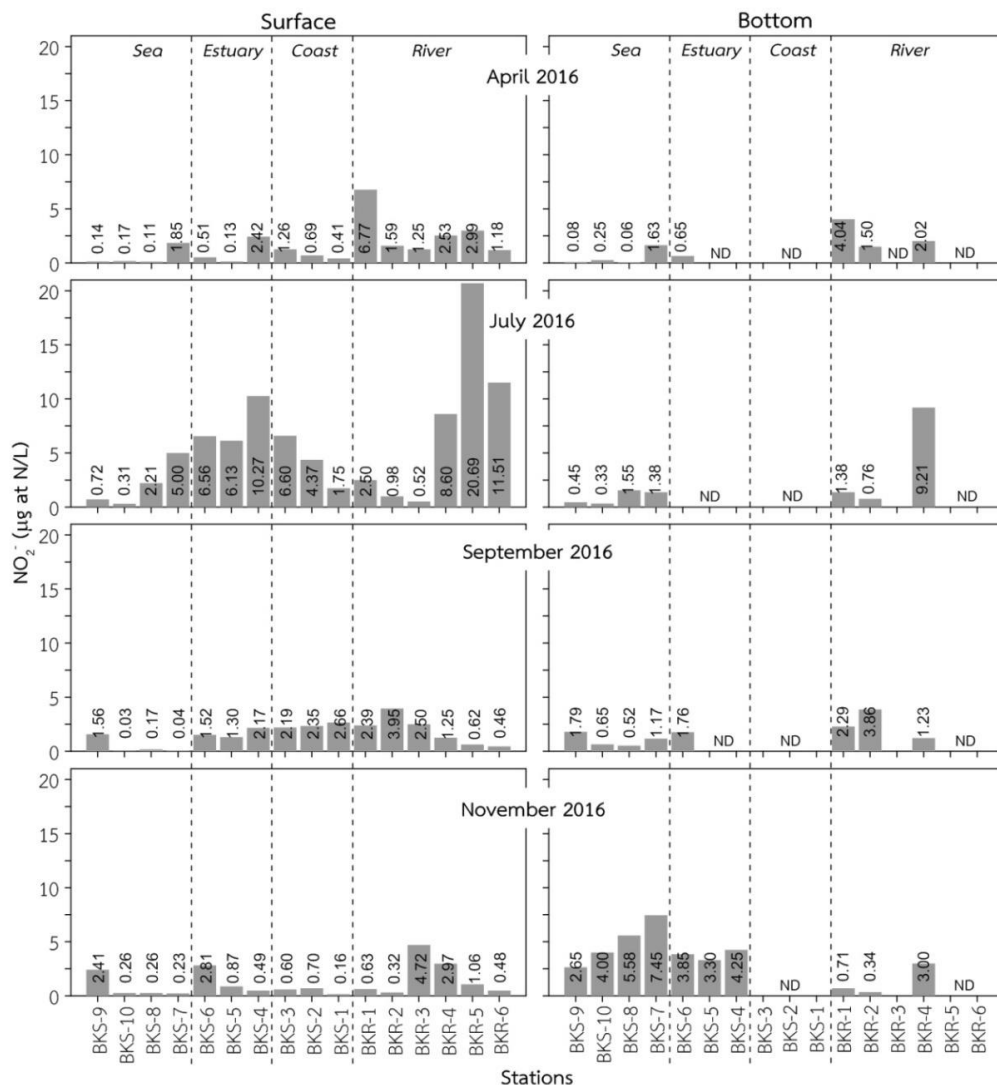
เอสทิวรีของแม่น้ำบางปะกง สำหรับช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุมและช่วงฤดูฝน มีการชะล้างพัดพาเอาปุ๋ยตะกอน และสารอินทรีย์ เช่น น้ำเสียและสิ่งปฏิกูลจากบนบกลงสู่แหล่งน้ำ แล้วเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านั้นเป็นแอมโมเนีย มีผลทำให้ในช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุมมีปริมาณแอมโมเนียสูง แม้ว่าช่วงฤดูฝนจะมีการชะล้างพัดพาสิ่งต่างๆ ลงมามาก เช่นเดียวกับช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุม แต่มีปริมาณน้ำที่มากทำให้เกิดการเจือจางของแอมโมเนีย



ภาพที่ 2 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณแอมโมเนียที่ผิวหน้าและพื้นท้องน้ำ ($\mu\text{g-at N/L}$) ในแม่น้ำบางปะกงและเอสทิวรีของแม่น้ำบางปะกงตามฤดูกาลในรอบปี 2559 (ND หมายถึง ไม่มีข้อมูลเนื่องจากความลึกน้อยกว่า 5 เมตร จึงเก็บตัวอย่างน้ำเฉพาะที่ผิวหน้าน้ำเพียงระดับเดียว)

ปริมาณไนโตรเจนที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.03-20.69 $\mu\text{g-at N/L}$ โดยพบสูงสุดในแม่น้ำที่สถานี BKR-5 ในช่วงเปลี่ยนจากฤดูแล้งเป็นฤดูน้ำมาก และต่ำสุดที่ฝั่วน้ำทะเลที่สถานี BKS-10 ในช่วงฤดูน้ำมาก (ภาพที่ 3) อาจเกิดจากอิทธิพลของน้ำท่าและการได้รับน้ำทิ้งและสิ่งปฏิกูลจากชุมชน บ้านเรือนและฟาร์มปศุสัตว์ เป็นแหล่งนำสารอาหารไนโตรเจนลงสู่แหล่งน้ำ และเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันจึงพบปริมาณไนโตรเจนที่ช่วงนี้มีค่าสูง ส่วนในช่วงฤดูแล้งปริมาณไนโตรเจนที่น่าจะเกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันของ

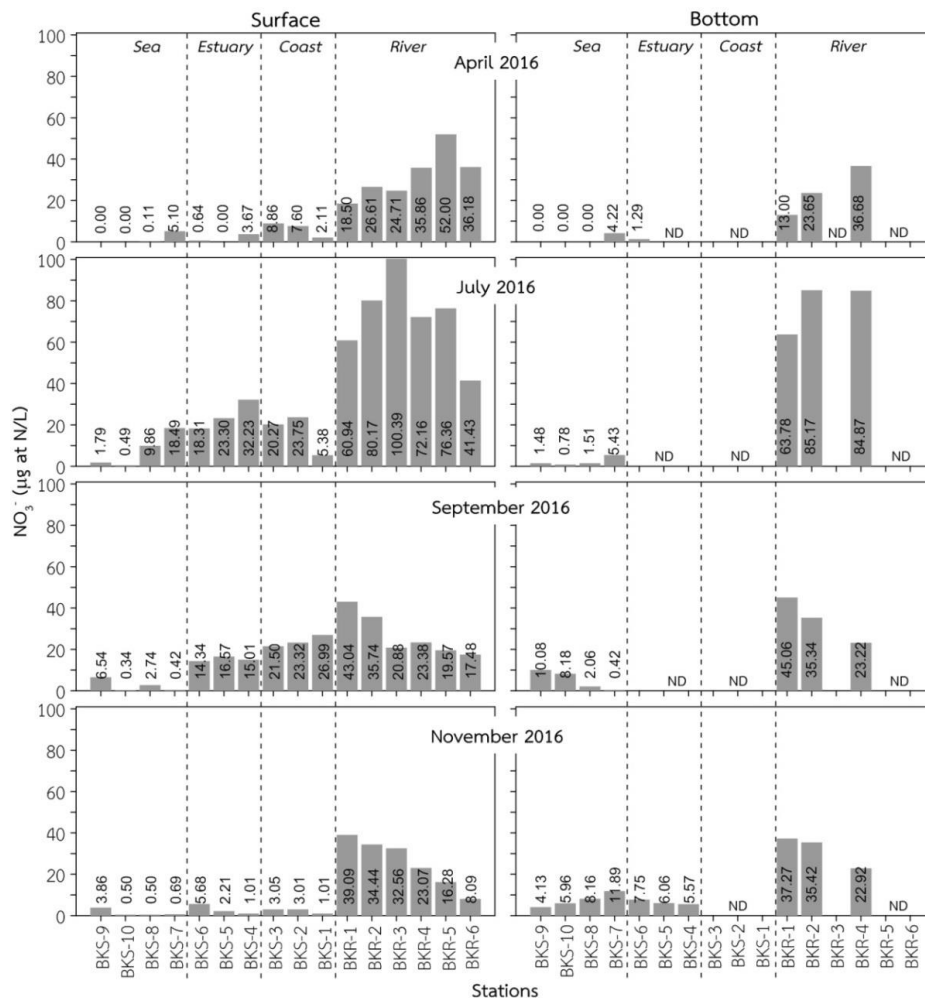
แบคทีเรียที่อยู่ในตะกอนและพบว่าปริมาณไนโตรเจนที่พบในการศึกษานี้อยู่ในระดับที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการศึกษาที่ผ่านมาของ Junchompoo *et al.* (2006) ที่พบว่าปริมาณไนโตรเจนบริเวณปากคลองเชื่อมต่อแม่น้ำบางปะกงอยู่ในช่วง 1.14-135 $\mu\text{g-at N/L}$ การที่พบปริมาณไนโตรเจนที่ต่ำ อาจเนื่องมาจากไนโตรเจนเป็นส่วนหนึ่งของการเกิดปฏิกิริยาทั้งไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน จึงพบว่าปริมาณไนโตรเจนที่ค่อนข้างต่ำและมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ (Junchompoo *et al.*, 2006)



ภาพที่ 3 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณไนโตรเจนที่ฝั่วน้ำน้ำและพื้นท้องน้ำ ($\mu\text{g-at N/L}$) ในแม่น้ำบางปะกงและเอสทูรีของแม่น้ำบางปะกงตามฤดูกาลในรอบปี 2559 (ND หมายถึง ไม่มีข้อมูลเนื่องจากความลึกน้อยกว่า 5 เมตร จึงเก็บตัวอย่างน้ำเฉพาะที่ฝั่วน้ำน้ำเพียงระดับเดียว)

ปริมาณไนเตรทมีค่าอยู่ในช่วง 0.11-100.39 $\mu\text{g-at N/L}$ โดยพบในแม่น้ำสูงสุดที่สถานี BKR-3 ในช่วงเปลี่ยนจากฤดูแล้งเป็นฤดูน้ำมาก และต่ำสุดที่ผิวทะเลที่สถานี BKS-8 ในช่วงฤดูแล้ง (ภาพที่ 4) โดยในช่วงฤดูแล้งนั้นไนเตรทได้รับอิทธิพลจากปริมาณน้ำทำนอยมาก ดังนั้นไนเตรทที่พบน่าจะเกิดจากปฏิกิริยาภายในบริเวณเอสทูรีของแม่น้ำบางปะกงเอง หรืออาจจะได้รับอิทธิพลจากน้ำทะเลด้วยบางส่วน แต่ในช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุมและช่วงฤดูฝนนั้น น้ำปริมาณมากชะล้างปุ๋ยที่ใช้ในการเกษตรกรรม สิ่งปฏิกูล และสารอินทรีย์ลงสู่แหล่งน้ำ จากนั้นแบคทีเรียจะทำการย่อยสลายกลายเป็นไนเตรทโดยกระบวนการ

ไนตริฟิเคชัน จึงพบว่าปริมาณไนเตรทสูงในเดือนที่มีฝนตกปานกลาง (ช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุม) สอดคล้องกับการศึกษาของ Kijkomhaeng (2000) ที่พบว่าปริมาณไนเตรทเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำฝน และจะลดลงเมื่อปริมาณน้ำฝนเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเจือจางและการได้รับไนเตรทในบริเวณเอสทูรีของแม่น้ำบางปะกง น่าจะมาจากการทำเกษตรกรรมอย่างหนาแน่น นอกจากนี้การขับและคายไนเตรทออกจากตะกอนดินหรือสารแขวนลอย และกระบวนการไนตริฟิเคชันโดยแบคทีเรีย ต่างก็มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรทในเอสทูรีของแม่น้ำบางปะกงเช่นกัน



ภาพที่ 4 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณไนเตรทที่ผิวหน้าน้ำและพื้นท้องน้ำ ($\mu\text{g-at N/L}$) ในแม่น้ำบางปะกงและบริเวณเอสทูรีของแม่น้ำบางปะกงตามฤดูกาลในรอบปี 2559 (ND หมายถึง ไม่มีข้อมูลเนื่องจากความลึกน้อยกว่า 5 เมตร จึงเก็บตัวอย่างน้ำเฉพาะที่ผิวหน้าน้ำเพียงระดับเดียว)

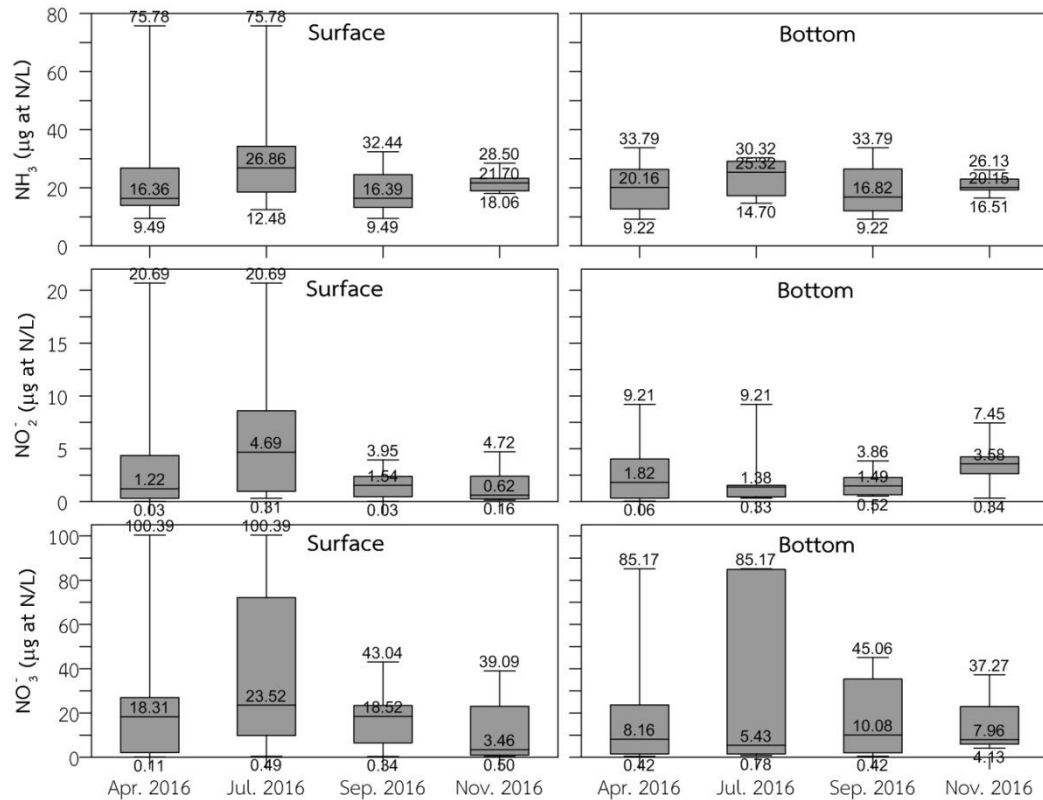
การเปลี่ยนแปลงตามสถานที่ของไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายบริเวณเอสทูรีของแม่น้ำบางปะกงจากการศึกษาค้นคว้าพบว่าปริมาณแอมโมเนียบริเวณเอสทูรีของแม่น้ำบางปะกงในแต่ละสถานที่ทำการศึกษาค้นคว้าว่าไม่มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงตามสถานที่อย่างเด่นชัดในช่วงฤดูแล้ง ช่วงฤดูน้ำมาก และช่วงเปลี่ยนจากฤดูน้ำมากเป็นฤดูน้ำแล้ง แต่กลับพบการเปลี่ยนแปลงตามสถานที่อย่างมากในช่วงเปลี่ยนจากฤดูแล้งเป็นฤดูน้ำมาก โดยพบปริมาณแอมโมเนียสูงในแม่น้ำและปากแม่น้ำ และพบค่าสูงมากที่สุดบริเวณเอสทูรีของแม่น้ำบางปะกงในสถานที่ BKS-6 อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงนี้อาจไม่ได้เกิดเนื่องจากอิทธิพลจากการชะล้างพัดพามากับน้ำท่าเพียงอย่างเดียวเท่านั้นแต่เกิดจากการได้รับอิทธิพลภายในเอสทูรีซึ่งพบมีค่าสูงบริเวณแม่น้ำและพื้นที่ท้องน้ำในทะเล การที่พบว่าในสถานที่ BKS-6 มีปริมาณแอมโมเนียที่สูงกว่าในสถานที่อื่นอาจเนื่องจากสถานีดังกล่าวอยู่ใกล้กับอ่าวชลบุรี จึงได้รับอิทธิพลของน้ำท่าที่พัดพามวลน้ำที่เพิ่งได้รับการปนเปื้อนจากสิ่งปฏิกูลต่างๆ ตลอดจนน้ำทิ้งจากชุมชนที่ตั้งอยู่ริมฝั่งและกิจกรรมทางการประมงที่พบหนาแน่นในบริเวณนี้ เมื่อสิ่งปฏิกูลไหลเข้าสู่บริเวณเอสทูรีแล้วเกิดกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันได้เป็นแอมโมเนีย สอดคล้องกับการศึกษาของ Horabun (1997) พบว่าปริมาณแอมโมเนียในเอสทูรีของแม่น้ำบางปะกงมีค่าสูงมากบริเวณแหล่งน้ำกร่อยแต่จะลดลงเมื่อออกสู่ทะเล และปริมาณแอมโมเนียเปลี่ยนแปลงตามปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำ ในขณะที่ไนโตรเจนมีการเปลี่ยนแปลงตามสถานที่โดยพบว่ามีความโน้มถ่วงลดลงตามระยะจากปากแม่น้ำออกสู่ทะเล โดยจะพบปริมาณไนโตรเจนสูงในสถานที่ใกล้กับปากแม่น้ำ และพบปริมาณไนโตรเจนมากในสถานที่ BKS-4 ในแม่น้ำเนื่องจากสถานีดังกล่าวอยู่ใกล้กับคลองด่านจึงอาจจะได้รับอิทธิพลจากน้ำท่า

ไหลลงสู่บริเวณเอสทูรี ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kijkomhaeng (2000) ที่กล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนที่ขึ้นกับปริมาณน้ำจืดที่ไหลเข้าสู่ปากแม่น้ำเป็นสำคัญ ส่วนปริมาณไนโตรเจนในเตรทมิแนวโน้มถ่วงการเปลี่ยนแปลงลดลงตามระยะทางจากปากแม่น้ำออกสู่ทะเลเช่นเดียวกับไนโตรเจน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนบริเวณเอสทูรีของแม่น้ำบางปะกงได้รับอิทธิพลจากการชะล้างพัดพามากับน้ำท่าแล้วเกิดกระบวนการทางกายภาพโดยการผสมผสานของมวลน้ำจืดและน้ำทะเล ทำให้ปริมาณไนโตรเจนลดลงตามระยะทางจากปากแม่น้ำสู่ทะเล นอกจากนี้แล้วกระบวนการทางชีวภาพโดยการถูกแปลงก่อกอนพืชนำไปใช้หรือการย่อยสลายโดยแบคทีเรียก็มีผลทำให้ปริมาณไนโตรเจนลดลงเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Horabun (1997) พบว่าปริมาณไนโตรเจนในเตรทมิแนวโน้มถ่วงลดลงจากปากแม่น้ำออกสู่ทะเล อาจเนื่องจากความเค็มของน้ำที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการทำงานของพวกแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และมีผลทำให้ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันลดลงด้วย

อย่างไรก็ตาม การศึกษาค้นคว้าพบว่าปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรเจน และไนเตรทมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดตามฤดูกาล โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดในช่วงเปลี่ยนจากฤดูแล้งเป็นฤดูน้ำมาก และน่าจะมีการเปลี่ยนรูปจากแอมโมเนียไปเป็นไนโตรเจนและไนเตรทตามกระบวนการไนตริฟิเคชันโดยแอมโมเนียที่ผิวน้ำเปลี่ยนไปเป็นไนโตรเจนและไนเตรทซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากฤดูแล้งไปเป็นช่วงเปลี่ยนจากฤดูแล้งเป็นฤดูน้ำมาก และลดลงในช่วงฤดูน้ำมาก และช่วงเปลี่ยนจากฤดูน้ำมากเป็นฤดูแล้งตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณไนเตรทที่พบที่พื้นที่ท้องน้ำอาจถูกแบคทีเรียบางชนิดเปลี่ยนไปเป็นไนโตรเจนและกลับเป็นแอมโมเนีย ตามกระบวนการ Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium (DNRA) ซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากน้ำที่พื้นแม่น้ำ การทดสอบทางสถิติพบว่า ปริมาณ

สารอาหารอนินทรีย์ในโตรเจนละลายน้ำมีความแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาโดยพบว่าในช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุมมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างจากช่วงฤดูฝน

และฤดูแล้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งมีค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



ภาพที่ 5 แผนภูมิ box and whisker plot แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายที่ผิวน้ำและพื้นท้องน้ำ (µg-at N/L) ในแม่น้ำบางปะกงและบริเวณบางปะกงเอสทูรีตามฤดูกาลในรอบปี 2559

สรุป

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลของไนโตรเจนอนินทรีย์ละลายในบริเวณเอสทูรีของแม่น้ำบางปะกงปี พ.ศ. 2559 พบว่าปริมาณแอมโมเนียมีค่าอยู่ในช่วง 9.22-75.78 µg-at N/L โดยพบค่าสูงสุดที่ผิวน้ำบริเวณเอสทูรีที่สถานี BKS-6 ในช่วงเปลี่ยนจากฤดูแล้งเป็นฤดูน้ำมาก และต่ำสุดที่พื้นท้องน้ำทะเลที่สถานี BKS-10 ในช่วงฤดูน้ำมาก ปริมาณไนไตรท์มีค่าอยู่ในช่วง 0.03-20.69 µg-at N/L โดยพบสูงสุดในแม่น้ำที่สถานี BKR-5 ในช่วงเปลี่ยนจากฤดูแล้งเป็นฤดูน้ำมาก และต่ำสุดที่ผิวน้ำทะเลที่สถานี BKS-10 ในช่วงฤดูน้ำมาก ปริมาณไนเตรท

ในช่วง 0.11-100.39 µg-at N/L โดยพบในแม่น้ำสูงสุดที่สถานี BKR-3 ในช่วงเปลี่ยนจากฤดูแล้งเป็นฤดูน้ำมากและต่ำสุดที่ผิวน้ำทะเลที่สถานี BKS-8 ในช่วงฤดูแล้งปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรทที่ผิวน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดตามฤดูกาล โดยพบการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดในช่วงเปลี่ยนจากฤดูแล้งเป็นฤดูน้ำมาก และอาจบ่งชี้ให้เห็นการเปลี่ยนรูปจากแอมโมเนียไปเป็นไนไตรท์และไนเตรทตามกระบวนการไนตริฟิเคชันและมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากฤดูแล้งไปเป็นช่วงเปลี่ยนจากฤดูแล้งเป็นฤดูน้ำมาก และลดลงในช่วงฤดูน้ำมากและช่วงเปลี่ยนจากฤดูน้ำมากเป็นฤดูแล้งตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณไนเตรท

ที่พบที่พื้นท้องน้ำอาจถูกแบคทีเรียบางชนิดเปลี่ยนไปเป็นไนโตรเจนและกลับเป็นแอมโมเนียตามลำดับ ตามกระบวนการ Denitrification และ DNRA ซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากน้ำที่พื้นแม่น้ำ การทดสอบทางค่าสถิติพบว่า ปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำมีความแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาโดยพบว่าในช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุมมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างจากช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 (เพิ่มเติม) ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 31 เพิ่มเติม/2559

เอกสารอ้างอิง

Announcement of the National Environment Board. 2007. (February 1, 2006) Government Gazette vol. 124, pp. 123-133. (in Thai)

- Grasshoff, K., Kremling, K. and Ehrhardt, M. 1999. **Method of Seawater Analysis**. 3rd edition. Wiley-VCH, New York.
- Horabun, T. 1997. Relationships between water quality and phytoplankton in the Bangpakong River. Master Thesis of Science, Kasetsart University. (in Thai)
- Junchompoo, C., Meksumpun, C. and Meksumpun, S. 2006. Study on water and bottom sediment properties for evaluation on enrichment and pollution status of Bangpakong River in Ban Pho district, Chachoengsao province. Master Thesis of Science, Kasetsart University. (in Thai)
- Kijkomhaeng, K. 2000. Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Nutrients in Bangpakong Estuary. Master Thesis of Science, Burapha University. (in Thai)
- Strickland, J.D.H. and Parsons, T.R. 1972. **A Practical Handbook of Seawater Analysis**. Ottawa, Canada.

การศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาผสมขมิ้นผง

Study on Shelf life of Dried Chili Paste Added with Hawm Gra Dang Nghah Rice Bar

กมลทิพย์ กรรไพบระ^{1*}, จริยา สุขจันทร์², ซูไรดา มะ³ และ นูร์มา สีเต๊ะ³

Kamontip Kanpairo^{1*}, Jariya Sukjantra², Suraida Ma³ and Nurma Seede³

Received: 30 December 2021, Revised: 7 April 2022, Accepted: 29 April 2022

บทคัดย่อ

ธัญพืชชนิดแห้ง (cereal bar) เป็นผลิตภัณฑ์อาหารประเภทพร้อมบริโภค ประกอบด้วยส่วนประกอบจากธัญพืชที่มีลักษณะเป็นของแข็งและส่วนประกอบอื่นที่มีลักษณะเป็นของเหลว การเสื่อมเสียส่วนใหญ่มาจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมโดยรอบได้แก่ ออกซิเจนและความชื้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนไปและเกิดกลิ่นหืน การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้บรรจุภัณฑ์ต่างประเภทกัน 2 ชนิดคือ ถุงพลาสติกโพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ (Linear Low Density Polyethylene; LLDPE) และถุงอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium Laminate Bag; AL) เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้ง ณ สภาวะอุณหภูมิห้อง (29 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 12 สัปดาห์ ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างระยะเวลาในการเก็บรักษาและชนิดของบรรจุภัณฑ์ ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี จุลินทรีย์และทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุงพลาสติกประเภท LLDPE มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ (ค่า L^* , a^* , b^* และเนื้อสัมผัส) เคมี (ค่า a_w , ความชื้น และ ค่า TBA) จุลินทรีย์ (จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและเชื้อรา) รวมทั้งผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสมากกว่าผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ จึงสรุปได้ว่า สภาวะการบรรจุที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้ง คือ ถุงอลูมิเนียมฟอยล์ ผลิตภัณฑ์ที่สภาวะนี้มีค่า a_w , ความชื้น และค่า TBA เท่ากับ 0.40 ± 0.01 , ร้อยละ 3.41 ± 0.23 และ 2.11 ± 0.23 mg MDA/kg sample ตามลำดับ จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (9.0×10^2 CFU/g) และรา (5.5×10^1 CFU/g)

¹ สาขาวิชาการประกอบอาหารฮาลาล คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จังหวัดยะลา 95000

¹ Department of Halal Culinary, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Yala 95000, Thailand.

² สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จังหวัดยะลา 95000

² Department of Food Science and Technology, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Yala 95000, Thailand.

³ ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาท้องถิ่น มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จังหวัดยะลา 95000

³ Local Promotion and Development Center, Yala Rajabhat University, Yala 95000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (corresponding author, e-mail): koikamontip.k@gmail.com Tel: 08 2833 9822

เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน (มผช. 902/2559) ซึ่งสามารถนำผลจากงานวิจัยไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ธัญพืชชนิดแห้งและนำไปต่อยอดในเชิงพาณิชย์ต่อไป

คำสำคัญ: ข้าวหอมกระดังงา, ธัญพืชชนิดแห้ง, บรรจุภัณฑ์, LLDPE, อลูมิเนียมฟอยล์

ABSTRACT

Cereal bars are ready-to-eat food products consisting of solid grains and other liquid ingredients. Most of the deterioration is caused by the surrounding environmental factors such as oxygen and moisture, resulting in the product's change in texture and rancidity. The objective of the study on the shelf life of Hawm Gra Dang Ngah Rice Bar was to study the effect of using two different package types, namely, linear low-density polyethylene (LLDPE) plastic bags and aluminum laminate bags (AL) stored at room temperature (29 ± 2 degrees Celsius) for 12 weeks. The results indicated that the correlation between the storage periods and the package types had a statistically significant ($p < 0.05$) effect on the physical, chemical, microbiological, and sensory qualities of the Hawm Gra Dang Ngah Rice Bar product. Hawm Gra Dang Ngah Rice Bar packed in LLDPE plastic bags had changes in physical (L^* , a^* , b^* values and texture), chemical (a_w values, moisture content, and TBA values), and microbiological qualities (total microbial counts and fungi) including the sensory acceptance greater than the other packed in AL bags. Therefore, it could be concluded that the appropriate packaging of Hawm Gra Dang Ngah Rice Bar was aluminum laminate bags. After storing for 12 weeks, the products kept in aforementioned condition had the a_w , % moisture and TBA contents of 0.40 ± 0.01 , 3.41 ± 0.23 and 2.11 ± 0.23 mg MDA/kg sample respectively. Total plate count (9.0×10^2 CFU/g) and mold (5.5×10^1 CFU/g) had met Community Product Standard (902/2016). Moreover, the results found in this research can be applied to cereal bar products and further developed commercially.

Keywords: Hawm Gra Dang Ngah Rice, cereal bar, packaging, LLDPE, aluminum laminate bags

บทนำ

ปัจจุบันผู้บริโภคทั่วโลกให้ความสำคัญกับสุขภาพและการบริโภคมากขึ้น ข้อมูลจาก Euromonitor International ที่นำเสนอเกี่ยวกับตลาดอาหารและเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพของไทย ในปี 2561 พบว่ามีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง เฉลี่ยร้อยละ 3.5 ต่อปี มีมูลค่าราว 187,000 ล้านบาท และคาดการณ์ว่าในปี 2565 ตลาดจะมีมูลค่าเพิ่มขึ้นเป็น 213,099 ล้านบาท

บาท ขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 2.7 ต่อปี โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการขยายตัวของอาหารและเครื่องดื่มสุขภาพมาจากพฤติกรรมการใช้ชีวิตด้วยความเร่งรีบ ใช้เวลาในการทำงานมากขึ้น ทำให้ผู้บริโภคมีความเครียดมากขึ้น ไม่มีเวลาในการออกกำลังกาย ขณะเดียวกันก็ตระหนักถึงการมีสุขภาพที่ดี ทำให้ผู้บริโภคแสวงหาสินค้าเพื่อสุขภาพและความเป็นอยู่ที่ดี เมื่อวิเคราะห์ถึงความต้องการอาหารสำเร็จรูปเพื่อสุขภาพ

พบว่า อันดับหนึ่งคือขนมและผลิตภัณฑ์จากนม อันดับสองเป็นอาหารเพื่อสุขภาพสำหรับเด็กเล็กและอันดับสามเป็นผลิตภัณฑ์ขนมอบ (baked food) จากข้าวและขนมขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพ โดยในตลอดระยะเวลา 5 ปีที่ผ่านมามีอัตราการขยายตัวร้อยละ 9.1 ต่อปี มีมูลค่า 3,756 ล้านบาท (Prachachart, 2019)

ธัญพืช (cereal) เป็นผลิตภัณฑ์สุขภาพชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่นิยมอย่างต่อเนื่อง และเนื่องด้วยคุณสมบัติของธัญพืช ที่ให้พลังงาน มีโปรตีนคุณภาพสูงซึ่งมีกรดอะมิโนสำคัญที่จำเป็นต่อร่างกาย เป็นแหล่งใยอาหารทั้งชนิดละลายน้ำและไม่ละลายน้ำทั้งมีวิตามินและแร่ธาตุที่สำคัญต่อร่างกาย ไขมันธัญพืชยังจัดเป็นไขมันที่มีคุณภาพดีที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง (Herawati *et al.*, 2019) ธัญพืชชนิดแท่งหรือซีเรียลบาร์ (cereal bars) จัดเป็นอาหารว่างชนิดหนึ่งที่มีประโยชน์และคุณค่าทางโภชนาการสูง ประกอบด้วยส่วนผสมที่เป็นชิ้นขนาดเล็กนำมาอัดเป็นแท่ง โดยยึดด้วยสารยึดเกาะ (Binder) ผสมกับธัญพืชหรือธัญชาติ นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ เนื่องจากลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สามารถพกพาไปรับประทานได้สะดวกในทุกที่ ทุกเวลา สามารถรับประทานเพื่อทดแทนมื้ออาหารหลักได้ในช่วงเวลาเร่งรีบ (Somboondumrongkul *et al.*, 2014; Yadav and Bhatnagar, 2016) ประกอบกับแนวการบริโภคอาหารยุคใหม่แบบ Balanced Diet & Lifestyle ที่กำลังนิยมทั่วโลก การบริโภคธัญพืชชนิดแท่งจึงได้รับความนิยมในการบริโภคเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ข้าวหอมกระดังงา เป็นพันธุ์ข้าวพื้นเมืองของอำเภอตากใบ จังหวัดนราธิวาส มีลักษณะประจำพันธุ์คือ เป็นข้าวเหนียว ที่มีจำนวนต้นตอกอ้อย ลำต้นของข้าวหอมกระดังงามีสีม่วง รวงข้าวมีสีน้ำตาลอมม่วง มีอายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 120-150 วัน เมล็ดข้าวสารค่อนข้างเล็ก มีสีน้ำตาลเข้มเมื่อนำมาหุงเป็นข้าวสุกแล้วจะมีความนุ่ม และกลิ่นหอมคล้ายดอก

กระดังงา (Hayamin, 2009) ข้าวหอมกระดังงาเป็นพันธุ์ข้าวอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีสารอาหารที่สำคัญหลายชนิดเช่น เป็นแหล่งของโปรตีน พลังงาน และที่สำคัญมีสารแอนโทไซยานินที่มีคุณสมบัติต้านมะเร็งลำไส้ ป้องกันการเกิดโรคความดันโลหิตสูง โรคเบาหวาน โรคหัวใจ ลดการอักเสบของผิวหนัง ทำให้เซลล์สมองทำงานได้ดี (Yuenyongputtakal *et al.*, 2019)

ชามาหรือซัลบัลคือ อาหารที่ปรุงจากพริกมีลักษณะคล้ายน้ำพริกในอาหารไทย โดยคำว่า ชามาเป็นคำพื้นถิ่นนิยมเรียกใน 3 จังหวัดชายแดนใต้ ส่วนอินโดนีเซียรวมถึงชาวมาลาเยทั่วไปเรียก ซัลบัล ในส่วนประกอบของ ชามาประกอบไปด้วยพริก กะปิ น้ำตาล น้ำมะนาว อาจเติมส่วนผสมอื่นลงไปซึ่งจะมีชื่อเรียกที่ต่างกันเช่น ชามาโชตงคือน้ำพริกใส่ปลาหมึก ชามาโปโยะห์คือน้ำพริกที่มีส่วนผสมของทุเรียน เป็นต้น (Chakamanont *et al.*, 2020) เมื่อวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการพบว่าในน้ำพริกชามา 100 กรัม จะให้พลังงาน 311 กิโลแคลอรี คาร์โบไฮเดรต 28.1 กรัม โปรตีน 30.9 กรัม และไขมัน 10.1 กรัม ซึ่งชามาจัดเป็นอาหารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการอีกชนิดหนึ่ง เนื่องจากในส่วนประกอบคือกะปิและเนื้อปลาเป็นแหล่งของโปรตีน พริกเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระ เหมาะสำหรับการบริโภคและนำมาเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อื่น

จากการทำโครงการพัฒนาและเสริมสร้างทักษะการประกอบอาชีพของเยาวชนและประชาชนในจังหวัดชายแดนภาคใต้ แผนงานบูรณาการขับเคลื่อนการแก้ปัญหาจังหวัดชายแดนภาคใต้พบว่า กลุ่มวิสาหกิจมั่นคง มั่งคั่ง ยั่งยืน อ.สุไหงโกทก จ.นราธิวาส ซึ่งผลิตน้ำพริก (ชามา) จำหน่าย ต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์เป็นอาหารทานเล่นโดยนำน้ำพริก (ชามา) มาเป็นส่วนผสม ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นอัตลักษณ์ของทางกลุ่มวิสาหกิจ

โดยนำข้าวหอมกระดังงาซึ่งเป็นข้าวพื้นเมืองในท้องถิ่นมาผสมกับน้ำพริก (ซามา) กลายเป็นข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้ง และศึกษาอายุการเก็บรักษา ซึ่งผู้วิจัยหวังว่าผลิตภัณฑ์ชนิดนี้จะเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทางกลุ่มสามารถนำไปผลิตเพื่อวางขายและสร้างรายได้ให้กับทางกลุ่มได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ผลิตข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้ง

เตรียมน้ำพริก (ซามา) ซึ่งมีส่วนผสมของ เนื้อปลา กระเทียม หอมแดง พริกแห้ง น้ำตาลทราย และเกลือ จากนั้นนำมาผลิตเป็นธัญพืชชนิดแห้ง ตามสูตรและวิธีการผลิตของกลุ่มวิสาหกิจมั่นคง มั่งคั่ง ยั่งยืน อ.สุไหงโกทก จ.นราธิวาส โดยในสูตรประกอบด้วยข้าวหอมกระดังงา น้ำพริก (ซามา) เบนะแซ กวักม ปลายะตักแห้งและน้ำมันถั่วเหลืองร้อยละ 50, 20, 15, 5, 5 และ 5 ตามลำดับ วิธีการผลิตเริ่มจากหุงข้าวหอมกระดังงาใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำคือ 1:2 นำข้าวหอมกระดังงาที่หุงเสร็จไปอบโดยใช้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมงด้วยตู้อบลมร้อน จากนั้นนำไปทอดที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส นาน 5 วินาที นำส่วนผสมทั้งหมดได้แก่ ข้าวหอมกระดังงาที่ทอดแล้ว น้ำพริก (ซามา) เบนะแซ กวักม ปลายะตักแห้ง และน้ำมันถั่วเหลือง คลุกเคล้าให้เข้ากัน ตักใส่พิมพ์ขนาดกว้าง 2.5×6 เซนติเมตร นำไปอบอีกครั้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้ง

นำผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งมาบรรจุในบรรจุภัณฑ์ น้ำหนักบรรจุ 20 กรัม/ซอง โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปร 2 ตัวแปรคือ ตัวแปรที่ 1 ชนิดของบรรจุภัณฑ์ 2 ชนิดคือ ถุงพลาสติกโพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำ (Linear Low Density Polyethylene;

LLDPE) และถุงอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium Laminate Bag; AL) ตัวแปรที่ 2 ระยะเวลาในการเก็บรักษาตั้งแต่สัปดาห์ที่ 0 ถึง สัปดาห์ที่ 12 เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิห้อง (29 ± 2 องศาเซลเซียส) โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมีและจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้ง สุ่มเก็บตัวอย่างทุก 2 สัปดาห์ เป็นเวลา 12 สัปดาห์ หรือจนกว่าตัวอย่างเสื่อมเสีย/ไม่เป็นที่ยอมรับ วิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ดังนี้ 1) คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี โดยใช้เครื่องวัดค่าสี ตรา Hunter Lab ยี่ห้อ Color Flex CX 1471 วัดลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) รุ่น TA-XT2 โดยทำการวัดค่าความแข็ง (hardness) ใช้หัววัด Blade set with knife ขนาดของตัวอย่าง $30 \times 30 \times 15$ มิลลิเมตร ระยะการกดสูงจากผิวหน้าตัวอย่าง 20 มิลลิเมตร (pre-test speed: 2 mm/s; test speed 2 mm/s; post-test speed 10 mm/s) ทำการวิเคราะห์อย่างน้อย 3 ซ้ำ 2) คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ค่าออกซิเดชันโดยใช้อุปกรณ์ Novasina AG รุ่น CH - 8853 ปริมาณความชื้นและปริมาณกรดไทโอบาร์บิติก (Thiobarbituric acid, TBA) โดยวิธี (AOAC, 2000) 3) คุณภาพทางจุลินทรีย์ ได้แก่ จุลินทรีย์ทั้งหมดและรา ตามวิธี AOAC (2000) 4) การยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งโดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน ทดสอบคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมโดยใช้แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส 9 point hedonic scale

วางแผนการทดลอง แบบ 2×7 Factorial in Completely Randomized Design (CRD) ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Windows Version 21 โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA (analysis of variance) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้
Duncan's Multiple Range Test

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพระหว่างเก็บรักษา

1.1 ค่าสี L^* a^* b^*

ปัจจัยร่วมระหว่างระยะเวลาในการเก็บรักษา และบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ส่งผลต่อค่า L^* a^* b^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยในวันแรกของการเก็บรักษา ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง LLDPE มีค่า L^* a^* b^* เท่ากับ 34.30 ± 0.69 , 8.56 ± 0.46 และ 19.93 ± 0.17 เมื่อเก็บรักษา 12 สัปดาห์ ค่า L^* a^* b^* เท่ากับ 30.02 ± 1.17 , 11.95 ± 0.15 และ 15.93 ± 0.17 ส่วนข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง AL มีค่า L^* a^* b^* เท่ากับ 34.32 ± 0.18 , 8.50 ± 0.10 และ 19.87 ± 0.28 เมื่อเก็บรักษา 12 สัปดาห์ ค่า L^* a^* b^* เท่ากับ 32.70 ± 0.17 , 9.29 ± 0.25 และ 17.85 ± 0.24 ตามลำดับ จากการทดลอง พบว่า ชนิดของบรรจุภัณฑ์ที่ต่างกันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า L^* a^* b^* กล่าวคือ การบรรจุในถุง LLDPE ค่า L^* และ b^* มีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า a^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากถุงพลาสติกชนิด LLDPE ไม่มีคุณสมบัติในการป้องกันความชื้นและแสง ทำให้รังสีควัตถุที่ให้สีแดง ในส่วนผสมบางอย่าง เช่น ข้าวหอมกระดังงา ซึ่งประกอบด้วยสารแอนโทไซยานิน และน้ำพริก (ชามา) ซึ่งประกอบด้วยแคโรทีนอยด์ เกิดการสลายตัวระหว่างการเก็บรักษา รวมทั้งส่วนผสมของผลิตภัณฑ์มีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบก็เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Maillard reaction) โดยกลุ่มกรดอะมิโนของโปรตีน และเปปไทด์ทำปฏิกิริยากับน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งทำให้เกิดสีน้ำตาลขึ้นในผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์จึงมีสีเข้มขึ้น (Patras *et al.*, 2010; Puttame and Chitphutthanakul, 2019) โดยเฉพาะเมื่อผลิตภัณฑ์มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณ

ความชื้นหรือการเพิ่มขึ้นของค่า a_w ส่งผลให้การปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเกิดได้อย่างรวดเร็ว ส่วนผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาที่บรรจุในถุง AL จะพบว่า ค่า L^* และ b^* มีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า a^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่มีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นช้ากว่าผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุง LLDPE เนื่องจาก ถุง AL มีคุณสมบัติในการป้องกันความชื้น การซึมผ่านของออกซิเจน และป้องกันการส่องผ่านของแสงได้ดีกว่าพลาสติกชนิดอื่น จึงใช้เป็นภาชนะบรรจุสำหรับป้องกันแสงและความชื้นในผลิตภัณฑ์อาหาร (Stoklosa *et al.*, 2012; Chittapalo and Songsanandr, 2014) ซึ่ง Areekul *et al.* (2014) กล่าวว่าสภาวะการเก็บรักษาที่ดีที่สุดคือการเก็บในบรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนและหากจะยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้นให้เก็บที่อุณหภูมิต่ำ จากการทดลองพบว่า การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ธัญพืชอัดแท่งในถุง AL เป็นเวลา 12 สัปดาห์ ผลิตภัณฑ์มีสีใกล้เคียงกับวันที่เริ่มต้นการผลิต (วันที่ 0) แสดงให้เห็นว่า บรรจุภัณฑ์ก็เป็นสิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา

1.2 เนื้อสัมผัส (ความแข็ง)

ปัจจัยร่วมระหว่างระยะเวลาในการเก็บรักษาและบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ส่งผลต่อค่าเนื้อสัมผัส (ความแข็ง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบว่า ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง AL มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง LDPPE กล่าวคือ ในวันแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) ข้าวหอมกระดังงาในถุง LLDPE มีค่าความแข็งเท่ากับ $1,209.67 \pm 92.42$ กรัม เมื่อเก็บรักษา 12 สัปดาห์ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น $1,712.42 \pm 95.82$ กรัม ส่วนผลิตภัณฑ์ในถุง AL พบว่า วันแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) ข้าวหอมกระดังงาในถุง AL มีค่าความแข็ง

เท่ากับ $1,204.00 \pm 104.01$ กรัม เมื่อเก็บรักษา 12 สัปดาห์มีค่าเท่ากับ $1,467.38 \pm 85.36$ กรัม จากการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา ส่วนการบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งในถุง LLDPE พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับค่า a_w และความชื้นที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากถุง LLDPE มีคุณสมบัติเป็นถุงใส โปร่งแสง ทำให้ความชื้นแสง และออกซิเจน สามารถซึมผ่านเข้าไปภายในบรรจุภัณฑ์ได้ โดยเฉพาะความชื้นเมื่อซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ดูดน้ำกลับเข้าไป ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูงขึ้น และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อสัมผัสในด้านการสูญเสียความกรอบและเกาะตัวรวมกันเป็นก้อน ซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เหนียวมากขึ้น ต้องใช้แรงในการกดให้แตกเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Khamanam (2014) ที่รายงานว่า ปริมาณความชื้นมีผลต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ประเภทขนมขบเคี้ยว ทำให้โครงสร้าง

Starch/Protein Matrix เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยอากาศที่มีปริมาณความชื้นสูงจะถ่ายเทไปยังผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์มีความเหนียวมากขึ้น ต้องใช้แรงในการกดเพื่อให้เสียสภาพมากขึ้น ซึ่งลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ประเภทขนมขบเคี้ยว คุณลักษณะที่สำคัญของอาหารประเภทนี้ที่ผู้บริโภคต้องการคือความกรอบ โดยอาหารที่กรอบจะต้องแตกง่ายทันทีเมื่อเคี้ยว (Kaur *et al.*, 2018) ส่วนผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งในถุง AL พบการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งเพียงเล็กน้อย เนื่องจากคุณสมบัติของถุง AL ที่สามารถป้องกันการแพร่ผ่านของความชื้น ออกซิเจน ก๊าซชนิดอื่นๆ รวมไปถึงสารระเหยให้กลิ่น และยังมีคุณสมบัติที่ดีในการป้องกันแสง จากข้อมูลดังกล่าวทำให้สรุปได้ว่าการบรรจุข้าวโพดแห้งในถุง AL ไม่ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไปมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับ การบรรจุในภาชนะชนิดอื่น (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพด้านกายภาพของข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 12 สัปดาห์

ชนิดบรรจุภัณฑ์	สัปดาห์ที่	L*	a*	b*	Hardness (g)
ถุง LLDPE	0	34.30 ± 0.69^a	8.56 ± 0.46^a	19.93 ± 0.17^a	$1,209.67 \pm 92.42^g$
	2	33.90 ± 0.49^b	8.80 ± 0.50^a	19.22 ± 0.31^a	$1,307.38 \pm 105.36^f$
	4	33.10 ± 0.47^b	8.94 ± 0.70^a	18.55 ± 0.29^b	$1,479.82 \pm 100.06^c$
	6	32.61 ± 0.58^c	9.67 ± 0.41^b	18.06 ± 0.79^b	$1,528.13 \pm 95.02^d$
	8	32.16 ± 0.10^c	10.39 ± 0.71^c	17.73 ± 0.20^c	$1,602.50 \pm 102.62^c$
	10	31.59 ± 0.54^d	10.92 ± 0.11^c	16.81 ± 0.37^d	$1,682.08 \pm 95.10^b$
	12	30.02 ± 1.17^e	11.95 ± 0.15^d	15.93 ± 0.17^e	$1,712.42 \pm 95.82^a$
ถุง AL	0	34.32 ± 0.18^a	8.50 ± 0.10^a	19.87 ± 0.28^a	$1,204.00 \pm 104.01^g$
	2	34.19 ± 0.14^a	8.57 ± 0.23^a	19.34 ± 0.28^a	$1,219.67 \pm 92.42^g$
	4	34.10 ± 0.70^a	8.64 ± 0.12^a	19.04 ± 0.50^a	$1,300.00 \pm 101.02^f$
	6	33.88 ± 0.18^b	8.70 ± 0.55^a	18.82 ± 0.18^b	$1,312.67 \pm 100.52^f$

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชนิดบรรจุ ภัณฑ์	สัปดาห์ที่	L*	a*	b*	Hardness (g)
ถุง AL	8	33.42±0.40 ^b	8.95±0.24 ^a	18.62±0.44 ^b	1,398.35±82.01 ^{ef}
	10	33.05±0.46 ^b	9.16±0.42 ^b	18.07±0.70 ^b	1,406.33±85.61 ^{ef}
	12	32.70±0.17 ^c	9.29±0.25 ^b	17.85±0.24 ^c	1,467.38±85.36 ^c

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรต่างกันในแนวคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

2. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีระหว่างเก็บรักษา

2.1 ค่า a_w และ ความชื้น

ปัจจัยร่วมระหว่างระยะเวลาในการเก็บรักษาและบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ส่งผลต่อค่า a_w อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยในวันแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง LLDPE มีค่า a_w เท่ากับ 0.31 ± 0.01 เมื่อเก็บรักษาไป 12 สัปดาห์มีค่า a_w เท่ากับ 0.62 ± 0.05 ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุง AL ในวันแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) มีค่า a_w เท่ากับ 0.31 ± 0.06 เมื่อเก็บรักษาไป 12 สัปดาห์มีค่า a_w เท่ากับ 0.40 ± 0.01 ส่วนความชื้น พบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างระยะเวลาในการเก็บรักษาและสภาวะการบรรจุ 2 รูปแบบส่งผลต่อค่าความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) วันแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง LLDPE มีค่าความชื้นร้อยละ 2.26 ± 0.16 เมื่อเก็บรักษา 12 สัปดาห์ผลิตภัณฑ์มีความชื้นร้อยละ 6.34 ± 0.23 ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุงอูมิเนียมฟอยล์ ในวันแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) มีปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 2.24 ± 0.24 และเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 12 สัปดาห์ความชื้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 3.41 ± 0.23 (ตารางที่ 2) เมื่อพิจารณาทั้ง 2 ปัจจัยคือค่า a_w และ ความชื้น พบว่า ให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน โดยผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษาในถุง AL มีการเปลี่ยนแปลงของค่า a_w และ ความชื้นต่ำกว่าการเก็บรักษาในถุง LLDPE

เนื่องจาก ถุง AL มีคุณสมบัติในการป้องกันแสงออกซิเจนและความชื้น (Pua *et al.*, 2008) อย่างไรก็ตามทุกชุดการทดลองมีค่า a_w และปริมาณความชื้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของผัก ผลไม้ และธัญพืชอัดแห้ง ซึ่งกำหนดค่า a_w ไม่เกิน 0.85 และความชื้นไม่เกินร้อยละ 12 (Thai Community Product Standard 902, 2016) ดังนั้น อาหารที่มีค่า a_w อยู่ในช่วงดังกล่าว จุลินทรีย์โดยเฉพาะจุลินทรีย์ก่อโรคไม่สามารถเจริญได้ รวมทั้งสามารถยับยั้งปฏิกิริยาเคมีต่างๆ เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นหรือค่า a_w ทำให้อาหารเสื่อมคุณภาพและไม่ปลอดภัย ซึ่งมีผลโดยตรงต่ออายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ แต่จากการทดลองผลิตภัณฑ์ในบรรจุภัณฑ์ทั้ง 2 แบบมีการเปลี่ยนแปลงของค่า a_w และ ความชื้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา มีสาเหตุจากการที่อาหารได้สัมผัสกับออกซิเจนที่หลงเหลือในบรรจุภัณฑ์หรือมีการซึมผ่านของออกซิเจนเข้าไปในบรรจุภัณฑ์ รวมทั้งสภาพแวดล้อม ทำให้อาหารดูดซับความชื้น ส่งผลทำให้ค่า a_w และปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นด้วย สอดคล้องกับ Areekul *et al.* (2014) ที่ได้ศึกษาค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับสภาพการให้ซึมผ่านของไอน้ำของพลาสติก พบว่า พลาสติกชนิดเดียว เช่น พอลิโพลีไพลีน พอลิเอทิลีน มีสัมประสิทธิ์สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำปานกลาง มีค่าระหว่าง 0.2785-0.3688 กรัมต่อตารางเมตรต่อวันต่อมิลลิเมตรปรอท

โดยการเคลื่อนที่ของไอน้ำจะเกิดในถุงพลาสติกได้ ดีกว่าถุง AL เนื่องจากถุง AL เกิดจากฟิล์มพอลิโพลีโพลีไพลีนฉนวนผิวด้านนอกด้วยไอโลหะ จึงทำให้มีคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านไอน้ำและออกซิเจนได้ดีกว่าถุงพลาสติกที่เป็นฟิล์มโพลีเอทิลีนชั้นเดียว (Dutta and Dutta, 2016) ซึ่งถุง AL มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำน้อยกว่า 0.70 กรัมต่อตารางเมตรต่อวันต่อมิลลิเมตรปรอท (Butler *et al.*, 2009; Herawati *et al.*, 2019) ทำให้ระยะเวลาการเก็บที่นานขึ้น ผลผลิตนั้นก็มีความชื้นสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้สาเหตุหนึ่งที่ส่งผลทำให้ความชื้นในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาเนื่องมาจาก ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งจัดเป็นอาหารพวก High Hygroscopicity คือเป็นอาหารที่มีน้ำตาลและเกลือสูง เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จะทำให้ปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์อย่างรวดเร็ว

2.2 ค่า TBA

ค่า TBA เป็นดัชนีบ่งบอกถึงคุณภาพที่มีความสำคัญบ่งชี้ถึงการเกิดออกซิเดชันของไขมัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันเป็นส่วนประกอบ ซึ่งจะวัดปริมาณสาร secondary oxidation products ที่เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็น primary oxidation products จะเกิดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (Lamkampang and Inget, 2015) โดยมีปริมาณออกซิเจนและค่า a_w เป็นปัจจัยในการเร่งให้เกิดปฏิกิริยา (Banchuen *et al.*, 2009) โดยทั่วไป ค่า TBA ที่มากกว่า 3 mg MDA/kg sample จะทำให้ผู้บริโภครับรู้กลิ่นแปลกปลอมทางประสาทสัมผัสต่ออาหารได้ และถ้าค่ามากกว่า 7 mg MDA/kg sample ไขมันจะเสื่อมคุณภาพมากขึ้นและมักกลิ่นรุนแรงมากขึ้น และจะไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์ หากค่า TBA เกิน 20 mg MDA/kg sample ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผลิตภัณฑ์นั้นด้วย (Lopacka *et al.*, 2017; Serpen and Gökmen, 2009) ปัจจัยร่วมระหว่าง

ระยะเวลาในการเก็บรักษาและบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ส่งผลต่อค่า TBA อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง LLDPE มีค่า TBA เริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 1.04 ± 0.92 mg MDA/kg sample เมื่อเก็บรักษา 12 สัปดาห์ ค่า TBA มีค่าเท่ากับ 3.18 ± 0.47 mg MDA/kg sample ส่วนข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง AL มีค่า TBA เริ่มต้นเท่ากับ 1.04 ± 0.86 mg MDA/kg sample เมื่อเก็บรักษา 12 สัปดาห์มีค่าเท่ากับ 2.11 ± 0.21 mg MDA/kg sample จากผลการทดลองจะพบว่า ค่า TBA ของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง LLDPE และ AL เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน สอดคล้องกับค่า a_w และปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นตลอดอายุการเก็บรักษาเช่นกัน ซึ่งค่า a_w เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพของอาหาร เพราะจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทางเคมีหรือปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์อย่างช้าๆ ค่า a_w ในช่วง 0-0.4 อัตราการเกิดออกซิเดชันจะลดลง และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่า a_w มากกว่า 0.4 (Choe and Min, 2007) ผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งจัดอยู่ในกลุ่มอาหารแห้งหรืออาหารความชื้นต่ำ (a_w ระหว่าง 0.0-0.60) เมื่ออาหารได้สัมผัสกับออกซิเจนที่หลงเหลือในบรรจุภัณฑ์ หรือว่ามีการซึมผ่านของออกซิเจนเข้าไปในบรรจุภัณฑ์ ทำให้ส่วนผสมบางอย่าง เช่น ข้าวหอมกระดังงา ปลากระด้างแห้งทอด ซึ่งมีองค์ประกอบของไขมันเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้กรดไขมันอิสระและถูกออกซิไดซ์ได้สารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ สารนี้จะแตกตัวเป็นสารประกอบแอลดีไฮด์คีโตน แอลกอฮอล์และกรดคาร์บอนิลิก ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารในเทอมของการเกิด hydrolytic rancidity ซึ่งทำให้เกิดกลิ่นหืน ส่วนชนิดของบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกันพบว่า ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง LLDPE มีค่า TBA สูงกว่าข้าว

หอยกระดังยชนิดแท่งที่บรรจุในถุง AL เนื่องจากถุง AL มีคุณสมบัติในการป้องกันแสง ออกซิเจน และ ไอน้ำ จึงสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของ ผลิตภัณฑ์ ส่วนถุง LLDPE มีคุณสมบัติเป็นถุงใส โปร่งแสง ทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันสามารถถูกกระตุ้นจากแสง นอกจากนี้ยังมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน มากกว่าถุง AL อีกด้วย คือ ถุง LLDPE มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนอยู่ในช่วง 0.2785 - 0.3688 กรัมต่อตารางเมตรต่อวันต่อมิลลิเมตรปรอท ในขณะที่ อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของ AL มีค่า

0.0076-0.0351 กรัมต่อตารางเมตรต่อวันต่อมิลลิเมตรปรอท (Dutta and Dutta, 2016; Lebidzinska and Szefer, 2006) ซึ่งบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารประเภททอดหรือกรอบนั้น ควรมีคุณสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ เพื่อกันความชื้นซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความกรอบลดลง และต้องเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอาหาร ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืนขึ้นในผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพด้านเคมีของผลิตภัณฑ์ข้าวหอยกระดังยชนิดแท่งที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 12 สัปดาห์

ชนิดบรรจุภัณฑ์	สัปดาห์ที่	a_w	ความชื้น (%)	TBA (mg MDA/kg sample)
ถุง LLDPE	0	0.31±0.01 ^h	2.26±0.16 ⁱ	1.04±0.92 ^j
	2	0.38±0.01 ^c	2.68±0.49 ^g	1.95±1.08 ^g
	4	0.41±0.01 ^d	2.89±0.21 ^f	2.27±1.06 ^c
	6	0.47±0.02 ^c	3.32±0.41 ^c	2.49±0.51 ^d
	8	0.52±0.02 ^c	4.89±0.39 ^c	2.61±0.62 ^c
	10	0.57±0.01 ^b	5.25±0.39 ^b	2.93±0.82 ^b
	12	0.62±0.05 ^a	6.34±0.23 ^a	3.18±0.47 ^a
ถุง AL	0	0.31±0.06 ^h	2.24±0.24 ⁱ	1.04±0.86 ^j
	2	0.34±0.06 ^g	2.41±0.51 ^{hi}	1.25±0.63 ⁱ
	4	0.34±0.02 ^g	2.53±0.29 ^h	1.45±1.02 ^h
	6	0.36±0.02 ^f	2.87±0.61 ^f	1.86±0.82 ^{gh}
	8	0.37±0.01 ^{ef}	3.20±0.46 ^{ef}	1.98±0.53 ^g
	10	0.38±0.01 ^c	3.24±0.77 ^{ef}	2.09±0.44 ^f
	12	0.40±0.01 ^d	3.41±0.23 ^d	2.11±0.21 ^f

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3. คุณภาพทางจุลินทรีย์

ผลจากการนำผลิตภัณฑ์ข้าวหอยกระดังยชนิดแท่งมาเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ 2 ชนิดคือถุง

LLDPE และถุง AL เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (29±2 องศาเซลเซียส) สุ่มตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางจุลินทรีย์ทุก 2 สัปดาห์ ทำการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ

เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและเชื้อรา โดยเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเรื่องผัก ผลไม้ และธัญพืชอัดแท่ง ซึ่งกำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาดังนี้ จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดต้องไม่เกิน 1×10^6 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม ยีสต์และราต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม (Thai Community Product Standard 902, 2016) ผลการศึกษาพบว่า การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในถุง LLDPE และถุง AL มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านจุลินทรีย์เกิดขึ้น โดยจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุง AL มีการเพิ่มจำนวนขึ้นน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุง LLDPE ตลอด 12 สัปดาห์ ในวันแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุง LLDPE มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดเริ่มต้น 1.6×10^2 โคโลนีต่อกรัมและเพิ่มเป็น 1.5×10^4 โคโลนีต่อกรัม เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 10 สัปดาห์ ส่วนผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุง AL มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดเริ่มต้น 1.4×10^2 โคโลนีต่อกรัม และเพิ่มเป็น 9.0×10^2 โคโลนีต่อกรัมเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 12 สัปดาห์ (ตารางที่ 3) ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุง LLDPE มีปริมาณเชื้อราเริ่มต้น 1.2×10^1 โคโลนีต่อกรัมและเพิ่มเป็น 2.2×10^2 โคโลนีต่อกรัม ในสัปดาห์ที่ 10 ส่วนผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุงอูมิเนียมฟอยล์มีปริมาณเชื้อราเริ่มต้น 1.2×10^1 โคโลนีต่อกรัม และเพิ่มเป็น 5.5×10^1 โคโลนีต่อกรัมเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 12 สัปดาห์ การเพิ่มขึ้นของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและเชื้อรามีความสัมพันธ์กับค่า a_w และปริมาณความชื้น โดยทั่วไปเชื้อจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตเมื่ออาหารมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.6-0.9

เชื้อจุลินทรีย์ประเภทราจะหยุดการเจริญเติบโตเมื่ออาหารมีค่า a_w เท่ากับ 0.62 หรือต่ำกว่า (Pratiwi *et al.*, 2019; Rawat and Darappa, 2015) จากผลการทดลองพบว่า ในสัปดาห์ที่ 10 ผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแท่งที่บรรจุในถุง LLDPE มีปริมาณเชื้อราเท่ากับ 2.2×10^2 โคโลนีต่อกรัม ซึ่งเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเรื่องผัก ผลไม้ และธัญพืชอัดแท่ง ที่กำหนดให้ราต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม เป็นผลเนื่องจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บรักษา รวมทั้งบรรจุภัณฑ์ประเภท LLDPE มีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของความชื้น แสง ออกซิเจนได้น้อยกว่าถุง AL ซึ่งการเพิ่มขึ้นของเชื้อจุลินทรีย์มีสาเหตุเนื่องจากมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตซึ่งมีปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ปริมาณสารอาหาร ปริมาณน้ำอิสระของอาหาร ปริมาณออกซิเจน ซึ่งถ้าหากปัจจัยเหล่านี้มี ปริมาณเพียงพอและอยู่ในช่วงที่เหมาะสมจุลินทรีย์ก็จะสามารถเจริญเติบโตได้ (Phothapaeree *et al.*, 2017) จึงสรุปได้ว่า การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแท่งในถุง LLDPE สามารถเก็บรักษาได้ 8 สัปดาห์ ถ้าหากต้องการยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้น สามารถเก็บรักษาในถุงอูมิเนียมฟอยล์ซึ่งตลอดระยะเวลาทั้งสิ้น 12 สัปดาห์พบว่า คุณภาพของผลิตภัณฑ์ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (Thai Community Product Standard 902, 2016)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์คุณภาพด้านจุลินทรีย์ของัญผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 12 สัปดาห์

สัปดาห์ ที่	ถุง LLDPE		ถุง AL	
	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (CFU/g)	เชื้อรา (CFU/g)	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (CFU/g)	เชื้อรา (CFU/g)
0	1.6×10^2	1.2×10^1	1.4×10^2	1.2×10^1
2	4.8×10^2	1.7×10^1	1.7×10^2	1.4×10^1
4	3.2×10^3	2.5×10^1	3.5×10^2	2.9×10^1
6	5.0×10^3	5.2×10^1	6.4×10^2	3.2×10^1
8	8.2×10^3	6.7×10^1	7.5×10^2	4.1×10^1
10	1.5×10^4	2.2×10^2	8.1×10^2	5.2×10^1
12	-	-	9.0×10^2	5.5×10^1

4. การทดสอบทางประสาทสัมผัส

การประเมินผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัสและความชอบรวมของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งโดยใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 30 คน ด้วยวิธี 9-point hedonic scale พบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างระยะเวลาในการเก็บรักษาและสภาวะการบรรจุ 2 รูปแบบ ส่งผลต่อคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัสและความชอบรวม ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คะแนนการประเมินทางลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง LLDPE ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนลดลงตามระยะเวลาของการเก็บรักษา โดยช่วงแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนเท่ากับ 7.46 และเมื่อเก็บรักษาถึงสัปดาห์ที่ 10 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนน 6.43 ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุง AL พบว่าช่วงแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนเท่ากับ 7.46 และเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 12 สัปดาห์ผู้ทดสอบชิมให้คะแนน 7.06 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 คุณลักษณะด้านสีของผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง LLDPE ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนลดลง

ตามระยะเวลาของการเก็บรักษา โดยช่วงแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนเท่ากับ 7.34 และเมื่อเก็บรักษาถึงสัปดาห์ที่ 10 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนน 6.73 ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุง AL พบว่าช่วงแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนเท่ากับ 7.33 และเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ผู้ทดสอบชิมให้คะแนน 7.10 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองทางคุณลักษณะทางกายภาพโดยการวัดค่า L^* a^* b^* ที่พบว่า การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในถุง LLDPE ส่งผลต่อค่า L^* a^* b^* ของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งมากกว่าการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในถุง AL ส่งผลให้ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนการยอมรับในด้านค่าสีของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันด้วยส่วนคุณลักษณะทางด้านกลิ่นพบว่า ผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง LLDPE ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนลดลงตามระยะเวลาของการเก็บรักษาเช่นกัน โดยช่วงแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนเท่ากับ 7.50 และเมื่อเก็บรักษาจนถึงสัปดาห์ที่ 10 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนน 6.33 ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุง AL พบว่าช่วงแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) ผู้ทดสอบชิมให้

คะแนนเท่ากับ 7.51 และเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ผู้ทดสอบชิมให้คะแนน 6.93 ตามลำดับ ซึ่งการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งในถุง AL ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนสูงกว่าเนื่องจากยังมีกลิ่นของส่วนผสมมากกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kanpairo (2012) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์เครื่องปรุงรสต้มยำ พบว่า การเปลี่ยนแปลงกลิ่นเครื่องเทศสมุนไพรอาจเป็นผลเนื่องมาจากส่วนประกอบของผงปรุงรสต้มยำ ได้แก่ ตะไคร้ ใบมะกรูด และหอมแดง ซึ่งเป็นสารที่ระเหยได้ง่ายและมีการสลายตัวถ้ามีสภาวะการเก็บที่ไม่เหมาะสมเช่น ความร้อนและบรรจุภัณฑ์ที่ไม่สามารถป้องกันความชื้น แสง และอากาศได้ ซึ่งการใช้ถุงอูมิเนียมพอลิเอทิลีนช่วยป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและความชื้นได้ดี การระเหยของกลิ่นในผลิตภัณฑ์จึงเกิดได้น้อย ส่งผลให้กลิ่นเครื่องเทศยังคงอยู่ การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัส พบว่า ผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง LLDPE ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนลดลงตามระยะเวลาของการเก็บรักษา โดยช่วงแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนเท่ากับ 7.34 และเมื่อเก็บรักษาถึงสัปดาห์ที่ 10 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนน 6.23 ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุง AL พบว่าช่วงแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) ผู้ทดสอบชิม

ให้คะแนนเท่ากับ 7.33 และเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ผู้ทดสอบชิมให้คะแนน 7.04 ตามลำดับ คะแนนที่ได้สอดคล้องกับค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ที่พบว่า การบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งในถุง AL ผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงด้านความแข็งเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง LDPPE ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของถุงอูมิเนียมพอลิเอทิลีนที่สามารถป้องกันความชื้นได้ดีกว่าถุงพลาสติกชนิด PP และ PE (Pinto *et al.*, 2017) ส่วนผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความชอบโดยรวมพบว่า ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่บรรจุในถุง LLDPE ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนอยู่ในช่วง 6.73-7.69 ส่วนผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุงอูมิเนียมพอลิเอทิลีนผู้ทดสอบชิมให้คะแนนอยู่ในช่วง 7.10-7.70 ซึ่งผู้ทดสอบชิมให้คะแนนผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุงอูมิเนียมพอลิเอทิลีนมากกว่าและเมื่อเมื่อตรวจสอบคะแนนของปัจจัยต่างๆ ในระหว่างการเก็บรักษาได้แก่ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น และเนื้อสัมผัสพบว่า ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจากปัจจัยดังกล่าวสรุปได้ว่า การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมจะช่วยยืดอายุและทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์คุณภาพด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้งที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 12 สัปดาห์

ชนิดบรรจุภัณฑ์	สัปดาห์ที่	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น	เนื้อสัมผัส	ความชอบรวม
ถุง LLDPE	0	7.46±0.92 ^a	7.34±1.29 ^a	7.50±1.19 ^a	7.34±1.29 ^a	7.69±0.81 ^a
	2	7.43±0.51 ^a	7.34±0.83 ^a	7.26±1.22 ^c	7.22±0.83 ^b	7.36±1.22 ^c
	4	7.00±0.77 ^{bc}	7.27±1.28 ^b	7.09±1.30 ^c	7.16±1.28 ^c	7.17±0.90 ^d
	6	7.00±0.67 ^{bc}	7.13±0.59 ^c	6.84±0.61 ^c	6.80±0.59 ^c	7.05±0.56 ^c
	8	6.98±0.60 ^c	7.06±0.67 ^d	6.66±0.58 ^f	6.66±0.67 ^{ef}	6.90±0.66 ^f
	10	6.43±0.56 ^d	6.73±0.35 ^c	6.33±0.61 ^g	6.23±0.35 ^f	6.73±0.63 ^g

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ชนิดบรรจุ ภัณฑ์	สัปดาห์ที่	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น	เนื้อสัมผัส	ความชอบรวม
	12	-	-	-	-	-
ถุง AL	0	7.46±0.51a	7.33±0.89a	7.51±0.63a	7.33±0.89a	7.70±0.56 a
	2	7.43±0.61a	7.33±0.81a	7.46±0.81a	7.30±0.81a	7.66±0.63 a
	4	7.27±1.00ab	7.28±1.34b	7.38±1.32b	7.27±0.34b	7.60±0.68 ab
	6	7.20±0.58ab	7.27±0.64b	7.29±0.70c	7.18±0.64c	7.57±0.68b
	8	7.16±0.65ab	7.26±0.59b	7.18±0.63d	7.16±0.59c	7.46±0.81bc
	10	7.10±0.74b	7.12±0.53c	7.04±0.50e	7.06±0.74d	7.16±0.61d
	12	7.06±0.63bc	7.10±0.74c	6.93±0.45ef	7.04±0.53d	7.10±0.97d

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

สรุป

ปัจจัยร่วมระหว่างระยะเวลาในการเก็บรักษาและบรรจุภัณฑ์ 2 ชนิด ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี จุลินทรีย์ และทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวหอมกระดังงาชนิดแห้ง ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุง AL สามารถเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องได้นาน 12 สัปดาห์ โดยที่ยังคงมีค่า a_w ปริมาณความชื้น จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และเชื้อรา อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผัก ผลไม้ และธัญพืชอัดแห้ง ส่วนการประเมินผลทางประสาทสัมผัสพบว่า ผู้ทดสอบชิมยังให้การยอมรับผลิตภัณฑ์โดยวิธี 9-point hedonic scale อยู่ในระดับ 6-7 คะแนน จากคะแนนเต็ม 9 คะแนน แต่ปัจจัยด้านกลิ่นพบว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนน้อยที่สุดคือ 6.93 สอดคล้องกับค่า TBA ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บรักษา โดยในสัปดาห์ที่ 12 มีค่า TBA เท่ากับ 2.11 ± 0.21 mg MDA/kg sample ซึ่งโดยทั่วไปค่า TBA ที่มากกว่า 3 mg MDA/kg sample จะทำให้ผู้บริโภครับรู้กลิ่นแปลกปลอมทางประสาทสัมผัสต่ออาหารได้ ทั้งนี้ การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในถุง AL สามารถชะลอการ

เปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมี จุลินทรีย์ ของผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้การควบคุมคุณภาพระหว่างกระบวนการผลิต การบรรจุ และการเก็บรักษาเพื่อรอจำหน่าย ก็ยังเป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ที่ให้การสนับสนุนสถานที่และทุนสนับสนุนการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis of AOAC international**. 17th ed. Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg, Md.
- Areekul, V., Phongpipatpong, M., Narinsuksanti, S. and Tarchew, S. 2014. **Research Report on Development of Instant Jiaogulan Tea Powder Using Spray Dryer and Its**

- Storage Stability.** King Mokut, s Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok. (in Thai)
- Banchuen, J., Thammarutwasik, P., Ooraikul, B., Wuttijumnong, P. and Sirivongpaisal, P. 2009. Effect of germinating processes on bioactive component of Sangyod Muang Phatthalung rice. **Thai Journal of Agricultural Science** 42(4): 191-199.
- Butler, T.I., Morris, B.A. and Wagner, J.R. 2009. **Chapter 15 - PE based multilayer film structures.** Multilayer flexible packaging, William Andrew Publishing, Boston.
- Chakamanont, S., Tubporn, H. and Ruengrong, A. 2020. Guidelines for the Transmission of Cultural Values and CollectiveIdentity : Chili Pastes of Southeast Asia. **Journal of Cultural Approach** 21(40): 35-45. (in Thai)
- Chittapalo, T. and Songsanandr, P. 2014. Product development of black glutinous rice cracker with Panang flavor and its quality changes. **International Food Research Journal** 21(5): 2025-2029.
- Choe, E. and Min, D.B. 2007. Chemistry of deep-fat frying oils. **Journal of Food Science** 72(5): 77-86.
- Dutta, A. and Dutta, G. 2016. Comparing optimum barrier variables of Aluminium and MPET Foil Based Laminates for coffee packaging. **Journal of Applied Packaging Research** 8(3): 52-60.
- Hayamin, P. 2009. A construct of mortar machine. **Princess of Naradhiwas University Journal** 1(3): 95-101. (in Thai)
- Herawati, E.R.N., Miftakhussolikhah, M., Pusporini, A.R. and Murdiati, A. 2019. Sensorial and chemical characterization of snack bar with variation of gembolo flour (*Dioscorea bulbifera*) and arrowroot starch (*Marantha arundinaceae* L.). **Food Research** 3(5): 564-569.
- Kanpairo, K. 2012. Production and Utilization of Tuna Processing Juice Powder as Ingredient in Tom-Yum Mix Seasoning Powder. Master Thesis of Science, Prince of Songkla University. (in Thai)
- Kaur, R., Ahluwalia, P., Sachdev, P.A. and Kaur, A. 2018. Development of gluten-free cereal bar for gluten intolerant population by using quinoa as major ingredient. **Journal of Food Science and Technology** 55(9): 3584-3591.
- Khamanam, P. 2014. The Value Added Made From Degrade Sun Dried Banana and Banana Syrup for Snack Bars. Master Thesis of Science, Pibulsongkram Rajabhat University. (in Thai)
- Lamkampang, P. and Inget, S.V. 2015. Product Development of Khao-Tang Supplemented with Calcium from Grey Feather Back Fish bone. **Suandusit Research Journal** 8(1): 57-71. (in Thai)
- Lebiedzinska, A. and Szefer, P. 2006. Vitamins B in grain and cereal-grain food, soyproducts and seeds. **Food Chemistry** 95(1): 116-122.

- Lopacka, J., Poltorak, A. and Wierzbicka, A. 2017. Effect of reduction of oxygen concentration in modified atmosphere packaging on bovine M. longissimus lumborum and M. gluteus medius quality traits. **Meat Science** 124: 1-8.
- Patras, A., Bruton, N.P., O'Donnell, C. and Tiwari, B.K. 2010. Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. **Trends in Food Science & Technology** 21(1): 3-11.
- Phothapaeree, N., Jarusaksakul, N., Somwangthanaroj, A. and Tananuwong, K. 2017. Influence of packaging and storage conditions on quality parameters and shelf life of solar-dried banana. **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 39(2): 253-260.
- Pinto, V.R.A., Freitas, T.B.O., Dantas, M.I.S., Lucia, S.M.D., Melo, L.F., Minim, V.P.R. and Bressan, J. 2017. Influence of package and health-related claims on perception and sensory acceptability of snack bars. **Food Research International** 101: 103-113.
- Prachachart. 2019. **Trends Healthy Food and beverage**. Prachachart business. Available source: <https://www.prachachat.net/columns/news-268743>, March 20, 2021. (in Thai)
- Pratiwi, I.A., Kemsawasd, V. and Winuprasith, T. 2019. Storage Stability of High Fiber Snack Bar. **Global Health Management Journal** 3(3): 124-137.
- Pua, C.K., Sheikh Abd. Hamid, N., Tan, C.P., Mirhosseini, H., Abd. Rahman, R. and Rusul, G. 2008. Storage stability of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) powder packaged in aluminium laminated polyethylene and metallized co-extruded biaxially oriented polypropylene during storage. **Journal of Food Engineering** 89: 419-428.
- Puttame, K. and Chitphutthanakul, S. 2019. Effect of Antioxidants and Packages on Shelf-Life of Fried Durian Stick Product. **Rajabhat Rambhai Barni Research Journal** 13(3): 162-169. (in Thai)
- Rawat, N. and Darappa, I. 2015. Effect of ingredients on rheological, nutritional and quality characteristics of fibre and protein enriched baked energy bars. **Journal of food science and technology** 52(5): 3006-3013.
- Serpen, A. and Gökmen, V. 2009. Evaluation of the Maillard reaction in potato crisps by acrylamide, antioxidant capacity and color. **Journal of Food Composition and Analysis** 22(6): 589-595.
- Somboondumrongkul, A., Luekhajon, P. and Srisaya, J. 2014. **Research Report on Cereal Bar with Sangyod Rice**. Rajamangala University of Technology Srivijaya. (in Thai)
- Stoklosa, A.M., Lipasek, R.A., Taylor, L.S. and Mauer, L.J. 2012. Effects of storage conditions, formulation, and particle size on moisture sorption and flowability of powders: A study of deliquescent ingredient blends. **Food Research International** 49: 783-791.
- Thai Community Product Standard 902. 2016. **Fruit Vegetable and Cereal Bar (902/2016)**. Available source: http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0902_59, March 18, 2021. (in Thai)

- Yadav, L. and Bhatnagar, V. 2016. Formulation, Quality Evaluation and Shelf-life of Value Added Cereal Bar by incorporation of Defatted Soy Flour. **International Journal Food Fermentation Technology** 6(2): 251-259.
- Yuenyongputtakal, W., Chinasam, S. and Wichienchot, S. 2019. **Research Report on Adding Value to Green Mussel and Hawm Gra Dang Ngh Rice for Ready-to-Eat Jerky-Like Product Production.** Burapha University. (in Thai)

พฤติกรรมและกำลังของเสาท่อเหล็กหน้าตัดกลมกรอกคอนกรีต ที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

Behavior and Strength of Circular Hydraulic Cement Concrete-Filled Steel Tube Columns

นำชัย จ้อยสูงเนิน¹ จักษดา ชำรงวุฒิ^{1*} เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์¹ และ สิทธิชัย แสงอาทิตย์²

Namchai Joysoongnern¹, Jaksada Thumrongvut^{1*}, Cherdsak Suksiripattanapong¹ and Sittichai Seangatith²

Received: 30 January 2021, Revised: 10 January 2022, Accepted: 17 January 2022

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมรับแรงในแนวแกนและลักษณะการวิบัติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HCFT column) ภายใต้แรงอัดในแนวแกน และเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดของเสาที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC-LRFD เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของสมการฯ ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างทดสอบมีจำนวนทั้งสิ้น 24 ตัวอย่าง โดยเป็นเสาหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm และสูง 750 mm ปูนซีเมนต์ 2 ชนิด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ถูกใช้ในการผลิตคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดประลัย 18 MPa จากการทดสอบพบว่า พฤติกรรมการรับแรงของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีลักษณะเชิงเส้นตรงถึงประมาณ 80-90% ของแรงอัดสูงสุด จากนั้น ตัวอย่างเสาจะมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นนี้ถูกจำแนกเป็นแบบ Strain-Softening โดยลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสาเป็นการแตกร้าวของแกนคอนกรีตและการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็ก นอกจากนี้ พบว่าสมการออกแบบเสาของ AISC-LRFD มีความน่าเชื่อถือเพียงพอในการประเมินแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก สุดท้าย จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตพบว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถใช้เป็นวัสดุแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต, ท่อเหล็กหน้าตัดกลม, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, แรงอัดในแนวแกน

¹ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

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

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): jaksada.th@rmu.ac.th Tel: 08 1548 4799

ABSTRACT

This paper aimed to study the axial load behaviors and failure modes of circular hydraulic cement concrete-filled steel tube columns (HCFT column) under concentrically axial load and to compare the maximum compressive loads obtained from the experiment with those calculated by using the AISC-LRFD composite column design equations in order to check the adequacy of the equation. In this study, a total of 24 circular column specimens was tested. The dimension of the specimens is 150 mm in diameter and 750 mm in height. Two different cement types, hydraulic cement (HC) and ordinary Portland cement (OPC), were used to produce the concrete with the targeted ultimate compressive strength of 18 MPa. From the tests, it was found that the HCFT columns had a linear elastic behavior up to approximately 80-90% of their maximum compressive loads. After that, the behavior of the columns was nonlinear until their failure. This nonlinear behavior can be classified as the strain-softening type. The mode of failure of the HCFT columns was in a form of cracking and crushing of the concrete core and local buckling of the hollow steel tube. Additionally, it was found that the AISC-LRFD composite column design equation is reliable for estimating the maximum compressive load of the HCFT columns. Finally, by comparing the efficiency of the hydraulic cement versus the ordinary Portland cement for the concrete-filled steel tube column used in this study, it can be concluded that the hydraulic cement can be used as a substitute material for the ordinary Portland cement.

Key words: concrete-filled tube column, circular steel tubular, hydraulic cement, axial compression

บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ระบบการก่อสร้างแบบหล่อในที่ (cast-in-place construction system) เป็นระบบที่มักใช้ระยะเวลาดำเนินงานค่อนข้างมาก ส่งผลให้ต้นทุนก่อสร้างมีราคาสูง ดังนั้น การพัฒนาระบบการก่อสร้างแบบสำเร็จรูป (fabrication) หรือแบบกึ่งสำเร็จรูป (pre-fabrication) จึงเข้ามามีบทบาทเพื่อช่วยเสริมในบางส่วนของโครงสร้าง (Thumrongvut *et al.*, 2022) เนื่องจากประสิทธิภาพการดำเนินงานที่รวดเร็วและสามารถควบคุมคุณภาพของชิ้นส่วนได้ดีกว่าระบบเดิม (Yang *et al.*, 2016) อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาการขาดแคลนแรงงานในการก่อสร้างลงได้มาก ตัวอย่างเช่น การใช้แบบหล่อสำเร็จรูปเป็นแบบหล่อให้กับโครงสร้างและออกแบบให้รับแรงกระทำร่วมกับโครงสร้างโดยไม่มีการถอดแบบหล่อ

ดังกล่าวออก เช่น การใช้ท่อเหล็กกลวง (hollow steel tube) เป็นแบบหล่อสำเร็จรูปถาวรของเสา ดังแสดงในงานวิจัยของ Uy (2001), Huang *et al.* (2002), Hanand Yao (2003), Giakoumelis and Lam (2004), Thumrongvut and Tiwjantuk (2018), Joysoongnoen *et al.* (2021), Khamphay *et al.* (2021) ปัจจุบันเสาเชิงประกอบ เช่น เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled tube (CFT) column) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั่วโลก เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมีข้อดีที่สำคัญคือ ช่วยให้การก่อสร้างมีความรวดเร็ว โครงสร้างมีความสวยงามโดยใช้ท่อเหล็กเป็นแบบหล่อถาวร (Mursi and Uy, 2003; Eid and Dancygier, 2006; Zhang and Liu, 2007; Thumrongvut *et al.*, 2016, Thumrongvut *et al.*, 2021) และท่อเหล็กดังกล่าวยังทำงานร่วมกับแกนคอนกรีตหรือแกนคอนกรีตเสริม

เหล็กในการรับแรงกระทำโดยอาศัย composite action ส่งผลให้เสามีกำลังรับแรงอัดและความเหนียวสูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (Seangatith and Thumrongvut, 2009; Ding *et al.*, 2016) นอกจากนี้ composite action ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานก่อนที่จะเกิดการวิบัติ (Boyd *et al.*, 1995; Nakanishi *et al.*, 1999; Ji *et al.*, 2013) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เสาท่อนเหล็กกรอกคอนกรีตสามารถป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมอย่างมีประสิทธิภาพเหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงต่อภัยพิบัติเนื่องจากแผ่นดินไหว (Elremaily and Azizinamini, 2002; Han *et al.*, 2003)

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบัน เสาท่อนเหล็กกรอกคอนกรีตมักถูกผลิตจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยผลกระทบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จำนวนมาก (Fernandez-Jimenez *et al.*, 2006) และก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) โดยปริมาณของการปล่อย CO_2 จำนวน 1 ตันต่อการผลิตปูนซีเมนต์ในแต่ละตัน ซึ่งมากกว่าร้อยละ 5 ของการอุตสาหกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก (Ferreira *et al.*, 2014) ดังนั้น การเปลี่ยนมาใช้วัสดุเชื่อมประสานทางเลือกใหม่ เพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ น่าจะเป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถลดปัญหาการปล่อย CO_2 และสภาวะเรือนกระจก (Bilodeau and Malhotra, 2000) ซึ่งหนึ่งในวัสดุทางเลือกที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาทดแทนคือ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกหรือไฮบริดซีเมนต์ ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกประเภทใช้งานทั่วไป (GU) มีคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2594-2556 (Thai Industrial Standard, 2013)

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีองค์ประกอบจากปูนเม็ด (clinker) เถ้าลอย (fly ash) และหินปูน (limestone)

เป็นส่วนประกอบเพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยมีจุดเด่นคือใช้พลังงานในกระบวนการผลิตและปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Mazumdar and Pheeraphan, 2021) รวมถึงใช้วัตถุดิบและกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (eco product) ที่ผ่านงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในชิ้นส่วนโครงสร้างยังไม่มีมากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการตอบสนองทางโครงสร้างของเสาท่อนเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นวัสดุเชื่อมประสาน สุดท้ายผลลัพธ์ที่ได้จะช่วยส่งเสริมให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการรับแรงอัดและการประเมินกำลังของเสาท่อนเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นวัสดุเชื่อมประสานทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตลอดจนส่งเสริมชิ้นส่วนโครงสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ยกกระดับคุณภาพชีวิตให้กับผู้ใช้งาน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การออกแบบปฏิภาคส่วนผสม

การออกแบบปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (คู่เทียบ) เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ถูกออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete โดยมีกำลังรับแรงอัดประลัย (ultimate compressive strength) เท่ากับ 18 MPa (ประมาณ 180 kg/cm^2) จากการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตสามารถสรุปส่วนผสมตามกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตต่อปริมาตร 1 m^3 ได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Type of Cement	f'_c (MPa)	Cement (kg)	Water (kg)	Fine Aggregate (kg)	Coarse Aggregate (kg)	w/c Ratio
Hydraulic Cement	18	304	232	944	744	0.76
Portland Cement	18	304	232	944	744	0.76

2. การทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกหรือไฮบริดซีเมนต์เป็นปูนซีเมนต์ประเภทใช้งานทั่วไป (GU) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยมีกำลังรับแรงอัดประลัยเท่ากับ 18 MPa (ประมาณ 180 kg/cm^2) ซึ่งเป็นกำลังรับแรงอัดประลัยในช่วงใช้งานสำหรับอาคารโดยทั่วไป ท่อเหล็กที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นท่อเหล็กหน้าตัดกลมตามมาตรฐานเหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลวง มอก. 107-2561 (Thai Industrial Standard, 2018) ที่มีความหนาเท่ากับ 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm แกนคอนกรีต (concrete core) ในเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตถูก

แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แกนคอนกรีตส่วนและแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก เหล็กข้ออ้อย DB12 (SD40) และเหล็กกลม RB9 (SR24) ถูกใช้เป็นเหล็กเสริมหลัก (เหล็กยื่น) และเหล็กปลอก ตามลำดับ การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุกระทำตามมาตรฐาน ASTM ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 (ASTM C39, 2018) และการทดสอบกำลังรับแรงดึงของท่อเหล็กและเหล็กเสริมเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E8 (ASTM E8, 2016) โดยคุณสมบัติทางกลเฉลี่ยของคอนกรีต ท่อเหล็กและเหล็กเสริม แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างทดสอบและคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

Specimen	t (mm)	Concrete		Steel Tube		Steel Bar		Number
		A_c (mm ²)	f'_c (MPa)	A_{st} (mm ²)	f_{yst} (MPa)	A_{sr} (mm ²)	f_{ysr} (MPa)	
HCFT-18-3.0-N	3.0	19,607	20.2	1,529	370.2	-	-	2
HCFT-18-4.5-N	4.5	19,483	20.2	2,272	347.5	-	-	2
HCFT-18-6.0-N	6.0	18,942	20.2	3,001	366.7	-	-	2
HCFT-18-3.0-R	3.0	19,607	20.2	1,529	370.2	452.4	561.7	2
HCFT-18-4.5-R	4.5	19,483	20.2	2,272	347.5	452.4	561.7	2
HCFT-18-6.0-R	6.0	18,942	20.2	3,001	366.7	452.4	561.7	2
PCFT-18-3.0-N	3.0	19,607	20.5	1,529	370.2	-	-	2
PCFT-18-4.5-N	4.5	19,483	20.5	2,272	347.5	-	-	2
PCFT-18-6.0-N	6.0	18,942	20.5	3,001	366.7	-	-	2
PCFT-18-3.0-R	3.0	19,607	20.5	1,529	370.2	452.4	561.7	2
PCFT-18-4.5-R	4.5	19,483	20.5	2,272	347.5	452.4	561.7	2
PCFT-18-6.0-R	6.0	18,942	20.5	3,001	366.7	452.4	561.7	2

3. ตัวอย่างทดสอบ

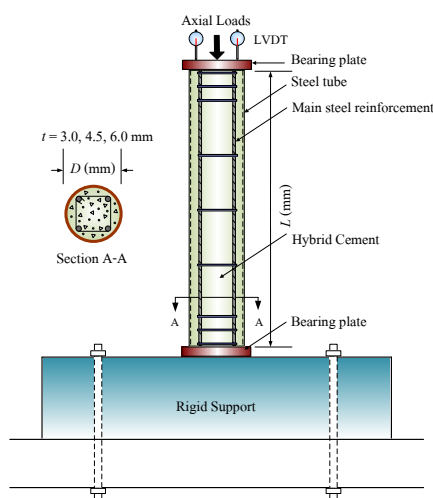
ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดเป็นเสาสั้นหน้าตัดกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 150 mm ความสูง 750 mm อัตราส่วนของความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) เท่ากับ 5.0 โดยตัวอย่างเสาถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม แยกตามประเภทของวัสดุเชื่อมประสาน โดยกลุ่มที่ 1 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นวัสดุเชื่อมประสาน และกลุ่มที่ 2 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมีความหนา (t) ของท่อเหล็ก 3 ค่า ได้แก่ 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm ตามลำดับ ตัวอย่างทดสอบมีจำนวน 24 ตัวอย่าง โดยชื่อตัวอย่างทดสอบถูกนำเสนอดังตารางที่ 2 ทั้งนี้สัญลักษณ์ของตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดในรูป W-X-Y-Z โดย W หมายถึง ประเภทของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต ได้แก่ HCFT และ PCFT เป็นสัญลักษณ์แทนเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ตามลำดับ X หมายถึง กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต (f'_c) ในหน่วย MPa และ Y แทนความหนาของท่อเหล็กในหน่วย mm

สุดท้าย Z หมายถึง ลักษณะของแกนคอนกรีตของเสาท่อเหล็ก ซึ่งมี 2 รูปแบบ ได้แก่ N

และ R เป็นสัญลักษณ์แทน แกนคอนกรีตล้วน และ แกนคอนกรีตเสริมเหล็ก ตามลำดับ

4. การทดสอบเสาตัวอย่าง

การทดสอบเริ่มต้นจากการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machines (UTM) ขนาด 2,000 kN ดังแสดงในภาพที่ 1 ปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างเสารองรับโดยแผ่นเหล็กหนาเท่ากับ 50 mm จากนั้นติดตั้ง Linear Variable Differential Transducer (LVDT) จำนวน 2 ตัว ที่ปลายด้านบนบริเวณหัวกดของเครื่องทดสอบเพื่อวัดระยะการหดตัวเฉลี่ยของเสา ลักษณะการให้แรงอัดกระทำต่อเสาเป็นแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (entire section) ของตัวอย่างทดสอบ จากนั้น เริ่มทำการ pre-loading ประมาณ 25% ของกำลังรับแรงอัดประลัยคอนกรีต เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหัวกดและหน้าสัมผัสของตัวอย่างเสา จากนั้น ทำการทดสอบโดยเพิ่มแรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยอัตรา 1 mm/min และใช้ KYOWA EDX-10 Series Data Acquisition Unit เก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่ง ตัวอย่างเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์หรือหยุดการทดสอบที่ค่าการหดตัว 50 mm



ภาพที่ 1 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเสา

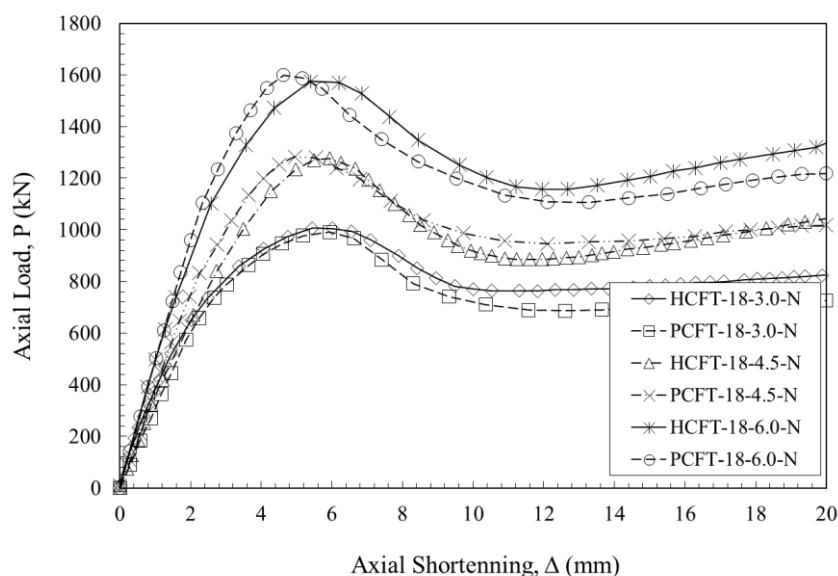
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. พฤติกรรมการรับแรงอัดในแนวแกน

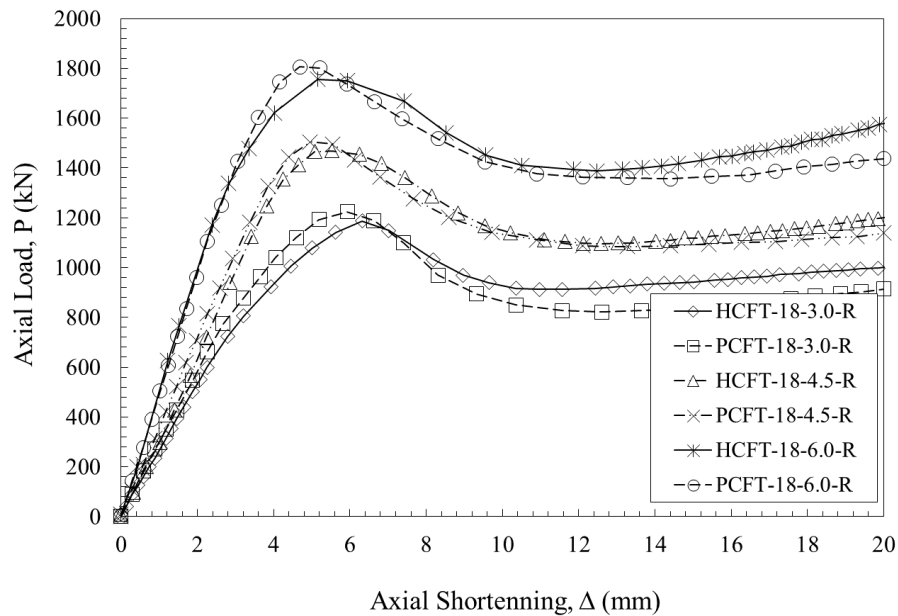
ภาพที่ 2 และภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดในแนวแกน (axial load) และการหดตัวในแนวแกน (axial shortening) ของตัวอย่างเสา HCFT และเสา PCFT โดยจำกัดการแสดงผลที่ค่าการหดตัวเท่ากับ 20 mm หรือที่ Axial strain ในคอนกรีตเท่ากับ 0.0267 mm/mm (2.67%) ซึ่งเป็นค่าความเครียดที่สูงกว่าความเครียดอัดประลัย (ultimate compressive strain) ของคอนกรีตประมาณ 10 เท่า และนิยามให้ค่าแรงอัดสูงสุด (maximum load) ที่ได้จากการทดสอบ (P_{test}) เป็นแรงที่เกิดขึ้นในเสาโดยปราศจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) ของผนังท่อเหล็ก

จากพฤติกรรมการรับแรงอัดของตัวอย่างเสา HCFT และเสา PCFT ที่ให้แรงกระทำต่อหน้าตัดทั้งหมด (กระทำผ่านแกนคอนกรีตและท่อเหล็ก) ในภาพที่ 2 และภาพที่ 3 พบว่า พฤติกรรมรับแรงของตัวอย่างเสา HCFT และเสา PCFT ทั้งหมดมีความใกล้เคียงกัน โดยช่วงแรกพฤติกรรมของเสามีลักษณะเชิงเส้นตรง

(linear) จนกระทั่งถึงจุดที่เสารับแรงอัดประมาณ 80-90% ของแรงอัดสูงสุด และเห็นได้ว่าความชันเส้นกราฟของเสามีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความหนาของท่อเหล็ก จากนั้น พฤติกรรมของตัวอย่างเสาเข้าสู่ช่วงที่สอง เมื่อเสารับแรงอัดเพิ่มขึ้นคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวขนาดเล็ก (micro-cracking) ในเนื้อคอนกรีตอย่างต่อเนื่องเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเกิดการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้น เนื่องจากผลของ Poisson's Effect หลังจากนั้น ความชันของเส้นกราฟเริ่มมีค่าลดลง เนื่องจากการอัดแตก (crushing) ของแกนคอนกรีตและการโก่งเดาะของผนังท่อเหล็ก (Ding *et al.*, 2016) และพฤติกรรมของตัวอย่างเสา HCFT และเสา PCFT จะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นตรง (nonlinear) มากขึ้น จนถึงจุดวิบัติของเสา พฤติกรรมในช่วงแบบไร้เชิงเส้นตรงของตัวอย่างเสา HCFT และเสา PCFT มีลักษณะแบบ Strain-Softening โดยที่เสาจะสามารถรับแรงอัดได้สูงสุดค่าหนึ่ง หลังจากนั้นเสาจะมีความแข็งแรงลดลง (degrading stiffness) (Thumrongvut *et al.*, 2016)



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวของตัวอย่างเสา HCFT และเสา PCFT (แกนคอนกรีตล้วน)



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวภายใต้แรงอัดในแนวแกนของเสา HCFT และเสา PCFT (แกนคอนกรีตเสริมเหล็ก)

2. ลักษณะการวิบัติ

ภาพที่ 4 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสาที่ได้จากการทดสอบ โดยภาพที่ 4(a) ถึงภาพที่ 4(c) แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา HCFT ที่มีความหนา 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm ตามลำดับ และภาพที่ 4(d) ถึงภาพที่ 4(f) แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา PCFT ที่มีความหนา 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm ตามลำดับ จากการสังเกตลักษณะการวิบัติพบว่า ตัวอย่างเสาทั้ง 2 ประเภทมีลักษณะการวิบัติที่คล้ายคลึงกัน โดยทุกตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) และมีค่าการหดตัวในแนวแกนที่จุดวิบัติเกินกว่า 50 mm หรือที่ค่าความเครียดเฉลี่ยมากกว่า 0.0667 mm/mm (6.67%) แสดงให้เห็นว่าเสา HCFT และเสา PCFT เป็นเสาที่มีความเหนียวในแนวแกนสูง (Seangatith

and Thumrongvut, 2009) นอกจากนี้ รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างเสาเป็นการโก่งเดาะเฉพาะที่ (โป่งออก) ของผนังท่อเหล็กที่กึ่งกลางเสาหรือบริเวณใกล้เคียง โดยสามารถเห็นการโก่งเดาะเฉพาะที่ของท่อเหล็กได้ชัดเจนหลังจากจุดที่แรงอัดมีค่าสูงสุด (Ding *et al.*, 2016; Thumrongvut and Tiwjantuk, 2018) นอกจากนี้ ความหนาของท่อเหล็กเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อแรงอัดสูงสุดและการเสียรูปของท่อเหล็กภายใต้แรงอัดโดยตรง ท่อเหล็กที่มีความหนาบาง (3.0 mm) จะมีความแข็งแรง (stiffness) ของผนังท่อเหล็กต่ำกว่าท่อเหล็กที่มีความหนาสูง (6.0 mm) ดังนั้นจึงส่งผลให้ท่อเหล็กที่มีความหนาบางกว่ามีอัตราการเสียรูปของท่อเหล็กมากกว่าท่อเหล็กที่มีความหนาสูง (Khamphay *et al.*, 2021)



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

ภาพที่ 4 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา HCFT และเสา PCFT

(a), (b) และ (c) เป็นเสา HCFT ที่มีความหนา 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm และ

(d), (e) และ (f) เป็นเสา PCFT ที่มีความหนา 3.0 mm 4.5 mm และ 6.0 mm ตามลำดับ

3. การเปรียบเทียบกำลังของเสา HCFT และเสา PCFT กับสมการของ AISC-LRFD

ในการออกแบบเสาเชิงประกอบของ American Institute of Steel and Construction (AISC) (2010) โดยวิธี Load and Resistant Factor Design

(LRFD) ถือเป็นข้อกำหนดที่นิยมสำหรับใช้ในการออกแบบเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต โดยสมการแรงอัดในแนวแกนระบุของหน้าตัด (P_{no}) อยู่ในรูปของสมการที่ (1)

$$P_{no} = A_{st}F_{yst} + C_2 f'_c \left(A_c + A_{sr} \frac{E_{sr}}{E_c} \right) \quad (1)$$

โดยที่ A_{st} คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็ก F_{yst} คือ หน่วยแรงคราก (yielding stress) ของท่อ

เหล็ก C_2 คือ ค่าคงที่สำหรับท่อเหล็กหน้าตัดกลม เท่ากับ 0.95 f'_c คือ กำลังรับแรงอัดประลัยของ

คอนกรีต A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต A_{sr} คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม E_{sr} คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม และ E_c คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต และความแข็งแรงประสิทธิภาพ

(effective stiffness) ของหน้าตัดเสาต่อเหล็กเชิงประกอบ (EI_{eff}) อยู่ในรูปของสมการที่ (2)

$$EI_{eff} = E_{st}I_{st} + E_{sr}I_{sr} + C_3E_cI_c \quad (2)$$

เมื่อ C_3 คือสัมประสิทธิ์สำหรับคำนวณความแข็งแรงประสิทธิภาพของหน้าตัด สามารถคำนวณจากสมการที่ (3)

$$C_3 = 0.6 + 2 \left(\frac{A_{st}}{A_c + A_{st}} \right) \leq 0.9 \quad (3)$$

โดยที่ E_{st} คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของท่อเหล็ก I_{st} คือโมเมนต์อินเนอร์เซียของท่อเหล็ก I_{sr} คือโมเมนต์อินเนอร์เซียของเหล็กเสริม และ I_c คือโมเมนต์อินเนอร์เซียของคอนกรีต

สุดท้าย AISC-LRFD ได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณแรงอัดในแนวแกนระบุ (nominal compressive strength, $P_{n,LRFD}$) ของเสาเชิงประกอบอยู่ในรูปของสมการที่ (4)

$$P_{n,LRFD} = P_{no} \times 0.658^{P_{no}/P_e} \quad (4)$$

โดยที่ $P_e = \pi^2 EI_{eff} / (KL)^2$ เมื่อ K คือค่าสัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิภาพของเสา และ L คือความยาวของเสา

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างเสา HCFT และเสา PCFT ที่ทดสอบได้ (P_{test}) และแรงอัดในแนวแกนระบุจากสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC-LRFD ($P_{n,LRFD}$) จากตารางที่ 3 พบว่า ตัวอย่างเสา HCFT มีอัตราส่วนของแรงอัดสูงสุดที่ทดสอบได้และแรงอัดในแนวแกนระบุจากสมการออกแบบของ AISC-LRFD ($P_{test} / P_{n,LRFD}$) อยู่ในช่วงระหว่าง 1.07-1.19 โดยอัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1.00 ซึ่งผลของแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าสมการออกแบบของ AISC-LRFD ประมาณ 7-19% สอดคล้องกับผลการทดสอบเสา PCFT

ที่มีอัตราส่วน $P_{test} / P_{n,LRFD}$ อยู่ในช่วงระหว่าง 1.08-1.25 จากการเปรียบเทียบภายใต้ขอบเขตของการศึกษานี้ แสดงให้เห็นว่า สมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC-LRFD สามารถประเมินแรงอัดสูงสุดของเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้อย่างถูกต้อง โดยให้สัดส่วนความปลอดภัยเฉลี่ยเท่ากับ 11.8% และ 15.7% สำหรับเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามลำดับ สุดท้าย จากประสิทธิภาพการรับแรงอัดในแนวแกนของเสาต่อเหล็กกรอกคอนกรีต การนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานสำหรับคอนกรีตจะเป็นทางเลือกในการก่อสร้างอาคารและโครงสร้างพื้นฐานแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นอย่างดี

ตารางที่ 3 แรงอัดสูงสุดของเสา HCFT และเสา PCFT จากการทดสอบและสมการออกแบบ ASIC-LRFD

Specimen	Type of Cement	t (mm)	Concrete Core	P_{test} (kN)	$P_{n,LRFD}$ (kN)	$P_{test} / P_{n,LRFD}$
HCFT-18-3.0-N	Hydraulic	3.0	Concrete	988.1	925.2	1.07
HCFT-18-4.5-N	Hydraulic	4.5	Concrete	1,248.4	1,146.2	1.09
HCFT-18-6.0-N	Hydraulic	6.0	Concrete	1,549.8	1,443.6	1.07
HCFT-18-3.0-R	Hydraulic	3.0	Tied Column	1,155.8	1,004.7	1.15
HCFT-18-4.5-R	Hydraulic	4.5	Tied Column	1,460.9	1,225.9	1.19
HCFT-18-6.0-R	Hydraulic	6.0	Tied Column	1,740.4	1,523.5	1.14
PCFT-18-3.0-N	Portland	3.0	Concrete	1,001.9	925.2	1.08
PCFT-18-4.5-N	Portland	4.5	Concrete	1,250.6	1,146.2	1.09
PCFT-18-6.0-N	Portland	6.0	Concrete	1,590.4	1,443.6	1.10
PCFT-18-3.0-R	Portland	3.0	Tied Column	1,246.3	1,004.7	1.24
PCFT-18-4.5-R	Portland	4.5	Tied Column	1,526.4	1,225.9	1.25
PCFT-18-6.0-R	Portland	6.0	Tied Column	1,795.4	1,523.5	1.18

สรุป

จากการศึกษาเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีลักษณะเป็นเสาสั้นครั้งนี้ พบข้อสรุปที่สำคัญดังต่อไปนี้

1) พฤติกรรมทางโครงสร้างของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะการรับแรงแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดที่เสารับแรงอัดประมาณ 80-90% ของแรงอัดสูงสุด และมีพฤติกรรมในช่วงที่สองแบบไร้เชิงเส้นแบบ Strain-softening โดยที่เสาสามารถรับแรงอัดได้สูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้น เสาจะมีกำลังและความแกร่งลดลง

2) การวิบัติของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยเสาเกิดการวิบัติจริงที่ค่าการหดตัวในแนวแกนมากกว่า 50 mm ส่งผลให้เสามีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างใน

แนวแกนที่สูง การวิบัติเกิดขึ้นโดยการโป่งออกในรูปแบบการโก่งเคาะเฉพาะที่ของผนังท่อเหล็ก โดยท่อเหล็กและการเสริมเหล็กในแนวแกนสามารถช่วยเสริมกำลังและความเหนียวให้แก่เสาได้ค่อนข้างสูง

3) การเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างเสาที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC-LRFD พบว่า สมการออกแบบของ AISC-LRFD สามารถประเมินแรงอัดสูงสุดของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้อย่างเหมาะสมในการใช้งาน โดยให้สัดส่วนความปลอดภัยเฉลี่ยเท่ากับ 11.8% และ 15.7% ตามลำดับ

4) ผลที่ได้จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานของคอนกรีตในการก่อสร้างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตทดแทนการใช้น้ำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยงานวิจัยนี้จะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นในการนำปูนซีเมนต์ไฮ

ครอลิกหรือไฮบริดซีเมนต์มาประยุกต์ใช้ในงาน
โครงสร้างต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและ
นวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ
บริษัท โอเคเค เอ็นจิเนียริง แอนด์ คอนสตรัคชั่น จำกัด
โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม
(พวอ.) ระดับปริญญาโท: NRCT5-RR163008-M16
และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
อีสานที่ให้การสนับสนุนสถานที่และเครื่องมือทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- American Institute of Steel and Construction (AISC).
2010. ANSI/AISC 360-10 Specification for
Structural Steel Buildings. AISC, Chicago,
Illinois.
- ASTM C39. 2018. ASTM C39 Standard Test Method
for Compressive Strength of Cylindrical
Concrete Specimens. Annual Book of ASTM
Standard, American Society for Testing and
Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM E8. 2016. Standard Test Methods for Tension
Testing of Metallic Materials. Annual Book
of ASTM Standard, American Society for
Testing and Materials, West Conshohocken,
PA, USA.
- Bilodeau, A. and Malhotra, V.M. 2000. High-volume
fly ash system: concrete solution for sustainable
development. **ACI Materials Journal** 97:
41-48.
- Boyd, F.P., Cofer, W.F. and McLean, D.I. 1995. Seismic
performance of steel-encased concrete columns
under flexural loading. **ACI Structural Journal**
92(3): 355-364.
- Ding, F., Li, Z., Cheng, S. and Yu, Z. 2016. Composite
action of octagonal concrete-filled steel tubular
stub columns under axial loading. **Thin-Walled
Structures** 107: 453-461.
- Eid, R. and Dancygier, A.N. 2006. Confinement
effectiveness in circular concrete columns.
Engineering Structures 28(13): 1885-1896.
- Elremaily, A. and Azizinamini, A. 2002. Behavior
and strength of circular concrete-filled tube
columns. **Journal of Constructional Steel
Research** 58: 1567-1591.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. and Lopez Hombrados,
C. 2006. Some engineering properties of
alkali activated fly ash concrete. **ACI Materials
Journal** 103(2): 106-112.
- Ferreira, L.F., Costa, H.S., Barata, I.I., Santos Julio, E.N.,
Tiago, P.M. and Coelho, J.F. 2014. Precast
alkali-activated concrete towards sustainable
construction. **Magazine of Concrete Research**
66(12): 618-626.
- Giakoumelis, G. and Lam, D. 2004. Axial capacity of
circular concrete-filled tube columns. **Journal
of Constructional Steel Research** 60(7):
1049-1068.
- Han, L.H. and Yao, G.H. 2003. Influence of concrete
compaction on the strength of concrete-filled
steel RHS columns. **Journal of Constructional
Steel Research** 59(6): 751-767.
- Han, L.H., Yang, Y.F. and Tao, Z. 2003. Concrete-
filled thin walled steel RHS beam-columns
subjected to cyclic loading. **Thin-walled
Structures** 41(9): 801-833.

- Huang, C.S., Yeh, Y.K., Liu, G.Y., Hu, H.T., Tsai, K.C., Weng, Y.T., Wang, S.H. and Wu, M.H. 2002. Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns. **Journal Structural Engineering** 128(9): 1222-1230.
- Ji, X., Kang, H., Chen, X. and Qian, J. 2013. Seismic behavior and strength capacity of steel tube -reinforced concrete composite columns. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics** 43(4): 487-505.
- Joysoongnoen, N., Thumrongvut, J., Sawang-ngam, T., Detphan, S. and Supromwan, J. 2021. Experimental behavior of high-strength square concrete-filled steel tube columns under various load application. **Thailand Concrete Association Journal** 9(1): 15-23. (in Thai)
- Khamphay, P., Thumrongvut, J., Joysoongnoen, N., Jiammeepreecha, W. and Chaidachatorn, K. 2021. Strengthening of square concrete -filled steel tube column with steel bars under uni-axial load. **Thailand Concrete Association Journal** 9(1): 7-14. (in Thai)
- Mazumdar, A.R. and Pheeraphan, T. 2021. Comparative study of properties of concrete made of hydraulic cement (TIS 2594) and ordinary Portland cement (TIS 15). **Thailand Concrete Association Journal** 9(1): 1-6. (in Thai)
- Mursi, M. and Uy, B. 2003. Strength of concrete filled steel box columns incorporating interaction buckling. **Journal of Structural Engineering** 129(5): 626-639.
- Nakanishi, K., Kitada, T. and Nakai, H. 1999. Experimental study on ultimate strength and ductility of concrete filled steel columns under strong earthquake. **Journal of Constructional Steel Research** 51(3): 297-319.
- Seangatith, S. and Thumrongvut, J. 2009. Experimental investigation on square steel tubed RC columns under axial compression. **Suranaree Journal of Science and Technology** 16(3): 205-220.
- Thai Industrial Standard. 2013. Hydraulic cement (TIS 2594-2556). Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thai Industrial Standard. 2018. Carbon Steel Tubes for General Structure (TIS 107-2561). Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- Thumrongvut, J. and Tiwjantuk, P. 2018. Strength and axial behavior of cellular lightweight concrete -filled steel rectangular tube columns under axial compression. **Materials Science Forum** 941: 2417-2422.
- Thumrongvut, J., Seangatith, S., Phetchuay, C. and Suksiripattanapong, C. 2022. Comparative experimental study of sustainable reinforced Portland cement concrete and geopolymers concrete beams using rice husk ash. **Sustainability** 14(16): 9856.
- Thumrongvut, J., Seangatith, S., Siriparinyanan, T. and Wangrakklang, S. 2016. An experimental behaviour of cellular lightweight concrete-filled steel square tube columns under axial compression. **Materials Science Forum** 860: 121-124.
- Thumrongvut, J., Tipcharoen, A. and Prathumwong, K. 2021. Post-fire performance of square concrete -filled steel tube columns under uni-axial

- load. **Materials Science Forum** 1016: 618-623.
- Uy, B. 2001. Strength of short concrete filled high strength steel box columns. **Journal of Constructional Steel Research** 57(2): 113-134.
- Yang, Z., Ma, Z. and Wu, S. 2016. Optimized flowshop scheduling of multiple production lines for precast production. **Automation in Construction** 72: 321-329.
- Zhang, S. and Liu, J. 2007. Seismic behavior and strength of square tube confined reinforced-concrete (STRC) columns. **Journal of Constructional Steel Research** 63(9): 1194-1207.

ผลของสารสกัดหยาบจากสาหร่ายขนาดเล็กต่อการยับยั้ง เชื้อราก่อโรคผลเน่าในเงาะ

Effect of Microalgae Crude Extracts on Antifungal in Fruit Rot Disease of Rambutan

กิตติวรรณ พรหมมิตร จิดาภา หยั่งกุล มิตี เจียรพันธุ์ วิณา จิรัฐวรุตม์กุล ชัยसार จิรนนท์ กล่อมมนรา แก้วรักษา
และ พัชรีย์ หลุ่งหม่าน*

Kittiwan Prommit, Jidapa Yongkul, Miti Jearaphunt, Weena Jirattiwatukul Chaisarn, Cheeranun Klommara
Kaewruksa and Patcharee Lungmann*

Received: 4 May 2021, Revised: 18 February 2022, Accepted: 28 March 2022

บทคัดย่อ

เงาะเป็นผลไม้เมืองร้อนของประเทศไทยที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจในตลาดผลไม้ แต่ประสบปัญหาโรคผลเน่า ซึ่งมีสาเหตุจากการเข้าทำลายของเชื้อราก่อโรคหลายชนิด เช่น *Aspergillus* sp., *Colletotrichum* sp., *Phomopsis* sp. และ *Pestalotiopsis* sp. ทำให้คุณภาพและอายุการเก็บรักษาผลเงาะลดลง เกษตรกรจึงเลือกใช้สารเคมี ได้แก่ คอปเปอร์ออกซิคลอไรด์และกำมะถันในการควบคุมโรค แต่การใช้สารเคมีส่งผลกระทบต่อสุขภาพ สิ่งแวดล้อม และค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการคัดแยกสาหร่ายขนาดเล็กจากตัวอย่างดิน บริเวณป่าต้นน้ำบ้านน้ำราด อำเภอกีรีรัฐนิคม จังหวัดสุราษฎร์ธานี ศึกษาสารสกัดหยาบเพื่อยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรคผลเน่าของเงาะ ผลการแยกสาหร่ายขนาดเล็กได้ทั้งหมด 8 ชนิด ได้แก่ *Haematococcus* sp., *Fischerella* sp., *Oscillatoria* sp., *Hapalosiphon* sp., *Calothrix* sp., *Anabaena* sp., *Aphanocapsa* sp. และ *Scytonema* sp. เชื้อราสาเหตุโรคผลเน่าของเงาะ 4 ไอโซเลต ได้แก่ *Penicillium* sp., *Corticium* sp., *Pestalotiopsis* sp. และ *Lasiodiplodia* sp. ตามลำดับ สาหร่ายขนาดเล็กสกัดด้วย เมทานอลได้สารสกัดหยาบร้อยละ 4.45-5.37 และสกัดด้วยเอทิลอะซิเตต ได้สารสกัดหยาบร้อยละ 4.48-5.39 ผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อราด้วยวิธี Paper Disc Diffusion ที่เพาะเลี้ยงในอาหารสูตร BG-11 เป็นเวลา 12 วัน พบว่าสารสกัดหยาบสาหร่ายขนาดเล็ก 3 สกุล ได้แก่ *Oscillatoria* sp., *Fischerella* sp. และ *Anabaena* sp. มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรคผลเน่าของเงาะ สาหร่าย *Oscillatoria* sp. ที่สกัดด้วยเมทานอลมีฤทธิ์ดีที่สุดในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราสาเหตุโรคผลเน่าของเงาะที่เกิดจากเชื้อ *Lasiodiplodia* spp. รองลงมาคือ

สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี ถนนสุราษฎร์-นาสาร อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84100

Biology Department, Faculty of Science and Technology, Surat Thani Rajabhat University, Surat-Nasan Road, Muang, Surat Thani 84100, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): plungmann@yahoo.com Tel: 0896512097

Oscillatoria sp. ที่สกัดด้วยเอทิลอะซิเตท วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนการยับยั้งได้เท่ากับ 15.25 และ 14.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในขณะที่สำหรับ *Anabaena* sp. ที่สกัดด้วยเอทิลอะซิเตท มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อรา *Corticium* sp. ส่วนสำหรับ *Fischerella* sp. ที่สกัดด้วยเมทานอล ยับยั้งการเจริญของเชื้อรา *Lasiodiplodia* spp. วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนการยับยั้งได้เท่ากับ 11.05 มิลลิเมตร

คำสำคัญ: สาหร่ายขนาดเล็ก, สารสกัดหยาบ, การยับยั้งสาเหตุโรคผลเน่าของเงาะ

ABSTRACT

Rambutan (*Nephelium lappaceum* Linn.) is a tropical fruit in Thailand that has economic value in the market, however the fruit rot disease caused by various fungal pathogens such as *Aspergillus* sp., *Colletotrichum* sp., *Phomopsis* sp., and *Pestalotiopsis* sp. affects both quality and shelf life. Many farmers used chemicals such as copper oxychloride and sulfur to control the disease, but the use of chemicals affects health and environment as well as increases costs. This research aimed to screen the microalgae in the soil collected from Nam Rad Forest Headwaters, Khiri Rat Nikhom District, Surat Thani, and to test the antifungal activity from the crude extracts against fruit rot disease. The screening results showed 8 species of microalgae, including *Haematococcus* sp., *Fischerella* sp., *Oscillatoria* sp., *Hapalosiphon* sp., *Calothrix* sp., *Anabaena* sp., *Aphanocapsa* sp. and *Scytonema* sp. and 4 isolates of fungi cause the fruit rot disease in rambutan, including *Penicillium* sp., *Corticium* sp., *Pestalotiopsis* sp., and *Lasiodiplodia* sp. Microalgae extracted by methanol yielded 4.45 - 5.37 percent, while the ethyl acetate-extracted yielded 4.48 - 5.39 percent. The evaluation of antifungal activity using disc diffusion technique revealed that the extraction from 3 genera of microalgae cultured in BG-11 medium for 12 days, including *Oscillatoria* sp., *Fischerella* sp., and *Anabaena* sp., could inhibit the rambutan fruit rot disease fungi. *Oscillatoria* sp. extracted with methanol had the most effective inhibition activity against the rambutan fruit rot disease caused by *Lasiodiplodia* spp. followed by *Oscillatoria* sp. extracted with ethyl acetate, with a mean inhibition zone of 15.25 and 14.5 mm, respectively. *Anabaena* sp. extracted with ethyl acetate inhibited the growth of *Corticium* sp., while *Fischerella* sp. extracted with methanol inhibited the growth of *Lasiodiplodia* spp. with a mean inhibition zone of 11.05 mm.

Key words: microalgae, crude extract, inhibition of rambutan fruit rot disease causes

บทนำ

ปัจจุบันการควบคุมโรคพืชเกษตรกรรมใช้สารเคมีเนื่องจากควบคุมโรคได้อย่างรวดเร็ว สารเคมีที่เกษตรกรนิยมใช้ได้แก่ คอปเปอร์ออกซีคลอไรด์

(copper oxychloride) กำมะถัน (sulfur) คาร์เบนดาซิม (carbendazim) ไอโพรไดโอน (iprodione) เบนซิ มิคาโซล (benzimidazole) และ อิมาซาลิล (imazalil) เป็นต้น ปัญหาการใช้สารเคมีส่งผลเสียต่อสุขภาพ

ผู้ใช้และผู้บริโภค ก่อให้เกิดสารพิษตกค้างในดินส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และทำให้ค่าใช้จ่ายของเกษตรกรเพิ่มขึ้น (Nicolopoulou-Stamati *et al.*, 2016) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการควบคุมโรคพืชที่ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถกระทำได้หลายวิธี ได้แก่ การนำเทคโนโลยีชีวภาพด้านจุลินทรีย์ (Belete and Boyraz, 2019) หรือการใช้สารสกัดธรรมชาติจากสมุนไพร เป็นต้น การใช้สารสกัดจากจุลินทรีย์ โดยเฉพาะสาหร่ายขนาดเล็กได้แก่ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สาหร่ายสีเขียว และไดอะตอม มีความปลอดภัยด้านอาหารและสุขภาพ ลดปัญหาการผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเพื่อยับยั้งแบคทีเรีย รา และไวรัส (Tiwari and Kaur, 2014; De Morais *et al.*, 2015) โดยผลิตสารในกลุ่ม พอลิไทด์ (polyketide) เอมีน (amine) อัลคาลอยด์ (alkaloid) กรดไขมัน (fatty acids) อินโดล (indole) และ ลิโปเปปไทด์ (lipopeptides) (De Morais *et al.*, 2015; Goncalves, 2021; Nandagopal *et al.*, 2021) มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อราก่อโรคพืช (Righini *et al.*, 2022) เช่น *Botrytis cinerea* ก่อโรคในสตอเบอรี่ *Erysiphe polygoni* สาเหตุโรคราแป้ง (powdery mildew) และเชื้อก่อโรคในมะเขือเทศ จากงานวิจัยพบว่า fischerellin เป็นสารสกัดจากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Fischerella muscicola* ยับยั้งเชื้อรา *Uromyces appendiculatus* สาเหตุโรคราสนิม *Erysiphe graminis* สาเหตุโรคราแป้ง ส่วนสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Nostoc muscorum* ยับยั้งเชื้อรา *Sclerotinia sclerotiorum* สาเหตุโรคราสีขาว *Fusarium oxysporum* สาเหตุโรคเหี่ยวในผัก (Singh *et al.*, 2016) สำหรับ *Scytonema* sp. สร้างสาร scytopycin มีฤทธิ์ต้านเชื้อรา (Shishido *et al.*, 2015) *Calothrix* sp. TISTR 8906 ยับยั้งเชื้อรา *Macrophomina phaseolina* สาเหตุโรคในข้าวฟ่าง ข้าวโพด และถั่วเขียว เป็นต้น โรคผลเน่าของเงาะเกิดจากเชื้อราหลายชนิดเข้าทำลาย

ได้แก่ *Lasiodiplodia theobromae*, *Gliocephalotrichum* spp., *Colletotrichum gloeosporioides*, *Pestalotiopsis* sp. และ *Phomopsis* sp. เป็นปัญหาสำคัญสร้างความเสียหายต่อปริมาณและคุณภาพเงาะทำให้ อายุการเก็บรักษาลดลง (Chirawut, 2014) การควบคุมโรคผลเน่าของเงาะมีหลายวิธีที่มีความปลอดภัย เช่น จุลินทรีย์ปฏิปักษ์ ชีวภัณฑ์จากพืช สารปลอดภัย และ ไคโตซาน เป็นต้น การใช้สารสกัดจากสาหร่ายขนาดเล็กเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นำมาทดสอบการยับยั้งเชื้อราก่อโรคผลเน่าในเงาะในระดับห้องปฏิบัติการ ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกสาหร่ายขนาดเล็กและทดสอบฤทธิ์การยับยั้งเชื้อราก่อโรคในเงาะ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ควบคุมโรคผลเน่าในเงาะ เพื่อเป็นแนวทางการลดการใช้สารเคมีเพื่อเป็นอีกทางเลือกให้แก่เกษตรกรต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การคัดเลือกสายพันธุ์สาหร่ายขนาดเล็ก

คัดแยกสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินบนอาหารแข็ง BG-11 โดยวิธี streak plate จากตัวอย่างดินบริเวณป่าต้นน้ำบ้านน้ำราดอำเภอกีร์รฐนิคม จังหวัดสุราษฎร์ธานี ช่วงเดือน พฤศจิกายน นานิวิสุทธิ ไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและจำแนก (Wehr and Sheath, 2003) เก็บรักษาตัวอย่างสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในหลอดทดลอง วางภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์ เพื่อนำไปศึกษาต่อไป

2. การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก

2.1 การเตรียมหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็ก

เลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็ก 8 สกุล ได้แก่ *Haematococcus* sp., *Fischerella* sp., *Oscillatoria* sp., *Hapalosiphon* sp., *Calothrix* sp., *Anabaena* sp., *Aphanocapsa* sp. และ *Scytonema* sp. ในอาหารเหลว BG-11 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร บรรจุในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิ 35 -

37 องศาเซลเซียส) ภายใต้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ 5,000 ลักซ์ บนเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เมื่อเซลล์เข้าสู่ระยะคงที่ (stationary phase) ใช้เวลา 12 วัน นำหัวเชื้อไปเพาะเลี้ยงเพื่อเพิ่มปริมาณต่อไป

2.2 การเพิ่มปริมาณสาหร่ายขนาดเล็ก

นำหัวเชื้อสาหร่ายขนาดเล็กข้อ 2.1 ปรับความเข้มข้นของเซลล์ให้ได้ 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร มาเลี้ยงในอาหารเหลว BG-11 ปริมาตร 300 มิลลิลิตร บรรจุในพลาสติกขนาด 500 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ 5,000 ลักซ์ ให้แสงต่อเนื่องบนเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 วัน จากนั้นเก็บเกี่ยวเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กโดยวิธีการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ล้างเซลล์ด้วยน้ำกลั่นที่ฆ่าเชื้อแล้ว 2 ครั้ง นำเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กที่ได้สกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

3. การสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากสาหร่ายขนาดเล็ก

นำเซลล์สาหร่ายขนาดเล็กข้อ 2.2 มาทำให้เซลล์แตกโดยการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส และบดให้ละเอียด สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลและเอทิลอะซิเตท เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เก็บสารสกัดส่วนใสไประเหยตัวทำละลายออก ภายใต้สูญญากาศด้วยเครื่อง rotary evaporator ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จนได้สารสกัดหยาบจากสาหร่ายขนาดเล็ก ชั่งน้ำหนักสารสกัดหยาบแล้วนำไปคำนวณหาร้อยละของสารสกัดหยาบที่ได้ จากนั้นเก็บรักษาในขวดสีชา ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการทดสอบต่อไป

4. การแยกเชื้อราก่อโรคในผลเงาะ

แยกเชื้อราจากผลเงาะที่เป็นโรคผลเน่า โดยตัดชิ้นส่วนบริเวณที่เป็นโรคเป็นชิ้น ขนาด 0.5×0.5

เซนติเมตร แช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 3 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่นนิ่งมาเชื้อ 2 ครั้ง ซับให้แห้งด้วยกระดาษกรองที่ฆ่าเชื้อ นำชิ้นส่วนเงาะน้ำหนัก 25 กรัม ใส่ในสารละลายน้ำเกลือ 0.85 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 225 มิลลิลิตร นำไปปั่นด้วยเครื่อง stomacher ที่ความเร็ว 200 รอบ เป็นเวลา 2 นาที เจือจางให้ได้ระดับความเข้มข้น 10^{-3} นำมา spread plate บนอาหารพีดีเอ (Potato Dextrose Agar) บ่มที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส 3-4 วัน จนเส้นใยเจริญ เชียบบริเวณปลายเส้นใยมาวางบนอาหารพีดีเอ บ่มที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน แยกเชื้อราให้บริสุทธิ์ด้วยเทคนิค single spore (Choi *et al.*, 1999) นำมาข้อมสี Lactophenol Cotton Blue (LPCB) ศึกษาทางสัณฐานวิทยา ภายใต้กล้องจุลทรรศน์

5. การทดสอบประสิทธิภาพของสารสกัดต่อการยับยั้งเชื้อราก่อโรคผลเงาะ

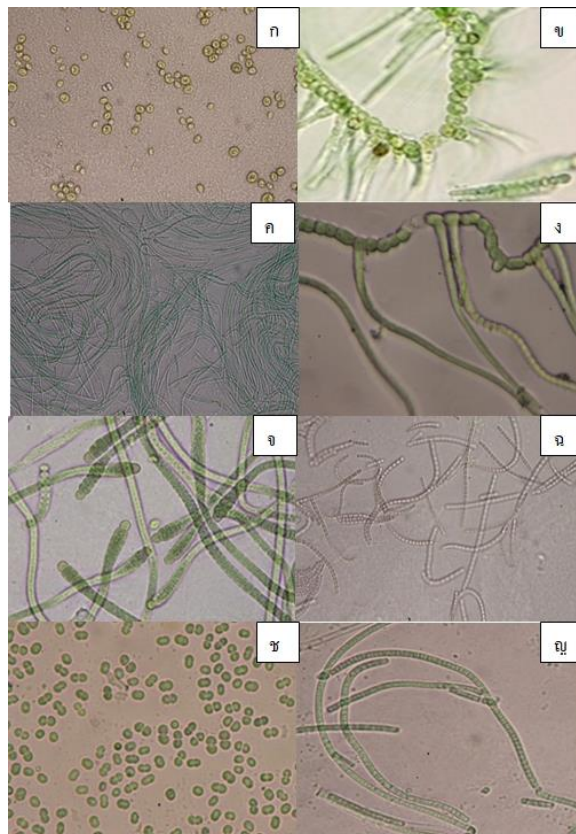
ทดสอบการยับยั้งเชื้อราก่อโรคพืชด้วยวิธี Paper Disc Diffusion นำสารสกัดจากสาหร่ายขนาดเล็กจากข้อ 3 ความเข้มข้น 500 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร หยดบนแผ่นทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ทิ้งให้แห้ง ส่วนตัวควบคุมเชิงลบ (negative control) ใช้ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดสาหร่ายขนาดเล็ก (เมทานอลและเอทิลอะซิเตท) จากนั้นใช้ไม้พันสำลีปราศจากเชื้อ เกลี่ยสปอร์แขวนลอยเชื้อราที่มีความเข้มข้น 1.0×10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร ให้ทั่วจานอาหาร PDA ทิ้งไว้ 10 นาที จนกระทั่งผิวหน้าอาหารแห้ง แล้ววางแผ่นทดสอบลงบนผิวหน้าอาหาร โดยวาง 2 ตำแหน่งต่อหนึ่งจานเพาะเชื้อ ทำการทดสอบ 2 ซ้ำ นำจานเลี้ยงเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน ตรวจผลการทดสอบโดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนการยับยั้ง (inhibition zone) ในหน่วยมิลลิเมตร (Kim and Kim, 2008)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการคัดแยกสาหร่ายขนาดเล็ก

ผลการศึกษาพบสาหร่ายขนาดเล็กจำนวน 8 ชนิด แบ่งเป็นสาหร่าย สีเขียว จำนวน 1 ชนิด ได้แก่ *Haematococcus* sp. และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน จำนวน 7 ชนิด ได้แก่ *Fischerella* sp., *Oscillatoria* sp., *Hapalosiphon* sp., *Calothrix* sp., *Anabaena* sp.,

Aphanocapsa sp. และ *Scytonema* sp. โดยที่ *Anabaena* sp. เป็นชนิดที่พบมากที่สุด (คิดเป็น 35 %) รองลงมา คือ *Oscillatoria* sp. (คิดเป็น 25 %), *Fischerella* sp. (คิดเป็น 18 %), *Hapalosiphon* sp. (คิดเป็น 7 %), *Calothrix* sp., *Aphanocapsa* sp. และ *Scytonema* sp. (คิดเป็นชนิดละ 5 %) ตามลำดับ (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของสาหร่ายขนาดเล็ก ภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 400 เท่า

ก. *Haematococcus* sp. ข. *Fischerella* sp. ค. *Oscillatoria* sp. ง. *Hapalosiphon* sp.

จ. *Calothrix* sp. ฉ. *Anabaena* sp. ช. *Aphanocapsa* sp. ญ. *Scytonema* sp.

เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวมีการศึกษาค่อนข้างจำกัด สภาพแวดล้อมส่วนใหญ่ถูกทำลายจากการบุกรุกพื้นที่ป่าเพื่อปลูกยางพาราและทำการเกษตรจากแหล่งน้ำที่เคยมีความอุดมสมบูรณ์กลายเป็นพื้นน้ำตื้นเขิน ส่งผลทำให้พื้นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ความหลากหลายและการแพร่กระจายของสาหร่ายขนาดเล็กในสถานที่ต่างๆ จะมีชนิดของ

สาหร่ายแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากความเหมาะสมปัจจัยทางอาหารและสภาพแวดล้อม คณะผู้วิจัยเก็บตัวอย่างเดือนพฤศจิกายนซึ่งเป็นช่วงฤดูฝนจะมีผลต่อการดำรงชีวิตของสาหร่ายในแต่ละชนิด เช่น แสงสาหร่ายต้องการแสงสว่างในการเจริญเติบโตปกติจะเจริญอยู่ในดินความลึกไม่เกิน 0.5 เซนติเมตร หรือในพื้นที่ที่มีน้ำขัง ความเข้มของแสงจะเปลี่ยนแปลงไป

ขึ้นกับฤดูกาล พืชที่เจริญปกคลุมอยู่ ตลอดจนความขุ่นของน้ำ สาหร่ายแต่ละชนิดมีความทนทานต่อแสงได้แตกต่างกันแล้วแต่ชนิดและสายพันธุ์ น้ำที่มีความขุ่นมากจะส่งผลทำให้แสงผ่านน้ำได้น้อยลง จึงอาจพบสาหร่ายที่ตรึงไนโตรเจนเป็นบางครั้ง ในบางครั้งฝนอาจทำให้เกิดการคลุกเคล้ากันระหว่างสาหร่ายและดิน ทำให้กิจกรรมการตรึงไนโตรเจนของสาหร่ายลดลงเกือบทั้งหมดได้ และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญของสาหร่ายคือ 25-35 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างสาหร่ายที่แยกได้เป็นสาหร่ายสีเขียวและสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน บางสกุลมีรายงานวิจัยถึงการผลิตสารทุติยภูมิ (secondary metabolites) ที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและผลิตสารยับยั้งการเจริญของเชื้อราและแบคทีเรียก่อโรคในพืช (Abdel-Monaim *et al.*, 2016) Alwathnani and Perveen (2012) รายงานว่า *Nostoc linckia* สามารถยับยั้ง *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* สาเหตุโรคเหี่ยวในมันฝรั่ง นอกจากนี้ *Oscillatoria*, *Anabaena*, *Nostoc* และ *Calothrix* ยับยั้งเชื้อราโรคพืช โดยเฉพาะ *Nostoc commune* และ *Oscillatoria tenuis* มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *Phytophthora capsici*

ดังนั้นสาหร่ายขนาดเล็กที่ผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสามารถพัฒนาเป็นสารยับยั้งเชื้อราก่อโรคพืชทดแทนการใช้สารสังเคราะห์ซึ่งก่อให้เกิดสารพิษตกค้างในสิ่งแวดล้อม และส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตรวมถึงมนุษย์ หากมีการนำสารจากธรรมชาติมาทดแทนสารสังเคราะห์จะเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

2. ปริมาณสารสกัดหยาบจากสาหร่ายขนาดเล็ก

จากการนำตัวอย่างดินบริเวณป่าต้นน้ำบ้านน้ำราด อำเภอคีรีรัฐนิคม จังหวัดสุราษฎร์ธานี ปริมาณสารสกัดหยาบสาหร่ายขนาดเล็ก แสดงในตารางที่ 1 พบว่าสาหร่ายขนาดเล็กที่สกัดด้วยเมทานอลได้ปริมาณสารสกัดร้อยละ 4.45-5.37 และสกัดด้วยเอทิลอะซิเตท ได้ปริมาณสารสกัดร้อยละ 4.48-5.39 สาหร่ายขนาดเล็ก *Haematococcus* sp. ที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทิลอะซิเตทให้น้ำหนักสารสกัดสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 5.39 และที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ให้น้ำหนักสารสกัดสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 5.37

ตารางที่ 1 ร้อยละของสารสกัดหยาบสาหร่ายขนาดเล็ก เพาะเลี้ยงในอาหารเหลว BG-11 เมื่อสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลและเอทิลอะซิเตท

ชนิดสาหร่าย	ร้อยละของสารสกัด	
	เมทานอล	เอทิลอะซิเตท
<i>Haematococcus</i> sp.	5.37	5.39
<i>Fischerella</i> sp.	4.48	4.50
<i>Oscillatoria</i> sp.	4.62	4.64
<i>Hapalosiphon</i> sp.	5.26	5.29
<i>Calothrix</i> sp.	4.98	4.96
<i>Anabaena</i> sp.	4.57	4.53
<i>Aphanocapsa</i> sp.	4.45	4.48
<i>Scytonema</i> sp.	4.55	4.53

ตัวทำละลายอินทรีย์ที่นำมาสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมีหลายชนิด เช่น เมทานอล เอทานอล คลอโรฟอร์ม อะซิโตน เอทิล อะซิเตทและ เฮกเซน โดยแต่ละชนิดมีจุดเดือด ความหนาแน่น การมีขั้วและความสามารถในการผสมรวมกับน้ำต่างกัน สามารถนำมาใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับสกัดสารเมแทบอไลต์ในอุตสาหกรรมอาหารและยา (Grodowska and Parczewski, 2010) สำหรับตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อนำมาสกัดสารหยาบจะได้กลุ่มสารเคมีชนิดต่างๆ เช่น เปปไทด์ (peptide) กรดไขมัน (fatty acids) คาโรทีนอยด์ (carotenoids) โพลีฟีนอล (polyphenol) ฟีนอลิก (phenolic) ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) และพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) สารเคมีดังกล่าวเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย เชื้อรา ไวรัส และเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Guerreiro *et al.*, 2020) นอกจากนี้ พบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของสารสกัดสำหรับ Gonzalez *et al.* (2001) ศึกษาผลของสภาวะการเจริญต่อการผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในสภาวะที่ให้ความเครียดและสภาวะธรรมชาติพบว่า การเลี้ยงในสภาวะที่ให้ความเครียดมีแนวโน้มจะสร้างสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้ดีกว่าแต่ไม่ชัดเจน (แตกต่างกันไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ)

3. ผลการแยกเชื้อราก่อโรคในผลเงาะ

จากการเก็บตัวอย่างเงาะที่แสดงอาการโรคผลเน่า มาแยกเชื้อสาเหตุของโรค และทำการศึกษาโครงสร้างของเชื้อรา พบว่า สามารถแยกเชื้อราให้บริสุทธิ์ได้ทั้งหมด 4 ไอโซเลท ได้แก่ *Penicillium* sp., *Corticium* sp., *Pestalotiopsis* sp. และ *Lasiodiplodia* sp.

จากลักษณะสัณฐานวิทยาสันนิษฐานว่าเชื้อราไอโซเลท 1 เชื้อรา *Penicillium* sp. ไอโซเลท 2 เชื้อรา *Corticium* sp. ไอโซเลท 3 เชื้อรา *Pestalotiopsis* sp. และ ไอโซเลท 4 เชื้อรา *Lasiodiplodia* sp. เนื่องจากเชื้อราไอโซเลท 1 ลักษณะโคโคนีมีสีเขียวอมเหลือง

หรือเขียวมะกอก ปลายโคนดิโอพอร์ (conidiophore) มีการแตกแขนงเป็นไฟอะลาอิด (phialide) สปอร์เป็นแบบโคนิเดีย (conidia) ไอโซเลท 2 สร้างเส้นใยสีขาวอมชมพูไปจนถึงม่วงอ่อน เบสิดิโอสปอร์ (basidiospore) ลักษณะแคบรูปกระสวย มีความยาว 8-11 ไมโครเมตร กว้าง 3-5 ไมโครเมตร ไอโซเลท 3 สร้างเส้นใยสีขาว นวลและหยาบฟูเล็กน้อย สร้างพิกนิตีเดีย (pycnidia) สีดำกระจายทั่วโคโคนี โคนิเดียมีความยาว 20-23 ไมโครเมตร กว้าง 5-6 ไมโครเมตร ลักษณะยาวเรียว บางเซลล์ส่วนหัวและท้ายมีลักษณะแหลมเรียวไม่มีสี แต่เซลล์บริเวณกลาง 3 เซลล์จะมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ไอโซเลท 4 เส้นใยสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำเส้นใยละเอียดค่อนข้างฟู โคนิเดียระยะแรกมีสีใส เซลล์เดี่ยว รูปไข่ถึงยาวรี จนถึงค่อนข้างกลม ปลายด้านหนึ่งกลมมน มีความยาว 20-25 ไมโครเมตร กว้าง 10-14 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงนำเชื้อราทั้ง 4 ไอโซเลทมาใช้ทดสอบประสิทธิภาพของสารสกัดจากสาหร่ายขนาดเล็กในการยับยั้งเชื้อรา จากรายงานวิจัยของ Chirawut (2014) สาเหตุโรคผลเน่าในเงาะเกิดจากเชื้อรา *Lasiodiplodia theobromae*, *Gliocephalotrichum* spp., *Colletotrichum gloeosporioides*, *Pestalotiopsis* sp. และ *Phomopsis* sp. Thimabut *et al.* (2016) แยกเชื้อราก่อโรคในผลเงาะโรงเรียน อำเภอนาสาร จังหวัดสุราษฎร์ธานี สามารถแยกเชื้อราได้ 2 ชนิดคือ *Pestalotiopsis* sp. และ *Phomopsis* sp. ในขณะที่ Sanosomneng *et al.* (2019) รายงานว่าเชื้อราที่ทำให้เงาะเกิดผลเน่ามากที่สุดคือ *Gliocephalotrichum* spp. รองลงมาคือ *Pestalotiopsis* spp. และ *Lasmenia* spp. ตามลำดับ ทั้งนี้เชื้อราก่อโรคผลเน่าในเงาะ เป็นปัญหาสำคัญทำให้คุณภาพของผลเงาะลดลง อายุการเก็บรักษาสั้น

4. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสารสกัดจากสาหร่ายขนาดเล็กในการยับยั้งเชื้อราสาเหตุก่อโรคในเงาะ

สาหร่ายขนาดเล็กเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีศักยภาพในการยับยั้งเชื้อราก่อโรค การสกัดด้วยตัวทำละลายที่แตกต่างกันอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อรา ประสิทธิภาพสารสกัดหายาจากสาหร่ายขนาดเล็กในการยับยั้งเชื้อราสาเหตุก่อโรคเน่าในเงาะ สารสกัดหายาจาก *Oscillatoria* sp. ที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลสามารถยับยั้งเชื้อราก่อโรคเน่าของเงาะได้ดีที่สุด สามารถยับยั้งก่อโรคเน่าของเงาะได้ทุกไอโซเลท วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนการยับยั้ง (inhibition zone) เท่ากับ 15.25 ± 0.3 มิลลิเมตร ส่วนการสกัดด้วยตัวทำละลายเอทิลอะซิเตท ประสิทธิภาพการยับยั้งเท่ากับ 14.5 ± 0.7 มิลลิเมตร รองลงมา คือสารสกัดสาหร่ายขนาดเล็ก *Fischerella* sp. ที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลยับยั้งเชื้อรา *Penicillium* sp. และ *Lasiodiplodia* sp. วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนการยับยั้ง เท่ากับ 6.5 ± 0.7 และ 11.5 ± 0.7 มิลลิเมตร ตามลำดับ และที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทิลอะซิเตทยับยั้งเชื้อรา *Corticium* sp. และ *Lasiodiplodia* sp. วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนการยับยั้งเท่ากับ 8.5 ± 0.7 และ 10.0 ± 0 มิลลิเมตร ตามลำดับ สารสกัดหายาจาก *Anabaena* sp. ที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทิล อะซิเตทสามารถยับยั้งเชื้อรา *Penicillium* sp. และ *Corticium* sp. วัดเส้นผ่านศูนย์กลาง

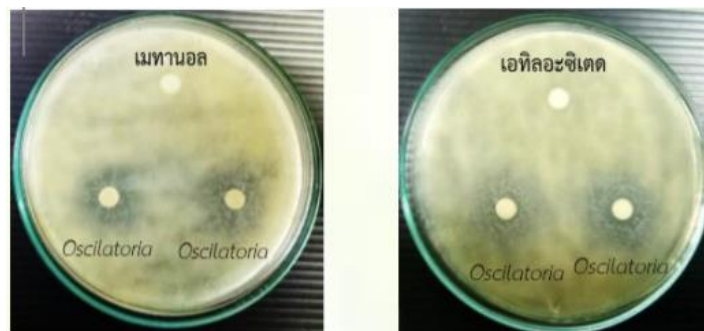
ของโซนการยับยั้งเท่ากับ 8.0 ± 0 และ 11.5 ± 0.7 มิลลิเมตร ตามลำดับ สารสกัดจากสาหร่ายขนาดเล็กทั้ง 8 สกุลไม่สามารถยับยั้งเชื้อรา *Pestalotiopsis* sp. ได้ สำหรับปัจจัยของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดสารเพื่อยับยั้งเชื้อรา พบว่าสาหร่ายขนาดเล็กมีองค์ประกอบภายในเซลล์อยู่ในสภาพขี้วปานกลางสามารถถูกสกัดได้ดีด้วยเมทานอลและเอทิลอะซิเตท และเมื่อพิจารณาเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนการยับยั้งของ *Oscillatoria* sp. ซึ่งยับยั้งเชื้อราก่อโรคผลเน่าในเงาะได้ดีที่สุด พบว่าเมทานอลเป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้ดีกว่าเอทิลอะซิเตท นอกจากนี้ คุณสมบัติของเมทานอลเป็นสารที่มีขี้วปานกลางจึงสามารถละลายน้ำได้ดีกว่าสารที่สกัดได้โดยตัวทำละลายที่มีขี้วต่ำ และเป็นตัวทำละลายที่ระเหยได้ง่าย ทำให้ง่ายต่อการแยกตัวทำละลายออกจากสารสกัด และอิทธิพลของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดพบว่าสารออกฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์มีค่าดัชนีความมีขี้วปานกลาง (polarity index, P) เช่น เมทานอล ($P = 5.1$) และ เอทิลอะซิเตท ($P = 4.4$) ในขณะที่การใช้ตัวทำละลายที่มีค่าดัชนีความมีขี้วสูงมาก เช่น น้ำ ($P = 10.2$) และตัวทำละลายที่มีค่าดัชนีความมีขี้วต่ำมาก เช่น เฮกเซน ($P = 0.1$) ไม่สามารถสกัดสารออกฤทธิ์ไซยาโนแบคทีเรียได้ ดังนั้น ตัวทำละลายสภาพที่มีขี้วปานกลางจึงสกัดสารได้ดี โดยเฉพาะเมทานอล และเอทิลอะซิเตท (Utaiida et al., 2014)

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราสาเหตุก่อโรคในผลเงาะของสารสกัดหยาบจากสาหร่ายขนาดเล็ก ด้วยวิธี

Paper Disc Diffusion

ความเข้มข้นของ สารสกัด 500 µg/ml	ตัวทำละลาย	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนการยับยั้ง (มิลลิเมตร)			
		<i>Penicillium</i> sp.	<i>Corticium</i> sp.,	<i>Pestalotiopsis</i> sp.	<i>Lasiodiplodia</i> sp.
<i>Fischerella</i> sp.	เมทานอล	6.5±0.7	-	-	11.5±0.7
	เอทิลอะซิเตท	-	8.5±0.7	-	10.0±0.0
<i>Oscillatoria</i> sp.	เมทานอล	-	-	-	15.25±0.3
	เอทิลอะซิเตท	-	-	-	14.5±0.7
<i>Anabaena</i> sp.	เมทานอล	-	-	-	-
	เอทิลอะซิเตท	8.0±0	11.5±0.7	-	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่เกิดบริเวณการยับยั้ง; ค่าเฉลี่ย ± ค่า SD

ภาพที่ 2 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนการยับยั้งเชื้อรา *Lasiodiplodia* sp. ของสารสกัดหยาบ *Oscillatoria* sp. ที่ความเข้มข้น 500 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

สาหร่ายขนาดเล็กโดยเฉพาะสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพภายในเซลล์และนอกเซลล์ที่หลากหลาย มีฤทธิ์ในการต้านแบคทีเรีย เชื้อรา และไวรัส สามารถนำมาใช้ทางการเกษตร (Goncalves, 2021) จึงได้รับความสนใจนำมาใช้เป็นสารชีวภาพที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อควบคุมโรคพืช จากงานวิจัยของ Abdel-Monaim *et al.* (2016) รายงานว่า *Nostoc muscorum*, *Oscillatoria agardhii*, *Spirulina platensis* และ *Anabaena sphaerica* เมื่อนำมาสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล อะซิโตน และน้ำ สามารถยับยั้งเชื้อรา *Rhizoctonia solani*, *Fusarium*

solani และ *Phytophthora phaseolina* โดยสาหร่ายดังกล่าวผลิตสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิ ได้แก่ กรดอินโดลแอซิดิก (IAA) ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และโปรติเอส เป็นต้น Haggag *et al.* (2014) พบว่าสารสกัดจาก *Oscillatoria agardhii* และ *Anabaena sphaerica* ที่ความเข้มข้นต่ำสุด 0.3 µg/ml สามารถยับยั้งเชื้อรา *Fusarium equiseti*, *F. moniliforme*, *F. solani*, *F. proliferatum*, *F. graminearum*, *Penicillium digitatum*, *Aspergillus terreus*, *A. niger*, *A. flavus*, *A. oryza*, *Alternaria alternate* และ *A. triticina* สาเหตุโรคในเมล็ดธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี และข้าวบาร์เลย์ โดย *Oscillatoria agardhii*

ที่สกัดด้วยอะซิโตน เมทานอล และน้ำ สารสกัดยับยั้งเชื้อราวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนการยับยั้งอยู่ในช่วง 9.8-24.1, 8.1-18.8 และ 5.5-9.9 มิลลิเมตร ตามลำดับ และ *Anabaena sphaerica* ยับยั้งเชื้อราวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนการยับยั้งอยู่ในช่วง 7.7-16.3, 6.2-12.4 และ 5.5-9.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ จึงมีความเป็นไปได้ที่นำสารสกัดจากสาหร่ายขนาดเล็กมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพต่อโรคในผัก ผลไม้ ซึ่งเป็นทางเลือกสำหรับเกษตรกรที่จะใช้สารชีวภาพยับยั้งเชื้อรา

สรุป

สาหร่ายขนาดเล็กที่แยกได้จากดินบริเวณป่าต้นน้ำ มี 8 ชนิด แบ่งเป็นสาหร่าย สีเขียว จำนวน 1 ชนิด ได้แก่ *Haematococcus* sp. และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน จำนวน 7 ชนิด ได้แก่ *Fischerella* sp., *Oscillatoria* sp., *Hapalosiphon* sp., *Calothrix* sp., *Anabaena* sp., *Aphanocapsa* sp. และ *Scytonema* sp. โดยที่ *Anabaena* sp. เป็นชนิดที่พบมากที่สุด (คิดเป็น 35 %) รองลงมาคือ *Oscillatoria* sp. (คิดเป็น 25 %), *Fischerella* sp (คิดเป็น 18 %), *Hapalosiphon* sp. (คิดเป็น 7 %), *Calothrix* sp., *Aphanocapsa* sp. และ *Scytonema* sp. (คิดเป็นชนิดละ 5 %) ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าสารสกัดหยาบสาหร่ายขนาดเล็ก 3 สกุล ได้แก่ *Oscillatoria* sp., *Fischerella* sp. และ *Anabaena* sp. มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรคผลเน่าของเงาะ สาหร่าย *Oscillatoria* sp. ที่สกัดด้วยเมทานอลมีฤทธิ์ดีที่สุดในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราสาเหตุโรคผลเน่าของเงาะที่เกิดจากเชื้อ *Lasiodiplodia* spp. รองลงมาคือ *Oscillatoria* sp. ที่สกัดด้วยเอทิลอะซิเตท วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนการยับยั้งได้เท่ากับ 15.25 และ 14.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในขณะที่สาหร่าย *Anabaena* sp. ที่สกัดด้วยเอทิลอะซิเตท มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อรา

Corticium sp. ส่วนสาหร่าย *Fischerella* sp. ที่สกัดด้วยเมทานอล ยับยั้งการเจริญของเชื้อรา *Lasiodiplodia* spp. วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนการยับยั้งได้เท่ากับ 11.05 มิลลิเมตร จากการศึกษาครั้งนี้เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้น จึงควรมีการศึกษาต่อไปในด้านการนำสาหร่ายขนาดเล็กที่แยกได้มาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น การผลิตปุ๋ยชีวภาพสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เป็นต้น

กิจกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

เอกสารอ้างอิง

- Abdel-Monaim, M.F., Mazen, M.M. and Atwa, M.A.A.M. 2016. Effect of cyanobacteria on reducing damping-off and root rot incidence in lupine plants, New Valley Governorate, Egypt. **British Microbiology Research Journal** 16(2): 1-14.
- Alwathnani, H.A. and Perveen, K. 2012. Biological control of *Fusarium* wilt of tomato by antagonist fungi and cyanobacteria. **African Journal of Biotechnology** 11(5): 1100-1105.
- Belete, T. and Boyraz, N. 2019. Biotechnological tools for detection, identification and management of plant diseases. **African Journal of Biotechnology** 18(29): 797-807.
- Chirawut, B. 2014. Fruit rot disease of harvested rambutan and its control. **Thai Agricultural Research Journal** 32(1): 89-109. (in Thai)

- Choi, Y.W., Hyde, K.D. and Ho, W.H. 1999. Single spore isolation of fungi. **Fungal Diversity** 3: 29-38.
- De Moraes, M.G., Vaz, B.D.S., De Moraes, E.G. and Costa, J.A.V. 2015. Biologically active metabolites synthesized by microalgae. **BioMed Research International** (Suppl. 1): 1-15.
- Goncalves, A.L. 2021. The use of microalgae and cyanobacteria in the improvement of agricultural practices: A review on their biofertilising, biostimulating and biopesticide roles. **Applied Sciences** 11(871): 1-21.
- Gonzalez del Val, A., Platas, G., Basilio, A., Cabello, A., Gorrochategui, J., Suay, I., Vicente, F., Protillo, E., Jimenez del Rio, M., Reina, G.G. and Pelaez, F. 2001. Screening of antimicrobial activities in red, green and brown macroalgae from Gran Canaria (Canary Islands, Spain). **International Microbiology** 4(1): 35-40.
- Grodowska, K. and Parczewski, A. 2010. Organic solvents in the pharmaceutical industry. **Acta Poloniae Pharmaceutica-Drug Research** 67: 3-12.
- Guerreiro, A., Andrade, M.A., Menezes, C., Vilarinho, F. and Dias, E. 2020. Antioxidant and cytoprotective properties of cyanobacteria: Potential for biotechnological applications. **Toxins** 12(548): 1-18.
- Haggag, W., Abd El-Aty, A.M. and Mohamed, A.A. 2014. The potential effect of two cyanobacteria species; *Anabaena sphaerica* and *Oscillatoria agardhii* against storage fungi. **European Scientific Journal** 10(30): 1857-7881.
- Kim, J. and Kim, J.D. 2008. Inhibitory effect of algal extracts on mycelial growth of the tomato-wilt pathogen, *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici*. **Mycobiology** 36(4): 242-248.
- Nandagopal, P., Steven, A.N., Chan, L.N., Rahmat, Z., Jamaluddin, H. and Noh, N.I.M. 2021. Bioactive metabolites produced by cyanobacteria for growth adaption and their pharmacological properties. **Biology** 10: 1-24.
- Nicolopoulou-Stamati, P., Maipas, S., Kotampasi, C., Stamatis, P. and Hens, L. 2016. Chemical pesticides and human health: The urgent need for a new concept in agriculture. **Frontiers in Public Health** 4: 148.
- Righini, H., Francioso, O., Quintana, A.M. and Roberti, R. 2022. Cyanobacteria: A natural source for controlling agricultural plant diseases caused by fungi and oomycetes and improving plant growth. **Horticultural** 8(1): 58.
- Sanosomneng, K., Bussabong, N., Sangchotea, S. and Tongsri, V. 2019. Fungal pathogens of rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) fruit rot and disease control using salicylic acid. **Thai Science and Technology Journal** 28(7): 1216-1226. (in Thai)
- Shishido, T.K., Humisto, A., Jokela, J., Liu, L., Wahlsten, M., Tamrakar, A., Fewer, D.P., Pemi, P., Andreote, A.P.D., Fiore, M.F. and Sivonen, K. 2015. Antifungal compounds from cyanobacteria. **Marine Drugs** 13(4): 2124-2140.
- Singh, N.K., Dhar, W.D. and Tabassum, R. 2016. Role of cyanobacteria in crop protection, pp. 1-8. *In The Proceedings of the National Academy of Sciences*. India.

- Thimabut, K., Srisawat, T. and Ummarat, N. 2016. Efficiency of khium (*Cotylelobium lanceolatum* Craib.) branch extracts against pathogenic fungi causing postharvest disease of rambutan fruit. **Songklanakarin Journal of Plant Science** 3(Suppl. I): 132-137. (in Thai)
- Tiwari, A. and Kaur., A. 2014. Allelopathic impact of cyanobacteria on pathogenic fungi. **International Journal of Pure & Applied Bioscience** 2(3): 63-70.
- Utaida, S., Khlangmake, V., Chittapun, S. and Charoenrat, T. 2014. Screening of antibacterial substances from cyanobacteria *Anabaena* spp. and *Nostoc* spp. **Thai Journal of Science and Technology** 22(2): 147-157. (in Thai)
- Wehr, J.D. and Sheath, R.G. 2003. **Freshwater Algae of North America Ecology and Classification**. 1st ed. Academic Press, Boston.

การจำแนกภาพสมุนไพรจีนด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกผ่านแอปพลิเคชัน บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์

Classification of Chinese Herb Images Using Deep Learning Technique via Android Application

ณัฐวดี หงษ์บุญมี* และ ลดาเมณี วงษ์พา

Nattavadee Hongboonmee* and Ladamane Wongpha

Received: 22 November 2021, Revised: 14 February 2022, Accepted: 14 March 2022

บทคัดย่อ

ปัจจุบันแนวโน้มเรื่องการดูแลสุขภาพด้วยสมุนไพรกำลังได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะสมุนไพรจีนซึ่งมีสรรพคุณสามารถบำบัดรักษาอาการป่วยหรือโรคได้ แต่การตรวจสอบชนิดสมุนไพรจีนและสรรพคุณการรักษาโรคเป็นเรื่องยากสำหรับประชาชนทั่วไป งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์สำหรับจำแนกภาพสมุนไพรจีนโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก ขั้นตอนงานวิจัยประกอบด้วย การเตรียมภาพก่อนการประมวลผลได้มีการเตรียมภาพตัวอย่างที่นำมาใช้ทดสอบจำนวนทั้งหมด 2,640 ภาพ ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำภาพตัวอย่างมาฝึกสอน สร้างแบบจำลองจำแนกภาพด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม การเรียนรู้เชิงลึกคอนโวลูชันโดยใช้ไลบรารีของเทนเซอร์โฟลสำหรับการจำแนกภาพ ซึ่งฝึกสอนให้สามารถจำแนกภาพสมุนไพรจีนจำนวน 12 ประเภท จากนั้นนำแบบจำลองไปพัฒนาเป็นแอปพลิเคชัน ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการทดสอบประสิทธิภาพแอปพลิเคชัน สถิติที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำ ค่าความระลึกค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า (1) แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับจำแนกภาพสมุนไพรจีนที่รอบการฝึกสอน 500 รอบ มีค่าความถูกต้องสูงสุดเท่ากับ 98.30% ค่าความแม่นยำ 98.29% และค่าความระลึก 98.30% (2) ผลลัพธ์ค่าความถูกต้องของแอปพลิเคชันในการจำแนกภาพสมุนไพรจีน มีค่าความถูกต้องเฉลี่ย 89.17% และ (3) ผลการประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญอยู่ในระดับเหมาะสมมากและความพึงพอใจของระบบโดยผู้ใช้งานอยู่ในระดับพึงพอใจมาก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.23 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการช่วยจำแนกภาพสมุนไพรจีนเบื้องต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

Department of Computer Science and Information Technology, Faculty of Science, Naresuan University, ThaPho, Mueang, Phitsanulok 65000, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): nattavadeeho@nu.ac.th Tel: 08 9528 5209

คำสำคัญ: การจำแนก, ภาพสมุนไพรจีน, การเรียนรู้เชิงลึก, โครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน, แอปพลิเคชัน

ABSTRACT

Currently, the herb-based health-care has been receiving more attention, especially Chinese herbs that are able to alleviate or treat diseases. However, examining the type and remedial effect of Chinese herbs remains difficult for the general public. This research aimed to develop an android application for classification of Chinese herb images with deep learning technique. The research started from preparation of 2,640 test images for processing. The next step was taking the collected images to be used as a training set for training the model, based on deep learning, convolutional neural network by using Tensorflow's library for image classification. This model was trained to be able to recognize 12 Chinese herbs. Then, the model was developed into an application. The last step was application performance testing. The statistics used in this research were the accuracy, precision, recall, mean, and standard deviation. The research found that (1) the deep learning model for Chinese herb classification at 500 cycles had the maximum accuracy of 98.30%, precision of 98.29% and recall of 98.30%; 2) the results showed that average accuracy of the application for Chinese herb image classification was 89.17%; and (3) performance assessment by experts had high suitability, and the results of the user satisfaction of the application was at a high level with an average of 4.23. The experimental results indicate that the developed application can effectively help classify Chinese herb image.

Key words: classification, Chinese herb image, deep learning, convolutional neural network, application

บทนำ

ปัจจุบันแนวคิดเรื่องการดูแลสุขภาพด้วยสมุนไพรกำลังได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสมุนไพรเป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะมีผลข้างเคียงต่อร่างกายน้อยกว่ายาแผนปัจจุบัน (Wannawibul, 2012) ทำให้ผู้ต้องการดูแลสุขภาพหันมาสนใจการแพทย์แผนตะวันออก เช่น แพทย์แผนจีน และการใช้ยาสมุนไพรจีนรักษาโรคกันมากขึ้น (Huachiew Traditional Chinese Medicine Clinic, 2021) การรักษาสุขภาพด้วยแพทย์แผนจีนมีทั้งการกดจุด ผีงเข็ม และการใช้ยาสมุนไพรจีน โดยสมุนไพรจีนหลายชนิดมีสรรพคุณสามารถบำบัดรักษาอาการป่วยหรือโรคได้ (Health Book Editor,

2013) ซึ่งนับเป็นทางเลือกในการรักษาอาการของผู้ป่วยได้อีกทางหนึ่ง ปัญหาหลักของการใช้สมุนไพรจีนคือ ประชาชนส่วนใหญ่ไม่มีองค์ความรู้เกี่ยวกับชนิดสมุนไพรจีน ไม่สามารถจำแนกพืชสมุนไพรแต่ละชนิดได้อย่างถูกต้อง ไม่รู้จักว่าสมุนไพรจีนมีสรรพคุณอย่างไร เนื่องจากพืชสมุนไพรบางชนิดนั้นหายาก หรือบางชนิดอาจมีความคล้ายคลึงกับพืชพันธุ์ชนิดอื่น ทำให้ไม่สามารถจำแนกและนำสมุนไพรมาใช้ได้ทันที การตรวจสอบชนิดสมุนไพรจีนและสรรพคุณการรักษาโรคจำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์และทักษะของผู้เชี่ยวชาญด้านสมุนไพรจีนเพื่อแยกแยะและตัดสินใจ ซึ่งเป็นเรื่องยากสำหรับประชาชนทั่วไปในการตรวจสอบชนิดและสรรพคุณทางยาของสมุนไพร

จีน จากปัญหาดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงเห็นว่าการแก้ปัญหาการจำแนกสมุนไพรรจีนและบอกสรรพคุณได้แบบอัตโนมัติ โดยใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์จะทำให้มีความรวดเร็วและตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ที่ต้องการทราบชนิดสมุนไพรรจีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้นักวิจัยหลายท่าน ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการจำแนกรูปภาพพืชพันธุ์ต่างๆ เช่น Gatica *et al.* (2013) ทำการวิจัยเรื่องการจำแนกภาพผลมะกอก โดยการวิเคราะห์ภาพผลมะกอกด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองมีความแม่นยำในการจำแนกภาพ 97.00% งานวิจัยของ Sladojevic *et al.* (2016) ศึกษาโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน เพื่อจำแนกพืชที่เป็นโรคโดยใช้ภาพใบไม้ที่เป็นโรค และใบไม้ที่อยู่ในสภาพปกติ ผลการทดลองพบว่า อัตราความถูกต้องการจำแนกอยู่ที่ 96.30% งานวิจัย Lu *et al.* (2017) กล่าวถึงการใช้โครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึกคอนโวลูชัน สำหรับการจำแนกโรคข้าว 10 ประเภท ผลการทดลองพบว่าแบบจำลอง มีค่าความแม่นยำ 95.48% Lim and Chuah (2018) นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการจำแนกชนิดทุเรียนด้วยโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชันมีความแม่นยำในการจำแนก 81.25% Sanuksan and Surinta (2019) ศึกษาโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชันเพื่อจำแนกพรรณไม้ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติ ผลการศึกษาพบว่าถ้าต้องการที่จะสร้างแบบจำลองในการจำแนกพรรณไม้ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติควรจะใช้โครงสร้างแบบ GoogleNet ซึ่งได้ค่าความถูกต้องเท่ากับ 87.40% Carrio *et al.*, 2017 กล่าวถึงเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) คือ การพัฒนาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ให้สามารถเลียนแบบการทำงานของมนุษย์ ซึ่งมีกระบวนการคิดคำนวณคล้าย

กับระบบโครงข่ายประสาทของสมองมนุษย์ เรียกว่าโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network: NN) จุดเด่นของการเรียนรู้เชิงลึกเมื่อนำไปใช้งาน (Boonkidram and Sriwiboon, 2020) คือ การเรียนรู้เชิงลึกสามารถสร้างแบบจำลองและหาคำตอบได้ด้วยการนำโครงข่ายประสาทเทียมหลายๆ ชั้น เรียกว่าชั้นซ่อน (Hidden Layer) มาใช้วิเคราะห์และหาคำตอบ ยิ่งใช้ชั้นซ่อนจำนวนมากในขั้นตอนการประมวลผล จะทำให้มีโครงสร้างการเรียนรู้ที่ลึกมากขึ้น ส่วนโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) (Verma *et al.*, 2019) เป็นวิธีการหนึ่งของหลักการการเรียนรู้เชิงลึก มีคุณสมบัติที่สามารถแยกคุณลักษณะ (Feature) ของภาพที่นำเข้าระบบ เช่น สี สันหรือลักษณะรูปทรง นำคุณลักษณะต่างๆ มาวิเคราะห์แล้วกำหนดคุณสมบัติของสิ่งที่มองเห็น จากนั้นจำแนก (Classify) ว่าสิ่งนั้นมีคุณสมบัติเป็นอะไร แล้วทำซ้ำหลายๆ รอบเพื่อให้ได้ความแม่นยำมากที่สุด

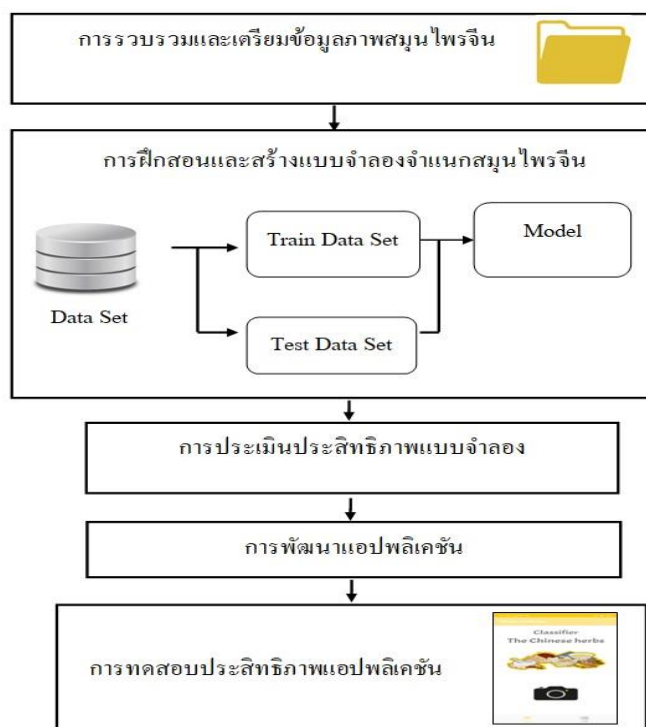
จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบเทคนิคที่น่าสนใจ คือ การใช้การประมวลผลภาพเข้ามาช่วยในการจำแนกรูปภาพ โดยเทคนิคที่เข้ามาใช้ร่วมกันที่น่าสนใจ คือ การเรียนรู้เชิงลึก ซึ่งเป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่มีความแม่นยำที่สูง โดยเฉพาะการใช้โครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึกคอนโวลูชัน ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมที่สามารถเรียนรู้ข้อมูลเพื่อตัดสินใจต่อปัญหาต่างๆ ได้ด้วยตนเองแบบอัตโนมัติ เหมาะสมกับการนำไปใช้จำแนกภาพสมุนไพรรจีน

ด้วยเหตุดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบจำแนกภาพสมุนไพรรจีนผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนที่ใช้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ (1) เพื่อสร้างแบบจำลองจำแนกภาพสมุนไพรรจีนโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (2) เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันจำแนก

ภาพสมุนไพรจีนแบบอัตโนมัติบนสมาร์ทโฟน ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ และ (3) เพื่อประเมินประสิทธิภาพแอปพลิเคชัน โดยการพัฒนาระบบในรูปแบบแอปพลิเคชันจะช่วยเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการใช้งาน เนื่องจากสามารถแสดงผลที่ได้ทันที นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลสมุนไพรไปเป็นแนวทางในการดูแลสุขภาพตนเองเบื้องต้นได้

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงพัฒนา (Development Research) โดยคณะผู้วิจัยได้ออกแบบกรอบแนวคิดงานวิจัย ได้ขั้นตอนการดำเนินงาน 5 ขั้นตอน (ภาพที่ 1) ได้แก่ (1) การรวบรวมและเตรียมข้อมูลภาพสมุนไพรจีน (2) การฝึกสอนและสร้างแบบจำลองจำแนกสมุนไพรจีน (3) การประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง (4) การพัฒนาแอปพลิเคชัน และ (5) การทดสอบประสิทธิภาพแอปพลิเคชัน ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดงานวิจัย

1. การรวบรวมและเตรียมข้อมูลภาพสมุนไพรจีน

การเก็บรวบรวมข้อมูลรูปภาพกลุ่มตัวอย่างได้มาจากการถ่ายภาพสมุนไพรจีน ซึ่งจากการปรึกษาผู้เชี่ยวชาญด้านสมุนไพรทำให้คัดเลือกสมุนไพรจีนที่ใช้บ่อยที่สุดทางด้านแพทย์แผนจีนจำนวน 12 ประเภท ได้แก่ เห็ดหลินจือ ถั่งเช่าสีทอง โสมจีน โป๊ยกั๊ก เก๋ากี้ ดังกฤษ เห็กเต็ก ดอกไม้จีน ดังเซียม ขวง

เกียง ปักกี้ และฮ่วยซัว นำสมุนไพรจีนที่คัดเลือกมาถ่ายภาพโดยวางสมุนไพรจีนบนกระดาษสีขาวและถ่ายภาพด้วยกล้องบนโทรศัพท์สมาร์ทโฟน จากนั้นให้ผู้เชี่ยวชาญด้านสมุนไพรตรวจสอบความถูกต้องของรูปภาพให้ตรงกับประเภทสมุนไพรจีน จำนวนกลุ่มตัวอย่างรูปภาพที่ผ่านการตรวจสอบมีจำนวนทั้งหมด 2,640 ภาพ ดังภาพที่ 2 และตารางที่ 1 จากนั้น

นำมาแบ่งออกเป็นสามกลุ่มด้วยวิธีการสุ่มกลุ่มตัวอย่างแบบง่าย (Random Sampling) เพื่อใช้เป็นชุดข้อมูลฝึกสอน (Train Data Set) ชุดข้อมูลทดสอบ (Test Data

Set) และชุดข้อมูลทดสอบกับแอปพลิเคชัน (Validate Data Set) ภาพทั้งหมดกำหนดค่าความละเอียดภาพเท่ากับ 224×224 พิกเซล



ภาพที่ 2 ตัวอย่างภาพสมุนไพรจีนแต่ละประเภท

ตารางที่ 1 จำนวนภาพตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

ลำดับ	สมุนไพรจีน	ข้อมูลฝึกสอน	ข้อมูลทดสอบ	ข้อมูลทดสอบกับแอปพลิเคชัน	จำนวนทั้งหมด
1	เห็ดหลินจือ	180	20	20	220
2	ถั่งเช่าสีทอง	180	20	20	220
3	โสมจีน	180	20	20	220
4	โป๊ยกั๊ก	180	20	20	220
5	เก๋ากี้	180	20	20	220
6	คังคูน	180	20	20	220
7	เฉาก๊วย	180	20	20	220
8	ดอกไม้วัง	180	20	20	220
9	คังเขียม	180	20	20	220
10	ขวงเกียง	180	20	20	220
11	ปักคี้	180	20	20	220
12	ฮ่วยซัว	180	20	20	220
	รวม	2,160	240	240	2,640

2. การฝึกสอนและสร้างแบบจำลองจำแนกสมุนไพรจีน

การสร้างแบบจำลองเป็นการนำข้อมูลที่จัดเตรียมไว้มาทำการประมวลผลเพื่อฝึกสอน (Train Data) และสร้างแบบจำลองเพื่อรู้จำและจำแนกภาพสมุนไพรจีนประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกเลือกใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน เครื่องมือสำหรับการดำเนินงาน ได้แก่ (1) ไอบรารีเทนเซอร์โฟล ซึ่ง เป็นไลบรารีสำหรับพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกมีความสามารถในการรับข้อมูลและทำการประมวลผล อัตโนมัตินี้เพื่อตรวจจับรูปแบบหรือจัดหมวดหมู่ข้อมูลและสามารถเรียนรู้คุณลักษณะได้แบบอัตโนมัติและ (2) ภาษาไพทอน ซึ่งมีการเรียกใช้ไลบรารีเทนเซอร์โฟลสำหรับฝึกสอนและสร้างแบบจำลอง โดยกำหนดค่าความละเอียดภาพเท่ากับ 224×224 พิกเซล ชุดข้อมูลภาพทั้งหมดไลบรารีเทนเซอร์โฟลจะดำเนินการแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือ ข้อมูลฝึกสอน (Train Data) ส่วนที่สอง คือ ข้อมูลทดสอบ (Test Data)

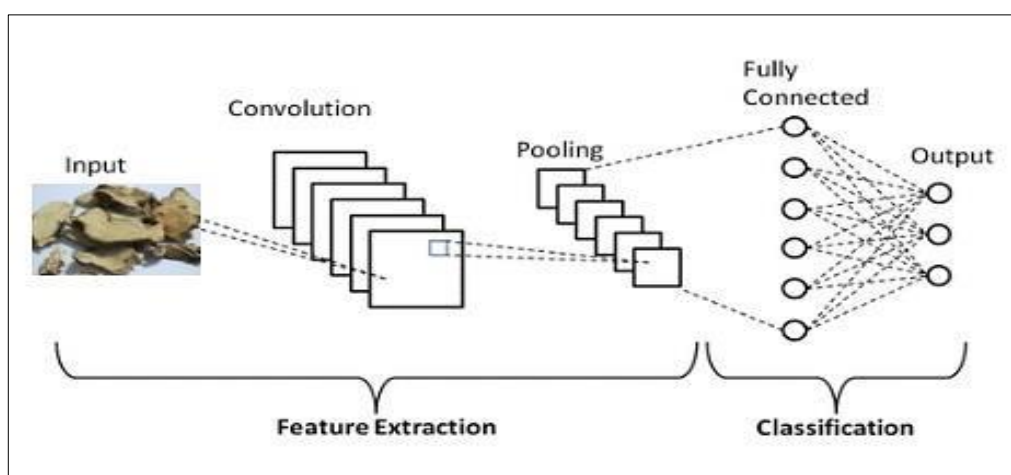
การเรียนรู้เชิงลึกของโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน

การเรียนรู้เชิงลึก (Carrio *et al.*, 2017) คือ เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่มีโครงสร้างเชิงลึกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชันเพื่อสกัดคุณลักษณะเด่นจากรูปภาพโดยอัตโนมัติ ขั้นตอนการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน แสดงในภาพที่ 3 รายละเอียดการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชันมีดังนี้

(1) ส่วนการรับข้อมูล (Input) การรับข้อมูลหรือวัตถุ เช่น ภาพสมุนไพรจีน

(2) ส่วนการประมวลผล ประกอบด้วย การประมวลผลเป็นชั้นๆ (Hidden Layer) เหมือนกับการทำงานของสมองมนุษย์เพื่อเรียนรู้ (Training) และการคัดแยกประเภทของภาพ โดยแบบจำลองจะเรียนรู้จากข้อมูลฝึกสอนแล้วกำหนดคุณสมบัติของสิ่งที่มองเห็น (Feature Extraction) แบบอัตโนมัติ จากนั้นจำแนก (Classification) ว่าสิ่งนั้นมีคุณสมบัติเป็นอะไร

(3) ส่วนการแสดงผลลัพธ์ (Output) การคัดแยกคุณสมบัติเป็นผลมาจากใช้ชั้นซ่อนจำนวนหลายชั้นมาวิเคราะห์จนได้คำตอบแสดงผลลัพธ์การจำแนกของแต่ละภาพ เช่น ภาพสมุนไพรจีนประเภทต่างๆ



ภาพที่ 3 กระบวนการฝึกสอนแบบจำลองด้วยโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน

```

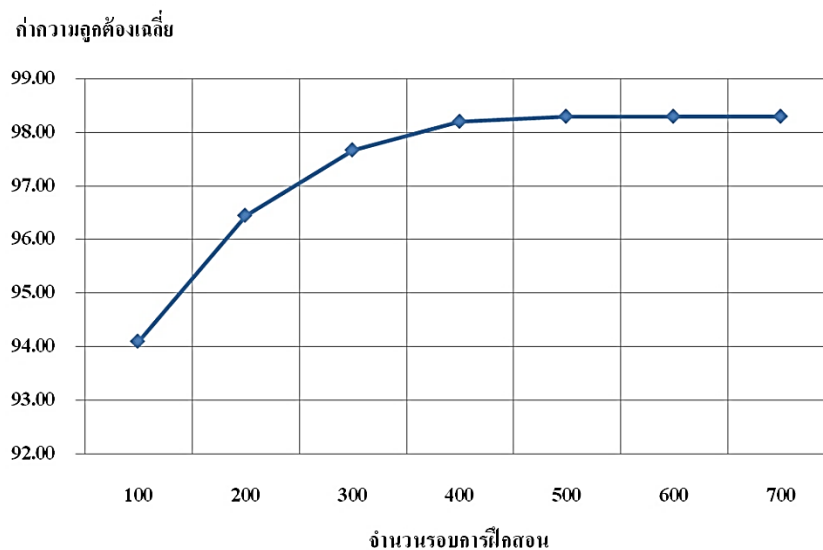
Administrator: Command Prompt
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:06.896787: Step 420: Validation accuracy = 99.0% (N=100)
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:08.461288: Step 430: Train accuracy = 100.0%
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:08.461288: Step 430: Cross entropy = 0.031563
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:08.598184: Step 430: Validation accuracy = 98.0% (N=100)
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:10.208980: Step 440: Train accuracy = 100.0%
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:10.208980: Step 440: Cross entropy = 0.032149
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:10.394081: Step 440: Validation accuracy = 96.0% (N=100)
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:12.072875: Step 450: Train accuracy = 100.0%
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:12.072875: Step 450: Cross entropy = 0.032376
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:12.244138: Step 450: Validation accuracy = 94.0% (N=100)
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:13.851675: Step 460: Train accuracy = 100.0%
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:13.851675: Step 460: Cross entropy = 0.023228
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:14.037063: Step 460: Validation accuracy = 97.0% (N=100)
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:15.758337: Step 470: Train accuracy = 100.0%
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:15.758337: Step 470: Cross entropy = 0.030292
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:15.922383: Step 470: Validation accuracy = 98.0% (N=100)
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:17.594988: Step 480: Train accuracy = 100.0%
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:17.594988: Step 480: Cross entropy = 0.030684
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:17.782787: Step 480: Validation accuracy = 99.0% (N=100)
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:19.537957: Step 490: Train accuracy = 100.0%
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:19.537957: Step 490: Cross entropy = 0.044987
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:19.678819: Step 490: Validation accuracy = 97.0% (N=100)
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:21.130443: Step 499: Train accuracy = 100.0%
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:21.130443: Step 499: Cross entropy = 0.021992
INFO:tensorflow:2020-09-29 11:24:21.310091: Step 499: Validation accuracy = 99.0% (N=100)
INFO:tensorflow:Final test accuracy = 98.3% (N=472)
INFO:tensorflow:Froze 2 variables.
Converted 2 variables to const ops.

```

ภาพที่ 4 หน้าจอการฝึกสอนและสร้างแบบจำลองด้วยภาษาไพทอน

การฝึกสอนและสร้างแบบจำลองจำแนก
สมุนไพรรจีน ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือ คือ ภาษาไพทอน
เวอร์ชัน 3.6 และไลบรารีเทนเซอร์โฟล เวอร์ชัน 2.0
ตัวอย่างการฝึกสอนข้อมูลและสร้างแบบจำลอง

แสดงในภาพที่ 4 การทดลอง ได้ทดลองฝึกสอน
แบบจำลองเริ่มตั้งแต่ 100 รอบ จนถึง 700 รอบ เพื่อ
หาค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุด (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 แผนภูมิค่าความถูกต้องเฉลี่ยของแบบจำลอง

จากภาพที่ 5 แสดงค่าความถูกต้องเฉลี่ย (Average
Accuracy) ของแบบจำลองในแต่ละรอบการฝึกสอน
มีค่าความถูกต้องเฉลี่ยที่แตกต่างกัน โดยจะเห็นได้ว่า
ค่าความถูกต้องเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเริ่มคงที่ ที่

รอบการฝึกสอนที่ 500 รอบ โดยค่าความถูกต้องเฉลี่ย
สูงสุดที่ได้เมื่อฝึกสอนโครงข่ายครบ 500 รอบ อยู่ที่
98.30% แสดงถึงประสิทธิภาพในการจำแนกภาพ

สมุนไพรรจีนโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกด้วยโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน

3. การประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง

การประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองใช้วิธีการแบ่งข้อมูลภาพทั้งหมดออกเป็นสองส่วนประกอบด้วย ชุดข้อมูลเรียนรู้และชุดข้อมูลทดสอบซึ่งข้อมูลทดสอบได้มาจากการสุ่มเลือกจากภาพประเภทสมุนไพรรจีน ซึ่งจะได้ข้อมูลจำนวน 240 ภาพ

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

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

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

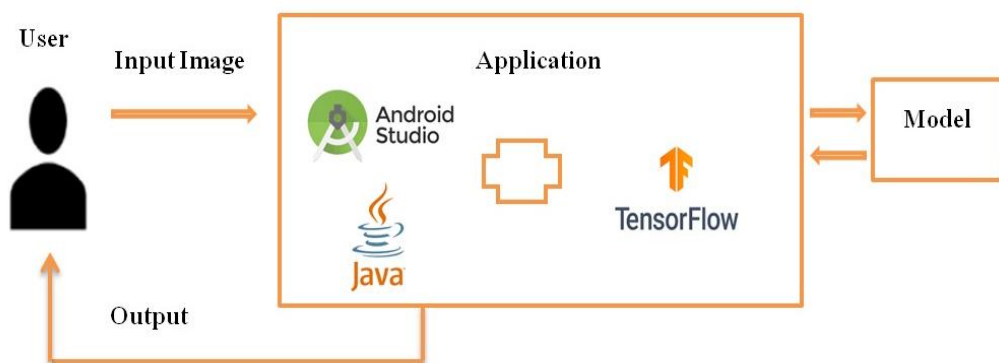
โดยที่ True Positive (TP) คือ คลาสบอกว่าจริงและทำนายว่าจริง True Negative (TN) คือ คลาสบอกว่าไม่จริงและทำนายว่าไม่จริง False Positive (FP) คือ คลาสบอกว่าจริงและทำนายว่าไม่จริง False Negative (FN) คือ คลาสบอกว่าไม่จริงและทำนายว่าจริง

4. การพัฒนาแอปพลิเคชัน

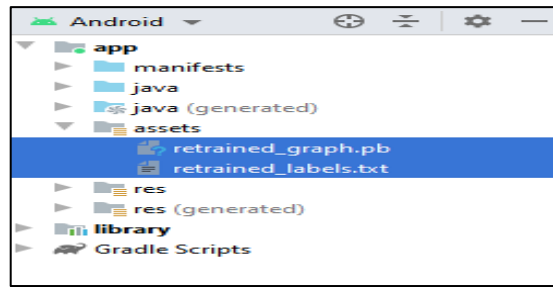
เพื่อความสะดวกต่อการนำไปใช้งานคณะผู้วิจัยได้พัฒนาระบบให้อยู่ในรูปแบบแอปพลิเคชัน

(ประเภทละ 20 ภาพ) มาทำการทดสอบและนำแบบจำลองจำแนกภาพที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วมาทดสอบค่าความถูกต้องของการทำนาย การวัดประสิทธิภาพใช้ตัวชี้วัด ได้แก่ ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ค่าความแม่นยำ (Precision) และค่าความระลึก (Recall) (Manoi *et al.*, 2019) ดังสมการที่ 1, 2 และ 3

ชั้นบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ โดยมีแผนภาพสถาปัตยกรรม ดังแสดงในภาพที่ 6 ซึ่งกำหนดให้ผู้ใช้สามารถถ่ายภาพสมุนไพรรจีนผ่านกล้องสมาร์ทโฟน จากนั้นแอปพลิเคชันจะเรียกใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อจำแนกประเภทของภาพแล้วแสดงผลลัพธ์ระบุประเภทสมุนไพรรจีนกลับมาแสดงผลบนหน้าจอสมาร์ทโฟน



ภาพที่ 6 สถาปัตยกรรมของแอปพลิเคชันจำแนกภาพสมุนไพรรจีน



ภาพที่ 7 การนำแบบจำลองเข้าใช้งานบนโปรแกรมแอนดรอยด์สตูดิโอ

เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาประกอบด้วย โปรแกรมแอนดรอยด์สตูดิโอ (Android Studio) ใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน ภาษาจาวา (Java) ใช้เขียนคำสั่งในการทำงานของแอปพลิเคชันในการสร้างส่วนการรับข้อมูลเข้าและส่งออกผลลัพธ์ผ่านหน้าจอแอปพลิเคชันและไลบรารีของเทนเซอร์โฟล ซึ่งเป็นไลบรารีของการเรียนรู้เชิงลึกเป็นส่วนของการเรียกใช้แบบจำลอง (Back-end) จำแนกภาพสมุนไพรรจีน การพัฒนาแอปพลิเคชันเป็นการนำแบบจำลองจำแนกภาพที่ได้จากขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเข้าโปรแกรมแอนดรอยด์สตูดิโอเพื่อเรียกใช้ประมวลผลในแอปพลิเคชัน ซึ่งไฟล์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองจะมีจำนวนสองไฟล์ ได้แก่ ไฟล์ `retrain_graph.pb` และไฟล์ `retrained_labels.txt` (ภาพที่ 7)

5. การทดสอบประสิทธิภาพแอปพลิเคชัน

การทดสอบประสิทธิภาพแอปพลิเคชัน ใช้วิธีการทดสอบความถูกต้องของฟังก์ชันการใช้งาน และทดสอบความแม่นยำของแอปพลิเคชันในการจำแนกภาพสมุนไพรรจีนแต่ละประเภท แล้วทำการ

วัดค่าร้อยละความถูกต้อง นอกจากนี้ยังทำการประเมินผลการใช้แอปพลิเคชันจากประชากรกลุ่มตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยกลุ่มประชากรตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยี 3 คน ผู้เชี่ยวชาญด้านสมุนไพร 1 คน และกลุ่มบุคคลทั่วไป นักศึกษา ในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งได้มาจากการสุ่มจำนวน 26 คน รวมจำนวน 30 คน ประเมินผลการใช้งานระบบเพื่อวัดระดับคุณภาพและความพึงพอใจการใช้งาน การวิเคราะห์ข้อมูลใช้หลักสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ซึ่งจะใช้ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เป็นเครื่องชี้วัดคุณภาพและความพึงพอใจโดยรวมเกณฑ์การให้คะแนนประเมินใช้ตามหลัก Likert Scale ผลการวิเคราะห์ได้วิเคราะห์จากแบบสอบถามเพื่อศึกษาคุณภาพและความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้งานแอปพลิเคชัน ซึ่งคณะผู้วิจัยได้ดำเนินการสำรวจความพึงพอใจโดยแบ่งระดับคะแนนความคิดเห็นหรือความพึงพอใจออกเป็น 5 ระดับ แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์การให้คะแนนประเมินความคิดเห็นหรือความพึงพอใจ

ระดับเกณฑ์การให้คะแนน		ความหมาย
เชิงคุณภาพ	เชิงปริมาณ	
มากที่สุด	4.51 - 5.00	มีความเหมาะสมหรือความพึงพอใจในระดับมากที่สุด
มาก	3.51 - 4.50	มีความเหมาะสมหรือความพึงพอใจในระดับมาก
ปานกลาง	2.51 - 3.50	มีความเหมาะสมหรือความพึงพอใจในระดับปานกลาง
น้อย	1.51 - 2.50	มีความเหมาะสมหรือความพึงพอใจในระดับน้อย
น้อยที่สุด	0.00 - 1.50	มีความเหมาะสมหรือความพึงพอใจในระดับน้อยที่สุด

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการวิจัย สามารถสรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ ประกอบด้วย (1) ผลการสร้างแบบจำลองจำแนกภาพสมุนไพรจีนด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (2) ผลการพัฒนาแอปพลิเคชัน และ (3) ผลการทดสอบประสิทธิภาพแอปพลิเคชัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ผลการสร้างแบบจำลองจำแนกภาพสมุนไพรจีนด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก

ผลการสร้างแบบจำลองจำแนกภาพสมุนไพรจีน โดยใช้ไลบรารีเทนเซอร์โฟลและภาษา

ไพทอนสำหรับการสร้างแบบจำลอง ซึ่งคณะผู้วิจัยได้นำชุดข้อมูลภาพจำนวน 2,160 ภาพ สำหรับเป็นชุดข้อมูลการเรียนรู้ของเครื่องและใช้ชุดข้อมูลภาพจำนวน 240 ภาพ สำหรับเป็นชุดข้อมูลทดสอบ ทดลองสร้างแบบจำลองเปรียบเทียบกับเทคนิคการจำแนก Deep Neural Network (DNN) และเทคนิคConvolutional Neural Network (CNN) วัดประสิทธิภาพแบบจำลองด้วยค่า Accuracy, Precision และ Recall ผลการทดลองแสดงดัง ตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลอง

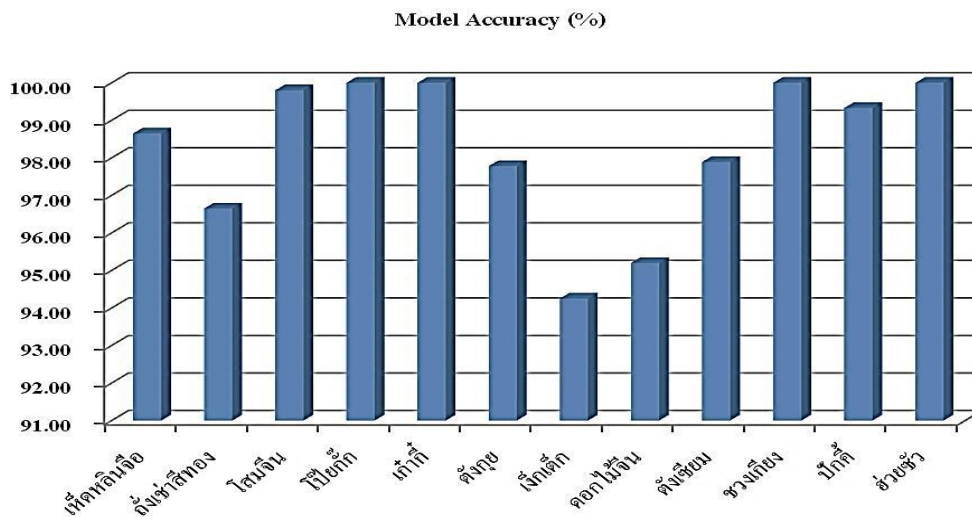
Model Name	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)
DNN	92.10	92.75	91.45
CNN	98.30	98.29	98.30

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองจำแนกภาพสมุนไพรจีน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน (CNN) มีประสิทธิภาพสูงที่สุดมีค่าความถูกต้อง (Accuracy) 98.30% ค่าความแม่นยำ (Precision) 98.29% และค่าความระลึก (Recall) 98.30% สอดคล้องกับงานวิจัย Sladojevic *et al.* (2016); Lu *et al.* (2017) ที่พบว่าแบบจำลองจากเทคนิค CNN มีความแม่นยำสูง ส่วน

แบบจำลองจากเทคนิค DNN มีค่าความถูกต้อง (Accuracy) 92.10% ค่าความแม่นยำ (Precision) 92.75% และค่าความระลึก (Recall) 91.45% ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลอง CNN ซึ่งได้ค่าประสิทธิภาพ สูงที่สุด ผลการทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน (CNN) แยกตามประเภทสมุนไพรจีน แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน

ลำดับ	สมุนไพรจีน	ข้อมูลฝึกสอน	ข้อมูลทดสอบ	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)
1	เห็ดหลินจือ	180	20	98.65	98.58	98.71
2	ถั่งเช่าสีทอง	180	20	96.65	96.65	96.65
3	โสมจีน	180	20	99.80	99.79	99.90
4	โป๊ยถัก	180	20	100.00	100.00	100.00
5	เก๋ากี้	180	20	100.00	100.00	100.00
6	ตังกุย	180	20	97.78	97.75	97.81
7	เง็กเต็ก	180	20	94.25	94.24	94.25
8	ดอกไม้อื่น	180	20	95.20	95.20	95.19
9	ตังเซียม	180	20	97.89	97.89	97.88
10	ชวงเกียง	180	20	100.00	100.00	100.00
11	ปักถั้ว	180	20	99.33	99.40	99.25
12	ฮ่วยซั่ว	180	20	100.00	100.00	100.00
	รวม	2,160	240	98.30	98.29	98.30



ภาพที่ 8 แผนภูมิแสดงค่าความถูกต้องการจำแนกสมุนไพรจีนแต่ละประเภทของแบบจำลอง

จากภาพที่ 8 แสดงผลลัพธ์การทดสอบแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก เมื่อพิจารณาจากอัตราความสำเร็จในการจำแนก (Accuracy) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการจำแนกภาพสมุนไพรจีนที่ใช้การเรียนรู้เชิงลึกด้วยโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน

มีประสิทธิภาพสูงสำหรับกระบวนการประมวลผลภาพเพื่อจำแนกภาพสมุนไพรจีน โดยผลลัพธ์การทดสอบในแต่ละประเภทสมุนไพร พบว่ารูปภาพสมุนไพรจีนที่มีอัตราความสำเร็จในการจำแนกสูงสุด 100.00% ได้แก่ โป๊ยถัก เก๋ากี้ ชวงเกียง และฮ่วยซั่ว

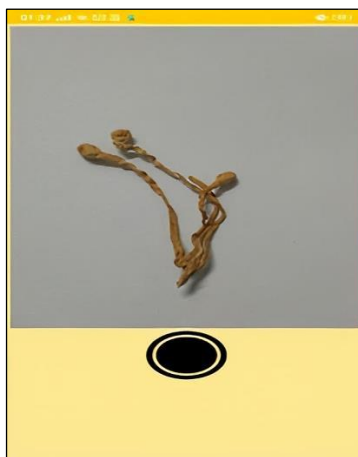
รองลงมาได้แก่ โสมจีน มีอัตราความสำเร็จในการจำแนก 99.80% และอันดับที่สาม ได้แก่ ปักคี่ มีอัตราความสำเร็จในการจำแนก 99.33% อัตราความสำเร็จในการจำแนกเฉลี่ยเท่ากับ 98.30% จากผลลัพธ์ดังกล่าวสรุปได้ แบบจำลองจำแนกภาพสมุนไพรจีนที่สร้างขึ้นโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกด้วยโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชันมีความสามารถในการจำแนกภาพสมุนไพรจีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความแม่นยำสูง สอดคล้องกับงานวิจัย Atole and Park (2018); Jmour *et al.* (2018) ที่พบว่าแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกมีความสามารถจำแนกภาพได้ดีที่สุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการจำแนกภาพแบบอัตโนมัติและใช้เวลาในการประมวลผลน้อย จึงมีความเหมาะสมสำหรับนำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น มาใช้พัฒนาแอปพลิเคชันช่วยวิเคราะห์จำแนกภาพสมุนไพรจีนแบบอัตโนมัติต่อไป

2. ผลการพัฒนาแอปพลิเคชัน

ผลการพัฒนาแอปพลิเคชันวิเคราะห์จำแนกภาพสมุนไพรจีนผ่านการถ่ายภาพจากกล้องสมาร์ทโฟน ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ มีหน้าจอหลักแสดงดังภาพที่ 9 (ก) ขั้นตอนการทำงานเริ่มจากผู้ใช้ใช้งานใช้กล้องสมาร์ทโฟนถ่ายภาพสมุนไพรจีน ดังภาพที่ 9 (ข) จากนั้นแอปพลิเคชันจะตรวจสอบประเภทสมุนไพรจีนโดยการเรียกใช้แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกตามที่ได้ฝึกสอนแบบจำลองไว้ เมื่อแบบจำลองประมวลผลภาพแล้วจะแสดงผลพร้อมเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำที่หน้าจอกลับไปให้ผู้ใช้ระบบต่อไป ดังภาพที่ 9 (ค) สมุนไพรจีนที่แอปพลิเคชันสามารถตรวจสอบได้มี 12 ประเภท ได้แก่ เห็ดหลินจือ ถั่งเช่าสีทอง โสมจีน โป๊ยเซียน เก๋ากี้ ดังกฤษ แก้วมณี ดอกไม้มื่นดัง เข็ม ขมิ้น บักคี่ และช่วยช้วน นอกจากนี้ แอปพลิเคชันยังมีแผนการให้ความรู้เกี่ยวกับสรรพคุณทางยาของสมุนไพรจีนแต่ละประเภทเพิ่มเติมด้วย แสดงดังภาพที่ 10 (ก) - (ข)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 9 (ก) หน้าจอหลักแอปพลิเคชัน (ข) หน้าจอการถ่ายภาพ และ (ค) หน้าจอผลลัพธ์การวิเคราะห์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 10 (ก) หน้าจอเมนูรายการสมุนไพรจีน และ (ข) หน้าจอข้อมูลเกี่ยวกับสมุนไพรจีน

จากผลการพัฒนาแอปพลิเคชัน พบว่าแอปพลิเคชันสามารถจำแนกและระบุภาพสมุนไพรจีนแต่ละภาพได้ แบบอัตโนมัติ ซึ่งจะช่วยอำนวยความสะดวกให้ผู้ใช้งานสามารถถ่ายภาพและวิเคราะห์ประเภทสมุนไพรจีนด้วยตนเองเบื้องต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว

3. ผลการทดสอบประสิทธิภาพแอปพลิเคชัน

การทดสอบประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน ได้แยกการทดลองไว้ 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันที่นำเสนอด้วยการหาค่าความถูกต้องของการเรียนรู้ภาพของแอปพลิเคชัน ส่วนที่ 2 เป็นการประเมินการใช้งานระบบจากกลุ่มตัวอย่าง ผลการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

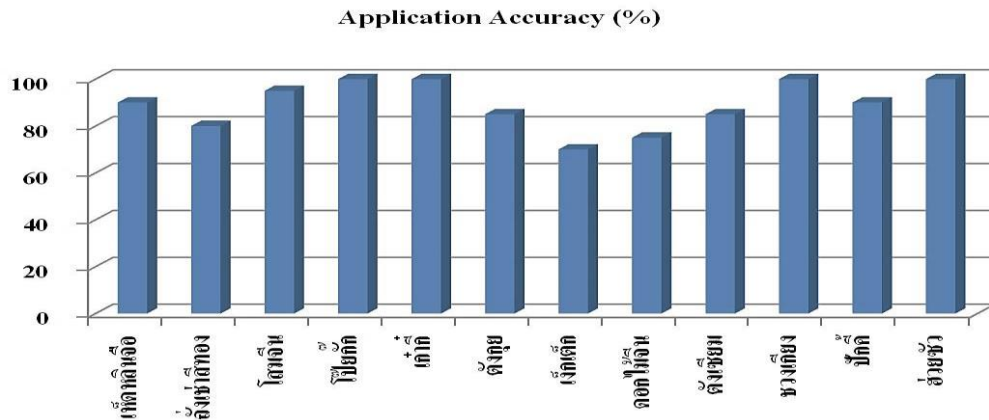
3.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน

การทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกสมุนไพรจีน ซึ่งเป็นการทดสอบถ่ายภาพสมุนไพรจีน

ผ่านกล้องสมาร์ตโฟน โดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบ (Validate Data Set) จำนวน 240 ภาพ ประกอบด้วยภาพสมุนไพรจีนประเภทละ 20 ภาพ จากผลการบันทึกการทดลองตารางที่ 5 โดยสรุปค่าเฉลี่ยความถูกต้องของการจำแนกภาพสมุนไพรจีนทั้ง 12 ประเภทเท่ากับ 89.17% ซึ่งมีประสิทธิภาพความแม่นยำอยู่ในระดับดี สอดคล้องกับงานวิจัย Muneer and Fati (2020) ซึ่งพบว่าแอปพลิเคชันสำหรับจำแนกภาพจากแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก มีความสามารถในการจำแนกภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ สมุนไพรจีนที่แอปพลิเคชันสามารถทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด ได้แก่ โป๊ยกั๊ก เก้าอี้ ชวงเกียงและฮ่วยซัว ได้ค่าความถูกต้อง 100.00% รองลงมาได้แก่ โสมจีน จำแนกได้ถูกต้อง 95.00% อันดับที่สาม ได้แก่ เห็ดหลินจือและบักกี้ จำแนกได้ค่าความถูกต้อง 90.00% ส่วนสมุนไพรจีนที่จำแนกได้ถูกต้องน้อยที่สุด ได้แก่ เฉากี้ ค่าความถูกต้องเท่ากับ 70.00% รายละเอียดดังภาพที่ 11

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพแอปพลิเคชัน

ลำดับ	สมุนไพรจีน	จำนวนภาพที่ใช้ทดสอบ	จำนวนภาพที่ตรวจสอบถูกต้อง	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)	ค่าความถูกต้อง (%)
1	เห็ดหลินจือ	20	18	10.00	90.00
2	ถั่งเช่าสีทอง	20	16	20.00	80.00
3	โสมจีน	20	19	5.00	95.00
4	โป๊ยก๊ิก	20	20	0.00	100.00
5	เก๋ากี้	20	20	0.00	100.00
6	ตังกุย	20	17	15.00	85.00
7	เง็กเต็ก	20	14	30.00	70.00
8	ดอกไม้วิน	20	15	25.00	75.00
9	ตังเซียม	20	17	15.00	85.00
10	ชวงเกียง	20	20	0.00	100.00
11	ปักกี้	20	18	10.00	90.00
12	ฮ่วยซัว	20	20	0.00	100.00
	รวม	240	214	10.83	89.17



ภาพที่ 11 แผนภูมิแสดงค่าความถูกต้องการจำแนกสมุนไพรจีนแต่ละประเภทของแอปพลิเคชัน

ซึ่งการจำแนกที่ผิดพลาดเนื่องจาก ภาพสมุนไพรจีนเง็กเต็ก มีลักษณะสีส้มและรูปทรงคล้ายคลึงกับภาพสมุนไพรจีนตังกุย จึงทำให้มีบางภาพของสมุนไพรจีนเง็กเต็ก ถูกจำแนกเป็นสมุนไพรจีนตังกุย ค่าความถูกต้องการจำแนกจึงต่ำกว่าสมุนไพรจีนประเภทอื่นๆ ในทางตรงกันข้ามสมุนไพรจีนโป๊ยก๊ิก เก๋ากี้ ชวงเกียงและฮ่วยซัว มี

ลักษณะที่แตกต่างจากสมุนไพรจีนอื่นๆ อย่างชัดเจน จึงทำให้แอปพลิเคชันสามารถจำแนกลักษณะของสมุนไพรจีนได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากกว่า นอกจากนี้ จากการนำแอปพลิเคชันไปใช้จริง พบข้อสังเกตว่าแสงสว่างของภาพและฉากหลังของภาพก็มีผลต่อความถูกต้องในการจำแนกภาพ เช่น จากการทดลองภาพสมุนไพรจีนเง็กเต็ก ซึ่งได้ค่าความถูก

ต้องการจำแนกน้อยที่สุด นอกจากภาพสมุนไพรรจีนเง็กเต็กจะมีลักษณะสีสันและรูปทรงใกล้เคียงกับสมุนไพรรจีนดงอยู่แล้ว ภาพสมุนไพรรจีนเง็กเต็กยังมีสีขาวกลมกลืนกับฉากหลัง และความสว่างที่ภาพมีมากขึ้นไปส่งผลให้แอปพลิเคชันจำแนกภาพคลาดเคลื่อนได้ โดยงานวิจัยของ Butploy and Boonying (2020) พบข้อสังเกตเดียวกัน คือ แสงสว่างและฉากหลังของภาพ มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพความแม่นยำในการจำแนกภาพของแอปพลิเคชัน

3.2 ผลการประเมินการใช้งานระบบ

การประเมินการใช้งานระบบพิจารณาทั้งในเชิงคุณภาพผ่านความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญ และเชิง

ปริมาณผ่านการใช้แบบประเมินความพึงพอใจ การประเมินคุณภาพระบบที่พัฒนาขึ้นได้นำไปประเมินคุณภาพกับผู้เชี่ยวชาญจำนวน 4 คน ได้แก่ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยี 3 คน และผู้เชี่ยวชาญด้านสมุนไพรรจีน 1 คน ด้วยแบบสอบถามประเมินคุณภาพ ผลการประเมินคุณภาพระบบจากผู้เชี่ยวชาญโดยภาพรวมอยู่ในระดับเหมาะสมมาก มีค่าเฉลี่ย 4.42 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.55 รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการประเมินคุณภาพระบบจากผู้เชี่ยวชาญ

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D	การแปลผล
1. คุณภาพด้านเนื้อหา	4.50	0.50	มาก
2. คุณภาพด้านการออกแบบ	4.75	0.43	มากที่สุด
3. คุณภาพด้านการใช้งาน	4.00	0.71	มาก
เฉลี่ย	4.42	0.55	มาก

ตารางที่ 7 ผลการประเมินการใช้งานระบบจากผู้ใช้งาน

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D	การแปลผล
1. ด้านการทำงานได้ตามฟังก์ชันการใช้งาน	4.23	0.50	มาก
2. ด้านตรงความต้องการของผู้ใช้	4.10	0.54	มาก
3. ด้านความสะดวกในการใช้งาน	4.37	0.48	มาก
เฉลี่ย	4.23	0.51	มาก

จากตารางที่ 7 การประเมินการใช้งานระบบโดยผู้ใช้งาน พบว่าระบบมีผลการประเมินเฉลี่ยเท่ากับ 4.23 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.51 ซึ่งมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก โดยผลการประเมินด้านความสะดวกในการใช้งานมีค่ามากที่สุด ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.37 ซึ่งเกิดจากความสามารถของแอปพลิเคชันที่มีส่วนช่วยในการจำแนกภาพสมุนไพรรจีนได้

อย่างรวดเร็ว สามารถทราบผลลัพธ์ได้ทันที โดยไม่ต้องเสียเวลาในการสืบค้นข้อมูล สอดคล้องกับงานวิจัยของ Petagon and Pantho (2020) ผลการประเมินความพึงพอใจของแอปพลิเคชันจากผู้ใช้งานอยู่ในระดับเหมาะสมมาก แสดงให้เห็นว่าแอปพลิเคชันนี้สามารถช่วยในการอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์จำแนกภาพสมุนไพรรจีนได้เป็นอย่างดี

งานวิจัยนี้ได้นำภาพสมุนไพรจีนประมวลผลภาพด้วยหลักการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับจำแนกภาพสมุนไพรจีน จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการสร้างแบบจำลองด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน มีความแม่นยำมากกว่าหลักการ Machine Learning ที่ใช้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยจากตารางที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละวิธี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเรียนรู้เชิงลึกด้วยโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน (CNN) ได้ค่าความถูกต้องสูงสุด 98.30% ในขณะที่ค่าความถูกต้องของ Machine Learning ด้วยเทคนิค DNN ได้ค่าความถูกต้อง 92.10% สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่นำเสนอโดย Gatica et al. (2013) ซึ่งใช้เทคนิค DNN สร้างแบบจำลองและได้ค่าความถูกต้อง 97.00%

สรุป

ผลงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงประยุกต์มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบจำแนกภาพสมุนไพรจีนผ่านแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ ผลการวิจัยพบว่า (1) แบบจำลองจำแนกภาพจากโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน มีความสามารถในการจำแนกภาพสมุนไพรจีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยได้ค่าความถูกต้อง 98.30% ค่าความแม่นยำ 98.29% ค่าความระลึกลับ 98.30% (2) ผลการพัฒนาแอปพลิเคชัน พบว่าแอปพลิเคชันสามารถจำแนกและระบุภาพสมุนไพรจีนแต่ละภาพได้แบบอัตโนมัติ และ (3) ผลการประเมินแอปพลิเคชันกับชุดข้อมูลทดสอบ จำนวน 240 ภาพ พบว่าแอปพลิเคชันสามารถจำแนกภาพและระบุประเภทสมุนไพรจีนคิดเป็นร้อยละความถูกต้องเฉลี่ย 89.17% ซึ่งมีความแม่นยำที่สูง ส่วนผลการประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ พบว่าคุณภาพของระบบอยู่ในระดับ มีความเหมาะสมมาก และผลการประเมินความพึงพอใจระบบจากกลุ่มตัวอย่างที่มีต่อแอปพลิเคชัน

จำแนกภาพสมุนไพรจีนที่พัฒนาขึ้น พบว่าความพึงพอใจโดยรวมของกลุ่มตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.23 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าแอปพลิเคชันที่นำเสนอมีประสิทธิภาพ มีความแม่นยำสูง บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในการช่วยวิเคราะห์จำแนกสมุนไพรจีนได้อย่างสะดวกรวดเร็ว ง่ายต่อการใช้งานและมีประสิทธิภาพ สามารถช่วยวิเคราะห์จำแนกสมุนไพรจีนจากภาพถ่ายด้วยตัวเองเบื้องต้นได้อย่างเหมาะสม

แนวทางการพัฒนาในอนาคต ได้แก่ การรวบรวมและเตรียมข้อมูลกลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสม และมีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น รวมไปถึงการใช้กล้องสมาร์ตโฟนในการถ่ายภาพ ต้องใช้องค์ประกอบของแสงที่เหมาะสม การตั้งค่าต่างๆ ของกล้อง เพื่อให้ได้ภาพที่คมชัดที่สุด และศึกษาเทคนิควิธีการเรียนรู้เชิงลึกแบบอื่นๆ เพิ่มเติม จะทำให้ผลการทดสอบแอปพลิเคชันมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Atole, R. and Park, D. 2018. A Multiclass Deep Convolutional Neural Network Classifier for Detection of Common Rice Plant Anomalies. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications** 9(1): 67-70.
- Boonkidram, S. and Sriwiboon, N. 2020. Physical Quality Investigation of Germinated Brown Rice by using Image Processing. **Journal of Information Science and Technology** 10(2): 101-109. (in Thai)
- Butploy, N. and Boonying, S. 2020. Classification of Benjapakee Buddha amulets image by deep learning. **RMUTSB Academic Journal** 8(1): 100-111. (in Thai)

- Carrio, A., Sampedro, C., Rodriguez-Ramos, A. and Campoy, P. 2017. A Review of Deep Learning Methods and Applications for Unmanned Aerial Vehicles. **Journal of Sensors** 2017(1): 1-13.
- Gaticaa, G., Bestb, S., Ceronic, J. and Lefranc, G. 2013. Olive fruits recognition using neural networks. **Procedia Computer Science** 2013(17): 412-419.
- Health Book Editor. 2013. **The miracle of Chinese herbs for treat disease and health care.** 1st ed. Se-education, Bangkok. (in Thai)
- Huachiew Traditional Chinese Medicine Clinic. 2021. **What is Traditional Chinese medicine?.** Huachiew Traditional Chinese Medicine. Available Source: <https://www.huachiewtcm.com>, September 9, 2021. (in Thai)
- Jmour, N., Zayen, S. and Abdelkrim, A. 2018. Convolutional neural networks for image classification, pp. 397-402. *In Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Systems and Electrical Technologies.* ASET Association, Hammamet.
- Lim, G. and Chuah, J. 2018. Durian types recognition using deep learning techniques, pp. 183-187. *In Proceedings of IEEE Control and System Graduate Research Colloquium.* University Technology Mara, Shah Alam.
- Lu, Y., Yi, S., Zeng, N., Liu, Y. and Zhang, Y. 2017. Identification of rice diseases using deep convolutional neural networks. **Neurocomputing** 2017(267): 378-384.
- Manoi, N., Bunjanda, A. and Rattanapoka, C. 2019. A System for Cooking Recipe Sharing and Cooking Recipe Finding by an Image of Ingredients using Deep Learning Technique. **The Journal of Industrial Technology** 15(2): 97-111. (in Thai)
- Muneer, A. and Fati, S. 2020. Efficient and Automated Herbs Classification Approach Based on Shape and Texture Features using Deep Learning. **IEEE Access** 8(1): 196747-196764.
- Petagon, R. and Pantho, O. 2020. Drone for Detecting Forest Fires using Deep Learning Technique. **The Sripatum Review of Science and Technology** 12(1): 65-78. (in Thai)
- Sanuksan, J. and Surinta, O. 2019. Deep Convolutional Neural Networks for Plant Recognition in the Natural Environment. **Journal of Science and Technology Mahasarakham University** 38(2): 113-124. (in Thai)
- Sladojevic, S., Arsenovic, M., Anderla, A., Culibrk, D. and Stefanovic, D. 2016. Deep Neural Networks Based Recognition of Plant Diseases by Leaf Image Classification. **Computational Intelligence and Neuroscience** 2016(1): 1-11.
- Verma, A., Singh, P. and Alex, J. 2019. Modified Convolution Neural Network Architecture Analysis for Facial Emotion Recognition, pp. 169-173. *In Proceedings of the 2019 International Conference on Systems, Signals and Image Processing.* University of Osijek, Osijek.
- Wannawibul, P. 2012. **Know choose know use 100 Chinese herbs.** 1st ed. Thongkasem Publishing, Bangkok. (in Thai)

ดัชนีที่เหมาะสมสำหรับการสำรวจพื้นที่ชุ่มน้ำด้วยข้อมูลจากระยะไกล

Suitable Index for Wetland Monitoring Using Remote Sensing Data

เจนจิรา พิบูลย์ และ ดรณวรรณ กำธรเกียรติ*

Chanechira Piboon and Daroonwan Kamthonkiat*

Received: 25 April 2021, Revised: 20 October 2021, Accepted: 4 January 2022

บทคัดย่อ

การขาดแคลนแรงงาน งบประมาณ และเทคโนโลยีในการสำรวจพื้นที่ชุ่มน้ำได้อย่างรวดเร็ว นั้น เป็นอุปสรรคสำคัญในการอนุรักษ์และบริหารจัดการทรัพยากรภายในพื้นที่ชุ่มน้ำ การศึกษาดัชนีที่เหมาะสมในการสำรวจพื้นที่ชุ่มน้ำจากข้อมูลการรับรู้จากระยะไกลสามารถลดข้อจำกัดข้างต้นได้ โดยใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียมแลนด์แซท 8 ที่เข้าถึงได้ง่ายและไม่มีค่าใช้จ่ายมาประยุกต์เป็นดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพื้นที่ชุ่มน้ำ 5 ดัชนี ได้แก่ Normalized Difference Water Index (NDWI) Modification of Normalized Difference Water Index (MNDWI) Tasseled-cap Wetness Index (TCWI) Normalized Suspended Material Index (NSMI) และ Normalized Difference Suspended Sediment Index (NDSSI) ซึ่งจะนำมาจำแนกสิ่งปกคลุมดิน 6 ประเภท ได้แก่ พืชหนาแน่นมาก พืชหนาแน่นน้อย น้ำใส น้ำมีตะกอนน้อย น้ำมีตะกอนมาก และป่าไม้รวมถึงพื้นที่โดยรอบภายในเขตอุทยานแห่งชาติเขาสามร้อยยอด จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ผลการจำแนกสิ่งปกคลุมดินของแต่ละดัชนีถูกนำมาเปรียบเทียบความสอดคล้องด้วยสายตา โดยแบ่งพื้นที่เป็น 3 โซนหลัก คือ โซน A แหล่งน้ำ โซน B พืช และโซน C พื้นที่ป่าไม้และบริเวณโดยรอบ และเพิ่มการตรวจสอบความแม่นยำในการจำแนกด้วยวิธี Confusion matrix กับข้อมูลจากฐานข้อมูล Google Earth และการสำรวจภาคสนามเพื่อให้ได้ค่าความแม่นยำโดยรวมและสัมประสิทธิ์แคปป่าที่สะท้อนความแม่นยำของผลลัพธ์ ผลการศึกษพบว่า ดัชนี NDWI มีสิ่งปกคลุมดินทั้ง 3 โซนสอดคล้องกับแหล่งอ้างอิง และมีค่าความแม่นยำโดยรวมร้อยละ 73.8 และสัมประสิทธิ์แคปป่าเท่ากับ 0.68 จึงเป็นดัชนีที่มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือที่สุด ในขณะที่ดัชนี MNDWI ดัชนี TCWI ดัชนี NSMI และดัชนี NDSSI มีการจำแนกป่าไม้และพืชบนบกผิดไปเป็นแหล่งน้ำและพืชอย่างชัดเจนบริเวณโซน B และ C อีกทั้งยังมีค่าความแม่นยำในการจำแนกโดยรวมต่ำกว่าร้อยละ 70 และสัมประสิทธิ์แคปป่าน้อยกว่า 0.5 ซึ่งมีความแม่นยำต่ำกว่ามาตรฐาน สรุปได้ว่า ดัชนี NDWI จากภาพถ่ายจากดาวเทียมแลนด์แซท 8 มีศักยภาพดีและใช้งบประมาณน้อย เหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาเป็นเครื่องมือติดตามสถานะของสิ่งปกคลุมดินในพื้นที่ศึกษานี้และพื้นที่ชุ่มน้ำอื่นๆ แบบหลายช่วงเวลาหรืออย่างต่อเนื่องได้

คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อำเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12121

Faculty of Liberal Arts, Thammasat University, Khlong Luang, Pathum Thani 12121, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): daroonwan.k@arts.tu.ac.th

คำสำคัญ: ดัชนีพื้นที่ชุ่มน้ำ, การสำรวจจากระยะไกล, แลนด์แซท 8, สามร้อยยอด

ABSTRACT

Lack of labor, budget and technology for short time monitoring of wetland conditions has become a major obstacle to sustainable management and conservation of wetlands. A study of the most suitable index for wetland monitoring is using free and easily accessible satellite images from LANDSAT 8 to overcome the mentioned limitations. Five wetland related indices, namely Normalized Difference Water Index (NDWI), Modification of Normalized Difference Water Index (MNDWI), Tasseled-cap Wetness Index (TCWI), Normalized Suspended Material Index (NSMI) and Normalized Difference Suspended Sediment Index (NDSSI) were assessed to classify 6 land covers: high density aquatic-plant, low density aquatic-plant, clear water, low turbidity water, high turbidity water, and forest area in wetland and vicinity areas of Khao Sam Roi Yod National Park in Prachuab Kirikhan Province. For validation of the results, the study area has been divided into 3 zones: water or Zone A, aquatic-plant or Zone B, and forest (including terrestrial plants and others) or Zone C, simple corresponding between land covers in the classified results and the study area were then visually observed. Additional process of accuracy assessment (confusion matrix) using the data from Google Earth database and field survey has been conducted, the derived overall accuracy and kappa coefficient of each result refer to its accuracy. The results showed that only the classification of NDWI presented high correspondence to zonal comparison and calculated accuracy (73.8% of overall accuracy and 0.68 of kappa coefficient). Whereas MNDWI, TCWI, NSMI, and NDSSI showed high confusion in the zones of forest (Zone C) and aquatic-plants (Zone B), and failed to the standard of accuracy with less than 70% of overall accuracy and less than 0.5 of kappa coefficient. In conclusion, NDWI from LANDSAT 8 is a good option and low budgetary for multi-temporal or continuous monitoring in the study area and other wetlands.

Key words: wetland index, remote sensing, LANDSAT 8, Sam Roi Yod

บทนำ

พื้นที่ชุ่มน้ำมีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ภายในระบบนิเวศนั้น และยังเป็นแหล่งทรัพยากรทางธรรมชาติที่เอื้อประโยชน์ต่อมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม การสำรวจพื้นที่ชุ่มน้ำขนาดใหญ่ มักทำได้ล่าช้าจากข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ จำนวนเจ้าหน้าที่หรือผู้ที่มีหน้าที่รับผิดชอบ และงบประมาณที่ใช้ในการทำงานมีจำกัด การสำรวจจากระยะไกล

ด้วยอากาศยานหรือดาวเทียมเป็นวิธีที่ช่วยให้ได้ข้อมูลภาพรวมหรือสิ่งปกคลุมดินในพื้นที่ขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดค่าใช้จ่ายและระยะเวลา มากกว่าหากเปรียบเทียบกับการใช้แรงงานคน โดยมีการศึกษาที่ประยุกต์ภาพถ่ายจากดาวเทียมในการวิเคราะห์สภาพแวดล้อมหรือสถานะความสมบูรณ์ของแหล่งน้ำ พืชบริเวณปากแม่น้ำและพื้นที่ชุ่มน้ำหลายกรณี หากพิจารณาในช่วงไม่เกิน 5 ปีที่ผ่านมา

พบว่า Lv *et al.* (2019) ใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT ระหว่าง พ.ศ. 2532 ถึง 2558 เพื่อติดตามการสูญเสียพื้นที่ชุ่มน้ำในเขตเมืองใหม่สงอัน (Xiong'an New Area) ประเทศจีน มีการประยุกต์ดัชนีแสดงความแตกต่างของพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) ดัชนีแสดงความแตกต่างของน้ำ (Normalized Difference Water Index: NDWI) และดัชนีติดตามความชื้นดิน (Soil Moisture Monitoring Index: SMMI) มาใช้ในการวิเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่า ระหว่าง พ.ศ. 2532 ถึง 2558 พื้นที่ชุ่มน้ำลดลง 40.94 ตารางกิโลเมตร (13.84%) ซึ่งมีผลมาจากการขาดแคลนน้ำในบางบริเวณของพื้นที่ชุ่มน้ำและส่งผลต่อความชื้นดินที่ลดลง ทำให้พืชน้ำไม่สามารถเจริญเติบโตได้ จึงถูกแทนที่ด้วยพืชชนิดอื่นๆ ในขณะที่ Shahzad *et al.* (2018) ใช้ภาพแบนด์ที่ 1 (blue: 450-520 nm) แบนด์ที่ 2 (green: 520-600 nm) แบนด์ที่ 3 (red: 630-690 nm) และแบนด์ที่ 5 (shortwave infrared: 1550-1750 nm) ของดาวเทียม LANDSAT 7 ระบบ Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) และดัชนี Normalized Difference Suspended Sediment Index (NDSSI) ศึกษาตะกอนแขวนลอยในน้ำ (Suspended Solids Concentration - SSC) บริเวณปากแม่น้ำในเขตอุตสาหกรรมทางตอนใต้ของประเทศปากีสถาน (Indus Delta Region, south of Pakistan) โดยผลการวิเคราะห์ SSC ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าตะกอนที่ตรวจวัดในวันที่ตรงกับการบินภาพของดาวเทียม ผลการศึกษาแสดงค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างชุดข้อมูลทั้งสองเท่ากับ 0.88 ซึ่งดัชนี NDSSI สามารถช่วยให้ผลการวิเคราะห์ค่า SSC มีความแม่นยำมากขึ้น ส่วน Arisanty and Saputra (2017) ได้ศึกษาการหมุนเวียนของตะกอนแขวนลอยบริเวณปากแม่น้ำบาริโต (Barito Delta) ซึ่งได้รับอิทธิพลจากการทำการเกษตร การทำเหมืองแร่ และการลักลอบตัดไม้ในพื้นที่ดังกล่าว การศึกษานี้ใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT 7

ใน พ.ศ. 2554 (ค.ศ. 2011) ที่บันทึกในช่วงหน้าฝนและหน้าแล้งมาวิเคราะห์ด้วย 3 วิธี คือ Normalized Suspended Material Index (NSMI) Normalized Differences Suspended Sediment Index (NDSSI) และการหาสัดส่วนแบนด์ (Green/Blue) และนำค่าตะกอนที่วิเคราะห์จากภาพดัชนีทั้งหมดมาหาความสัมพันธ์กับปริมาณตะกอนที่ตรวจวัดจริงในพื้นที่ศึกษา ผลการศึกษาพบว่า ตะกอนในน้ำที่วิเคราะห์จากดัชนี NSMI มีความสัมพันธ์กับค่าตะกอนที่ตรวจวัดจริงมากที่สุด

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาของ Blackmore (2016) ที่เปรียบเทียบดัชนี Normalized Difference Water Index (NDWI) และดัชนีที่ปรับปรุงจาก NDWI เรียกว่า Modified NDWI (MNDWI) ที่วิเคราะห์จากภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT 8 ระบบ OLI โดยใช้วิเคราะห์พื้นที่น้ำและความชื้นดินบริเวณพื้นที่ชุ่มน้ำและแหล่งน้ำโดยรอบที่อยู่ในพื้นที่ลุ่มแม่น้ำทาลาติน (Tualatin River Basin) ผลการศึกษาพบว่า ดัชนี MNDWI สามารถจำแนกพื้นที่แหล่งน้ำขนาดใหญ่ได้อย่างชัดเจน สามารถวิเคราะห์ความชื้นและความแห้งแล้งของพื้นที่ได้ดี ในขณะที่ดัชนี NDWI จะมีปฏิสัมพันธ์กับพื้นที่ที่มีพืชปกคลุมมากกว่า โดย Blackmore (2016) ได้สรุปว่า การใช้ดัชนีจากภาพถ่ายจากดาวเทียมจะเป็นวิธีที่ประหยัดที่สามารถให้ข้อมูลความชื้นและรายละเอียดของพื้นที่ ซึ่งมีประโยชน์โดยตรงต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ชุ่มน้ำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่วนการศึกษาของ Sarun *et al.* (2016) ได้ประยุกต์ดัชนี Normalized Difference Water Index (NDWI) ดัชนี Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) และดัชนี Tasseled Cap Wetness (TCWI) จากภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT 7 ระบบ Enhanced Thematic Mapping Plus (ETM+) ร่วมกับข้อมูลภูมิประเทศ ชื่อ Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital

Elevation Model (GDEM) หรือมักเรียกว่า ASTER GDEM ที่ผลิตภายใต้ความร่วมมือระหว่างประเทศญี่ปุ่น (The Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI) of Japan) และสหรัฐอเมริกา (The United States National Aeronautics and Space Administration: NASA) เพื่อจำแนกพื้นที่ชุ่มน้ำที่อยู่ทางตอนใต้ของรัฐเกรละ ประเทศอินเดียในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากคลื่นสึนามิใน พ.ศ. 2547 งานวิจัยนี้ใช้วิธีแบ่งช่วงค่าข้อมูลของพื้นที่ชุ่มน้ำในดัชนีทั้ง 3 ข้างต้น โดยเน้นบริเวณที่ราบลุ่มจากข้อมูล ASTER GDEM โดยพื้นที่ชุ่มน้ำของแต่ละดัชนีจะถูกนำมารวมกัน (Union) ผลการศึกษาพบว่า มีพื้นที่ชุ่มน้ำคงเหลือร้อยละ 23 ของพื้นที่ศึกษา (103 ตารางกิโลเมตร) โดยมีการสรุปว่าการใช้ดัชนีทั้ง 3 ร่วมกับข้อมูลภูมิประเทศให้ผลการจำแนกพื้นที่ชุ่มน้ำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ในขณะที่งานของ Tang *et al.* (2016) มีการวิเคราะห์สถานการณ์น้ำท่วมระหว่าง พ.ศ. 2528 ถึง 2558 ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ชุ่มน้ำพลาซาในมลรัฐเนบราสก้า (Nebraska playa wetland) ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT และ Google Earth Engine (GEE) มีการใช้ดัชนี 4 อย่าง คือ ดัชนี Negative Normalized Vegetation Index (NNVI) ดัชนี NDWI ดัชนี MNDWI ดัชนี Tasseled Cap Wetness-Greenness Difference (TCWGD) ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ 176.79 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 18.92 ของพื้นที่ชุ่มน้ำแห่งนี้ถูกน้ำท่วม โดย TCWGD เป็นดัชนีที่เหมาะสมกับการศึกษาสถานการณ์น้ำท่วมในพื้นที่ศึกษามากที่สุด ส่วน Mozumder *et al.* (2014) ได้ศึกษาระบบนิเวศน์ของพื้นที่ชุ่มน้ำแรมซาร์สำคัญในลุ่มแม่น้ำพรหมบุตร ชื่อว่า Deepor Beel ตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศอินเดีย โดยใช้ดัชนี NDWI ดัชนี MNDWI ดัชนี Normalized Difference Pond Index (NDPI) และดัชนี Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) จากภาพถ่ายจากดาวเทียม

LANDSAT พ.ศ. 2532 พ.ศ. 2544 และ พ.ศ. 2555 ร่วมกับข้อมูลเกี่ยวกับพื้นที่ศึกษา มาวิเคราะห์แบบ rule-based เพื่อจำแนกสิ่งปกคลุมดินหลักๆ ของพื้นที่ชุ่มน้ำเป้าหมาย ผลการศึกษาพบว่า ดัชนีข้างต้นสามารถจำแนกพื้นที่น้ำได้ดี และพบการลดลงของพื้นที่ชุ่มน้ำซึ่งเป็นผลมาจากการก่อสร้างทางรถไฟ การปล่อยน้ำเสีย และการขยายพื้นที่เพาะปลูกโดยรอบ รวมถึงการเข้าไปตั้งถิ่นฐานภายในพื้นที่ชุ่มน้ำอย่างผิดกฎหมาย และในการศึกษาของ Sun *et al.* (2012) ได้ประยุกต์ดัชนี Enhanced Vegetation Index (EVI) และดัชนี Tasseled Cap wetness index (TCWI) จากภาพถ่ายจากดาวเทียม Terra/Aqua ระบบ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) เพื่อศึกษาความสมบูรณ์หรือสถานะของพื้นที่ชุ่มน้ำที่อยู่ในลุ่มน้ำโซยเก (Zoige Basin) มณฑลเสฉวน ประเทศจีน ที่ยังขาดการสำรวจข้อมูลสถานะของพืชหรือความสมบูรณ์ของพื้นที่ชุ่มน้ำและบริเวณใกล้เคียง อีกทั้งยังประสบปัญหาการทำปศุสัตว์จำนวนมากในพื้นที่ โดยชันและคณะ ระบุว่า ดัชนี EVI และดัชนี TCWI ให้ผลการวิเคราะห์ความสมบูรณ์และสถานะของพื้นที่ชุ่มน้ำและบริเวณใกล้เคียงที่น่าเชื่อถือ

จากการศึกษาข้างต้น มีการประยุกต์ดัชนีจากภาพถ่ายจากดาวเทียมหลายวิธีในการวิเคราะห์สภาพแวดล้อมหรือสถานะความสมบูรณ์ของแหล่งน้ำ พืชบริเวณปากแม่น้ำ และพื้นที่ชุ่มน้ำ อย่างไรก็ตาม ยังไม่สามารถสรุปได้ว่า ดัชนีใดมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการวิเคราะห์ความหลากหลายของสิ่งปกคลุมดินภายในพื้นที่ชุ่มน้ำ จึงเป็นที่มาของการศึกษานี้ ที่ประยุกต์ดัชนีจากภาพถ่ายจากดาวเทียมที่มีบทบาทในการศึกษาเกี่ยวกับพื้นที่ชุ่มน้ำ มาใช้วิเคราะห์สิ่งปกคลุมดินภายในพื้นที่ชุ่มน้ำของอุทยานแห่งชาติเขาสามร้อยยอด และตอบคำถามการวิจัย คือ ดัชนีใดสามารถวิเคราะห์สิ่งปกคลุมดินภายในพื้นที่ชุ่มน้ำเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่ง

แนวทางการวิเคราะห์และผลจากการศึกษานี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการสนับสนุนงานด้านการสำรวจพื้นที่ชุ่มน้ำให้แก่หน่วยงานในสังกัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม หรือหน่วยงานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ นอกจากการประยุกต์ภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT 8 ที่ใช้ในการศึกษานี้แล้ว ยังมีผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่มีคุณสมบัติเชิงคลื่น เชิงพื้นที่ และเชิงเวลาเหมาะสมที่อาจพิจารณานำมาใช้สำรวจหรือประยุกต์สำหรับติดตามสภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำเพิ่มเติมได้ และหากเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถเข้าถึงได้แบบไม่มีค่าใช้จ่าย ก็จะช่วยประหยัดงบประมาณในการจัดซื้อข้อมูล จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นเครื่องมือในการสำรวจพื้นที่ชุ่มน้ำอย่างต่อเนื่องหรือหลายช่วงเวลา เพื่อประโยชน์ในการอนุรักษ์ทรัพยากรหรือระบบนิเวศภายในพื้นที่ชุ่มน้ำได้อย่างยั่งยืน

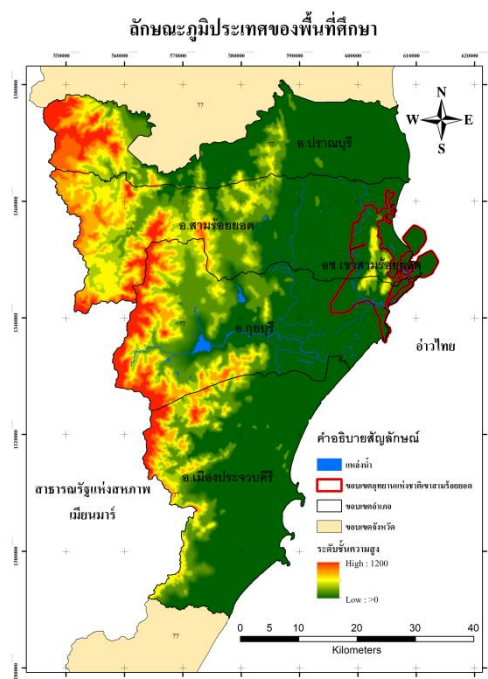
(Rapinel *et al.*, 2019; Ngwenya and Marambanyika, 2021)

วิธีการดำเนินการวิจัย

ประกอบด้วยเนื้อหา 3 ส่วน คือ พื้นที่ศึกษา เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

1. พื้นที่ศึกษา

อุทยานแห่งชาติเขาสามร้อยยอด เป็นอุทยานแห่งชาติลำดับที่ 4 และเป็นอุทยานแห่งชาติทางทะเลแห่งแรกของประเทศไทย มีพื้นที่ประมาณ 98 ตารางกิโลเมตร (59,375 ไร่) ตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกของจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ คาบเกี่ยวกับอำเภอสามร้อยยอดและอำเภอกุยบุรี (อาณาเขตสีแดงในภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 ลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา

โดยทางด้านทิศตะวันตกของพื้นที่ศึกษา คือ เทือกเขาตะนาวศรีกั้นพรมแดนระหว่างไทยกับ สาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมาร์ มีความลาดชัน

(บริเวณพื้นที่สีแดงด้านซ้ายในภาพที่ 1) และค่อยๆ ลาดลงไปจนถึงชายฝั่งทะเลอ่าวไทยทางทิศตะวันออก (สีเขียวด้านขวาในภาพที่ 1) พื้นที่ชุ่มน้ำแห่งนี้ขึ้น

ทะเบียนเป็นแรมซาร์ไซต์ (Ramsar Site) ลำดับที่ 11 ของประเทศไทย (National Parks of Thailand, 2021; Department of Mineral Resources, 2008)

ในการศึกษานี้ จะเน้นพิจารณาสิ่งปกคลุมดินภายในพื้นที่ชุ่มน้ำเฉพาะส่วนที่เป็นทุ่งน้ำจืดที่อยู่บนฝั่ง โดยไม่รวมพื้นที่ของอุทยานฯ ในส่วนที่จัดสรรเพื่อใช้ประโยชน์บริเวณที่อยู่ติดชายฝั่งและไม่รวมเกาะและอาณาเขตทะเลของอุทยานฯ โดยบริเวณทุ่งน้ำจืดจะมีทั้งแหล่งน้ำถาวร ฝืนน้ำ รวมถึงป่าไม้และพื้นที่โดยรอบ ซึ่งมีความหลากหลายของสิ่งปกคลุมดินที่เป็นองค์ประกอบหลักของพื้นที่ชุ่มน้ำ จึงเป็นพื้นที่เป้าหมายในการวิเคราะห์ครั้งนี้ มีขนาดพื้นที่ 49,103.45 ไร่ หรือ 78.56 ตารางกิโลเมตร

2. เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

2.1 ภาพถ่ายจากดาวเทียมที่ใช้ในการศึกษา
นี้ ได้แก่

- LANDSAT 8 ระบบ Operational Land Imager (OLI) ที่สำรวจในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นและอินฟราเรด ความละเอียดจุดภาพ 30 เมตร บันทึกภาพวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2560 (Path 129 Row 052) ซึ่งให้บริการเพื่อการศึกษาวิจัยแบบไม่คิดมูลค่าผ่านเว็บไซต์ (<https://earthexplorer.usgs.gov>) ของหน่วยงาน United States Geological Survey (USGS) และ

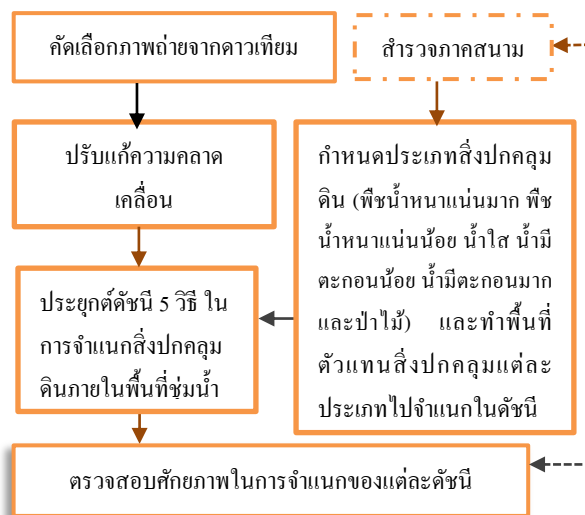
- ภาพถ่ายจากดาวเทียม Worldview-4 (เดิมชื่อ GeoEye-2) บันทึกภาพวันที่ 27 มกราคม 2560 และ 18 พฤษภาคม 2561 ความจุดภาพน้อยกว่า 5 เมตร ซึ่งมีในฐานข้อมูล Google Earth

2.2 แผนที่เชิงเลขขอบเขตอุทยานแห่งชาติเขาสามร้อยยอด (ไม่ระบุปี) จากสำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 3 สาขาเพชรบุรี กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

2.3 โปรแกรมที่ใช้ในการประมวลภาพถ่ายจากดาวเทียม ชื่อ Environment for Visualizing Images หรือ ENVI เวอร์ชัน 5.4 และโปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ArcGIS Desktop 10.2 ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์และจัดทำแผนที่ รวมถึงมีการติดตามข้อมูลของพื้นที่ศึกษาในหลายช่วงเวลาผ่านโปรแกรม Google Earth Pro (Free ware) นอกจากนี้ ยังมีเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล รวมถึงกล้องถ่ายรูปและอุปกรณ์รับสัญญาณระบุตำแหน่งพิกัดโลก (Global Navigation Satellite System หรือ GNSS) ที่ใช้ในการสำรวจภาคสนาม

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

สามารถสรุปเป็นขั้นตอนหลักๆ ดังต่อไปนี้ (ดูแผนผังในภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 คัดเลือกภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT 8 ที่ปราศจากเมฆปกคลุมและมีความคมชัด และหลีกเลี่ยงการใช้ภาพที่บันทึกในช่วงเวลาที่พื้นที่ชุ่มน้ำประสบปัญหาภัยแล้งหรือน้ำท่วม จากการศึกษาข้อมูลสถานการณ์น้ำของพื้นที่ศึกษา อุทยานแห่งชาติเขาสามร้อยยอด (Thai Meteorological Department, 2021) และการคัดเลือกภาพที่คมชัด พบว่า ภาพที่บันทึกในวันที่ 17 เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์

3.2 ปรับแก้ความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศที่ส่งผลต่อค่าการสะท้อนที่ผิดปกติในภาพถ่ายด้วยแบบจำลอง FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes) ในโปรแกรม ENVI ทำให้ภาพมีความถูกต้องและมีความคมชัดมากขึ้น (L3Harris Geospatial Solutions, Inc., 2022) พร้อมทั้งจะนำไปคำนวณหรือประยุกต์เป็นภาพดัชนีในขั้นตอนต่อไป

3.3 ประยุกต์ดัชนี จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้คัดเลือกดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพื้นที่ชุ่มน้ำมาจำนวน 5 ดัชนี เพื่อใช้วิเคราะห์ความหนาแน่นของพืชน้ำ แหล่งน้ำและปริมาณตะกอน รวมถึงป่าไม้หรือพืชบนบกที่อยู่ในบริเวณโดยรอบ ซึ่งเป็นสิ่งปกคลุมดินที่สะท้อนถึงความสมบูรณ์ของพื้นที่ชุ่มน้ำได้ในภาพรวม โดยดัชนีที่จะนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน ได้แก่ ดัชนี Normalized Difference Water Index (NDWI) ดัชนี Modification of Normalized Difference Water Index (MNDWI) ดัชนี Tasseled-cap Wetness Index (TCWI) ดัชนี Normalized Suspended Material Index (NSMI) และ ดัชนี Normalized Difference Suspended Sediment Index (NDSSI) โดยมีสมการคำนวณดังต่อไปนี้

- ดัชนี NDWI สามารถคำนวณดัชนี NDWI ได้จากสมการที่ 1 (McFeeters, 1996)

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

สมการที่ 1

- ดัชนี MNDWI สามารถคำนวณดัชนี MNDWI จากสมการที่ 2 (Xu, 2006)

$$MNDWI = \frac{GREEN - SWIR1}{GREEN + SWIR1}$$

สมการที่ 2

- ดัชนี TCWI เน้นศึกษาความเปียกของดินและพืช (wetness soil/vegetation) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3 (Baig *et al.*, 2014)

$$TCWI = BLUE * 0.1511 + GREEN * 0.1973 + RED * 0.3283 + NIR * 0.3407 + SWIR * (-0.7117) + RIR * (-0.4559) \quad \text{สมการที่ 3}$$

- ดัชนี NSMI สามารถคำนวณดัชนี NSMI ดังสมการที่ 4 (Montalvo, 2010)

$$NSMI = \frac{(\rho_{RED}) + (\rho_{GREEN}) - (\rho_{BLUE})}{(\rho_{RED}) + (\rho_{GREEN}) + (\rho_{BLUE})} \quad \text{สมการที่ 4}$$

- ดัชนี NDSSI สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 5 (Hossain *et al.*, 2010)

$$NDSSI = \frac{(\rho_{BLUE}) - (\rho_{NIR})}{(\rho_{BLUE}) + (\rho_{NIR})} \quad \text{สมการที่ 5}$$

จากสมการทั้ง 5 ข้างต้น BLUE คือ ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นสีน้ำเงิน GREEN คือ ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นสีเขียว RED คือ ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นสีแดง NIR (Near Infrared) คือ ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ SWIR (Shortwave Infrared) คือ ช่วงคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้นความยาวคลื่น 1.55 - 1.75 ไมโครเมตร RIR (Reflect Infrared) คือ ช่วงคลื่นอินฟราเรดสะท้อนความยาวคลื่น 2.08 - 2.35 ไมโครเมตร ส่วนสมการที่ 4 และ 5 ซึ่งมีอักษรกรีก หรือ โรว์ (rho) อยู่หน้าชื่อของช่วงคลื่น เช่น ρ_{red} หมายถึง สมการนั้นต้องใช้ค่าการสะท้อนบนพื้นผิวโลก (Surface Reflectance - SR) ของช่วงคลื่น RED เป็นต้น

3.4 ดำรงข้อมูลภาคสนามช่วงต้นเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2562 เพื่อประโยชน์ในการกำหนดประเภทของสิ่งปกคลุมดินที่ต้องการวิเคราะห์ และใช้เป็นข้อมูลสำหรับการตรวจสอบความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลพื้นที่ศึกษาจากภาพถ่ายจากดาวเทียมรายละเอียดสูงในฐานข้อมูล Google Earth

3.5 กำหนดประเภทสิ่งปกคลุมดินภายในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สะท้อนให้เห็นถึงความสมบูรณ์หรือความเสื่อมโทรมทางกายภาพในเบื้องต้น และดังที่ได้พบเห็นจากการสำรวจภาคสนามและข้อมูลประกอบจากฐานข้อมูล Google Earth ได้แก่ พืชพรรณน้ำหนาแน่นมาก พืชพรรณน้ำหนาแน่นน้อย น้ำใส น้ำมีตะกอนน้อย น้ำมี

ตะกอนมาก และป่าไม้ โดยบริเวณพืชพรรณน้ำหนาแน่นมากจะเป็นต้นกกชนิดต่างๆ ในขณะที่พืชพรรณน้ำหนาแน่นน้อยส่วนใหญ่จะเป็นบริเวณที่มีดอกบัว (ใช้ชนิดพืชน้ำในการช่วยแบ่งความหนาแน่นของพืชน้ำ) ซึ่งเป็นจุดดึงดูดนักท่องเที่ยวโดยเฉพาะในช่วงที่ดอกบัวบานเป็นบริเวณกว้าง ส่วนพื้นที่น้ำจะจำแนกเป็นบริเวณที่มีน้ำใส น้ำมีตะกอนน้อย และน้ำที่มีตะกอนมาก ซึ่งสามารถสะท้อนถึงคุณภาพน้ำในเบื้องต้น หากแหล่งน้ำมีตะกอนมากจะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำและสัตว์น้ำ หรืออาจหมายถึง พื้นที่ดินเลนจากตะกอนน้ำมากที่จะส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำได้ เนื่องจากข้อมูลตะกอนน้ำไม่มีการจัดเก็บโดยกรมอุทยานฯ หรือหน่วยงานอื่นๆ อีกทั้งในการศึกษาครั้งนี้ ยังขาดแคลนงบประมาณและความเชี่ยวชาญในการจัดเก็บข้อมูลน้ำ จึงใช้การพิจารณาระดับความขุ่น-ใสของน้ำด้วยสายตา แบ่งเป็นน้ำใสหรือน้ำไม่มีตะกอนที่มักพบบริเวณน้ำลึก น้ำมีตะกอนน้อยจะหมายถึง บริเวณที่มีความใสลดลงจากน้ำใสไม่เกินร้อยละ 50 แต่หากมากกว่าร้อยละ 50 จะจัดเป็นน้ำมีตะกอนมาก นอกจากนี้ยังใช้ภาพจาก Google Earth ในเวลาใกล้เคียงกับช่วงเวลาที่ยังสามารถช่วยจำแนกตำแหน่ง โดยน้ำใสจะมีสีเขียวสดสีน้ำเงินและมีโทนสีที่ขุ่นสว้างเมื่อมีความขุ่นหรือมีปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้น ส่วนพื้นที่ป่าไม้ ในที่นี้หมายถึงรวมทั้งป่าไม้และบริเวณ

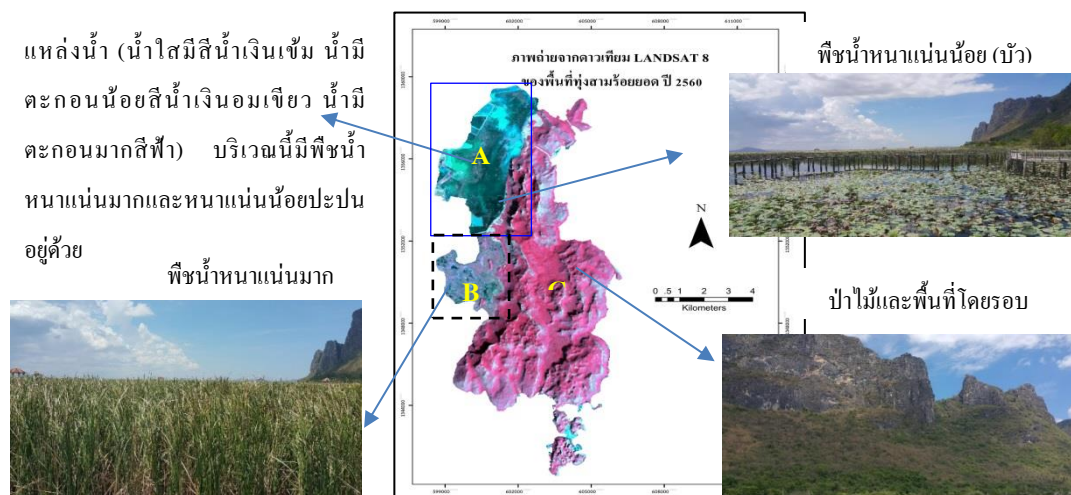
โดยรอบของพื้นที่ชุ่มน้ำ ซึ่งในการศึกษานี้ จะกำหนดพื้นที่ตัวแทนของสิ่งปกคลุมดินแต่ละประเภทแล้วไปวิเคราะห์และจำแนกในภาพดัชนีทั้ง 5 ดัชนี

3.6 ตรวจสอบศักยภาพในการจำแนกของแต่ละดัชนี 2 วิธี คือ 1) การเปรียบเทียบกับสายตา เนื่องจากพื้นที่ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสิ่งปกคลุมดินในการศึกษาค่อนข้างเล็ก จึงจะเน้นพิจารณาความแม่นยำในลักษณะของการเปรียบเทียบประเภทของสิ่งปกคลุมดินด้วยสายตา ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและเข้าใจง่าย เมื่อนำภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT 8 ปี 2560 มาผสมแบบสีเท็จ (R: NIR, G: RED, B: GREEN) เพื่อให้แสดงพื้นที่ที่มีพืชปกคลุมเป็นสีแดง หากยังมีสีแดงเข้มจะแสดงถึงความสมบูรณ์แข็งแรงหรือความหนาแน่นของพืชยังมีมาก โดยสามารถแบ่งพื้นที่เป้าหมายเพื่อทำการศึกษาและตรวจสอบเป็น 3 ส่วนหรือโซนหลัก (ดูภาพที่ 3) ซึ่งแต่ละโซนมีรายละเอียดของสิ่งปกคลุมดินที่ปรากฏในภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT 8 ดังนี้

- โซน A เป็นบริเวณที่มีแหล่งน้ำและพืชน้ำ โดยบริเวณน้ำใสจะเห็นเป็นสีน้ำเงินเข้มหรือเกือบดำในภาพ แต่พื้นที่น้ำส่วนใหญ่เป็นน้ำมีตะกอนน้อย (สีน้ำเงินอมเขียว) และมีพืชน้ำหนาแน่นน้อย (สีแดงปนน้ำเงินหรือเทาเข้ม) กระจายปะปนอยู่ โดยมีพืชน้ำหนาแน่นมาก (สีแดงปนเทาอ่อน) แทรกอยู่บางจุด ส่วนน้ำมีตะกอนมาก (สีฟ้า) ก็พบปรากฏอยู่หลายบริเวณเช่นกัน

- โซน B เป็นบริเวณที่มีพืชน้ำ มีการกระจุกตัวทั้งแบบหนาแน่นมากและหนาแน่นน้อย มีบางบริเวณเป็นที่เนินและภูเขาโดลูกเล็กๆ น้ำท่วมไม่ถึง และพบป่าไม้หรือพืชที่เจริญเติบโต (สีแดง) บนที่เนินและบริเวณรอยต่อระหว่างโซน B และ C

- โซน C เป็นบริเวณที่มีป่าไม้ อยู่บริเวณที่เนินและภูเขา ซึ่งยังมี พืชบกหรือไม้ยืนต้น รวมถึงพื้นที่อื่นๆ โดยรอบ ซึ่งครอบคลุมถึงพื้นที่น้ำเล็กๆ อยู่ระหว่างเกาะทางตอนใต้ของพื้นที่ศึกษา ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นน้ำที่มีตะกอนมาก



ภาพที่ 3 ตัวแทนสิ่งปกคลุมดินเป้าหมายและตำแหน่งในภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT 8

2) ตรวจสอบความแม่นยำในการจำแนกประเภทของสิ่งปกคลุมดิน (Accuracy assessment) ด้วยวิธี Confusion matrix ซึ่งเป็นตารางที่หาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากจุดสำรวจภาคสนามกับตำแหน่งของสิ่งปกคลุม

ดินประเภทต่างๆ ที่จำแนกจากภาพดัชนี (รวมจำนวน 42 ตำแหน่ง) ซึ่งให้ผลการคำนวณค่าความแม่นยำโดยรวม (Overall accuracy) และค่าสัมประสิทธิ์เคปป่า (Kappa coefficient) หากค่าความแม่นยำโดยรวมไม่ต่ำกว่า

ร้อยละ 70 และค่าสัมประสิทธิ์แคปป่าไม่ต่ำกว่า 0.5 หมายถึง มีความแม่นยำในการจำแนกอยู่ในระดับดี หรือผ่านมาตรฐาน สามารถนำไปวิเคราะห์หรือนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างน่าเชื่อถือต่อไป

หลังตรวจสอบความแม่นยำด้วย 2 วิธีข้างต้นแล้ว ทำให้สามารถสรุปผลการศึกษาดัชนีที่เหมาะสมในการสำรวจพื้นที่ชุ่มน้ำเป้าหมายมากที่สุด และคำนวณพื้นที่ของสิ่งปกคลุมดินทั้ง 6 ประเภทที่วิเคราะห์ได้จากดัชนีดังกล่าว

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลการศึกษาศักยภาพของดัชนี NDWI ดัชนี MNDWI ดัชนี TCWI ดัชนี NSMI และ ดัชนี NDSSI ที่สังเคราะห์จากข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT 8 ในช่วงต้นปี 2560 เพื่อจำแนกสิ่งปกคลุมดิน 6 ประเภท ได้แก่ พืชพรรณหนาแน่นมาก พืชพรรณาน้อย น้ำใส น้ำมีตะกอนน้อย น้ำมีตะกอนมาก และป่าไม้ นั้น แสดงระดับความสอดคล้องของรายละเอียดหรือองค์ประกอบสำคัญในแต่ละโซนตามที่กำหนดในภาพที่ 3 และค่าความแม่นยำที่ตรวจสอบด้วยวิธี Confusion Matrix ประกอบกับการ

นำเสนอแผนที่และช่วงค่าของดัชนีต่างๆ ที่จำแนกสิ่งปกคลุมดินแต่ละประเภท ดังรายละเอียดต่อไปนี้

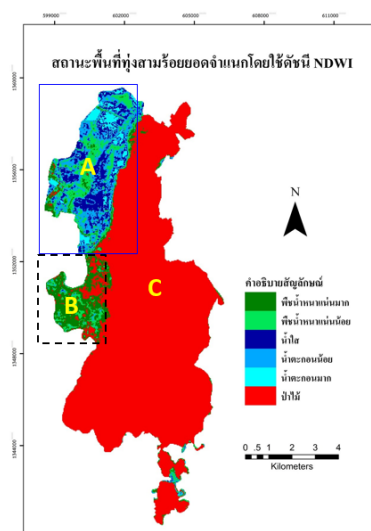
1. ผลการจำแนกสิ่งปกคลุมดิน 6 ประเภทของดัชนี NDWI

ผลการจำแนกสิ่งปกคลุมดินเป้าหมายทั้ง 6 ประเภทของดัชนี NDWI แสดงในภาพที่ 4 พบว่าการจำแนกสิ่งปกคลุมดินมีความสอดคล้องกับลักษณะของสิ่งปกคลุมดินในพื้นที่ค่อนข้างมากเมื่อพิจารณาด้วยสายตา ซึ่งสามารถสรุปเป็นโซนได้ดังนี้

- โซน A สามารถจำแนกน้ำใส และน้ำมีตะกอนมากได้ชัดเจน ส่วนน้ำมีตะกอนน้อยก็จำแนกได้แต่พบปะปนกับพืชพรรณาน้อยอยู่หลายบริเวณ ในขณะที่มีพืชพรรณาน้อยมากและป่าไม้แทรกอยู่เพียงเล็กน้อย

- โซน B พบพืชพรรณาน้อยมากปะปนกับพืชพรรณาน้อยในบริเวณนี้ และมีป่าไม้แทรกอยู่โดยเฉพาะบริเวณรอยต่อระหว่างพืชพรรณาน้อยและพืชบก

- โซน C จำแนกพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นป่าไม้พบการปะปนของพืชพรรณาน้อย พืชพรรณาน้อยมาก และน้ำมีตะกอนอยู่เพียงเล็กน้อย ซึ่งมักอยู่บริเวณขอบ



Overall Accuracy	73.8095
Kappa Coefficient	0.6857
Index Value (-1.0000 to 1.0000)	ประเภทสิ่งปกคลุมดิน (สิ่งปกคลุมดินที่มีค่าใกล้เคียงกัน)
-1.000 to -0.5901	ป่าไม้
-0.5900 to -0.3901	พืชพรรณาน้อยมาก (ป่าและพืชพรรณาน้อย)
-0.3900 to -0.2001	พืชพรรณาน้อย (พืชพรรณาน้อยมาก)
-0.2000 to -0.0001	น้ำมีตะกอนน้อย (พืชพรรณาน้อยและน้ำใส)
0.0000 to 0.3999	น้ำใส
0.4000 to 1.000	น้ำมีตะกอนมาก

ภาพที่ 4 สิ่งปกคลุมดินจำแนกด้วยดัชนี NDWI

จากภาพที่ 4 แสดงค่าดัชนี NDWI มีช่วงค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 โดยช่วงค่าของแต่ละประเภทสิ่งปกคลุมดินสามารถแยกจากกันได้อย่างชัดเจนและมีค่าความแม่นยำโดยรวมในการจำแนกประเภทสิ่งปกคลุมดินเท่ากับร้อยละ 73.8 และค่าสัมประสิทธิ์แคปปา 0.68 แสดงว่า มีความแม่นยำดีหรือผ่านมาตรฐานและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หรืออ้างอิงต่ออย่างไรก็ตาม ยังคงพบการจำแนกปะปนกันของสิ่งปกคลุมดินบางชนิด ซึ่งจะเห็นได้จากการที่มีค่าของดัชนีบางช่วงมีสิ่งปกคลุมดินชนิดอื่นด้วย ดังได้ระบุในวงเล็บของภาพที่ 4

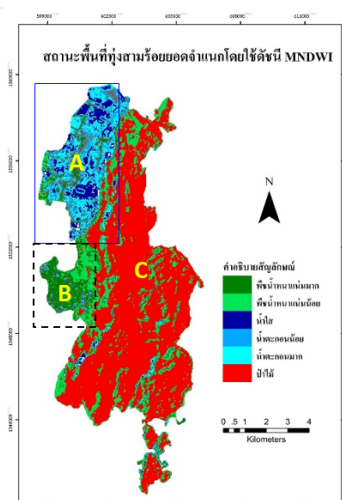
จะเห็นได้ว่า ดัชนี NDWI สามารถจำแนกสิ่งปกคลุมดินในแต่ละโซนได้สอดคล้องกับแหล่งอ้างอิงมาก ซึ่งไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Lv *et al.* (2019) ที่ระบุว่า ดัชนี NDWI มีบทบาทสำคัญในการจำแนกองค์ประกอบสำคัญในพื้นที่ชุ่มน้ำ คือ ส่วนที่เป็นน้ำ ดิน และพืช โดยดัชนีคำนวณมาจากช่วงคลื่น GREEN ที่สามารถใช้วิเคราะห์น้ำสะท้อนน้ำและพืชได้ดี ส่วนช่วงคลื่น NIR เหมาะสมในการวิเคราะห์ความหนาแน่นและความสมบูรณ์ของพืช ส่วนดินและสิ่งปกคลุมดินอื่นๆ ทั้งสองช่วงคลื่นก็สามารถจำแนกได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ ผลการจำแนกสิ่งปกคลุมดินในงานวิจัยนี้

ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Blackmore (2016) และงานวิจัยของ Tang *et al.* (2016) ที่สรุปว่า ดัชนี NDWI จะมีปฏิสัมพันธ์กับพื้นที่ชุ่มน้ำ สามารถแยกพืชน้ำออกจากพืชบนบกได้จากความแตกต่างของความชื้นดิน (น้ำขัง/น้ำไม่ขัง) รวมถึงสามารถแยกระดับความหนาแน่นของพืชน้ำได้

2. ผลการจำแนกสิ่งปกคลุมดิน 6 ประเภทของดัชนี MNDWI

ผลการจำแนกสิ่งปกคลุมดินเป้าหมายทั้ง 6 ประเภทของดัชนี MNDWI แสดงในภาพที่ 5 เมื่อพิจารณาความสอดคล้องของผลการจำแนกกับลักษณะของสิ่งปกคลุมดินในพื้นที่ด้วยสายตาสามารถสรุปเป็นโซนได้ดังนี้

- โซน A สามารถจำแนกน้ำใส น้ำมีตะกอนมาก และน้ำมีตะกอนน้อยได้ และมีพืชน้ำหนาแน่นมากครอบคลุมพื้นที่มากกว่าพืชน้ำหนาแน่นน้อย
- โซน B พบพืชน้ำหนาแน่นมากครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ในโซนนี้ และมีพืชน้ำหนาแน่นน้อยปะปนอยู่บ้าง แต่พบป่าไม้แทรกอยู่น้อยมาก
- โซน C ถูกจำแนกพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นป่าไม้ แต่พบการปะปนของพืชน้ำหนาแน่นน้อย น้ำใส และน้ำมีตะกอนปะปนกับป่าไม้และพื้นที่โดยรอบ



Overall Accuracy	51.1111
Kappa Coefficient	0.4294
Index Value (-1.0000 to 1.0000)	ประเภทสิ่งปกคลุมดิน (สิ่งปกคลุมดินที่มีค่าใกล้เคียงกัน)
-1.0000 to -0.4001	ป่าไม้ (พืชน้ำหนาแน่นน้อยและน้ำทั้งหมด)
-0.4000 to -0.2501	พืชน้ำหนาแน่นน้อย (พืชน้ำหนาแน่นมากและป่าไม้)
-0.2500 to 0.0000	พืชน้ำหนาแน่นมาก (พืชน้ำหนาแน่นน้อย)
0.0000 to 0.2999	น้ำมีตะกอนน้อย (พืชน้ำหนาแน่นมาก)
0.3000 to 0.7000	น้ำมีตะกอนมาก (น้ำมีตะกอนน้อย)
0.5500 to 1.0000	น้ำใส (น้ำมีตะกอนมาก และน้ำมีตะกอนน้อย)

ภาพที่ 5 สิ่งปกคลุมดินจำแนกด้วยดัชนี MNDWI

ค่าดัชนี MNDWI มีช่วงค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 โดยช่วงค่าของแต่ละประเภทสิ่งปกคลุมดินมีการคาบเกี่ยวกับสิ่งปกคลุมดินประเภทอื่นๆ ดังระบุในวงเล็บในภาพที่ 5 ส่งผลให้มีค่าความแม่นยำโดยรวมในการจำแนกประเภทสิ่งปกคลุมดินเท่ากับร้อยละ 51.11 และค่าสัมประสิทธิ์แคปป่า 0.43 แสดงว่ามีความแม่นยำต่ำกว่ามาตรฐาน

จะเห็นได้ว่า มีการจำแนกพืชน้ำ และแหล่งน้ำอยู่ในโซน C ซึ่งไม่สอดคล้องกับแหล่งอ้างอิง โดยในโซน A พบน้ำใสและน้ำมีตะกอนมาก ในขณะที่น้ำมีตะกอนน้อยไม่ปรากฏชัดเจน นอกจากนี้ยังพบพืชน้ำหนาแน่นมากครอบคลุมพื้นที่ในน้ำและบริเวณโซน B มากเกินจริง ในขณะที่พื้นที่ขึ้น พื้นที่ป่าไม้บริเวณที่เป็นภูเขาหรือสันเขา และป่าไม้ไม่หนาแน่นที่ปรากฏสีในภาพถ่ายจากดาวเทียมใกล้เคียงกันนั้น ได้ถูกจำแนกเป็นพืชน้ำหนาแน่นน้อย ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องบางส่วนกับข้อสรุปของ Blackmore (2016) ที่ใช้ดัชนี MNDWI ในการจำแนกพื้นที่แหล่งน้ำขนาดใหญ่ได้อย่างชัดเจนสามารถทำนายความชื้นและความแห้งแล้งของพื้นที่ได้ดีแต่ไม่ได้สรุปชัดเจนเรื่องตะกอนน้ำและการจำแนกพืชน้ำ เช่นเดียวกับการอธิบายช่วงค่าของสมการ (สมการที่ 2) ที่ระบุถึงช่วงค่าของน้ำ ดินที่มี

ความชื้น และบริเวณที่ไม่ใช่ น้ำ อาทิ ดินแห้ง เมือง และสิ่งปลูกสร้าง แต่ไม่ได้รับชัดเจนถึงช่วงค่าของพืช

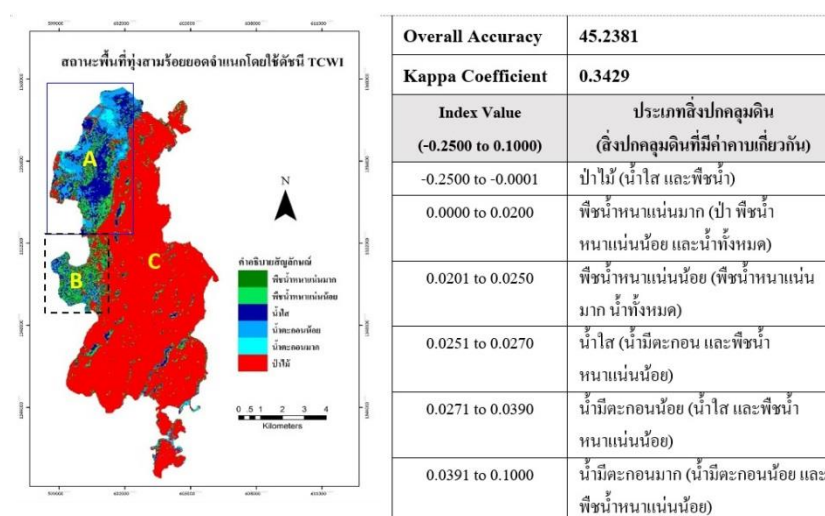
3. ผลการจำแนกสิ่งปกคลุมดิน 6 ประเภทของดัชนี TCWI

ผลการจำแนกสิ่งปกคลุมดินเป้าหมายทั้ง 6 ประเภทของดัชนี TCWI ได้แสดงในภาพที่ 6 เมื่อพิจารณาความสอดคล้องของผลการจำแนกกับลักษณะของสิ่งปกคลุมดินในพื้นที่ด้วยสายตาสามารถสรุปเป็นโซนได้ดังนี้

- โซน A สามารถจำแนกน้ำใส น้ำมีตะกอนมาก และน้ำมีตะกอนน้อยได้เป็นกลุ่มก้อนชัดเจน ส่วนพืชน้ำหนาแน่นมากและพืชน้ำหนาแน่นน้อยไม่สามารถแยกจากกันได้อย่างชัดเจน รวมถึงมีการจำแนกเป็นป่าไม้แทรกอยู่บางบริเวณ

- โซน B พบพืชน้ำหนาแน่นมาก พืชน้ำหนาแน่นน้อย น้ำใส น้ำมีตะกอน รวมถึงมีป่าไม้ ซึ่งทั้งหมดถูกจำแนกปะปนกัน

- โซน C จำแนกพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นป่าไม้ แต่พบการปะปนของน้ำและพืชน้ำหลายบริเวณ โดยเฉพาะบริเวณที่เป็นเงาของภูเขา



ภาพที่ 6 สิ่งปกคลุมดินจำแนกด้วยดัชนี TCWI

ค่าดัชนี TCWI จะมีช่วงค่าไม่แน่นอน ในการศึกษานี้มีช่วงค่าอยู่ระหว่าง -0.2500 ถึง 0.1000 โดยช่วงค่าของแต่ละประเภทสิ่งปกคลุมดินมีการคาบเกี่ยวกับสิ่งปกคลุมดินประเภทอื่นๆ ดังระบุในวงเล็บของภาพที่ 6 ส่งผลให้มีค่าความแม่นยำโดยรวมในการจำแนกประเภทสิ่งปกคลุมดินเท่ากับร้อยละ 45.24 และค่าสัมประสิทธิ์แคปปา 0.34 และเมื่อมีความสอดคล้องระหว่างผลการจำแนกและโซนของสิ่งปกคลุมดินด้วยสายตา พบว่า สอดคล้องระดับปานกลาง ซึ่งสามารถสรุปว่า มีความแม่นยำในการจำแนกต่ำกว่ามาตรฐาน จะเห็นได้ว่า ดัชนี TCWI สามารถจำแนกน้ำได้หลายระดับ แต่จำแนกน้ำได้มากและปะปนไปในโซน B และ C ซึ่งไม่สอดคล้องกับแหล่งอ้างอิงโดยศึกษาภาพในการจำแนกเกี่ยวกับน้ำได้มีการสรุปไว้ในงานวิจัยของ Tang *et al.* (2016) ที่ใช้ดัชนี TCWGD ซึ่งรวม TCWI อยู่ด้วยนั้น มีความเหมาะสมกับการศึกษาสถานการณ์น้ำท่วมในพื้นที่ชุ่มน้ำพลาในมณฑลยูนนาน ประเทศสหรัฐอเมริกามากที่สุด ในขณะที่ Sun *et al.* (2012) ใช้ดัชนี TCWI ร่วมกับดัชนี EVI ทำให้ได้การวิเคราะห์ความสมบูรณ์และสถานะของพื้นที่ชุ่มน้ำและบริเวณใกล้เคียงมีความน่าเชื่อถือ ซึ่งในงานวิจัยนี้เน้นพิจารณาศักยภาพของการจำแนกสิ่งปกคลุมดิน

ของดัชนีที่ละเอียด จึงยังพบความไม่น่าเชื่อถือของการจำแนกสิ่งปกคลุมดิน ซึ่งไม่สอดคล้องกับข้อสรุปในงานวิจัยของชั้นและคณะ

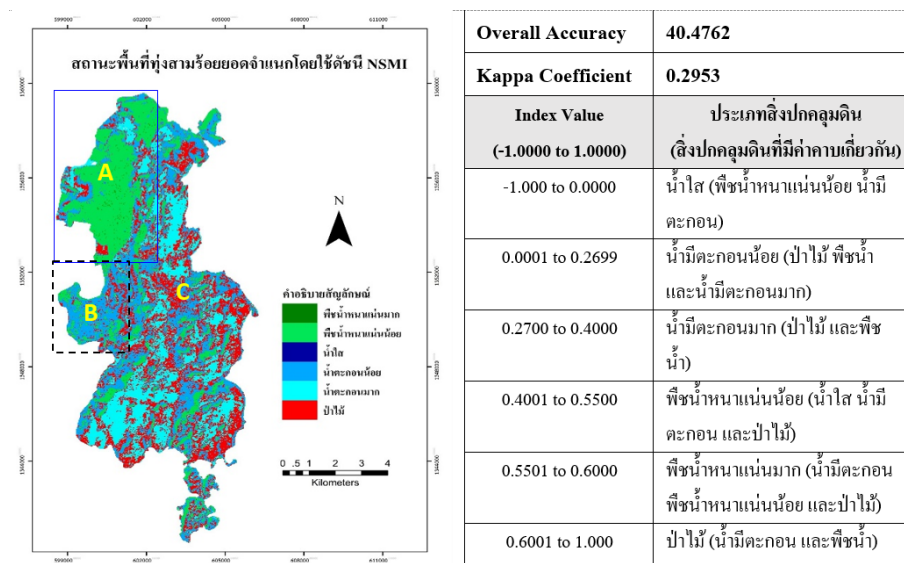
4. ผลการจำแนกสิ่งปกคลุมดิน 6 ประเภทของดัชนี NSMI

ผลการจำแนกสิ่งปกคลุมดินเป้าหมายทั้ง 6 ประเภทของดัชนี NSMI แสดงในภาพที่ 7 เมื่อพิจารณาความสอดคล้องของผลการจำแนกกับลักษณะของสิ่งปกคลุมดินในพื้นที่ด้วยสายตาสามารถสรุปเป็นโซนได้ดังนี้

- โซน A พบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ถูกจำแนกเป็นพืชน้ำหนาแน่นน้อย และพบการจำแนกน้ำมีตะกอนมาก น้ำมีตะกอนน้อย และป่าไม้ปะปนกันในโซนนี้

- โซน B มีการจำแนกพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นน้ำมีตะกอนน้อย โดยมีการจำแนกเป็นพืชน้ำหนาแน่นน้อยและป่าไม้แทรกอยู่ไม่มากบริเวณรอยต่อระหว่างโซน B และ C

- โซน C พบว่า น้ำมีตะกอน พืชน้ำหนาแน่นน้อยและป่าไม้ถูกจำแนกปะปนกันอย่างชัดเจนในโซนนี้



ภาพที่ 7 สิ่งปกคลุมดินจำแนกด้วยดัชนี NSMI

ค่าดัชนี NSMI มีช่วงค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 โดยช่วงค่าของแต่ละประเภทสิ่งปกคลุมดินมีการคาบเกี่ยวกับสิ่งปกคลุมดินประเภทอื่นๆ มาก ดังระบุในวงเล็บในภาพที่ 7 ส่งผลให้มีค่าความแม่นยำโดยรวมในการจำแนกประเภทสิ่งปกคลุมดินเท่ากับร้อยละ 40.47 และค่าสัมประสิทธิ์แคปป่า 0.29 แสดงว่ามีความแม่นยำต่ำกว่ามาตรฐานมาก

จะเห็นได้ว่า ดัชนี NSMI ไม่สามารถแยกน้ำมีตะกอนมากและน้ำมีตะกอนน้อยออกจากพืชน้ำและป่าไม้ได้ ซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Arisanty and Saputra (2017) ที่ระบุว่า ค่าตะกอนในน้ำที่วิเคราะห์จากดัชนี NSMI นั้นมีความสัมพันธ์กับค่าตะกอนน้ำที่ตรวจวัดจริงมากที่สุด เมื่อพิจารณาจากคำอธิบายของสมการ (สมการที่ 4) พบว่า น้ำใสจะมีค่าของดัชนีต่ำ ในขณะที่น้ำยังมีตะกอนมากจะยังมีค่าสูง ซึ่งไม่มีการระบุถึงช่วงค่าของพืช อีกทั้งสมการนี้น่าจะเหมาะกับการศึกษาน้ำเป็นหลัก เพราะไม่สามารถแยกพืชน้ำหรือพืชบนบกออกจากของน้ำมีตะกอนได้

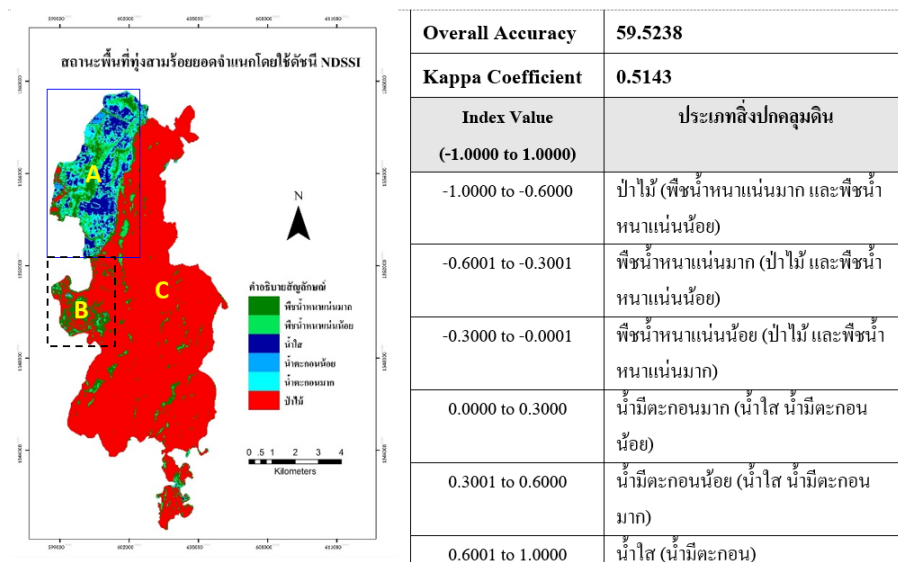
5. ผลการจำแนกสิ่งปกคลุมดิน 6 ประเภทของดัชนี NDSSI

ผลการจำแนกสิ่งปกคลุมดินเป้าหมายทั้ง 6 ประเภทของดัชนี NDSSI ได้แสดงในภาพที่ 8 เมื่อพิจารณาความสอดคล้องของผลการจำแนกกับลักษณะของสิ่งปกคลุมดินในพื้นที่ด้วยสายตาสามารถสรุปเป็นโซนได้ดังนี้

- โซน A สามารถจำแนกน้ำใสและน้ำมีตะกอนได้ แต่ระดับตะกอนมากและน้อยนั้นไม่สามารถแยกกันได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ ยังพบพืชน้ำหนาแน่นมากและหนาแน่นน้อยอยู่หลายบริเวณ พบป่าไม้แทรกอยู่เล็กน้อยทางทิศตะวันตก

- โซน B พบพืชน้ำหนาแน่นมากปะปนกับพืชน้ำหนาแน่นน้อย และประมาณครึ่งหนึ่งของพื้นที่ถูกจำแนกเป็นป่าไม้

- โซน C มีการจำแนกพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นป่าไม้ พบการปะปนของพืชน้ำหนาแน่นมากและพืชน้ำหนาแน่นน้อยบางบริเวณ โดยเฉพาะบริเวณที่เป็นเงาของภูเขา



ภาพที่ 8 สิ่งปกคลุมดินจำแนกด้วยดัชนี NDSSI

ค่าดัชนี NDSSI มีช่วงค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 โดยช่วงค่าของแต่ละประเภทสิ่งปกคลุมดินมีการคาบเกี่ยวกับสิ่งปกคลุมดินประเภทอื่นๆ มาก ดังระบุในวงเล็บในภาพที่ 8 ส่งผลให้มีค่าความแม่นยำโดยรวมในการจำแนกประเภทสิ่งปกคลุมดินเท่ากับร้อยละ 59.52 และค่าสัมประสิทธิ์แคปปา 0.51 ซึ่งมีความแม่นยำระดับปานกลางแต่ยังต่ำกว่าระดับมาตรฐานที่จะนำไปใช้ประโยชน์หรืออ้างอิงได้อย่างน่าเชื่อถือ

จะเห็นได้ว่า ดัชนี NDSSI ไม่สามารถจำแนกระดับตะกอนในน้ำได้อย่างชัดเจน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Arisanty and Saputra (2017) ที่ศึกษาการหมุนเวียนของตะกอนแขวนลอยบริเวณปากแม่น้ำบาริต (Barito Delta) ด้วยดัชนี NSMI ดัชนี NDSSI และการหาสัดส่วนแบนด์ หรือ band ratio (green/blue) ซึ่งพบว่า ค่าตะกอนในน้ำที่วิเคราะห์จากดัชนี NSMI มีความสัมพันธ์กับค่าตะกอนที่ตรวจวัดจริงมากที่สุด ในขณะที่ดัชนี NDSSI และ band ratio ไม่สามารถจำแนกตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งข้อสรุปดังกล่าวขัดแย้งกับงานวิจัยของ Shahzad *et al.* (2018) ที่ใช้ดัชนี NDSSI ในการศึกษาตะกอนแขวนลอยบริเวณปากแม่น้ำในเขตอุตสาหกรรมทางตอนใต้ของประเทศปากีสถาน และพบว่า ดัชนี NDSSI สามารถช่วยให้ผลการวิเคราะห์ค่าตะกอนแขวนลอยมีความแม่นยำมากขึ้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่อ้างถึงข้างต้นจะเน้นศึกษาตะกอน ไม่มีการกล่าวถึงพืช เช่นเดียวกับคำอธิบายสมการที่ระบุเพียงว่า ค่าดัชนียิ่งสูงจะแสดงถึงระดับความใสของน้ำยิ่งมาก ในขณะที่น้ำยังมีตะกอนมากจะยิ่งมีค่าดัชนีต่ำ

จากผลการจำแนกสิ่งปกคลุมดินเป้าหมายทั้ง 6 ประเภทของแต่ละดัชนีที่พิจารณาความสอดคล้องของผลการจำแนกกับลักษณะของสิ่งปกคลุมดิน 3 โซนในพื้นที่ด้วยสายตา พบว่า มีความคลาดเคลื่อนในการจำแนกป่าไม้และพืชบนบกไปเป็นแหล่งน้ำและพืชน้ำ ในผลการจำแนกจาก 4 ดัชนี คือ ดัชนี MNDWI ดัชนี

TCWI ดัชนี NSMI และดัชนี NDSSI โดยความคลาดเคลื่อนในการจำแนกจะมีระดับที่แตกต่างกัน ซึ่งปรากฏชัดเจนบริเวณโซน B และ C ในขณะที่ความคลาดเคลื่อนในการจำแนกสิ่งปกคลุมดินที่พบในโซนต่างๆ จะปรากฏน้อยที่สุดเมื่อวิเคราะห์ด้วยดัชนี NDWI อีกทั้งเมื่อคำนวณด้วยวิธี Confusion matrix แล้ว ยังพบว่ามีเพียงดัชนี NDWI ที่มีค่าความแม่นยำโดยรวมไม่ต่ำกว่า 70 และค่าสัมประสิทธิ์แคปปาไม่ต่ำกว่า 0.5 ด้วยเหตุนี้ ผลการจำแนกสิ่งปกคลุมดินเป้าหมายที่ได้จากดัชนี NDWI จึงมีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการจำแนกสิ่งปกคลุมดินบริเวณพื้นที่ชุ่มน้ำภายในอุทยานแห่งชาติเขาสามร้อยยอด โดยผลการจำแนกแสดงพื้นที่พืชน้ำหนาแน่นมากเท่ากับ 4,398.19 ไร่ (ร้อยละ 8.96 ของพื้นที่ทั้งหมด) พืชน้ำหนาแน่นน้อย 2,953.69 ไร่ (ร้อยละ 6.02 ของพื้นที่ทั้งหมด) 49,103.45 ไร่ (ร้อยละ 103.45 ไร่) แหล่งน้ำใส 3,750.75 ไร่ (ร้อยละ 7.64 ของพื้นที่ทั้งหมด) น้ำมีตะกอนน้อย 2,280.38 ไร่ (ร้อยละ 4.64 ของพื้นที่ทั้งหมด) น้ำตะกอนมาก 989.44 ไร่ (ร้อยละ 2.02 ของพื้นที่ทั้งหมด) และพื้นที่ป่าไม้รวมบริเวณโดยรอบครอบคลุมพื้นที่ 34,731 ไร่ (ร้อยละ 70.73 ของพื้นที่ทั้งหมด)

สรุป

ดัชนีที่สามารถวิเคราะห์สิ่งปกคลุมดินภายในพื้นที่ชุ่มน้ำเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ ดัชนี NDWI ซึ่งนอกจากจะมีค่าความแม่นยำโดยรวมและค่าสัมประสิทธิ์แคปปาสูงที่สุดแล้ว (Overall accuracy = 73.8 และ Kappa coefficient = 0.68) ในผลลัพธ์ยังปรากฏชัดเจนว่า สามารถจำแนกระดับตะกอนน้ำ ความหนาแน่นของพืชน้ำ และแยกป่าหรือพืชบกได้ดี ในขณะที่ดัชนีอื่นๆ มีค่าความแม่นยำโดยรวมและค่าสัมประสิทธิ์แคปปาไม่ผ่านมาตรฐาน (Overall accuracy < 70 และ Kappa coefficient < 0.5) เพื่อพิจารณาในภาพผลลัพธ์พบว่า ดัชนี MNDWI และดัชนี NDSSI มีศักยภาพในการจำแนกบริเวณน้ำใสและน้ำมีตะกอน

ได้ แต่ยังมีข้อจำกัดในการจำแนกระดับความหนาแน่นของพืชน้ำ และพบการจำแนกปะปนกันระหว่างพืชน้ำและพืชบก ส่วนดัชนี TCWI สามารถจำแนกระดับตะกอนในน้ำได้ดี แต่จำแนกบริเวณเงาของภูเขาเป็นแหล่งน้ำและพืชน้ำ สำหรับดัชนีที่ให้ผลการจำแนกที่คลาดเคลื่อนมากที่สุดในการศึกษานี้ คือ NSMI ที่ไม่สามารถแยกน้ำมีตะกอนมากและน้ำมีตะกอนน้อยออกจากพืชน้ำและป่าไม้ได้ ซึ่งอาจสรุปได้ว่า ดัชนี MNDWI ดัชนี TCWI ดัชนี NSMI และดัชนี NDSSI มีศักยภาพในการศึกษาแหล่งน้ำ ตะกอนน้ำ รวมถึงความชื้นในพื้นที่ แต่มีข้อจำกัดในการจำแนกความหลากหลายของสิ่งปกคลุมดินหรือองค์ประกอบอื่นภายในพื้นที่ชุ่มน้ำ สำหรับการจำแนกระดับความหนาแน่นของพืชน้ำด้วยชนิดพืช และจำแนกระดับความขุ่น-ใสของน้ำจากการประเมินด้วยสายตาและใช้สีที่ปรากฏในภาพถ่ายจากดาวเทียมนั้น สามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือมากขึ้นได้ หากมีข้อมูลความหนาแน่นของพืชน้ำ และระดับความขุ่น-ใสของน้ำที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์หรือเกณฑ์ที่มีมาตรฐาน ปัจจุบันมีการนำดัชนีหรือช่วงคลื่นอื่นๆ รวมถึงข้อมูลจากระบบตรวจวัดหรือเครื่องมืออื่นๆ มาบูรณาการกันเพื่อพัฒนาการวิเคราะห์พื้นที่ชุ่มน้ำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่เมื่อมีแหล่งข้อมูล ขึ้นตอนหรือเครื่องมือที่มากขึ้น การวิเคราะห์ย่อมใช้เวลามากขึ้น เช่นเดียวกับค่าใช้จ่ายที่มากขึ้นตามไปด้วย ในการศึกษานี้ได้นำเสนอดัชนีเดี่ยวที่คำนวณมาจากภาพถ่ายจากดาวเทียมที่เข้าถึงง่ายและไม่มีค่าใช้จ่าย และมีศักยภาพในการจำแนกสิ่งปกคลุมดินภายในพื้นที่ชุ่มน้ำและบริเวณโดยรอบได้ดีและรวดเร็ว จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์เพื่อติดตามสถานะหรือสิ่งปกคลุมดินของพื้นที่ชุ่มน้ำภายในอุทยานแห่งชาติเขาสามร้อยยอดหรือพื้นที่ชุ่มน้ำอื่นๆ ได้หลายช่วงเวลาหรืออย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ข้อมูล

ที่มีประโยชน์ต่อการบริหารจัดการหรืออนุรักษ์พื้นที่ชุ่มน้ำให้คงความสมบูรณ์อย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยงานที่สนับสนุนข้อมูลในการศึกษานี้ทุกแห่ง และขอบคุณคณะศิลปศาสตร์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ในการผลักดันให้เกิดการพัฒนาและเผยแพร่งานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Arisanty, D. and Saputra, A.N. 2017. Remote Sensing Studies of Suspended Sediment Concentration Variation in Barito Delta, pp. 1-7. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 98, The 5th Geoinformation Science Symposium 2017 (GSS 2017)*. Yogyakarta, Indonesia.
- Baig, M.H.A., Zhang, L., Shuai, T. and Tong, Q. 2014. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters* 5(5): 423-431.
- Blackmore, D.S. 2016. Use of Water Indices Derived from Landsat OLI Imagery and GIS to Estimate the Hydrologic Connectivity of Wetlands in the Tualatin River National Wildlife Refuge. Master Thesis of Science (Geography), Portland State University.
- Department of Mineral Resources. 2008. **Zoning Classification for Geology and Mineral Resources Management of Prachuap Khiri Khan Province**. Advance Vision Service Limited, Bangkok. (in Thai)

- Hossain, A.K.M.A., Jia, Y. and Chao, X. 2010. Development of Remote Sensing Based Index for Estimating/Mapping Suspended Sediment Concentration in River and Lake Environments, pp. 578-585. *In ISE Proceeding, The 8th international symposium on ECOHYDRAULICS (ISE 2010)*. International Association for Hydraulic Engineering and Research (IAHR), South Korea.
- Lv, J., Jiang, W., Wang, W., Wu, Z., Liu, Y., Wang, X. and Li, Z. 2019. Wetland Loss Identification and Evaluation Based on Landscape and Remote Sensing Indices in Xiong'an New Area. *Remote Sensing* 11(23): 2834.
- L3Harris Geospatial Solutions, Inc. 2022. **Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH)**. Available Source: <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/flaash.html>, May 20, 2022.
- McFeeters, S.K. 1996. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17(7): 1425-1432.
- Montalvo, L.G. 2010. **Spectral Analysis of Suspended Material in Coastal Waters: A Comparison Between Band Math Equations**. Available Source: <https://docplayer.net/39330139-Spectral-analysis-of-suspended-material-in-coastal-waters-a-comparisonbetween-band-math-equations.html>, January 13, 2021.
- Mozumder, C., Tripathi, N.K. and Tipdecho, T. 2014. Ecosystem evaluation (1989–2012) of Ramsar wetland Deepor Beel using satellite-derived indices. *Environmental Monitoring and Assessment* 186(2014): 7909-7927.
- National Parks of Thailand. 2021. **Khao Sam Roi Yot National Park – General Information**. Available Source: <https://nps.dnp.go.th/parksdetail.php?id=129&name=KhaoSamRoiYotNationalPark>, February 20, 2021. (in Thai).
- Ngwenya, K. and Marambanyika, T. 2021. Trends in use of remotely sensed data in wetlands assessment and monitoring in Zimbabwe. *African Journal of Ecology* 59(3): 676-686. doi: 10.1111/aje.12858.
- Rapinel, S., Fabre, E., Dufour, S., Arvor, D., Mony, C. and Hubert-Moy, L. 2019. Mapping potential, existing and efficient wetlands using free remote sensing data. *Journal of Environmental Management* 247(2019): 829-839.
- Sarun, S., Vineetha, P. and Kumar, R.A. 2016. Semi-Automated Methods for Wetland Mapping Using Landsat ETM+: A Case Study from Tsunami Affected Panchyats of Alappad & Arattupuzha, South Kerala. *International Journal of Science and Research* 5(8): 1150-1154.
- Shahzad, M.I., Meraj, M., Nazeer, M., Zia, I., Inam, A., Mehmood, K. and Zafar, H. 2018. Empirical estimation of suspended solids concentration in the Indus Delta Region using Landsat-7 ETM+ imagery. *Journal of Environmental Management* 209: 254-261.
- Sun, J., Cao, J., Duan, H., Yan, C. and Wang, T. 2012. Monitoring ecological health of wetlands and adjacent uplands by combining MODIS vegetation

- index and wetness index, pp. 1-4. *In Proceeding, International Symposium on Geomatics for Integrated Water Resource Management.* Geomatics for Integrated Water Resources Management (GIWRM), China.
- Tang, Z., Li, Y., Gu, Y., Jiang, W., Xue, Y., Hu, Q., LaGrange, T., Bishop, A., Drahota, J. and Li, R. 2016. Assessing Nebraska playa wetland inundation status during 1985-2015 using Landsat data and Google Earth Engine.
- Environmental Monitoring and Assessment** 188(12): 654.
- Thai Meteorological Department. 2021. **Report of Natural Disasters in Thailand.** Available Source: <http://climate.tmd.go.th/disaster/>, February 20, 2021.
- Xu, H. 2006. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. **International Journal of Remote Sensing** 27(14): 3025-3033.

การพยากรณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย

Forecasting Carbon Dioxide Emissions (CO₂) from Industry Sector in Thailand

ณภัทน์จันทร์ ด่านสวัสดิ์*

Napattchan Dansawad *

Received: 17 December 2020, Revised: 28 February 2021, Accepted: 20 December 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนตุลาคม 2563 จำนวนทั้งสิ้น 46 ค่า ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด ประกอบด้วยข้อมูลชุดที่ 1 คือข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนธันวาคม 2562 จำนวน 36 ค่า ถูกนำมาใช้ในการศึกษาและเปรียบเทียบความเหมาะสมของวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธี ได้แก่ 1) วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ 2) วิธีแนวโน้มเชิงเส้น 3) วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย 4) วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง 5) วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสามครั้ง และ 6) วิธีแยกส่วนประกอบ จากนั้นจะเลือกวิธีการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ศึกษามากที่สุด จากค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (MAPE) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ย (MAD) ที่ต่ำที่สุด แล้วจึงนำวิธีการพยากรณ์ที่คัดเลือกแล้ว มาหาช่วงเวลาการพยากรณ์ล่วงหน้าตั้งแต่ 3 เดือน 6 เดือน และ 9 เดือน โดยใช้ข้อมูลชุดที่ 2 คือข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม 2563 ถึงเดือนตุลาคม 2563 จำนวน 10 ค่า เพื่อหาว่าวิธีการพยากรณ์นี้เหมาะสมกับช่วงเวลาการพยากรณ์ล่วงหน้าช่วงไหนมากที่สุด ผลการศึกษาพบว่า วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง เป็นวิธีการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมมากที่สุด และเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ล่วงหน้า 3 เดือน

คำสำคัญ: การพยากรณ์, วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง, วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ABSTRACT

The purposes of this research were to examine and compare the forecasting methods for carbon dioxide emissions (CO_2) from the industry sector in Thailand. The data were gathered from Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy between January 2017 and October 2020, and 46 values were used and separated into two groups. The first group contained 36 values between January 2017 and December 2019 for studying and comparing the most appropriate forecasting methods by (1) Moving Average Method, (2) Trend Analysis Method, (3) Single Exponential Smoothing Method, (4) Double Exponential Smoothing Method, (5) Triple Exponential Smoothing Method, and (6) Decomposition Method. The suitable forecasting method was chosen by considering the smallest value of Mean Absolute Percent Error and Mean Absolute Deviation. Then the selected suitable method was used to determine the most suitable forecasting period by the second group which contained 10 values from January 2020 to October 2020 for finding the most suitable predictive timing. The result indicated that Double Exponential Smoothing Method was the best and most suitable forecasting 3 months in advance.

Key words: forecasting, double exponential smoothing method, moving average method, CO_2

บทนำ

ข้อมูลจากสถาบันทรัพยากรโลก (World Resource Institute) (Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization), 2018) ระบุว่าในปี พ.ศ. 2555 ประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคอุตสาหกรรมสูงเป็นอันดับที่ 27 ของโลก และเป็นอันดับที่ 3 ของประเทศในอาเซียน โดยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งสิ้นประมาณ 375.7 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า หรือคิดเป็นร้อยละ 0.8 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก และในปี พ.ศ. 2563 (Chumme, 2011) ระบุว่าประเทศไทยมีปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากเป็นอันดับที่ 25 จาก 186 ประเทศทั่วโลก โดยก๊าซเรือนกระจกที่ประเทศไทยมีการปล่อยออกมามากที่สุด ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งมีอัตราการปล่อยก๊าซโดยเฉลี่ยสะสมต่อปีสูงถึงร้อยละ 5 เมื่อเทียบกับอัตราเฉลี่ยทั่วโลกที่เพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 0.4 ต่อปีเท่านั้น และเมื่อนำปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย

เทียบกับปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกภาคส่วนของกรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ ซึ่งมีขนาดเศรษฐกิจใหญ่กว่าประเทศไทยเกือบ 10 เท่า (Chumme, 2011) พบว่า ทั้งสองประเทศมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใกล้เคียงกัน

โดยสาเหตุหลักที่ทำให้ประเทศไทยมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว นั้น สืบเนื่องจากการกระทำและกิจกรรมของประชาชนภายในประเทศ เช่น การขุดพลังงานฟอสซิล อย่างน้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ มาใช้ ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศเป็นจำนวนมากและรวดเร็ว เกินกว่าที่ต้นไม้และพืชต่างๆ รวมถึงมหาสมุทรจะดูดซับไว้ได้ นอกจากนี้ การเปลี่ยนพื้นที่ป่าให้เป็นพื้นที่เกษตรกรรม และสร้างที่อยู่อาศัย ก็เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้คาร์บอนที่สะสมอยู่ในเนื้อไม้ ในราก ในดิน ถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ เป็นต้น

เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณการปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณการสะสมของก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้อุณหภูมิภายในโลกสูงขึ้น ทำให้ฤดูกาลทั่วโลกเปลี่ยนไป ก๊าซเรือนกระจกเป็นก๊าซที่มีความจำเป็นและมีความสำคัญต่อการรักษาระดับอุณหภูมิของโลก เมื่อรังสีจากดวงอาทิตย์แผ่เข้าสู่ชั้นบรรยากาศและให้ความร้อนแก่โลก พลังงานความร้อนบางส่วนจะทำให้อุณหภูมิภายในโลกมีความอบอุ่น ก่อนที่พลังงานความร้อนนั้นจะถูกแผ่กลับออกห้วงอวกาศในรูปรังสีอินฟราเรด โดยในสภาวะปกติรังสีอินฟราเรดที่ถูกแผ่ออกไปบางส่วนจะถูกชั้นบรรยากาศของโลกกักเก็บไว้ตามธรรมชาติ ซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิของโลกอยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของสิ่งที่มีชีวิต แต่ถ้าชั้นบรรยากาศของโลกหนาขึ้น เนื่องจากการสะสมของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซเรือนกระจกอื่นๆ รังสีอินฟราเรดที่ควรจะถูกแผ่ออกไปบางส่วนห้วงอวกาศจะถูกเก็บสะสมรวมกันไว้ที่ชั้นบรรยากาศแทน ส่งผลให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นถึงระดับเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้เช่นกัน

จากปัญหาสถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกอันมีสาเหตุหลักมาจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประเทศไทยจึงเป็น 1 ใน 184 ประเทศทั่วโลก ที่ได้ให้สัตยาบันเข้าร่วมความตกลงปารีส ซึ่งเป็นกลไกภายใต้อนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยมีเป้าหมายลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้ได้อย่างน้อย 7% ภายในปี พ.ศ. 2563 และลดให้ได้ 20-25% ภายในปี พ.ศ. 2573 (Ngamrabiab, 2020)

เพื่อเป็นประโยชน์ในการวางแผนการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย ผู้วิจัยจึงใช้ข้อมูล

ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนตุลาคม 2563 จำนวนทั้งสิ้น 46 ค่า มาใช้ในการศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสม สำหรับการพยากรณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย โดยจะศึกษาจากวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธี ได้แก่ 1) วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ 2) วิธีแนวโน้มเชิงเส้น 3) วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย 4) วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง 5) วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสามครั้ง และ 6) วิธีแยกส่วนประกอบ การที่ผู้วิจัยเลือกวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธีนี้มาใช้ในการศึกษา เนื่องจากเป็นวิธีการพยากรณ์ที่คำนึงถึงความสัมพันธ์ของข้อมูล โดยการนำข้อมูลในอดีตที่มีอยู่มาสร้างสมการการพยากรณ์ โดยที่วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่จะนำข้อมูลในอดีตมาถ่วงน้ำหนักเท่าๆ กัน เพื่อพยากรณ์ค่าต่างๆ ที่ต้องการในอนาคต วิธีแนวโน้มเชิงเส้นจะนำข้อมูลในอดีตมาใช้ ภายใต้งบเงื่อนไขที่ว่าค่าของข้อมูลต่างๆ เมื่อนำมาเขียนกราฟกราฟที่ได้จะต้องมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงเท่านั้น สำหรับวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลจะคล้ายๆ กับวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ แต่จะแตกต่างกันตรงที่มีการให้น้ำหนักหรือความสำคัญของข้อมูลที่เกิดขึ้นล่าสุดก่อน กล่าวคือ วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย จะเหมาะสมสำหรับข้อมูลที่ไม่มีทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล ในขณะที่วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง จะเหมาะสมสำหรับข้อมูลที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และไม่มีอิทธิพลของฤดูกาล และวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสามครั้ง จะเหมาะสมสำหรับข้อมูลที่มีแนวโน้ม และมีอิทธิพลของฤดูกาล สำหรับวิธีแยกส่วนประกอบ จะใช้กับข้อมูลที่มีแนวโน้ม และมีอิทธิพลของฤดูกาล แต่จะมีการแยกองค์ประกอบ ออกเป็นองค์ประกอบ

แนวโน้ม องค์ประกอบฤดูกาล และองค์ประกอบสุม จากวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธีดังที่กล่าวข้างต้น ผู้วิจัย จะเลือกวิธีการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมมากที่สุด มาคำนวณหาช่วงเวลาการพยากรณ์ล่วงหน้าที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ศึกษา ก่อนที่จะนำไปใช้ในการพยากรณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยล่วงหน้าอีก จำนวน 14 เดือน คือตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2563 ถึง เดือนธันวาคม 2564

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ทำการรวบรวมข้อมูลปริมาณ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จาก ภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย เป็นรายเดือน ย้อนหลังจำนวนทั้งสิ้น 46 เดือน คือตั้งแต่เดือน มกราคม 2560 ถึงเดือนตุลาคม 2563 ซึ่งข้อมูล ดังกล่าวจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด ประกอบด้วยข้อมูล ชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนธันวาคม 2562 จำนวน 36 ค่า สำหรับศึกษาวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธี ได้แก่ 1) วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ 2) วิธีแนวโน้มเชิง เส้น 3) วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย 4) วิธี ปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง 5) วิธีปรับ เรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสามครั้ง และ 6) วิธีแยก ส่วนประกอบ โดยผู้วิจัยจะเลือกวิธีการพยากรณ์ที่ให้ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Mean Absolute Percent Error : MAPE) และค่าเฉลี่ยความ คลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Mean Absolute Deviation : MAD) ที่ต่ำที่สุด ซึ่งวิธีการพยากรณ์ที่เลือกนั้นจะถือ ว่ามีความเหมาะสมที่สุดสำหรับข้อมูลที่ต้องการ ศึกษา จากนั้นจะนำวิธีการพยากรณ์ที่เลือกมาคำนวณ ช่วงเวลาการพยากรณ์ล่วงหน้า 3 ช่วง คือ 3 เดือน 6 เดือน และ 9 เดือน โดยใช้ข้อมูลชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือน มกราคม 2563 ถึงเดือนตุลาคม 2563 จำนวน 10 ค่า

เพื่อหาว่าวิธีการพยากรณ์นี้เหมาะสมกับช่วงเวลาการ พยากรณ์ล่วงหน้าช่วงไหนมากที่สุด โดยพิจารณา เทียบเทียบจากค่า MAPE ที่ต่ำที่สุดของทั้ง 3 ช่วงเวลา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

นำ ข้อมูล ปริมาณ การ ปล่อย ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมใน ประเทศไทย ซึ่งรวบรวมตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนตุลาคม 2563 จำนวน 46 ค่า มาทำการ ตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูล ด้วยวิธี บ็อกพล็อต (Box Plot) ทั้งนี้ถ้าหากพบว่ามีข้อมูลที่มีค่าผิดปกติ จะต้องทำการปรับค่าผิดปกตินั้นโดยใช้วิธี Box-Cox transformation ก่อนที่จะใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นสำหรับการพยากรณ์ในขั้นตอนต่อไป

2. วิธีการพยากรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

หลังจากทำการตรวจสอบว่าข้อมูลทั้ง 46 ค่า ว่ามีค่าผิดปกติหรือไม่แล้ว จึงจะนำข้อมูลดังกล่าวมา แบ่งออกเป็น 2 ชุด โดยข้อมูลชุดที่ 1 ประกอบด้วยข้อมูล ตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนธันวาคม 2562 จำนวน 36 ค่า และข้อมูลชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2563 ถึง เดือนตุลาคม 2563 จำนวน 10 ค่า จากนั้นจะนำข้อมูล ชุดที่ 1 มาทำการศึกษาด้วยวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average Method)

เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับสร้างสมการ พยากรณ์ในช่วงระยะเวลานั้นๆ จากการเฉลี่ยค่า สังเกตล่าสุดจำนวน n ค่า เมื่อกำหนดให้น้ำหนักของ ข้อมูลแต่ละค่ามีค่าที่เท่ากัน และไม่กำหนดจำนวนค่า สังเกต n ที่นำมาเฉลี่ยไว้แน่นอน แต่จะเลือก n ที่ทำ ให้ค่าพยากรณ์ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด โดย พิจารณาจากค่า n ที่ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนโดยรวมต่ำ ที่สุด (Taengphukieo and Issarapong, 2019) มีสมการ การพยากรณ์หนึ่งช่วงเวลาล่วงหน้าที่เวลา t ดังนี้

$$\hat{Y}_t = (A_t + A_{t-1} + \dots + A_{t-n+1}) / n \quad (1)$$

เมื่อ $\hat{Y}_t$ แทน ค่าพยากรณ์ในช่วงเวลาที่ t
 A_t แทน ข้อมูลของข้อมูลในช่วงเวลาปัจจุบัน t
 n แทน จำนวนข้อมูลที่จะใช้ในการหาค่าเฉลี่ย

หากปัจจัยดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์กันในรูปแบบเชิงเส้น ก็สามารถใช้วิธีนี้ในการสร้างสมการเส้นตรงเพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าในอนาคต (Taengphukieo and Issarapong, 2019) โดยมีรูปแบบสมการคือ

2.2 วิธีแนวโน้มเชิงเส้น (Trend Analysis Method)

เป็นวิธีการพยากรณ์ที่ใช้หลักการทางคณิตศาสตร์มาพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่ต้องการศึกษา

$$\hat{Y}_t = a + bt \quad (2)$$

เมื่อ $\hat{Y}_t$ แทน ค่าพยากรณ์ในช่วงเวลาที่ t
 a แทน ค่าตัดแกนที่ช่วงเวลา 0
 b แทน ค่าความชัน
 t แทน ช่วงเวลา t

ความผันแปรเนื่องจากเหตุการณ์ที่ผิดปกติเพียงอย่างเดียว ค่าพยากรณ์จะคำนวณได้จากข้อมูลที่ผ่านมทั้งหมด โดยมีการให้น้ำหนักหรือความสำคัญของข้อมูลแต่ละค่าไม่เท่ากัน การให้น้ำหนักจะให้ความสำคัญกับข้อมูลที่เกิดขึ้นล่าสุด และจะลดหลั่นกันไปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลสำหรับค่าของข้อมูลที่ห่างไกลออกไป โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ปรับให้เรียบ α มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 (Taesombut, 2006) มีสมการพยากรณ์หนึ่งช่วงเวลาล่วงหน้าเป็นเวลา t ดังนี้

2.3 วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย

(Single Exponential Smoothing Method)

เป็นวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมกับข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลง หรือเป็นข้อมูลที่ไม่มีแนวโน้มและไม่มีความผันแปรตามฤดูกาล มีเฉพาะ

$$\hat{Y}_{t+1} = \phi Y_t + (1 - \phi) \hat{Y}_t \quad (3)$$

เมื่อ $\hat{Y}_{t+1}$ แทน ค่าพยากรณ์ในช่วงเวลาที่ $t+1$
 ϕ แทน ค่าถ่วงน้ำหนักปรับเรียบ
 Y_t แทน ค่าจริงในช่วงเวลาปัจจุบัน
 $\hat{Y}_t$ แทน ค่าพยากรณ์ในช่วงเวลาที่ t

กับวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย แต่จะแตกต่างกันตรงที่วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย เหมาะกับข้อมูลที่มีความไม่แน่นอนเพียงอย่างเดียว (ไม่มีแนวโน้มและฤดูกาล) จึงมีค่าคงที่สำหรับปรับเรียบเพียง 1 ค่า คือ α แต่วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง จะมีค่าคงที่สำหรับปรับระดับ 2 ค่า คือ α และ γ (Taesombut, 2006) มีสมการที่ใช้ในการพยากรณ์ คือ

2.4 วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง

(Double Exponential Smoothing Method)

เรียกอีกอย่างว่าวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบโฮลท์ (Holt's Linear Method) เป็นวิธีที่ใช้หลักการของเอ็กซ์โพเนนเชียลมาใช้ซึ่งคล้าย

$$\hat{Y}_{t+n} = L_t + b_t n \quad (4)$$

เมื่อ $\hat{Y}_{t+n}$ แทน ค่าพยากรณ์ในช่วงเวลาที่ $t+n$

L_t แทน ค่าคงที่ จะหาได้จาก

$$L_t = \alpha Y_t + (1-\alpha)(L_{t-1} + b_{t-1})$$

b_t แทน ค่าประมาณแนวโน้มของข้อมูล จะหาได้จาก $b_t = \gamma(L_t - L_{t-1}) + (1-\gamma)b_{t-1}$

n แทน ช่วงเวลาของการพยากรณ์

α แทน ค่าคงที่ที่ทำให้เรียบระหว่างข้อมูลกับค่าพยากรณ์ มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

γ แทน ค่าคงที่ที่ทำให้เรียบระหว่างแนวโน้มจริง กับค่าประมาณแนวโน้ม มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

2.5 วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสามครั้ง (Triple Exponential Smoothing Method) หรือวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบวินเทอร์ (Winter's Method) เป็นวิธีที่เหมาะสม

$$\hat{Y}_{t+n} = (L_t + nb_t)S_t \quad (5)$$

เมื่อ $\hat{Y}_{t+n}$ แทน ค่าพยากรณ์ในช่วงเวลาที่ $t+n$

L_t แทนค่าประมาณแนวระดับของข้อมูลคำนวณจาก

$$L_t = \alpha(Y_t / S_{t-s}) + (1-\alpha)(L_{t-1} + b_{t-1})$$

n แทน ช่วงเวลาของการพยากรณ์

b_t แทน ค่าประมาณแนวโน้ม จะหาได้จาก

$$b_t = \gamma(L_t - L_{t-1}) + (1-\gamma)b_{t-1}$$

S_t แทน ค่าประมาณฤดูกาล คำนวณได้จาก

$$S_t = \gamma(Y_t / L_t) + (1-\delta)S_{t-1}$$

α แทน ค่าคงที่ที่ทำให้เรียบระหว่างข้อมูลกับค่าพยากรณ์ มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

γ แทน ค่าคงที่ที่ทำให้เรียบระหว่างแนวโน้มจริง กับค่าประมาณแนวโน้ม มีค่าระหว่าง 0 ถึง 0

δ แทน ค่าคงที่ที่ทำให้เรียบระหว่างค่าฤดูกาลจริงกับค่าประมาณฤดูกาล มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

สำหรับข้อมูลที่มีแนวโน้ม อิทธิพลของฤดูกาล ใช้พยากรณ์ระยะสั้นถึงปานกลาง ไม่นิยมใช้กับข้อมูลที่เป็นรายปี เพราะจะทำให้ไม่สามารถแยกอิทธิพลของฤดูกาลได้ แต่นิยมใช้กับข้อมูลควรรอยู่ในรูปรายเดือน รายสัปดาห์ หรือรายวัน ถ้าเป็นข้อมูลรายเดือนต้องมีข้อมูลอย่างน้อย 36 ค่าขึ้นไป วิธีการนี้จะยังคงใช้หลักการของเอ็กซ์โพเนนเชียล คือให้ความสำคัญกับข้อมูลไม่เท่ากัน และมีค่าให้ปรับเรียบ 3 ค่าคือ α γ และ δ วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสามครั้งมี 2 รูปแบบ คือรูปแบบการคูณ และรูปแบบการบวก ในที่นี้จะเลือกศึกษาเฉพาะวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสามครั้งในรูปแบบการคูณ (Taesombut, 2006) โดยมีรูปแบบสมการที่ใช้ในการพยากรณ์ คือ

s แทน จำนวนฤดูกาลใน 1 ปี เช่น ถ้าเป็น ข้อมูลรายเดือน $s=12$

2.6 วิธีแยกส่วนประกอบ (Decomposition Method)

เป็นวิธีการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลา โดยการแยกส่วนประกอบข้อมูลอนุกรมเวลา และนำไปสร้างสมการพยากรณ์ ส่วนประกอบของอนุกรมเวลา คือ อิทธิพลแนวโน้ม (Trend: T) และอิทธิพลของฤดูกาล (Seasonal Effect: S) สำหรับอิทธิพลของวัฏจักร (Cyclical Effect: C) และเหตุการณ์ที่ผิดปกติ (Irregular Effect: I) จะไม่นิยมนำมาพิจารณา เนื่องจากไม่สามารถคาดการณ์ได้ว่าจะเกิดขึ้นในช่วงใด (Taesombut, 2006) ซึ่งตัวแบบที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้อยู่ในรูปแบบการคูณ คือ

$$\hat{Y}_t = T_t S_t; t=1,2,\dots \quad (6)$$

เมื่อ $\hat{Y}_t$ แทน ค่าพยากรณ์ในช่วงเวลาที่ t

T_t แทน ค่าอิทธิพลของแนวโน้ม สำหรับช่วงเวลา t

S_t แทน ค่าอิทธิพลของฤดูกาล สำหรับช่วงเวลา t

3. เกณฑ์การเปรียบเทียบความเหมาะสมของวิธีการพยากรณ์

เมื่อนำข้อมูลชุดที่ 1 จำนวนทั้งสิ้น 36 ค่า มาทำการศึกษาดูด้วยวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธีดังที่กล่าวข้างต้นแล้ว จึงจะทำการเปรียบเทียบความเหมาะสม

ระหว่างวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธีที่ศึกษา โดยพิจารณาจาก MAPE ซึ่งเป็นการวัดความถูกต้องของการพยากรณ์ที่วัดจากขนาดของความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์เทียบกับค่าจริง โดยไม่คิดเครื่องหมาย เป็นค่าวัดความถูกต้องที่ไม่มีหน่วย จึงเหมาะที่จะใช้กับการเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์เดียวกัน หรือเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์หลายวิธีเมื่อใช้ข้อมูลชุดเดียวกัน (Kawinpas *et al.*, 2015) มีสูตรการคำนวณดังต่อไปนี้

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i / Y_i| \times 100\% \quad (7)$$

เมื่อ e_i แทน ผลต่างของค่าจริงกับค่าพยากรณ์ ณ เวลา t

Y_i แทน ค่าจริง ณ เวลา t

นอกจากค่า MAPE แล้ว ผู้วิจัยจะใช้ค่า MAD พิจารณาความเหมาะสมของวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธี ควบคู่ไปด้วยกัน โดยค่า MAD นี้ เป็นค่าวัด

ความถูกต้องของการพยากรณ์ ที่วัดจากขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ โดยไม่คำนึงถึงทิศทางของความคลาดเคลื่อน และข้อมูลจะมีหน่วยวัดหน่วยเดียวกันกับสิ่งที่ต้องการวัด (Jitrat, 2015) โดยคำนวณจาก

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (8)$$

4. การหาช่วงการพยากรณ์ล่วงหน้าที่เหมาะสม

หลังจากการนำข้อมูลชุดที่ 1 จำนวนทั้งสิ้น 36 ค่า มาทำการศึกษาดูด้วยวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธี และคำนวณหาค่า MAPE และ MAD ของแต่ละวิธีแล้ว จึงจะคัดเลือกวิธีการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมกับข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยมากที่สุด โดยจะพิจารณาจากวิธีการพยากรณ์ที่มีค่า MAPE และ MAD ที่ต่ำที่สุด แล้วจึงนำวิธีการพยากรณ์ที่คัดเลือกแล้ว มาหาช่วงเวลาการพยากรณ์ล่วงหน้าตั้งแต่ 3 เดือน 6 เดือน และ 9 เดือน โดยใช้ข้อมูลชุดที่ 2 คือข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม 2563 ถึงเดือนตุลาคม 2563 จำนวน 10 ค่า โดยพิจารณาจากค่า MAPE เพื่อหาว่าวิธีการพยากรณ์นี้เหมาะสมกับช่วงเวลาการ

พยากรณ์ล่วงหน้าช่วงไหนมากที่สุด ทั้งนี้จะพิจารณาที่ค่า MAPE ก่อน ถ้าหากมีค่าเท่ากัน จึงจะพิจารณาที่ค่า MAD เป็นลำดับถัดไป จากนั้นจะนำวิธีการพยากรณ์ที่เลือก และช่วงเวลาการพยากรณ์ล่วงหน้าที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ศึกษา มาทำการพยากรณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยล่วงหน้าอีกจำนวน 14 เดือน

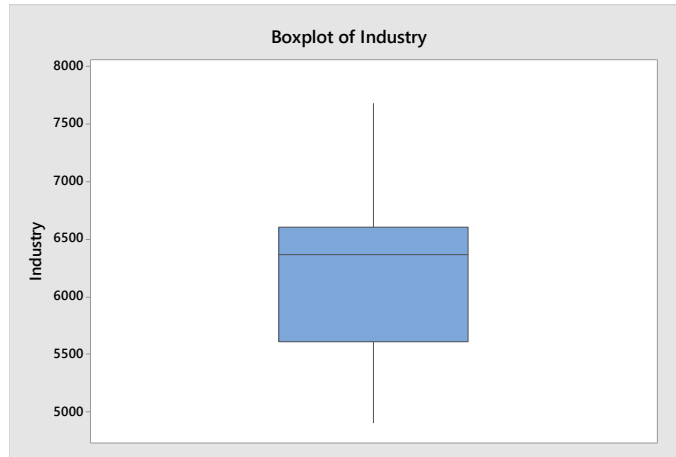
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

จากการนำข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย จำนวน 46 ค่า มาทำการตรวจสอบความ

ผิดปกติของข้อมูล ด้วยวิธีบ็อกพล็อต (Box Plot) แสดงดังภาพที่ 1 พบว่าไม่มีค่าผิดปกติแต่อย่างใด ดังนั้นจึงสามารถใช้ข้อมูลชุดนี้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการ

พยากรณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยด้วยวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธี ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นต่อไปได้

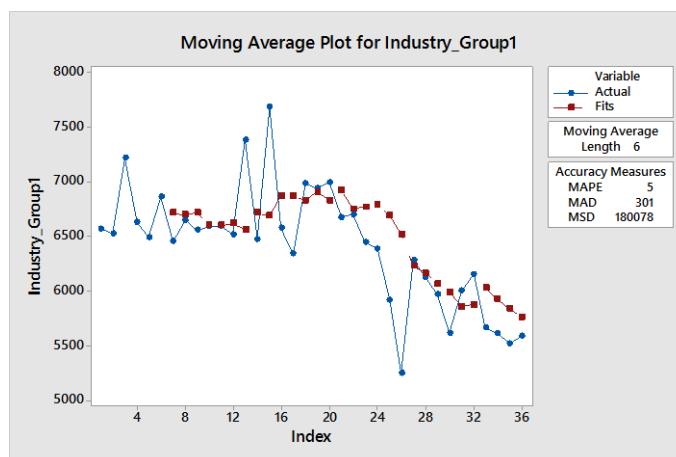


ภาพที่ 1 กราฟบ็อกพล็อต (Box Plot) ของข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย จำนวน 46 ค่า

2. ผลการเปรียบเทียบความเหมาะสมระหว่างวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธีที่ศึกษา

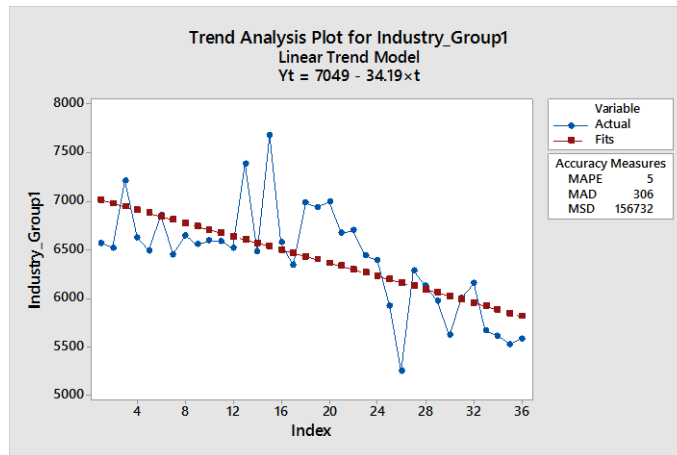
จากนั้นจะแบ่งข้อมูลจำนวน 46 ค่าออกเป็น 2 ชุด โดยจะนำข้อมูลชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนธันวาคม 2562 จำนวน 36 ค่า มาทำการศึกษา

ด้วยวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธี ได้ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยกับค่าพยากรณ์ โดยวิธีการพยากรณ์ต่างๆ แสดงดังภาพที่ 2 ถึงภาพที่ 7 ดังนี้



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ฯ ค่าจริงกับค่าพยากรณ์ โดยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

ผลการพยากรณ์โดยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ดังภาพที่ 2 พบว่า มีค่า MAPE = 5 และ ค่า MAD = 301

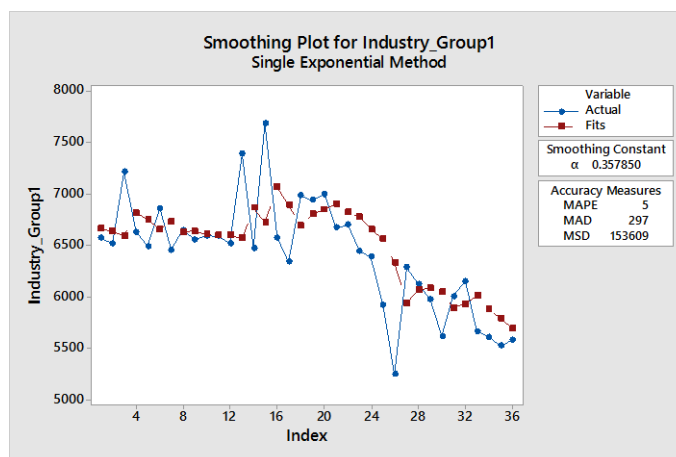


ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ฯ ค่าจริงกับค่าพยากรณ์ โดยวิธีแนวโน้มเชิงเส้น

ผลการพยากรณ์โดยวิธีแนวโน้มเชิงเส้น ดัง

โดยมีสมการการพยากรณ์คือ $\hat{Y}_t = 7,049 - 34.19t$

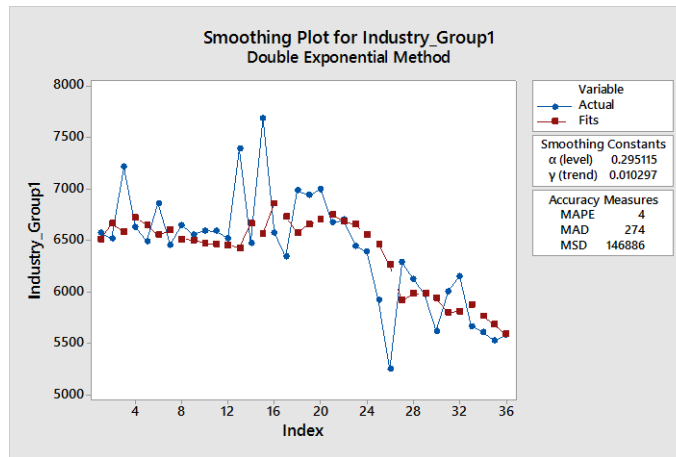
ภาพที่ 3 พบว่า มีค่า MAPE = 5 และ ค่า MAD = 306



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ฯ ค่าจริงกับค่าพยากรณ์ โดยวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย

ผลการพยากรณ์โดยวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย ดังภาพที่ 4 พบว่า มีค่า MAPE

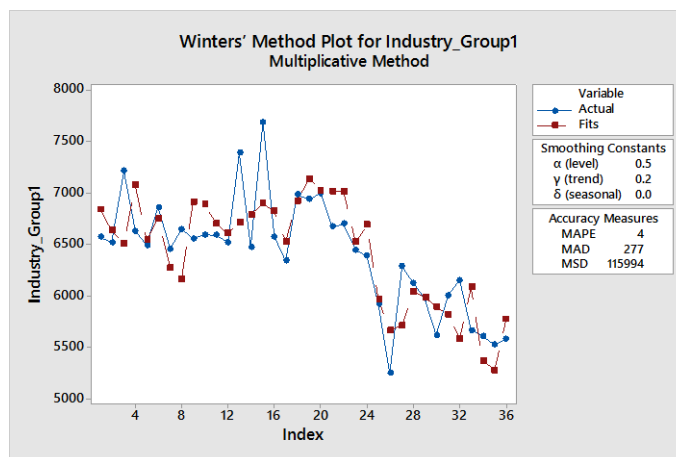
= 5 และค่า MAD = 297 โดยมีค่าถ่วงน้ำหนักปรับเรียบ (α) โดยประมาณเท่ากับ 0.358



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ฯ ค่าจริงกับค่าพยากรณ์ โดยวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง

ผลการพยากรณ์โดยวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง ดังภาพที่ 5 พบว่า มีค่า MAPE = 4 และค่า MAD = 274 โดยมีค่าคงที่สำหรับ

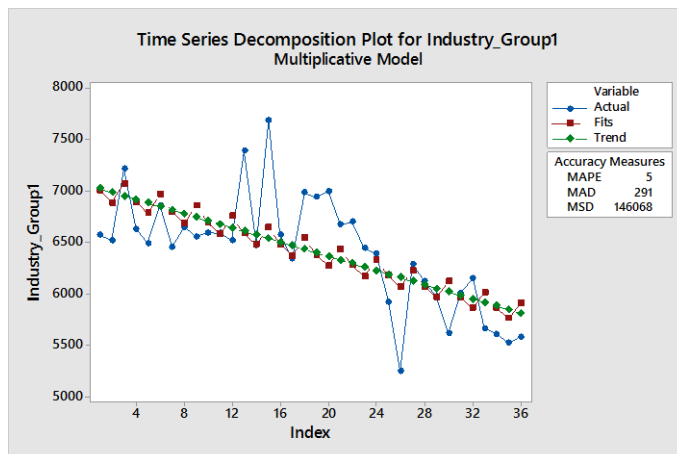
ปรับระดับ 2 ค่า คือ α และ γ โดยประมาณเท่ากับ 0.295 และ 0.010 ตามลำดับ



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ฯ ค่าจริงกับค่าพยากรณ์ โดยวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสามครั้ง

ผลการพยากรณ์โดยวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสามครั้ง ดังภาพที่ 6 พบว่า มีค่า MAPE = 4 และค่า MAD = 277 โดยมีค่าคงที่ที่ทำให้เรียบ 3

ค่าคือ α , γ และ δ โดยประมาณเท่ากับ 0.5, 0.2 และ 0.0 ตามลำดับ



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ฯ ค่าจริงกับค่าพยากรณ์ โดยวิธีแยกส่วนประกอบ

ผลการพยากรณ์โดยวิธีแยกส่วนประกอบ ดังภาพที่ 7 พบว่า มีค่า $MAPE = 5$ และ ค่า $MAD = 291$

3. ผลการการเปรียบเทียบความเหมาะสมของการพยากรณ์

เมื่อได้ผลการพยากรณ์จากวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธีแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการเปรียบเทียบความเหมาะสมของวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธี ซึ่งเกณฑ์ในการคัดเลือกวิธีการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมที่สุดคือต้องเลือกจากวิธีการพยากรณ์ที่มี $MAPE$ และ MAD ที่ต่ำที่สุด ทั้งนี้จะพิจารณาที่ค่า $MAPE$ ก่อน ถ้าหากมีค่าเท่ากัน จึงจะพิจารณาที่ค่า MAD เป็นลำดับถัดไป ผลการเปรียบเทียบ $MAPE$ และ MAD แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งวิธีที่ให้ค่า $MAPE$ และ MAD ต่ำที่สุด คือ วิธี

ปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง เนื่องจากมีค่า $MAPE$ และ MAD ที่ต่ำที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 4.0 และ 274 พันตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ตามลำดับ รองลงมาคือ วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสามครั้ง วิธีแยกส่วนประกอบ วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย และวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ตามลำดับ ในขณะที่วิธีแนวโน้มเชิงเส้น เป็นวิธีการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการพยากรณ์อื่นๆ ที่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้ ดังนั้น วิธีการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้พยากรณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยมากที่สุด คือ วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบความเหมาะสมของการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธี

วิธีการพยากรณ์	ค่า MAPE	ค่า MAD (พันทันคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่า)
1. วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่	5.0	301
2. วิธีแนวโน้มเชิงเส้น	5.0	306
3. วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย	5.0	297
4. วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง	4.0	274
5. วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสามครั้ง	4.0	277
6. วิธีแยกส่วนประกอบ	5.0	291

4. ผลการหาช่วงการพยากรณ์ล่วงหน้าที่เหมาะสม

จากผลการเปรียบเทียบความเหมาะสมของวิธีการพยากรณ์ทั้ง 6 วิธีที่ศึกษาข้างต้น พบว่าวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง มีความเหมาะสมสำหรับข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยมากที่สุด จึงนำวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง มาทำการหาช่วงเวลาการพยากรณ์ล่วงหน้าที่เหมาะสม โดยกำหนดช่วงเวลาการพยากรณ์ออกเป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงเวลาการพยากรณ์ล่วงหน้า 3 เดือน 6 เดือน และ 9 เดือน โดยคำนวณจากข้อมูลชุดที่ 2 คือข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม 2563 ถึงเดือนตุลาคม 2563 จำนวน 10 ค่า ผลการศึกษาพบว่า วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง เหมาะสมกับการพยากรณ์ล่วงหน้า 3 เดือน เนื่องจากให้ค่า MAPE ต่ำที่สุดเพียง 3.61 เมื่อเทียบกับช่วงการพยากรณ์ล่วงหน้า 6 เดือน และ 9 เดือน ที่มีค่า MAPE เท่ากับ 5.07 และ 4.49 ตามลำดับ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบช่วงการพยากรณ์ล่วงหน้าที่เหมาะสม โดยวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง

ล่วงหน้า 3 เดือน		ล่วงหน้า 6 เดือน		ล่วงหน้า 9 เดือน	
ค่าจริง	ค่าพยากรณ์	ค่าจริง	ค่าพยากรณ์	ค่าจริง	ค่าพยากรณ์
5,938.84	5,545.29	5,938.84	5,545.29	5,938.84	5,545.29
5,377.04	5,501.07	5,377.04	5,501.07	5,377.04	5,501.07
5,354.93	5,456.85	5,354.93	5,456.85	5,354.93	5,456.85
		4,901.71	5,412.63	4,901.71	5,412.63
		5,173.14	5,368.41	5,173.14	5,368.41
		5,052.43	5,324.19	5,052.43	5,324.19
				5,197.88	5,279.98
				5,296.57	5,235.76
				5,600.00	5,191.54
MAPE = 3.61		MAPE = 5.07		MAPE = 4.49	

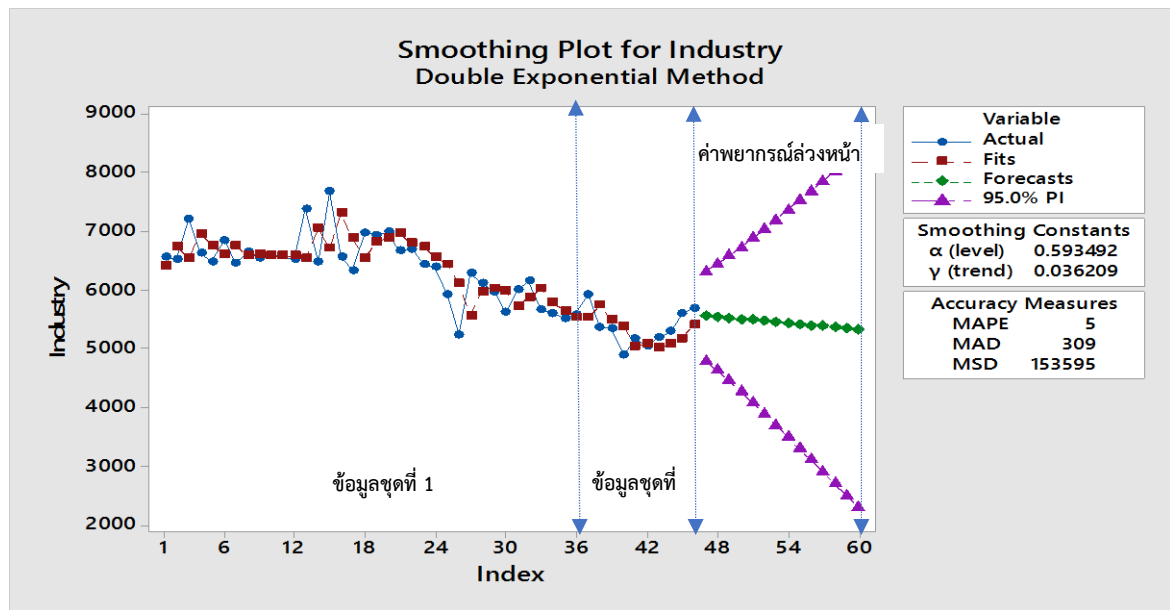
จากการเปรียบเทียบและคัดเลือกวิธีการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมกับข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย พบว่าวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง มีความเหมาะสมกับข้อมูลดังกล่าวมากที่สุด อาจเนื่องมาจากเป็นวิธีที่มีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ปรับให้เรียบจำนวน 2 ค่าในการปรับระดับของข้อมูล โดยใช้ค่า α เป็นค่าสัมประสิทธิ์ปรับให้เรียบระหว่างข้อมูลจริงกับค่าพยากรณ์ และใช้ γ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ปรับให้เรียบระหว่างแนวโน้มจริงกับค่าประมาณแนวโน้ม เพื่อให้ได้ค่าพยากรณ์ที่เกิดขึ้นใหม่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งจะสามารถใช้ได้ดีในกรณีที่ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เป็นข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีแนวโน้มแต่ไม่ปรากฏอิทธิพลของฤดูกาลเด่นชัด และยังเหมาะสมกับการพยากรณ์ในระยะสั้น จนถึงการพยากรณ์ในระยะปานกลาง สอดคล้องกับการศึกษาของ (Bermúdez *et al.*, 2006; Poonsuan, 2007; Tojumsil and Pimsakul, 2018; Ampawa and Dansawad, 2020)

สำหรับการพยากรณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมใน

ประเทศไทยล่วงหน้า จำนวน 14 เดือน คือนับตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2563 ถึงเดือนธันวาคม 2564 โดยวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง สามารถแสดงดังตารางที่ 3 และภาพที่ 8 ซึ่งผลการพยากรณ์ล่วงหน้าพบว่า ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย จะยังคงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรก และจะค่อยๆ ลดต่ำลงมาเรื่อยๆ โดยจะแนวโน้มที่สูงที่สุดในเดือนพฤศจิกายน 2564 มีค่าประมาณ 5,559.59 พันตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ในขณะที่เดือนธันวาคม 2564 จะมีแนวโน้มที่ต่ำที่สุด โดยมีค่าโดยประมาณ 5,333.82 พันตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายในประเทศไทยที่ต้องการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้ได้มากขึ้นในทุกๆ ปี ภายหลังจากการลงนามในสัตยาบันเข้าร่วมความตกลงปารีส ภายใต้อนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ในปี 2559 (Limsakul and Jungoth, 2016)

ตารางที่ 3 ค่าพยากรณ์ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (หน่วย: พันตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า) จาก ภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2563 ถึงเดือนธันวาคม 2564 โดยวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง

ช่วงเวลา	ค่าพยากรณ์	ช่วงเวลา	ค่าพยากรณ์
พฤศจิกายน 2563	5,559.59	มิถุนายน 2564	5,438.02
ธันวาคม 2563	5,542.22	กรกฎาคม 2564	5,420.65
มกราคม 2564	5,524.86	สิงหาคม 2564	5,403.29
กุมภาพันธ์ 2564	5,507.49	กันยายน 2564	5,385.92
มีนาคม 2564	5,490.12	ตุลาคม 2564	5,368.55
เมษายน 2564	5,472.75	พฤศจิกายน 2564	5,351.19
พฤษภาคม 2564	5,455.39	ธันวาคม 2564	5,333.82



ภาพที่ 8 การพยากรณ์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ฯ ล่วงหน้า เดือนพฤศจิกายน 2563 ถึงเดือนธันวาคม 2564 โดยวิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง

สรุป

การวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบและคัดเลือกวิธีการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมกับข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนตุลาคม 2563 จำนวนทั้งสิ้น 46 ค่า ผู้วิจัยได้แบ่งข้อมูลดังกล่าวออกเป็น 2 ชุด โดยข้อมูลชุดที่ 1 ประกอบด้วยข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนธันวาคม 2562 จำนวน 36 ค่าสำหรับศึกษาเปรียบเทียบความเหมาะสมของวิธีการพยากรณ์ 6 วิธี คือ 1) วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ 2) วิธีแนวโน้มเชิงเส้น 3) วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลอย่างง่าย 4) วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง 5) วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสามครั้ง และ 6) วิธีแยกส่วนประกอบ โดยใช้เกณฑ์พิจารณาค่า MAPE และ MAD ที่ต่ำที่สุด เพื่อคัดเลือกวิธีการพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ต้องการศึกษามากที่สุด และข้อมูลชุดที่ 2 ประกอบด้วยข้อมูลตั้งแต่เดือน

มกราคม 2563 ถึงเดือนตุลาคม 2563 จำนวน 10 ค่า ใช้สำหรับคำนวณหาช่วงเวลาการพยากรณ์ล่วงหน้าที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ต้องการศึกษา จากวิธีการพยากรณ์ที่ได้คัดเลือกมาแล้ว ทั้งนี้จะแบ่งช่วงเวลาการพยากรณ์ล่วงหน้าออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ 3 เดือน 6 เดือน และ 9 เดือน โดยจะพิจารณาจากค่า MAPE ที่ต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่า วิธีปรับเรียบเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบสองครั้ง มีความเหมาะสมสำหรับข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยมากที่สุด และเหมาะสมสำหรับช่วงเวลาการพยากรณ์ล่วงหน้า 3 เดือน

เอกสารอ้างอิง

Ampawa, P. and Dansawad, N. 2020. A Comparative Forecasting Model of Monthly Rainfall in Pathum Thani Province, pp. 1120-1129. In **National Conference on Innovation Management: Circular Economy with The King's Philosophy for Sustainable Development 5th**. College

- of Innovative Management, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Pathum Thani. (in Thai)
- Bermúdez, J.D., Segura, J.V. and Vercher, E. 2006. Improving Demand Forecasting Accuracy using Non-Linear Programming Software. **Journal of the Operational Research Society** 57: 94-100.
- Chummee, W. 2011. **Climate Change Closer and Scary than We Thought!**. Available Source: <https://www.scbeic.com/th/detail/product/703>, November 21, 2020. (in Thai)
- Jitrat, S. 2015. Accuracy Comparison on Stocks of the Information Technology and Communication Sector in the Stock Exchange of Thailand Forecasting Between ARIMA Model and E-GARCH Model. Master Thesis of Economics, Khon Kaen University. (in Thai)
- Kawinpas, M., Payakkapong, P. and Chomtee, B. 2015. A Comparison of Forecasting Methods between Bayesian Network and Exponential Smoothing for the Stock Price Index of Property and Construction Groups in Thailand. **Thammasat Journal** 23(2): 203-211. (in Thai)
- Ngamrabiab, C. 2020. **Thailand Reduces Greenhouse Gas Emissions by 45.68 million tons of Carbon Dioxide Equivalent (in 2019)**. Available Source: <https://www.bltbangkok.com/news/12495/>, November 21, 2020. (in Thai)
- Limsakul, A. and Jungoth, R. 2016. The Paris Agreement: An Important Turning Point in Global Action on Climate Change. **Green Research** 13(34): 3-11. (in Thai)
- Poonsuan, W. 2007. A Forecasting System for the Household Manufacturer A Case Study S.B. Furniture Co., Ltd. Master Thesis of Engineering (Industrial Engineering), King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. (in Thai)
- Taengphukieo, R. and Issarapong, N. 2019. Analysis of Comparing Forecasting Methods for Production Planning: Case Study of Beef Companies, Nakhon Phanom Province. **EAU Heritage Journal: Science and Technology** 13(3): 222-232. (in Thai)
- Taesombut, S. 2006. **Quantitative Forecasting**. 1st ed. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization). 2018. **Low Carbon City**. Greenhouse Gas Emissions Reporting for Local Government. Available Source: <http://www.tgo.or.th/2020/index.php/en>, March 3, 2020. (in Thai)
- The Office of SMEs Promotion. 2020. **Gross Domestic Product of Small and Medium Enterprises of 2019**. SME WHITE PAPER 2020. Available Source: https://www.sme.go.th/upload/mod_download/download-20201005123037.pdf, March 3, 2020. (in Thai)
- Tojumsil, J. and Pimsakul, S. 2018. Forecasting Model for Advanced Purchasing Planning by Exponential Smoothing. **Ladkrabang Engineering Journal** 35(2): 22-32. (in Thai)

การประเมินปริมาณโลหะหนักในดินชั้นบนและฝุ่นหลังคาใน 4 เขต ของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรี

Assessment of Heavy Metal Contents in Top Soil and Roof Dust around Four Districts in Thonburi Area

อุทุมพร สมพงษ์*

Utumporn Sompong*

Received: 25 April 2021, Revised: 20 October 2021, Accepted: 4 January 2022

บทคัดย่อ

ปัจจุบันปัญหาฝุ่นละอองเป็นปัญหาที่สำคัญของประเทศไทย หากเป็นฝุ่นละอองที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักด้วยแล้ว ยิ่งจะทำให้เกิดผลเสียเป็นอย่างมาก งานวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดปริมาณโลหะหนักในดินชั้นบนและฝุ่นหลังคาในกรุงเทพมหานคร วิเคราะห์หาปัจจัยที่อาจมีผลต่อปริมาณโลหะหนัก และระบุแหล่งที่มาของโลหะหนัก โดยวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก 5 ชนิดที่พบมากในฝุ่นและใช้มากในอุตสาหกรรม ได้แก่ เหล็ก ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม ในตัวอย่างดินชั้นบนและฝุ่นหลังคาใน 2 ปี คือ พ.ศ. 2563 และ 2564 จากชุมชน 4 เขตของกรุงเทพมหานครในฝั่งธนบุรี ได้แก่ บางขุนเทียน หนองแขม บางบอน และบางแค ซึ่งมีโรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมาก ผลการวิจัยพบว่า ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมในดินมีค่าเฉลี่ยเป็น 31.80 ± 12.22 และ 0.85 ± 0.36 มก./กก. ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพดินซึ่งไม่กำหนดมาตรฐานของโลหะหนักชนิดอื่นไว้ เช่นเดียวกับในฝุ่นที่ไม่มีมาตรฐานของปริมาณโลหะหนักในประเทศไทย ชนิดของตัวอย่าง พื้นที่ และเวลา มีผลต่อปริมาณตะกั่ว แต่ไม่พบอิทธิพลดังกล่าวในปริมาณโลหะชนิดอื่น ค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วในฝุ่นมากกว่าในดินอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p\text{-value} < 0.0001$) ซึ่งมีค่าเป็น 86.83 ± 40.48 และ 31.80 ± 12.22 มก./กก. ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วในพ.ศ. 2564 มากกว่า พ.ศ. 2563 อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p\text{-value} = 0.0012$) ซึ่งมีค่าเป็น 72.93 ± 64.05 และ 47.61 ± 21.50 มก./กก. ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วในแต่ละเขตมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p\text{-value} = 0.0003$) โดยเขตบางขุนเทียนมีค่ามากที่สุด คือ 86.95 ± 86.05 มก./กก. ยิ่งไปกว่านั้น ค่าการสะสมตัวของโลหะหนักในฝุ่นเฉลี่ยของสังกะสีในเขตหนองแขมและบางขุนเทียน และของแคดเมียมในเขตบางขุนเทียนพบว่า มีค่ามากกว่า

10

คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ บพิธพิมุข จักรวรรดิ เขตสัมพันธวงศ์ กรุงเทพฯ 10100

Faculty of Liberal Art, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Bophit Phimuk Chakkrawat, Samphanthawong, Bangkok 10100, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): utumporn.som@rmutr.ac.th

คำสำคัญ: ดินชั้นบน, ฝุ่นหลังคา, โลหะหนัก, ธนบุรี

ABSTRACT

Particular matter (PM) crisis is a currently important issue in Thailand. If the PM contaminates with heavy metals, it will be seriously affected. Therefore, this research aims to determine heavy metal contents in top soil and roof dust in Bangkok to find factors affecting the contents, and to identify sources of the heavy metals. The research method was done by assessing five heavy metal contents that have usually been found in dust and industry, including iron, copper, zinc, lead, and cadmium in samples. They are top soil and roof dust collected in two years of 2020 and 2021 from four districts in Bangkok, Thonburi zone composing of Bangkhuntien, Nongkhaem, Bangbon, and Bangkhae. There are lots of industries in the study areas. We found that the means of lead and cadmium contents in soil were 31.80 ± 12.22 and 0.85 ± 0.36 mg/kg which are less than those of standard quality of soil (No standard for other heavy metal contents in soil and no standard for all heavy metal contents in dust in Thailand). Besides, we found factors affecting lead content are types of samples, areas, and times, but there was no effect on the other heavy metal contents. The mean of lead content in dust was more than that of lead content in top soil comprising 86.83 ± 40.48 and 31.80 ± 12.22 mg/kg, respectively with a very high significance of $p\text{-value} < 0.0001$. The mean of lead content in 2020 was more than that of lead content in 2021 viz. 72.93 ± 64.05 and 47.61 ± 21.50 mg/kg, respectively with a very high significance of $p\text{-value} = 0.0012$. Moreover, the mean of lead content among different areas was highly significant with $p\text{-value} = 0.0003$. Bangkhuntien was the highest in the content of 86.95 ± 86.05 mg/kg. However, enrichment factor of zinc of Nongkhaem and Bangkhuntien and that of cadmium of Bangkhuntien were higher than 10.

Key words: roof dust, top soil, heavy metal, Thonburi

บทนำ

มลพิษทางอากาศ คือ ภาวะอากาศที่มีสารเจือปนอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าระดับปกติเป็นเวลานานพอที่จะทำให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์สัตว์ พืช หรือทรัพย์สินต่างๆ อาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ปัญหามลพิษทางอากาศที่รุนแรงมากขึ้นทุกปีจึงเนื่องมาจากฝุ่นเป็นสำคัญ ฝุ่นอาจจะมีการปนเปื้อนของโลหะหนักส่วนใหญ่มาจากอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น แบตเตอรี่ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และหมึกพิมพ์ เป็นต้น โลหะหนักจะเข้าสู่สิ่งมีชีวิตโดย

การดูดซึมผ่านเข้าทางผิวหนัง หรือดูดซึมเข้าสู่เซลล์หรือร่างกาย หรือหากเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ จะเข้าสู่กระบวนการย่อยอาหาร ผ่านทางระบบทางเดินอาหาร และถูกดูดซึมเข้าไปยังเนื้อเยื่ออวัยวะต่างๆ ของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดอันตรายหรือเกิดการเจ็บป่วยล้มตายลงได้ โลหะหนักเหล่านี้ไม่สลายตัวในธรรมชาติ สามารถสะสมอยู่ในอากาศ ดิน และน้ำ (Pollution Control Department, 2018)

โลหะหนัก คือ โลหะที่มีความหนาแน่นเกินกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ธาตุในตารางธาตุมี

อยู่ 80 ธาตุที่เป็นโลหะแต่มีโลหะประมาณ 22 ชนิด เท่านั้นที่มีรายงานว่า เป็นพิษต่อคน และการจัดการ ลำดับสารอันตรายโดย The Agency for Toxic Substance and Disease Registry (ATSDR) จัดให้โลหะหนักที่มี อันตรายสูงสุด 3 ชนิด คือปรอท ตะกั่ว และ แคดเมียม (NIDA center for research and development of disaster prevention and management, 2012) แต่โลหะหนักที่ พบมากในฝุ่นและใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม ได้แก่ สังกะสี แมงกานีส เหล็ก ตะกั่ว และทองแดง (Thongsanit *et al.*, 2015)

Samara and Voutsas (2005) ได้ศึกษาการ กระจายของโลหะหนักในฝุ่นจากถนน เมือง Thessaloniki ประเทศกรีซ ในย่านชุมชนเมืองใกล้กับ เขตอุตสาหกรรม พบการกระจายของโลหะหนัก 3 แบบ คือ อยู่ในอากาศตลอดเวลา ได้แก่ ตะกั่วและ แคดเมียม กระจายในฝุ่นขนาดกลาง ได้แก่ นิกเกิล ทองแดง และแมงกานีส และกระจายในฝุ่นขนาด ใหญ่ ได้แก่ เหล็ก นอกจากนี้ Khashman (2004) ได้ ศึกษาหาปริมาณโลหะหนักในดินและฝุ่นถนนในเขต อุตสาหกรรมในเมือง Karak ประเทศจอร์แดน พบว่า มีการปนเปื้อนของเหล็กมากที่สุด รองลงมา คือ ทองแดง สังกะสี นิกเกิล และตะกั่วตามลำดับ นอกจากนี้ Ozcan and Altundag (2013) ได้ศึกษาปริมาณโลหะหนักใน ตัวอย่างของฝุ่นจากถนนของย่านอุตสาหกรรมในเมือง Sakarya ประเทศตุรกีด้วย Inductively Couple Plasma - Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) พบว่า มีปริมาณของแคดเมียม แมงกานีส และสังกะสีมาก ที่สุด

งานวิจัยในครั้งนี้ จึงเป็นการวิเคราะห์ ปริมาณโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ เหล็ก ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียมด้วย ICP-OES ในดินชั้น บนและฝุ่นหลังคาใน 2 ปี คือ ปี พ.ศ. 2563 และ 2564 โดยใช้เก็บตัวอย่างดินชั้นบนและฝุ่นหลังคาจาก ชุมชนเขตของกรุงเทพมหานครในฝั่งธนบุรี จำนวน

4 เขต จากทั้งหมด 15 เขต ได้แก่ หนองแขม บางบอน บางขุนเทียน และบางแค ซึ่งอยู่ในเขตชานเมืองที่มี การจราจรหนาแน่นระดับหนึ่ง และมีโรงงาน อุตสาหกรรมจำนวนมาก โดยอุตสาหกรรมที่พบมาก ที่สุดในทุกเขต คือ อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์โลหะ ซึ่ง คิดเป็นร้อยละ 20.87, 18.53, 29.04 และ 21.58 ของ อุตสาหกรรมทั้งหมดในเขตหนองแขม บางบอน บาง ขุนเทียน และบางแค ตามลำดับ (Department of industrial works, 2021) ซึ่งมีโอกาสที่โลหะปนเปื้อนหนักผ่าน ทางอากาศได้ เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่อาจมีผลต่อ ปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ ชนิดของตัวอย่าง พื้นที่ และเวลา และหาค่าการสะสมตัวของโลหะหนักใน ฝุ่น (Enrichment Factor, EF) เพื่อระบุแหล่งที่มาของ โลหะหนักว่าเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์หรือเกิดจาก ธรรมชาติ โดย EF เป็นค่าที่สามารถใช้เปรียบเทียบ การเปลี่ยนแปลงของธาตุชนิดต่างๆ ในรูปแบบต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปจากที่มีอยู่ในธรรมชาติ ซึ่งเป็นที่ นิยมอย่างแพร่หลายในการอธิบายการเปลี่ยนแปลง ของธาตุต่างๆ ที่มีกิจกรรมของมนุษย์เข้ามาเกี่ยวข้อง เป็นการบอกถึงระดับการปนเปื้อนของธาตุชนิดนั้น (Lawson and Winchester, 1979; Hirunkam, 2013)

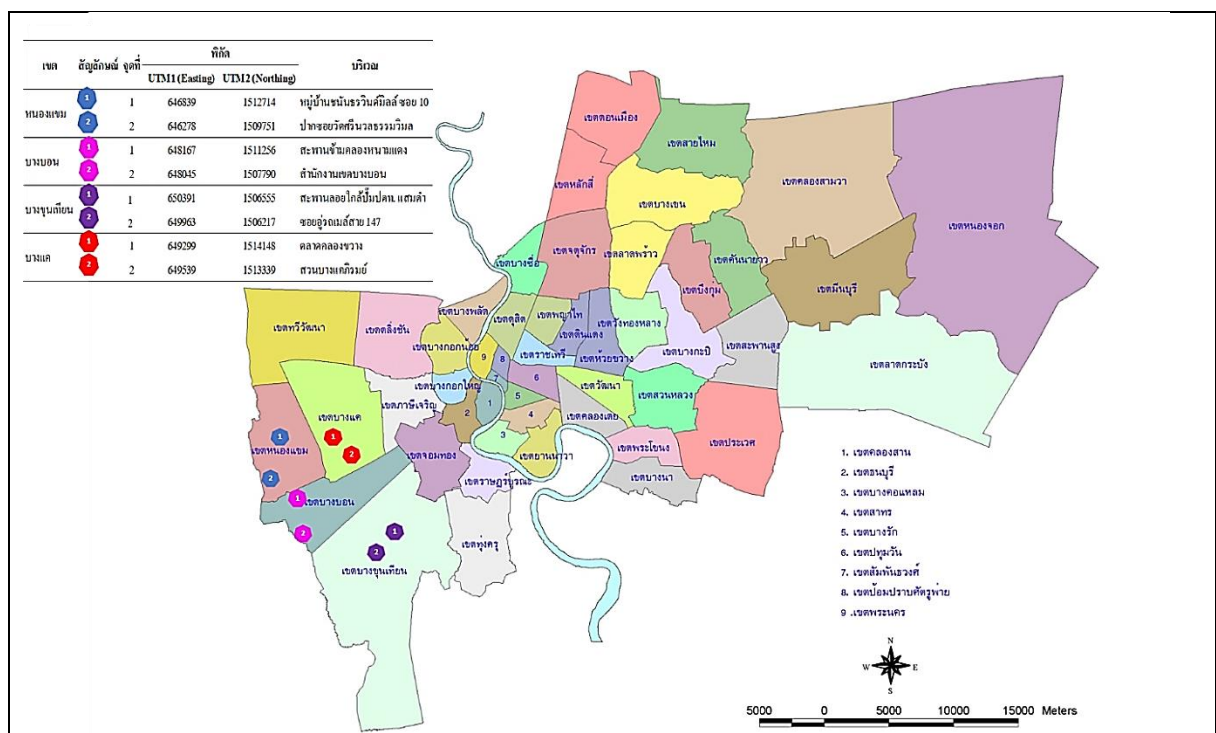
วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเก็บตัวอย่างดินชั้นบน

เก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มจากชุมชนใน 4 เขต ได้แก่ หนองแขม บางบอน บางขุนเทียน และบางแค ใน 2 ปี ได้แก่ พ.ศ. 2563 และ 2564 ในช่วงเดือน กุมภาพันธ์ ซึ่งสุ่มเดือนเก็บจากเดือนที่มีอากาศแห้ง ฝนตกน้อยซึ่งมีรายงานการทำวิจัยเกี่ยวกับฝุ่น (Meechaiyo, 2010) บันทึกพิกัด GPS (Global Positional System) (Deelaman *et al.*, 2015) ของจุดที่เก็บด้วยแอปพลิเคชัน Handy GPS (free) (BinaryEarth, 2021) ในระบบ UTM (Universal Transverse Mercator) แล้วสร้างเป็นแผนผัง การเก็บตัวอย่างดิน (Anuluxtipun *et al.*, 2003) ดังภาพที่

1 เพื่อใช้เก็บในปีที่ 2 เก็บตัวอย่างดินชั้นบนเขตละ 2 จุด จากการสุ่มในปีแรก และเก็บจุดเดิมในปีที่ 2 (เนื่องจากไม่สามารถสุ่มตัวอย่างแบบกระจายทั่วพื้นที่ในแต่ละเขต) โดยทั้ง 2 จุดที่สุ่ม เลือกจากจุดไม่เปียกและหรือมีน้ำท่วมขัง เก็บให้ห่างจากบ้านเรือนหรืออาคาร พิจารณาจุดที่ไม่มีสิ่งปนเปื้อน และเลือกเก็บในบริเวณที่เป็นแหล่งชุมชน ใกล้ถนนและโรงงานอุตสาหกรรม จุดละ 3 ตัวอย่างแล้วรวมเป็นตัวอย่างเดียว เก็บดินที่ความลึก 0-15 เซนติเมตร โดยใช้

วิธีการเจาะดินแบบคงสภาพ (Hirunkam, 2013; Pollution Control Department, 2015) ตากแดดไว้จนแห้ง ร่อนด้วยตะแกรงขนาด 250 ไมครอน (Hirunkam, 2013) และเก็บใส่ถุงพลาสติกหรือถุงกระดาษที่อุณหภูมิ 4 °C จากนั้น ส่งห้องปฏิบัติการวิจัยสถานะแวดล้อมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใน 4 วัน (Pollution Control Department, 2015) ด้วยตัวอย่างจำนวน 4 เขต $\times$ 2 ปี $\times$ 2 ซ้ำ = 16 ตัวอย่าง



ภาพที่ 1 บริเวณที่เก็บตัวอย่าง (BMA GIS portal, 2013)

2. การเก็บตัวอย่างฝุ่น

การเก็บตัวอย่างฝุ่นบนหลังคาหรือพื้นผิว ทำได้โดยเก็บฝุ่นที่ตกค้างบนหลังคาหรือพื้นของอาคาร ซึ่งเป็นหลังคากระเบื้องหรือพื้นปูนซีเมนต์ ที่สูงจากพื้นดิน 3 เมตรขึ้นไป เก็บในพื้นที่ 2 ตารางเมตร โดยใช้ตลับเมตรและไม้เมตรวัดและตีตารางพื้นที่ที่จะเก็บตัวอย่าง แล้วเก็บตัวอย่างโดยการกวาดด้วยแปรงหรือไม้กวาดที่ไม่มีส่วนประกอบของโลหะ (Hirunkam, 2013) เก็บตัวอย่างฝุ่นจากชุมชนใน 4 เขต ใน 2 ปี

ได้แก่ พ.ศ. 2563 และ 2564 ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ เช่นเดียวกับการเก็บตัวอย่างดินชั้นบน โดยเก็บในจุดเดียวกันกับที่เก็บตัวอย่างดินในทุกเขต คือ เก็บตัวอย่างเขตละ 2 จุด จุดละ 3 ตัวอย่างแล้วรวมเป็นตัวอย่างเดียว แล้วนำมาร่อนด้วยตะแกรงขนาด 250 ไมครอน เนื่องจากเป็นขนาดของฝุ่นที่พบโลหะหนักในปริมาณที่สูง และมีความเป็นอันตรายต่อสุขภาพหากได้รับเข้าสู่ร่างกาย (Hirunkam, 2013) จากนั้น เก็บใส่ถุงพลาสติกหรือถุงกระดาษที่อุณหภูมิ 4 °C ส่งห้องปฏิบัติการวิจัย

สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใน 4 วัน (Pollution Control Department, 2015) ด้วยตัวอย่าง จำนวน 4 เขต $\times$ 2 ปี $\times$ 2 ซ้ำ = 16 ตัวอย่าง

3. การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในตัวอย่าง

ส่งตัวอย่างดินและฝุ่นไปวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ เหล็ก ทองแดง สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม ที่ห้องปฏิบัติการสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งใช้วิธีการของ Standard methods for the examination of water and wastewater 22nd edition ปี 2012 (APHA-AWWA-WEF (American Public Health Association - American Water Works association - Water Environment Federation), 2012) โดยจะเตรียมสารละลายมาตรฐานของโลหะหนักที่มีความเข้มข้นต่างกัน 5 ความเข้มข้น ได้แก่ 5, 10, 50, 100, 500 และ 1,000 มก./ล. จากนั้น นำมาหาค่าการคายแสง (Emission) ของสารละลายมาตรฐาน ด้วย ICP-OES ยี่ห้อ Analytik Jena รุ่น PQ 9000 elite ด้วยอัตราการไหล 1 มล./วินาที โดยใช้ก๊าซ Plasma, Auxiliary, และ Nebulizer 12, 0.5 และ 0.5 ล./นาที่ ตามลำดับ และกำลังไฟ 1,200 วัตต์ แล้วสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการคายแสงและความเข้มข้น จากนั้น เตรียมการย่อยตัวอย่าง ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ โดยย่อยตัวอย่างดินและฝุ่นเหมือนกันตามวิธีมาตรฐาน ของ USEPA 3051A (USEPA, 2007) โดยการใช้ ตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม ชั่งน้ำหนักที่ถูกต้องด้วย ทัศนียม 4 ตำแหน่งไว้ นำตัวอย่างมาย่อยด้วยเครื่อง ไมโครเวฟยี่ห้อ MAR รุ่น 1600 และกรดไนตริก เข้มข้น 68% โดยใช้กำลังไฟ 1500 วัตต์ ด้วยอุณหภูมิ 0-250 °C เป็นเวลา 30 นาที และ 250 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้น ทิ้งให้อุณหภูมิต่ำกว่า 75 °C จากนั้น นำมากรองและปรับปริมาตร แล้วจึงนำไปวัดค่าการ คายแสง ด้วย ICP-OES ด้วยสภาวะเดียวกับการทำ กราฟมาตรฐาน การคำนวณหาปริมาณโลหะหนักใน

ตัวอย่างดินและฝุ่นทำได้โดยนำค่าการคายแสงของ ตัวอย่างที่วัดได้เทียบกับกราฟมาตรฐาน

4. การวิเคราะห์ปัจจัยที่อาจมีผลต่อปริมาณโลหะหนัก

ปัจจัยที่อาจมีผลต่อปริมาณ โลหะหนัก 5 ชนิดในดินและฝุ่น ได้แก่ ชนิดตัวอย่าง พื้นที่ และ เวลา ปริมาณโลหะหนักดังกล่าวจะถูกนำมาวิเคราะห์ ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ด้วยแผนการทดลองแบบ Factorial in Completely Randomized Design (CRD) ของปัจจัยและปฏิกิริยา สัมพันธ์ระหว่างปัจจัย และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทรีท เมนต์ของปัจจัยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติด้วย Least significant different (LSD) ด้วย R program version 4.0.4 (R Core Team, 2021) โดย ค่าสถิติ F ที่คำนวณได้จากโปรแกรมจะตอบสมมติฐาน ของการวิจัย ซึ่งหากค่าสถิติ F ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า ค่าวิกฤติที่ระดับนัยสำคัญต่างๆ ได้แก่ 0.05, 0.01 และ 0.001 จะหมายถึง ค่าเฉลี่ยทรีทเมนต์ของปัจจัยนั้นๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หรือ ปัจจัยนั้นมีผลต่อปริมาณโลหะหนัก หรืออาจพิจารณา จากค่า *p-value* ที่น้อยกว่า 0.05, 0.01 และ 0.001 ก็ได้ เช่นเดียวกัน

5. การคำนวณหาการสะสมตัวของโลหะหนักใน ฝุ่น (Enrichment factor; EF)

การคำนวณหา EF ทำเพื่อบอกระดับการปนเปื้อนของโลหะหนักที่เกิดขึ้นว่ามาจากกิจกรรม ของมนุษย์หรือมาจากธรรมชาติ ซึ่งจะใช้ธาตุที่อ้างอิง ที่เป็นโลหะที่พบปริมาณมากในธรรมชาติ ได้แก่ เหล็ก ซิลิกอน ไททานเนียม และอลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ (Lawson and Winchester, 1979; Hirunkam, 2013) โดยการเปรียบเทียบ สัดส่วนของโลหะหนักในธรรมชาติและฝุ่น ซึ่งคำนวณ จากสมการข้างล่างโดยการหาค่า EF ในงานวิจัยใน ครั้งนี้เป็นการเทียบระหว่างปริมาณโลหะหนักในฝุ่น กับปริมาณโลหะในดิน จึงใช้ปริมาณโลหะในดินแทน

crust ที่เป็นค่า background ซึ่งเป็นค่าที่แสดงดิน เฉพาะในพื้นที่ทำวิจัย

$$EF(X) = \frac{(\frac{X}{Ref})_{dust}}{(\frac{X}{Ref})_{crust}}$$

โดยที่ EF(X) คือ ค่า Enrichment factor ของโลหะหนักใดๆ

Ref คือ ปริมาณ โลหะหนัก อ้างอิงซึ่งใช้ปริมาณของเหล็ก

$(\frac{X}{Ref})_{dust}$ คือ อัตราส่วน โลหะหนัก ในฝุ่น

$(\frac{X}{Ref})_{crust}$ คือ อัตราส่วน โลหะหนัก ในดิน

โดยที่ ค่า EF บ่งบอกถึงระดับการปนเปื้อนของโลหะหนักดังนี้ (Yongming *et al.*, 2006)

EF < 2 หมายถึง ระดับ ต่ำ (Deficiency to minimal enrichment)

EF = 2 - 5 หมายถึง ระดับปานกลาง (Moderate enrichment)

EF = 5 - 20 หมายถึง ระดับ สูง (Significant enrichment)

EF = 20 - 40 หมายถึง ระดับสูงมาก (Very high enrichment)

EF > 40 หมายถึง ระดับสูงมาก เกินไป (Extremely high enrichment)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ปริมาณโลหะหนักในดินชั้นบน

ปริมาณเหล็กในดินใน 4 เขตของ กรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัยมีค่าเฉลี่ย เป็น $17,638 \pm 919.09$ มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมากกว่ารายงานจากงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่วิเคราะห์ความเข้มข้นและจัดกลุ่มโลหะหนักจากฝุ่นใน 10 พื้นที่ในจังหวัดนครราชสีมาที่พบปริมาณ

เหล็กในดินในช่วง 2,882 - 13,294 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 7,829 มก./กก. ทั้งนี้การที่ปริมาณเหล็กในดินที่มีค่ามากเป็นหลักหมื่นมก./กก. ในงานวิจัยดังกล่าว น่าจะมีสาเหตุมาจากตัวอย่างที่ใช้อยู่ในเมืองหลวงที่มีการจราจรหนาแน่นและมีโรงงานอุตสาหกรรมประเภทที่เกี่ยวข้องกับเหล็กอยู่ ได้แก่ โรงงานผลิตภัณฑ์โลหะและโรงงานผลิตยานพาหนะและอุปกรณ์ ซึ่งมีมากที่สุดเป็นอันดับ 1 และ 3 ใน 4 เขตที่ทำวิจัย และยังมากกว่างานวิจัยของ Karuchit and Hirunkam (2015) ที่ศึกษาปริมาณโลหะหนัก 9 ชนิดในดิน ฝุ่นหลังคา และฝุ่นละอองใน 10 ชุมชนในจังหวัดนครราชสีมา ที่พบค่ามัธยฐานของปริมาณเหล็กในดินเป็น 7,553 มก./กก.

ปริมาณทองแดงในดินใน 4 เขตของ กรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัย มีค่าเฉลี่ย เป็น 176.22 ± 197.34 มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่างานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณทองแดงในช่วง 0 - 3.100 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 2.110 มก./กก. และมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณทองแดงในดินของประเทศไทย (Zarcinas *et al.*, 2004) ที่ระบุว่ามีค่า 14.10 มก./กก. ยิ่งไปกว่านั้นยังมากกว่างานวิจัยของ Li and Feng (2012) ที่ศึกษาปริมาณโลหะหนัก 10 ชนิดในดินที่เมือง Weinan ในประเทศจีน ซึ่งพบปริมาณทองแดงอยู่ในช่วง 14.60-34.70 มก./กก.

ปริมาณสังกะสีในดินใน 4 เขตของ กรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัยมีค่าเฉลี่ย เป็น 221.40 ± 191.82 มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่างานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณสังกะสีในช่วง 1.340 - 27.09 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 11.80 มก./กก. และมากกว่าค่าเฉลี่ยของ

ปริมาณสังกะสีในดินของประเทศไทย (Zarcinas *et al.*, 2004) ที่ระบุว่ามีค่า 23.90 มก./กก. ยิ่งไปกว่านั้นยังมากกว่างานวิจัยของ Li and Feng (2012) ที่พบปริมาณสังกะสีอยู่ในช่วง 44.50 - 196.80 มก./กก.

ปริมาณตะกั่วในดินใน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัย มีค่าเฉลี่ยเป็น 31.80 ± 12.22 มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่างานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณตะกั่วในช่วง 1.710 - 17.56 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 6.44 มก./กก. และมากกว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่วในดินของประเทศไทย (Zarcinas *et al.*, 2004) ที่ระบุว่ามีค่า 17.50 มก./กก. แต่น้อยกว่างานวิจัยของ Li and Feng (2012) ที่พบปริมาณตะกั่วอยู่ในช่วง 19.00 - 89.5 มก./กก. และน้อยกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม และเพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมที่มีค่าเป็น 400 และ 750 มก./กก. ตามลำดับ ดังประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (Pollution control Department, 2015)

ปริมาณแคดเมียมในดินใน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำมีค่าเฉลี่ยเป็น 0.85 ± 0.36 มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่างานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณตะกั่วในช่วง 0.0400 - 0.1100 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 0.0700 มก./กก. และมากกว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณแคดเมียมในดินของประเทศไทย (Zarcinas *et al.*, 2004) ที่ระบุว่า มีค่า 0.0300 มก./กก. แต่น้อยกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม และเพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมที่มีค่าเป็น 37 และ 810 มก./กก. ตามลำดับดังประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (Pollution control Department, 2015)

2. ปริมาณโลหะหนักในฝุ่นหลังคา

ปริมาณเหล็กในฝุ่นใน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัยมีค่าเฉลี่ยเป็น $22,846 \pm 5,888$ มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่างานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณเหล็กในช่วง 6,099 - 24,129 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 11,528 มก./กก. และมากกว่างานวิจัยของ Srithawirat and Latif (2015) ที่ศึกษาปริมาณของโลหะหนัก 5 ชนิดเช่นเดียวกับในการวิจัยในครั้งนี้ในฝุ่นบนพื้นผิวบนอาคารบริเวณถนนหลักและถนนรองของจังหวัดพิษณุโลก ที่พบว่า มีปริมาณเหล็กบริเวณถนนหลักและถนนรองอยู่ในช่วง 4,384.2 - 8,376.4 และ 4,631.4 - 7,582 มก./กก. ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้น ยังมากกว่าค่ามัธยฐานของปริมาณเหล็กในฝุ่นหลังคา ที่ Karuchit and Hirunkam (2015) ศึกษาที่พบว่าเป็น 13,444 มก./กก. อย่างไรก็ตาม ค่าเฉลี่ยปริมาณเหล็กในงานวิจัยครั้งนี้ยังน้อยกว่างานวิจัยของ Srithawirat and Chimjan (2017) ที่ศึกษาปริมาณโลหะหนัก 5 ชนิดเช่นเดียวกับงานวิจัยในครั้งนี้ฝุ่นที่ตกลงบ้านเรือนทั้งภายในบ้านและภายนอกบ้านในชุมชนเกษตรกรรมในจังหวัดสุโขทัย ที่พบค่าเฉลี่ยเป็น $35,091 \pm 7,159$ และ $37,064 \pm 5,955$ มก./กก. ตามลำดับ นอกจากนี้ การที่ปริมาณเหล็กในฝุ่นมีค่ามากเป็นหลักหมื่นมก./กก. ในงานวิจัยในครั้งนี้ก็น่าจะมีสาเหตุเช่นเดียวกันกับในดิน คือ ตัวอย่างที่ให้อยู่ในเมืองหลวงที่มีการจราจรหนาแน่นและมีโรงงานอุตสาหกรรมประเภทที่เกี่ยวข้องกับเหล็กอยู่ได้แก่ โรงงานผลิตภัณฑ์โลหะและโรงงานผลิตยานพาหนะและอุปกรณ์ ซึ่งมีมากที่สุดเป็นอันดับ 1 และ 3 ใน 4 เขตที่ทำวิจัย ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อเปรียบเทียบผลการวิจัยกับงานวิจัยของ Khashman (2004) ได้ศึกษาหาปริมาณโลหะหนักในดินและฝุ่นถนนในเขตอุตสาหกรรมในเมือง Karak ประเทศออร์แดน พบว่า มีการปนเปื้อนของเหล็กมากที่สุด และ Samara

and Voutsas (2005) ที่ศึกษาการกระจายของโลหะหนักในฝุ่นจากถนน เมือง Thessaloniki ประเทศกรีซ ในย่านชุมชนเมืองใกล้กับเขตอุตสาหกรรม พบการกระจายของเหล็กฝุ่นละอองขนาดใหญ่ ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการวิจัยในครั้งนี้

ปริมาณทองแดงในฝุ่นใน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัยมีค่าเฉลี่ยเป็น 180.29 ± 50.50 มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่าจากงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณทองแดงในช่วง 29.99 - 182.37 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 96.99 มก./กก. และมากกว่าค่ามาตรฐานของปริมาณทองแดงในฝุ่นหลังคาที่ Karuchit and Hirunkam (2015) ศึกษาที่พบว่าเป็น 17.3 มก./กก.

ปริมาณสังกะสีในฝุ่นใน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัยมีค่าเฉลี่ยเป็น $1,702 \pm 1,473$ มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่ามากกว่าจากงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณสังกะสีในช่วง 385.9 - 1,302 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 781.93 มก./กก. และมากกว่าค่ามาตรฐานของปริมาณสังกะสีในฝุ่นหลังคาที่ Karuchit and Hirunkam (2015) ศึกษาที่พบว่าเป็น 44 มก./กก. แต่น้อยกว่างานวิจัยของ Figueroa *et al.* (2007) ที่ศึกษาปริมาณโลหะ

หนัก 10 ชนิดในฝุ่นหลังของโรงเรียนอนุบาล 25 แห่งในเมือง Sonora ทางตอนเหนือของประเทศเม็กซิโก ซึ่งพบค่าเฉลี่ยปริมาณสังกะสี 2,012 มก./กก.

ปริมาณตะกั่วในฝุ่นใน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัยมีค่าเฉลี่ยคือ 86.83 ± 40.48 มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งต่ำกว่าจากงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณตะกั่วในช่วง 408.5 - 2,111 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 1,127 มก./กก. และงานวิจัยของ Figueroa *et al.* (2007) พบค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่ว 101.88 มก./กก. แต่มากกว่าค่ามาตรฐานของปริมาณตะกั่วในฝุ่นหลังคาที่ Karuchit and Hirunkam (2015) ศึกษาที่พบว่าเป็น 10 มก./กก.

ในขณะที่ปริมาณแคดเมียมในฝุ่นใน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรีใน 2 ปีที่ทำวิจัยมีค่าเฉลี่ยเป็น 7.02 ± 9.05 มก./กก. ดังตารางที่ 1 ซึ่งสูงกว่าจากงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบปริมาณแคดเมียมในช่วง 0.5400 - 2.4700 มก./กก. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ย 1.4200 มก./กก. และมากกว่าค่ามาตรฐานของปริมาณแคดเมียมในฝุ่นหลังคาที่ Karuchit and Hirunkam (2015) ศึกษาที่พบว่าเป็น 0.2 มก./กก. แต่น้อยกว่างานวิจัยของ Figueroa *et al.* (2007) พบค่าเฉลี่ยปริมาณแคดเมียม 28.38 มก./กก.

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยปริมาณโลหะหนักในดินชั้นบนและผืนหลังคาน 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรี

เขต	ปีที่	ค่าเฉลี่ยปริมาณโลหะหนัก (มก./กก.)									
		เหล็ก		ทองแดง		สังกะสี		ตะกั่ว		แคดเมียม*	
		ดินชั้นบน	ผืนหลังคา	ดินชั้นบน	ผืนหลังคา	ดินชั้นบน	ผืนหลังคา	ดินชั้นบน	ผืนหลังคา	ดินชั้นบน	ผืนหลังคา
หนองแขม	1	18,360	22,827	66.80	112.00	40.28	378.50	19.91	37.78	BDL	0.32
	2	18,339	16,768	19.14	279.88	53.02	1,175	19.37	58.47	BDL	0.88
ค่าเฉลี่ย		18,350±14.85	19,798±4,284	42.97±33.70	195.94±118.71	46.65±9.01	776.75±563.21	19.64±0.38	48.12±14.63	BDL	0.60±0.40
บางบอน	1	18,692	36,194	209.00	200.00	372.00	427.50	42.92	87.25	0.47	0.29
	2	16,859	26,511	716.13	136.00	596.00	2,303.00	53.99	92.76	1.78	0.69
ค่าเฉลี่ย		17,776±1,296	31,353±6,847	462.57±358.60	168.00±45.25	484.0±158.39	1,365±1,326	48.46±7.83	90.01±3.90	1.13±0.93	0.49±0.28
บางขุนเทียน	1	22,006	16,338	274.00	133.43	377.00	503.00	44.55	71.73	0.44	0.49
	2	10,609	20,032	28.88	103.36	96.48	7,243	19.52	212.00	BDL	39.01
ค่าเฉลี่ย		16,308±8,059	18,185±2,612	151.44±173.33	118.4±21.26	236.74±198.36	3,873±4,766	32.04±17.70	141.87±99.19	0.44±0.00	19.75±27.24
บางแค	1	18,766	20,744	61.63	98.61	118.08	374.00	25.92	35.48	0.44	4.71
	2	17,476	23,354	34.20	379.00	118.32	1,213	28.19	99.19	1.55	9.80
ค่าเฉลี่ย		18,121±912.7	22,049±1,846	47.92±19.40	238.8±198.27	118.20±0.17	793.50±593.26	27.06±1.61	67.34±45.05	1.00±0.78	7.26±3.60
ค่าเฉลี่ยทุกเขต		17,638±919.09	22,846±5,888	176.22±197.34	180.29±50.50	221.40±191.82	1,702±1,473	31.80±12.22	86.83±40.48	0.85±0.36	7.02±9.05

หมายเหตุ *BDL คือ Below detection limit หมายถึง ปริมาณ โลหะหนักที่ตรวจวิเคราะห์ได้ต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่เครื่องมือจะตรวจวัดได้

3. ปัจจัยที่อาจมีผลกับปริมาณโลหะหนัก

การวิเคราะห์ปัจจัยที่อาจมีผลต่อปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ ชนิดของตัวอย่าง พื้นที่ และเวลา โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ของปัจจัยและปฏิริยาสัมพันธ์ของปัจจัย ด้วยแผนการทดลองแบบ Factorial in CRD และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่พหุคูณของปัจจัยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วย Least significant different (LSD) พบว่า ชนิดของตัวอย่าง ได้แก่ ดิน และฝุ่น พื้นที่ที่ทำวิจัย ได้แก่ 4 เขตของกรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรี และเวลาที่ทำวิจัย ได้แก่ ปี พ.ศ. 2563 และ 2564 นั้น มีผลต่อปริมาณของตะกั่วเท่านั้น โดยไม่มีผลต่อปริมาณโลหะหนักอื่นที่ทำวิจัยอันได้แก่ เหล็ก ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ดังตารางที่ 2 โดยค่าเฉลี่ยโดยปริมาณตะกั่วในฝุ่นมีค่าเป็น $86.83^a \pm 40.48$ มก./กก. ซึ่งมีค่ามากกว่าในดินซึ่งมีค่าเป็น $31.80^b \pm 12.22$ มก./กก. อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.0001$) ด้วยค่าสถิติ $F = 65.340$ ดังตารางที่ 2 ดังนั้น ชนิดของตัวอย่างจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อปริมาณตะกั่ว เนื่องจากค่าสถิติ F ที่มากกว่าค่าวิกฤติที่ระดับนัยสำคัญ 0.001 ไปมาก หรือพิจารณาจาก p -value ที่น้อยกว่า 0.001 ไปมากเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวคล้ายกับงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วในฝุ่นคิดเป็น 1,127 มก./กก. ซึ่งมีค่ามากกว่าในดินที่มีค่าเป็น 6.44 มก./กก.

เวลา ได้แก่ ปีที่ 1 (พ.ศ. 2563) และปีที่ 2 (พ.ศ. 2564) มีผลต่อค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่ว โดยค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วในปีที่ 2 ที่มีค่าเป็น $72.93^a \pm 64.05$ มก./กก. มีค่ามากกว่าในปีที่ 1 ที่มีค่าเป็น $47.61^b \pm 21.50$ มก./กก. อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (p -value = 0.0012) ด้วยค่า $F = 16.010$ ดังตารางที่ 2 แต่ยังไม่พบรายงานการศึกษาปริมาณโลหะหนักในดินและฝุ่นในปัจจัยเรื่องเวลาพบแต่ในส่วน of ปริมาณฝุ่นขนาดเล็ก (PM 10) ในงานวิจัยของ Srithawirat and Sassriruang (2014) ที่

ศึกษาปริมาณฝุ่นขนาดเล็ก (PM 10) ในที่พักอาศัยในอำเภอเมืองจังหวัดพิษณุโลก ที่พบว่าปริมาณฝุ่นขนาดเล็กที่แตกต่างกันตามเดือนที่เก็บตัวอย่างมาตรวจวัดภายใน 6 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนมิถุนายนในปี พ.ศ. 2557 อยู่ในช่วง 90.5 - 147.8 มก./ลบ.ม.

พื้นที่ ได้แก่ เขตหนองแขม บางบอน บางขุนเทียน และบางแค มีผลต่อค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่ว ค่าเฉลี่ยของปริมาณตะกั่วแยกตามพื้นที่ที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ด้วยค่า $F = 11.905$ ที่ p -value = 0.0003 ดังตารางที่ 2 โดยค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วในเขตบางขุนเทียนมีค่าสูงสุด คือ $86.95^a \pm 86.05$ มก./กก. รองลงมาคือ ของเขตบางบอน คือ $69.23^{ab} \pm 24.52$ มก./กก. และของเขตบางแค คือ $51.03^{bc} \pm 32.55$ มก./กก. ค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วที่น้อยที่สุดในเขตหนองแขม คือ $33.88^c \pm 18.49$ มก./กก. ดังตารางที่ 2 ซึ่งคล้ายกับผลจากงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่วิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วจากดินและฝุ่นใน 10 พื้นที่ในจังหวัดนครราชสีมาที่พบสัมประสิทธิ์การแปรผันของค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วในแต่ละพื้นที่ในดินและฝุ่นเป็น 0.74 และ 0.42 ตามลำดับ

ส่วนของปฏิริยาสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างปัจจัยทั้งสาม ได้แก่ ชนิดของตัวอย่าง พื้นที่ และเวลา ในแผนการทดลองแบบ factorial in CRD นั้น ไม่พบปฏิริยาสัมพันธ์ทางสถิติของ 3 ปัจจัยดังกล่าวในทั้ง 4 ปริมาณโลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ดังตารางที่ 2 แต่พบปฏิริยาสัมพันธ์ในปริมาณตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ได้แก่ ปฏิริยาสัมพันธ์ระหว่างชนิดของตัวอย่างและพื้นที่ ด้วยค่า $F = 7.382$ (p -value = 0.0029) ปฏิริยาสัมพันธ์ระหว่างชนิดของตัวอย่างและเวลาด้วยค่า $F = 19.810$ (p -value = 0.0005) และ ปฏิริยาสัมพันธ์ระหว่างชนิดของตัวอย่างเวลา และพื้นที่ ด้วยค่า $F = 7.590$ (p -value = 0.0026) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทรีทเมนต์

ปัจจัย	ชนิดของปัจจัย	ค่าเฉลี่ยปริมาณโลหะ (มก./กก.)				
		เหล็ก	ทองแดง	สังกะสี	ตะกั่ว	แคดเมียม
ชนิดของตัวอย่าง	ดินชั้นบน	17,638±919.09	176.22±197.34	221.40±191.82	31.80^b±12.22	0.85±0.36
	ผืนหลังคา	22,846±5,888	180.29±50.50	1,702±1,473	86.83^a±40.48	7.02±9.05
	ค่าสถิติ F	3.641 ^{ns}	0.002 ^{ns}	2.851 ^{ns}	65.340***	1.658 ^{ns}
	p-value	0.0757	0.9670	0.1120	<0.0001	0.2170
เวลา	ปีที่ 1	22,599±6,214	146.80±73.08	334.40±145.20	47.61^b±21.50	0.62±0.76
	ปีที่ 2	18,743±4,761	212.07±241.00	1,600±2,406	72.93^a±64.05	6.60±13.48
	ค่าสถิติ F	1.206 ^{ns}	0.498 ^{ns}	2.117 ^{ns}	16.010**	1.527 ^{ns}
	p-value	0.2894	0.4910	0.1660	0.0012	0.2360
พื้นที่	หนองแขม	19,073±2,611	119.46±113.47	411.70±532.40	33.88^c±18.49	0.418±0.310
	บางบอน	24,564±8,811	315.28±269.20	924.50±923.59	69.23^{ab}±24.52	0.615±0.313
	บางขุนเทียน	17,246±5,010	134.92±102.61	2,054±3,462	86.95^a±86.05	9.94±19.34
	บางแค	21,802±3,509	148.09±156.31	477.08±502.00	51.03^{bc}±32.55	3.42±4.35
	ค่าสถิติ F	1.300 ^{ns}	0.919 ^{ns}	0.761 ^{ns}	11.905***	0.849 ^{ns}
	p-value	0.3110	0.4560	0.5340	0.0003	0.4880
ชนิดของตัวอย่าง x พื้นที่	ค่าสถิติ F	1.084 ^{ns}	1.339 ^{ns}	0.674 ^{ns}	7.382**	0.887 ^{ns}
	p-value	0.3859	0.2990	0.5810	0.0029	0.4700
ชนิดของตัวอย่าง x เวลา	ค่าสถิติ F	0.055 ^{ns}	0.048 ^{ns}	2.153 ^{ns}	19.810***	1.403 ^{ns}
	p-value	0.8183	0.8300	0.1630	0.0005	0.2550
พื้นที่ x เวลา	ค่าสถิติ F	0.243 ^{ns}	0.629 ^{ns}	0.581 ^{ns}	2.893 ^{ns}	0.862 ^{ns}
	p-value	0.8649	0.6080	0.6370	0.0700	0.4820
ชนิดของตัวอย่าง x พื้นที่ x เวลา	ค่าสถิติ F	0.935 ^{ns}	1.148 ^{ns}	0.727 ^{ns}	7.590**	0.902 ^{ns}
	p-value	0.4480	0.3620	0.5520	0.0026	0.4630

หมายเหตุ ^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, ** หมายถึง แตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.01, *** หมายถึง แตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.001, และ ตัวอักษร ^a, ^b และ ^c แสดงถึงระดับความมากน้อยของค่าเฉลี่ยทรีทเมนต์ โดย ^a น้อยที่สุด รองลงมาคือ ^b และ ^c ตามลำดับ

5. การคำนวณหาการสะสมตัวของโลหะหนักในฝุ่น (EF)

หากพิจารณาค่าเฉลี่ยของ EF ของปริมาณโลหะหนักพบว่าค่าเฉลี่ย EF ของสังกะสีในเขตหนองแขมและบางขุนเทียนมีมากกว่า 10 ซึ่งงานวิจัยของ Mesa-Figueroa *et al.* (2007) Joshi *et al.* (2009) และ Hirunkam (2013) ระบุว่า หากค่า EF > 10 โลหะหนักที่พบในฝุ่นนั้นมีแนวโน้มที่จะมาจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ โดยมีค่าเป็น 15.90 ± 11.79 และ 39.76 ± 26.85

ตามลำดับ ดังตารางที่ 3 ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบ EF ของสังกะสีใน 10 พื้นที่ของจังหวัดนครราชสีมาอยู่ในช่วง 17.15 - 303.2 ซึ่งมีค่ามากกว่า 10 ไปมากในทุกพื้นที่ และงานวิจัยของ Karuchit and Hirunkam (2015) ที่พบว่า EF ของสังกะสีอยู่ในช่วง 0.75 - 16.14 แสดงว่าปริมาณสังกะสีในเขตหนองแขมและเขตบางขุนเทียนมีโอกาสดังกล่าวจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ร่วมด้วย ได้แก่ อุตสาหกรรมต่างๆ นอกเหนือไปจากสังกะสีที่เกิดเองตามธรรมชาติ

เช่น แร่ซัลไฟด์ เป็นต้น (Thongsanit *et al.*, 2015) อาการเมื่อได้รับฝุ่นหรือไอของสังกะสีในปริมาณมากจากการสูดดมจะเกิดอาการกระหายน้ำ ไอ หอบคลุมอกเสบ ปวดบวม เหนื่อยง่าย อ่อนแรง มีอาการปวดกล้ามเนื้อ คลื่นไส้ มีไข้ มีอาการหนาว

สะท้าน และผิวหนังเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งมักเกิดภายใน 4-12 ชั่วโมง หลังการสัมผัส อาการเหล่านี้จะหายเป็นปกติภายใน 1-2 เรียกชื่อโรคนี้ว่า โรคไขว้นจันทร์ หรือโรคไขพิษโลหะ (Siamchemi, 2017)

ตารางที่ 3 ค่าการสะสมตัวของโลหะหนักในฝุ่น (EF)

เขต	ปีที่	ค่าการสะสมตัวของโลหะหนักในฝุ่น*				
		เหล็ก	ทองแดง	สังกะสี	ตะกั่ว	แคดเมียม
หนองแขม	1	1.00	1.35	7.56	1.53	1.16
	2	1.00	15.99	24.24	3.30	3.53
	ค่าเฉลี่ย	1.00	8.67±10.35	15.90±11.79	2.41±1.26	2.35±1.68
บางบอน	1	1.00	0.50	0.59	1.05	0.60
	2	1.00	0.12	2.46	1.09	0.68
	ค่าเฉลี่ย	1.00	0.31±0.26	1.53±1.32	1.07±0.03	0.639±0.05
บางขุนเทียน	1	1.00	0.66	1.797	2.17	1.06
	2	1.00	1.90	39.76	5.75	156.00
	ค่าเฉลี่ย	1.00	1.28±0.88	39.76±26.85	3.96±2.54	78.54±109.60
บางแค	1	1.00	1.51	2.28	1.06	5.30
	2	1.00	8.29	7.67	2.63	10.91
	ค่าเฉลี่ย	1.00	4.90±4.80	4.97±3.82	1.85±1.11	8.10±3.97
ค่าเฉลี่ยทุกเขต		1.00	3.79±3.80	10.79±9.05	2.32±1.22	22.41±37.56

หมายเหตุ * ตัวอักษรหนาหมายถึงค่าการสะสมตัวของโลหะหนักในฝุ่นที่มากกว่า 10

นอกจากนี้ ยังพบว่า ค่าเฉลี่ย EF ของแคดเมียมของเขตบางขุนเทียน มีค่ามากกว่า 10 ไปมาก คือ 78.54 ± 109.6 ดังตารางที่ 2 ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Hirunkam (2013) ที่พบ EF ของแคดเมียมใน 5 พื้นที่ของจังหวัดนครราชสีมาที่มีค่ามากกว่า 10 ซึ่งอยู่ในช่วง 14.89 - 53.95 แสดงว่าปริมาณแคดเมียมในเขตบางขุนเทียนมีโอกาสเกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ร่วมด้วย ได้แก่ การเคลือบฉาบผิวโลหะต่างๆ เช่น เหล็ก เหล็กกล้า และทองแดง เป็นต้น ขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่ชนิดที่เติมประจุใหม่ได้ เป็นตัวที่ทำให้พลาสติกชนิดพีวีซีอยู่ตัว ทำวัสดุอุดฟัน การผลิตหลอดเรืองแสง สารกึ่งตัวนำ เครื่องเพชรพลอย กระบวนการแกะสลักแม่พิมพ์ อุตสาหกรรมรถยนต์และเครื่องบิน ทำสารกำจัดเชื้อรา

สารกำจัดแมลง และสารกำจัดหนอน ทำเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เม็ดสี สี และแก้ว อุตสาหกรรมการถ่ายภาพและการเคลือบมัน และเป็นตัวปนเปื้อนในปุ๋ยชนิดซูเปอร์ฟอสเฟต (Foundation of project of Thai encyclopedia for youth, 2015) พิษเฉียบพลันจากการหายใจสูดไอแคดเมียมเข้าไปในร่างกาย อาการที่พบคืออาการคล้ายโรคไขหวัดใหญ่และอาการของโรคไขควันโลหะ ได้แก่ อาการไอ แน่นหน้าอก หายใจไม่สะดวก ไข้ หนาวสั่น ปวดเมื่อยตามร่างกาย หากอาการรุนแรงมากขึ้นอาจพบภาวะปอดอักเสบและปอดบวม น้ำ การได้รับแคดเมียมเป็นระยะเวลานาน อาการพิษที่เด่นที่สุด คือ อัมตรัยต่อไต โดยเฉพาะท่อไตส่วนต้น โรคที่เกิดจากพิษแคดเมียมเรียกว่า โรค

พิษแคะเมียม หรือ โรคอไต อไต ส่วนอาการเรื้อรัง จะทำลายกระดูก ปวดกระดูก ทำลายปอด คับและไต เป็นโรคโลหิตจาง และเป็นสารก่อมะเร็ง (Division of occupational and environmental disease, 2014)

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยพบว่า แคะเมียม และสังกะสีมีค่า EF มากกว่า 10 แสดงว่ามีโอกาสที่ ทั้งแคะเมียมและสังกะสีในฝุ่นนั้นมีแหล่งที่มาจาก กิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม และการจราจร เป็นต้น (Karuchit and Hirunkam, 2015) ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงมาก เนื่องจากข้อมูลของกรม โรงงานอุตสาหกรรม พบว่า ทั้ง 4 เขตที่ท้าววิจัยมี โรงงานอุตสาหกรรมประเภทผลิตภัณฑ์โลหะมากที่สุดทุกเขต รองลงมา คือ ผลิตภัณฑ์พลาสติก และ ผลิตภัณฑ์ยานพาหนะและอุปกรณ์ (Department of industrial works, 2021)

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย EF ที่ได้ในแต่ละเขตกับระดับการปนเปื้อนของโลหะหนัก จะพบว่า เขตบางบอนมีการปนเปื้อนของโลหะ ทั้ง 4 ชนิดอยู่ในระดับต่ำ ($EF < 2$) ในขณะที่เขตบางขุนเทียนมีทองแดงเท่านั้นที่มีการปนเปื้อนในระดับต่ำ และเขตบางแคมีตะกั่วเท่านั้นที่มีการปนเปื้อนในระดับต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่า สังกะสีและแคะเมียมใน เขตบางขุนเทียนมีการปนเปื้อนในระดับสูงมาก ($EF = 20 - 40$) และระดับสูงมากเกินไป ($EF > 40$) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย EF ของทุกเขต พบว่า สังกะสีมี ระดับการปนเปื้อนสูง ($EF = 5 - 20$) และแคะเมียมมี ระดับการปนเปื้อนที่สูงมาก ($EF = 20 - 40$) ซึ่งไม่ค่อยสอดคล้องกับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแคะเมียม กับค่ามาตรฐานคุณภาพดิน ที่พบว่าต่ำกว่ามาตรฐาน (Pollution control Department, 2015) ในขณะที่ ทองแดง และตะกั่วมีระดับการปนเปื้อนปานกลาง ($EF = 2 - 5$) ซึ่งสอดคล้องกับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตะกั่ว กับค่ามาตรฐานคุณภาพดิน ที่พบว่าต่ำกว่ามาตรฐาน (Pollution control Department, 2015)

เมื่อพิจารณาค่า EF ในแต่ละเขตในทุกโลหะ หนักพบว่า เขตบางบอนมีการปนเปื้อนของโลหะ หนักน้อยที่สุด น่าจะมีสาเหตุมาจากเขตบางบอนเป็น เขตที่มีโรงงานอุตสาหกรรมเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โลหะ น้อยที่สุด คือ ร้อยละ 18.53 ของโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งหมดในเขต คือ 43 โรงงาน จาก 232 โรงงาน (Department of industrial works, 2021) ในขณะที่ เขตบางขุนเทียนมีการปนเปื้อนของโลหะมากที่สุด (สังกะสี ตะกั่ว และแคะเมียม) ซึ่งก็น่าจะมีสาเหตุมา จากเขตบางขุนเทียนเป็นเขตที่มีโรงงานอุตสาหกรรม เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โลหะมากที่สุด คือ ร้อยละ 29.04 ของโรงงานอุตสาหกรรมทั้งหมดในเขต คือ 255 โรงงาน จาก 878 โรงงาน และมีจำนวนโรงงาน อุตสาหกรรมเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โลหะมากที่สุดใน 4 เขตอีกด้วย (Department of industrial works, 2021) ยิ่งไปกว่านั้น การปนเปื้อนของโลหะหนักที่มากใน เขตบางขุนเทียนน่าจะมีสาเหตุจากการจราจร หนาแน่นและขนาดใหญ่ได้แก่ ถนนพระราม 2 อีก ด้วย เนื่องจากจุดเก็บตัวอย่างจุดที่ 1 ในเขตบางขุน เทียนอยู่ในบริเวณที่ติดกับถนนพระราม 2 แต่จุดที่ 2 อยู่ในซอย

อย่างไรก็ตามงานวิจัยในครั้งนี้ทำให้ได้ ทราบถึงปริมาณ โลหะหนักใน 4 เขตของ กรุงเทพมหานครฝั่งธนบุรี ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ระดับ การปนเปื้อนของโลหะหนักในฝุ่น และอิทธิพลจาก กิจกรรมของมนุษย์ ทั้งนี้ หากจะให้งานวิจัยมี ประโยชน์ยิ่งขึ้นไปอีกในแง่ของข้อมูลเพื่อการบริหาร จัดการด้านทรัพยากรอากาศของกรุงเทพมหานคร ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเฉพาะในเขตบางขุนเทียน โดยศึกษาปริมาณ โลหะหนักเปรียบเทียบตัวอย่างใน ชุมชนที่อยู่ติดกับโรงงานอุตสาหกรรมที่เสี่ยงต่อการ ปลดปล่อยโลหะหนักกับตัวอย่างบริเวณที่อยู่ติดกับบริเวณ ที่มีการจราจรหนาแน่นในแง่ของการกระจายตัวของ โลหะหนักในฝุ่นขนาดต่างๆ ปริมาณของฝุ่นชนิด

ต่างๆ และขนาดต่างๆ และรวมถึงศึกษาผลกระทบ
ด้านสุขภาพของคนในชุมชน

สรุป

จากการวิจัยพบว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณเหล็ก
ทองแดง สังกะสี และแคดเมียมในตัวอย่างดินและฝุ่น
ในทั้ง 4 เขต ใน 2 ปี ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ค่าเฉลี่ย
ปริมาณตะกั่วแตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลกับปริมาณ
ตะกั่วในตัวอย่าง ได้แก่ ชนิดของตัวอย่าง (ดินชั้นบน
และฝุ่นหลังคา) พื้นที่ และเวลา แต่ปัจจัยดังกล่าวไม่มี
ผลกับปริมาณเหล็ก ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม
จากค่าการสะสมตัวของโลหะหนักในฝุ่นของสังกะสี
ในการวิจัยแสดงว่า ปริมาณสังกะสีในฝุ่นในเขต
หนองแขม และบางขุนเทียน และปริมาณแคดเมียม
ในฝุ่นในเขตบางขุนเทียนมีอิทธิพลจากกิจกรรมของ
มนุษย์ร่วมด้วย และแสดงระดับการปนเปื้อนของ
โลหะหนักที่พบมากที่สุดในพื้นที่บางขุนเทียน ซึ่ง
น่าจะมีสาเหตุมาจากเขตนี้มีจำนวนโรงงาน
อุตสาหกรรมประเภทผลิตภัณฑ์โลหะมากกว่าเขตอื่น
และการจราจรหนาแน่นในเส้นทางจราจรขนาดใหญ่
กว่าเขตอื่น โดยปริมาณโลหะหนักที่พบมากอาจ
ส่งผลต่อสุขภาพของคนในชุมชนต่างๆ ในเขตบาง
ขุนเทียนได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก
งบประมาณรายได้ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2563

เอกสารอ้างอิง

Anuluxtipun, Y., Anu-rugsa, B. and Tangkongsap, S.
2003. Contamination of lead and cadmium
in soil, water and plant from landfill facility

of Amphor Muang, Suphanburi using geographic
information, pp. 514-521. *In Proceedings
of 41th Kasetsart University Annual Conference:
Science, Natural Resources and Environmental
Economics.* Kasetsart University, Bangkok.
(in Thai)

APHA-AWWA-WEF (American Public Health Association
- American Water Works association - Water
Environment Federation). 2012. **Standard
methods for the examination of water and
wastewater (22nd ed).** Available Source: <https://www.standardmethods.org>, March 10, 2016.

BinaryEarth. 2021. **Handy GPS (Version Free).** Available
Source: [https://play.google.com/store/apps/
details?id=binaryearth.handygpsfree&hl=e
n&gl=US](https://play.google.com/store/apps/details?id=binaryearth.handygpsfree&hl=en&gl=US), August 29, 2017.

BMA GIS portal. 2013. **Map of 50 districts in Bangkok.**
Available Source: [https://bmawebgis.cdg.co.th
/SEDPortal/50-map-overview/](https://bmawebgis.cdg.co.th/SEDPortal/50-map-overview/), December 25,
2021. (in Thai)

Deelaman, W., Chaochanchaikul, K. and Pankaew, P.
2015. **Evaluation of Contamination of Dust
with Size of Less Than 10 Micron in Rajamangala
University of Technology Phra Nakhon.**
Available Source: [https://repository.rmutp.
ac.th/bitstream/handle/123456789/1955/SC
I_59_05.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/1955/SC_I_59_05.pdf?sequence=1&isAllowed=y), August
29, 2017. (in Thai)

Department of industrial works. 2021. **Information
of industrial plants in Bangkok.** Available
Source: [http://reg.diw.go.th/executive/prov2
.asp?prov=10](http://reg.diw.go.th/executive/prov2.asp?prov=10), December 25, 2021. (in Thai)

Division of occupational and environmental disease. 2014.
Disease from cadmium. Available Source:

- <http://envocc.ddc.moph.go.th/contents/view/61>, March 14, 2021. (in Thai)
- Figueroa, D.M., Villanueva, M.D.L.O. and Parra, M.L.D.L. 2007. Heavy metal distribution in dust from elementary schools in Hermosillo, Sonora, México. **Atmospheric Environment** 41(2): 276-288.
- Foundation of project of Thai encyclopedia for youth. 2015. **Cadmium**. Available Source: <http://saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=22&chap=6&page=t22-6-infodetail05.html#~:text=cadmium compound used also for chemical of superphosphate>, March 8, 2021. (in Thai)
- Hirunkam, T. 2013. Heavy metal concentration and classification analysis of dust in Nakhon Ratchasima. Master degree of Engineering (Environmental engineering), Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Joshi, U.M., Vijayaraghavan, K. and Balasubramanian, R. 2009. Elemental composition of urban street dusts and their dissolution characteristics in various aqueous media. **Chemosphere** 77: 526-533.
- Karuchit, S. and Hirunkam, T. 2015. Multivariate analysis of heavy metal concentrations in soil, roof dust, and dust fall in Nakhon Ratchasima, Thailand. **Suranaree Journal of Science and Technology** 22(2): 173-182.
- Khashman, O.A.A. 2004. Heavy metal distribution in dust, street dust and soils from the work place in Karak Industrial Estate, Jordan. **Atmospheric Environment** 38(39): 6803-6812.
- Lawson, D.R. and Winchester, J.W. 1979. A standard crustal aerosol as reference for elemental enrichment factors. **Atmospheric Environment** 13: 925-930.
- Li, X. and Feng, L. 2012. Multivariate and geostatistical analyzes of metals in urban soil of Weinan industrial areas, Northwest of China. **Atmospheric Environment** 47: 58-65.
- Meechaiyo, N. 2010. Study of cadmium, lead, and manganese in PM 10 in business areas in municipality of Phitsanulok. Master degree of Engineering (Environmental engineering), Naresuan University. (in Thai)
- Meza-Figueroa, D., O-Villanueva, M.D.L. and De la Parra, M.L. 2007. Heavy metal distribution in dust from elementary school in Hermosillo, Sonora, Mexico. **Atmospheric Environment** 41: 276-288.
- NIDA center for research and development of disaster prevention and management. 2012. **Danger of heavy metals**. Available Source: www.dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/chemical-hazards/item/91-danger-of-heavy-metals, March 29, 2021. (in Thai)
- Ozcan, N. and Altundag, H. 2013. Specification of heavy metals in street dust samples from Sakarya I. organized industrial district using the BCR sequential extraction procedure by ICP-OES. **Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia** 27(2): 205-212.
- Pollution Control Department. 2015. **Standard quality of soil**. Available Source: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_soil01.html#s2, August 29, 2017. (in Thai)

- Pollution Control Department. 2018. **Notification of heavy metals in PM 2.5**. Available Source: <https://www.facebook.com/PCD.go.th/posts/2065066233576753>, March 5, 2021. (in Thai)
- R Core Team. 2021. **R program (version 4.0.4)**. Available Source: <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/old/4.0.4>, August 29, 2017.
- Samara, C. and Voutsa, D. 2005. Size distribution of airborne particulate matter and associated heavy metals in the roadside environment. **Chemosphere** 59(8): 1197-1206.
- Siamchemi. 2017. **Zinc: benefit and toxicity**. Available Source: <https://www.siamchemi.com/zinc>, March 8, 2021. (in Thai)
- Srithawirat, T. and Chimjan, O. 2017. Contamination assessment of heavy metals in dust deposited on residential building walls in agricultural areas of Sukhothai. **Journal of Environmental Management** 13(1): 20-33. (in Thai)
- Srithawirat, T. and Latif, M.T. 2015. Concentration of selected heavy metals in the surface dust of residential buildings in Phitsanulok, Thailand. **Environmental and Earth Science** 74(3): 2701-2706.
- Srithawirat, T. and Sassriruang, P. 2014. Dust in building of household in community of Amphor Munag, Phitsanulok, pp. 1-7. **In Proceeding of 10th Academic Conference of Naresuan Environment**. University of Naresuan, Phitsanulok. (in Thai)
- Thongsanit, P., Imkrajang, W. and Pakamma, M. 2015. **Heavy metal in small dust in building aside road in Amphor Muang, Phitsanulok**. 1st ed. Naresuan University Press, Phitsanulok. (in Thai)
- USEPA. 2007. **Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils Revision 1**. U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- Yongming, H., Peixuan, D., Junji, C and Pomentier, E.S. 2006. Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dust of Xi'an, Central China. **Science of the Total Environment** 355: 176-186.
- Zarcinas, B.A., Pongsakul, P., McLaughlin, M.J. and Cozen, G. 2004. Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia. **Environmental Geochemistry and Health** 26: 359-371.

การพัฒนาวัสดุปลูกพืชจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเชิงการค้า

Development of Growing Media from Commercial Agricultural Residues

สามารถ ใจเตี้ย* สิวาลี รัตนปัญญา จันจิราภรณ์ สท้านไตรภพ และ ฉัตรศิริ วิภาวิน

Samart Jaitae*, Siwalee Rattanapunya, Janjiraporn Stantripob and Chatsiri Vipawin

Received: 16 March 2021, Revised: 3 February 2022, Accepted: 1 March 2022

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาค้นแบบวัสดุปลูกพืชจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และ 2) พัฒนาแนวทางการทำผลิตภัณฑ์วัสดุปลูกเชิงการค้า กลุ่มตัวอย่างเป็นผู้มีส่วนได้เสีย จำนวน 20 คน ในพื้นที่อำเภอบ้านโฮ่ง จังหวัดลำพูน รวบรวมข้อมูลโดยการทดลอง การสัมภาษณ์แบบไม่เป็นทางการ และการสนทนากลุ่มแบบมีส่วนร่วม วิเคราะห์ข้อมูลใช้สถิติเชิงพรรณนา และการวิเคราะห์เชิงเนื้อหา

ผลการศึกษา พบว่า ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินแบบวัสดุปลูกทั้ง 7 สิ่งทดลอง ได้แก่ ความหนาแน่น ความชื้น ความพรุน ความเป็นกรด - ด่าง การนำไฟฟ้า และปริมาณอินทรีย์วัตถุแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้ผู้มีส่วนได้เสียเสนอแนะแนวทางการทำผลิตภัณฑ์เชิงการค้า โดย 1) วัสดุคิบออาจใช้เศษเหลือใช้จากการคั่วถั่วลิสง และใบลำไยหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต 2) การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตโดยการสนับสนุนเครื่องจักร สถานที่ และตัวเร่งการย่อยสลาย และ 3) การจำหน่ายผลิตภัณฑ์ต้องมีความร่วมมือกับหน่วยงานในพื้นที่เพื่อยกระดับและพัฒนาผลิตภัณฑ์ อย่งไรก็ตาม แนวทางในการพัฒนาวัสดุปลูกจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเชิงการค้าจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับองค์ความรู้ และทักษะของผู้ผลิต ทั้งกลุ่มเกษตรกร และกลุ่มวิสาหกิจชุมชน

คำสำคัญ: วัสดุปลูกพืช, เศษเหลือใช้ทางการเกษตร, เชิงการค้า

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมสาธารณสุขศาสตร์และสิ่งแวดล้อมชุมชน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
อำเภอมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Center of Excellence in Public Health Innovation and Community Environment, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat
University, Muang, Chiang Mai 50300, Thailand.

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

ABSTRACT

This mixed methods research aims to develop growing media from agricultural residues and guidelines for making commercial planting products. Twenty stakeholders living in the area of Ban Hong district, Lamphun province were participated. Data were collected through experiment, non - structured interview, and stakeholder participatory workshop. Data were analyzed through descriptive statistics and content analysis.

The results indicated that the mean physical and chemical properties of the seven experimental growing media, namely density, moisture content, porosity, pH, EC, and organic matter content, were significantly different. In this regard, stakeholders suggested guidelines for making commercial products: 1) raw materials may be left over from decorating mango branches and longan leaves after harvesting; 2) optimization of production processes is done by supporting machinery, sites, and accelerators; and 3) product distribution requires cooperation with local authorities to enhance and develop products. However, the development of growing media from agricultural residues needs to focus on knowledge and skills of both farmers and community enterprises.

Key words: growing media, agricultural residues, commercial

บทนำ

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการขยายพื้นที่ทางการเกษตรเพื่อรองรับความต้องการอาหารที่เพิ่มมากขึ้น มีรายงานการศึกษา พบว่าในประเทศไทยระหว่างปี ค.ศ. 2017 - 2018 มีปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรถึง 334 ล้านตัน อันเนื่องจากการขยายพื้นที่การเกษตรเพื่อการผลิตอาหารจำนวน 285 ล้านตัน (Venkatramanan *et al.*, 2021) ในประเทศไทยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีกระจายอยู่ทั่วประเทศ ขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของแต่ละพื้นที่ โดยมีปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจำนวนถึง 43 ล้านตันต่อปี ที่ไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ (Tengkaew and Wiwattanadate, 2014) และยังมีการประมาณการว่ามีวัสดุเหลือใช้จากการปลูกข้าวที่ค้างอยู่ในพื้นที่เพาะปลูกมากกว่า 2.5 ล้านตันต่อปี ซึ่งเกษตรกรส่วนใหญ่จะเผาทำลายเพื่อเตรียมพื้นที่ในการเพาะปลูกในฤดูกาลต่อไป (Center of Fuels and Energy from Biomass,

2017) มีรายงานการศึกษา พบว่า การจัดการวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในพื้นที่ชุมชนสะลง - จีเหล็ก เกษตรกรทำการเผาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในพื้นที่เพาะปลูก มีการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรด้านการเพาะปลูกพืช และด้านการเลี้ยงสัตว์ระดับปานกลาง และด้านการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ชุมชนระดับน้อย อย่างไรก็ตาม ประชาชนและเกษตรกรได้สะท้อนคุณค่าและประโยชน์ของเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่สามารถนำมาใช้เป็นปัจจัยการผลิตในระบบการเพาะปลูกพืช รวมถึงพื้นที่การเกษตรมีการใช้ประโยชน์อย่างเข้มข้นทำให้เกษตรกรต้องการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความอุดมสมบูรณ์อันจะส่งผลต่อผลผลิตการเกษตรที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทางเลือกในการปรับปรุงดินโดยใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอาจเป็นทางเลือกหนึ่งที่ต้นทุนต่ำและแสวงหาวัตถุดิบได้โดยง่าย ทั้งนี้มีปัจจัยการจัดเก็บวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (ครั้งต่อปี) มีความสัมพันธ์กับการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือใช้ทาง

การเกษตรของเกษตรกร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Jaitae, 2019) สอดคล้องกับการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในพื้นที่อำเภอบ้านโฮ่ง จังหวัดลำพูน ที่ประชาชนส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม โดยเฉพาะลำไยและมะม่วง ซึ่งพื้นที่การปลูกมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ เกษตรกรยังมีการปลูกพืชไร่ทั้งข้าวเหนียวนาปี ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และพืชผัก (Agricultural Extension Office of Lamphun, 2018) การดำเนินกิจกรรมการเกษตรเหล่านี้ก่อให้เกิดปริมาณเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อการจัดการที่บางวิธีก่อให้เกิดปัญหาทั้งด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อมมากมาย หน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนได้ตระหนักถึงปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการสนับสนุนให้นำกลับมาใช้ซ้ำหรือแปรรูปให้เกิดประโยชน์ แต่ก็ยังไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม กระบวนการส่งเสริมการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร การดำเนินงานที่ไม่ต่อเนื่องของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ดังเช่นรายงานการศึกษาที่พบว่า เกษตรกรบางส่วนยังเผาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในพื้นที่เพาะปลูก ส่วนการใช้ประโยชน์มีเกษตรกรบางส่วนเห็นว่าการผลิตปุ๋ยหมักหรือนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรไปใช้โดยตรงมีกระบวนการที่ยุ่งยากและใช้เวลานาน และยังขาดการสนับสนุนทั้งการให้ความรู้ที่เหมาะสม และขาดงบประมาณสนับสนุนที่เพียงพอ (Jaitae, 2013) ทั้งนี้วัสดุเหล่านี้ยังมีศักยภาพในการเป็นปัจจัยการผลิตพืช โดยกรมวิชาการเกษตรรายงานไว้ว่า ใบลำไยมีค่าเฉลี่ยไนโตรเจน ร้อยละ 1.631 ฟอสฟอรัส ร้อยละ 0.161 โพแทสเซียม ร้อยละ 0.470 อินทรีย์คาร์บอน ร้อยละ 45.76 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) 28.065 และใบมะม่วง มีค่าเฉลี่ยไนโตรเจน ร้อยละ 1.498 ฟอสฟอรัส ร้อยละ 0.121 โพแทสเซียม ร้อยละ 0.801 อินทรีย์คาร์บอน ร้อยละ 41.44 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) 27.664

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Department of Agriculture, 2005) สอดคล้องกับรายงานการศึกษาที่พบว่า การใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อปรับปรุงดินจะช่วยให้เกิดการสูญเสียธาตุไนโตรเจน (N) ลดลงเนื่องจากมีจุลินทรีย์ที่สามารถตรึงไนโตรเจนไว้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่นำมาใช้ (Kaewmorakot, 2013) การพัฒนาวัสดุปลูกพืชจากวัสดุข้างต้นอาจจะเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร และชุมชนได้ อย่างไรก็ตาม การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มาผลิตเป็นวัสดุปลูกพืชต้องให้ความสำคัญต่อการใช้ประโยชน์ของวัสดุปลูกที่ต้องคำนึงส่วนของพืชที่อยู่เหนือวัสดุปลูกให้ตั้งตรงอยู่ได้ เก็บสำรองธาตุอาหารพืช กักเก็บน้ำเพื่อเป็นประโยชน์ต่อพืช และแลกเปลี่ยนอากาศระหว่างรากพืชกับช่องว่างรอบๆ รวมถึงต้องพิจารณาในการผสมวัสดุปลูกพืชเมื่อผสมเป็นวัสดุปลูกพร้อมใช้แล้วต้องระบายน้ำได้ดี และวัสดุที่จะนำเป็นส่วนผสมต้องหาได้ง่าย นอกจากนี้ วัสดุปลูกต้องมีทั้งสถานะของแข็ง ทำหน้าที่สำหรับการเกาะยึดของระบบรากและยึดเหนี่ยวของดินพืช สถานะของเหลวสำหรับให้น้ำและแร่ธาตุอาหารพืช และสถานะแก๊สสำหรับถ่ายเทออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างรากพืชกับอากาศภายนอก ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูก (Kietnontapat and Aroonrungsikul, 2012) นอกจากนี้ ส่วนผสมที่นำมาทำวัสดุปลูกพืชยังเป็นการนำอินทรีย์วัตถุที่เป็นของเหลือใช้ในชุมชนมาใช้ประโยชน์ใหม่อันเป็นการลดปริมาณขยะอินทรีย์ได้อย่างเหมาะสม แต่วัสดุปลูกพืชส่วนใหญ่ที่วางขายทั่วไปจะมีราคาแพงและมักจะมีส่วนผสมที่ไม่สามารถอุ้มน้ำได้นานและมีปริมาณธาตุอาหารพืชจำนวนน้อย บางผลิตภัณฑ์มีการปนเปื้อนของสารพิษจึงไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้

ในการปลูกพืชเพื่อการบริโภคที่ปลอดภัยต่อสุขภาพ และสิ่งแวดล้อม (Kaewwongsa, 2013) จากข้อมูลดังกล่าว ข้างต้นการศึกษานี้จึงเป็นการนำเสนอแนวทางการพัฒนาวัสดุปลูกพืชจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสู่แนวทางการเพิ่มมูลค่าที่เกษตรกรหรือกลุ่มวิสาหกิจชุมชนสามารถขยายผลเพื่อการผลิตเชิงการค้าได้อย่างเหมาะสม ดังนั้น การศึกษาในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบวัสดุปลูกพืชจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และแนวทางการทำผลิตภัณฑ์วัสดุปลูกจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสู่ผลิตภัณฑ์เชิงการค้า

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยฉบับนี้ใช้กระบวนการวิจัยแบบผสมวิธี (Mixed Method) มีขั้นตอนการศึกษา ดังนี้

1. การพัฒนาต้นแบบวัสดุปลูกพืชจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

1.1 การเตรียมวัสดุปลูกสำหรับการทดลอง ได้แก่ ใบและกิ่งมะม่วง ใบและกิ่งลำไย เศษต้น ราก และเปลือกหอมแดงแห้ง ดินร่วน ใบจามจุรีแห้ง มูลโคนมแห้ง และน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน ทำการหั่นใบและกิ่งมะม่วง ใบและกิ่งลำไย โดยเครื่องหั่นไฟฟ้าให้ได้ขนาดประมาณ 1 นิ้ว แล้วนำส่วนผสมตามอัตราส่วน 1:1 ในแต่ละกรรมวิธีคลุกเคล้าให้เข้ากันหมักในกระบะไม้ไผ่ขนาดกว้าง 1.5 เมตร × 2.00 เมตร × สูง 0.80 เมตร เป็นระยะเวลา 60 วัน ในสภาพมีออกซิเจนควบคุมความชื้นด้วยการพ่นน้ำหมักมูลไส้เดือนดินจำนวน 5 ลิตร (อัตราส่วนน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน 1 ส่วน : น้ำสะอาด 1 ส่วน) ต่อสิ่งทดลอง ทุก 15 วัน

1.2 ขั้นตอนการทดลอง วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) มี 7 สิ่งทดลอง สิ่งทดลองละ 4 ซ้ำ ดังนี้

สิ่งทดลองที่ 1 ใบและกิ่งมะม่วง:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง

สิ่งทดลองที่ 2 ใบและกิ่งลำไย:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง

สิ่งทดลองที่ 3 เศษต้น รากและเปลือกหอมแดงแห้ง:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง

สิ่งทดลองที่ 4 ใบและกิ่งมะม่วง:ใบและกิ่งลำไย:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง

สิ่งทดลองที่ 5 ใบและกิ่งมะม่วง:เศษต้น รากและเปลือกหอมแดงแห้ง:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง

สิ่งทดลองที่ 6 ใบและกิ่งลำไย:เศษต้น รากและเปลือกหอมแดงแห้ง:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง

สิ่งทดลองที่ 7 ใบและกิ่งมะม่วง:ใบและกิ่งลำไย:เศษต้น ราก และเปลือกหอมแดงแห้ง:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง

1.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของต้นแบบวัสดุปลูก ทำการสุ่มวัสดุปลูกแต่ละสิ่งทดลอง นำส่งตรวจวิเคราะห์ ณ ห้องปฏิบัติการทางเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ โดยทำการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความชื้น (%) ค่าความหนาแน่นรวม (g/m^3) และค่าความพรุน (%) คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ความเป็นกรดเป็นด่าง ค่าการนำไฟฟ้า (dS/m) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%) (Handrech and Black, 1994)

2. การพัฒนาแนวทางการพัฒนาต้นแบบวัสดุปลูกพืชจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสู่ผลิตภัณฑ์เชิงการค้า

2.1 วิธีการ ใช้การสัมภาษณ์แบบไม่เป็นทางการ และการสนทนาเชิงปฏิบัติการกลุ่มผู้มีส่วนได้เสีย ประกอบด้วย

2.1.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง คัดเลือกแบบเจาะจง (Purposive selection) เพื่อให้ได้บุคคลที่สามารถให้ข้อมูลตรงตามที่ต้องการและ

กระจายอยู่ในพื้นที่ที่ได้รับประโยชน์ด้านต่างๆ ซึ่งการศึกษานี้ได้คัดเลือกตัวแทนเพื่อการสัมภาษณ์แบบไม่เป็นทางการ จำนวน 6 ท่าน ประกอบด้วยตัวแทนเกษตรกร จำนวน 3 คน ตัวแทนประชาชนทั่วไป จำนวน 2 คน และตัวแทนผู้นำชุมชน จำนวน 1 คน ส่วนกระบวนการสัมมนาเชิงปฏิบัติการคัดเลือก จากตัวแทนเกษตรกร จำนวน 12 คน และตัวแทนผู้สนใจทั่วไป จำนวน 2 คน

2.1.2 วิธีการดำเนินการ

1) การบรรยายเชิงวิชาการเพื่อการเสริมสร้างองค์ความรู้ในประเด็นการผลิตวัสดุปลูกพืชจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ประกอบด้วยวัตถุดิบที่เหมาะสมต่อการทำวัสดุปลูก กระบวนการทำวัสดุปลูกพืชจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คุณภาพวัสดุปลูกพืช และช่องทางการจำหน่ายผลิตภัณฑ์วัสดุปลูก

2) ร่วมกันสังเคราะห์และจัดทำแนวทางการนำต้นแบบวัสดุปลูกจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสู่ผลิตภัณฑ์เชิงการค้า ครอบคลุมประเด็นการแสวงหาวัตถุดิบ (ความเพียงพอและความยากง่าย) รูปแบบกระบวนการผลิต และแนวทางการจำหน่ายผลิตภัณฑ์

2.2 เครื่องมือ เป็นแบบบันทึกการสัมมนาเชิงปฏิบัติการกลุ่มผู้มีส่วนได้เสีย

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล ใช้การวิเคราะห์เชิงเนื้อหา โดยการสร้างข้อสรุปแบบอุปนัย การเปรียบเทียบข้อมูล และการตีความข้อมูล

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ส่วนที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของต้นแบบวัสดุปลูก

เมื่อทำการหมักวัสดุปลูกครบ 60 วัน ทำการสุ่มวัสดุปลูกมาตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่าวัสดุปลูกทั้ง 7 สิ่งทดลองมีค่าความหนาแน่นรวม ค่าความชื้น และค่าความพรุนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.559 ± 0.056 - 1.063 ± 0.063 กรัมต่อมิลลิเมตร ค่าความชื้นอยู่ระหว่าง ร้อยละ 30.14 ± 0.058 - 31.37 ± 0.540 และค่าความพรุนมีค่าอยู่ระหว่าง ร้อยละ 51.34 ± 0.30 - 60.27 ± 0.57 ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าสิ่งทดลองที่ 6 มีค่าความหนาแน่นสูงสุด สิ่งทดลองที่ 4 มีค่าความหนาแน่นต่ำสุด สิ่งทดลองที่ 4 มีค่าความชื้นสูงสุด สิ่งทดลองที่ 2 และสิ่งทดลองที่ 6 มีค่าความชื้นต่ำสุด และสิ่งทดลองที่ 2 มีความพรุนสูงสุด สิ่งทดลองที่ 5 มีค่าความพรุนต่ำสุด รายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของต้นแบบวัสดุปลูก

สิ่งทดลอง	ความหนาแน่น (g/m ³)	ความชื้น (%)	ความพรุน (%)
สิ่งทดลอง 1 (ใบและกิ่งมะม่วง:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง)	0.736 ± 0.003^{cd}	30.95 ± 0.11^a	57.95 ± 0.64^b
สิ่งทดลอง 2 (ใบและกิ่งลำไย:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง)	0.659 ± 0.056^{cd}	30.14 ± 0.06^b	60.27 ± 0.57^a
สิ่งทดลอง 3 (เศษดิน รากและเปลือกหอมแดงแห้ง:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง)	0.979 ± 0.112^a	31.07 ± 0.07^a	54.35 ± 0.32^c

ตารางที่ 1 (ต่อ)

สิ่งทดลอง	ความหนาแน่น (g/m ³)	ความชื้น (%)	ความพรุน (%)
สิ่งทดลอง 4 (ใบและกิ่งมะม่วง:ใบและกิ่งลำไย: ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง)	0.559±0.056 ^d	31.37±0.54 ^a	54.38±0.36 ^c
สิ่งทดลอง 5 (ใบและกิ่งมะม่วง:เศษต้น ราก และ เปลือกหอมแดงแห้ง:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง: มูลโคนมแห้ง)	0.943±0.160 ^{ab}	31.24±0.29 ^a	51.34±0.30 ^d
สิ่งทดลอง 6 (ใบและกิ่งลำไย:เศษต้น ราก และ เปลือกหอมแดงแห้ง:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง: มูลโคนมแห้ง)	1.063±0.063 ^a	30.14±0.06 ^b	57.84±0.23 ^b
สิ่งทดลอง 7 (ใบและกิ่งมะม่วง:ใบและกิ่งลำไย: เศษต้น ราก และเปลือกหอมแดงแห้ง:ดินร่วน: ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง)	0.778±0.051 ^{bc}	31.08±0.55 ^a	51.44±0.90 ^d
F - test	**	**	**
C.V. (%)	23.69	17.81	5.93

** = significant at $p < 0.01$ Means within each column followed by the same letters are not significantly different at $p \geq 0.5$ by DMRT

คุณสมบัติทางเคมี พบว่า วัสดุปลูกทั้ง 7 สิ่งทดลองมีค่าความเป็นกรด - ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณอินทรีย์วัตถุ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยทุกสิ่งทดลองมีค่าความเป็นด่างอ่อนๆ มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 7.61±0.96 - 8.21±0.10 ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.502±0.006 - 0.647±0.005 dS/m และปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) เฉลี่ยอยู่ระหว่าง

ร้อยละ 4.59±0.33 - 9.37±0.32 ทั้งนี้พบว่า สิ่งทดลองที่ 7 ที่มีส่วนผสมของใบและกิ่ง มะม่วง:ใบและกิ่งลำไย:เศษต้น ราก และเปลือกหอมแดงแห้ง:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง มีคุณสมบัติทางเคมีที่ดีเมื่อพิจารณาจากค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณอินทรีย์วัตถุ รายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีของต้นแบบวัสดุปลูก

สิ่งทดลอง	ความเป็นกรด - ด่าง	การนำไฟฟ้า (dS/m)	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%)
สิ่งทดลอง 1 (ใบและกิ่งมะม่วง:ดินร่วน:ใบจามจุรี แห้ง:มูลโคนมแห้ง)	7.61±0.96 ^c	0.555±0.112 ^a	4.59±0.33 ^c
สิ่งทดลอง 2 (ใบและกิ่งลำไย:ดินร่วน:ใบจามจุรี แห้ง:มูลโคนมแห้ง)	7.70±0.15 ^d	0.574±0.030 ^b	7.42±0.49 ^b

ตารางที่ 2 (ต่อ)

สิ่งทดลอง	ความเป็นกรด – ด่าง	การนำไฟฟ้า (dS/m)	ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%)
สิ่งทดลอง 3 (เศษดิน รากและเปลือกหอมแดง แห้ง:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง)	7.85±0.10 ^c	0.643±0.005 ^a	6.57±0.57 ^c
สิ่งทดลอง 4 (ใบและกิ่งมะม่วง:ใบและกิ่งลำไย: ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง)	8.21±0.10 ^a	0.548±0.054 ^a	5.60±0.36 ^d
สิ่งทดลอง 5 (ใบและกิ่งมะม่วง:เศษดิน ราก และ เปลือกหอมแดงแห้ง:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง: มูลโคนมแห้ง)	8.13±0.10 ^b	0.542±0.051 ^a	6.63±0.22 ^c
สิ่งทดลอง 6 (ใบและกิ่งลำไย:เศษดิน ราก และ เปลือกหอมแดงแห้ง:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง: มูลโคนมแห้ง)	8.17±0.15 ^{ab}	0.559±0.006 ^b	6.42±0.03 ^c
สิ่งทดลอง 7 (ใบและกิ่งมะม่วง:ใบและกิ่งลำไย: เศษดิน ราก และเปลือกหอมแดงแห้ง:ดินร่วน: ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง)	8.12±0.20 ^b	0.502±0.006 ^a	9.33±0.32 ^a
F - test	**	**	**
C.V. (%)	2.96	9.26	21.76

** = significant at $p < 0.01$ Means within each column followed by the same letters are not significantly different at $p \geq 0.5$ by DMRT

วัสดุปลูกทั้ง 7 สิ่งทดลองมีความร่วนซุย น้ำหนักเบา และระบายน้ำได้ดี โดยสิ่งทดลองที่ 2 มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีเมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นและค่าความพรุน ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าการใช้ส่วนผสมจากใบและกิ่งลำไยที่ไม่สามารถยัดเกาะกันได้มากนักทั้งสภาพเปียกและแห้ง ส่งผลให้เกิดช่องว่างทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กในวัสดุปลูกเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับวัสดุปลูกพืชที่ใช้กากขานอ้อยจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลเป็นวัสดุผสมหลัก ซึ่งขานอ้อยจะมีเส้นใยที่ไม่ยัดเกาะกันไม่ว่าจะเปียกหรือแห้ง เมื่อนำมาผสมกับกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษคราฟท์ และกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียจาก

อุตสาหกรรมผลิตกระแสไฟฟ้าอัตราส่วน 50:10:40 วัสดุปลูกอัตราส่วนนี้จะมีน้ำหนักแน่นต่ำ ความพรุนสูง มีสัดส่วนของช่องว่างขนาดใหญ่ และขนาดเล็กใกล้เคียงกันมากที่สุด (Optian *et al.*, 2018) ส่วนสิ่งทดลองที่ 7 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงสุด ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าการใช้วัสดุที่หลากหลายส่งผลให้วัสดุมีการย่อยสลายได้ดีโดยใบและกิ่งมะม่วง ใบและกิ่งลำไย มีการยัดเกาะตัวน้อยทำให้กองวัสดุปลูกมีการระบายอากาศที่ดี เศษดิน ราก และเปลือกหอมแดงมีค่าความชื้นสูง ส่วนมูลโคนมแห้งดูดซับน้ำได้ดี ทั้งนี้มูลโคเป็นวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงกว่าเศษเหลือของพืชอาจส่งผลต่อความชื้นของกองปุ๋ยหมักได้ (Yamyang *et al.*, 2018) การผสมวัสดุที่ดูดซับน้ำได้ดี

จะส่งผลให้ค่าความชื้นในวัสดุปลูกสูงขึ้น (Thongjoo *et al.*, 2001) ซึ่งลักษณะทางกายภาพของกองวัสดุปลูกนี้จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายเปลี่ยนวัตถุดิบอินทรีย์เป็นธาตุอาหารพืช (Pan *et al.*, 2012) อย่างไรก็ตาม ขนาดของวัสดุปลูกที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ อันเกิดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่นำมาเป็นส่วนผสมส่วนใหญ่เป็นวัสดุอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากอาจจะส่งผลให้กระบวนการการย่อยสลายไม่สมบูรณ์ ซึ่งอาจต้องเพิ่มระยะเวลาการหมักวัสดุปลูก โดยเฉพาะสิ่งทดลองที่ใช้ใบและกิ่งมะม่วง (สิ่งทดลองที่ 1) และใบและกิ่งลำไย (สิ่งทดลองที่ 2) เพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจต้องใช้เชื้อจุลินทรีย์เพื่อช่วยในกระบวนการการย่อยสลายให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เชื้อ *T. harzianum* และ *A. niger* มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายทางใบปาล์มน้ำมัน ทำให้ปุยหมักที่ได้มีโครงสร้างทางกายภาพและปริมาณธาตุอาหารพืชดีที่สุด (Seephueak *et al.*, 2020) ทั้งนี้วัสดุปลูกต้องมีความเหมาะสมสำหรับเทคนิคการปลูกพืชนั้นๆ มีคุณภาพของเนื้อวัสดุปลูกสม่ำเสมอ มีความคงตัว มีการยุบตัวของวัสดุปลูกน้อย มีอายุยาวนานพอสำหรับการปลูกพืช 1 ครั้ง มีความหนาแน่น ธาตุอาหารพืช และอุ้มน้ำได้เหมาะสม (Reinikainen, 1993)

ส่วนที่ 2 แนวทางการพัฒนาต้นแบบวัสดุปลูกคู่ผลิตภัณฑ์เชิงการค้า

การสัมภาษณ์แบบไม่เป็นทางการสรุปได้ว่า ต้นแบบวัสดุปลูกพืชที่ร่วมกันพัฒนาขึ้น มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาสู่ผลิตภัณฑ์เชิงการค้า โดย

เกษตรกรท่านหนึ่งกล่าวว่า “วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในชุมชนมีจำนวนมาก เคยมีหน่วยงานราชการมาให้ความรู้และสนับสนุนงบประมาณในการทำปุ๋ยหมัก แต่โครงการไม่ต่อเนื่องทำให้เกษตรกรส่วนใหญ่ยังคงเผาทำลายในแปลงปลูกของตนเอง ทั้งนี้ถ้านำมาพัฒนาเป็นวัสดุปลูกพืชที่มี

คุณภาพอาจจะนำไปจำหน่ายเป็นรายได้เสริมให้กับครอบครัวได้” (สัมภาษณ์ประชาชน เมื่อวันที่ 6 มิถุนายน 2563)

สอดคล้องกับผู้นำชุมชนที่กล่าวว่า “การใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต้องได้รับการสนับสนุนทั้งองค์ความรู้ สถานที่ และงบประมาณ ทั้งนี้การนำมาพัฒนาเป็นวัสดุปลูกพืชซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ปลูกไม้กระถางจะเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหล่านี้ได้” (สัมภาษณ์ประชาชน เมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม 2563)

เช่นเดียวกับประชาชนท่านหนึ่งกล่าวว่า “วัสดุปลูกพืชที่จำหน่ายในร้านขายพันธุ์ไม้ในชุมชนมีราคาแพง และเมื่อนำมาใช้ปลูกไม้ดอก ไม้ประดับในกระถาง ต้นไม้ที่ปลูกจะเจริญเติบโตได้ดีในช่วงแรก หลังจากนั้นต้นไม้จะโทรม ถ้าดูแลไม่ดี ต้นไม้จะตาย ถ้ามีวัสดุปลูกพืชที่มีคุณภาพและผลิตในชุมชนอาจทำให้ราคาถูกลง” (สัมภาษณ์ประชาชน เมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม 2563)

ทั้งนี้แนวทางการพัฒนาต้นแบบวัสดุปลูกคู่ผลิตภัณฑ์เชิงการค้า สรุปได้ดังนี้

1. แนวทางการแสวงหาวัตถุดิบ พบว่า ในพื้นที่มีเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหลากหลายชนิดที่สามารถนำมาพัฒนาเป็นวัสดุปลูกพืชได้ โดยเฉพาะเศษเหลือทิ้งจากการตัดแต่งกิ่งมะม่วง และใบลำไยหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต ซึ่งมีผลการศึกษาว่ามีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ได้ นอกจากนี้ ในพื้นที่ยังมีการเลี้ยงโคนมที่มีแนวโน้มจำนวนผู้เลี้ยงเพิ่มมากขึ้น อันจะส่งผลต่อปริมาณมูลโคและปัสสาวะวัวที่สามารถนำมาใช้ร่วมในการผลิตวัสดุปลูกได้

2. แนวทางเกี่ยวกับกระบวนการผลิต พบว่า การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตวัสดุปลูกพืชต้องได้รับการสนับสนุนเครื่องจักรในการตัดเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้มีขนาดเล็กอันจะส่งผลต่อ

ระยะเวลาในการย่อยสลาย และเครื่องจักรในการบรรจุผลิตภัณฑ์ รวมถึงต้องมีสถานที่ในการหมักวัสดุปลูกที่มีหลังคาป้องกันการชะของน้ำฝน กระบวนการผลิตวัสดุปลูกยังต้องใช้ตัวเร่งการย่อยสลาย เช่น หัวเชื้อจุลินทรีย์ น้ำหมักมูลไส้เดือนดิน และอินทรีย์วัตถุอื่นๆ ผสมรวมกัน ปัจจัยการผลิตวัสดุปลูกข้างต้นทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ต้องขอรับการสนับสนุนงบประมาณจากหน่วยงานท้องถิ่นภายใต้การรวมกลุ่มของเกษตรกรหรือประชาชน

3. แนวทางการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ พบว่าผลิตภัณฑ์วัสดุปลูกพืชในปัจจุบันมีการผลิตเชิงการค้าจำนวนมาก การจำหน่ายผลิตภัณฑ์ต้องมีการประสานความร่วมมือกับหน่วยงานระดับพื้นที่เพื่อยกระดับมาตรฐานผลิตภัณฑ์และร่วมกันพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้จำหน่ายในและนอกพื้นที่ เช่น นำไปฝากขายในร้านขายสารเคมีการเกษตร ร้านขายต้นไม้ดอกไม้ประดับหรือทำผลิตภัณฑ์บรรจุเป็นถุงกระสอบขนาดเล็ก 1 - 2 กิโลกรัม เพื่อจำหน่ายให้กับผู้ซื้อในเขตเมืองนำไปปลูกไม้ดอกไม้ประดับ หรือพืชผักในกระถาง

อย่างไรก็ตาม แนวทางในการพัฒนาวัสดุปลูกจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเชิงการค้าจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับองค์ความรู้และทักษะของผู้ผลิตซึ่งอาจเป็นกลุ่มเกษตรกร กลุ่มวิสาหกิจชุมชน หรือกลุ่มผู้สนใจทั่วไป รวมถึงแสวงหาแนวทางในการลดต้นทุนการผลิตโดยปรับส่วนผสมในวัสดุปลูกให้ใช้ส่วนผสมที่สามารถเพิ่มปริมาณธาตุอาหารพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จะเห็นได้ว่าแนวทางในการพัฒนาต้นแบบวัสดุปลูกเชิงการค้าได้สะท้อนความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุปลูกสู่ผลิตภัณฑ์ชุมชนทั้งการแสวงหาวัตถุดิบซึ่งในพื้นที่มีเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

จำนวนมากโดยเฉพาะเศษใบและกิ่งลำไยและมะม่วงที่เกษตรกรคัดแต่งทิ้งหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิต รวมถึงเศษวัสดุเหลือทิ้งจากหอมแดง และกระเทียมที่พ่อค้าคนกลางนำเข้ามาแปรรูปในพื้นที่ ในส่วนของกระบวนการผลิตอาจจะต้องเสริมสร้างองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องทั้งวิธีการผลิตที่ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพแข่งขันกับผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบันได้ รวมถึงวิธีการที่มีต้นทุนการผลิตที่เหมาะสม ทั้งนี้ Paes *et al.* (2019) พบว่า การเพิ่มมูลค่าขยะอินทรีย์มีต้นทุนในระบบสูง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่สามารถแข่งขันทางเศรษฐกิจกับผลิตภัณฑ์อื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน เนื่องจากคุณภาพของขยะอินทรีย์ในแต่ละพื้นที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ อาจจะต้องสร้างเสริมทักษะด้านการขายและการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของชุมชนให้กับกลุ่มผู้ผลิตสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์ท้องถิ่นเพื่อการเชื่อมโยงกับการท่องเที่ยวของชุมชนบ้านบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ซึ่งควรดำเนินการส่งเสริมการตลาด และการพัฒนารูปแบบผลิตภัณฑ์ท้องถิ่นให้มีความหลากหลายเพิ่มขึ้น โดยการจัดการความรู้ของชุมชนเพื่อส่งเสริมการพัฒนาผลิตภัณฑ์ท้องถิ่น (Sricharoenpramong *et al.*, 2020) อย่างไรก็ตาม ต้องสร้างกระบวนการมีส่วนร่วมของเกษตรกรในฐานะผู้ผลิตวัตถุดิบ ประชาชนทั่วไปในฐานะผู้ใช้วัสดุปลูก และหน่วยงานท้องถิ่น ในฐานะผู้สนับสนุนงบประมาณและองค์ความรู้ และปรับกระบวนการผลิตให้สามารถดำเนินการได้โดยกลุ่มเกษตรกร ทั้งนี้การอ้างอิงผลการตรวจสอบคุณภาพทางห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์อาจจะเป็นแนวทางในการสร้างการยอมรับของผู้บริโภคซึ่งจะส่งผลต่อการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ต่อไป

สรุป

ต้นแบบวัสดุปลูกพืชจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสิ่งทดลองที่ 2 ที่มีส่วนผสมของใบและกิ่งลำไย:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้ง มีค่าความหนาแน่นและค่าความพรุนที่ดี สิ่งทดลองที่ 7 ที่มีส่วนผสมของใบและกิ่งมะม่วง:ใบและกิ่งลำไย:เศษดิน ราก และเปลือกหอมแดงแห้ง:ดินร่วน:ใบจามจุรีแห้ง:มูลโคนมแห้งมีค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ดี ทั้งนี้กระบวนการพัฒนาวัสดุปลูกพืชต้องนำเสนอข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องเพื่อสร้างการยอมรับของผู้ใช้ รวมถึงเสริมสร้างทักษะที่เกี่ยวข้องให้กับชุมชน อย่างไรก็ตาม การพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงการค้าต้องสร้างกระบวนการการมีส่วนร่วมและแบ่งปันผลประโยชน์ร่วมกันอย่างทั่วถึง การรวมกลุ่มผู้สนใจในชุมชนเพื่อขอรับการสนับสนุนงบประมาณจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องอาจเป็นกระบวนการในระยะเริ่มต้น

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. การนำวัสดุเหลือทิ้งมาทำวัสดุปลูกพืชต้องพิจารณาระยะเวลาของการหมักที่จะส่งผลต่อการย่อยสลายของวัสดุอินทรีย์แต่ละชนิดที่นำมาใช้ โดยเฉพาะสิ่งทดลองที่มีส่วนผสมของ ใบ และกิ่งมะม่วง และใบ และกิ่งลำไย ทั้งนี้การเพิ่มปริมาณไนโตรเจนจากมูลสัตว์ส่งผลต่อการลดเวลาการย่อยสลายในกองวัสดุปลูก และเพิ่มปริมาณธาตุอาหารพืชในวัสดุปลูกได้
2. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุปลูกอาจจะยังไม่ครอบคลุมและบ่งชี้ถึงองค์ประกอบที่แท้จริงในวัสดุปลูกโดยเฉพาะปริมาณธาตุอาหารพืช อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพที่สะท้อนจากการสุ่มตรวจคุณสมบัติทางกายและเคมีโดยเฉพาะปริมาณอินทรีย์วัตถุก็อาจจะนำไปสู่ข้อสรุปของสิ่งทดลองที่

สามารถนำไปพัฒนาหรือใช้ประโยชน์ในการพัฒนาวัสดุปลูกพืชจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้

3. การพัฒนาวัสดุปลูกเชิงการค้าจำเป็นต้องสร้างกระบวนการเรียนรู้ของทุกภาคส่วน การอบรมเพื่อสร้างเสริมความรู้เป็นแนวทางในการสร้างการเรียนรู้ที่เหมาะสม แต่ต้องให้ความสำคัญต่อประเด็นที่ใช้ในการอบรมที่ตรงต่อการใช้ประโยชน์ สถานที่และระยะเวลาที่เหมาะสม

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรศึกษาวัสดุปลูกที่ผสมวัสดุอินทรีย์ที่หลากหลาย เช่น การนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียมาเป็นส่วนผสมร่วมกับใบจามจุรีและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ย่อยสลายยาก
2. ศึกษาความเหมาะสมของรูปแบบการหมัก ระยะเวลาการหมัก และการนำกลุ่มจุลินทรีย์มาช่วยในกระบวนการหมักเพื่อให้ได้วัสดุปลูกที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช
3. ศึกษารูปแบบการเรียนรู้ชุมชนเพื่อการพัฒนาและใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรบนฐานการมีส่วนร่วมที่แท้จริง ทั้งนี้อาจนำแนวทางการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วมมาประยุกต์ใช้เพื่อการศึกษา

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ขอขอบคุณผู้เกี่ยวข้องที่ได้ให้ข้อมูลการวิจัย และมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ที่สนับสนุนทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 โดยการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)

เอกสารอ้างอิง

Agricultural Extension Office of Lamphun, 2018. **Longan Production in Lamphun Province 2018.**

- Available Source: <http://www.lamphun.doae.go.th/>, January 2, 2021. (in Thai)
- Center of Fuels and Energy from Biomass. 2017. **Biomass Potential in Thailand**. Available Source: <http://www.iscisaraburee.sc.chula.ac.th/2017/index.php/2016/06/06/i-sink-under-the-weight-of-the-splendour/>, January 24, 2021. (in Thai)
- Department of Agriculture. 2005. **Organic Materials and Manure in Agricultural Areas**. The Agricultural Co - operative Federation of Thailand, Bangkok. (in Thai)
- Handreck, K.A. and Black, N.D. 1994. **Growing Media for Ornamental Plants and Turf**. New South Wales University Press. Randwick, N.S.W.
- Jaitae, S. 2013. Development of Healthy Home Garden Vegetable Production at Saluang-Keelek community, Maerim District, Chiang Mai Province. **Rajabhat Chiang Mai Research Journal** 14(2): 15-22. (in Thai)
- Jaitae, S. 2019. **Research Report on Development of Growing Media Product from Community Wastes for Agricultural Safety**. Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai. (in Thai)
- Kaewmorakot, T. 2013. Production of Compost from Shallot Waste, Bone meal and Goat dung. Master Thesis of Science, Prince of Songkla University. (in Thai)
- Kaewwongsa, A. 2013. **Soil Mixture for Potted Plants**. Available Source: <https://www.rakbankerd.com>, March 12, 2021.
- Kietnontapat, N. and Aroonrungsikul, C. 2012. Efficiency Improvement Technique on Insee 1 Seedling Production for Leaf Juice Extract. **Agricultural Science Journal** 43(2)(Supl.): 185-188. (in Thai)
- Optian, S., Ngencharoen, S. and Oupkaew, P. 2018. Feasibility Study of Growing Material Production from Sugarcane Bagasse and Wastewater Sludge. **VRU Research and Development Journal Science and Technology** 12(1): 79-92. (in Thai)
- Paes, L.A.B., Bezerra, B.S., Deus, R.M., Daniel, J. and Battistelleb, R.A.G. 2019. Organic Solid Waste Management in a Circular Economy Perspective - A Systematic Review and SWOT Analysis. **Journal of Cleaner Production**. **V.239**. Available Source: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118086>, May 2, 2021.
- Pan, I., Dam, B. and Sen, S.K. 2012. Composting of Common Organic Wastes Using Microbial Inoculants. **3 Biotech** 2(2): 127-134.
- Reinikainen, O. 1993. Choice of Growing Media for Pot Plants. **Acta Horticulturae** 342: 357-360.
- Seephueak, P., Wongpisal, P., Preecha, C. and Seephueak, W. 2020. Effect of Fungi on Physical and Nutrient of Compost from Oil Palm Frond (*Elaeis guineensis* Jacq.). **RMUTSV Research Journal** 12(3): 552-565. (in Thai)
- Sricharoenpramong, S., Yingyong, R. and Thipsot, S. 2020. Local Product Development Guidelines in Connection with Tourism of Bang Kacha Community, Chanthaburi Province. **Rajabhat**

- Chiang Mai Research Journal** 21(2): 157-166. (in Thai)
- Tengkaew, S. and Wiwattanadate, D. 2014. Study of Source and Potential of Biomass from Field Corn in Thailand. **Princess of Naradhiwas University Journal** 6(3): 102-111. (in Thai)
- Thongjoo, C., Henpitak, J. and Vungkarn, W. 2001. **Study and Development of The Growing Media from Waste Products of Agri-industry in The Western Region of Thailand**. Available Source: https://kukr2.lib.ku.ac.th/kukr_es/index.php?BKN/search_detail/result/7522, March 21, 2021. (in Thai)
- Venkatramanan, V., Shah, S., Rai, AK. and Prasad, R. 2021. Nexus Between Crop Residue Burning, Bioeconomy and Sustainable Development Goals Over North-Western India. **Frontiers in Energy Research** 8: 614212.
- Yamyang, M., Pante, T., Koedme, S., Pootaen-on, Y., Khiangam, S., Meetum, P. and Na Chiangma, P. 2018. Changeable on Some Physical and Chemical Properties during Composting of Low - Cost Compost. **Khon Kaen Agricultural Journal** 46(Suppl.): 308-314. (in Thai)

การพัฒนาผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลีนจืดน้ำตาลเสริมแคลเซียม

Product Development of Reduced Sugar Lychee Gummy Jelly with Calcium Supplement

ปาริชาติ สงสนันท์^{1*}, ทูติยาภรณ์ จิตตะปาโล¹, ศิริลักษณ์ เจริญรัตน์², รุ่งอรุณ สาสนทนายาศ³
และ กนกพร สัยยะสิทธิพานิชย์⁴

Parichart Songsanandr^{1*}, Thutiyaaporn Chittapalo¹, Siriluk Charoenrat², Rungarun Sasanatayart³
and Kanokporn Saiyasittipanich⁴

Received: 13 September 2021, Revised: 29 December 2021, Accepted: 2 February 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลีนจืดน้ำตาลเสริมแคลเซียม โดยศึกษาปริมาณมอลทิทอลที่จะใช้ทดแทนน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ พบว่า ปริมาณมอลทิทอลมีผลต่อค่าสี L, a, b ($p \leq 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สูตร ($p > 0.05$) ผลิตภัณฑ์สุดท้ายประกอบด้วยมอลทิทอล ร้อยละ 36.25 กลูโคสไซรัป ร้อยละ 23.61 น้ำลีนจี่ ร้อยละ 17.08 น้ำ ร้อยละ 9.44 เจลาติน ร้อยละ 8.61 แคลเซียมแล็กเทต ร้อยละ 2.78 กรดซิตริก ร้อยละ 1.24 เพกทิน ร้อยละ 0.96 และโปตัสเซียมซอร์เบต ร้อยละ 0.03 มีการแต่งสีผสมอาหารและกลิ่นลีนจี่สังเคราะห์ ผลการทดสอบความชอบและการยอมรับกับผู้บริโภคทั่วไป พบว่าผู้บริโภคให้การยอมรับผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลีนจืดน้ำตาลเสริมแคลเซียม ร้อยละ 83.72 โดยมีคะแนนความชอบเฉลี่ย (ความชอบ 7 ระดับ) ด้านสี กลิ่นรส ความง่ายในการเคี้ยว ความยืดหยุ่น รสหวาน รสเปรี้ยว และความชอบโดยรวม 6.2 ± 0.9 5.8 ± 1.0 5.6 ± 1.2 5.6 ± 1.3 5.8 ± 1.2 5.9 ± 1.0 และ 5.9 ± 0.9 ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลีนจืดน้ำตาลเสริมแคลเซียมมีความชื้น ร้อยละ 20.08 โปรตีน ร้อยละ 10.14 ไขมัน ร้อยละ 0.01 เถ้า ร้อยละ 1.10 ใยอาหาร ร้อยละ 1.44 และคาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 68.67 ผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 18.63 g/100 g ซึ่งลดลงจากสูตรอ้างอิง 39.08 g/100g

¹ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยพายัพ จังหวัดเชียงใหม่ 50000

¹ Faculty of Business Administration, Payap University, Chiang Mai 50000, Thailand.

² สำนักนวัตกรรมการสอนและการศึกษาทั่วไป มหาวิทยาลัยพายัพ จังหวัดเชียงใหม่ 50000

² Teaching Innovation and General Education Office, Payap University, Chiang Mai 50000, Thailand.

³ สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย 57100

³ School of Agro-Industry, Mae Fah Luang University, Chiang Rai 57100, Thailand.

⁴ คณะบัญชีและธุรกิจดิจิทัล มหาวิทยาลัยพายัพ จังหวัดเชียงใหม่ 50000

⁴ Faculty of Accountancy and Digital Business, Payap University, Chiang Mai 50000, Thailand.

* ผู้เขียนหลักประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): parichart_t@payap.ac.th Tel: 08 1531 3998

มีแคลเซียม 527 mg/100g เมื่อเทียบจากสูตรอ้างอิงพบว่ามีปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้น 520.4 mg/100 g ดังนั้นจึงสามารถกล่าวอ้าง “ลดน้ำตาล” และ “เสริมแคลเซียม” ได้ ผลิตกัณฑ์ที่มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด <10 CFU/g ปริมาณยีสต์และรา <10 CFU/g ตรวจไม่พบ *Staphylococcus aureus* ในตัวอย่าง 1 g และปริมาณ *Escherichia coli* < 3 MPN/g

คำสำคัญ: กัมมี่เยลลี่, ลินจี, มอลทิทอล, เสริมแคลเซียม

ABSTRACT

This research aimed to develop reduced sugar Lychee gummy jelly with calcium supplement. The effect of maltitol as sugar substitute on the quality of the product was studied. The result showed that maltitol content affected the color L, a, b of the products ($p \leq 0.05$). However, it was not significantly different ($p > 0.05$) in sensory quality. Final product was composed of 36.25% maltitol, 23.61% glucose syrup, 17.08% Lychee juice, 9.44% water, 8.61% gelatin, 2.78% calcium lactate, 1.24% citric acid, 0.96% pectin, and 0.03% potassium sorbate. The food colorant and artificial Lychee flavor were applied to improve the product appearance. According to the consumer test, 83.72% of the consumers accepted the product. The mean hedonic scores (7-point hedonic scale) of color, flavor, chewiness, springiness, sweet, sour and overall liking were 6.2 ± 0.9 5.8 ± 1.0 5.6 ± 1.2 5.6 ± 1.3 5.8 ± 1.2 5.9 ± 1.0 and 5.9 ± 0.9 , respectively. Reduced sugar Lychee gummy jelly with calcium supplement contained 20.08% moisture content, 10.14% protein, 0.01% lipid, 1.10% ash, 1.44% fiber, and 68.67% carbohydrate. The total sugar was 18.63 g/100g, which reduced from reference formula 39.08 g/100g. Calcium content was 527 mg/100g, which increased to 520.4 mg/100g from reference formula. Therefore, it could be claimed “reduced sugar” and “calcium supplement”. Microbial analysis of the product indicated that Total Plate Count and Yeast and Mold were less than 10 CFU/g. *Staphylococcus aureus* (in 1 g) was not detected and *Escherichia coli* was < 3 MPN/g.

Key words: gummy jelly, Lychee, maltitol, calcium supplement

บทนำ

ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่จัดเป็นผลิตภัณฑ์ลูกกวาด (Confectionery products) ประเภทหนึ่งที่มีความนิยมในกลุ่มเด็กจนถึงวัยรุ่น รวมถึงผู้ใหญ่วัยทำงานที่ชื่นชอบในความหวาน หอม เหนียวนุ่ม จัดเป็นขนมที่รับประทานง่าย เนื่องจากมีรูปร่างและสีสันที่

สวยงาม มีรสชาติหวานถูกปาก ผลิตกัณฑ์กลุ่มกัมมี่เยลลี่มีแนวโน้มว่าจะได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เพราะผู้บริโภคจะนิยมรับประทานผลิตภัณฑ์ที่สามารถเคี้ยวได้มากขึ้น ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำตาล ไขมัน น้ำตาล กรด และสารที่ทำให้เกิดเจล (Supimarot, 2000; Depanya, 2008) ลักษณะเฉพาะของกัมมี่เยลลี่

คือ เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นเจล มีความใส เนื้อสัมผัสเนียน ไม่หยาบสาก (Praditduang and Chaiseri, 1996) ในปัจจุบันการผลิตกัมมีเซลล์มีการเติมสารสำคัญต่างๆ ลงไปเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ ซึ่งได้รับความนิยมนอย่างมากทั้งในประเทศและต่างประเทศ เช่น การเติมวิตามินซี แคลเซียม หรือสารอาหารอื่นๆ อย่างไรก็ตาม การบริโภคผลิตภัณฑ์กัมมีเซลล์เป็นประจำ อาจก่อให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพตามมา เช่น เกิดโรคฟันผุ และโรคอ้วน เป็นต้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์ประเภทนี้มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบสูง ซึ่งการใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล จะสามารถลดอัตราการเกิดโรคดังกล่าวได้

ลิ้นจี่มีชื่อสามัญคือ Lychee, Litchi, Lichee หรือ Lichi มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Litchi chinensis* Sonn. จัดอยู่ในวงศ์ SAPINDACEAE ซึ่งเป็นวงศ์เดียวกับลำไยและเงาะ เป็นผลไม้ที่มีเปลือกสีแดง มีต้นกำเนิดในประเทศจีนตอนใต้ มีการปลูกอย่างแพร่หลายในแถบภาคเหนือของประเทศไทย เวียดนาม ญี่ปุ่น อินเดียตอนเหนือ บังคลาเทศ อเมริกาใต้ และสหรัฐอเมริกา ลิ้นจี่มีหลากหลายสายพันธุ์ พันธุ์ที่เป็นที่นิยม ได้แก่ สายพันธุ์จักรพรรดิ กิมเจ็ง และหงฮวย ลิ้นจี่จัดเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย (Puechkaset, 2018) ไม่ว่าจะเป็นในรูปแบบของผลไม้สดหรือแปรรูป อย่างไรก็ตาม ลิ้นจี่เป็นผลไม้ที่มีการเสื่อมเสียได้ง่าย เนื้อลิ้นจี่อุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุที่สำคัญต่อร่างกาย มีกรดไขมันที่สำคัญต่อร่างกาย เช่น กรดปาล์มติก ร้อยละ 12 กรดไลโนเลอิก ร้อยละ 11 และกรดโอเลอิก ร้อยละ 27 อย่างไรก็ตาม การรับประทานลิ้นจี่ในปริมาณมากเกินไปอาจทำให้เกิดอาการร้อนในได้ เนื่องจากในเนื้อผลลิ้นจี่มีสารประกอบชนิดหนึ่งที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดอาการร้อนใน (Medthai, 2017)

มอลทิทอล (Maltitol) เป็นสารให้ความหวานที่ให้พลังงาน จัดอยู่ในกลุ่มน้ำตาลแอลกอฮอล์ สารตั้งต้นในการผลิตมอลทิทอลได้แก่มอลโทส นอกจากนี้ยัง

สามารถใช้สารละลายแบ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอลทิทอล ในปัจจุบันมอลทิทอลมีจำหน่ายใน 2 ลักษณะคือในรูปสารละลายและแบบผง ซึ่งแบบผงจะมีความบริสุทธิ์สูงกว่า ไม่ดูดความชื้นและไม่เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด มอลทิทอลมีความหวานใกล้เคียงกับซูโครส โดยมีความหวานร้อยละ 85-95 ของซูโครส ให้พลังงาน 2.1 กิโลแคลอรีต่อกรัม มีสมบัติเป็นพรีไบโอติก (Prebiotics) ช่วยปรับสภาพระบบขับถ่าย ช่วยให้ร่างกายดูดซึมแร่ธาตุได้ง่าย ไม่ทำให้ฟันผุ ช่วยให้อาหารงาามขึ้น รวมถึงทำให้น้ำตาลไม่ตกผลึกเมื่อโดนความร้อน นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ประเภทลูกอม แยม เบเกอรี่ ไอศกรีม นอกจากนี้ยังเป็นสารให้ความหวานที่เหมาะสมกับผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนักและผู้ป่วยเบาหวาน (Norsuwan and Tantechai, 2018)

จากที่กล่าวมาจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์กัมมีเซลล์จากผลไม้ที่มีรสชาติเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค และมีคุณค่าทางโภชนาการ โดยใช้น้ำลิ้นจี่เป็นวัตถุดิบ เนื่องจากมีกลิ่นรสและรสชาติที่เหมาะสมในการแปรรูปเป็นกัมมีเซลล์ ทั้งนี้จะใช้สารทดแทนน้ำตาลเพื่อลดปริมาณน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ รวมถึงเสริมแคลเซียมเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์กัมมีเซลล์ลิ้นจี่คั้นน้ำตาล โดยใช้มอลทิทอลเป็นสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล และมีการเสริมแคลเซียมเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการในผลิตภัณฑ์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ

น้ำลิ้นจี่: นำลิ้นจี่แช่แข็ง (พันธุ์หงฮวย อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่) มาละลายโดยแช่ในตู้เย็นอุณหภูมิไม่เกิน 4°C จากนั้นนำมาสกัดน้ำด้วยเครื่องสกัดน้ำผลไม้แบบแยกกาก (Tefal Elea ZN350, Singapore) เติมน้ำตาลเทียมเมตาไบซัลไฟท์ปริมาณ 100 ppm เพื่อ

ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำล้นจี บรรจุน้ำล้นจีลงถุงโพลีเอทิลีน (PE) ถุงละประมาณ 120-125 g นำไปแช่แข็งจนกว่าจะใช้งานจึงนำมาทำการละลายในตู้เย็นอุณหภูมิไม่เกิน 4°C น้ำล้นจีที่สกัดได้มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในช่วง 19.0±2.0 °Brix pH อยู่ในช่วง 3.26-3.30

2. การศึกษาผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ล้นจีต้นแบบ

ผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ล้นจีต้นแบบใช้สูตรและกระบวนการผลิตที่ดัดแปลงมาจาก Garcia (2000) และ Rajamane et al. (2017) โดยสูตรประกอบด้วยน้ำตาลทราย ร้อยละ 25.69 กลูโคสไซรัป ร้อยละ 24.55 น้ำล้นจี ร้อยละ 19.51 น้ำ ร้อยละ 19.02 เจลาติน ร้อยละ 10.08 กรดซิตริก ร้อยละ 1.14 และมีการแต่งสีผสมอาหารสีชมพูในผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิตทำโดยผสมเจลาตินในน้ำเพื่อให้เจลาตินดูดน้ำแล้วพักไว้ ผสมน้ำตาลทราย กลูโคสไซรัปและน้ำส่วนที่เหลือ คนให้เข้ากันแล้วนำไปให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 117-118°C เติมน้ำล้นจีให้ความร้อนจนเดือดอีกครั้งเพื่อฆ่าเชื้อ จึงใส่เจลาตินที่พองตัวในน้ำลงไป คนให้เจลาตินละลายแล้วปิดไฟ เติมกรดซิตริกและสีผสมอาหาร นำไปอบในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 60°C เป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง จากนั้นตักฟองด้านหน้าออกแล้วจึงหยอดใส่พิมพ์พักให้เซตตัว แยกออกจากพิมพ์ แล้วนำผงมอลโตเด็กซ์ทรินทาเคลือบบางๆ ที่ผิวของกัมมีเยลลี่ด้วยแป้งชิลิโคน

นำผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ล้นจีต้นแบบไปทดสอบคุณภาพทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ค่า a_w (AwQuick, Rotronic instrument crop) ค่าสี L (ความสว่าง), a (สีแดง-สีเขียว), b (สีเหลือง-สีน้ำเงิน) (Minolta CT-10) Texture Profile Analysis (Texture Analyzer, TA.XT2i) หัววัด Hemispherical P/0.5HS Pre Test Speed 1.0 mm/s Test speed 1.0 mm/s Post Test Speed 2.0 mm/s Distance 50% Time 3.0 sec ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Refractometer PAL-1, Atago) และ pH (pH meter,

Mettler Toledo LE427) และนำผลิตภัณฑ์ไปทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสกับผู้ทดสอบชิมจำนวน 50 คน ภายในมหาวิทยาลัยพายัพ ด้วยวิธีการทดสอบความชอบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) เมื่อ 1 หมายถึงไม่ชอบอย่างยิ่ง และ 9 หมายถึงชอบอย่างยิ่ง ร่วมกับการทดสอบความพอดี 5 ระดับ (5-point just about right) คุณลักษณะที่ทดสอบ ได้แก่ สี กลิ่นรสล้นจี รสหวาน รสเปรี้ยว ความยากง่ายในการเคี้ยว ความยืดหยุ่น และความชอบโดยรวม นำข้อมูลการทดสอบความชอบมาหาคะแนนความชอบเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ส่วนผลการทดสอบความพอดีจะหาร้อยละความถี่ โดยกำหนดเกณฑ์ความพอดีที่ร้อยละ 70 แสดงว่าไม่ต้องปรับปรุงคุณลักษณะดังกล่าว แต่หากมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 70 ให้พิจารณาค่า net effect ประกอบ หากค่า net effect มีความแตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 20 แสดงว่ายังไม่ต้องปรับปรุงคุณลักษณะนั้นๆ (Somthawill and Sriwattana 2012) หากทุกคุณลักษณะมีคะแนนความชอบเฉลี่ยมากกว่า 7.0 แสดงว่าผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ แต่หากยังมีคุณลักษณะใดที่ได้คะแนนต่ำกว่า 7.0 หรือมีค่า net effect มากกว่าร้อยละ 20 จะทำการปรับปรุงคุณลักษณะนั้นๆ ตามผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

3. การพัฒนาผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ล้นจี

ทำการพัฒนาผลิตภัณฑ์ตามผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ต้นแบบและข้อเสนอแนะของผู้ทดสอบชิม โดยปรับปริมาณน้ำตาลและกรดซิตริกให้เพิ่มขึ้น รวมถึงมีการใช้กลั่นล้นจีสังเคราะห์เพื่อปรับปรุงกลิ่นของผลิตภัณฑ์ สูตรที่ใช้ในการผลิตประกอบด้วยน้ำตาลทราย ร้อยละ 34.89 กลูโคสไซรัป ร้อยละ 25.24 น้ำล้นจี ร้อยละ 14.55 น้ำ ร้อยละ 13.81 เจลาติน ร้อยละ 9.21 กรดซิตริก ร้อยละ 2.00 และกลั่นล้นจี ร้อยละ 0.3 เติมสีผสมอาหารสีชมพูเพื่อปรับสีผลิตภัณฑ์ นำผลิตภัณฑ์ไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมีเช่นเดียวกับ

การทดลองศึกษาผลิตภัณฑ์ต้นแบบ สำหรับการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสใช้วิธีการทดสอบความชอบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) หากทุกคุณลักษณะมีคะแนนความชอบเฉลี่ยมากกว่า 7.0 แสดงว่า ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับผลิตภัณฑ์และจะยุติการพัฒนาผลิตภัณฑ์

4. การศึกษาปริมาณมอลทิทอลที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลีนจืดน้ำตาลเสริมแคลเซียม

ศึกษาปริมาณมอลทิทอลที่จะทดแทนน้ำตาลในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ ผันแปรปริมาณมอลทิทอลที่จะทดแทนน้ำตาล 3 ระดับ คือ ทดแทนน้ำตาลร้อยละ 50 75 และ 100 โดยคำนวณให้ผลิตภัณฑ์มีความหวานเท่ากันในทุกสูตร (ความหวานของน้ำตาลเท่ากับ 1 และความหวานของมอลทิทอลเท่ากับ 0.9 เท่าของน้ำตาล) การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมีวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) สำหรับการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสกับผู้ทดสอบชิมจำนวน 50 คน ด้วยวิธีการทดสอบความชอบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อก (Randomized Complete Block Design) เติมแคลเซียมแล็กเตต (Calcium lactate pentahydrate) เพื่อเสริมแคลเซียมในผลิตภัณฑ์ทุกสูตร และมีการเติมโปตัสเซียมซอร์เบตเพื่อชะลอการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ ใช้ Medium Chain Triglyceride (MCT) oil ในการเคลือบผลิตภัณฑ์แทนมอลโทเดซทรีนสูตรผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สูตรดังตารางที่ 1 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี LSD ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสถิติสำเร็จรูป เพื่อหาปริมาณมอลทิทอล

ที่เหมาะสมที่จะใช้ในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลีนจืดน้ำตาลเสริมแคลเซียม

5. การทดสอบความชอบและการยอมรับของผู้บริโภค

ทำการทดสอบความชอบและการยอมรับผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เยลลี่ลีนจืดน้ำตาล โดยสำรวจผู้บริโภคทั่วไปจำนวน 170 คน ด้วยแบบสอบถามโดยใช้การเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบบังเอิญ แบบสอบถามประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับผู้ตอบแบบสอบถาม และการทดสอบความชอบและการยอมรับผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการทดสอบความชอบ 7 ระดับ (7-point hedonic scale) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และประมวลผล

6. การตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์สุดท้าย

ตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลีนจืดน้ำตาลเสริมแคลเซียมดังนี้ คุณภาพทางกายภาพและเคมี ได้แก่ a_w (AwQuick, Rotronic instrument crop) ค่าสี L, a, b (Minolta CT-10) Texture Profile Analysis (Texture Analyzer, TA.XT2i) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Refractometer PAL-1, Atago) และ pH (pH meter, Mettler Toledo LE427) คุณภาพทางจุลชีววิทยา ได้แก่ ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* และปริมาณยีสต์และรา องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น (AOAC, 2019) โปรตีน (AOAC, 2019) ไขมัน (AOAC, 2019) เกลือ (AOAC, 2019) ใยอาหาร (AOAC, 2019) คาร์โบไฮเดรต (Sullivan and Carpenter, 1993) น้ำตาลทั้งหมด (AOAC, 2016) แคลเซียม (AOAC, 2016) และพลังงาน (Sullivan and Carpenter, 1993)

ตารางที่ 1 สูตรผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลื่นจี๊ดคือน้ำตาลที่ผันแปรปริมาณมอลทิทอล

ส่วนผสม	ปริมาณมอลทิทอลที่ใช้ทดแทนน้ำตาล (ร้อยละ)		
	50	75	100
เจลาติน (g)	62	62	62
น้ำตาลทราย (g)	117.5	58.75	0
มอลทิทอล (g)	130.56	195.83	261.11
กลูโคสไซรัป (g)	170	170	170
น้ำลื่นจี (g)	123	123	123
น้ำ (g)	68	68	68
กรดซิตริก (g)	8.88	8.88	8.88
เพคติน (g)	6.9	6.9	6.9
แคลเซียมแล็กเตต (g)	20	20	20
โปตัสเซียมซอร์เบต (g)	0.22	0.22	0.22
กลีเซอรีน (mL)	10	10	10
สีผสมอาหาร (หยด)	15	15	15

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการศึกษาผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลื่นจี๊ดต้นแบบ

ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลื่นจี๊ดต้นแบบมีค่า a_w เท่ากับ 0.83 ± 0.01 ผลิตภัณฑ์มีสีส้มแดง (ภาพที่ 1) โดยมีค่าสี L, a, b เท่ากับ 31.5 ± 0.6 8.2 ± 0.4 และ 6.8 ± 0.5 ตามลำดับ มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด $75.01 \pm 0.35^\circ \text{Brix}$ และมี pH เท่ากับ 3.49 ± 0.01 ผลการวัด Texture Profile Analysis (TPA) ด้วยเครื่อง Texture Analyzer พบว่า ผลิตภัณฑ์มี hardness $2.784 \pm 0.112 \text{ N}$ adhesiveness 0.163 ± 0.003 springiness $1.014 \pm 0.011 \text{ N.s}$ cohesiveness 0.969 ± 0.005 gumminess 2.699 ± 0.116 และ chewiness 2.735 ± 0.105 (ตารางที่ 2) ทั้งนี้พบว่าผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลื่นจี๊ดต้นแบบมีค่า a_w สูงกว่ากัมมี่เยลลี่ที่จำหน่ายในท้องตลาด (ขนมวุ้นเจลาตินสำเร็จรูป) ที่มีค่า a_w 0.652 ± 0.002 ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลื่นจี๊ดต้นแบบมี hardness gumminess และ chewiness ไม่แตกต่างกับที่กัมมี่เยลลี่ในท้องตลาด ($p > 0.05$) แต่มีค่า adhesiveness cohesiveness

และ springiness สูงกว่ากัมมี่เยลลี่ในท้องตลาด โดยผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ในท้องตลาดที่นำมาเปรียบเทียบมี hardness $3.130 \pm 0.414 \text{ N}$ adhesiveness $0.039 \pm 0.005 \text{ N.s}$ springiness $0.959 \pm 0.007 \text{ N.s}$ cohesiveness 0.913 ± 0.002 gumminess $2.859 \pm 0.396 \text{ N}$ และ chewiness $2.744 \pm 0.396 \text{ N.s}$

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส (ตารางที่ 3) พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบเฉลี่ยต่อคุณลักษณะด้านสี รสหวาน รสเปรี้ยว ความยากง่ายในการเคี้ยว ความยืดหยุ่นและความชอบโดยรวมอยู่ในช่วงชอบปานกลาง ส่วนคุณลักษณะด้านกลิ่นรสลื่นจี๊ดอยู่ในระดับชอบเล็กน้อย เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความพอดีพบว่าคุณลักษณะที่ไม่ต้องปรับปรุงได้แก่ความยากง่ายในการเคี้ยว เนื่องจากมีร้อยละความพอดีมากกว่าร้อยละ 70 ส่วนคุณลักษณะอื่น ได้แก่ สี กลิ่นรสลื่นจี๊ด รสหวาน รสเปรี้ยวและความยืดหยุ่น ผู้ทดสอบต้องการให้เพิ่มความเข้มข้นของคุณลักษณะดังกล่าวขึ้น ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึง

ทำการปรับสูตรผลิตภัณฑ์ต้นแบบอีกครั้ง โดยเพิ่ม
ปริมาณน้ำตาลกรดซิตริก รวมถึงการใช้กลิ่นลิ้นจี่

สังเคราะห์ เพื่อปรับปรุงรสชาติและกลิ่นรสของ
ผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 2 คุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลิ้นจี่ต้นแบบ

รายการ	ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
a_w	0.83 ± 0.01
ค่าสี L	31.5 ± 0.6
ค่าสี a	8.2 ± 0.4
ค่าสี b	6.8 ± 0.5
Hardness (N)	2.784 ± 0.112
Adhesiveness (N.s)	0.163 ± 0.003
Springiness (N.s)	1.014 ± 0.011
Cohesiveness	0.969 ± 0.005
Gumminess (N)	2.699 ± 0.116
Chewiness (N.s)	2.735 ± 0.105
TSS ($^{\circ}$ Brix)	75.01 ± 0.35
pH	3.49 ± 0.01



ภาพที่ 1 ผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลิ้นจี่ต้นแบบ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ต้นแบบด้วยวิธีการทดสอบความชอบร่วมกับการทดสอบความพอดี (n=50)

คุณลักษณะ	คะแนนความชอบเฉลี่ย	ความพอดี (ร้อยละของจำนวนผู้ทดสอบ)					Net effect
		ลดลงมาก	ลดลงเล็กน้อย	ไม่ต้องปรับปรุง	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย	เพิ่มขึ้นมาก	
สี	7.6±1.0	0.0	2.2	57.8	37.8	2.2	37.8
กลิ่นรสลิ้นจี่	6.9±1.6	0.0	4.4	37.8	46.7	11.1	53.4
รสหวาน	7.1±1.5	2.2	8.9	46.7	37.8	4.4	31.1
รสเปรี้ยว	7.0±1.4	0.0	6.7	57.8	28.9	6.7	28.9
ความยากง่ายในการเคี้ยว	7.6±1.7	0.0	0.0	71.1	28.9	0.0	28.9
ความยืดหยุ่น	7.6±1.5	0.0	4.4	64.4	26.7	4.4	26.7
ความชอบโดยรวม	7.5±1.0	-	-	-	-	-	-

2. ผลการพัฒนาผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลิ้นจี่

ผลการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลิ้นจี่ที่พัฒนาแล้ว พบว่าผลิตภัณฑ์มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มปริมาณน้ำตาลและกรดซิตริก แต่มีค่า a_w และ pH ลดลงจากผลิตภัณฑ์ต้นแบบ (ตารางที่ 4) สำหรับการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่าคะแนนความชอบเฉลี่ยในทุกคุณลักษณะมีคะแนนสูงกว่าผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ยกเว้นคุณลักษณะด้านความยืดหยุ่นที่มีคะแนนความชอบเฉลี่ยเท่ากับผลิตภัณฑ์ต้นแบบ เนื่องจากผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบเฉลี่ยในทุกคุณลักษณะอยู่ในช่วงชอบมาก (ตารางที่ 5) แสดงว่าผู้ทดสอบให้การยอมรับ

ผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลิ้นจี่ จึงสิ้นสุดการพัฒนาผลิตภัณฑ์เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกัมมีเยลลี่ลิ้นจี่ต้นแบบกับกัมมีเยลลี่ลิ้นจี่ที่พัฒนาผลิตภัณฑ์แล้ว พบว่า ปริมาณน้ำตาล กลูโคสไซรัป และกรดซิตริกที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่า adhesiveness และ cohesiveness เพิ่มขึ้น แต่ทำให้ค่า hardness springiness gumminess และ chewiness ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Meesang *et al.* (2003) ที่พบว่าเมื่ออัตราส่วนของซูโครส/กลูโคสไซรัปและกรดซิตริกเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า hardness และ chewiness ลดลง และงานวิจัยของ Suwan *et al.* (2017) ที่พบว่าปริมาณเจลาตินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ hardness gumminess และ chewiness สูงขึ้น

ตารางที่ 4 คุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลิ้นจี่

รายการ	ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
a_w	0.745±0.01
ค่าสี L	41.3±0.43
ค่าสี a	19.1±1.86
ค่าสี b	12.1±1.3
Hardness (N)	1.365±0.049

ตารางที่ 4 (ต่อ)

รายการ	ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Adhesiveness (N.s)	0.422±0.022
Springiness (N.s)	0.914±0.003
Cohesiveness	0.924±0.012
Gumminess (N)	1.260±0.036
Chewiness (N.s)	1.152±0.034
TSS (°Brix)	80.43±0.35
pH	3.01±0.02

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ต้นแบบด้วยวิธีการทดสอบความชอบ 9 ระดับ (n=50)

คุณลักษณะ	คะแนนความชอบเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
สี	7.8±1.0
กลิ่นรสลิ้นจี	7.2±1.7
รสหวาน	7.8±1.0
รสเปรี้ยว	7.5±1.3
ความยากง่ายในการเคี้ยว	7.7±1.3
ความยืดหยุ่น	7.6±1.4
ความชอบโดยรวม	7.8±0.7

3. ผลการศึกษาปริมาณมอลทิทอลที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลีนจีลดน้ำตาลเสริมแคลเซียม

ผลการตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลีนจีลดน้ำตาลทั้ง 3 สูตร (ตารางที่ 6) พบว่า การผันแปรปริมาณมอลทิทอลไม่มีผลต่อค่า a_w , pH ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และลักษณะเนื้อ (hardness, adhesiveness, springiness, cohesiveness, gumminess และ chewiness) ของผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ ($p>0.05$) แต่มีผลต่อค่าสี L, a, b ($p\leq 0.05$) โดยผลิตภัณฑ์ที่ใช้มอลทิทอลทดแทนน้ำตาลร้อยละ 50 มีค่าสี L, a, b สูงที่สุด เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Rittilert and Warin (2019) ที่พบว่าการใช้มอลทิทอลทดแทนน้ำตาลในระดับต่างๆ มีผลต่อค่าสี L, a, b ของผลิตภัณฑ์

กัมมีเยลลี่มะม่วงหาวมะนาวโห่ ($p\leq 0.05$) สำหรับผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส (ตารางที่ 7) พบว่าการผันแปรปริมาณมอลทิทอลไม่มีผลต่อคะแนนความชอบเฉลี่ยในทุกคุณลักษณะ ($p>0.05$) ดังนั้นจึงเลือกใช้สูตรที่ทดแทนน้ำตาลด้วยมอลทิทอลร้อยละ 100 ในการผลิตต่อไป เนื่องจากมอลทิทอลเป็นสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลที่ให้พลังงานน้อยกว่าน้ำตาล ไม่ทำให้เกิดโรคฟันผุ ดูดซึมช้าและไม่สมบูรณ์ จึงไม่ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเหมือนน้ำตาลทรายและไม่ทำให้ระดับกลูโคสในเลือดสูงขึ้นในผู้ป่วยเบาหวาน (Phetlomthong and Rattanatraiwong, 2014)

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์
กัมมีเยลลี่ลดน้ำตาลทั้ง 3 สูตรกับสูตรที่ใช้น้ำตาล
ปกติ พบว่า การใช้มอลทิทอลทดแทนน้ำตาล ทำให้

ผลิตภัณฑ์มีค่า a_w และ pH สูงขึ้น และทำให้ค่าสี L,
a, b ลดลง ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบคุณภาพทางกายภาพและเคมีผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลดน้ำตาลที่ผ่านแปรปรมาณมอลทิทอล

รายการ	ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	ร้อยละ 50	ร้อยละ 75	ร้อยละ 100
a_w^{ns}	0.78±0.01	0.77±0.01	0.76±0.01
ค่าสี L	36.28±0.17 ^a	32.30±0.51 ^c	35.13±0.25 ^b
ค่าสี a	7.80±0.08 ^a	4.03±0.21 ^c	7.18±0.05 ^b
ค่าสี b	5.98±0.39 ^a	5.38±0.29 ^b	4.83±0.10 ^c
Hardness ^{ns} (N)	2.126±0.122	1.979±0.204	2.112±0.082
Adhesiveness ^{ns} (N.s)	0.237±0.054	0.249±0.019	0.200±0.025
Springiness ^{ns} (N.s)	0.766±0.007	0.751±0.033	0.762±0.132
Cohesiveness ^{ns}	0.713±0.011	0.676±0.043	0.699±0.009
Gumminess ^{ns} (N)	1.516±0.085	1.343±0.205	1.218±0.142
Chewiness ^{ns} (N.s)	1.161±0.067	1.013±0.198	1.126±0.068
TSS ^{ns} (°Brix)	80.65±0.92	80.87±0.74	80.95±1.77
pH ^{ns}	3.69±0.01	3.72±0.06	3.79±0.01

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกัน ($p > 0.05$)

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์กัมมีเยลลี่ลดน้ำตาลที่ผ่านแปรปรมาณมอลทิทอล (n=50)

คุณลักษณะ	คะแนนความชอบเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
	มอลทิทอลร้อยละ 50	มอลทิทอลร้อยละ 75	มอลทิทอลร้อยละ 100
สี ^{ns}	7.9±1.0	7.7±1.0	7.8±1.1
กลิ่นรสลิ้น ^{ns}	6.8±1.4	6.6±1.6	6.6±1.4
รสหวาน ^{ns}	6.7±1.5	6.9±1.4	6.6±1.3
รสเปรี้ยว ^{ns}	7.0±1.4	6.8±1.4	6.8±1.5
ความยากง่ายในการเคี้ยว ^{ns}	7.2±1.2	7.2±1.2	7.1±1.2
ความยืดหยุ่น ^{ns}	7.5±1.1	7.0±1.1	7.1±1.3
ความชอบโดยรวม ^{ns}	7.5±0.9	7.4±1.2	7.2±1.1

หมายเหตุ: ns หมายถึง คะแนนความชอบเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$)

4. ผลการทดสอบความชอบและการยอมรับของผู้บริโภค

ผลการทดสอบความชอบและการยอมรับกับผู้บริโภคทั่วไปด้วยแบบสอบถามโดยใช้การเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบบังเอิญ พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง คิดเป็นร้อยละ 86.05 ที่เหลือเป็นเพศชาย คิดเป็นร้อยละ 13.95 ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีอายุในช่วง 21-30 ปี คิดเป็นร้อยละ 41.86 รองลงมาคือช่วงอายุ 41-50 ปี คิดเป็นร้อยละ 25.58 ส่วนใหญ่ไม่เคยซื้อผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ คิดเป็นร้อยละ 44.19 รองลงมาคือซื้อ 1-2 ครั้งต่อเดือน คิดเป็นร้อยละ 40.70 สำหรับผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการทดสอบความชอบ 7 ระดับ (7-point hedonic scale) ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบต่อคุณลักษณะด้านสีผลิตภัณฑ์ในระดับชอบมากปานกลาง (คะแนนความชอบเฉลี่ย 6.1) ส่วนคะแนนความชอบในคุณลักษณะด้านกลิ่นรสลิ้นจี่ ความยากง่ายในการเคี้ยว ความยืดหยุ่น รสหวาน รสเปรี้ยวและความชอบรวมต่อผลิตภัณฑ์อยู่ในระดับชอบเล็กน้อย (คะแนนความชอบเฉลี่ยในช่วง 5.3-5.7) ผู้ตอบแบบสอบถามร้อยละ 83.72 ยอมรับผลิตภัณฑ์ ส่วนอีกร้อยละ 16.28 ไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ส่วนใหญ่ระบุเหตุผลที่ไม่ยอมรับคือ

ด้านรสชาติ กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์มีรสเปรี้ยวเกินไป หรือบางคนระบุว่าควรเพิ่มรสหวาน รองลงมาคือด้านกลิ่นและกลิ่นรส เช่น อยากให้มีกลิ่นรสลิ้นจี่มากขึ้น หรือระบุว่ากลิ่นไม่เหมือนลิ้นจี่ และบางคนอยากให้ผลิตภัณฑ์มีความเหนียวหนึบเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม มีข้อสังเกตว่าผู้ทดสอบที่ไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์ครั้งหนึ่งหรือร้อยละ 8.14 จากผู้ทดสอบทั้งหมดเป็นผู้บริโภคที่ไม่เคยซื้อผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่รับประทาน

5. ผลการตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์สุดท้าย

การตรวจสอบผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลิ้นจี่ลดน้ำตาลเสริมแคลเซียมพบว่าผลิตภัณฑ์มีสีปรากฏเป็นสีแดงส้ม (ภาพที่ 2) มีค่าสี L, a, b เท่ากับ 30.95 ± 0.62 5.50 ± 0.37 5.33 ± 0.48 ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์มีค่า a_w เฉลี่ย 0.742 ± 0.006 มีค่า hardness adhesiveness springiness cohesiveness gumminess และ chewiness ดังตารางที่ 8 ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพทางจุลชีววิทยาเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่อง เยลลี่แข็ง (มผช. 520/2547) (Thai Industrial Standards Institute (TISI), 2004) คือมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด <10 CFU/g ตรวจไม่พบ *Staphylococcus aureus* ในผลิตภัณฑ์ 1 g มีปริมาณ *Escherichia coli* น้อยกว่า 3 MPN/g และปริมาณยีสต์และรา <10 CFU/g (ตารางที่ 9)



ภาพที่ 2 ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลิ้นจี่ลดน้ำตาลเสริมแคลเซียม

ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลิ้นจี่ลดน้ำตาลเสริมแคลเซียมมีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า ใยอาหาร และคาร์โบไฮเดรต 20.08 10.14 0.01 1.10 1.44 และ 68.67 g/100g ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ให้พลังงาน

3.15 Kcal/g มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 18.63 g/100g เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลิ้นจี่สูตรอ้างอิง (สูตรน้ำตาล) ที่มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมด 57.71 mg/100g ผลิตภัณฑ์มีปริมาณแคลเซียม 527 mg/100g ซึ่งเพิ่มขึ้น

จากสูตรอ้างอิง (ไม่ได้เติมแคลเซียม) 520.4 mg/100g
หรือเพิ่มขึ้น 104.08 mg ต่อหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิง

(20 g) โดยผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณแคลเซียม 105.4 mg
ต่อหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิง (20 g)

ตารางที่ 8 ผลการตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพและเคมีผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลีนจืดน้ำตาลเสริมแคลเซียม

รายการ	ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
a_w	0.742±0.006
ค่าสี L	30.95±0.62
ค่าสี a	5.50 ±0.37 ^a
ค่าสี b	5.33±0.48 ^a
Hardness (N)	3.443±0.316
Adhesiveness (N.s)	0.166±0.010
Springiness (N.s)	0.813±0.007
Cohesiveness	0.724±0.013
Gumminess (N)	2.490±0.198
Chewiness (N.s)	2.023±0.159
TSS (°Brix)	78.58±0.32 ^b
pH	3.76±0.01

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลีนจืดน้ำตาลเสริมแคลเซียม

รายการ	มาตรฐาน	ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลีนจืดน้ำตาลเสริมแคลเซียม
Total Plate Count	ไม่เกิน 1×10^4 CFU/g	<10 CFU/g
<i>Staphylococcus aureus</i>	ไม่พบใน 1 g	ไม่พบใน 1 g
<i>Escherichia coli</i>	< 3 MPN/g	< 3 MPN/g
Yeast and Mold	ไม่เกิน 100 CFU/g	<10 CFU/g

ผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลีนจืดน้ำตาลเสริมแคลเซียมสามารถลดปริมาณน้ำตาลทั้งหมดลง 39.08 mg/100g เมื่อเทียบกับสูตรอ้างอิง จึงสามารถกล่าวอ้างว่า “ลดน้ำตาล” ได้ ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้นจากสูตรอ้างอิง 520.4 mg/100g หรือมีปริมาณเพิ่มขึ้น 104.08 mg ต่อหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิง (20 g) จึงสามารถกล่าวอ้าง “เสริมแคลเซียม” ได้ (เกณฑ์การกล่าวอ้างต้องมีค่าความแตกต่างของปริมาณแคลเซียมเมื่อเทียบกับสูตรอ้างอิง สูงกว่าร้อยละ 10 ของ Thai

RDI สำหรับผลิตภัณฑ์นี้ต้องมีปริมาณแคลเซียมสูงกว่า 80 mg ต่อหนึ่งบริโภคอ้างอิง จึงสามารถกล่าวอ้างได้) และเนื่องจากผลิตภัณฑ์มีแคลเซียมต่อหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงในเท่ากับ 105.4 mg หรือคิดเป็นร้อยละ 13.18 ของ Thai RDI (ต่อหนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิง) ดังนั้นจึงสามารถกล่าวอ้าง “เป็นแหล่งของแคลเซียม” หรือ “มีแคลเซียม” ได้เช่นกัน ทั้งนี้เกณฑ์การกล่าวอ้างว่า “เป็นแหล่งของแคลเซียม” หรือ “มีแคลเซียม” ได้ ผลิตภัณฑ์ต้องมีปริมาณแคลเซียมต่อ

หนึ่งหน่วยบริโภคอ้างอิงในปริมาณร้อยละ 10-19 ของ
Thai RDI (Ministry of Public Health of Thailand, 1998)

สรุป

จากการพัฒนาผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลื่นจี๊ดลดน้ำตาลเสริมแคลเซียมสามารถใช้มอลทิทอลทดแทนน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ได้ร้อยละ 100 ทำให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้ำตาลลดลงในระดับที่สามารถกล่าวอ้าง “ลดน้ำตาล” ได้ และปริมาณแคลเซียมเล็กน้อยที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้นในปริมาณที่สามารถกล่าวอ้างว่า “เสริมแคลเซียม” ได้ โดยผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้ำตาลลดลง 7.82 g ต่อหนึ่งหน่วยบริโภค และมีปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้น 104.08 mg ต่อหนึ่งหน่วยบริโภค เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลื่นจี๊ดสูตรอ้างอิง ทั้งนี้เป็นไปตามหลักเกณฑ์การกล่าวอ้างทางโภชนาการ ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพด้านจุลชีววิทยาเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่อง เยลลี่แข็ง (มพช. 520/2547) โดยผู้บริโภคให้การยอมรับผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่ลื่นจี๊ดลดน้ำตาลเสริมแคลเซียม ร้อยละ 83.72

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ โครงการวิจัยและพัฒนาภาครัฐ
ร่วมเอกชน กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์
วิจัย และนวัตกรรม ที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 2016. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 20th ed. The Association of Official Analytical Chemists, MD, USA.
- AOAC. 2019. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 21st ed. The Association of

Official Analytical Chemists, Washington
DC, USA.

- Depanya, W. 2008. **Research Report on Development of Gummy Jelly Tamarind Product**. Phetchabun Rajabhat University. (in Thai)
- Garcia, T. 2000. Analysis of gelatin-based confections. **The Manufacturing Confectioner** 80(6): 93-101.
- Medthai. 2017. **Lychee: 27 properties and benefits of lychee**. Available Source: <https://medthai.com/%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B9%89%E0%B8%99%E0%B8%88%E0%B8%B5%E0%B9%88/>, April 29, 2021. (in Thai)
- Meesang, S., Wuttichamnong, P., Pongsawatmanit, R. and Chuenput, S. 2003. Effect of gelatin sucrose/glucose syrup ratio and citric acid on physical properties and sensory quality of gummy jelly product, pp. 20-27. *In Proceedings of 41st Kasetsart University Annual Conference: Science and Genetic Engineering*. Architecture and Engineering, Agro-Industry, Natural Resources and Environment, Bangkok. (in Thai)
- Ministry of Public Health of Thailand. 1998. **Nutrition Labelling, Issue 182, 1998**. Available Source: http://food.fda.moph.go.th/law/data/announ_moph/P213.pdf, April 29, 2021. (in Thai)
- Norsuwan, T. and Tantechai, S. 2018. Effect of maltitol on physical and chemical properties of low calorie passion fruit jam, pp. 863-870. *In Proceedings of 56th Kasetsart University Annual Conference: Science and Genetic Engineering*. Architecture and Engineering, Agro-Industry, Natural Resources and Environment, Bangkok. (in Thai)

- Phetlomthong, P. and Rattanatraiwong, P. 2014. Sugar and sweetener: The current consumption trend. **King Mongkut's Agricultural Journal** 32(1): 77-86. (in Thai)
- Praditduang, S. and Chaiseri, S. 1996. **Confectionery and Chocolate**. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Puechkaset. 2018. **Lychees: Properties and Cultivation of Lychees**. Available Sources: <http://WWW.puechkaset.com/lychees>, December 2, 2018. (in Thai)
- Rajamanee, P, Sihabandit, U., Homelakorn, S., Lelaikham, B., Phichai, S. and Phoranso, W. 2017. Development of Ginger Gummy Jelly Product, pp. 629-633. In S. Teemueangsai, ed. **RMU Graduate Research Conference (GRC2017)**. Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham. (in Thai)
- Rittilert, P and Warin, K. 2019. Development of Karanda (*Carissa carandas* L.) Gummy Jelly Product. **Thai Journal of Science and Technology** 9(2): 342-354. (in Thai)
- Somthawill, S. and Sriwattana, S. 2012. The Use of Just About Right Scales in Reformulation of Thai Northern Style Sausage, pp. 167-174. In **Proceedings of 50th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry**. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Sullivan, D.M. and Carpenter, D.E. 1993. **Methods of Analysis for Nutrition Labeling**. AOAC International, Arlington, USA.
- Supimarot, S. 2000. **Confectionery and Chocolate Technology**. Chulalongkorn University Printing House, Bangkok. (in Thai)
- Suwan, T., Pradutprom, W., Ngamroop, W., Choosuk, N. and Phungamngoen, C. 2017. Development of Babbler's Bill Leaf Gummy Jelly. **Burapha Science Journal** 22(1): 189-201. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute (TISI). 2004. **Thai Community Product Standard of Dried Jelly: TCPS.520/2003**. Published documents, TISI, Bangkok. (in Thai)

การผลิตเครื่องดื่มนมกระบก (*Irvingia malayana* Oliv. ex A.W. Benn.)

Production of Krabok Milk Beverage

(*Irvingia malayana* Oliv. ex A.W. Benn.)

กัญญากัก จันทะมาลา ธฤต อภิสิทธิ์วงศ์ และ ขวัญหทัย แซ่ทอง *

Kanyapak Jantamala, Tarit Apisitwong and Kwanhathai Chaethong *

Received: 16 July 2021, Revised: 28 January 2022, Accepted: 31 May 2022

บทคัดย่อ

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มนมจากพืชโดยใช้วัตถุดิบท้องถิ่น คือ เมล็ดกระบก (*Irvingia malayana* Oliv. ex A.W. Benn.) หรือ อัลมอนต์อีสาน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและตรงตามความต้องการของผู้บริโภค โดยเริ่มจากศึกษาคุณภาพของวัตถุดิบและศึกษาปริมาณเนื้อเมล็ดกระบกที่เหมาะสมในสูตร จากนั้นศึกษาปริมาณเจลแลนกัมที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ จากการวิจัยพบว่า ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มนมกระบกที่มีเนื้อกระบกร้อยละ 13 และสารให้ความคงตัวเจลแลนกัมร้อยละ 0.02 ของน้ำหนักรวมทั้งหมด บั่นผสมเพื่อลดขนาดอนุภาคของไขมันด้วยเครื่องโฮโมจิไนซ์ที่ความเร็วรอบ 13,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 นาที และพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความคงตัวไม่แยกชั้นในระหว่างเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และได้รับการยอมรับของผู้บริโภคโดยมีระดับความพอใจในด้านคุณลักษณะต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความรู้สึกในปาก (mouthfeel) อยู่ในระดับพอใจแล้ว เครื่องดื่มนมกระบกที่ผลิตได้ให้พลังงานต่อหน่วยบริโภค (240 มิลลิลิตร) เท่ากับ 225 กิโลแคลอรี คาร์โบไฮเดรต 18.26 กรัม โปรตีน 2.54 กรัม ใยอาหาร 9.70 กรัม และไขมัน 15.58 กรัม โดยไม่พบโคเลสเตอรอล ไม่พบสาร D-amygdalin ทั้งในเมล็ดกระบกอบและผลิตภัณฑ์นมกระบก และผลิตภัณฑ์มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา โคลิฟอร์ม แบคทีเรียชนิดอี.โคไล (*Escherichia coli*) และสารอะฟลาทอกซิน ไม่เกินมาตรฐานตามข้อกำหนดของคณะกรรมการอาหารและยา

คำสำคัญ: การพัฒนาผลิตภัณฑ์, เครื่องดื่ม, นมกระบก, อัลมอนต์อีสาน, นมจากพืช

ABSTRACT

To attain the quality of the plant-based milk products desired or accepted by consumers, a development of milk beverage using local ingredients, namely, Krabok (*Irvingia malayana* Oliv. ex A.W. Benn) or E-saan almond, was performed. In the current study, the quality of starting raw material, the appropriate concentration of Krabok seeds in the formula, and the physical properties enhancement by adding adequate gellan gum were investigated. The results revealed that the optimal Krabok milk with the formula containing 13% Krabok, 0.02% gellan gum of the total weight homogenized at 13,000 rpm for 7 min to reduce the size of milk fat globules and pasteurized at 75°C for 5 min showed stable emulsion of developed products which did not separate during storage at 4°C and obtained “just about right” levels for all sensory attributes tested including appearance, color, smell, taste and mouthfeel. A serving of 240 mL (1 serving size) of Krabok milk provides 225 kcal, 18.26 g carbohydrate, 2.54 g protein, 9.70 g dietary fiber and 15.58 g fat without cholesterol. D-amygdalin was not found in either roasted Krabok seeds or Krabok milk products. Aerobic plate count, yeasts, molds, coliform, *E. coli* (*Escherichia coli*) and total aflatoxin examination of products were within the limit regulated by Thai Food and Drug Administration.

Key words: product development, beverage, Krabok milk, E-saan almond, plant-based milk

บทนำ

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่โดยใช้วัตถุดิบในท้องถิ่นเป็นการสร้างโอกาสในการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ให้มีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์อาหารและเป็นการส่งเสริมเกษตรกร กระบก (*Irvingia malayana* Oliv. ex A.W. Benn.) หรือ อัลมอนต์อีสาน เป็นพืชที่อยู่ในตระกูล Irvingiaceae จัดอยู่ในกลุ่มอัลมอนต์ป่า (Wild almond) เป็นพืชเมืองร้อน สามารถพบได้ทั่วไปในเขตภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ กัมพูชา มาเลเซีย ลาว อินโดนีเซีย ในประเทศไทยปลูกมากในจังหวัดแถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จะมีผลผลิตเมล็ดมากในช่วงเดือนเมษายนถึงเดือนพฤษภาคม (Kalsirisilp *et al.*, 2018) เมล็ดกระบกมีปริมาณไขมันร้อยละ 67 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 9.1 โปรตีน ร้อยละ 3.4 และเส้นใยอาหารสูง มีกรดลอริกและกรดไมริสติกเป็นกรดไขมันหลัก นิยมนำมาคั่วและบริโภค

เป็นอาหารว่างหรือขนมขบเคี้ยว มีรายงานวิจัยว่าถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในขนม หรือใช้ประโยชน์ในทางเภสัช (Sonwai and Pornprachanuvat, 2012; Akesowan *et al.*, 2020; Podchong *et al.*, 2020)

ผลิตภัณฑ์นมทางเลือกจากพืช (Plant-based milk alternative) คือ ผลิตภัณฑ์นมที่ไม่มีส่วนผสมของนมวัว มีอัตราการเติบโตทั่วโลกอย่างรวดเร็วในหมวดผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มใหม่ที่เป็นอาหารฟังก์ชัน (Functional food) เนื่องจากช่วยแก้ปัญหาการแพ้นมวัว การแพ้น้ำตาลแลคโตส (Lactose intolerance) ความกังวลเกี่ยวกับปริมาณแคลอรี ภาวะที่ร่างกายมีระดับโคเลสเตอรอลในเลือดสูงกว่าปกติ (Hypercholesterolemia) ผู้บริโภคที่รับประทานอาหารวีแกน (Sethi *et al.*, 2016) มีการนำเมล็ดพืชน้ำมันหลายชนิดมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเครื่องดื่มนมจากพืช ได้แก่ นมจากถั่วเหลือง ถั่วลิสง งา อัลมอนต์ และแมคาเดเมีย (Ongsaranakom *et*

al., 2009; Ahmadian-Kouchaksaraei *et al.*, 2014; Kundu *et al.*, 2018; Zaaboul *et al.*, 2019) ซึ่งคุณสมบัติของนมจากพืชแต่ละชนิดพบว่ามีความแตกต่างกันไปตามชนิดของพืชคุณภาพของวัตถุดิบและกระบวนการผลิต นมจากถั่วเหลืองนับว่าเป็นแหล่งโปรตีนที่มีปริมาณสูง มีสารอาหารใกล้เคียงกับนมวัว และรสชาติขมเยาแต่รสชาติของถั่ว (beany flavor) อาจไม่ถูกปากในผู้บริโภคบางกลุ่ม ขณะที่นมอัลมอนต์ เป็นนมทางเลือกของกลุ่มผู้บริโภคที่ต้องการจำกัดปริมาณแคลอรี เนื่องจากให้พลังงานต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับนมวัว หรือนมถั่วเหลืองในปริมาณที่เท่ากัน และอุดมไปด้วยไขมันที่ดีและวิตามินอี แต่มีโปรตีนน้อย (Vanga and Raghavan, 2018) กระบะกจึงเป็นวัตถุดิบท้องถิ่นที่น่าสนใจในการนำมาพัฒนาในรูปของนํ้านม มีรายงานการศึกษาถึงการใช้ประโยชน์จากนํ้านมและกรดไขมันจากเมล็ดกระบะก (Sonwai and Pomprachanuvat, 2012; Akesowan *et al.*, 2020; Podchong *et al.*, 2020) อย่างไรก็ตาม มีข้อมูลการบริโภคว่ากระบะกรับประทานมากมีผลให้เวียนศีรษะหรือบางคนอาเจียน อาจเนื่องมาจากอาการเป็นพิษจากสารไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ (Cyanogenic glycosides) ซึ่งพบโดยทั่วไปในพืชหลายชนิดที่คนเราบริโภค และสาร Amygdalin เป็นสารหลักในกลุ่มสารไกลโคไซด์ไซยาโนเจนิกที่พบในอัลมอนต์ (Bolarinwa *et al.*, 2014) ทั้งนี้กระบวนการผลิตนมจากพืชให้ได้คุณภาพดีขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น การเตรียม วิธีการสกัด คุณสมบัติของวัตถุดิบ การฆ่าเชื้อที่เหมาะสมในการผลิตเครื่องดื่มนํ้านม ซึ่งมีผลต่ออายุการเก็บรักษาและการยอมรับของผู้บริโภค (Ongsaranakom *et al.*, 2009; Ahmadian-Kouchaksaraei *et al.*, 2014; Kundu *et al.*, 2018; Zaaboul *et al.*, 2019)

ด้วยเหตุนี้ จึงมีแนวคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มนมจากพืชโดยใช้วัตถุดิบท้องถิ่นคือ เมล็ดกระบะก หรือ อัลมอนต์อีสาน นำมาศึกษาคุณภาพของวัตถุดิบเริ่มต้น และศึกษาปริมาณเนื้อ

เมล็ดกระบะกที่เหมาะสมและปริมาณการใช้เจลแลนกัมในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพในระหว่างเก็บรักษา โดยวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเครื่องดื่มที่ผลิตได้ เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตผลิตภัณฑ์นมกระบะกที่มีคุณภาพและปลอดภัยสำหรับผู้บริโภค

วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุดิบ

1. ตัวอย่างเมล็ดกระบะกดิบตากแห้งทั้งเปลือกเมล็ดใหญ่ รับซื้อจากเกษตรกร จังหวัดมุกดาหาร ล้างทำความสะอาดและคัดเลือกเฉพาะเมล็ดที่ดีและสมบูรณ์ เคลือบยางใส่ถาดและอบด้วยเตาอบไฟฟ้า (FNB Machinery&Solution, QL-2, ประเทศไทย) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วแกะเปลือกออก

2. สารให้ความคงตัว เจลแลนกัม (E418) เกรดอาหาร (Food grade) จากบริษัทเคมีภัณฑ์ โดยมีสมบัติละลายน้ำได้ ใช้เพื่อเป็นสารเพิ่มเนื้อ (Thickener), ตัวผสม (Emulsifier) และตัวคงสภาพ (Stabilizer) ในเครื่องดื่ม

วิธีการทดลอง

1. การศึกษาคุณภาพของวัตถุดิบเมล็ดกระบะก

นำเนื้อเมล็ดกระบะกที่เตรียมได้ มาวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ พลังงาน และคาร์โบไฮเดรต (AOAC, 1993) โปรตีน (AOAC, 2019) ไขมัน (AOAC, 2019) ความชื้น (AOAC, 2019) เถ้า (AOAC, 2019) และ โคลเลสเตอรอล (AOAC, 2019) วิเคราะห์ปริมาณอะฟลาทอกซิน โดยใช้เทคนิคการเตรียมตัวอย่างแบบ QuEChERS สกัดตัวอย่าง (2 ± 0.05 กรัม) ด้วยสารละลายอะซิโตรไนไตรล์เข้มข้นร้อยละ 80 และเติมกรดฟอร์มิก ร้อยละ 0.1 ก่อนนำไปฉีดวิเคราะห์ด้วย LC-MS/MS (Sun *et al.*, 2016) และวิเคราะห์หาปริมาณ D-amygdalin

โดยใช้ตัวอย่าง 5 กรัม สกัดด้วยเอทานอล ก่อนนำไปฉีดวิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC (Bolarinwa *et al.*, 2014)

2. การศึกษาปริมาณเนื้อเมล็ดกระบกและเจลแลนกันที่เหมาะสม

ศึกษาสัดส่วนเนื้อเมล็ดกระบกที่เหมาะสมในสูตร 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 13 และ 16 โดยน้ำหนัก (ใช้ข้อมูลจากการทดลองเบื้องต้น) บดผสมกับน้ำโดยใช้เครื่องปั่น (blender) (Tefal BL811, France) ที่ความเร็วสูงสุด (35,000 รอบ/นาที) เป็นเวลา 3 นาที กรองเอากากออก เติมน้ำเชื่อม (เข้มข้นร้อยละ 50) ร้อยละ 1.2 และเกลือร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก แล้วบดผสมเพื่อลดขนาดอนุภาคของไขมันด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (homogenizer) (YSTRAL Series X40, Germany) ที่ความเร็วรอบ 13,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 นาที และนำไปพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที (Ongsaranakom *et al.*, 2009) บรรจุใส่ขวดขณะร้อน ปิดฝาให้สนิทแล้วทำให้เย็นทันทีและเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส นำเครื่องดัดนมกระบกทั้ง 3 สูตร มาทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ (7 - point hedonic scale, 1 = ไม่ชอบมากที่สุด และ 7 = ชอบมากที่สุด) โดยผู้ทดสอบทั้งฝึกฝน จำนวน 30 คน เสิร์ฟตัวอย่างนมในแก้วพลาสติกใส แก้วละ 30 มิลลิลิตร พร้อมน้ำเปล่าและแครกเกอร์รสจืดเพื่อใช้สำหรับล้างปากก่อนชิมตัวอย่างถัดไป ทำการศึกษาคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ ความรู้สึกในปาก (mouthfeel) ความรู้สึกตกค้างหลังกลืน (aftertaste) และความชอบโดยรวม เพื่อคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมที่ได้คะแนนความชอบรวมสูงสุด

ศึกษาการใช้สารให้ความคงตัว เจลแลนกันในการเพิ่มความคงตัว ปรับปรุงเนื้อสัมผัสของนมกระบก และไม่แยกชั้นระหว่างเก็บ โดยศึกษาปริมาณเจลแลนกันที่เหมาะสมในสูตร 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0,

0.02, 0.04, 0.06 โดยน้ำหนัก (ใช้ข้อมูลจากการทดลองเบื้องต้น) กำหนดปริมาณเนื้อเมล็ดกระบกในสูตรคงที่ (คัดเลือกได้จากการศึกษาข้างต้น) เริ่มจากการนำเจลแลนกันบดผสมกับน้ำโดยใช้เครื่องปั่น (blender) ที่ความเร็วสูงสุด 3 นาที ก่อนนำไปบดผสมกับเนื้อเมล็ดกระบกตามขั้นตอนการผลิตนมกระบก นำเครื่องดัดนมกระบกทั้ง 3 สูตรมาวิเคราะห์ค่าความหนืด ด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบบรุคฟิลด์ (Brookfield Engineering laboratories Inc LVT, USA) ใช้หัวเข็มเบอร์ 1 ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างที่ 25 องศาเซลเซียส และทดสอบความคงตัวของนมกระบกโดยสังเกตจากการตกตะกอนในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน เพื่อคัดเลือกปริมาณของเจลแลนกันที่เหมาะสม

3. การประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์เครื่องดัดนมจากเมล็ดกระบกที่พัฒนาได้

นำผลิตภัณฑ์เครื่องดัดนมกระบกที่ได้จากข้อ 2 ที่เพิ่งผลิตเสร็จ ตรวจวัดค่าสี ($L^* a^* b^*$) โดยใช้เครื่อง Color reader (MINOLTA.CO.LTD รุ่น CR-10, ประเทศญี่ปุ่น) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solid, องศาบริกซ์) โดยใช้เครื่อง Digital Refractometer (Milwaukee รุ่น MA871, USA) ตรวจวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ พลังงาน และคาร์โบไฮเดรต (AOAC, 1993) เส้นใย (AOAC, 2019) โปรตีน (AOAC, 2019) ไขมัน (AOAC, 2019) ไขมันอิ่มตัว กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (MUFA) และกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (PUFA) (AOAC, 2019) เถ้า (AOAC, 2019) โคลเลสเตอรอล (AOAC, 2019) แร่ธาตุโซเดียม เหล็ก แคลเซียม โพแทสเซียม (AOAC, 2019), ฟอสฟอรัส (AOAC, 2019,) วิตามิน A (AOAC, 2019) วิตามิน B1 (AOAC, 2019) และวิตามิน B2 (AOAC, 2019) วิเคราะห์หาปริมาณ D-amygdalin โดยใช้ HPLC (Bolarinwa *et al.*, 2014) วิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ตามข้อกำหนดของคณะกรรมการอาหารและยา ประกาศกระทรวง

สาธารณสุข (ฉบับที่ 356) เรื่อง เครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (Notification of Ministry of Public Health, 2013) ได้แก่ จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ปริมาณยีสต์ และรา โคลิฟอร์ม โดยวิธีเอ็มพีเอ็น (MPN) แบคทีเรียชนิด อี.โคไล (*Escherichia coli*) และตรวจวิเคราะห์ปริมาณอะฟลาทอกซิน ตามข้อกำหนดของคณะกรรมการอาหารและยา ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 414) เรื่อง มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน (Notification of Ministry of Public Health, 2020) การวิเคราะห์การแยกชั้นของน้ำมัน และทดสอบผู้บริโภคร่วมเป้าหมายคือ ผู้ที่บริโภคนมจากพืชเป็นประจำ ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ (9 - point hedonic scale, 1 = ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 = ชอบมากที่สุด) ร่วมกับการทำ Just About Right (JAR) โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 50 คน ในด้านคุณลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ ความรู้สึกในปาก (mouthfeel) และความชอบโดยรวม รวมทั้งถามการยอมรับ และการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาสัดส่วนเนื้อเมล็ดกระบองที่เหมาะสมและการศึกษาการใช้สารให้ความคงตัว เจลแลนกัมในการเพิ่มความคงตัวและปรับปรุงเนื้อสัมผัสของนมกระบอง ใช้การออกแบบการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) สำหรับการทดสอบทางประสาทสัมผัสจะใช้การออกแบบการทดลอง แบบสุ่มในบล็อก (Randomized Complete Block Design, RCBD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ตั้งแต่การเตรียมตัวอย่างไปจนถึงการวิเคราะห์ และนำข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าคุณภาพต่างๆ มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ถ้าพบนัยสำคัญทางสถิติจะคำนวณค่า Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. คุณภาพของวัตถุดิบเมล็ดกระบอง

ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของเมล็ดกระบอง (ตารางที่ 1) พบว่าเนื้อเมล็ดกระบองที่ผ่านกระบวนการเตรียมโดยล้างทำความสะอาดและคัดเลือกเฉพาะเมล็ดที่ดีและสมบูรณ์ไม่มีร่องรอยของโรค หรือการถูกทำลายด้วยแมลง อบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที ปริมาณ 100 กรัม ให้พลังงานถึง 726.7 kcal มีคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 16.1 มีโปรตีนร้อยละ 12.6 ความชื้นร้อยละ 1.4 และมีไขมันปริมาณสูงถึงร้อยละ 68 โดยไม่พบโคเลสเตอรอล จากรายงานวิจัยระบุว่าไขมันอิ่มตัวเป็นองค์ประกอบหลักของไขมันในเมล็ดกระบองประกอบด้วยกรดลอริก (C12:0) และกรดไมริสติก (C14:0) (Sonwai and Pomprachanuvat, 2012; Podchong *et al.*, 2020) โดยกรดไขมันทั้งสองชนิดนี้เป็นกรดไขมันดีที่พบในนมแม่และนมวัว และจากข้อมูลที่ระบุว่าหากรับประทานกระบองมากแล้วมีผลให้เวียนศีรษะหรือบางคนอาเจียน อันเนื่องมาจากอาการเป็นพิษจากสารไซยาโนเจนิก ไกลโคไซด์ (Cyanogenic glycosides) ซึ่งพบโดยทั่วไปในพืชหลายชนิดที่คนเรารับบริโภค และสาร Amygdalin เป็นสารหลักในกลุ่มสารไกลโคไซด์ไซยาโนเจนิกที่พบในตระกูลอัลมอนต์ (Bolarinwa *et al.*, 2014) ในงานวิจัยนี้จึงมีการวิเคราะห์หาปริมาณ D-amygdalin โดยใช้ HPLC ผลการทดสอบไม่พบสารดังกล่าวทั้งในเมล็ดกระบองดิบและเมล็ดกระบองที่ผ่านกระบวนการอบ ซึ่งจากรายงานวิจัยได้ระบุว่าพบปริมาณสาร amygdalin ในปริมาณน้อยมากในเมล็ดอัลมอนต์อบเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณในเมล็ดอัลมอนต์ดิบ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณสาร amygdalin ที่วิเคราะห์ได้ นอกจากประสิทธิภาพในการสกัดสารเพื่อนำไปวิเคราะห์แล้ว ปริมาณสารดังกล่าวสามารถแปรผันได้จากสายพันธุ์ และปัจจัยแวดล้อมในระหว่างเพาะปลูก (Bolarinwa *et al.*, 2014) และเมล็ดกระบองมีปริมาณอะฟลาทอกซินทั้งหมด <0.5 µg/kg (ตารางที่ 1) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานข้อกำหนด

ของคณะกรรมการอาหารและยาที่กำหนดให้ตรวจพบอะฟลาทอกซินทั้งหมดได้ไม่เกิน 15 $\mu\text{g/kg}$ ในวัตถุดิบซึ่งต้องผ่านกระบวนการคัดหรือทำความสะอาด แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเตรียมวัตถุดิบ

เมล็ดกระบกเพื่อนำไปแปรรูปในขั้นถัดไปมีประสิทธิภาพเพียงพอในการเตรียมวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและปลอดภัยในการบริโภค

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อเมล็ดกระบกอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ	หน่วย
พลังงาน	726.7	kcal/100g
คาร์โบไฮเดรต	16.1	g/100g
โปรตีน	12.6	g/100g
ไขมัน	68.0	g/100g
ความชื้น	1.4	g/100g
เถ้า	1.9	g/100g
โคเลสเตอรอล	<2.0	mg/100g
อะมิกดาลิน (D-amgdalin)	nd	mg/kg
อะฟลาทอกซินทั้งหมด	<0.5	$\mu\text{g/kg}$
- อะฟลาทอกซิน B1	<0.5	$\mu\text{g/kg}$
- อะฟลาทอกซิน B2	<0.5	$\mu\text{g/kg}$
- อะฟลาทอกซิน G1	<0.5	$\mu\text{g/kg}$
- อะฟลาทอกซิน G2	<0.5	$\mu\text{g/kg}$

หมายเหตุ: รายงานผลการทดสอบออกโดยห้องปฏิบัติการ Intertek Testing Services (Thailand) Ltd. (ได้รับการรับรองตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025), nd = not detected

2. ปริมาณเนื้อเมล็ดกระบกและเจลแลนกัมที่เหมาะสม

ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ (7 - point hedonic scale) โดยใช้ผู้ทดสอบทั้งฝึกฝน จำนวน 30 คน ได้ผลดังตารางที่ 2 พบว่าการแปรผันปริมาณเนื้อเมล็ดกระบกในสูตร 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 13 และ 16 โดยน้ำหนักผลิตภัณฑ์มีค่าคะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติความรู้สึกในปาก (mouthfeel) ความรู้สึกตกค้างหลังกลืน (aftertaste) และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) ค่าคะแนนความชอบ

โดยรวมของทั้งสามสูตรอยู่ในช่วงระดับชอบถึงชอบมาก เมื่อพิจารณาจากข้อเสนอแนะพบว่าสูตรที่มีเนื้อกระบกร้อยละ 16 มีความข้นหนืดมากเกินไปและมีกลิ่นฉุนแรงเกินไป ส่วนสูตรที่มีเนื้อกระบกร้อยละ 10 มีความเจือจางของนมมากเกินไป เครื่องดื่มนมที่มีปริมาณเนื้อเมล็ดกระบก ร้อยละ 10, 13 และ 16 โดยน้ำหนัก มีค่าความหนืดเท่ากับ 7.5, 14.0 และ 22.5 cP เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนืดกับนมอัลมอนต์ที่มีวางจำหน่ายในตลาด ซึ่งวัดค่าความหนืดได้เท่ากับ 14.5 cP สูตรนมที่มีเนื้อกระบกร้อยละ 13 จึงมีค่าความหนืดที่

ใกล้เคียงที่สุด จึงเลือกสัดส่วนนี้ไปใช้ศึกษาต่อใน
ขั้นตอนถัดไป

ตารางที่ 2 คุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ (7 - point hedonic scale) ของเครื่องดื่มนม
กระบอกที่มีปริมาณเนื้อกระบอกแตกต่างกัน

ปริมาณ เนื้อ กระบอก (%w/w)	ลักษณะ ปรากฏ ^{ns}	สี ^{ns}	กลิ่นรส ^{ns}	รสชาติ ^{ns}	ความรู้สึกลิ้น ปาก (mouthfeel) ^{ns}	ความรู้สึกลิ้น ตกค้างหลัง กลืน (aftertaste) ^{ns}	ความชอบ โดยรวม ^{ns}
10%	5.80 ± 1.45	6.10 ± 1.54	5.16 ± 1.79	4.97 ± 1.85	5.29 ± 1.60	5.03 ± 1.87	5.19 ± 1.94
13%	6.03 ± 1.45	6.61 ± 1.38	5.74 ± 1.69	5.23 ± 2.08	5.68 ± 1.72	5.39 ± 1.87	5.84 ± 1.81
16%	5.45 ± 1.73	6.45 ± 1.48	5.00 ± 1.97	4.35 ± 2.20	5.26 ± 1.75	4.81 ± 1.87	5.10 ± 1.89

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±S.D. (N = 30), ns = not significant

ผลการศึกษาการใช้สารให้ความคงตัวเจลแลนกับ
เพื่อเพิ่มความคงตัวซึ่งสังเกตจากการที่น้ำนมไม่แยกชั้น
ในระหว่างเก็บและปรับปรุงเนื้อสัมผัสของนมกระบอก
โดยศึกษาปริมาณเจลแลนกับที่เหมาะสมในสูตร 4 ระดับ
คือ ร้อยละ 0, 0.02, 0.04, 0.06 โดยน้ำหนัก โดยกำหนด
ปริมาณเนื้อเมล็ดกระบอกในสูตรคงที่เท่ากับร้อยละ 13
โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์ค่าความหนืดพบว่าเมื่อ
ปริมาณเจลแลนกับในสูตรเพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าความหนืด
เพิ่มขึ้นเท่ากับ 14.0, 15.5, 16.5 และ 18.5 cP ตามลำดับ
ทั้งนี้เนื่องจากเจลแลนกับเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่ผลิต
จากการหมักคาร์โบไฮเดรตด้วยจุลินทรีย์ *Sphingomonas*
elodea สำหรับการละลายของเจลแลนกับนั้นพบว่า
สามารถละลายได้ในน้ำเย็นหรือน้ำร้อนขึ้นอยู่กับ
จำนวนหมู่อะซิด จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงมีการใช้
ประโยชน์หลากหลายในผลิตภัณฑ์อาหาร และสามารถ
ใช้เพิ่มความคงตัวระหว่างเก็บได้ในเครื่องดื่มและ
ผลิตภัณฑ์นมถั่วเหลือง (Valli and Clark, 2009) โดย
กลไกการเกิดเจลของเจลแลนกับต้องการไอออน
ประจุบวก เช่น แคลเซียมไอออน เกิดเป็นเจลที่
โมเลกุลเชื่อมต่อกันที่เสถียร เรียกว่า จังชันโซน

(junction zone) เกิดเป็นโครงสร้างเจลที่แข็งแรง เจล
ที่เกิดจากเจลแลนกับมีลักษณะใสและทนต่อความร้อน
(Pongsawatmanit, 2009) และจากการทดสอบความ
คงตัวของนมกระบอกโดยวิธีสังเกตจากการตกตะกอน
ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส
พบว่านมกระบอกที่เติมเจลแลนกับทุกความเข้มข้นไม่
มีการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 1 ภายหลังเก็บ
เป็นเวลา 10 วัน เช่นเดียวกับรายงานวิจัยของ Satsue
(2019) ในการใช้แซนแทนกับเพื่อเพิ่มความคงตัวใน
น้ำนมจากกระเจบ ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดสูงจะส่งผลให้
ไม่เกิดการแยกชั้นหรือเกิดชั้นน้อย แต่การเลือกใช้
สารให้ความคงตัวที่มีความเข้มข้นมากเกินไปจะ
ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์และการ
ยอมรับของผู้บริโภคด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้นปริมาณ
สารให้ความคงตัว เจลแลนกับที่เหมาะสม คือ ร้อยละ
0.02 เนื่องจากใช้ปริมาณในสูตรน้อยแต่ก็สามารถ
ป้องกันการแยกชั้นระหว่างเก็บได้ และมีความหนืด
เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (15.5 cP) จากสูตรที่ไม่เติมสารให้
ความคงตัวที่ผู้บริโภคให้การยอมรับ



(a)

(b)

(c)

(d)

ภาพที่ 1 เครื่องดื่มนมกระบอกที่ไม่เติมเจลแลนกับ (a) และเติมเจลแลนกับร้อยละ 0.02 (b) ร้อยละ 0.04 (c) และ ร้อยละ 0.06 (d) เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน

3. ผลการศึกษาคุณภาพของการเครื่องดื่มนมกระบอกที่พัฒนาได้

เครื่องดื่มนมกระบอกที่เพิ่งผลิตเสร็จ ที่มีเนื้อเมล็ดกระบอกในสูตรเท่ากับร้อยละ 13 และเจลแลนกับร้อยละ 0.02 ปั่นผสมเพื่อลดขนาดอนุภาคของไขมันด้วยเครื่องโฮมจิในเซอร์ที่ความเร็วรอบ 13,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7 นาที และพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที บรรจุใส่ขวดขณะร้อน ปิดฝาให้สนิทแล้วทำให้เย็นทันทีนั้น มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ เท่ากับ 6.33 องศาบริกซ์ และมีค่าสี L^* , a^* , b^* เท่ากับ 84.90, 0.20, 5.17 ตามลำดับ มีคุณค่าทางโภชนาการเปรียบเทียบกับนมที่มีจำหน่ายแสดงดังตารางที่ 3 พบว่าการบริโภคนมกระบอก 240 มิลลิลิตร จะได้รับพลังงาน 225 กิโลแคลอรี มีคาร์โบไฮเดรต 18.26 กรัม โปรตีน 2.54 กรัม ไขมัน 9.70 กรัม และไขมัน 15.58 กรัม โดยไม่พบโคเลสเตอรอล เมื่อเปรียบเทียบกับนมชนิดต่างๆ ได้แก่ นมวัว นมถั่วเหลือง และนมอัลมอนต์ พบว่านมกระบอกให้พลังงานสูงที่สุดขณะที่นมอัลมอนต์ให้พลังงานต่อหน่วยบริโภคต่ำสุดมีค่าประมาณ 36 กิโลแคลอรี ทั้งนี้เนื่องจากพลังงาน

ส่วนใหญ่ของนมกระบอกมาจากไขมัน โดยเฉพาะไขมันอิ่มตัวที่เป็นองค์ประกอบหลักในวัตถุดิบเมล็ดกระบอก (Sonwai and Pornprachanuvat, 2012; Podchong *et al.*, 2020) นมถั่วเหลืองและนมวัวซึ่งมีปริมาณโปรตีนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับนมกระบอกและนมอัลมอนต์ นมวัวเป็นแหล่งของแคลเซียมที่สำคัญในการบริโภค โดยนมวัว 1 กล่องมีปริมาณแคลเซียมเฉลี่ยเท่ากับ 294 มิลลิกรัม ขณะที่การบริโภคนมพืชอีกสองชนิด ได้แก่ นมถั่วเหลือง และนมอัลมอนต์ ยังคงได้รับแคลเซียมในปริมาณที่ใกล้เคียงกันกับนมวัว ส่วนนมกระบอกมีปริมาณแคลเซียมน้อยกว่านมวัวประมาณ 7.5 เท่าชี้ให้เห็นว่านมกระบอกยังไม่ใช่แหล่งอาหารที่ดีสำหรับแคลเซียม แต่เป็นแหล่งของไขมันดีเนื่องจากในองค์ประกอบของเมล็ดกระบอกมีไขมันที่สำคัญอยู่สองชนิด คือ กรดลอริก และกรดไมริสติก (Sonwai and Pornprachanuvat, 2012; Podchong *et al.*, 2020) โดยกรดไขมันทั้งสองชนิดนี้เป็นกรดไขมันดีที่พบในนมแม่ นมวัว และพืชไขมันหลายชนิด (Verruck *et al.*, 2019; German and Dillard, 2010) อย่างไรก็ตาม

นมกระบอกมีปริมาณใยอาหารและธาตุเหล็กสูงกว่า นมวัว นมถั่วเหลือง และนมอัลมอนต์

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของเครื่องดื่มนมกระบอกกับนมที่มีจำหน่ายในตลาด (ต่อหน่วยบริโภค 240 มิลลิลิตร)

สารอาหาร	นมกระบอก	นมอัลมอนต์*	นมถั่วเหลือง*	นมวัว*
พลังงาน (kcal)	225	36.43	95	158
คาร์โบไฮเดรต (g)	18.62	1.32	5	n.a.
เส้นใย	9.70	0.64	0.96	0
โปรตีน (g)	2.54	1.67	8.71	8.11
ไขมัน (g)	15.58	2.71	4.35	9.05
ไขมันอิ่มตัว	14.54	0	0.64	5.64
กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (MUFA)	0.46	1.67	0.84	2.62
กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (PUFA)	0.05	0.67	2.40	0.35
โคเลสเตอรอล (mg)	0	0	0	34.1
แร่ธาตุ (mg)				
แคลเซียม	38.93	325.29	205.86	294
เหล็ก	2.40	0.18	0.84	0.12
แมกนีเซียม	n.a.	21	49	32
ฟอสฟอรัส	n.a.	48	108	230
โพแทสเซียม	109.10	65	364.29	373
โซเดียม	29.88	146.42	65	121
สังกะสี	n.a.	0.56	0.75	0.94
วิตามิน				
วิตามิน A (lg)	n.a.	77.14	32.57	82
วิตามิน B1 (mg)	n.a.	n.a.	0.08	0.1
วิตามิน B2 (mg)	n.a.	0.19	0.24	0.4

หมายเหตุ: รายงานผลการทดสอบคุณค่าโภชนาการของนมกระบอกออกโดยห้องปฏิบัติการ Intertek Testing Services (Thailand) Ltd. (ได้รับการรับรองตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025), n.a.= information not available, *Vanga and Raghavan (2018)

ผลการวิเคราะห์หา D-amygdalin โดยใช้ HPLC ไม่พบสารดังกล่าวในตัวอย่างนมกระบอกที่ผลิตได้ และไม่พบจุลินทรีย์ทั้งหมด (<10 CFU/กรัม) ยีสต์

และรา (<10 CFU/กรัม) โคลิฟอร์ม (<3 MPN/กรัม) แบคทีเรียชนิด อี. โคไล (*Escherichia coli*) (<3 MPN/กรัม) และไม่พบสารอะฟลาทอกซิน (<0.5 ไมโครกรัมต่อ

กิโลกรัม) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานตามข้อกำหนดในประกาศกระทรวงสาธารณสุข ปี พ.ศ. 2556 ฉบับ 356 เรื่อง เครื่องดื่มในภาชนะปิดสนิท (Notification of Ministry of Public Health, 2013) และ ฉบับ 414 เรื่อง มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน (Notification of Ministry of Public Health, 2020) แสดงว่าผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มนมกระบอกที่พัฒนาได้มีความปลอดภัยต่อการบริโภค และผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มนมกระบอกโดยใช้กลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายจำนวน 50 คน พบว่าผลคะแนนความชอบต่อคุณลักษณะต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม อยู่ใน

ระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง (ตารางที่ 4) อย่างไรก็ตามมีค่าร้อยละการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภคเท่ากับร้อยละ 85 จึงมีความเป็นไปได้ในการผลิตเพื่อจำหน่ายและส่งเสริมให้เป็นผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ สำหรับแนวทางในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์พบว่าจากผลการทดสอบระดับความพอดิด้านคุณลักษณะด้านต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วยลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความรู้สึกลิ้นปาก (mouthfeel) อยู่ในระดับพอดิแล้ว (เกณฑ์ระดับความพอดิในงานวิจัยนี้ คือ $\%JAR \geq 70$)

ตารางที่ 4 การยอมรับและระดับความพอดิของผู้บริโภคต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มนมกระบอก

คุณลักษณะ	คะแนนความชอบ	%JAR	%น้อยเกินไป	%มากเกินไป
ลักษณะปรากฏ	6.72 ± 1.43	88	8	4
สี	7.16 ± 1.36	84	6	10
กลิ่นรส	6.90 ± 1.28	78	10	12
รสชาติ	6.86 ± 1.31	88	8	4
ความรู้สึกลิ้นปาก (mouthfeel)	6.74 ± 1.25	88	4	8
ความชอบโดยรวม	6.98 ± 0.97	-	-	-

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±S.D. (N = 50)

สรุป

เครื่องดื่มนมกระบอกที่เหมาะสม คือ สูตรที่มีเนื้อเมล็ดกระบอกเท่ากับร้อยละ 13 และสารให้ความคงตัว เจลแลนกัน เท่ากับร้อยละ 0.02 ของน้ำหนัก รวมทั้งหมด โดยการเติมเจลแลนกันในส่วนช่วยเพิ่มความคงตัวไม่แยกชั้นระหว่างเก็บได้ การบริโภคนมกระบอกหนึ่งหน่วยบริโภค (240 มิลลิลิตร) จะได้รับพลังงาน 225 กิโลแคลอรี มีคาร์โบไฮเดรต 18.26 กรัม โปรตีน 2.54 กรัม ใยอาหาร 9.70 กรัม และไขมัน 15.58 กรัม โดยไม่มีโคเลสเตอรอล นมกระบอกมีปริมาณ

แคลเซียมน้อยกว่านมวัวประมาณ 7.5 เท่า ซึ่งให้เห็นว่านมกระบอกเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มนมจากพืชที่ให้พลังงานสูง โดยมีคาร์โบไฮเดรตและไขมันอิ่มตัวเป็นองค์ประกอบหลัก และให้เส้นใยสูง แต่ไม่ใช่แหล่งของแคลเซียม จึงควรมีการศึกษาการเพิ่มปริมาณแคลเซียมในนมชนิดนี้ต่อไป ผลการวิเคราะห์หา D-amylgdalin โดยใช้ HPLC ไม่พบสารดังกล่าวทั้งในเมล็ดกระบอกดิบ เมล็ดกระบอกที่ผ่านกระบวนการอบและนมกระบอกที่ผลิตได้ ไม่พบจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์ และรา โคลิฟอร์ม แบคทีเรียชนิด อี.โคไล (*Escherichia*

coli) และไม่พบสารอะฟลาทอกซินในผลิตภัณฑ์นมกระบอก แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มนมกระบอกที่พัฒนาได้มีความปลอดภัยต่อการบริโภค และผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มนมกระบอก อยู่ในระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปีการศึกษา 2563 โดยสถาบันนวัตกรรมวิสาหกิจดิจิทัล

เอกสารอ้างอิง

- Ahmadian-Kouchaksaraei, Z., Varidi, M., Varidi, M.J. and Pourazarang, H. 2014. Influence of processing conditions on the physicochemical and sensory properties of sesame milk: A novel nutritional beverage. **LWT - Food Science and Technology** 57(1): 299-305.
- Akesowan, A., Choonhahirun, A. and Jariyawaranugoon, U. 2020. Quality and sensory profile evaluation of gluten-free sapodilla-wild almond seed bar with stevia as partial sugar substitution. **Food Research** 4(4): 1109-1115.
- AOAC. 1993. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 14th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, USA.
- AOAC. 2019. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 21th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, USA.
- Bolarinwa, I.F., Orfila, C. and Morgan, M.R. 2014. Amygdalin content of seeds, kernels and food products commercially-available in the UK. **Food Chemistry** 152: 133-139.
- German, J.B. and Dillard, C.J. 2010. Saturated fats: a perspective from lactation and milk composition. **Lipids** 45(10): 915-923.
- Kalsirisilp, R., Chawsuanpair, W. and Langkapin, J. 2018. Design and Fabrication of Continuous Type Barking Deer's Mango Nut Sheller. **Journal of Engineering, RMUTT** 16(2): 119-128.
- Kundu, P., Dhankhar, J. and Sharma, A. 2018. Development of non dairy milk alternative using soymilk and almond milk. **Current Research in Nutrition and Food Science** 6(1): 203-210.
- Notification of Ministry of Public Health. 2013. **Re: Beverages in Sealed Container**. Available Source: http://food.fda.moph.go.th/law/data/announ_moph/P356.pdf, July 14, 2021.
- Notification of Ministry of Public Health. 2020. **Re: Standards for Contaminants in Food**. Available Source: http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2563/E/118/T_0017.PDF, July 14, 2021.
- Ongsaranakom, M., Subhimaros, S. and Chinprahast, N. 2009. Production of non-dairy beverage from pressed macadamia nut, pp. 1534-1544. **In The 12th National Graduate Research Conference**. CGAU and Khon Kaen University, Thailand. (in Thai)
- Podchong, P., Inbumrung, P. and Sonwai, S. 2020. The Effect of Hard Lauric Fats on the Crystallization

- Behavior of Cocoa Butter Substitute. **Journal of Oleo Science** 69(7): 659-670.
- Pongsawatmanit, R. 2009. Hydrocolloids application in food products, pp. 275-296. *In* Pongsawatmanit, R., ed. **Product Development in Agro-Industry**. Kasetsart University Press, Bangkok. (in Thai)
- Satsue, N. 2019. Product development of imitation milk from water caltrop, Bangkok. Master Thesis of Home Economics, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. (in Thai)
- Sethi, S., Tyagi, S.K. and Anurag, R.K. 2016. Plant-based milk alternatives an emerging segment of functional beverages: a review. **Journal of Food Science and Technology** 53(9): 3408-3423.
- Sonwai, S. and Pomprachanuvat, P. 2012. Characterization of physicochemical and thermal properties and crystallization behavior of Krabok (*Irvingia malayana*) and rambutan seed fats. **Journal of Oleo Science** 61(12): 671-679.
- Sun, J., Li, W., Zhang, Y., Hu, X., Wu, L. and Wang, B. 2016. QuEChERS Purification Combined with Ultrahigh-Performance Liquid Chromatography Tandem Mass Spectrometry for Simultaneous Quantification of 25 Mycotoxins in Cereals. **Toxins** 8(12): 1-18.
- Valli, R. and Clark, R. 2009. Gellan Gum, pp. 145-166. *In* Imeson, A., ed. **Food Stabilisers, Thickeners and Gelling Agents**. Blackwell Publishing Ltd., UK.
- Vanga, S.K. and Raghavan, V. 2018. How well do plant based alternatives fare nutritionally compared to cow's milk?. **Journal of food science and Technology** 55(1): 10-20.
- Verruck, S., Balthazar, C.F., Rocha, R.S., Silva, R., Esmerino, E.A., Pimentel, T.C., Freitas, M.Q., Silva, M.C., Gomes da Cruz, A. and Prudencio, E.S. 2019. Dairy foods and positive impact on the consumer's health, pp. 289-316. *In* Toldra, F., ed. **Advances in Food and Nutrition Research**. Academic Press, San Diego.
- Zaaboul, F., Raza, H., Cao, C. and Yuanfa, L. 2019. The impact of roasting, high pressure homogenization and sterilization on peanut milk and its oil bodies. **Food Chemistry** 280: 270-277.

การศึกษาอัตราส่วนความหนาและวัสดุชั้นแกนกลางจากเส้นใยไฟเบอร์และพลาสติก โพลีโพรพิลีนรีไซเคิลต่อสมบัติทางเสียงและทางกลของวัสดุเชิงประกอบแซนด์วิช

The Study of Thickness Ratio and Bamboo Fiber and Recycled-Polypropylene Core Layer on Acoustic and Mechanical Properties of Sandwich Composites

นพณัฐ จาตุรณกุลชัย และ ธเนศ รัตนวิไล *

Noppanat Jaturonlux and Thanate Ratanawilai *

Received: 23 March 2022, Revised: 19 May 2022, Accepted: 27 May 2022

บทคัดย่อ

วัสดุก่อสร้างโดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นความสำคัญไปที่ความแข็งแรงในการใช้งาน แต่มีลักษณะทางเสียงก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยาก วัสดุโครงสร้างแซนด์วิชจึงเป็นแนวทางในการตอบโต้ได้ทั้งในด้านความแข็งแรงและการป้องกันเสียงรบกวน วัสดุแซนด์วิชมีความยืดหยุ่นสูงที่สามารถเพิ่มสมบัติต่างๆ เข้าไปในแกนกลางของโครงสร้างได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักในการศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุแกนกลาง และอัตราส่วนความหนาของวัสดุชั้นผิวหน้าและชั้นแกนกลางของโครงสร้างแซนด์วิช ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางเสียง (สัมประสิทธิ์การป้องกันเสียง) โดยวัสดุแกนกลางที่เลือกศึกษา ได้แก่ เส้นใยไฟเบอร์และพลาสติกรีไซเคิลชนิด โพลีโพรพิลีน (rPP) ที่อัตราส่วนความหนาของชั้นผิวหน้า 2 ด้านและชั้นแกนกลาง 3 ระดับ ได้แก่ 2-6-2, 3-4-3 และ 4-2-4 มิลลิเมตร จากผลการทดสอบและเปรียบเทียบโครงสร้างแซนด์วิชกับวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียว พบว่าโครงสร้างแซนด์วิชที่ทุกระดับความหนามีค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงและค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดัดและค่าความแข็งแรงอัดมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับวัสดุแกนกลางจากเส้นใยไฟเบอร์ให้ค่าการลดเสียงสูงกว่าพลาสติก rPP อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่พลาสติก rPP ให้สมบัติทางกลโดยรวมสูงกว่าเส้นใยไฟเบอร์อย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน นอกจากนี้ผลการทดสอบการปรับอัตราส่วนความหนาพบว่าเมื่อความหนาของชั้นแกนกลางที่เพิ่มมากขึ้นจาก 4-2-4 เป็น 2-6-2 มิลลิเมตร ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): thanate.r@psu.ac.th Tel: 0 7428 7151

การลดเสียง ค่าสมบัติการดัดและความแข็งพื้นผิว แต่มีการลดลงของค่าสมบัติการอัดอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

คำสำคัญ: โครงสร้างแซนด์วิช, วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้, เส้นใยไฟเบอร์, โพรลีนโพลิเอทิลีนรีไซเคิล, สมบัติทางเสียง

ABSTRACT

The construction materials mostly focus on overall mechanical properties. One of pollutions often found is the noise pollution. For this reason, the sandwich structure is the source of solution for this kind of problem. This structure can add various insulation for different properties into the sandwich composites. This study focuses on the material of the core layer and the thickness ratio between the face sheet and the core layers of the sandwich structure. Therefore, the objective of this research is to study the behaviors of the core material and the thickness ratio between face sheet layer and core layer that influence both an acoustic and mechanical properties. The raw materials for the core layer include bamboo fiber and recycled polypropylene (rPP) with three different thickness ratios for the face sheet and the core layers namely 2-6-2, 3-4-3, and 4-2-4 mm. The results revealed that the sandwich structure, compared to the wood plastic composites (WPCs), had a significant influence on the increase of noise reduction coefficient and hardness values whereas the flexural strength and compressive strength decreased significantly. Additionally, increasing thickness ratio from 4-2-4 to 2-6-2 mm had an influence on the increase of noise reduction coefficient and flexural and hardness values whereas the compressive value decreased significantly. Furthermore, the bamboo fiber as a core layer significantly provided higher noise reduction value than that of rPP. On the other hand, the rPP gave significantly higher overall mechanical properties than that of bamboo fibers as a core layer.

Key words: sandwich structure, wood plastic composites, bamboo fiber, recycled polypropylene, acoustic property

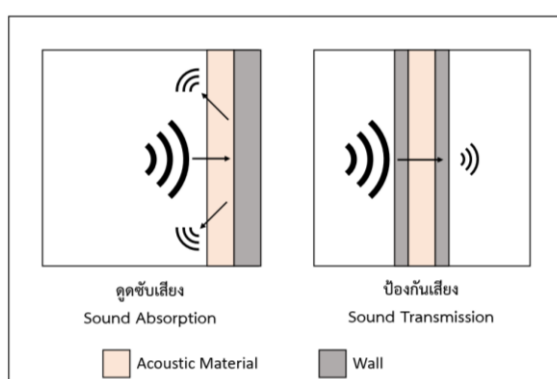
บทนำ

จากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรส่งผลให้มีปริมาณบ้านเรือน สำนักงาน และอาคารต่างๆ เพิ่มมากขึ้น จากข้อมูลปริมาณสิ่งก่อสร้างเมื่อปี พ.ศ. 2560 แสดงให้เห็นถึงจำนวนอาคารที่เป็นประเภท โรงเรือนและมีใช้โรงเรือนมีจำนวนกว่า 34,000 ราย และ 5,100 ราย โดยในประเภทของอาคารโรงเรือนเป็นอาคารเพื่ออยู่อาศัยมากกว่า 63.9% และเป็นอาคารพาณิชย์ 15.5% (National Statistical Office, 2017) เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยในการก่อสร้างอาคารต่างๆ มัก

มุ่งเน้นในการทำให้อาคารมีความแข็งแรง อย่างไรก็ตาม มลภาวะทางเสียงก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยหลักของการใช้อาคารทั้งในที่ทำงานหรือที่อยู่อาศัย โดยทั่วไปแล้ว มลภาวะสามารถแบ่งออกได้ 4 ประเภท ได้แก่ มลภาวะทางดิน มลภาวะทางน้ำ มลภาวะทางอากาศ และมลภาวะทางเสียง (Hussain and Keçili, 2020) โดยที่มลภาวะทางเสียงเป็นผลพวงจากการเกิดและเพิ่มขึ้นของถนนและอาคารบ้านเรือน จากข้อมูลการเก็บค่าเฉลี่ยเสียงในประเทศไทยในปี 2563 พบว่าพื้นที่ทั่วไปและพื้นที่ริมถนนในเขตพื้นที่จังหวัด

กรุงเทพมหานคร มีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 56.8 และ 68.5 เดซิเบล ตามลำดับ ในส่วนพื้นที่ต่างจังหวัด พบว่าพื้นที่ทั่วไป และพื้นที่ริมถนนมีปริมาณเสียงเฉลี่ย 55.9 และ 62.6 เดซิเบล ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าพื้นที่ริมถนนมีมลภาวะทางเสียงสูงกว่าพื้นที่ทั่วไปถึง 12% สำหรับพื้นที่ต่างจังหวัด และ 20% ในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า ปริมาณถนนและอาคารในจังหวัดกรุงเทพมหานครมีปริมาณมากกว่าในเขตต่างจังหวัด จึงส่งผลให้เกิดมลภาวะทางเสียงที่สูงกว่า (Air Quality & Noise Management Division, 2020) ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้หากได้ยินเสียงในระดับที่สูงหรือเป็นเวลายาวนานเกินไป เว้นแต่จะได้รับการป้องกันเพื่อลดมลภาวะทางเสียงที่เข้ามารบกวน จะเห็นได้ว่ามลภาวะทางเสียงเป็นปัจจัยภายนอกที่ควบคุมไม่ได้หรือควบคุมได้ยากและยังส่งผลให้เกิดความรำคาญในการทำงานหรืออยู่อาศัย อีกทั้งยังเป็นส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดโรคนอนไม่หลับ ได้อีกด้วย ในกรณีรุนแรงอาจทำให้ถึงขั้นการสูญเสียการได้ยินได้ (Abdallah, 2017) ดังนั้น ปัญหามลภาวะทางเสียงจึงเป็นปัญหาควรให้ความสำคัญและหาแนวทางป้องกันก่อนที่จะเกิดความสูญเสียตามมา

ปัจจุบันการป้องกันมลภาวะทางเสียงมีหลากหลายวิธีการ หนึ่งในวิธีการที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ การเลือกใช้วัสดุฉนวนกันเสียงหรือวัสดุอะคูสติก โดยที่วัสดุอะคูสติกทำหน้าที่ดูดซับพลังงานเสียงที่ผ่านวัสดุไปทำให้มีพลังงานลดน้อยลง ส่งผลให้เสียงเบาลง โดยที่การใช้งานวัสดุอะคูสติกสำหรับบุบริเวณผนังภายในห้อง มักเรียกว่า วัสดุอะคูสติกแบบนี้ว่า วัสดุดูดซับเสียง เนื่องจากกลไกการทำงานของวัสดุดูดซับเสียงจะทำหน้าที่รับพลังงานเสียงผ่านและดูดซับเสียงไว้ ทำให้พลังงานเสียงที่สะท้อนกลับออกมายังผู้ใช้งานลดน้อยลง ลดอาการของเสียงสะท้อนได้ดี ในอีกรูปแบบของการใช้งาน คือ การนำวัสดุอะคูสติกใส่ไว้ในผนัง โดยมักกลไกการทำงานคือการทำให้เสียงที่ส่งผ่านผนังห้องจะต้องผ่านวัสดุอะคูสติก เป็นการลดพลังงานเสียงที่ผ่านผนังห้องทำให้ผู้รับเสียงที่อยู่ห้องที่ติดกันได้รับพลังงานเสียงที่ลดน้อยลง โดยวัสดุประเภทนี้มักเรียกว่า ฉนวนกันเสียง (Peng, 2017) จะเห็นได้ว่า หากวัสดุอะคูสติกบุติดกับผนังจะช่วยลดการเกิดเสียงก้อง หากอยู่ภายในผนังช่วยลดปริมาณเสียงส่งผ่านระหว่างห้อง แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ประเภทสมบัติทางเสียง

วัสดุอะคูสติกโดยทั่วไปจะมีลักษณะภายในเป็นรูปแบบโครงข่าย (Network) มีช่องว่างภายในจำนวนมากที่มีความซับซ้อน ไม่มีรูปแบบตายตัว ซึ่ง

เรียกชื่อวัสดุตามโครงสร้างแบบนี้ว่า “วัสดุรูพรุน” โดยวัสดุอะคูสติกในปัจจุบันมักสร้างจากวัสดุสังเคราะห์ เช่น เซลูล่าโฟม เส้นใยแก้ว และเส้นใย

หิน เป็นต้น (Chin *et al.*, 2018; Putra *et al.*, 2018) วัสดุเหล่านี้จะถูกนำมาสร้างเป็นฉนวนกันเสียง เนื่องจากให้ค่าในการดูดซับและป้องกันเสียงได้ดี อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของวัสดุสังเคราะห์เหล่านี้คือการส่งผลกระทบต่อร่างกายเมื่อเกิดการสัมผัสกับหรือสูดดมเข้าไป เช่น เส้นใยแก้วซึ่งมีส่วนประกอบหลักของเรซิน (Resin) และเส้นใยขนาดเล็ก โดยเรซินเป็นสารทำให้เกิดการระคายเคืองต่อดวงตาและผิวหนัง หากเกิดสูดดมเข้าไปในร่างกายทำให้เกิดการตกค้างภายในและส่งผลให้หายใจติดขัด นอกจากนี้ยังอาจทำให้เกิดผื่นคันและระคายเคืองต่อดวงตาอีกด้วย (Singh and Bhalla, 2017) อีกทั้งในกระบวนการผลิตเส้นใยสังเคราะห์มีการปล่อยของเสียทางน้ำและอากาศ รวมถึงการขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีการใช้พลังงานสูง (Afolabi *et al.*, 2020) ซึ่งส่งผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

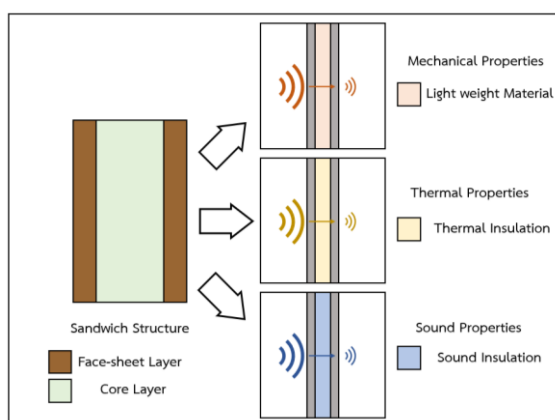
ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาและค้นคว้าเพื่อหาวัสดุที่สามารถทดแทนการใช้วัสดุสังเคราะห์ โดยเส้นใยธรรมชาติเป็นหนึ่งในวัสดุที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยต้องเลือกวัสดุที่มีสมบัติความหนาแน่นต่ำเพื่อให้เหมาะต่อการนำไปเป็นวัสดุอะคูสติก ไม่มีผลกระทบต่อผู้ใช้งานและสิ่งแวดล้อม เช่น การนำเส้นใยปาล์มน้ำมันมาทำอัดขึ้นรูปในลักษณะทรงกระบอกที่มีความหนา 10-50 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาสมบัติการดูดซับเสียงที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง (Sound Absorption Coefficient : SAC) ที่ 0.84-0.9 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเส้นใยสังเคราะห์ (Or *et al.*, 2017) นอกจากนี้ ยังมีการนำส่วนของลำต้นของพืชมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับเสียง เช่น การนำลำต้นไผ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 - 7 มิลลิเมตร จัดเรียงกันในรูปแบบแนวยาวและแนวขวาง ที่ให้ค่า SAC ที่ดีที่สุดที่ 0.8 ซึ่งใกล้เคียงกับเส้นใยสังเคราะห์เช่นกัน (Putra *et al.*, 2015) ดังนั้น วัสดุจากธรรมชาติ

จึงนับเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำมาประยุกต์แทนวัสดุอะคูสติกสังเคราะห์

เพื่อให้การประยุกต์ใช้งานของวัสดุอะคูสติกที่มีหลากหลาย “โครงสร้างแซนด์วิช” จึงถูกเลือกนำมาใช้ โดยโครงสร้างแซนด์วิชจัดเป็นโครงสร้างประเภทหนึ่งของวัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) ที่มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน สามารถปรับเปลี่ยนองค์ประกอบให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้งานได้ โดยส่วนประกอบของโครงสร้างแซนด์วิชประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน มีการจัดเรียงเป็นชั้น ตั้งแต่ 3 ชั้นขึ้นไป โดยมี “ชั้นผิวหนัง” (Face-sheet Layer) เป็นแผ่นประกบทั้งสองด้านทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงและคงทน ส่วน “ชั้นแกนกลาง” (Core Layer) มักทำจากวัสดุอ่อนที่ทำหน้าที่แตกต่างกันตามการประยุกต์ใช้งาน เช่น การเลือกใช้วัสดุฉนวนเพื่อเพิ่มสมบัติการกันความร้อน ความเย็น หรือเสียง แสดงดังภาพที่ 2 โดยทั่วไปชั้นผิวหนังจะมีความหนาน้อยกว่าชั้นแกนกลาง จึงทำให้โครงสร้างแซนด์วิชมีสมบัติทางกลสูงแต่น้ำหนักเบา โดยมีงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้โอลูมิเนียมเป็นชั้นผิวหนังของโครงสร้างแซนด์วิชและใช้โพลีเอทิลีนเป็นแกนกลาง ซึ่งช่วยเพิ่มสมบัติทางกลให้สูงขึ้น (Dalai and Sreekanth, 2021) หรือการเลือกใช้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้เป็นชั้นผิวหนังและมีการเลือกใช้พลาสติกหลากหลายชนิดในชั้นแกนกลาง (Promjan *et al.*, 2021) นอกจากนี้ ยังพบว่าโครงสร้างแซนด์วิชมีบทบาทสำคัญในการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมวัสดุยานยนต์ เครื่องบิน รถไฟ และวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น (Styles *et al.*, 2007; ALRahman *et al.*, 2013; Patel and Modi, 2013) จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของวัสดุแซนด์วิชและยังคงมีอีกหลายปัจจัยที่ต้องศึกษา เช่น ชนิดของวัสดุ โครงสร้างชั้นแกนกลางหรืออัตราส่วนความหนา เป็นต้น ดังนั้น การเปรียบเทียบวัสดุแกนกลางจากวัสดุธรรมชาติและวัสดุสังเคราะห์ ได้แก่ เส้นใยไผ่ ทำหน้าที่เป็น

วัสดุอะลูมิเนียม และพลาสติกโพรลีนโฟลีนรีไซเคิลของวัสดุแซนด์วิช ที่มีชั้นผิวหน้าทำจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและผงไม้ยางพารา และอัตราส่วนความหนาของชั้นผิวหน้าและชั้นแกนกลางที่ส่งผลต่อสมบัติการป้องกันเสียง และสมบัติทางกลของวัสดุแซนด์วิช จึงเป็นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ โดยการเลือกศึกษาพลาสติกโพรลีนโฟลีนรีไซเคิล

(recycled polypropylene : rPP) เนื่องจากเป็นพลาสติกที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมการนำพลาสติกรีไซเคิลกลับมาใช้ใหม่ สำหรับผงไม้ยางพาราที่ทำหน้าที่เป็นเส้นใยเสริมแรง จัดเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา จึงถูกนำมาใช้ให้เกิดมูลค่า



ภาพที่ 2 โครงสร้างวัสดุแซนด์วิช

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัย มีองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด ได้แก่ วัสดุ ขั้นตอนการขึ้นรูป และการทดสอบชิ้นงาน

1. วัสดุ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของวัสดุแซนด์วิช ที่มีชั้นแผ่นประกบ คือวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ที่มีองค์ประกอบของพลาสติก rPP จากบริษัท วิทยาอินเตอร์เทรด จำกัด (จังหวัดสมุทรปราการ) และเส้นใยเสริมแรงผงไม้ยางพารา (RWF) เป็นผงขี้เลื่อยของอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ นอกจากนี้ มีการเพิ่มสารเติมแต่ง ได้แก่ สารคู่ควบ จากบริษัท Sigma-aldrich จำกัด สารต้านรังสียูวี จากบริษัท ทีเอช คัลเลอรี่ จำกัด (สมุทรปราการ ประเทศไทย) และสารหล่อลื่น จากบริษัท Nippon Seiro จำกัด โดยสารเหล่านี้เป็นการเสริมสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ อีก

ทั้งยังช่วยในการขึ้นรูปได้ดียิ่งขึ้น สำหรับวัสดุชั้นแกนกลางของวัสดุแซนด์วิช มี 2 ชนิด ได้แก่ พลาสติก rPP และเส้นใยไผ่ (BBF) ได้รับจากโรงงานเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ในพื้นที่จังหวัดสงขลา เพื่อให้การขึ้นรูปเมื่อใช้เส้นใยไผ่เป็นชั้นแกนกลาง จำเป็นต้องใช้กาวยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์เป็นตัวประสานเพื่อให้เส้นใยสามารถคงรูปอยู่ได้ (Anisuzzaman *et al.*, 2014) นอกจากนี้ยังมีสารประสานที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างชั้นผิวหน้าและชั้นแกนกลางจากเส้นใยไผ่ คือ กาวโพลียูรีเทนซิลิแลนท์ จากบริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ จำกัด (ประเทศไทย)

2. กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

ในขั้นแรกทำการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและผงไม้เพื่อทำเป็นแผ่นประกบของวัสดุแซนด์วิช โดยนำผงไม้ยางพารามาผ่านกระบวนการบดย่อยขนาดและทำการร่อนเพื่อให้ได้ขนาดไม่เกิน 80 เมช และทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา

6 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำส่วนประกอบวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ได้แก่ เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน ร้อยละ 50.3 ผงไม้ยางพารา ร้อยละ 44.5 สารกึ่งควบ ร้อยละ 3.9 สารต้านทานรังสียูวี ร้อยละ 0.2 และสารหล่อลื่น ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสูตรที่เหมาะสมในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบจากพลาสติก rPP และ ผงไม้ยางพารา (Homkhiew *et al.*, 2014) มาทำการผสมเข้าด้วยกันด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin Screw Extruder) รุ่น EMT-26 อุณหภูมิในการอัดรีดอยู่ในช่วง 170-190 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วเกลียว 50 รอบต่อนาที ทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ที่มีเนื้อเดียวกัน นำมาตัดให้มีขนาดความยาวไม่เกิน 4 - 5 มิลลิเมตร เพื่อให้มีการกระจายตัวที่ดีในการนำไปอัดขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดที่แรงดัน 70.3×10^4 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จะได้ชิ้นงานแผ่นเรียบที่มีความหนา 2, 3 และ 4 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นผิวหน้าของวัสดุแซนด์วิช และขนาด 10 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานอ้างอิง

ในส่วนของชิ้นแกนกลางจะทำการศึกษาวัสดุ 2 ชนิด ได้แก่ พลาสติก rPP และเส้นใย โดยนำเส้นใยเหล่านั้นมาทำการบดและร่อนแยกขนาดให้อยู่ในช่วง 40 - 60 เมช ทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นทำการผสมเส้นใยเข้ากับกาวยูเรียฟอรัมาลดีไฮด์ ทำหน้าที่เป็นตัวประสานในอัตราส่วนร้อยละ 90 และร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ด้วยเครื่องปั่นผสมเพื่อให้สารประสานกระจายตัวไปยังเส้นใยได้อย่างทั่วถึง จากนั้นทำการอัดรีด ที่แรงดัน 70.3×10^4 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานแผ่นผิวเรียบที่ขนาดความหนา 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นชิ้นแกนกลางของวัสดุแซนด์วิช ในส่วนของพลาสติก rPP ที่นำมาใช้ทำแกนกลางนั้น ได้รับจากโรงงานผลิต

เม็ดพลาสติก มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กทรงกระบอกยาวประมาณ 2 - 4 มิลลิเมตร นำมาทำการอัดรีดขึ้นรูปให้มีขนาดและความหนาเช่นเดียวกันกับแกนกลางจากเส้นใยไฟ

เมื่อได้แผ่นประกบและแผ่นแกนกลางแล้ว จึงทำการขึ้นรูปชิ้นงานแซนด์วิชโดยมีการเรียงชั้นของวัสดุแซนด์วิชตามลำดับ คือ แผ่นประกบ-แกนกลาง-แผ่นประกบ โดยมีอัตราส่วนความหนาแต่ละชั้นดังนี้ 2-6-2, 3-4-3 และ 4-2-4 มิลลิเมตร ตามลำดับ และมีความหนารวมทั้งสามชั้น 10 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นแกนกลางที่ทำจากเส้นใยไฟจะใช้สารประสานกาวโพลียูรีเทนซิลแลนท์ ในการเชื่อมต่อระหว่างชั้นผิวหน้าและชิ้นแกนกลาง ทำการอัดเย็นที่แรงดัน 70.3×10^4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อให้สารประสานเกิดการประสานระหว่างชั้นได้อย่างทั่วถึง ในส่วนของการขึ้นรูปชิ้นงานแซนด์วิชที่มีแกนกลางทำจากพลาสติก rPP สามารถประสานกับแผ่นประกบได้ผ่านกระบวนการอัดรีดโดยไม่ต้องใช้ตัวประสานช่วย

3. วิธีการทดสอบ

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน 2 ประเภท ได้แก่ สมบัติการป้องกันเสียงและสมบัติทางกล โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

3.1 การทดสอบสมบัติการป้องกันเสียง

ทำการทดสอบสมบัติการป้องกันเสียงตามมาตรฐาน ASTM E90 ด้วยห้องทดสอบเสียงสะท้อน (Reverberation room) ที่มีฉนวนกันเสียงสี่เหลี่ยมตามข้อมูลอ้างอิง (Papanikolaou and Trochides, 1985) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียง โดยการใช้ห้องกำเนิดเสียงที่ทำหน้าเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานเสียง ส่งพลังงานผ่านชิ้นงานทดสอบซึ่งจัดวางอยู่บริเวณช่องว่างของห้องกำเนิดเสียง ทำการวัดและเก็บค่าพลังงานเสียงที่ลดลงเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดเสียงที่ปล่อยพลังงานเสียงด้วยคลื่น

ความถี่ 1/1 ออกเทฟ (1/1 Octave band) ได้แก่ 500, 1,000, 2,000, 4,000 และ 8,000 เฮิรตซ์ โดยมีขนาดชิ้นงานทดสอบที่ $150 \times 240 \times 10$ มิลลิเมตร³ แสดงดังภาพที่ 3(ก) และทำการทดสอบซ้ำ 3 ตัวอย่าง

3.2 การทดสอบสมบัติทางกล

ทำการทดสอบสมบัติความแข็งแรงดัด ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D790-92 ซึ่งเป็นการทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด (Three point bending) ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Instron Universal Tester Machine, Model 5582) ชิ้นงานทดสอบมีขนาด $13 \times 100 \times 10$ มิลลิเมตร³ (กว้าง×ยาว×หนา) แสดงดังภาพที่ 3(ข) การทดสอบสมบัติการอัด ตามมาตรฐาน

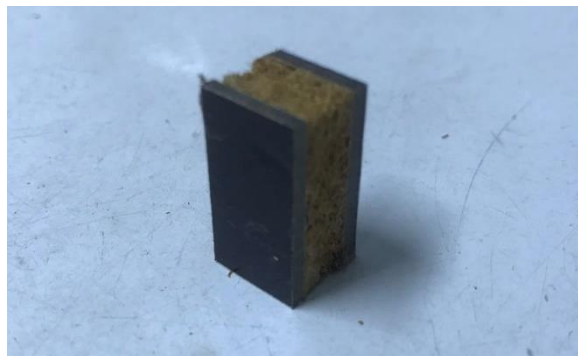
การทดสอบ ASTM D6108-97 ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Tester Machine) มีขนาดชิ้นงาน $10 \times 20 \times 10$ มิลลิเมตร³ (กว้าง×ยาว×หนา) แสดงดังภาพที่ 3(ค) ความเร็วในกดอัด 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที สำหรับการทดสอบสมบัติความแข็งพื้นผิว ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D2240 ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งผิวแบบพกพา (Durometer แบบ Shore D) มีขนาดชิ้นงาน $16 \times 16 \times 10$ มิลลิเมตร³ (กว้าง×ยาว×หนา) แสดงดังภาพที่ 3(ง) โดยทั้ง 3 การทดสอบ จะทำที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส และทดสอบซ้ำ 5 ตัวอย่าง ในแต่ละประเภทของการทดสอบ



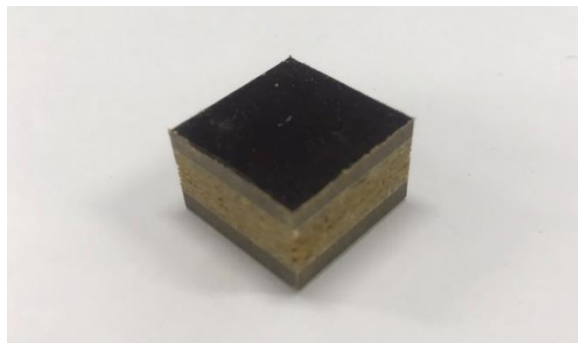
(ก) ชิ้นงานทดสอบสมบัติการป้องกันเสียง



(ข) ชิ้นงานทดสอบสมบัติการดัด



(ค) ชิ้นงานทดสอบสมบัติการอัด



(ง) ชิ้นงานทดสอบสมบัติความแข็งแรงพื้นผิว

ภาพที่ 3 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบวัสดุแซนดวิชแกนกลางจากเส้นใยไผ่ อัตราส่วนความหนา 2/6/2

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการทดสอบสมบัติการป้องกันเสียง

จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงของวัสดุแซนดวิชที่มีชั้นแกนกลางทำจากเส้นใยไผ่ที่ความหนา 2-6-2 มิลลิเมตร ให้ค่าสูงสุด 35.53 เดซิเบล ที่ช่วงคลื่นความถี่เสียง 2,000 เฮิรตซ์ ในขณะที่ความหนา 4-2-4 มิลลิเมตร ให้ค่าต่ำสุด 24.73 เดซิเบล ที่ช่วงคลื่นความถี่เสียง 500 เฮิรตซ์ สำหรับกรณีที่ชั้นแกนกลางทำจาก rPP ที่ความหนา 3-4-3 มิลลิเมตร ให้ค่าสูงสุด 30.56 เดซิเบล ที่ช่วงคลื่นความถี่เสียง 2,000 เฮิรตซ์ ในขณะที่ความหนา 2-6-2 มิลลิเมตร ให้ค่าต่ำสุด 20.26 เดซิเบล ที่ช่วงคลื่นความถี่เสียง 4,000 เฮิรตซ์ นอกจากนี้ยังสังเกตจากภาพที่ 4 ได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงของชั้นแกนกลางจากเส้นใยไผ่จะให้ค่าที่สูงกว่าแกนกลางจากพลาสติก rPP ที่คลื่นความถี่เสียงเดียวกัน เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยไผ่มีจำนวนและขนาดช่องว่างระหว่างเส้นมากกว่า rPP ส่งผลให้เส้นใยไผ่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงสูงกว่า rPP นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้เพียงชั้นเดียวซึ่งใช้เป็นตัวควบคุม จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงน้อยกว่าวัสดุแซนดวิชที่มีแกนกลางจากเส้นใยไผ่และ rPP ที่ทุกระดับความหนา ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของชั้นแกนกลาง ส่งผลให้พลังงานเสียงส่งผ่านวัสดุแต่ละ

ชั้นนั้นจะช่วยลดพลังงานเสียงโดยการดูดซับไว้ในชั้นวัสดุเหล่านั้น (Peng, 2017)

เมื่อพิจารณาปัจจัยอัตราส่วนความหนาของวัสดุแซนดวิช พบว่าการเพิ่มความหนาของชั้นแกนกลางจากเส้นใยไผ่มีแนวโน้มที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากวัสดุแกนกลางจากเส้นใยไผ่มีลักษณะเป็นวัสดุรูพรุน ดังแสดงในภาพที่ 5 ที่ความหนาของชั้นเส้นใยที่มากขึ้นส่งผลให้มีพื้นที่รูพรุนเพิ่มขึ้นและสามารถการดูดซับเสียงเพิ่มมากขึ้นด้วย (Putra *et al.*, 2018) แต่ในส่วนวัสดุแซนดวิชที่มีชั้นแกนกลางเป็นพลาสติกชนิด rPP นั้น การเพิ่มความหนาของชั้นแกนกลางจาก 4-2-4 เป็น 2-6-2 มิลลิเมตร มีแนวโน้มที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงลดน้อยลง ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่สวนทางกันกับชั้นแกนกลางเส้นใยไผ่ เนื่องจากชั้นแกนกลางซึ่งเป็นพลาสติกช่วยส่งผ่านพลังงานเสียงได้ดี ส่งผลให้วัสดุแซนดวิชที่ความหนา 2-6-2 มิลลิเมตร ซึ่งมีแกนกลางเป็นพลาสติกหนา 6 มิลลิเมตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงมีค่าที่น้อยกว่าวัสดุแซนดวิชความหนา 4-2-4 มิลลิเมตร

เมื่อนำผลการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (one-way ANOVA) โดยมีปัจจัยในการวิเคราะห์ ได้แก่ วัสดุแซนดวิชที่มีชั้นแกนกลางจากเส้นใยไผ่และพลาสติก rPP ที่ระดับอัตราส่วนความหนา 2-6-2, 3-4-3 และ 4-

2-4 มิลลิเมตร โดยมีชิ้นงานควบคุม (Control sample) คือ WPCs โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ความพอเพียงของรูปแบบจำลอง ดังภาพที่ 6 (ก) ซึ่งแสดง Normal probability ของค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงที่ 500 เฮิร์ตซ์ ไม่พบค่าผิดปกติภายในกราฟและข้อมูลมีลักษณะใกล้เคียงกับเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ภาพที่ 6 (ข) แสดงความแปรปรวนคงที่ของค่าความผิดพลาดพบว่า ค่าความแปรปรวนมีความสม่ำเสมอ ภาพที่ 6 (ค) แสดงความเป็นอิสระของข้อมูล ซึ่งมีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์โดยไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน แสดงให้เห็นว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน เมื่อทำการวิเคราะห์ความพอเพียงของรูปแบบจำลองของค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงที่ช่วงคลื่น 500, 1,000, 2,000, 4000 และ 8,000 เฮิร์ตซ์ พบว่าทุกชุดข้อมูลมีการแจกแจงแบบ

ปกติ มีค่าความแปรปรวนสม่ำเสมอ และข้อมูลเป็นอิสระต่อกันที่ทุกคลื่นความถี่ที่ทำการทดสอบ

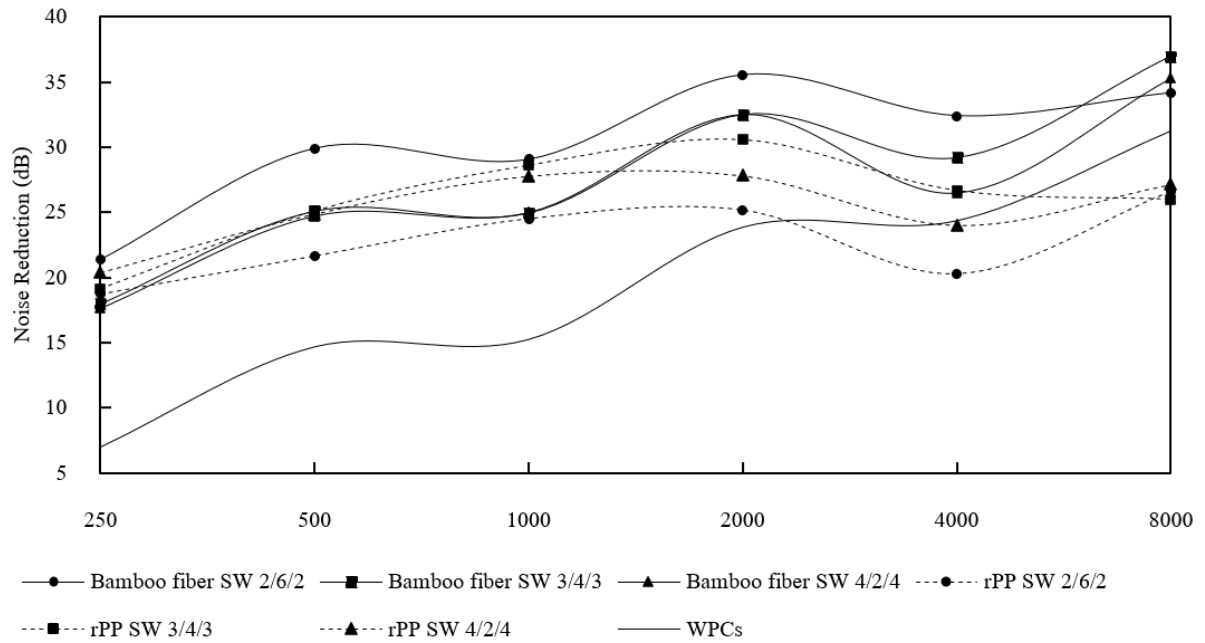
จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงที่ช่วงคลื่นที่ 500, 1,000, 2,000 และ 4,000 เฮิร์ตซ์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ขณะที่ช่วงคลื่นความถี่เสียง 8,000 เฮิร์ตซ์ มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ตามลำดับ นอกจากนี้การเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละปัจจัยด้วยวิธี the Fisher LSD Method แสดงให้เห็นถึงกลุ่มความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (Group : ^{A,B,C,D,E}) แสดงดังตารางที่ 1 เช่น ที่ช่วงคลื่นความถี่ 500 เฮิร์ตซ์ ชิ้นงานวัสดุแซนวิชแกนกลางเส้นใยไฟเบอร์ ที่ความหนา 2-6-2 และ 3-4-3 มิลลิเมตร มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ความหนา 3-4-3 และ 4-2-4 มิลลิเมตร มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว ของชิ้นงานทดสอบที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียง (เดซิเบล)

Sound frequency (Hz)	Sandwich with core wood composites (Bamboo fiber)			Sandwich with core pure plastics (rPP)			Control (WPCs)
	2/6/2	3/4/3	4/2/4	2/6/2	3/4/3	4/2/4	WPCs
500	29.90 ^A	25.10 ^B	24.73 ^B	21.63 ^B	25.10 ^B	24.90 ^B	14.66 ^C
1,000	29.06 ^A	24.96 ^{BC}	25.00 ^{BC}	24.50 ^{AB}	28.60 ^A	27.80 ^C	15.23 ^D
2,000	35.53 ^A	32.50 ^{AB}	32.53 ^{AB}	25.16 ^{CD}	30.56 ^{BC}	27.83 ^{CD}	23.86 ^E
4,000	32.40 ^A	29.20 ^C	26.50 ^{BC}	20.26 ^D	26.66 ^{BC}	24.03 ^C	24.36 ^C
8,000*	34.16	36.96	35.30	26.60	26.00	27.16	31.26

* Value is insignificant

^{A, B, C, D, E} Grouping information using the Fisher LSD method and 95% confidence



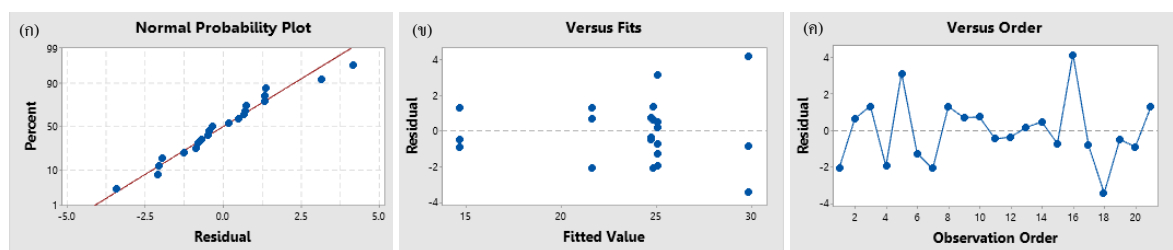
ภาพที่ 4 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงของชิ้นงานทดสอบ



(ก) ภาพถ่ายที่กล้องขยาย 5 เท่า

(ข) ภาพถ่ายที่กล้องขยาย 10 เท่า

ภาพที่ 5 ลักษณะภายในแกนกลางจากเส้นใยไผ่



(ก) กราฟ Normal probability

(ข) กราฟ Versus Fits

(ค) กราฟ Versus Order

ภาพที่ 6 การวิเคราะห์ความพอเพียงของรูปแบบจำลองของค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียง ที่คลื่นความถี่ 500 เฮิรตซ์

2. ผลการทดสอบสมบัติการคัด

จากผลการทดสอบแรงคัด แสดงดังภาพที่ 7 และ 8 พบว่า วัสดุแซนดวิชที่มีแกนกลางเส้นใยไฟเบอร์ มีค่าความแข็งแรงคัดเฉลี่ยในช่วง 12.4-15.1 เมกะปาสคาล ขณะที่ส่วนแกนกลาง rPP ให้ค่าเฉลี่ยในช่วง 34.9-42.5 เมกะปาสคาล จะเห็นได้ว่า การเพิ่มขึ้นแกนกลางเส้นใยไฟเบอร์ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงคัดของวัสดุแซนดวิชลดลง เมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียว ที่ให้ค่าเฉลี่ย 29.1 เมกะปาสคาล เนื่องจากรูปแบบภายในชั้นแกนกลางเป็นมีลักษณะที่เส้นใยมีการยึดเกาะกันเป็นโครงข่ายซึ่งมีช่องว่างระหว่างเส้นใยเหล่านั้น ทำให้เส้นใยเกิดการแตกหักได้ง่าย ดังแสดงในภาพที่ 5 ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของชั้นแกนกลางจากพลาสติก rPP ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงคัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน กล่าวได้ว่าวัสดุในชั้นแกนกลางของโครงสร้างแซนดวิชมีส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติการคัดที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ในส่วนของค่ามอดูลัสแรงคัด ยังคงมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับค่าความแข็งแรงคัด แสดงดังภาพที่ 8 เมื่อพิจารณาการเพิ่มความหนาของชั้นแกนกลางของวัสดุแซนดวิชจากแกนกลางพลาสติก rPP ดังแสดงในภาพที่ 7 ที่อัตราส่วนความหนา 4-2-4 มิลลิเมตร ให้ค่าเฉลี่ย 34.9 เมกะปาสคาล เมื่อความหนาของชั้นแกนกลางเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนความหนาของวัสดุแซนดวิชเป็น 2-6-2 มิลลิเมตร ส่งผลให้มีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นถึง 42.5 เมกะปาสคาล ซึ่งเป็นแนวโน้มเช่นเดียวกันกับแกนกลางจากเส้นใยไฟเบอร์ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของชั้นแกนกลางส่งผลต่อค่าความ

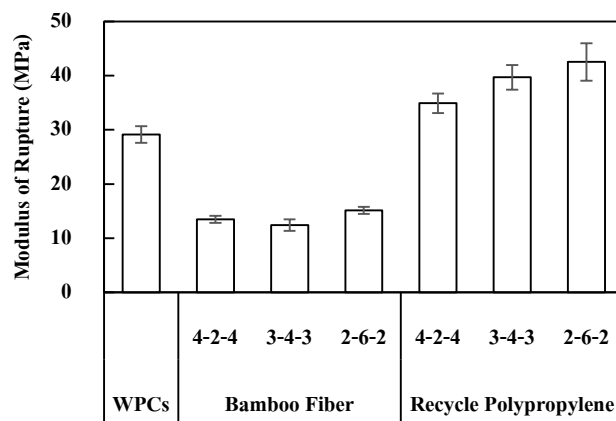
แข็งแรงคัด การโก่งตัว และความเค้นเฉือน อีกทั้งความเค้นที่เกิดขึ้นสามารถกระจายภายในชั้นแกนกลางได้ดีมากขึ้น เป็นผลให้สมบัติการคัดเพิ่มมากขึ้นเมื่อชั้นแกนกลางมีความหนาที่เพิ่มมากขึ้น (Promjan *et al.*, 2021)

นอกจากนี้ ได้มีการวิเคราะห์ความพอเพียงของรูปแบบจำลองเช่นเดียวกับการทดสอบสมบัติป้องกันเสียง พบว่าทุกชุดข้อมูลของค่าความแข็งแรงคัดและมอดูลัสแรงคัด มีการแจกแจงแบบปกติ มีค่าความแปรปรวนสม่ำเสมอและข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า วัสดุแซนดวิชมีชั้นแกนกลางจากพลาสติก rPP ที่ความหนา 2-6-2 มิลลิเมตร ให้ค่าความแข็งแรงคัดสูงสุด (42.52 เมกะปาสคาล) มากกว่าวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้กว่า 45.87% สำหรับค่ามอดูลัสแรงคัดที่ความหนา 2-6-2 มิลลิเมตร ก็ให้ค่าสูงสุด (2,409.13 เมกะปาสคาล) เช่นเดียวกันและสูงกว่าชิ้นงานอ้างอิงถึง 5.52% ซึ่งค่าแรงคัดระหว่างวัสดุแซนดวิชมีชั้นแกนกลางจากพลาสติก rPP และวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ขณะที่วัสดุแซนดวิชที่มีชั้นแกนกลางจากเส้นใยไฟเบอร์ ให้ค่าความแข็งแรงคัดและมอดูลัสแรงคัดน้อยที่สุดในกลุ่มชิ้นงานทดสอบ ที่ทุกระดับความหนา โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นแกนกลางของเส้นใยไฟเบอร์ให้ค่าความแข็งแรงคัดและมอดูลัสแรงคัดที่มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

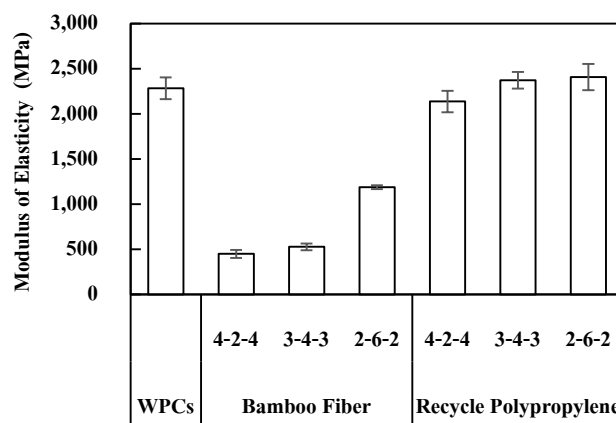
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว ของชิ้นงานทดสอบที่มีผลต่อสมบัติทางกล

Properties	Sandwich with core wood composites			Sandwich with core pure plastics			Control sample (WPCs)
	2-6-2	3-4-3	4-2-4	2-6-2	3-4-3	4-2-4	
Modulus of Rupture	15.15 ^D	12.41 ^D	13.51 ^D	42.52 ^A	39.70 ^A	34.911 ^B	29.148 ^C
Modulus of Elasticity	1188.81 ^D	527.64 ^D	449.67 ^D	2409.13 ^A	2371.22 ^A	2137.22 ^B	2283.03 ^{AB}
Compressive Strength	12.59 ^E	21.57 ^D	30.50 ^C	55.20 ^A	57.22 ^A	38.47 ^B	32.38 ^C
Compressive Modulus	-	734.51 ^E	896.83 ^{DE}	1340.95 ^B	1712.91 ^A	1210.35 ^{BC}	1027.26 ^{CD}
Hardness (Shore D)	74.68 ^{BC}	74.52 ^{BC}	74.67 ^{BC}	76.5 ^{AB}	77.4 ^A	75 ^{BC}	73.18 ^C

A, B, C, D, E Grouping information using the Fisher LSD method and 95% confidence



ภาพที่ 7 ค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานทดสอบ



ภาพที่ 8 ค่ามอดูลัสแรงดัดของชิ้นงานทดสอบ

3. ผลการทดสอบสมบัติการอัด

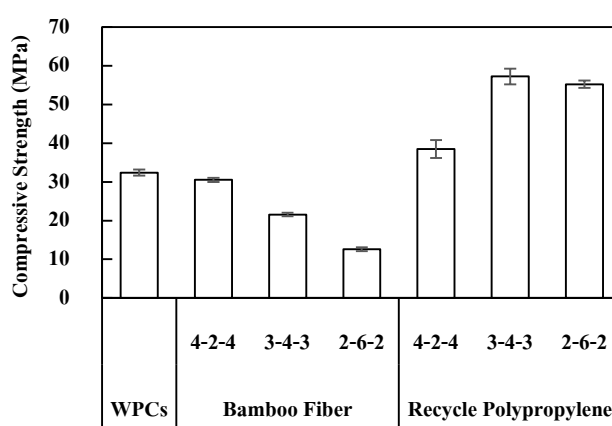
ผลการทดสอบแรงอัด ดังแสดงในภาพที่ 9 และ 10 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงอัดของวัสดุแซนดวิช

จากแกนกลางเส้นใยไฟเบอร์ให้ค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 12.5 - 30.5 เมกะปาสคาล ซึ่งน้อยกว่าค่าจากแกนกลางจากพลาสติก rPP ที่ให้ค่าเฉลี่ยในช่วง 38.4 - 57.2 เมกะปาสคาล

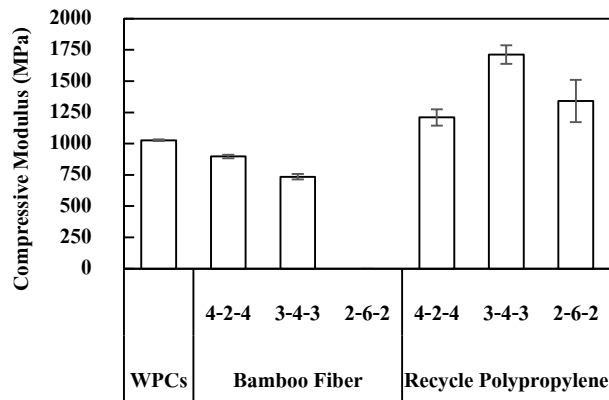
เนื่องจากเส้นใยไผ่ มีค่าสมบัติทางกลด้อยกว่า rPP ส่งผลให้วัสดุแซนดวิชที่มีเส้นใยไผ่เป็นแกนกลางให้ค่าต่ำกว่า เมื่อเพิ่มความหนาชั้นแกนกลางของพลาสติก rPP พบว่าค่าความแข็งแรงอัดมีแนวโน้มสูงมากขึ้น เนื่องจากความหนาชั้นแกนที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเค้นอัดสามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น ซึ่งมีพฤติกรรมไปในแนวทางเดียวกันกับความสามารถในการรับแรงคดวัสดุแซนดวิช อย่างไรก็ตามความหนาของชั้นแกนกลางที่มากเกินไปอาจส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของชั้นผิวหน้าให้ลดน้อยลง ส่งผลให้สมบัติการอัดโดยรวมเริ่มลดลง สังเกตได้จากความหนาแกนกลางที่ 3-4-3 มิลลิเมตร (57.2 เมกะปาสกาล) ลดลงเมื่อมีความหนา 2-6-2 มิลลิเมตร (55.206 เมกะปาสกาล) เมื่อพิจารณาแกนกลางจากเส้นใยไผ่จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงอัดลดน้อยลงเมื่อความหนาของชั้นแกนกลางเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแกนกลางของเส้นใยไผ่มีการยึดติดกันของเส้นใยในรูปแบบ

ของวัสดุที่มีรูพรุน จึงเกิดการแตกหักได้ง่าย ส่งผลให้ความสามารถในการรับความเค้นอัดรับแรงได้ลดลง ดังนั้นการเพิ่มความหนาของชั้นแกนกลางจากเส้นใยไผ่ทำให้ค่าความแข็งแรงอัดลดลง นอกจากนี้ผลการทดสอบค่ามอดูลัสแรงอัดก็ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความแข็งแรงอัด (Lee *et al.*, 2018)

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าวัสดุแซนดวิชที่มีชั้นแกนกลางจากพลาสติก rPP ที่ความหนา 3-4-3 มิลลิเมตร ให้ค่าความแข็งแรงอัด (57.22 เมกะปาสกาล) และค่ามอดูลัสแรงอัด (1,712.91 เมกะปาสกาล) ซึ่งมากกว่าวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้กว่า 76.71% และ 66.74% ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากชิ้นงานทดสอบอื่นๆ ขณะที่วัสดุแซนดวิชมีชั้นแกนกลางจากเส้นใยไผ่ ให้ค่าความแข็งแรงอัดและมอดูลัสแรงอัดน้อยที่สุดในกลุ่มชิ้นงานทดสอบ ซึ่งให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับสมบัติการคด



ภาพที่ 9 ค่าความแข็งแรงอัดของชิ้นงานทดสอบ

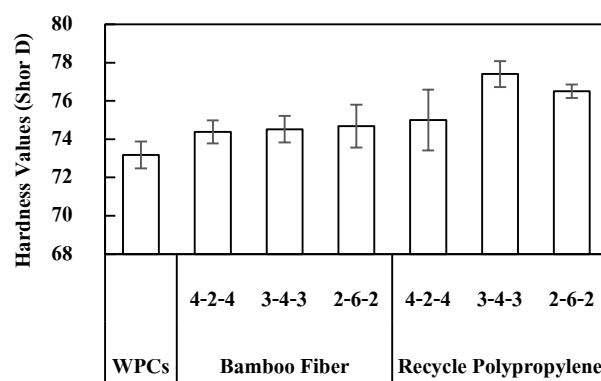


ภาพที่ 10 ค่ามอดุลัสแรงอัดของชิ้นงานทดสอบ

4. ผลการทดสอบสมบัติความแข็งผิวพื้นผิว

ผลการทดสอบสมบัติความแข็งพื้นผิว ดังแสดงในภาพที่ 11 พบว่าค่าความแข็งพื้นผิวของวัสดุแกนคิ้วที่มีแกนกลางจากเส้นใยไผ่ ให้ค่าความแข็งพื้นผิวเฉลี่ย 74.3 - 74.6 ขณะที่แกนกลางจากพลาสติก rPP ให้ค่าเฉลี่ย 75 - 77.4 ของทุกระดับความหนา จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของวัสดุแกนคิ้วและวัสดุเชิงประกอบพลาสติกแบบเนื้อเดียวกัน ให้ค่าใกล้เคียงกันอันเนื่องจากวัสดุชั้นผิวหน้าเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน จึงให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาวัสดุแกนคิ้วสังเกตได้ว่าชั้นแกนกลางจากเส้นใยไผ่ที่ทุกระดับความหนาและแกนกลางจาก rPP ที่ความหนา 4-2-4 มิลลิเมตร ให้ค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม แกนกลางจาก rPP ที่ความหนา 3-4-3 มิลลิเมตร และ

2-6-2 มิลลิเมตร มีแนวโน้มสูงขึ้นอาจเกิดผลให้ความแข็งพื้นผิวส่งแรงผ่านมายังชั้นแกนกลางจึงช่วยให้ชั้นผิวหน้ามีแรงต้านที่เพิ่มมากขึ้น (Dalai and Sreekanth, 2021) เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าชิ้นงานแกนคิ้วที่มีชั้นแกนกลางจากเส้นใยไผ่ที่ทุกระดับความหนามีค่าความแข็งพื้นผิวที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีแกนกลางจากพลาสติก rPP ที่ความหนา 2-6-2 และ 3-4-3 มิลลิเมตร พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบวัสดุแกนคิ้วที่มีแกนกลางจากพลาสติก rPP กับวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ พบว่าวัสดุแกนคิ้วมีค่าความแข็งผิว (77.4) เพิ่มขึ้น 5.7%



ภาพที่ 11 ผลการทดสอบค่าความแข็งพื้นผิว

สรุป

จากการศึกษาปัจจัยชนิดของชั้นแกนกลางจากเส้นใยไฟเบอร์และพลาสติก rPP และอัตราส่วนความหนาของชั้นแกนกลางและชั้นผิวหน้าที่ 2-6-2, 3-4-3 และ 4-2-4 มิลลิเมตร ถึงผลกระทบที่มีผลต่อสมบัติการป้องกันเสียง สมบัติการตัด สมบัติการอัดและความแข็งพื้นผิว พบว่าการเพิ่มขึ้นของชั้นแกนกลางส่งผลต่อสมบัติทางกลอย่างมีนัยสำคัญ และการเพิ่มความหนาของชั้นแกนกลางที่มากเกินไปอาจส่งผลให้สมบัติทางกลเริ่มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชั้นแกนกลางระหว่างเส้นใยไฟเบอร์และพลาสติก rPP ของวัสดุแซนด์วิช พบว่าเส้นใยไฟเบอร์ให้สมบัติป้องกันเสียงสูงกว่าพลาสติก rPP ขณะที่พลาสติก rPP ให้สมบัติทางกลโดยรวมสูงกว่าเส้นใยไฟเบอร์ โดยที่ชั้นงานแซนด์วิชที่มีแกนกลางเป็นเส้นใยไฟเบอร์ ความหนา 2-6-2 มิลลิเมตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียงดีที่สุดในช่วง 24.73 - 35.53 เดซิเบล ที่ช่วงคลื่นความถี่เสียง 500 - 8,000 เฮิรตซ์ แกนกลางจากพลาสติก rPP ความหนา 4-2-4 มิลลิเมตร ให้ค่าความแข็งแรงดัดและมอดูลัสแรงดัดได้สูงสุดที่ 42.52 และ 2,409.13 เมกะปาสกาล ตามลำดับ และที่ความหนา 3-4-3 มิลลิเมตร ให้ค่าความแข็งแรงอัด มอดูลัสแรงอัด และความแข็งพื้นผิวได้สูงสุด ที่ 57.22 และ 1,712.91 เมกะปาสกาล และ 77.4 ตามลำดับ นอกจากนี้ผลงานวิจัยนี้ได้แสดงถึงแนวโน้มพฤติกรรมของโครงสร้างแซนด์วิชสามารถช่วยเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุ เช่นการประยุกต์ใช้ฉนวนชนิดอื่นๆ ในชั้นแกนกลางหรือการปรับเปลี่ยนชั้นผิวหน้าที่แข็งแรงยิ่งขึ้น อีกทั้งการปรับอัตราส่วนความหนาที่มีผลต่อพฤติกรรมของสมบัติต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมต่อสภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดิน ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ รหัสโครงการ

ENG6201136s และ ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อีกทั้งงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับคำแนะนำจากกลุ่มวิจัยเทคโนโลยีไม้อย่างพาราและการจัดการสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เอกสารอ้างอิง

- Abdallah, T. 2017. Environmental Impacts, pp. 45-59. In Abdallah T., ed. **Sustainable Mass Transit**. Elsevier, United State.
- Afolabi, L.O., Ariff, Z.M., Hashim, S.F.S., Alomayri, T., Mahzan, S., Kamarudin, K.A. and Muhammad, I.D. 2020. Syntactic Foams Formulations, Production Techniques, and Industry Applications: A Review. **Journal of Materials Research and Technology** 9(5): 10698-10718.
- Air Quality & Noise Management Division. 2020. **Situation and Management of Air Pollution and Noise Problems in 2020**. Department Pollution Control. Available Source: Thailand <https://www.pcd.go.th/publication/14100>, April 3, 2022. (in Thai).
- ALRahman, L.A., Raja, R.I. and Rahman, R.A. 2013. Experimental Study on Natural Fibers for Green Acoustic Absorption Materials. **American Journal of Applied Sciences** 10(10): 1307-1314.
- Anisuzzaman, S.M., Bono, A., Krishnaiah, D., Ismail, N.M. and Mansuit, H. 2014. The Performance of Melamine Urea Formaldehyde (MUF) Based Particleboard with Wheat Flour as Filler. **Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)** 68(1): 61-69.

- Chin, D.D.V.S., Yahya, M.N.B., Che Din, N.B. and Ong, P. 2018. Acoustic properties of biodegradable composite micro-perforated panel (BC-MPP) made from kenaf fibre and polylactic acid (PLA). **Applied Acoustics** 138: 179-187.
- Dalai, N. and Sreekanth, P.S.R. 2021. UHMWPE / Nanodiamond Nanocomposites for Orthopaedic Applications: A Novel Sandwich Configuration Based Approach. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials** 116: 104327.
- Hussain, C.H. and Keçili, R. 2020. Environmental pollution and environmental analysis, pp. 1-36. *In* Hussain, C. and Keçili, R., eds. **Modern Environmental Analysis Techniques for Pollutants**. Elsevier, United State.
- National Statistical Office. 2017. **Data Processing of Construction Areas, 2017**. National Statistical Office (Thailand). Available Source: <http://www.nso.go.th/sites/2014/Pages/News/2561/N24-04-61-1.aspx>, February 11, 2022. (in Thai)
- Homkhiew, C., Ratanawilai, T. and Thongruang, W. 2014. The Optimal Formulation of Recycled Polypropylene/Rubberwood Flour Composites from Experiments with Mixture Design. **Composites Part B: Engineering** 56: 350-57.
- Lee, J.H., Kang, S.H., Ha, Y.J. and Hong, S.G. 2018. Structural Behavior of Durable Composite Sandwich Panels with High Performance Expanded Polystyrene Concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials** 12(1): DOI 10.1186/s40069-018-0255-6.
- Or, K.H., Putra, A. and Selamat, M.Z. 2017. Oil Palm Empty Fruit Bunch Fibres as Sustainable Acoustic Absorber. **Applied Acoustics** 119: 9-16.
- Papanikolaou, G. and Trochides, A. 1985. Design of a Test Facility for Transmission Loss Measurement. **Applied Acoustics** 18(5): 315-323.
- Patel, J.M. and Modi, B.A. 2013. Stiffness and Thermal Analysis of Doubly Curve Sandwich Panel for an Automobile Application. **Procedia Engineering** 51: 655-664.
- Peng, L. 2017. Sound absorption and insulation functional composites, pp. 333-373. *In* Fan, M. and Fu, F., eds. **Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction**. Woodhead Publishing, Singapore.
- Promjan, J., Ratanawilai, T. and Homkhiew, C. 2021. The Property of Sandwich-Structure Rubberwood -Plastic Composites with Different Plastic Core Layer. **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok** 32(3): 700-711. (inThai)
- Putra, A., Or, K.H., Selamat, M.Z., Nor, M.J.M., Hassan, M.H. and Prasetyo, I. 2018. Sound Absorption of Extracted Pineapple-Leaf Fibres. **Applied Acoustics** 136: 9-15.
- Putra, A., Khair, F.A. and Nor, M.J.M. 2015. Utilizing Hollow-Structured Bamboo as Natural Sound Absorber. **Archives of Acoustics** 40(4): 601-608.
- Singh, Z. and Bhalla, S. 2017. Advance Research in Textile Engineering Toxicity of Synthetic Fibres & Health. **Advance Reserach in Textile Engineering** 2(1): 1-4.

Styles, M., Compston, P. and Kalyanasundaram, S.
2007. The Effect of Core Thickness on the
Flexural Behaviour of Aluminium Foam

Sandwich Structures. **Composite Structures**
80(4): 532-538.

ตัวแบบพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย (กฟผ.)

Forecasting Model for the Amount of Water Flowing into the Reservoirs of the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT)

จิโรจน์ แซ่ยั้ง วฐา มินเสน* และ พิมพกา ธาณินพงศ์

Jiroge Saeying, Watha Minsan* and Phimphaka Taninpong

Received: 2 September 2021, Revised: 16 February 2022, Accepted: 7 March 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมสำหรับพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) 11 แห่ง ได้แก่ เขื่อนภูมิพล เขื่อนศรีนครินทร์ เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนวชิราลงกรณเขื่อนรัชชประภา เขื่อนอุบลรัตน์ เขื่อนสิรินธร เขื่อนจุฬาภรณ์ เขื่อนห้วยกุ่ม เขื่อนน้ำพุง และเขื่อนบางลาง ด้วยวิธีการวิเคราะห์อนุกรมเวลา 4 วิธี คือ วิธีแยกส่วนประกอบ วิธีปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์และวินเทอร์ วิธีบอซ-เจนกินส์ และวิธีพยากรณ์รวม โดยใช้ข้อมูลทุติยภูมิปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 ทั้งหมด 132 ค่า แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดข้อมูลฝึกฝน ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 จำนวน 120 ค่า เป็นชุดข้อมูลเพื่อสร้างตัวแบบพยากรณ์ และชุดข้อมูลทดสอบ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2563 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 จำนวน 12 ค่า เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ โดยใช้เกณฑ์รากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) ต่ำสุด และใช้โปรแกรม Minitab 18 และ Excel Office 365 เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูล จากการวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลาปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนแต่ละแห่ง เพื่อหาตัวแบบที่เหมาะสม พบว่าวิธีการพยากรณ์รวมโดยการถ่วงน้ำหนักด้วยสัมประสิทธิ์การถดถอย เป็นวิธีที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนทั้ง 11 แห่ง

คำสำคัญ: อ่างเก็บน้ำ, แยกส่วนประกอบ, ปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์และวินเทอร์, บอซ-เจนกินส์, การพยากรณ์รวม

ABSTRACT

The objective of this study is to construct the appropriate forecasting model for the amount of water flowing into the 11 reservoirs of the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), namely, Bhumibol Dam, Srinakarin Dam, Sirikit Dam, Vajiralongkorn Dam, Ratchaprapha Dam, Ubolratana Dam, Sirindhorn Dam, Chulabhorn Dam, Huai Kum Dam, Nampong Dam, and Bang Lang Dam. The forecasting models used in this study were decomposition method, Holt-Winters exponential smoothing method, Box-Jenkins method, and combined forecasting method. The amount of water flowing into the reservoirs was secondary data gathered from Electricity Generating Authority of Thailand during January 2010 to December 2020 (132 values). The data was divided into two sets. The training data set had 120 values, which were the data from January 2010 to December 2019, and were used for constructing the forecasting model. The test data set had 12 values, which were the data collected from January 2020 to December 2020, and were used for checking the accuracy of the forecasting models. The criterion of model evaluation was the lowest root mean square error (RMSE). Minitab 18 and Excel Office 365 were used as the data analysis program. Research results indicated that the combined forecasting method using weights based upon a regression analysis method had given the lowest RMSE.

Key words: reservoir, decomposition, Holt-Winters' exponential smoothing, Box-Jenkins, combined forecasting

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจของภาคอุตสาหกรรม ภาคการเกษตร และการขยายตัวของชุมชน ส่งผลให้มีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่เพิ่มมากขึ้นทั้ง ที่ดิน ไฟฟ้า น้ำ และอื่นๆ การสร้างอ่างเก็บน้ำ จึงเป็นสิ่งที่มนุษย์ทำขึ้นเพื่อพัฒนาแหล่งน้ำของมนุษย์ โดยอ่างเก็บน้ำเป็นสิ่งที่สร้างขึ้น สำหรับการกักเก็บน้ำที่มากเกินไปจนต้องการไว้ในช่วงฤดูฝนเพื่อใช้ในฤดูแล้งที่ขาดแคลนน้ำ หรือสร้างปิดกั้นลำน้ำธรรมชาติระหว่างหุบเขาหรือเนินสูง ใช้พื้นที่เหนืออ่างเก็บน้ำในการเก็บปริมาณน้ำ (Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2014) สำหรับใช้ในการเพาะปลูก เพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรให้ได้มากที่สุด นอกจากนี้การสร้างอ่างเก็บน้ำนั้นไม่ได้กักเก็บน้ำมาได้ใช้เพื่อการเพาะปลูกเท่านั้น ยังต้องกักเก็บน้ำมาใช้ในการด้าน

อื่นๆ เช่น เพื่อการเกษตรกรรม การชลประทาน การสาธารณสุขโรค การอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถผลิตได้เฉลี่ยปีละประมาณ 554 ล้านกิโลวัตต์ต่อชั่วโมง (The Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology, 2014) รวมถึงการป้องกันความเสียหายอันเกิดจากปัญหาน้ำท่วมฉับพลัน โดยการช่วยชะลอความเร็วของน้ำ และยังสามารถจัดการกับปริมาณน้ำ และมีการระบายน้ำให้เหมาะสมตามสถานการณ์ เป็นต้น ดังนั้น จึงทำให้ปัจจุบันทรัพยากรน้ำตามแหล่งน้ำต่างๆ เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งในการดำรงของมนุษย์ ตั้งแต่ในระดับชุมชนจนถึงระดับประเทศ

จากข้อมูลรายงานประจำปี พ.ศ. 2562 เรื่องสรุปสถานการณ์น้ำและการบริหารจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ประเทศไทยมีอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่และ

ขนาดกลาง 1,202 แห่ง มีความจุรวม 78,695 ล้านลูกบาศก์เมตร เป็นอ่างเก็บน้ำที่อยู่ในการดูแลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) 12 แห่ง ประกอบด้วย เขื่อนภูมิพล เขื่อนศรีนครินทร์ เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนวชิราลงกรณ เขื่อนรัชชประภา เขื่อนอุบลรัตน์ เขื่อนสิรินธร เขื่อนจุฬาภรณ์ เขื่อนห้วยกุ่ม เขื่อนน้ำพุง เขื่อนบางลาง และเขื่อนท่าทุ่งนา มีความจุรวมกันคือ 61,472 ล้านลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 78 ของความจุอ่างเก็บน้ำทั้งประเทศ โดยในปี พ.ศ. 2562 ประเทศไทยมีปริมาณฝนน้อยในทุกภูมิภาค ปริมาณฝนรวมปี พ.ศ. 2562 น้อยกว่าค่าเฉลี่ยประมาณ 15% ทำให้ปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนต่างๆ อยู่ในเกณฑ์น้อยมาก ส่งผลต่อปริมาณน้ำต้นทุนฤดูแล้ง (1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2562 - 31 เมษายน พ.ศ. 2563) มีปริมาณน้อย ไม่เพียงพอต่อการเพาะปลูกข้าวนาปรัง โดยเฉพาะภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำนั้นลดน้อยลงอย่างชัดเจน ณ วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2562 เวลา 24:00 น. มีปริมาณน้ำเก็บกัก 39,507 ล้านลูกบาศก์เมตร (คิดเป็นร้อยละ 64 ของความจุ) เป็นน้ำใช้งานได้ 16,463 ล้านลูกบาศก์เมตร (คิดเป็นร้อยละ 43 ของความจุใช้งานได้) น้อยกว่าปี พ.ศ. 2561 ในช่วงเวลาเดียวกัน ร้อยละ 33.8 หรือ 8,415 ล้านลูกบาศก์เมตร จึงต้องควบคุมการใช้น้ำเพื่อการอุปโภค-บริโภคเท่านั้น (The Electricity Generating Authority of Thailand, 2020)

เนื่องจากอ่างเก็บน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยแต่ละแห่งมีความสำคัญและส่วนมากมีขนาดใหญ่ การจัดการกับปริมาณน้ำจึงส่งผลอย่างยิ่ง ต่อการใช้ชีวิตของคนและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ดังนั้น จึงควรมีการเตรียมแผนรับมือล่วงหน้า โดยการนำข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอดีตมาใช้พยากรณ์ปริมาณน้ำไหลของอ่างเก็บน้ำในอนาคต หากนำเทคนิคพยากรณ์อนุกรมเวลามาช่วย

พยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำได้ จะทำให้ทราบว่าช่วงใดที่จะมีปริมาณน้ำไหลมากหรือน้อย ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เพื่อให้ทราบว่าแต่ละช่วงมีปริมาณน้ำไหลเข้ามากน้อยเพียงใด และสามารถบริหารจัดการปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำได้ โดยการนำวิธีการพยากรณ์ทางสถิติ 4 วิธี ได้แก่ วิธีแยกส่วนประกอบ วิธีปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์-วินเทอร์ วิธีบอกซ์-เจนกินส์ และวิธีพยากรณ์รวม เพื่อหาตัวแบบพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และผลการวิจัยครั้งนี้เป็นประโยชน์ในการตัดสินใจวางแผนการจัดการปริมาณน้ำอ่างเก็บน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยใช้ข้อมูลทุติยภูมิจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ 11 แห่ง ประกอบด้วย เขื่อนภูมิพล เขื่อนศรีนครินทร์ เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนวชิราลงกรณ เขื่อนรัชชประภา เขื่อนอุบลรัตน์ เขื่อนสิรินธร เขื่อนจุฬาภรณ์ เขื่อนห้วยกุ่ม เขื่อนน้ำพุง และเขื่อนบางลาง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 ทั้งหมด 132 ค่า แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ข้อมูลชุดแรกเป็นชุดข้อมูลฝึกฝนคือ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 จำนวน 120 ค่า เป็นชุดข้อมูลเพื่อสร้างตัวแบบพยากรณ์ ชุดข้อมูลชุดที่สองเป็นชุดข้อมูลทดสอบคือ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2563 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 จำนวน 12 ค่า เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ โดยใช้เกณฑ์รากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) ต่ำสุด และใช้โปรแกรม

Minitab 18 และ Excel Office 365 เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูล

2. วิธีแยกส่วนประกอบ (Decomposition Method)

วิธีแยกส่วนประกอบ เป็นวิธีการวิเคราะห์อนุกรมเวลาที่แยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลาออกจากกันและอธิบายแต่ละส่วนประกอบในเทอมของ

สมการหรือแบบแผน จากแต่ละส่วนประกอบที่แยกออกมาทำให้เห็นลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาชัดเจนมากขึ้น และแยกพิจารณาการรวมส่วนประกอบอนุกรมเวลาเมื่อตัวแบบบวกเป็นดังสมการที่ (1)

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + S_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

เมื่อ Y_t แทนค่าที่แท้จริงใน ณ เวลา t

β_0, β_1 แทน ค่าคงที่ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสังเกตต่อหนึ่งหน่วยเวลา ตามลำดับ

S_t แทน ความแปรผันของฤดูกาล จะเรียกอิทธิพลของฤดูกาลในกรณีตัวแบบบวก และดัชนีฤดูกาลในกรณีตัวแบบคูณ (คาบเวลาของฤดูกาลมีค่าเท่ากับ 12)

ε_t แทนความคลาดเคลื่อนที่มีการแจกแจงปกติและเป็นอิสระกัน ที่มีเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนคงที่ทุกช่วงเวลา

t แทน หน่วยเวลาของข้อมูลอนุกรม ในงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลอนุกรมเวลารายเดือน

จากสมการที่ (1) ตัวแบบพยากรณ์แบบบวกเป็นดังสมการที่ (2)

$$\hat{Y}_t = b_0 + b_1 t + \hat{S}_t \quad (2)$$

$\hat{Y}_t$ แทน ค่าพยากรณ์ใน ณ เวลา t

b_0, b_1 และ $\hat{S}_t$ แทนตัวประมาณของ β_0, β_1 และ S_t ตามลำดับ

นอกจากนี้ตัวแบบคูณเป็นดังสมการที่ (3)

$$Y_t = \beta_0 \beta_1^t S_t \varepsilon_t \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) ตัวแบบพยากรณ์แบบคูณเป็นดังสมการที่ (4)

$$\hat{Y}_t = b_0 b_1^t \hat{S}_t \quad (4)$$

งานวิจัยนี้เลือกรูปแบบบวกหรือคูณพิจารณาจากความแปรปรวนหรือการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลา ถ้าความแปรปรวนของข้อมูลอนุกรมเวลาคงที่จะเลือกใช้สมการรูปแบบบวก และถ้าความแปรปรวนของข้อมูลอนุกรมเวลาไม่คงที่จะใช้สมการรูปแบบคูณโดยใช้สถิติทดสอบของเลวีเน (Levene's Test) และในการศึกษาส่วนประกอบของอนุกรมเวลาเกี่ยวกับแนวโน้มใช้สถิติทดสอบรันส์ (Runs Test) และใช้สถิติทดสอบ Kruskal Wallis ในการศึกษาความแปรผันของฤดูกาล

3. วิธีปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์และวินเทอร์ (Holt-Winters Exponential Smoothing Method: HWS)

วิธีปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์และวินเทอร์ เป็นวิธีการสร้างสมการพยากรณ์สำหรับอนุกรมเวลาที่มีแนวโน้มและฤดูกาล โดยนำข้อมูลในอดีตมาวิเคราะห์เพื่อสร้างตัวแบบจำลองและนำแบบจำลองนั้นมาพยากรณ์ค่าอนาคต สำหรับวิธี HWS ใช้ค่าปรับให้เรียบ 3 ค่าได้แก่ α, γ และ δ ที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 สำหรับค่าแนวโน้ม ค่าความลาดชันและค่าวัฏจักรของฤดูกาลหรือดัชนีฤดูกาล

ตามลำดับ (Taesombat, 2006) วิธีนี้จะแบ่งออกเป็น 2
แบบ คือวิธีปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของ
โฮลต์และวินเทอร์ที่มีแนวโน้มฤดูกาลแบบบวก ตัว

แบบดังสมการที่ (1) และตัวแบบพยากรณ์ดังสมการ
ที่ (5) ถึง (8)

$$\hat{Y}_{t+p} = \hat{T}_t + p\hat{\beta}_t + \hat{S}_{t-L+p} \quad (5)$$

$$\hat{T}_t = \alpha(Y_t + \hat{S}_{t-L}) + (1 - \alpha)(\hat{T}_{t-1} - \hat{\beta}_{t-1}) \quad (6)$$

$$\hat{\beta}_t = \gamma(\hat{T}_t - \hat{T}_{t-1}) + (1 - \gamma)\hat{\beta}_{t-1} \quad (7)$$

$$\hat{S}_t = \delta(Y_t - \hat{T}_t) + (1 - \delta)\hat{S}_{t-L} \quad (8)$$

วิธีปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของ
โฮลต์และวินเทอร์ที่มีแนวโน้มฤดูกาลแบบคูณ ตัว

แบบดังสมการที่ (9) และตัวแบบพยากรณ์ดังสมการ
ที่ (10) ถึง (13) ดังนี้

$$Y_t = (\beta_0 + \beta_1^t)S_t + \varepsilon_t \quad (9)$$

$$\hat{Y}_{t+p} = (\hat{T}_t + p\hat{\beta}_t)\hat{S}_{t-L-p} \quad (10)$$

$$\hat{T}_t = \alpha\left(\frac{Y_t}{\hat{S}_{t-L}}\right) + (1 - \alpha)(\hat{T}_{t-1} - \hat{\beta}_{t-1}) \quad (11)$$

$$\hat{\beta}_t = \gamma(\hat{T}_t - \hat{T}_{t-1}) + (1 - \gamma)\hat{\beta}_{t-1} \quad (12)$$

$$\hat{S}_t = \delta\left(\frac{Y_t}{\hat{T}_t}\right) + (1 - \delta)\hat{S}_{t-L} \quad (13)$$

เมื่อ $\hat{Y}_{t+p}$ แทน ค่าพยากรณ์ ณ เวลา $t + p$ โดยที่ p แทนเวลาที่ต้องการพยากรณ์ไปล่วงหน้า
 $\hat{T}_t$ แทน ค่าแนวโน้มที่ ณ เวลา t
 $\hat{\beta}_t$ แทน ค่าความลาดชันที่ ณ เวลา t
 $\hat{S}_t$ แทน ค่าวัดอิทธิพลของฤดูกาลหรือดัชนีฤดูกาล
 L แทน คาบเวลาของฤดูกาลมีค่าเท่ากับ 12

งานวิจัยนี้เลือกรูปแบบบวกหรือคูณ
พิจารณาจากความแปรปรวนหรือการเคลื่อนไหวของ
อนุกรมเวลา เช่นเดียวกับวิธีแยกส่วนประกอบโดยใช้
สถิติทดสอบของเลวิน

4. วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins Method)

วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์จะพิจารณาภายใต้
อนุกรมเวลาแบบคงที่ (Stationary Time Series) โดย

หารูปแบบที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลา โดยใช้ค่า
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัวเอง (Autocorrelation
Function: ACF) และค่าสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ใน
ตัวบางส่วน (Partial Autocorrelation Function:
PACF) จะมีตัวแบบโดยทั่วไป (General Model) ของ
 $ARIMA(p, d, q) \times SARIMA(P, D, Q)_L$ แสดงดัง
สมการที่ (14)

$$\phi_p(B)\Phi_P(B^L)(1-B)^d(1-B^L)^DY_t = \delta + \theta_q(B)\Theta_Q(B^L)\varepsilon_t \quad (14)$$

เมื่อ d แทนจำนวนครั้งที่หาผลต่างของแนวโน้ม

D แทนจำนวนครั้งที่หาผลต่างของฤดูกาล และ L แทนจำนวนฤดูกาลต่อปี

p แทนอันดับของ Autoregressive (AR) และ q แทนอันดับของ Moving Average (MA)

P แทนอันดับของ Seasonal Autoregressive (SAR) และ Q แทนอันดับของ Seasonal Moving Average (SMA)

B แทนตัวดำเนินการย้อนหลัง (Backward Operator) โดยที่ $B^L Y_t = Y_{t-L}$

$\delta = \mu \phi_p(B) \Phi_P(B^L)$ แทนค่าคงตัว โดยที่ μ แทนค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลา

ϕ_p แทนการถดถอยในตัวแบบไม่มีฤดูกาลอันดับ p (Non-seasonal Autoregressive Operator of Order p : AR(p))

Φ_P แทนการถดถอยในตัวแบบมีฤดูกาลอันดับ P (Seasonal Autoregressive: SAR(P))

θ_q แทนค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบไม่มีฤดูกาลอันดับ q (Non-seasonal Moving Average: MA(q))

Θ_Q แทนค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบมีฤดูกาลอันดับ Q (Seasonal Moving Average: SMA(Q))

วิธีบอกซ์-เจนกินส์มีขั้นตอนการพยากรณ์ (Manmin, 2006) ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การตรวจสอบข้อมูล เพื่อพิจารณาว่าข้อมูลอนุกรมเวลา (Y_t) อยู่ภายใต้ภายใต้ อนุกรมเวลาแบบคงที่หรือไม่ ในกรณีที่ข้อมูลอนุกรมเวลาไม่อยู่ภายใต้ อนุกรมเวลาแบบคงที่ จะต้องทำการแปลงข้อมูลอนุกรมเวลาให้อยู่ภายใต้ภายใต้ อนุกรมเวลาแบบคงที่ โดยการหาผลต่าง พังก์ชันลอการิทึม หรือการแปลงด้วยรากที่สอง เมื่อเกิดอนุกรมเวลาแบบคงที่ต่อข้อมูลอนุกรมเวลาแล้ว ต่อไปจะกำหนดตัวแบบที่เป็นไปได้จาก การพิจารณา ACF และ PACF ของอนุกรมเวลา

ขั้นตอนที่ 2 สร้างกราฟ ACF และ PACF ของอนุกรมเวลา เพื่อพิจารณาว่าอนุกรมเวลาชุดใหม่ อยู่ภายใต้ อนุกรมเวลาแบบคงที่หรือไม่ ถ้าอนุกรมเวลาคงที่แล้วให้ไปทำขั้นตอนที่ 3 แต่ถ้ายังไม่คงที่ ให้กลับไปพิจารณาปรับวิธีการแปลงข้อมูลให้อนุกรมเวลาแบบคงที่ต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 การกำหนดตัวแบบ เป็นการหาตัวแบบอนุกรมเวลาที่คิดว่าเหมาะสมกับอนุกรมเวลา โดยพิจารณาจากกราฟ ACF และ PACF

ขั้นตอนที่ 4 การประมาณค่าพารามิเตอร์ หลังจากระบุตัวแบบที่ใช้สำหรับอนุกรมเวลาแล้ว จะต้องประมาณค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับ

อนุกรมเวลามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดยใช้วิธีการประมาณด้วยกำลังสองน้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 5 การตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ เพื่อทดสอบว่าตัวแบบที่ได้มานั้นเหมาะสมกับอนุกรมเวลาหรือไม่ ถ้าไม่เหมาะสม จะต้องพิจารณาและกำหนดตัวแบบใหม่ในขั้นตอนที่ 3 และเมื่อการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนจากตัวแบบแล้วไม่พบเห็นรูปแบบคงเหลืออยู่นั้นแสดงว่าตัวแบบดังกล่าวมีคุณสมบัติคล้ายตัวแบบอย่างสุ่ม ใช้ตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างในการพยากรณ์ต่อไปได้

5. วิธีการพยากรณ์รวม (Combined Forecasting Method)

การพยากรณ์รวมเป็นวิธีการประยุกต์ที่มีการรวมค่าพยากรณ์จากวิธีการพยากรณ์เดี่ยวตั้งแต่ 2 วิธีขึ้นไปเพื่อให้ได้ค่าพยากรณ์ใหม่ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด สามารถใช้ได้ดีในกรณีที่วิธีการพยากรณ์เดี่ยวมีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลา มากกว่า 1 วิธี (Manmin, 2006) ณ ที่นี้ได้พิจารณาวิธีการพยากรณ์เดี่ยว 3 วิธี คือ วิธีแยกส่วนประกอบ วิธีปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์และวินเทอร์ และวิธีบอกซ์-เจนกินส์ โดยมีวิธีการที่ใช้ในการถ่วงน้ำหนัก 3 วิธีดังนี้ (Minsan, 2022)

5.1 วิธีการถ่วงน้ำหนักด้วยสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Analysis Method: REG) (Keerativibool, 2013) ตัวแบบพยากรณ์แสดงดังสมการที่ (15)

$$\hat{Y}_t = b_0 + b_1 \hat{Y}_{1t} + b_2 \hat{Y}_{2t} + b_3 \hat{Y}_{3t} \quad (15)$$

เมื่อ $\hat{Y}_{1t}$, $\hat{Y}_{2t}$ และ $\hat{Y}_{3t}$ แทนค่าพยากรณ์เดี่ยว ณ เวลา t จากวิธีแยกส่วนประกอบ วิธีปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์และวินเทอร์ และวิธีบอซ-เจนกินส์ ตามลำดับ

b_0 , b_1 , b_2 และ b_3 แทนค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวิธีการพยากรณ์เดี่ยวด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

(Least Squares Method) (Montgomery *et al.*, 2006)

5.2 วิธีการถ่วงน้ำหนักค่าสัมบูรณ์ต่ำสุด (Least Absolute Value: LAV) การคำนวณหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของวิธีนี้อาศัยเทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming Technique) โดยมี

สมการเป้าหมายทำให้ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าต่ำสุด (Sukparungsee, 2003) ตัวแบบพยากรณ์แสดงดังสมการที่ (16)

$$\hat{Y}_t = w_1 \hat{Y}_{1t} + w_2 \hat{Y}_{2t} + w_3 \hat{Y}_{3t} \quad (16)$$

โดยที่ $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$

เมื่อ w_i แทนน้ำหนักของวิธีการพยากรณ์ที่ i ; $i = 1, 2, 3$ ซึ่งหาได้จากการให้ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด โดยใช้คำสั่ง Solver Simplex LP ในโปรแกรม Microsoft Excel

5.3 วิธีการถ่วงน้ำหนักความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยผกผัน (Inverse of Mean Squares Error Method: INV) เป็นการนำค่าความคลาดเคลื่อน

กำลังสองเฉลี่ยที่คำนวณได้จากแต่ละเทคนิคการพยากรณ์มาแปลงเป็นค่าถ่วงน้ำหนัก (Weiss *et al.*, 2018) ตัวแบบพยากรณ์แสดงดังสมการที่ (17)

$$\hat{Y}_t = w_1 \hat{Y}_{1t} + w_2 \hat{Y}_{2t} + w_3 \hat{Y}_{3t}$$

โดยที่ $w_i = \frac{(1/MSE_i)}{\sum_{i=1}^3 (1/MSE_i)}$; $i = 1, 2, 3$

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^{n_2} e_t^2}{n_2} \quad (17)$$

เมื่อ $e_t = Y_t - \hat{Y}_t$ แทนความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ ณ เวลา t

n_2 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดข้อมูลทดสอบ ($n_2 = 12$)

6. การเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ การวิจัยครั้งนี้ได้คัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ โดย การเปรียบเทียบค่า RMSE ต่ำที่สุด จากวิธีการ

พยากรณ์ทั้ง 4 วิธี วิธีแยกส่วนประกอบ วิธีปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์และวินเทอร์ วิธีบอซ-เจนกินส์ และวิธีการพยากรณ์รวม ดังสมการที่ (18) ดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_2} \sum_{t=1}^{n_2} e_t^2} \quad (18)$$

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการพิจารณาการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลา

ผลการวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลา ทดสอบองค์ประกอบแนวโน้ม ฤดูกาล และความแปรปรวนของข้อมูล โดยใช้สถิติทดสอบรันส์, Kruskal Wallis และของเลวิน ตามลำดับ พบว่าข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ 11 แห่ง มีอิทธิพลจากแนวโน้มและฤดูกาล และเมื่อ

พิจารณาอ่างเก็บน้ำที่มีความแปรปรวนคงที่ประกอบด้วย 9 แห่ง ได้แก่ เขื่อนศรีนครินทร์ เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนวชิราลงกรณ เขื่อนรัชชประภา เขื่อนสิรินธร เขื่อนจุฬาภรณ์ เขื่อนห้วยกุ่ม เขื่อนน้ำพุง และเขื่อนบางลาง อ่างเก็บน้ำที่มีความแปรปรวนไม่คงที่ประกอบด้วย 2 แห่ง คือ เขื่อนภูมิพลและเขื่อนอุบลรัตน์ แสดงดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 ค่าสถิติทดสอบและค่าพี (p-value) ของการใช้สถิติทดสอบรันส์, Kruskal Wallis และของเลวิน ของอนุกรมเวลาข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ 11 แห่ง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

อ่างเก็บน้ำ	Runs Test		Kruskal Wallis Test		Levene's Test	
	Test Statistic	p-value	Test Statistic	p-value	Test Statistic	p-value
เขื่อนภูมิพล	-9.474	0.000*	90.130	0.000*	2.230	0.025*
เขื่อนศรีนครินทร์	-9.668	0.000*	84.660	0.000*	1.100	0.367
เขื่อนสิริกิติ์	-9.474	0.000*	84.480	0.000*	1.160	0.329
เขื่อนวชิราลงกรณ	-9.861	0.000*	84.360	0.000*	0.790	0.628
เขื่อนรัชชประภา	-8.508	0.000*	83.210	0.000*	1.150	0.332
เขื่อนอุบลรัตน์	-9.474	0.000*	82.390	0.000*	2.320	0.020*
เขื่อนสิรินธร	-9.088	0.000*	73.000	0.000*	0.780	0.680
เขื่อนจุฬาภรณ์	-9.861	0.000*	66.820	0.000*	1.220	0.292
เขื่อนห้วยกุ่ม	-9.474	0.000*	52.320	0.000*	1.020	0.425
เขื่อนน้ำพุง	-8.894	0.000*	70.410	0.000*	1.670	0.105
เขื่อนบางลาง	-9.088	0.000*	63.560	0.000*	0.660	0.741

หมายเหตุ: * ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ผลการวิเคราะห์อนุกรมเวลาโดยวิธีการแยกส่วนประกอบ

จากการคำนวณหาความแปรผันฤดูกาล กรณีที่เป็นตัวแบบคุณความแปรผันของฤดูกาลจะแสดงด้วยค่าดัชนีฤดูกาลที่มีเกณฑ์เทียบปริมาณระดับน้ำปกติจะอยู่ที่ค่าเท่ากับ 100 และ กรณีที่เป็นตัวแบบบอกความแปรผันของฤดูกาลจะแสดงด้วยค่าอิทธิพลฤดูกาลที่มีเกณฑ์เทียบปริมาณระดับน้ำปกติจะอยู่ที่ค่าเท่ากับ 0 ได้ค่าดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3 พบว่า

เขื่อนที่ได้รับความแปรผันฤดูกาลทำให้มีปริมาณน้ำสูงสุดในเดือนสิงหาคมประกอบด้วย 4 แห่ง คือ เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนวชิราลงกรณเขื่อนรัชชประภา และเขื่อนน้ำพุง ในเดือนกันยายนประกอบด้วย 5 แห่ง ได้แก่ เขื่อนภูมิพล เขื่อนอุบลรัตน์ เขื่อนศรีนครินทร์ เขื่อนสิรินธร และเขื่อนจุฬาภรณ์ เขื่อนที่มีปริมาณน้ำสูงสุดในเดือนตุลาคมคือ เขื่อนห้วยกุ่ม และสูงสุดในเดือนธันวาคม คือ เขื่อนบางลางเขื่อนศรีนครินทร์

3. ผลการวิเคราะห์อนุกรมเวลาโดยวิธีปรับให้เรียบ

ด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์และวินเทอร์

จากการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยใช้คำสั่ง

Solver ในโปรแกรม Microsoft Excel ที่ให้ค่า RMSE

ของข้อมูลชุดที่ 1 ค่าที่สุด ได้ค่าปรับให้เรียบ α , δ และ γ ที่เหมาะสมกับข้อมูลอนุกรมเวลาปริมาณน้ำ

ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำแต่ละแห่ง แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 2 ความแปรผันฤดูกาลของอนุกรมเวลาเขื่อนภูมิพล เขื่อนอุบลรัตน์ เขื่อนศรีนครินทร์ เขื่อนสิริกิติ์ และเขื่อนวชิราลงกรณ์

เดือน	ดัชนีฤดูกาล (ร้อยละ)		อิทธิพลฤดูกาล		
	เขื่อนภูมิพล	เขื่อนอุบลรัตน์	เขื่อนศรีนครินทร์	เขื่อนสิริกิติ์	เขื่อนวชิราลงกรณ์
ม.ค.	22	15	-284.03	-365.06	-391.13
ก.พ.	8	14	-311.45	-405.13	-416.6
มี.ค.	8	15	-339.21	-407.26	-415.16
เม.ย.	9	20	-335.48	-385.69	-424.42
พ.ค.	42	78	-259.91	-251.09	-378.91
มิ.ย.	54	82	-146.99	-130.76	1.86
ก.ค.	92	93	165.44	429.46	734.28
ส.ค.	215	126	577.71	1,159.4	1,144.63
ก.ย.	312	341	712.57	852.97	710.82
ต.ค.	295	327	546.81	95.82	99.29
พ.ย.	107	71	-85.33	-258.45	-285.16
ธ.ค.	36	18	-240.14	-334.2	-379.49

หมายเหตุ: Min  Max ในแต่ละเขื่อน

ตารางที่ 3 ความแปรผันฤดูกาลของอนุกรมเวลาเขื่อนรัชชประภา เขื่อนสิรินธร เขื่อนจุฬาภรณ์ เขื่อนห้วยกุ่ม เขื่อนน้ำพุง และเขื่อนบางลาง

เดือน	อิทธิพลฤดูกาล					
	เขื่อนรัชชประภา	เขื่อนสิรินธร	เขื่อนจุฬาภรณ์	เขื่อนห้วยกุ่ม	เขื่อนน้ำพุง	เขื่อนบางลาง
ม.ค.	-156.86	-121.19	-11.23	-3.4	-9.63	88.23
ก.พ.	-186.4	-123.59	-11.93	4.47	-9.49	-41.79
มี.ค.	-144.3	-124.87	-12.02	-2.62	-9.99	-55.89
เม.ย.	-142.26	-115.8	-11.04	-6.17	-9.17	-52.24
พ.ค.	-70.28	-81.65	-3.87	-6.04	-6.38	-32.17
มิ.ย.	91.31	-9.79	-6.55	0.48	-4.09	-62.28
ก.ค.	177.24	185.05	-2.48	-4.48	21.13	-76.01
ส.ค.	280.02	189.2	5.21	-2.07	25.29	-54.24
ก.ย.	248.18	345.46	35.96	13.33	20.96	-24.75

ตารางที่ 3 (ต่อ)

เดือน	อิทธิพลฤดูกาล					
	เขื่อนรัชชประภา	เขื่อนสิรินธร	เขื่อนจุฬาภรณ์	เขื่อนห้วยกุ่ม	เขื่อนน้ำพุง	เขื่อนบางลาง
ต.ค.	126.85	87.23	30.66	23.74	-0.28	35.17
พ.ย.	-80.71	-108.99	-3.6	-8.1	-8.69	101.43
ธ.ค.	-142.81	-121.07	-9.11	-9.13	-9.66	174.55

หมายเหตุ: Min  Max ในแต่ละเขื่อน

ตารางที่ 4 ค่าปรับให้เรียบ α, δ และ γ ของอนุกรมเวลาอ่างเก็บน้ำ 11 แห่ง

อ่างเก็บน้ำ	ค่าปรับให้เรียบ		
	α	δ	γ
เขื่อนภูมิพล	0.0000	0.2106	0.0000
เขื่อนศรีนครินทร์	0.8066	0.9473	0.0000
เขื่อนสิริกิติ์	0.5635	0.8313	0.0000
เขื่อนวชิราลงกรณ	0.0811	0.3446	0.0000
เขื่อนรัชชประภา	0.1327	0.4126	0.0000
เขื่อนอุบลรัตน์	0.0000	0.3872	0.0000
เขื่อนสิรินธร	0.1196	0.2374	0.0000
เขื่อนจุฬาภรณ์	0.0942	0.6970	0.0000
เขื่อนห้วยกุ่ม	0.0196	0.7882	0.0039
เขื่อนน้ำพุง	0.2285	0.3158	0.0000
เขื่อนบางลาง	0.1599	0.2838	0.0000

4. ผลการวิเคราะห์อนุกรมเวลาโดยวิธีบอกซ์-เจนกินส์

จากการพิจารณาลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาข้อมูลชุดที่ 1 พบว่าข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อน 11 แห่ง มีอิทธิพลจากแนวโน้มและฤดูกาลทั้ง 11 แห่ง แต่อ่างเก็บน้ำที่มีความแปรปรวนคงที่ ประกอบด้วย 9 แห่ง ได้แก่

เขื่อนศรีนครินทร์ เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนวชิราลงกรณ เขื่อนรัชชประภา เขื่อนสิรินธร เขื่อนจุฬาภรณ์ เขื่อนห้วยกุ่ม เขื่อนน้ำพุง และเขื่อนบางลาง และอ่างเก็บน้ำที่มีความแปรปรวนไม่คงที่ ประกอบด้วย 2 แห่ง คือ เขื่อนภูมิพลและเขื่อนอุบลรัตน์

ตารางที่ 5 ตัวแบบจากวิธีการพยากรณ์บ็อกซ์-เจนกินส์ของอนุกรมเวลาปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ 11 แห่ง

อ่างเก็บน้ำ	SARIMA (p, d, q) (P, D, Q) ₁₂
เขื่อนภูมิพล	SARIMA (0,1,0) (1,1,0) ₁₂
เขื่อนศรีนครินทร์	SARIMA (0,1,2) (0,1,3) ₁₂
เขื่อนสิริกิติ์	SARIMA (0,1,2) (0,1,3) ₁₂
เขื่อนวชิราลงกรณ์	SARIMA (0,1,2) (0,1,3) ₁₂
เขื่อนรัชชประภา	SARIMA (0,1,1) (0,1,1) ₁₂
เขื่อนอุบลรัตน์	SARIMA (2,1,0) (0,1,1) ₁₂
เขื่อนสิรินธร	SARIMA (0,1,2) (0,1,1) ₁₂
เขื่อนจุฬาภรณ์	SARIMA (0,1,1) (0,1,1) ₁₂
เขื่อนห้วยกุ่ม	SARIMA (0,1,1) (0,1,1) ₁₂
เขื่อนน้ำพุง	SARIMA (0,1,1) (0,1,2) ₁₂
เขื่อนบางลาง	SARIMA (0,1,1) (0,1,2) ₁₂

โดยผู้วิจัยได้ใช้ฟังก์ชันลอการิทึม ในการปรับให้ความแปรปรวนคงที่สำหรับอ่างเก็บน้ำที่ความแปรปรวนไม่คงที่ และกำจัดอิทธิพลจากแนวโน้มและฤดูกาลออกจากอนุกรมเวลา ได้ตัวแบบที่เหมาะสมที่สุดของอ่างเก็บน้ำแต่ละแห่ง แสดงดังตารางที่ 5

5. ผลการวิเคราะห์อนุกรมเวลาโดยวิธีการพยากรณ์รวม

จากการใช้วิธีการพยากรณ์รวม 3 วิธี ได้แก่ วิธีการถ่วงน้ำหนักด้วยสัมประสิทธิ์การถดถอย (REG) วิธีการถ่วงน้ำหนักค่าสัมบูรณ์ต่ำสุด (LAV) และวิธีการถ่วงน้ำหนักความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยผกผัน (INV) สามารถหาค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวิธีได้ผล ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าถ่วงน้ำหนักจากการพยากรณ์รวม 3 วิธี

อ่างเก็บน้ำ	REG				LAV			INV		
	b_0	b_1	b_2	b_3	w_1	w_2	w_3	w_1	w_2	w_3
เขื่อนภูมิพล	-38.084	1.069	-2.768	5.929	0.063	0.000	0.937	0.040	0.436	0.524
เขื่อนศรีนครินทร์	-25.628	-1.880	0.233	3.428	0.000	0.000	1.000	0.219	0.260	0.521
เขื่อนสิริกิติ์	123.342	-0.333	1.311	0.291	0.862	0.138	0.000	0.405	0.422	0.173
เขื่อนวชิราลงกรณ์	-12.314	-0.083	-0.128	0.795	0.739	0.000	0.261	0.270	0.160	0.570
เขื่อนรัชชประภา	-656.964	7.140	2.672	-9.014	0.915	0.000	0.085	0.341	0.309	0.350
เขื่อนอุบลรัตน์	-2.031	6.180	-0.230	-37.278	0.325	0.000	0.675	0.305	0.570	0.126
เขื่อนสิรินธร	34.140	3.277	-2.797	0.114	0.275	0.000	0.725	0.371	0.289	0.340
เขื่อนจุฬาภรณ์	-13.163	1.544	-0.540	0.189	0.638	0.000	0.362	0.689	0.118	0.194

ตารางที่ 6 (ต่อ)

อ่างเก็บน้ำ	REG				LAV			INV		
	b_0	b_1	b_2	b_3	w_1	w_2	w_3	w_1	w_2	w_3
เขื่อนห้วยกุ่ม	-10.513	-0.446	-0.582	1.841	0.483	0.517	0.000	0.489	0.148	0.363
เขื่อนน้ำพุง	0.138	1.809	-1.585	0.368	0.329	0.000	0.671	0.352	0.241	0.407
เขื่อนบางลาง	120.486	-3.110	2.589	1.552	0.000	0.897	0.103	0.369	0.296	0.335

หมายเหตุ: 1 คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของวิธีแยกส่วนประกอบ, 2 คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของวิธีปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์และวินเทอร์ และ 3 คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของวิธีบอซ-เจนกินส์

6. ผลการเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์

การพิจารณาตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุดของอนุกรมเวลาปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 11 แห่ง ด้วยเกณฑ์ RMSE ค่าที่สุดของวิธีแยกส่วนประกอบวิธีปรับให้เรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์และวินเทอร์ (HWS) วิธีบอซ-เจนกินส์ และวิธีการพยากรณ์รวม พบว่าวิธีที่เหมาะสมที่สุดเพียงวิธีเดียวคือ วิธีการพยากรณ์รวมโดยการถ่วงน้ำหนักด้วยสัมประสิทธิ์การถดถอย ดังตารางที่ 7

7. การพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ

ในการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 11 แห่ง ได้แก่ เขื่อนภูมิพล เขื่อนศรีนครินทร์ เขื่อน

สิริกิติ์ เขื่อนวชิราลงกรณเขื่อนรัชชประภา เขื่อนอุบลรัตน์ เขื่อนสิรินธร เขื่อนจุฬาภรณ์ เขื่อนห้วยกุ่ม เขื่อนน้ำพุง และเขื่อนบางลาง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2564 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2564 โดยเลือกใช้วิธีการพยากรณ์รวมโดยการถ่วงน้ำหนักด้วยสัมประสิทธิ์การถดถอย กับข้อมูลอนุกรมเวลาทั้งหมดจำนวน 132 ค่า ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 เพื่อสร้างตัวแบบสำหรับพยากรณ์ เดือนมกราคม พ.ศ. 2564 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2564 แสดงดังภาพที่ 1 การเปรียบเทียบข้อมูลอนุกรมเวลาปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อน 11 แห่ง กับวิธีการพยากรณ์รวม ดังภาพที่ 2 และค่าถ่วงน้ำหนักจากวิธีการถ่วงน้ำหนักด้วยสัมประสิทธิ์การถดถอยของอ่างเก็บน้ำแต่ละแห่ง ดังตารางที่ 8 ดังนี้

ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่า RMSE ของข้อมูลอนุกรมเวลาปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจากวิธีแยกส่วนประกอบโฮลต์และวินเทอร์ บอซ-เจนกินส์ และการพยากรณ์รวม

อ่างเก็บน้ำ	ค่า RMSE ของวิธีการพยากรณ์					
	แยกส่วนประกอบ	HWS	บอซ-เจนกินส์	REG	LAV	INV
เขื่อนภูมิพล	857.29	259.18	236.39	25.83*	176.38	103.85
เขื่อนศรีนครินทร์	243.04	223.40	157.72	106.91*	157.72	184.02
เขื่อนสิริกิติ์	217.46	213.18	333.28	134.13*	207.95	206.72
เขื่อนวชิราลงกรณ	438.01	567.93	301.35	105.65*	393.18	367.69
เขื่อนรัชชประภา	158.49	166.58	156.59	106.38*	156.02	153.68
เขื่อนอุบลรัตน์	155.31	113.61	241.89	54.01*	210.92	131.82
เขื่อนสิรินธร	102.67	116.36	107.31	46.98*	105.42	107.36

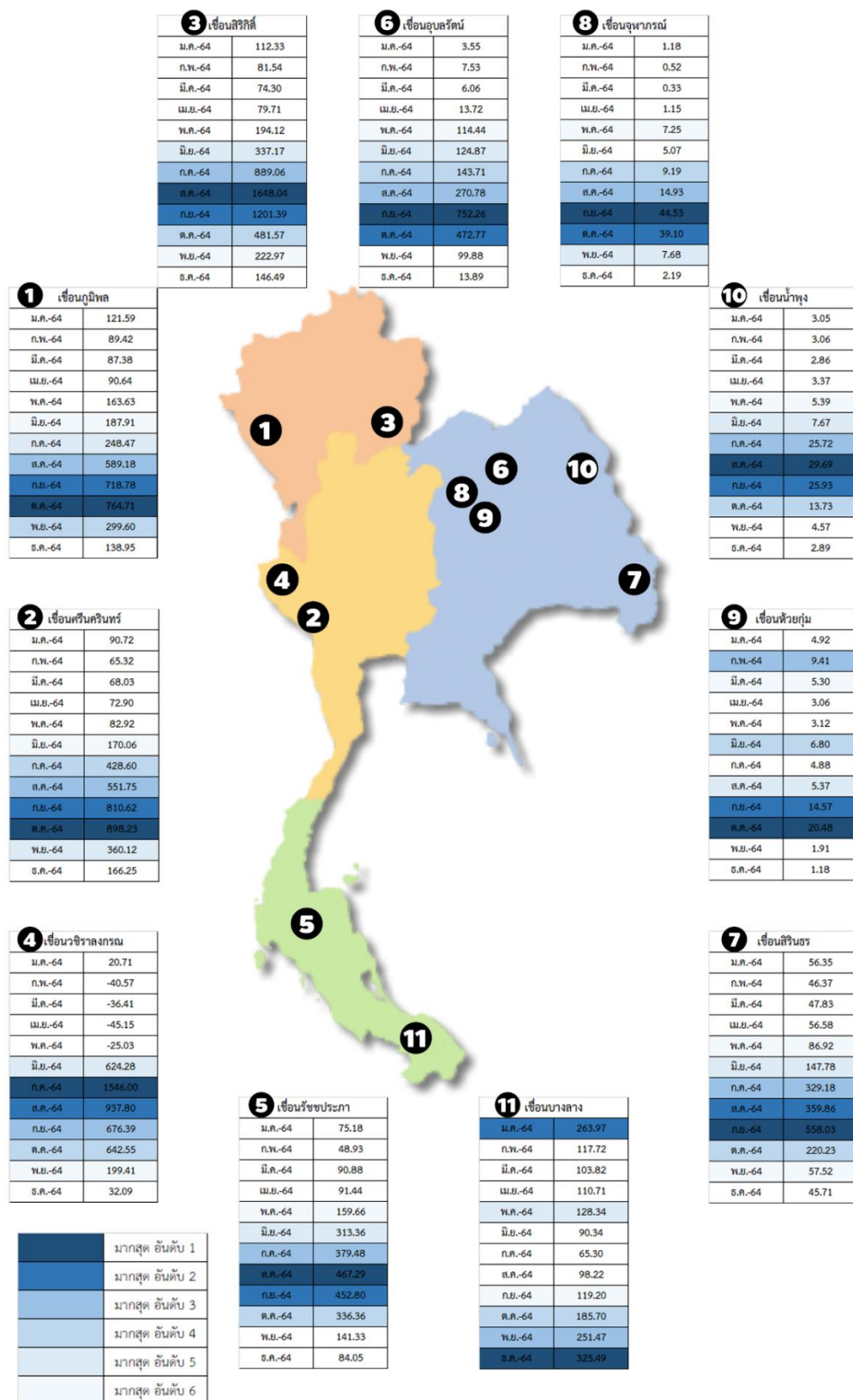
ตารางที่ 7 (ต่อ)

อ่างเก็บน้ำ	ค่า RMSE ของวิธีการพยากรณ์					
	แยกส่วนประกอบ	HWS	บอซซ์-เจนกินส์	REG	LAV	INV
เขื่อนจุฬาภรณ์	10.37	25.07	19.55	4.96*	11.24	11.72
เขื่อนห้วยกุ่ม	6.77	12.33	7.86	5.18*	8.83	6.51
เขื่อนน้ำพุง	8.75	10.58	8.14	1.61*	8.17	8.68
เขื่อนบางลาง	104.16	116.27	109.35	94.41*	115.12	108.34

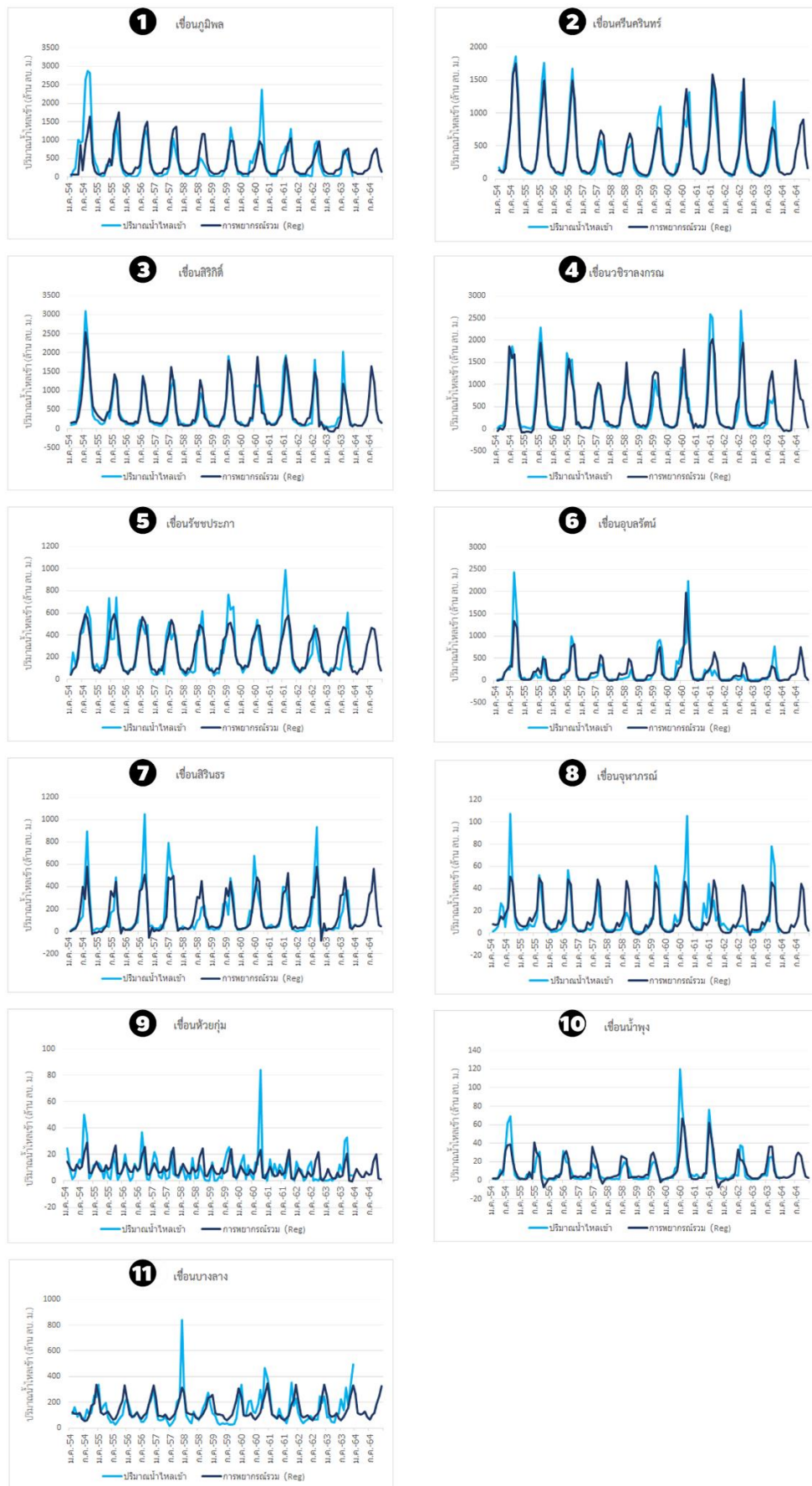
หมายเหตุ: * วิธีการพยากรณ์ที่ให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด

ตารางที่ 8 ค่าถ่วงน้ำหนักจากวิธีการพยากรณ์รวมโดยการถ่วงน้ำหนักด้วยสัมประสิทธิ์การถดถอย

อ่างเก็บน้ำ	b_0	b_1	b_2	b_3
เขื่อนภูมิพล	75.162	-0.092	0.762	0.000
เขื่อนศรีนครินทร์	22.438	0.195	-0.162	0.879
เขื่อนสิริกิติ์	35.598	0.126	0.232	0.591
เขื่อนวชิราลงกรณ์	2.977	0.198	-0.257	1.055
เขื่อนรัชชประภา	10.894	0.704	-0.413	0.665
เขื่อนอุบลรัตน์	-29.248	1.361	-0.165	0.693
เขื่อนสิรินธร	18.610	0.692	-0.604	0.859
เขื่อนจุฬาภรณ์	0.832	0.658	-0.066	0.314
เขื่อนห้วยกุ่ม	3.108	0.700	0.022	-0.076
เขื่อนน้ำพุง	0.539	0.546	-0.428	0.798
เขื่อนบางลาง	2.239	0.877	-0.215	0.323



ภาพที่ 1 ค่าพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ (ล้านลูกบาศก์เมตร) 11 แห่ง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2564 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2564



ภาพที่ 2 เปรียบเทียบข้อมูลอนุกรมเวลากับค่าพยากรณ์โดยวิธีพยากรณ์รวมปริมาณน้ำอ่างเก็บน้ำของเขื่อน 11 แห่ง

จากการเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ทั้ง 4 วิธีพบว่าวิธีการพยากรณ์รวมเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสอดคล้องกับการศึกษาของ Keerativibool (2013) และ Papukdee *et al.* (2019) ซึ่งรายงานว่าการพยากรณ์รวมเหมาะสมที่สุดในการเปรียบเทียบการพยากรณ์

สรุป

การวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอวิธีการหาตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมสำหรับอนุกรมเวลาข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ 11 แห่ง ประกอบด้วย เขื่อนภูมิพล เขื่อนศรีนครินทร์ เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนวชิราลงกรณเขื่อนรัชชประภา เขื่อนอุบลรัตน์ เขื่อนสิรินธร เขื่อนจุฬาภรณ์ เขื่อนห้วยกุ่ม เขื่อนน้ำพุง และเขื่อนบางลาง โดยใช้ข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 ทั้งหมด 132 ค่า แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ข้อมูลชุดแรกคือ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 จำนวน 120 ค่า เป็นชุดข้อมูลเพื่อสร้างตัวแบบพยากรณ์ ชุดข้อมูลชุดที่สองคือ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2563 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 จำนวน 12 ค่า เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ โดยใช้เกณฑ์รากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด พบว่าวิธีการพยากรณ์รวมโดยการถ่วงน้ำหนักด้วยสัมประสิทธิ์การถดถอย เป็นเพียงวิธีเดียวที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของเขื่อนทั้ง 11 แห่ง โดยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำสูงสุดของทุกเขื่อนยกเว้นเขื่อนบางลาง จะอยู่ในช่วงหน้าฝน คือตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึงเดือนกันยายนของทุกปี ส่วนเขื่อนบางลางซึ่งอยู่ทางตอนใต้สุดของประเทศไทยปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำสูงสุดจะได้รับผลของช่วงฤดูมรสุมคือช่วงเดือน ตุลาคม ถึงเดือน มกราคม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกสำหรับข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)

เอกสารอ้างอิง

- Department of Alternative Energy Development and Efficiency. 2014. **The dam is a reservoir of water energy.** Available Source: <https://ienergyguru.com/2015/10/dam-and-hydro-electricity/>, March 1, 2021. (in Thai)
- Keerativibool, W. 2013. A Comparison of Forecasting Methods between Box-Jenkins, Simple Seasonal Exponential Smoothing, and Combined Forecasting Methods for Predicting Monthly Mean Temperature. **Burapha Science Journal** 18(2): 149-160. (in Thai)
- Manmin, M. 2006. **Time series and forecasting.** Prakaypruek Publishing Center, Bangkok. (in Thai)
- Minsan, P. 2022. Forecasting model for Export Condom Quantity of Thailand on the COVID-19 situation. **The Journal of Applied Science** 21(1): 244500. (in Thai)
- Montgomery, D.C., Peck, E.A. and Vining, G.G. 2006. **Introduction to Linear Regression Analysis.** 4th ed. Wiley, New York.
- Papukdee, N., Senawong, N. and Busababodhin P. 2019. A Comparative Forecasting Model of Monthly Rainfall in the Northeast of Thailand. **The Journal of King Mongkut's University of**

- Technology North Bangkok** 29(2): 302-313.
- Sukparungsee, S. 2003. Using the Combined Forecasting Technique by Weighted Average. **Journal of Technical Education Development** 15(46): 1-7. (in Thai)
- Taesombat, S. 2006. **Quantitative Forecasting**. Kasetsart University Press, Bangkok. (in Thai)
- The Electricity Generating Authority of Thailand. 2020. **Summary of the water situation and water management in EGAT reservoir in 2019**. Available Source: <http://water.egat.co.th/>, May 30, 2021. (in Thai)
- The Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology. 2014. **What have we gained and lost by building the dam**. Available Source: <http://primaryscience.ipst.ac.th/?p=257>, March 1, 2021. (in Thai)
- Weiss, C.E., Raviv, E. and Roetzer, G. 2018. Forecast Combinations in R using the ForecastComb Package. **The R Journal** 10(2): 262-281.

ลักษณะทางเคมี กายภาพ จุลชีววิทยา และคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ ลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกด้วยหอมทอง

Chemical, Physical, Microbiological Properties, and Nutritional Value of Vegan Tofu Meatballs Mixed with Banana Blossom (Hom Thong)

ธีรภาพ ปานคล้าย * ชมุก สร้างศรีวงศ์ เอวรีย์ ดีโว และ จีรวัดน์ เจริญอารีย์

Teerapap Panklai *, Schmuck Srangsriwong, Awareee Deewo and Girawat Reanaree

Received: 22 January 2022, Revised: 9 May 2022, Accepted: 27 May 2022

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางเคมี กายภาพ จุลชีววิทยา และคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกด้วยหอมทองเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเต้าหู้เจสูตรมาตรฐาน พบว่าสูตรลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกด้วยหอมทองมีค่าความสว่าง (L^*) มากกว่าสูตรมาตรฐาน ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การตรวจวิเคราะห์ proximate analysis พบว่า ปริมาณความชื้น ($71.17 \pm 0.18\%$) และโปรตีน ($9.68 \pm 0.11\%$) ของลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกด้วยหอมทองมีปริมาณมากกว่าลูกชิ้นเต้าหู้เจสูตรมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ปริมาณไขมัน ($6.67 \pm 0.07\%$) คาร์โบไฮเดรต ($11.39 \pm 0.21\%$) และเถ้า ($1.08 \pm 0.01\%$) น้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) คุณค่าทางโภชนาการที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป INMUCAL-Nutrients V.3 พบว่า พลังงาน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน แคลเซียม เหล็ก วิตามินบี 1 น้ำตาล และโซเดียม ของลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกด้วยหอมทองมีปริมาณน้อยกว่าลูกชิ้นเต้าหู้เจสูตรมาตรฐาน ในขณะที่ปริมาณวิตามินเอและวิตามินซีมีปริมาณมากกว่า ปริมาณสารโพลีฟีนอล (0.80 ± 0.04 mg gallic acid/g) ของลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกด้วยหอมทองมีปริมาณมากกว่าลูกชิ้นเต้าหู้เจสูตรมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) การตรวจวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยาโดยเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนลูกชิ้นหมู พบว่าผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกด้วยหอมทองมีปริมาณของจุลินทรีย์เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์ชุมชนลูกชิ้นหมู

คำสำคัญ: ลูกชิ้นเต้าหู้เจ, ปลีกด้วยหอมทอง, คุณค่าทางโภชนาการ, สารโพลีฟีนอล

สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120
Program in Food and Nutrition, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Khlong Luang, Pathum Thani 12120, Thailand.

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

ABSTRACT

This study aimed to analyze and compare the chemical, physical, microbiological properties, and nutritional value of vegan tofu meatballs mixed with banana blossom and the standard formula of vegan tofu meatballs. The results showed that vegan tofu meatballs mixed with banana blossom had more lightness (L^*) than the standard formula while red color (a^*) and yellow color (b^*) were not significantly different. Proximate analysis showed that moisture ($71.17 \pm 0.18\%$) and protein contents ($9.68 \pm 0.11\%$) of vegan tofu meatballs mixed with banana blossom were significantly higher than the standard formula. Fat ($6.67 \pm 0.07\%$), carbohydrate ($11.39 \pm 0.21\%$), and ash ($1.08 \pm 0.01\%$) were significantly lower than the standard formula ($p < 0.001$). The nutritional values which were calculated using the program INMUCAL-Nutrients V.3 revealed that the amount of energy, carbohydrate, protein, fat, calcium, iron, vitamin B1, sugar, and sodium contents in vegan tofu meatballs mixed with banana blossom were less than the standard formula while the amount of vitamin A and vitamin C were more than the standard formula. The vegan tofu meatballs mixed with banana blossom had more total phenolic compounds (0.80 ± 0.04 mg gallic acid/g) than the standard formula. Microbiological examination showed that vegan tofu meatballs mixed with banana blossom had no microorganisms exceeding the standard criteria (pork meatballs).

Key words: vegan tofu meatballs, Hom Thong banana blossom, nutritional value, polyphenols

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาด้านสุขภาพของประชากรในประเทศไทยมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีรายงานการสำรวจสุขภาพประชาชนไทยโดยการตรวจร่างกาย ครั้งที่ 5 ปี 2557 พบว่าประชากรไทยอายุ 15 ปีขึ้นไปเป็นโรคความดันโลหิตสูง (24.7 %) และโรคเบาหวาน (8.9 %) นอกจากนี้ยังพบความชุกของผู้ที่มีภาวะน้ำหนักเกิน (37.5 %) และผู้ที่มีภาวะอ้วน (10.9 %) ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การเกิดโรคและภาวะเหล่านี้คือการมีพฤติกรรม การเลือกบริโภคอาหารที่ไม่เหมาะสมและการมีกิจกรรมทางกายที่ลดลง (Institute for Population and Social Research, Mahidol University, 2017)

จังหวัดปทุมธานีมีพื้นที่ปลูกกล้วยหอมกระจายอยู่ทุกอำเภอ โดยจากข้อมูลการปลูกกล้วย

หอมในปี 2561/62 พบว่า จังหวัดปทุมธานีมีพื้นที่เพาะปลูกกล้วยหอม จำนวน 13,730.25 ไร่ อำเภอที่มีการปลูกกล้วยหอมมากที่สุด ได้แก่ อำเภอหนองเสือ รองลงมาอำเภอเมืองปทุมธานี สามโคก คลองหลวง รัษฎบุรี ลำลูกกา และลาดหลุมแก้ว ตามลำดับ มีเกษตรกรปลูกกล้วยหอม ทั้งสิ้น 812 ครัวเรือน ซึ่งมีปริมาณผลผลิตกล้วยหอมรวม 46,147,690 กิโลกรัม หรือ 46,147.69 ตัน คิดเป็นผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 3,361.02 กิโลกรัม/ไร่ (Pathum Thani Provincial Agricultural Extension Office, 2020) จากข้อมูลจะพบว่าจังหวัดปทุมธานีมีการปลูกกล้วยหอมในปริมาณมาก ซึ่งกล้วยหอมเมื่อเริ่มแทงปลีออกมาแล้วผ่านไป 30 วันจะมีการตัดปลีกล้วยทิ้ง ดังนั้นจึงมีปลีกล้วยเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากปลีกล้วยหรือหัวปลีคือส่วนที่เป็นดอกของต้นกล้วย

ปลีกล้วยมักถูกนิยมนำมาปรุงเป็นอาหารในรูปแบบต่างๆ อาทิ รับประทานเป็นผักเคียงคู่กับน้ำพริกหรือปรุงเป็นแกงชนิดต่างๆ และมีงานวิจัยที่นำปลีกล้วยมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารชนิดต่างๆ เช่น การทำปลีกล้วยให้เป็นผงและผสมในเนื้อเค้ก (Tasnim *et al.*, 2020) หรือบิสกิต (Elaveniya and Jayamuthunagai, 2014) การนำปลีกล้วยมาบดและผสมเป็นน้กเก็ต (Abdul Wahab *et al.*, 2020) การนำปลีกล้วยมาทำเป็นชาขงสำเร็จรูป (Amornlerdpison *et al.*, 2016) หรือการนำปลีกล้วยมาบดผสมกับเห็ดทำเป็นลูกชิ้น (Chaiwongsa *et al.*, 2021) เป็นต้น ปลีกล้วยถือว่าเป็นผักหรือสมุนไพรที่มีรสฝาด มีสรรพคุณช่วยเพิ่มน้ำนม (Faculty of Public Health, Mahidol University, 2014) ซึ่งปลีกล้วยปริมาณ 100 กรัม ให้พลังงาน 24 กิโลแคลอรี โปรตีน 1.58 กรัม ไขมัน 0.36 กรัม คาร์โบไฮเดรต 1.52 กรัม และใยอาหาร 4.26 กรัม (Institute of Nutrition, Mahidol University, 2015) นอกจากนี้มีรายงานวิจัยพบว่าปลีกล้วยมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Muchahary and Deka, 2021; Nuchsuk, 2018; Thaweesang, 2019; Khongkhon *et al.*, 2017) ฤทธิ์ลดระดับโคเลสเตอรอลและระดับน้ำตาลในเลือด (Liyanage *et al.*, 2016) และฤทธิ์ด้านการอักเสบ (Khongkhon *et al.*, 2017) เป็นต้น

ลูกชิ้นเป็นผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปที่มีผู้นิยมบริโภคเป็นอย่างมากเนื่องจากมีรสชาติที่อร่อย บริโภคได้ง่าย และสามารถนำไปประกอบอาหารได้หลากหลายเมนู (Bureau of Food and Water Sanitation, Department of Health, Ministry of Public Health, 2014) ผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นจะมีความแตกต่างกันในด้านของคุณภาพและสารอาหารทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมในการผลิต จากงานวิจัยที่ศึกษาและวิเคราะห์

คุณค่าทางโภชนาการของลูกชิ้นในกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ อุตสาหกรรมขนาดกลาง และอุตสาหกรรมในครัวเรือน พบว่า ปริมาณของพลังงาน ความชื้น คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ของทั้ง 3 กลุ่มไม่แตกต่างกัน ปริมาณโคเลสเตอรอลและน้ำตาลในกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดกลางมีแนวโน้มสูงกว่ากลุ่มอื่นๆ ปริมาณของโปรตีนและเถ้าในกลุ่มอุตสาหกรรมในครัวเรือนมีแนวโน้มต่ำกว่ากลุ่มอื่นๆ ปริมาณแป้งในกลุ่มอุตสาหกรรมในครัวเรือนมีแนวโน้มสูงที่สุด ปริมาณโปรแตสเซียมในกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มีแนวโน้มสูงกว่าในกลุ่มอื่นๆ ปริมาณฟอสฟอรัสในกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดกลางมีแนวโน้มสูงที่สุด และปริมาณโซเดียมและเหล็กในกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มีแนวโน้มสูงที่สุด (Chan-Urai, 2004) ดังนั้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นให้ผู้ที่มีส่วนผสมของปลีกล้วยหอมทองจึงเป็นการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับผลิตภัณฑ์ลูกชิ้น

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะทางเคมี กายภาพ จุลชีววิทยา และคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นจากผู้ผสมปลีกล้วยหอมทอง สำหรับเป็นอาหารทางเลือกใหม่เพื่อสุขภาพ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นจากผู้ผสมปลีกล้วยหอมทอง

1.1 ผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นจากผู้ผสมปลีกล้วยหอมทองที่เลือกใช้ในการศึกษานี้มีอัตราส่วนผสมระหว่างเต้าหู้ขาว: ปลีกล้วยหอมทองร้อยละ 50:50 (ตารางที่ 1) (Panklai *et al.*, 2021)

ตารางที่ 1 ปริมาณร้อยละของส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเต้าหู้เจ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)	
	สูตรมาตรฐาน	สูตรผสมปลีกล้วยหอมทอง
ปลีกล้วยหอมทอง	-	26.60
เต้าหู้	72.46	53.19
แป้ง	14.49	10.64
น้ำมัน	2.90	2.13
เครื่องปรุงและเครื่องเทศ	0.87	7.44

2. การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี จุลชีววิทยา และคุณค่าทางโภชนาการ

2.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การตรวจวัดสี (Color measurement) โดยใช้เครื่อง portable colorimeter รุ่น CR-10

2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ การตรวจวิเคราะห์ proximate analysis ประกอบด้วย ความชื้น เถ้า ไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต ตามวิธี AOAC (2016) และวิเคราะห์ปริมาณของสารโพลีฟีนอล (Total phenolic compounds) ตามวิธีของ Singleton and Rossi (1965)

2.3 การศึกษาคุณสมบัติทางจุลชีววิทยา ได้แก่ การตรวจวัดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total plate count) ด้วยวิธี FDA BAM online (2001) (Maturin and Peeler, 2001), เชื้อ *Vibrio cholerae* ด้วยวิธี FDA BAM online (2004) (Kaysner et al., 2004), เชื้อ *Bacillus cereus* ด้วยวิธี ISO 7932 (2004), เชื้อ *Clostridium perfringens* ด้วยวิธี ISO 7937 (2004), เชื้อ *Escherichia coli* ด้วยวิธี FDA BAM online (2017) (Feng et al., 2017), เชื้อ *Listeria monocytogenes* ด้วยวิธี ISO 11290-1 (2017), เชื้อ *Salmonella* spp. ด้วยวิธี ISO 6579-1 (2017) และ เชื้อ *Staphylococcus aureus* ด้วยวิธี AOAC (2019)

2.4 การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป INMUCAL-Nutrients V.3 (Institute of Nutrition, Mahidol University, 2013) สำหรับคำนวณ

หาค่าพลังงาน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน วิตามิน และแร่ธาตุต่างๆ

3. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างตัวแปร 2 ตัว (Independent-samples t-test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ($p < 0.01$) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for windows

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี จุลชีววิทยา และคุณค่าทางโภชนาการ

1.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพด้านค่าสี ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพด้านค่าสีพบว่า สูตรลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกล้วยหอมทองมีความสว่าง (L^*) มากกว่าสูตรมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Elaveniya and Jayamuthunagai (2014) พบว่า ค่าสี L^* ของบิสกิตที่มีส่วนผสมของปลีกล้วยผงมีค่ามากกว่าสูตรของบิสกิตที่ไม่มีส่วนผสมของปลีกล้วยผง ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และจากงานวิจัยของ Chaiwongsa et al. (2021) ให้ผลในทางตรงกันข้ามโดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปลีกล้วย

ลงในลูกชิ้นทำให้ค่า L^* ลดลงและค่า a^* เพิ่มขึ้นซึ่งอาจเป็นผลมาจากขั้นตอนการเตรียมปลีกกล้วยที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 2)

1.2 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี พบว่า ลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกกล้วยหอมทองมีปริมาณความชื้น โปรตีน และสารโพลีฟีนอลมากกว่าลูกชิ้นเต้าหู้เจสูตรมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่มีปริมาณไขมัน คาร์โบไฮเดรต และถั่วเน่าต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Elaveniya and Jayamuthunagai (2014) พบว่าบิสกิตที่ผสมปลีกกล้วยผงมีค่าโปรตีนมากกว่าบิสกิตที่ไม่ได้ผสมผงปลีกกล้วย และมีค่าไขมันน้อยกว่าเช่นเดียวกัน

1.3 การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการ

ผลการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการ พบว่าพลังงาน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน แคลเซียม เหล็ก วิตามิน บี 1 น้ำตาล และโซเดียม ของลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกกล้วยหอมทองมีปริมาณน้อยกว่าลูกชิ้นเต้าหู้เจสูตรมาตรฐาน ในขณะที่มีปริมาณ

วิตามิน เอ และวิตามิน ซี มากกว่า และร้อยละการกระจายตัวของพลังงานมีความใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลคุณค่าทางโภชนาการของสถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล (Institute of Nutrition, Mahidol University, 2015) พบว่าปริมาณปลีกกล้วยดิบ 100 กรัม มีปริมาณพลังงาน โปรตีน ไขมัน แคลเซียม เหล็ก และโซเดียม น้อยกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณเต้าหู้ขาวชนิดแข็ง 100 กรัม ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าเมื่อลดปริมาณเต้าหู้ขาวและเพิ่มปริมาณปลีกกล้วยในสูตรลูกชิ้นเต้าหู้เจทำให้ปริมาณสารอาหารบางชนิดลดลงด้วยเช่นกัน

1.4 การศึกษาคุณสมบัติทางจุลชีววิทยา

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกกล้วยหอมทองโดยทำการวิเคราะห์และเทียบเคียงกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนลูกชิ้นหมู (Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, 2012) พบว่า ลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกกล้วยหอมทอง มีปริมาณของจุลินทรีย์เป็นไปตามเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนลูกชิ้นหมูดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพ เคมีของผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเต้าหู้เจ

คุณสมบัติ	สูตรมาตรฐาน	สูตรผสมปลีกกล้วยหอมทอง	p value*
ทางกายภาพ			
ค่าสี			
L^*	46.13 ± 1.50	50.97 ± 0.68	<0.01
a^*	1.37 ± 1.12	2.70 ± 1.83	ns
b^*	15.73 ± 3.69	14.80 ± 0.26	ns
ทางเคมี			
ความชื้น (ร้อยละ)	64.11 ± 0.20	71.17 ± 0.18	<0.001
โปรตีน (ร้อยละ)	9.33 ± 0.08	9.68 ± 0.11	<0.01
ไขมัน (ร้อยละ)	8.69 ± 0.19	6.67 ± 0.07	<0.001

ตารางที่ 2 (ต่อ)

คุณสมบัติ	สูตรมาตรฐาน	สูตรผสมปลีก้วยหอมทอง	<i>p</i> value*
ทางเคมี			
เถ้า (ร้อยละ)	1.35 ± 0.01	1.08 ± 0.01	<0.001
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	16.52 ± 0.26	11.39 ± 0.21	<0.001
สารโพลีฟีนอล (mg gallic acid/g)	0.15 ± 0.01	0.80 ± 0.04	<0.001

หมายเหตุ * หมายถึง วิเคราะห์ความแตกต่างตัวแปร 2 ตัว (Independent-Samples T Test) ระหว่างสูตรมาตรฐานและสูตรผสมปลีก้วยหอมทองที่นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ตารางที่ 3 คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเต้าหู้เจ

สารอาหาร	หน่วย	สูตรมาตรฐาน	สูตรผสมปลีก้วยหอมทอง
ปริมาณลูกชิ้นเจต่อหนึ่งลูก	กรัม	10	10
พลังงาน	กิโลแคลอรี	17	13
คาร์โบไฮเดรต	กรัม	1.70	1.40
โปรตีน	กรัม	0.95	0.74
ไขมัน	กรัม	0.72	0.54
แคลเซียม	มิลลิกรัม	3.97	3.43
เหล็ก	มิลลิกรัม	0.30	0.24
วิตามิน เอ	อาร์เออี	0	0.24
วิตามิน บี 1	มิลลิกรัม	0.01	0
วิตามิน บี 2	มิลลิกรัม	0	0
วิตามิน ซี	มิลลิกรัม	0.01	0.43
น้ำตาล	กรัม	0.35	0.26
โซเดียม	มิลลิกรัม	63.43	46.63
การกระจายตัวของพลังงาน (คาร์โบไฮเดรต: โปรตีน: ไขมัน)	ร้อยละ	40: 22: 38	42: 22: 36

ที่มา: คำนวณจากโปรแกรมสำเร็จรูป INMUCAL-Nutrients V.3

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกด้วยหอมทอง

จุลินทรีย์	ลูกชิ้นเจผสมปลีกด้วยหอมทอง	มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนลูกชิ้นหมู*
Total Plate Count (cfu/g)	$< 2.5 \times 10^2$	$< 1 \times 10^6$
<i>Salmonella</i> spp. (/25 g)	ไม่พบ	ไม่พบ
<i>Staphylococcus aureus</i> (cfu/g)	< 10	< 100
<i>Bacillus cereus</i> (cfu/g)	< 10	< 100
<i>Clostridium perfringens</i> (cfu/g)	< 10	< 100
<i>Listeria monocytogenes</i> (/25 g)	ไม่พบ	ไม่พบ
<i>Vibrio cholerae</i> (/25 g)	ไม่พบ	ไม่พบ
<i>Escherichia coli</i> (MPN/g)	< 3	< 3

* ที่มา: Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, 2012

สรุป

จากการศึกษา พบว่า ลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกด้วยหอมทองมีปริมาณของโปรตีนและสารโพลีฟีนอลมากกว่าลูกชิ้นเต้าหู้เจสูตรมาตรฐาน ในขณะที่ปริมาณของพลังงาน คาร์โบไฮเดรต และไขมันมีปริมาณที่น้อยกว่า ซึ่งจะเห็นได้ว่าการผสมปลีกด้วยหอมทองในลูกชิ้นเต้าหู้เจสามารถช่วยปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการให้กับลูกชิ้นเต้าหู้เจได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกด้วยหอมทองจึงสามารถเป็นตัวเลือกหรืออาหารทางเลือกใหม่เพื่อสุขภาพสำหรับผู้สนใจในการดูแลสุขภาพ เพื่อช่วยลดโอกาสเสี่ยงของการเกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (non-communicable diseases; NCDs) ที่พบในปัจจุบันมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับทุนสนับสนุนในโครงการการพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นเต้าหู้เจผสมปลีกด้วยหอมทอง เลขที่สัญญา

ABCRMUTT61B1-05 และขอขอบคุณ บริษัท วันบานาน่า จำกัด ที่ให้การสนับสนุนปลีกด้วยหอมทองในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Abdul Wahab, N.B., Nasiroh Ismail, S. and Shah Zainal Abidin, M.H. 2020. Physicochemical and Sensory Characteristics of Banana Blossom Nuggets. **International Journal of Research and Innovation Management** 6(1): 56-66.
- Amornlerdpison, D., Junthip, R. and Jamjai, U. 2016. Antioxidant Activity and Active Compound from Banana Blossom Beverage, pp. 1360-1365. **In The 3rd Conference on Research and Creative Innovation CRCI-2016**. Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai. (in Thai)
- AOAC. 2019. **Official methods of analysis**. 21st ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC, USA.

- AOAC. 2016. **Official Methods of Analysis**. 20th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC, USA.
- Bureau of Food and Water Sanitation, Department of Health, Ministry of Public Health. 2014. **Academic guide for controlling of meatball production with machine operations**. Available Source: http://thaifranchisedownload.com/dl/file_9312_2020070715.pdf, October 28, 2021. (in Thai)
- Chaiwongsa, K., Charoenvitayavorakul, N., Pakasap, C. and Khuenpet, K. 2021. Effect of banana blossom substitution on quality characteristic of plant-based shiitake mushroom balls. **Asia-Pacific Journal of Science and Technology** 26(3): 1-10.
- Chan-Urai, P. 2004. Nutritive values of meat ball products. Master Thesis of Science (Nutrition), Mahidol University. (in Thai)
- Elaveniya, E. and Jayamuthunagai, J. 2014. Functional, Physicochemical and Anti-oxidant properties of Dehydrated Banana Blossom Powder and its Incorporation in Biscuits. **International Journal of Chem Tech Research** 6(9): 4446-4454.
- Faculty of Public Health, Mahidol University. 2014. **Herbal food to increase milk**. Journal of Faculty of Public Health. Available Source: https://www.ph.mahidol.ac.th/newsletter/57/16_119.pdf, October 28, 2021. (in Thai)
- Feng, P., Weagant, S.D., Grant, M.A. and Burkhardt, W. 2017. **BAM Chapter 4: Enumeration of Escherichia coli and the Coliform Bacteria**. Laboratory Methods (Food). Available Source: <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-4-enumeration-escherichia-coli-and-coliform-bacteria>, November 15, 2021.
- Institute of Nutrition, Mahidol University. 2013. **Program INMUCAL-Nutrients V.3 aggregate data platform NB1 (Program computer)**. Published documents, Institute of nutrition, Mahidol University, Nakhon Pathom. (in Thai)
- Institute of Nutrition, Mahidol University. 2015. **Online Thai Food composition database 2015**. Available Source: https://inmu2.mahidol.ac.th/thaifcd/search_food_by_name_result.php?food_id=623&rk=, November 15, 2021. (in Thai)
- Institute for Population and Social Research, Mahidol University. 2017. **Empowering Vulnerable Populations Creating an Inclusive Society**. Thai Health 2017. Available Source: <https://www.dropbox.com/s/170oujqallw48pp/ThaiHealth2017EN.pdf?dl=0>, October 28, 2021. (in Thai)
- ISO 7932. 2004. Microbiology of food and animal feeding stuffs-Horizontal method for the enumeration of presumptive *Bacillus cereus*-Colony-count technique at 30 degrees °C.
- ISO 7937. 2004. Microbiology of food and animal feeding stuffs-Horizontal method for the enumeration of *Clostridium perfringens*-Colony-count technique.:2004.
- ISO 11290-1. 2017. Microbiology of the food chain -Horizontal method for the detection and enumeration of *Listeria monocytogenes* and of *Listeria* spp. In: Part 1: Detection method.

- ISO 6579-1. 2017. Microbiology of the food chain
- Horizontal method for the detection, enumeration and serotyping of *Salmonella*
- Part 1: Detection of *Salmonella* spp.
- Kaysner, C.A., DePaola, A., Jr. and Jones, J. 2004. **BAM Chapter 9: Vibrio**. Laboratory Methods (Food). Available Source: <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-9-vibrio>, November 15, 2021.
- Khongkhon, S., Ruangnoo, S. and Itharat, A. 2017. Inhibition of LPS-Induced Nitric Oxide Production in RAW 264.7 Cell Lines, DPPH Radical Scavenging and Total Phenolic Content of Banana (*Musa sapientum*) Blossom Extracts. **Journal of the Medical Association of Thailand** 100(Suppl. 5): S67-S73.
- Liyanage, R., Gunasegaram, S., Visvanathan, R., Jayathilake, C., Weththasinghe, P., Jayawardana, B.C. and Vidanarachchi, J.K. 2016. Banana Blossom (*Musa acuminata* Colla) Incorporated Experimental Diets Modulate Serum Cholesterol and Serum Glucose Level in Wistar Rats Fed with Cholesterol. **Cholesterol** 2016(21): 1-6.
- Maturin, L. and Peeler, J.T. 2001. **BAM Chapter 3: Aerobic Plate Count**. Laboratory Methods (Food). Available Source: <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-3-aerobic-plate-count>, November 15, 2021.
- Muchahary, S. and Deka, S.C. 2021. Impact of supercritical fluid extraction, ultrasound-assisted extraction, and conventional method on the phytochemicals and antioxidant activity of bhimkol (*Musa balbisiana*) banana blossom. **Journal of Food Processing and Preservation** 45(7): e15639.
- Nuchsuk, C. 2018. Antioxidant Activity of Crude Extract from Banana Flower of *Musa* AA cv. “Kluai Khai”, *Musa* ABB cv. “Kluai Namwa” and *Musa* AAA “Kluai Hom. **Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal** 10(12): 1-10. (in Thai)
- Panklai, T., Srangsiwong, S., Deewo, A. and Reanaree, G. 2021. Product Development of Vegan Tofu Meatballs Mixed with Banana Blossom. **EAU Heritage Journal Science and Technology** 15: 130-138. (in Thai)
- Pathum Thani Provincial Agricultural Extension Office. 2020. **Hom Banana**. Information for planning the development of agricultural and product cooperatives in Pathum Thani Province 2020. Available Source: <https://www.opsmoac.go.th/pathumthani-dwl-files-421391791163>, October 28, 2021. (in Thai)
- Singleton, V.L. and Rossi, J.A. 1965. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagent. **American Journal of Enology and Viticulture** 16: 144-158.
- Tasnim, T., Das, P.C., Begum, A.A., Nupur, A.H. and Mazumder, Md.A.R. 2020. Nutritional, textural and sensory quality of plain cake enriched with rice rinsed water treated banana blossom flour. **Journal of Agriculture and Food Research** 2: 100071.
- Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry. 2012. **Pork Meatballs**. Thai Community

Product Standard. Available Source: http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0304_55(ลูกชิ้นหมู). pdf, November 15, 2021. (in Thai)

Thaweesang, S. 2019. Antioxidant activity and Total Phenolic compounds of Fresh and Blanching Banana blossom (*Musa ABB CV.Kluai "Namwa"*)

in Thailand, pp. 1-7. In **3rd International Conference on Chemistry and Energy Research**. IOP Publishing, Shenzhen, China.

การเจริญเติบโตและผลผลิตของดาวเรืองที่ปลูกในจังหวัดสงขลา

Growth and Yield of Marigold Planted in Songkhla Province

พงษ์ศักดิ์ มานสุริวงศ์* วิชัย หวังวโรดม และ สมปอง เตชะโต

Pongsak Mansuriwong*, Vichai Wongvarodom and Sompong Te-chato

Received: 12 May 2021, Revised: 21 April 2022, Accepted: 29 April 2022

บทคัดย่อ

การศึกษาการเจริญเติบโต และผลผลิตของดาวเรือง 20 พันธุ์ ที่สาขาวิชานวัตกรรมและการเกษตรและการจัดการ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ ถึง มิถุนายน 2561 วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) จำนวน 4 ซ้ำ การทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกพันธุ์ดาวเรืองที่เหมาะสมต่อการปลูกเป็นการค้าในจังหวัดสงขลา และพื้นที่ใกล้เคียง พบว่า ดาวเรืองทั้ง 20 พันธุ์ มีอัตราการรอดตายสูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ที่อายุ 30 วันหลังย้ายปลูก มีการเจริญเติบโตทางลำต้นดี และให้ผลผลิตสูงอยู่ในช่วง 121,174.85-193,886.87 ดอกต่อไร่ นอกจากนี้ยังพบว่า พันธุ์ TLG 5011 F₁, Sri siam gold, F₁ Noppakun gold, Cana gold extra และ Tongtep 05 ทนโรคได้ดี และให้ผลผลิตสูงอยู่ในช่วง 158,579.76-189,824.60 ดอกต่อไร่ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดอกอยู่ในช่วง 3.52-8.62 เซนติเมตร ดอกมีอายุในการปักแจกันของทุกพันธุ์อยู่ในช่วง 6.00-9.25 วัน และดอกมีสีเหลืองทอง ซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาดในอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

คำสำคัญ: ดาวเรือง, การเจริญเติบโต, ผลผลิต, พันธุ์, สงขลา

สาขาวิชานวัตกรรมและการเกษตรและการจัดการ (วิชาเอกพืชศาสตร์) คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Agricultural Innovation and Management Division (Plant science), Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): pongsak039@gmail.com Tel: 08 1969 7502

ABSTRACT

Growth and yield of twenty varieties of marigold were evaluated at Agricultural Innovation and Management Division, Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Hat Yai district, Songkhla province during February and June 2018. The experimental design was a Randomized Complete Block Design (RCBD) with 4 replications. The aim of this study was to select suitable varieties for commercial growing in Songkhla province and nearby areas. It was found that all of marigold varieties had a survival rate higher than 80% at 30 days after transplanting with good vegetative growth performances and high flower yield ranging from 121,174.85-193,886.87 flowers/rai. Moreover, the results revealed that varieties TLG 5011 F₁, Sri siam gold, F₁ Noppakun gold, Cana gold extra and Tongtep 05 tolerated to diseases and had the number of flowers ranging from 158,579.76-189,824.60 flowers/rai, flower size at 3.52-8.62 cm in diameter, prolong vase life of marigold for 6.00-9.25 days and yellow - orange color which are marketable in Hat Yai district, Songkhla province.

Key words: marigold, growth, yield, variety, Songkhla

บทนำ

ดาวเรือง (*Tagetes erecta* L.) หรือชื่อท้องถิ่นอื่นที่รู้จักกัน เช่น คำปู้จู้ คำปู้จู้หลวง (พวยัพ) บ่วงลิ้วเก็ก เจาหู้ยัง กิมเก็ก (จีน) (Kasemsap, 1989) เป็นไม้ดอกที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจในระดับโลกมาอย่างยาวนานโดยจัดอยู่ 1 ใน 3 อันดับแรกของไม้ดอกประดับแปลงในสหรัฐอเมริกา คือ ดาวเรือง พิทูเนีย และบานชื่น (USDA, 2013) รวมถึงเป็นไม้ตัดดอกที่ได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องในประเทศแถบทวีปเอเชีย เช่น อินเดีย เนปาล และไทย (Sangwan *et al.*, 2010) ประเทศไทยนิยมปลูกดาวเรืองเพื่อตัดดอกจำหน่าย ปลูกเป็นไม้ประดับแปลง ไม้กระถางเพื่อประดับตกแต่งอาคารบ้านเรือนและสถานที่ต่างๆ ดาวเรืองเป็นไม้ดอกที่มีการเจริญเติบโตเร็ว แข็งแรงไม่ค่อยมีโรคหรือแมลงรบกวน ออกดอกเร็ว ดอกดกมีอายุการเก็บเกี่ยวสั้นให้ผลตอบแทนสูง รูปทรงของดอกสวยงาม สีสดใส ใบแบนทนนานหลายวันสามารถปักแจกันได้นาน 1-2 สัปดาห์ ปลูกได้ทั่วประเทศของประเทศไทย และปลูกได้ตลอดทั้งปี

(Uthairatanakij and Obsuwan, 2007) ในปีการเพาะปลูก พ.ศ. 2560 พบว่าประเทศไทยมีเนื้อที่เพาะปลูกดาวเรืองทั้งหมด 5,609 ไร่ มีเนื้อที่ที่เก็บเกี่ยวได้ 5,129 ไร่ ผลผลิตรวมที่เก็บเกี่ยวได้ 26,221.22 ตัน (Department of Agricultural Extension, 2018) แหล่งปลูกที่สำคัญได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่ พะเยา ลำปาง นนทบุรี กรุงเทพฯ ราชบุรี สมุทรสาคร สุพรรณบุรี และอุดรธานี แหล่งปลูกในภาคใต้ ได้แก่ จังหวัดตรัง สุราษฎร์ธานี และสงขลา (Department of Agricultural, 2017)

ดาวเรืองเป็นไม้ดอกที่ตลาดมีความต้องการตลอดทั้งปี ปัจจุบันมีการสนับสนุนส่งเสริมให้ปลูกดาวเรืองเป็นอาชีพหลักและอาชีพเสริมของเกษตรกรและผู้สนใจ ทำให้สามารถสร้างรายได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่จำเป็นต้องใช้พื้นที่มากเหมือนพืชอื่น สามารถกำหนดระยะเวลาการออกดอกให้ตรงกับเทศกาลสำคัญ เช่น วันสำคัญทางพระพุทธศาสนา วันตรุษจีน วันสารทไทย เป็นต้น จังหวัดสงขลาเป็นศูนย์กลางการค้าและการท่องเที่ยวที่สำคัญของภาคใต้ ตลาด

หรือผู้บริโภคมีความต้องการใช้ดอกดาวเรืองเป็นประจำทุกวันตลอดทั้งปีเป็นจำนวนมาก โดยดาวเรืองดอกสีเหลืองทองเป็นที่นิยมอย่างมากในตลาดผู้บริโภคในจังหวัดสงขลา ดังนั้น ดาวเรืองจึงเป็นไม้ดอกที่มีศักยภาพทางการตลาดที่ชัดเจนในพื้นที่อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยดาวเรืองที่มีจำหน่ายอยู่ในอำเภอหาดใหญ่ขนส่งมาจากภูมิภาคอื่นทำให้มีคุณภาพดกดกลดลงอย่างมาก เช่น ดอกข้าเหี่ยว สีไม่สด เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่าดาวเรืองจะเป็นพืชที่สามารถปลูกได้ทั่วทุกภาคของประเทศไทย (Uthairatanakij and Obsuwan, 2007) แต่การเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของดาวเรืองแตกต่างกันไปตามพื้นที่ปลูกและพันธุ์ โดยพันธุ์ Khun tan gold มีลำต้นสูง ทรงพุ่มใหญ่ ดอกใหญ่ ก้านดอกยาว พันธุ์ King yellow, Chiang Mai yellow, Calor และ Venus yellow มีลำต้นเตี้ย ทรงพุ่มแน่น ก้านดอกสั้น มีอายุการออกดอกเร็ว (Srioon, 2016) เช่นเดียวกับดาวเรืองแอฟริกัน พันธุ์ Tuljapur Local-1, Pakharsangavi Local และ Tuljapur Local-2 มีลำต้นสูง และให้ดอกต่อเนื่องสูง (Shivakumar and Srinivasa, 2017) ในการทดลองครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตและผลผลิตของดอกดาวเรืองพันธุ์ตัดดอกที่เหมาะสมและมีศักยภาพต่อการผลิตเป็นดาวเรืองตัดดอกในจังหวัดสงขลาต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. แผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block (RCB) ประกอบด้วย 20 ทรีตเมนต์ (พันธุ์) คือ T₁- Cana yellow, T₂- TLY 4805 F₁, T₃- F₁ Golden millionaire, T₄- Ruam daw 16, T₅- Ruam daw 30, T₆- F₁ Maruay, T₇- F₁ Khun sap, T₈- Srisupran yellow, T₉- F₁ Noppakun gold, T₁₀- Tongtep 05, T₁₁- Bali gold, T₁₂- TLG 5011 F₁, T₁₃-

Cana gold, T₁₄- Sri siam deep gold, T₁₅- Cana gold extra, T₁₆- TLG 5012 F₁, T₁₇- Sri siam gold, T₁₈- 018 Gold, T₁₉- Teevee F₁ และ T₂₀- Narai orange ทำการทดลองจำนวน 4 ซ้ำๆ ละ 20 ต้น และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ (Soonsuwon, 2002)

2. การปลูก

เพาะเมล็ดพันธุ์ดาวเรืองในวันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2561 ที่แปลงทดลองสาขาวิชาวนวัฒนกรรมเกษตรและการจัดการ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ในถาดเพาะพลาสติกขนาด 72 หลุม ใช้พีทมอสเป็นวัสดุเพาะ รดน้ำเช้าและบ่าย ดูแลจนต้นกล้ามีอายุ 2 สัปดาห์หลังเพาะเมล็ดพันธุ์ เตรียมแปลงปลูกโดยการไถตากดินประมาณ 2 สัปดาห์ จากนั้นทำการไถดะ ไถแปร และไถพรวน และทำการยกแปลงขนาด 1×5 เมตร ใช้ระยะระหว่างแปลง 0.50 เมตร ก่อนปลูกใส่ปุ๋ยขาวอัตรา 100 กิโลกรัมต่อไร่ เพื่อปรับสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ผสมกับปุ๋ยคอกอัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ และรองก้นหลุมด้วยปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 20 กิโลกรัมต่อไร่ ปลูกเป็นแถว ใช้ระยะปลูก 50×50 เซนติเมตร

ย้ายต้นกล้าที่เตรียมไว้ลงปลูกในแปลงปลูก ก่อนการย้ายปลูกทำให้ต้นกล้าคุ้นเคยกับสภาพแวดล้อมในแปลงปลูก โดยให้แสงแดดมากขึ้น และรดน้ำน้อยลง ย้ายปลูกต้นกล้าในตอนเย็น และปลูกซ่อมต้นกล้าหลังย้ายปลูกภายใน 1 สัปดาห์

การปฏิบัติดูแลรักษา ให้น้ำแบบสายน้ำพุ่งวันละ 2 ครั้ง ช่วงเช้าและบ่าย สัปดาห์ที่ 1 หลังจากย้ายปลูก ให้ปุ๋ยเคมีสูตร 21-0-0 อัตรา 35 กิโลกรัมต่อไร่ สัปดาห์ที่ 2 หลังจากย้ายปลูก ทำการเด็ดยอด นิดพินยาฆ่าแมลงคาร์โบซัลแฟน 2 มิลลิลิตร/น้ำ 1 ลิตร 2 ครั้ง และใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัม

ต่อไร่ พร้อมการพูนโคนและกำจัดวัชพืช สัปดาห์ที่ 3 หลังจากย้ายปลูก ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 21-0-0 อัตรา 35 กิโลกรัมต่อไร่ และใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ สัปดาห์ที่ 4 ฉีดพ่นยาฆ่าแมลงอะบาเม็กติน 3 มิลลิกรัม/น้ำ 1 ลิตร 2 ครั้ง เพื่อป้องกันและกำจัดหนอน เพลี้ยชนิดต่างๆ และแมลงศัตรูชนิดอื่นๆ และใช้สารป้องกันกำจัดเชื้อราควินโทซีนร่วมกับอิทธิโดอะโซล 1 มิลลิกรัม/น้ำ 1 ลิตร ราดที่โคนต้น 2 ครั้ง เพื่อป้องกันการระบาดของโรคโคนเน่า

ทำการเก็บข้อมูลด้านอัตราการรอดตายหลังย้ายปลูก 30 วัน ความสูงของต้น (โดยวัดความสูงตั้งแต่โคนต้นจนถึงปลายยอด) ความกว้างทรงพุ่ม (โดยวัดจากปลายใบด้านข้างของทรงพุ่มที่ยาวที่สุด จนถึงปลายใบที่ยาวที่สุดด้านตรงกันข้าม) จำนวนกิ่งแขนง สุ่มวัดจำนวน 10 ต้นต่อแปลง จำนวนกิ่งแขนง นิกหัก เปอร์เซ็นต์การเข้าทำลายของโรค อายุการออกดอก สีดอกตามสิมาตรฐานของ The Royal Horticultural Society, London จำนวนดอกต่อต้น เส้นผ่าศูนย์กลางดอก จำนวนดอกแยกตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง จำนวนดอกแต่ละขนาด ความยาวก้านดอก สุ่มวัด 10 ดอกต่อแปลง และอายุการใช้งานของดอก

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การจำแนกกลุ่มของพันธุ์ดาวเรืองด้วยสีดอก เพื่อประโยชน์จากการใช้งานของดาวเรืองที่หลากหลาย โดยเฉพาะดอกที่นำมาใช้ในพิธีการต่างๆ สามารถแบ่งกลุ่มสีดอกเป็น 3 กลุ่มสี คือ สีเหลือง (yellow) สีเหลืองทอง (yellow-orange) และสีส้ม (orange) (ตารางที่ 1) โดยพันธุ์ที่มีดอกสีเหลือง จำนวน 8 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ T₁- Cana yellow, T₂- TLY 4805 F₁, T₃- F₁ Golden millionaire, T₄- Ruam daw 16, T₅- Ruam daw 30, T₆- F₁ Maruay, T₇- F₁ Khun sap และ T₈-

Srisupran yellow พันธุ์ที่มีดอกสีเหลืองทอง จำนวน 11 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ T₉- F₁ Noppakun gold, T₁₀- Tongtep 05, T₁₁- Bali gold, T₁₂- TLG 5011 F₁, T₁₃- Cana gold, T₁₄- Sri siam deep gold, T₁₅- Cana gold extra, T₁₆- TLG 5012 F₁, T₁₇- Sri siam gold, T₁₈- 018 Gold และ T₁₉- Tevee F₁ และพันธุ์ที่มีดอกสีส้ม จำนวน 1 พันธุ์ คือ พันธุ์ T₂₀- Narai orange

1. การเจริญเติบโต

จากการศึกษา พบว่า อัตราการรอดตาย ดาวเรืองทั้ง 20 พันธุ์ มีอัตราการรอดตายที่ 30 วันหลังย้ายปลูก 30 วัน สูงกว่า 80 เปอร์เซนต์ โดยดาวเรืองพันธุ์ T₁, T₃, T₆ และ T₁₂ มีอัตราการรอดตายสูงสุด 100 เปอร์เซนต์ แต่ไม่แตกต่างทางสถิติ กับพันธุ์ T₂, T₄, T₅, T₇, T₉, T₁₀, T₁₃, T₁₄, T₁₅, T₁₆, T₁₇, T₁₈ และ T₁₉ ที่มีอัตราการรอดตายอยู่ในช่วง 96.25 - 98.75 เปอร์เซนต์ ส่วนพันธุ์ T₂₀ มีอัตราการรอดตายต่ำสุด 80 เปอร์เซนต์ (ตารางที่ 1)

ความสูงและความกว้างทรงพุ่ม ดาวเรืองทั้ง 20 พันธุ์ สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมของจังหวัดสงขลา จากการวัดความสูงของต้นดาวเรืองในระยะออกดอก 50 เปอร์เซนต์ พบว่า ดาวเรืองส่วนใหญ่สูงกว่า 50 เซนติเมตร โดยพันธุ์ดอกสีเหลืองมีความสูงและความกว้างทรงพุ่มอยู่ในช่วง 49.68-66.54 เซนติเมตร และ 34.12-47.96 เซนติเมตร ตามลำดับ กลุ่มที่มีดอกสีเหลืองทองอยู่ในช่วง 34.82-70.72 เซนติเมตร และ 35.15-45.67 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยพันธุ์ T₁₂ มีความสูงมากที่สุด 70.72 เซนติเมตร ส่วนพันธุ์ T₄ มีความสูงน้อยที่สุด 26.60 เซนติเมตร และพันธุ์ T₂₀ ในกลุ่มพันธุ์ดอกสีส้ม พบว่า มีความสูงและความกว้างทรงพุ่ม 50.21 เซนติเมตร และ 42.00 เซนติเมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 สีดอก อัตราการรอดตาย ความสูงต้น และความกว้างทรงพุ่ม ของดาวเรืองพันธุ์ต่างๆ ที่ปลูกในจังหวัดสงขลา

พันธุ์	สีดอก	อัตราการรอด ตาย (%)	ความสูงต้น (ซม.)	ความกว้างทรงพุ่ม (ซม.)
T ₁ - Cana yellow	yellow 9 group B	100.00 a	62.57 bc	44.13 abc
T ₂ - TLY 4805 F ₁	yellow 9 group A	98.75 ab	64.61 abc	40.78 abcde
T ₃ - F ₁ Golden millionaire	yellow 12 group A	100.00 a	65.77 abc	46.57 ab
T ₄ - Ruam daw 16	yellow 12 group A	96.25 abcde	26.60 h	34.12 e
T ₅ - Ruam daw 30	yellow 9 group A	98.75 ab	64.37 abc	43.54 abc
T ₆ - F ₁ Maruay	yellow 8 group A	100.00 a	65.88 abc	43.53 abc
T ₇ - F ₁ Khun sap	yellow 9 group A	95.00 abcde	66.54 abc	47.96 a
T ₈ - Srisupran yellow	yellow 2 group A	83.75 cef	49.68 f	37.29 cde
T ₉ - F ₁ Noppakun gold	yellow-orange 17 group A	96.25 abcde	60.96 cd	42.08 abcd
T ₁₀ - Tongtep 05	yellow-orange 17 group B	97.50 abc	65.74 abc	43.04 abc
T ₁₁ - Bali gold	yellow-orange 17 group A	85.00 bcdef	34.82 g	39.38 bcde
T ₁₂ - TLG 5011 F ₁	yellow-orange 14 group A	100.00 a	70.72 a	45.67 ab
T ₁₃ - Cana gold	yellow-orange 15 group A	95.00 abcde	66.32 abc	42.64 abc
T ₁₄ - Sri siam deep gold	yellow-orange 23 group A	98.75 ab	60.40 cd	43.37 abc
T ₁₅ - Cana gold extra	yellow-orange 14 group A	98.75 ab	68.39 ab	45.30 ab
T ₁₆ - TLG 5012 F ₁	yellow-orange 21 group A	98.75 ab	63.38 bc	44.75 ab
T ₁₇ - Sri siam gold	yellow-orange 17 group C	97.50 abc	68.02 ab	41.46 abcde
T ₁₈ - 018 Gold	yellow-orange 14 group A	97.50 abc	65.02 abc	39.61 bcde
T ₁₉ - Tevee F ₁	yellow-orange 21 group A	97.50 abc	55.63 de	35.15 de
T ₂₀ - Narai orange	orange 28 group B	80.00 f	50.21 ef	42.00 abcd
F-test		*	*	*
C.V. (%)		8.77	6.56	10.12

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์ที่มีอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี DMRT

จำนวนกิ่งของดาวเรือง พบว่า กลุ่มพันธุ์ดอกสีเหลือง มีจำนวนกิ่งอยู่ในช่วง 18.25-25.61 กิ่งต่อต้น พันธุ์ T₁ มีจำนวนกิ่งมากที่สุด 25.61 กิ่งต่อต้น ส่วนพันธุ์ดอกสีเหลืองทอง มีจำนวนกิ่งอยู่ในช่วง 19.81-27.75 กิ่งต่อต้น โดยพันธุ์ T₁₂ มีจำนวนกิ่ง

สูงสุด 27.75 กิ่งต่อต้น และพันธุ์ดอกสีส้ม มีจำนวนกิ่ง 22.31 กิ่งต่อต้น (ตารางที่ 2) ซึ่งจำนวนกิ่งที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการตัดยอดเพื่อบังคับให้ต้นแตกตาข้างใหม่ และมีการเจริญเติบโตได้ดี การฉีกหักของกิ่งพบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

โดยดาวเรืองพันธุ์ดอกสีเหลือง เหลืองทอง และส้ม มีการฉีกหักของกิ่งต่อน้อยในช่วง 0.19-2.34, 1.01-2.19 และ 2.81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สาเหตุการฉีกหักของกิ่งเนื่องจากดาวเรืองเป็นไม้เนื้ออ่อนจึงหักได้ค่อนข้างง่าย แสดงว่าดาวเรืองพันธุ์ต่างๆ ที่ปลูกทดสอบ มีเปอร์เซ็นต์ของกิ่งฉีกหักน้อยมากในระหว่างการเจริญเติบโต และการให้ผลผลิต

การเข้าทำลายของโรคเหี่ยวจากเชื้อ *Phytophthora* sp. พบว่าดาวเรืองดอกสีเหลืองมีการ

เข้าทำลายของโรค อยู่ในช่วง 0.06-1.06 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้พันธุ์ T_1 , T_3 และ T_6 มีความต้านทานต่อโรคได้ดี โดยไม่พบการเข้าทำลายของโรคดังกล่าว กลุ่มพันธุ์ดอกสีเหลืองทอง พบการเข้าทำลายของโรค อยู่ในช่วง 0.06-1.50 เปอร์เซ็นต์ โดยพันธุ์ T_{12} ไม่พบการเข้าทำลายของโรค (ตารางที่ 2) ส่วนพันธุ์ T_{20} ดอกสีส้มมีการเข้าทำลาย 1.31 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าดาวเรืองทุกพันธุ์มีเปอร์เซ็นต์การเข้าทำลายของโรคต่ำมาก

ตารางที่ 2 จำนวนกิ่ง การฉีกหักของกิ่งแขนง และการเข้าทำลายของโรค ของดาวเรืองพันธุ์ต่างๆ ที่ปลูกในจังหวัดสงขลา

พันธุ์	จำนวนกิ่ง/ต้น	จำนวนกิ่งฉีกหัก/ต้น (%)	การเข้าทำลายของโรค (%)
T_1 - Cana yellow	25.61 bc	1.88 abc	0.00 b
T_2 - TLY 4805 F_1	22.94 ef	1.58 abc	0.06 b
T_3 - F_1 Golden millionaire	22.56 fg	1.81 abc	0.00 b
T_4 - Ruam daw 16	18.25 m	0.19 d	0.19 b
T_5 - Ruam daw 30	21.23 hij	1.41 bcd	0.06 b
T_6 - F_1 Maruay	15.06 n	2.31 abc	0.00 b
T_7 - F_1 Khun sap	19.56 l	2.34 ab	0.25 b
T_8 - Srisupran yellow	20.88 ijk	1.56 abc	1.06 ab
T_9 - F_1 Noppakun gold	20.25 jkl	2.19 abc	0.19 b
T_{10} - Tongtep 05	23.81 de	1.29 bcd	0.13 b
T_{11} - Bali gold	21.38 ghij	1.01 cd	1.50 a
T_{12} - TLG 5011 F_1	27.75 a	1.44 bcd	0.00 b
T_{13} - Cana gold	21.94 fghi	1.83 abc	0.25 b
T_{14} - Sri siam deep gold	22.00 fghi	2.03 abc	0.06 b
T_{15} - Cana gold extra	24.56 cd	1.78 abc	0.06 b
T_{16} - TLG 5012 F_1	26.44 b	1.96 abc	0.06 b
T_{17} - Sri siam gold	24.88 cd	1.80 abc	0.13 b
T_{18} - 018 Gold	21.56 ghi	1.49 bcd	0.13 b
T_{19} - Tevee F_1	19.81 kl	1.34 bcd	0.13 b
T_{20} - Narai orange	22.31 fgh	2.81 a	1.31 a

ตารางที่ 2 (ต่อ)

พันธุ์	จำนวนกิ่ง/ต้น	จำนวนกิ่งหัก/ต้น (%)	การเข้าทำลายของโรค (%)
F-test	*	*	*
C.V. (%)	3.64	44.48	22.37

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์ที่มีอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี DMRT

2. การออกดอกและผลผลิตดอก

การออกดอกของพันธุ์ดาวเรือง พบว่า พันธุ์ที่สามารถออกดอกได้เร็ว คือ พันธุ์ T_{17} และพันธุ์ T_{20} มีอายุดอกแรกบาน 29.00 วันหลังย้ายปลูก เร็วกว่าพันธุ์อื่นที่ใช้เวลา 31.25-35.50 วัน หลังย้ายปลูก อายุดอกบาน 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า พันธุ์ T_{20} มีอายุดอกบาน 50 เปอร์เซ็นต์ เร็วที่สุดเพียง 32 วันหลังย้ายปลูก เร็วกว่าพันธุ์อื่นๆ ที่อยู่ในช่วง 32.25 -40.50 วันหลังย้ายปลูก ระยะเวลาการให้ดอกหรือช่วงระยะเวลาที่สามารถเก็บเกี่ยวดอก ประเมินตั้งแต่เก็บเกี่ยวดอกแรกจนเก็บเกี่ยวดอกที่มีขนาดตลาดต้องการหมดแปลง พบว่า ดาวเรืองพันธุ์ดอกสีเหลือง พันธุ์ T_4 และ T_8 มีระยะเวลาการให้ดอกนาน 44.00 วัน แต่ไม่แตกต่างทางสถิติกับพันธุ์ T_1 , T_3 , T_5 และ T_6 ที่ให้ระยะเวลาการให้ดอกอยู่ในช่วง 42.00-43.25 วัน ส่วนพันธุ์ดอกสีเหลืองทอง มีช่วงระยะเวลาการให้ดอกที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 42.25- 44.00 วัน ยกเว้นพันธุ์ T_{11} ที่มีระยะเวลาการให้ดอกสั้นเพียง 38.75 วัน (ตารางที่ 3)

ผลผลิตดอกดาวเรืองทุกพันธุ์ให้ผลผลิตมากกว่า 34 ดอกต่อต้น และให้ผลผลิตสูงกว่า 120,000 ดอกต่อไร่ (ตารางที่ 3) พันธุ์ดอกสีเหลืองให้ผลผลิตอยู่ในช่วง 127,423.82-190,793.50 ดอกต่อไร่ โดยพันธุ์ T_7 ให้จำนวนดอกสูงสุด 53.66 ดอกต่อต้น และมีจำนวนดอก 190,793.50 ดอกต่อไร่ แต่ไม่แตกต่างทางสถิติกับพันธุ์ T_3 , T_5 และ T_8 ที่ให้ผลผลิตอยู่ในช่วง 43.21-50.30 ดอกต่อต้น และ 153,628.59-178,855.57 ดอกต่อไร่ ดาวเรืองพันธุ์ดอกสีเหลืองทองให้ผลผลิตอยู่ในช่วง 121,174.85-189,824.60 ดอกต่อไร่ โดยพันธุ์ T_{12} ให้จำนวนดอก 53.39 ดอกต่อต้น และ 189,824.60 ดอกต่อไร่ ไม่แตกต่างทางสถิติกับพันธุ์ T_9 , T_{13} , T_{15} , T_{16} , T_{17} และดอกสีส้มพันธุ์ T_{20} ให้ผลผลิตจำนวนสูงสุด 54.53 ดอกต่อต้น และ 193,886.87 ดอกต่อไร่ ส่วนพันธุ์ T_{11} ให้จำนวนดอกต่ำสุด 34.08 ดอกต่อต้น และ 121,174.85 ดอกต่อไร่ แสดงว่า ดาวเรืองแต่ละพันธุ์ ให้ผลผลิตดอกค่อนข้างสูง และมีความแตกต่างกันทางสถิติระหว่างพันธุ์ (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ดอกแรกบาน ดอกบาน 50% ระยะเวลาการให้ดอก จำนวนดอกต่อต้น และจำนวนดอกต่อไร่ ของดาวเรืองพันธุ์ต่างๆ ที่ปลูกในจังหวัดสงขลา

พันธุ์	ดอกแรก บาน(วัน หลังย้าย ปลูก)	ดอกบาน 50% (วันหลังย้าย ปลูก)	ระยะเวลา การให้ดอก (วัน)	จำนวนดอก (ดอก/ต้น)	จำนวนดอก (ดอก/ไร่)
T ₁ - Cana yellow	34.25 abc	37.25 bc	42.00 abc	38.58 cde	137,157.27 cde
T ₂ - TLY 4805 F ₁	34.75 ab	37.00 bcd	40.50 cd	40.28 bcde	143,228.46 bcde
T ₃ - F ₁ Golden millionaire	33.50 bcde	32.25 cdef	43.25 abc	46.81 abcd	166,446.53 abcd
T ₄ - Ruam daw 16	32.25 ef	34.75 ef	44.00 ab	35.84 de	127,423.82 de
T ₅ - Ruam daw 30	33.25 bcde	36.00 bcdef	41.75 bcd	43.21 abcde	153,628.59 abcde
T ₆ - F ₁ Maruay	32.50 def	35.00 def	42.50 abc	41.23 bcde	146,579.61 bcde
T ₇ - F ₁ Khun sap	33.75 bcde	37.75 b	42.50 abc	53.66 a	190,793.50 a
T ₈ - Srisupran yellow	31.25 f	34.50 ef	44.00 ab	50.30 abc	178,855.57 abc
T ₉ - F ₁ Noppakun gold	34.00 abcd	36.00 bcdef	42.25 abc	46.96 abcd	166,970.98 abcd
T ₁₀ - Tongtep 05	34.00 abcd	37.75 bc	41.25 bcd	44.60 abcde	158,579.76 abcde
T ₁₁ - Bali gold	35.50 a	40.50 a	38.75 d	34.08 e	121,174.85 e
T ₁₂ - TLG 5011 F ₁	33.75 bcde	35.75 bcdef	43.50 abc	53.39 a	189,824.60 a
T ₁₃ - Cana gold	33.25 bcde	36.00 bcdef	41.25 bcd	46.84 abcd	166,535.42 abcd
T ₁₄ - Sri siam deep gold	33.00 cde	36.00 bcdef	44.00 ab	47.64 abcd	169,371.01 abcd
T ₁₅ - Cana gold extra	32.75 cdef	35.25 cdef	44.00 ab	46.39 abcd	164,944.28 abcd
T ₁₆ - TLG 5012 F ₁	33.25 bcde	36.50 bcde	43.00 abc	50.44 abc	179,353.35 abc
T ₁₇ - Sri siam gold	29.00 g	34.50 ef	43.00 abc	51.17 ab	181,931.16 ab
T ₁₈ - 018 Gold	33.50 bcde	35.50 cdef	42.50 abc	40.11 bcde	142,606.23 bcde
T ₁₉ - Tevee F ₁	32.25 ef	34.25 f	43.00 abc	43.71 abcde	155,406.39 abcde
T ₂₀ - Narai orange	29.00 g	32.00 g	45.00 a	54.53 a	193,886.87 a
F-test	*	*	*	*	*
C.V. (%)	3.07	3.41	4.33	15.41	15.41

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์ที่มีอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี DMRT

3. คุณภาพผลผลิตดอก

ในด้านคุณภาพผลผลิตดอก จำแนกขนาดตามเส้นผ่านศูนย์กลางดอก พบว่า ดาวเรืองทั้ง 3

กลุ่มพันธุ์ ให้ผลผลิตดอกที่มีทั้งขนาดใหญ่และปานกลาง มีความแตกต่างกันทางสถิติระหว่างพันธุ์ อยู่ในช่วง 7.21-7.64, 5.48- 5.76 เซนติเมตร ตามลำดับ

ส่วนขนาดจัมโบ้และเล็ก อยู่ในช่วง 8.28-8.73 และ 3.52-3.72 เซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้คุณภาพของดอกเป็นผลมาจากปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยที่ได้รับอยู่ในช่วง 0.1-17.9 มิลลิเมตร ความเข้มแสงเฉลี่ยอยู่

ในช่วง 18.05-22.42 เมกกะจูลต่อตารางเมตร แสดงว่าดาวเรืองทั้ง 3 กลุ่มพันธุ์ คือ พันธุ์ดอกสีเหลือง สีเหลืองทอง และสีส้มให้ผลผลิตดอกที่มีขนาดของดอกแต่ละขนาดใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 ขนาดดอกของดาวเรืองพันธุ์ต่างๆ ที่ปลูกในจังหวัดสงขลา

พันธุ์	เส้นผ่านศูนย์กลางดอก (ซม.)			
	จัมโบ้ (>8.0)	ใหญ่ (6.1-8.0)	กลาง (4.1-6.0)	เล็ก (<4.0)
T ₁ - Cana yellow	8.73	7.21 e	5.59 ab	3.65
T ₂ - TLY 4805 F ₁	8.61	7.50 abcde	5.64 ab	3.68
T ₃ - F ₁ Golden millionaire	8.41	7.35 abcde	5.68 ab	3.66
T ₄ - Ruam daw 16	8.28	7.41 abcde	5.72 a	3.56
T ₅ - Ruam daw 30	8.36	7.45 abcde	5.64 ab	3.64
T ₆ - F ₁ Maruay	8.60	7.50 abcde	5.70 ab	3.58
T ₇ - F ₁ Khun sap	8.49	7.25 de	5.67 ab	3.66
T ₈ - Srisupran yellow	8.40	7.29 cde	5.65 ab	3.70
T ₉ - F ₁ Noppakun gold	8.59	7.51 abcde	5.48 b	3.67
T ₁₀ - Tongtep 05	8.55	7.55 abcd	5.70 ab	3.67
T ₁₁ - Bali gold	8.28	7.23 de	5.76 ab	3.61
T ₁₂ - TLG 5011 F ₁	8.62	7.64 a	5.60 a	3.52
T ₁₃ - Cana gold	8.39	7.47 abcde	5.62 ab	3.71
T ₁₄ - Sri siam deep gold	8.65	7.31 bcde	5.66 ab	3.69
T ₁₅ - Cana gold extra	8.60	7.51 abcde	5.62 ab	3.64
T ₁₆ - TLG 5012 F ₁	8.63	7.28 cde	5.66 ab	3.63
T ₁₇ - Sri siam gold	8.44	7.52 abcde	5.59 ab	3.65
T ₁₈ - 018 Gold	8.49	7.62 ab	5.66 ab	3.72
T ₁₉ - Tevee F ₁	8.64	7.58 abc	5.70 ab	3.59
T ₂₀ - Narai orange	8.42	7.44 abcd	5.70 ab	3.60
F-test	ns	*	*	ns
C.V. (%)	2.91	1.97	1.87	2.67

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์ที่มีอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี DMRT
ns ไม่แตกต่างทางสถิติ

เมื่อพิจารณาจำนวนดอกจำแนกตามขนาดพบว่า คาวเรืองทั้ง 3 กลุ่มพันธุ์ มีจำนวนดอกขนาดจัมโบ้ ใหญ่ ปานกลาง และเล็ก อยู่ในช่วง 0.55 (4.11%) -4.48 (8.94%), 13.15 (40.35%) -30.62 (57.35%), 9.43 (26.74%) -17.00 (34.45%) และ 1.14 (3.37%) -7.26 (18.24%) ดอกต่อต้าน ตามลำดับ โดยพันธุ์ T₁₆ ให้จำนวนดอกขนาดจัมโบ้สูงสุด 4.48 (8.48%) ดอกต่อต้าน ส่วนพันธุ์ T₇ ให้จำนวนดอกขนาดใหญ่และขนาดกลางสูง 30.62 (57.35%) และ 16.36 (30.64%) ดอกต่อต้าน ตามลำดับ พันธุ์ T₂₀ ให้จำนวนดอกขนาดปานกลางสูงสุด 18.51 (34.62%) และพันธุ์ T₁₈ ให้จำนวนดอกขนาดเล็กมากที่สุด 7.26 (18.24%) ดอกต่อต้าน (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 จำนวนดอกจำแนกตามขนาดของคาวเรืองพันธุ์ต่างๆ ที่ปลูกในจังหวัดสงขลา

พันธุ์	จำนวนดอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง /ต้น							
	จัมโบ้	%	ใหญ่	%	กลาง	%	เล็ก	%
T ₁ - Cana yellow	2.85 abc	7.45	20.42 abc	53.41	10.10 c	26.42	4.86 abcd	12.72
T ₂ - TLY 4805 F ₁	2.76 abc	6.77	24.32 ab	59.70	10.09 c	24.77	3.57 abcd	8.76
T ₃ - F ₁ Golden millionaire	1.84 cd	3.98	24.06 ab	52.04	15.13 abc	32.73	5.20 abc	11.25
T ₄ - Ruam daw 16	0.87 d	2.47	21.92 ab	62.17	9.43 c	26.74	3.04 cd	8.62
T ₅ - Ruam daw 30	2.91 abc	8.93	13.15 c	40.35	12.67 bc	38.88	3.86 abcd	11.84
T ₆ - F ₁ Maruay	3.21.abc	7.84	22.42 abc	54.76	11.50 bc	28.09	3.81 abcd	9.31
T ₇ - F ₁ Khun sap	1.65 cd	3.09	30.62 a	57.35	16.36 ab	30.64	4.76 abcd	8.92
T ₈ - Srisupran yellow	0.55 d	4.11	26.28 ab	53.26	17.00 ab	34.45	5.51 abc	11.17
T ₉ - F ₁ Noppakun gold	3.61 ab	7.89	23.12 abc	50.54	14.16 abc	30.95	4.86 abcd	10.62
T ₁₀ - Tongtep 05	2.86 abc	6.52	21.66 abc	49.36	13.56 abc	30.90	5.80 abc	13.22
T ₁₁ - Bali gold	1.81 cd	5.35	20.64 abc	60.99	10.25 c	30.29	1.14 d	3.37
T ₁₂ - TLG 5011 F ₁	3.25 abc	6.13	27.33 ab	51.51	16.39 ab	30.88	6.09 abc	11.48
T ₁₃ - Cana gold	1.60 cd	3.44	22.46 abc	48.25	16.03 ab	34.43	6.46 abc	13.87
T ₁₄ - Sri siam deep gold	1.96 bcd	4.14	25.78 ab	54.41	13.95 abc	29.44	5.69 abc	12.01
T ₁₅ - Cana gold extra	1.63 cd	3.55	26.57 ab	57.91	12.89 abc	28.10	4.79 abcd	10.44
T ₁₆ - TLG 5012 F ₁	4.48 a	8.94	25.42 ab	50.71	14.08 abc	28.08	6.15 abc	12.27
T ₁₇ - Sri siam gold	1.91 bcd	3.77	26.75 ab	52.77	16.46 ab	32.47	5.57 abc	10.99
T ₁₈ - 018 Gold	1.79 cd	4.50	17.48 bc	43.90	13.28 abc	33.36	7.26 a	18.24
T ₁₉ - Tevee F ₁	0.79 d	1.81	29.76 a	68.29	9.75 c	22.37	3.28 bcd	7.53
T ₂₀ - Narai orange	2.41 bcd	4.01	25.84 ab	48.33	18.51 a	34.62	6.97 ab	13.04
F-test	*		*		*		*	
C.V. (%)	47.23		25.53		25.01		45.42	

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์ที่มีอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี DMRT

ในด้านคุณภาพการใช้งาน พบว่า ดาวเรืองเกือบทุกพันธุ์มีความยาวของก้านดอกยาวกว่า 10 เซนติเมตร ยกเว้นพันธุ์ T₄, T₈, T₁₁ และ T₁₉ ที่มีก้านดอกสั้นกว่า อยู่ในช่วง 5.48-9.74 เซนติเมตร โดยพันธุ์ T₁₆ ให้ความยาวก้านดอกยาวสุด 13.76 เซนติเมตร แตกต่างทางสถิติกับพันธุ์ T₄ ที่ให้ความยาวก้านดอกสั้นสุด 5.48 เซนติเมตร (ตารางที่ 6) แสดงว่าดาวเรืองทั้ง 3 กลุ่ม ส่วนใหญ่มีก้านดอกที่ยาวมีผลดีในการใช้ปักแจกัน และจัดช่อดอกไม้

ส่วนอายุการใช้งานของดอก ประเมินจากอายุของดอกในการปักแจกันและอายุของดอกที่เก็บ

ในสภาพแห้ง พบว่า มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ โดยดอกมีอายุในการปักแจกันของทุกพันธุ์อยู่ในช่วง 6.00-9.25 วัน ยกเว้นพันธุ์ T₄ ที่มีอายุการบานเพื่อการใช้งานสั้นที่สุดเพียง 5.25 วัน ส่วนอายุของดอกที่เก็บในสภาพแห้ง พบว่า ดาวเรืองพันธุ์ต่างๆ มีอายุดอกเพื่อการใช้งานอยู่ในช่วง 5.25-7.00 วัน พันธุ์ T₂, T₃, T₅, T₆, T₉, T₁₃, T₁₆ และ T₁₇ มีอายุของดอกที่เก็บในสภาพแห้งนานสูงสุด 7.00 วัน แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 6 ความยาวก้านดอก อายุการบานของดอกในการปักแจกัน และอายุของดอกที่เก็บในสภาพแห้งของดาวเรืองพันธุ์ต่างๆ ที่ปลูกในจังหวัดสงขลา

พันธุ์	ความยาวก้านดอก (เซนติเมตร)	อายุของดอก ในการปักแจกัน (วัน)	อายุของดอก ที่เก็บในสภาพแห้ง (วัน)
T ₁ - Cana yellow	11.39 bcd	9.25 a	6.00 b
T ₂ - TLY 4805 F ₁	11.97 abc	8.50 bc	7.00 a
T ₃ - F ₁ Golden millionaire	11.72 bc	7.75 def	7.00 a
T ₄ - Ruam daw 16	5.48 e	5.25 k	5.25 c
T ₅ - Ruam daw 30	10.51 bcd	8.00 cde	7.00 a
T ₆ - F ₁ Maruay	11.05 abc	7.25 fgh	7.00 a
T ₇ - F ₁ Khun sap	10.36 cde	9.00 ab	6.00 b
T ₈ - Srisupran yellow	9.74 de	6.00 j	5.50 c
T ₉ - F ₁ Noppakun gold	12.65 ab	7.00 ghi	7.00 a
T ₁₀ - Tongtep 05	12.71 ab	8.25 cd	6.00 b
T ₁₁ - Bali gold	6.33 e	7.50 efg	6.00 b
T ₁₂ - TLG 5011 F ₁	11.06 bcd	7.25 fgh	6.00 b
T ₁₃ - Cana gold	12.08 abc	8.00 cde	7.00 a
T ₁₄ - Sri siam deep gold	11.02 bcd	8.00 cde	6.00 b
T ₁₅ - Cana gold extra	11.04 bcd	7.75 def	6.00 b
T ₁₆ - TLG 5012 F ₁	13.76 a	8.00 cde	7.00 a
T ₁₇ - Sri siam gold	11.65 bcd	8.00 cde	7.00 a
T ₁₈ - 018 Gold	10.27 cde	8.50 bc	6.00 b

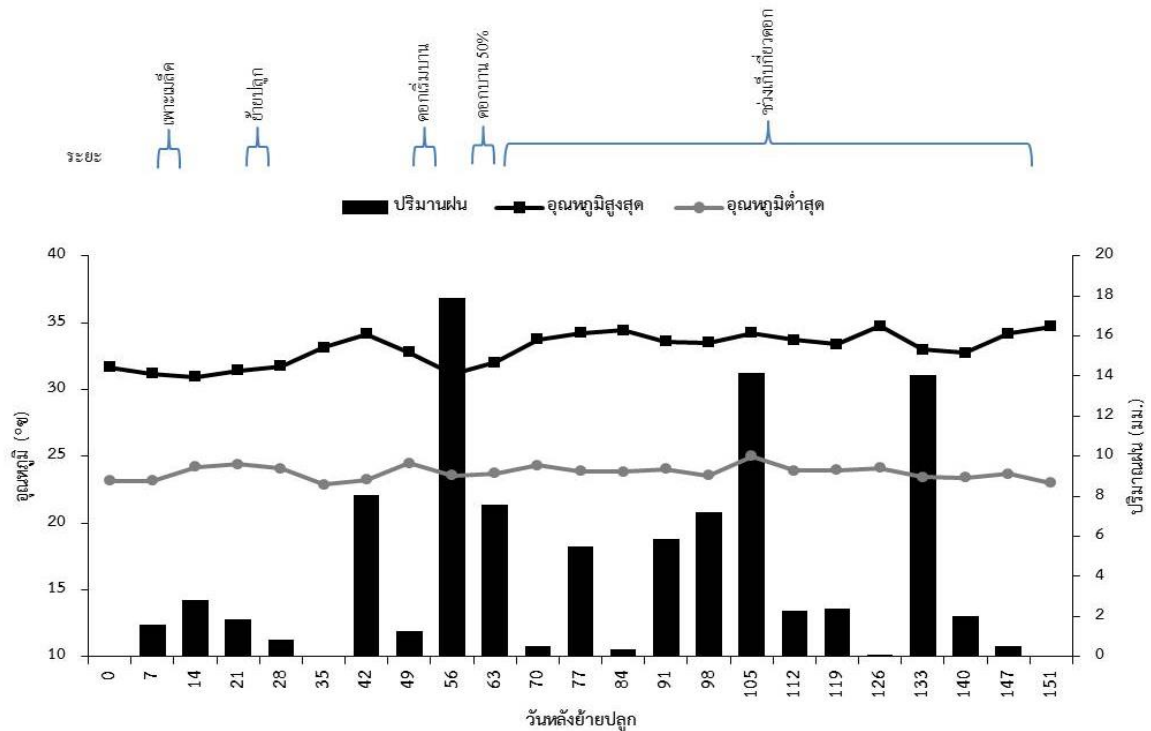
ตารางที่ 6 (ต่อ)

พันธุ์	ความยาวก้านดอก (เซนติเมตร)	อายุของดอก ในการปักแจกัน (วัน)	อายุของดอก ที่เก็บในสภาพแห้ง (วัน)
T ₁₉ - Tevee F ₁	8.67 e	6.75 hi	5.50 c
T ₂₀ - Narai orange	10.19 bcd	6.50 ij	6.00 b
F-test	*	*	*
C.V. (%)	10.96	5.36	3.23

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์ที่มีอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี DMRT

จากการปลูกทดสอบการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และคุณภาพผลผลิตของดาวเรืองพันธุ์ต่างๆ จำนวน 20 พันธุ์ ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ ถึง มิถุนายน พ.ศ. 2561 ในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา พบว่า ในช่วงวันปลูกดังกล่าวพื้นที่ปลูกมีอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยในช่วง 21.4-24.2 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยในช่วง 28.3-33.8 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยในช่วง 0.1-17.9 มิลลิเมตร (ภาพที่ 1) และค่า pH 6.7 ซึ่งจัดว่ามีความเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของดาวเรือง ทั้งนี้ดาวเรืองเป็นไม้ดอกที่ต้องการอุณหภูมิในการเจริญเติบโตอยู่ในช่วง 14.5-34.6 องศาเซลเซียส (Srioon, 2016) และมีการเจริญเติบโตแตกต่างกันไปตามพันธุ์ (Narsude *et al.*, 2010; Shivakumar and Srinivasa, 2017) เมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตในภาพรวม พบว่า ดาวเรืองทุกพันธุ์มีการเจริญเติบโตดีและมีผลผลิตสูงเป็นส่วนใหญ่ ดาวเรืองทุกพันธุ์มีอัตราการรอดตายที่อายุ 30 วันหลังย้ายปลูก สูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 1) แสดงว่า ดาวเรือง 20 พันธุ์ ที่ทดสอบให้ต้นกล้าที่สมบูรณ์

แข็งแรง สามารถตั้งตัวได้ดีหลังย้ายปลูกในแปลง ในด้านการเจริญเติบโตด้านความสูง พันธุ์ดาวเรืองส่วนใหญ่มีความสูงต้นสูงกว่า 50 เซนติเมตร ขนาดทรงพุ่มของต้นดาวเรืองเป็นองค์ประกอบสำคัญของการให้ผลผลิตดอกของดาวเรือง พบว่า ดาวเรืองที่ปลูกมีจำนวนกิ่งต่อต้นเฉลี่ย 22.13 กิ่ง ดาวเรืองพันธุ์ TLG 5011 F₁ ให้จำนวนกิ่งต่อต้นสูงสุด 27.75 กิ่ง ส่วนพันธุ์ Ruam daw 16 ให้จำนวนกิ่งต่อต้นต่ำสุด 18.25 กิ่ง การหักกิ่งของกิ่ง ในระหว่างการเจริญเติบโตและระยะการให้ผลผลิตดอก ซึ่งมีผลต่อปริมาณผลผลิตดอกพบน้อยมากในดาวเรืองทั้ง 20 พันธุ์ โดยพันธุ์ Narai orange มีการหักกิ่งของกิ่งสูงสุดเพียง 2.81 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้การหักกิ่งของกิ่งมีสาเหตุมาจากการรับน้ำหนักของจำนวนดอกที่มากเกินไป ทำให้เกิดการหักกิ่งที่บริเวณโคนของกิ่งขึ้น อีกทั้งยังมีต้นที่เป็นโรคยอดดกอดดูปลูก พบการเข้าทำลายของโรคเพียง 0-1.50 เปอร์เซ็นต์ โดยพันธุ์ Cana yellow, F₁ Golden millionaire, TLG 5011 F₁ และ F₁ Maruay มีความต้านทานต่อโรคสูง ไม่พบการเข้าทำลายของโรค 100 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 1 ปริมาณผล อุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุด ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ถึงกรกฎาคม พ.ศ. 2561 ที่สถานีตรวจอากาศ กองสอ.หาดใหญ่ จ.สงขลา (Kho Hong Agrometeorological Station, 2018)

การออกดอกของดาวเรือง 20 พันธุ์ พบว่า มีอายุดอกแรกบานอยู่ในช่วง 29.00-35.50 วันหลังย้ายปลูก และมีอายุดอกบาน 50 เปอร์เซ็นต์ ในช่วง 32.00-45.05 วันหลังย้ายปลูก สอดคล้องกับดาวเรืองพันธุ์ Pusa Narangi Gainda มีอายุดอกบาน 31.33 วันหลังย้ายปลูก (Kurakula, 2017) ส่วนพันธุ์ Inca ออกดอกที่ 48 วันหลังย้ายปลูก (Kannika, 1998) โดยพันธุ์ Sri siam gold เริ่มออกดอกก่อนพันธุ์อื่นๆ โดยมีอายุออกดอก 50 เปอร์เซ็นต์ เพียง 34.50 วันหลังย้ายปลูก (ตารางที่ 3) เมื่อเปรียบเทียบจากลักษณะประจำพันธุ์ ทำให้สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตดอกได้ก่อนซึ่งจะเป็นผลดีในด้านการตลาด ส่วนดาวเรืองพันธุ์ Bali gold มีอายุดอกบาน 50 เปอร์เซ็นต์ช้าสุด 40.50 วันหลังย้ายปลูก ซึ่งช่วงอุณหภูมิต่ำสุดที่สงขลาสูงกว่าอุณหภูมิที่ดาวเรืองต้องการในการเจริญเติบโตเล็กน้อย จึงทำให้ดอกออกเร็วขึ้น

ปริมาณผลผลิตดอกดาวเรืองทุกพันธุ์ที่ปลูกในอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ให้ผลผลิตดอกต่อต้นสูงในช่วง 35.84-54.53 ดอก หรือ 120,000-190,000 ดอกต่อไร่ (ตารางที่ 3) โดยพันธุ์ Narai orange ให้ผลผลิตสูงสุด 54.53 ดอกต่อต้น และ 193,886.87 ดอกต่อไร่ ใกล้เคียงกับพันธุ์ F₁ Khun sap และ TLG 5011 F₁ ที่มีจำนวนดอก 53.66 ดอกต่อต้น และ 190,793.50 ดอกต่อไร่ และ 53.39 ดอกต่อต้น และ 189,824.60 ดอกต่อไร่ ตามลำดับ จะเห็นว่าผลผลิตแตกต่างกันไปตามพันธุ์ สอดคล้องกับการรายงานของ Shivakumar and Srinivasa (2017) ที่ปลูกทดสอบผลผลิตของดาวเรือง 14 พันธุ์ พบว่า ผลผลิตดอกแตกต่างกันไปตามพันธุ์ โดยพันธุ์ Nilakkotai Local Orange และ Coimbatore Local Yellow ให้จำนวนดอกต่อต้นสูงสุด 59.00-59.40 ดอก เช่นเดียวกันกับ Narasude *et al.* (2010) ศึกษาผลผลิตของดาวเรืองแอฟริกัน พบว่า พันธุ์ Tuljapur Local -1 มีจำนวนดอกต่อต้นสูงสุด 71.00 ดอก อยู่ใน

ระดับใกล้เคียงกับพันธุ์ Pakharsangavi Local และ Tuljapur Local -2 ที่ 70.93 และ 70.33 ดอก ตามลำดับ

คุณภาพผลผลิตดอกดาวเรืองทั้ง 3 กลุ่ม คือ พันธุ์ดอกสีเหลือง สีเหลืองทอง และสีส้ม ให้ผลผลิตดอกที่มีทั้งขนาดจัมโบ้ ใหญ่ ปานกลาง และเล็กอยู่ในช่วง 8.28-8.73, 7.21-7.64, 5.48-5.76 และ 3.52-3.72 เซนติเมตร ตามลำดับ แสดงว่าดาวเรืองทั้ง 3 กลุ่มพันธุ์ ให้ผลผลิตดอกที่มีขนาดของดอกแต่ละขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลจากการได้รับปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ และความชื้นแสง

อายุการใช้งานของดอก ประเมินจากอายุของดอกในการปักแจกันและอายุของดอกที่เก็บในสภาพแห้ง ดอกทั้ง 3 กลุ่มพันธุ์ มีอายุในการปักแจกันอยู่ในช่วง 6.00-9.25 วัน ยกเว้นพันธุ์ T₄ ที่มีอายุการใช้งานเพื่อการใช้นานที่สุดเพียง 5.25 วัน ส่วนอายุของดอกที่เก็บในสภาพแห้ง พบว่า ดาวเรืองพันธุ์ต่างๆ มีอายุดอกเพื่อการใช้นานอยู่ในช่วง 5.25-7.00 วัน

ผลผลิตดอกคงค้างบนต้นแม่ในแปลงปลูกภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตดอก ที่ตลาดต้องการเสร็จแล้ว พบว่า ในช่วงระยะเวลาประมาณ 30 วัน หลังเก็บเกี่ยว ยังคงมีดอกขนาดเล็กๆ หรือดอกไม่ได้ขนาดจำนวนมากตกค้างอยู่บนต้นในแปลงปลูก ดังนั้น การใช้ประโยชน์จากดอกเล็กๆ ที่ไม่ได้คุณภาพช่วงท้ายฤดูปลูก เช่น การแปรรูปเป็นชาเสริมสุขภาพ สีส้มอาหาร เครื่องสำอาง สีย้อมผ้า และใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ (Ahmad *et al.*, 2011; Gupta and Vasudeva, 2012) จะสามารถสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรได้อีกทางหนึ่งหากมีการส่งเสริมและมีการบริหารจัดการตลาดรับซื้ออย่างเป็นระบบในอนาคต อีกทั้งยังเป็นประโยชน์ในแง่ของการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า มีประสิทธิภาพ และลดการสูญเสียของผลผลิตไปอย่างเปล่าประโยชน์เท่าที่ควร

การพิจารณาพันธุ์ที่มีศักยภาพนอกจากประเมินจากการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิต ยังต้องนำปัจจัยด้านความชอบของผู้บริโภคมาพิจารณา ร่วมด้วยเป็นสำคัญ จากการสำรวจตลาดดอกไม้ในอำเภอหาดใหญ่ พบว่า สีของดอกดาวเรืองที่เป็นที่ต้องการหรือเป็นที่นิยมของตลาด พบว่า ดอกสีเหลืองทอง ได้แก่ พันธุ์ F₁ Noppakun gold, Tongtep 05, Bali gold, TLG 5011 F₁, Cana gold, Sri siam deep gold, Cana gold extra, TLG 5012 F₁, Sri siam gold, 018 Gold และ Tevee F₁ ซึ่งตลาดมีความต้องการสูง เนื่องจากมีสีดอกสดสวย ดอกมีสีส้มเป็นที่ต้องการมากที่สุด (ตารางที่ 1,2,3) ส่วนดาวเรืองพันธุ์ดอกสีเหลืองที่มีศักยภาพ ได้แก่ พันธุ์ Cana yellow, TLY 4805 F₁, F₁ Golden millionaire, Ruam daw 16, Ruam daw 30, F₁ Maruay, F₁ Khun sap และ Srisupran yellow สำหรับพันธุ์ Narai orange แม้ให้ผลผลิตสูงกว่า 190,000 ดอกต่อไร่ แต่ปัญหาด้านคุณภาพของช่อดอก ได้แก่ ช่อดอกเล็ก กลุ่มดอกย่อยหลวม ดอกบานเร็ว มีอายุการบานดอกน้อย และมีสีดอกไม่เป็นที่นิยมของตลาดในภาคใต้

สรุป

ดาวเรืองทั้ง 20 พันธุ์ มีอัตราการรอดตายสูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ มีการเจริญเติบโตทางลำต้นดี และให้ผลผลิตสูงอยู่ในช่วง 193,886.87-121,174.85 ดอกต่อไร่ คิดเป็นรายได้ผลผลิต 121,174.85-193,886.87 บาทต่อไร่ ขนาดดอกส่วนใหญ่ อยู่ในช่วงกลาง-ใหญ่มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ จากการปลูกทดสอบ สามารถคัดเลือกได้ 3 พันธุ์ที่มีผลผลิตสูงสุดในแต่ละกลุ่มพันธุ์ตามสีดอก คือ 1.) พันธุ์ F₁ Khun sap ดอกมีสีเหลือง มีต้นสูง 66.54 เซนติเมตร ออกดอกหลังย้ายปลูก 33.75 วัน มีจำนวนดอก 53.66 ดอกต่อต้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดอกอยู่ในช่วง 3.66-8.49 เซนติเมตร บานนาน 9.00 วัน รายได้ผลผลิต 117,280 บาทต่อไร่

2.) พันธุ์ TLG 5011 F₁ ดอกมีสีเหลืองทอง มีต้นสูง 68.50 เซนติเมตร ออกดอกหลังย้ายปลูก 33.75 วัน มีจำนวนดอก 53.39 ดอกต่อต้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดอกอยู่ในช่วง 3.52-8.62 เซนติเมตร บานนาน 7.25 วัน รายได้ผลผลิต 174,000 บาทต่อไร่ และ 3.) พันธุ์ Narai orange ดอกสีส้ม มีต้นสูงปานกลาง 50.32 เซนติเมตร ออกดอกหลังย้ายปลูก 29.00 วัน มีจำนวนดอก 54.53 ดอกต่อต้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางดอกอยู่ในช่วง 3.60-8.42 เซนติเมตร บานนาน 6.50 วัน รายได้ผลผลิต 170,520 บาทต่อไร่

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัย และขอขอบคุณสาขาวิชาวนวัฒนกรรมและการเกษตรและการจัดการ (วิชาเอกพืชศาสตร์) คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ที่อนุเคราะห์ให้ใช้ห้องปฏิบัติการเมล็ดพันธุ์พืชและแปลงทดลองในการศึกษาในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Ahmad, I., Asif, M., Amjad, A. and Amad, S. 2011. Fertilization enhances growth, yield and xanthophyll contents of marigold. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry** 35: 641-648.
- Department of Agricultural. 2017. **Quantity and value of flowering plants**. Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. (in Thai)
- Department of Agricultural Extension. 2018. **Marigold Planting Information Report**. Available Source: <http://www.agriinfo.doae.go.th/year> 61/plant/rotor/flower/marigold1.pdf, June 6, 2018. (in Thai)
- Gupta, P. and Vasudeva, N. 2012. Maligold a potential ornamental plant drug. **Hamdard Medicus** 55: 352-364.
- Kannika, T. 1998. Varietal studies in 14 varieties of American Marigold (*Tagetes erecta*). Special problem, Department of horticulture, Kasetsart University. (in Thai)
- Kasemsap, S. 1989. **Flowering Pot Plants**. Akson Phitthaya Printing House, Bangkok. (in Thai)
- Kho Hong Agrometeorological Station. 2018. **Annual Meteorological Report 2018**. Meteorological Department, Songkhla. (in Thai)
- Kurakula, D., Girwani, A., Vijaya, D. and Prashanth, P. 2017. Effect of levels of fertigation on growth and flowering of marigold (*Tagetes erecta* L.) CV. Pusa Narangi Gaiinda. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences** 6: 1146-1151.
- Narsude, P.B., Kadam, A.S. and Patil, V.K. 2010. Studies on the growth and yield attributes of different African Marigold (*Tagetes erecta* L.) genotypes under Marathwada condition. **Asian Journal of Horticulture** 5: 284-286.
- Sangwan, P., Garg, V.K. and Kaushik, C.P. 2010. Growth and yield response of marigold to potting media containing vermicompost produced from different wastes. **Environmentalist** 30: 123-130.
- Shivakumar, V. and Srinivasa, V. 2017. Estimation of chlorophyll content of leaf, growth and yield of marigold (*Tagetes erecta* L.) genotypes under hill zone of Karnataka. **International**

- Journal of Pure & Applied Bioscience** 5: 1000-1004.
- topmenu-news/2016-09-30-05-07-32/87-2017-08-14-09-16-32, June 24, 2017.
- Soonsuwon, W. 2002. **Research Methods in Agriculture**. Department of Plant Science, Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University, Songkhla. (in Thai)
- USDA. 2013. **New release: Selected North Carolina floriculture crop values up**. Available Source: <http://www.ncagr.gov/stats/release/Floriculture.pdf>, July 18, 2014.
- Srioon K. 2016. **Comparison of marigold varieties and some cut varieties of marigold**. Available Source: <http://hort.ku.ac.th/2016/index.php/>
- Uthairatanakij, A. and Obsuwan, K. 2007. Effect of chitosan on the growth of *Tagetes* sp. **Agricultural Science Journal** 38: 200-203. (in Thai)

การสังเคราะห์ ศึกษาโครงสร้าง คุณสมบัติเชิงแสงผ่านปฏิกิริยาการระงับ และ คุณสมบัติในการเป็นสารออกฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งของสารประกอบเชิงซ้อน

เออริเดียม(III) กับลิแกนด์ triphenylphosphine (PPh_3)

Synthesis, Characterization, Photo-Physical Properties, Quenching Reaction and Anticancer Activity Against Cancer Cell Lines of Ir(III) Complex Containing PPh_3 Ligand

รัตติญญ กองพันธุ์¹ เสาวนิต ทรายทอง¹ จวงจันทร วุฒิพันธุ์¹ อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์² และ นรารักษ์ หลีสกุล^{1*}
Rattanyu Kongpan¹, Saowanit Saithong¹, Juangjan Wuttipan¹, Avirut Chinkulkijniwat²
and Nararak Leesakul^{1*}

Received: 20 May 2022, Revised: 21 June 2022, Accepted: 27 June 2022

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้สังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ผ่านปฏิกิริยาการแทนที่ระหว่างเออริเดียม(III)ไดเมอร์กับลิแกนด์ triphenylphosphine (PPh_3) ในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน ศึกษาโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวด้วยเทคนิค Single crystal X-ray diffraction, $^1\text{H-NMR}$, FTIR และการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ซึ่งพบว่าโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นทรงเหลี่ยมแปดหน้าบิดเบี้ยว (distorted octahedral) จากการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ โดยใช้ความยาวคลื่นสำหรับการกระตุ้นอยู่ที่ 350 นาโนเมตร พบว่ามีการเปล่งแสงที่ 489 นาโนเมตร และสารประกอบเชิงซ้อนข้างต้นมีคุณสมบัติในการเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดความเข้มข้นของเหล็กประจุ 3+ (Fe(III)) ในลักษณะที่เป็น turn-off luminescent นอกจากนี้ ผลการศึกษาความสามารถของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ในการออกฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็งเต้านม 4 ชนิด ได้แก่ MCF-7, MDA-MB-231, MDA-MB-468 และ BT-549 พบว่าสามารถยับยั้งเซลล์มะเร็งเต้านมทั้ง 4 ชนิด โดยให้ค่า IC_{50} เท่ากับ 7.03 ± 0.99 , 5.85 ± 0.36 , 6.10 ± 0.14 และ $6.20\pm 0.07 \mu\text{M}$ ตามลำดับ

คำสำคัญ: สารประกอบเชิงซ้อนเออริเดียม(III), ไตรฟีนิลฟอสฟีน, การเปล่งแสง, ฤทธิ์ต้านมะเร็ง

¹ สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

¹ Division of Physical Science and Center of Excellence for Innovation in Chemistry, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.

² สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² Center of Excellence in Civil Engineering, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

* Corresponding author, e-mail: nararak.le@psu.ac.th Tel: 0 74288421

ABSTRACT

In this study, $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex was synthesized via the substitution reaction between Ir(III) dimeric complex with triphenylphosphine (PPh_3) ligand in dichloromethane solvent. The complex was characterized by single crystal X-ray diffraction, ^1H -NMR, FTIR spectroscopies and elemental analysis. Photo-physical properties of the title complex were studied for a further application based on its luminescence at 489 nm with an excitation wavelength at 350 nm. It behaved as a turn-off luminescent chemosensor toward Fe(III) ion concentrations. In addition, it was investigated for anti-breast cancer activity against four cell lines of MCF-7, MDA-MB-231, MDA-MB-468 and BT-549 with IC_{50} values: 7.03 ± 0.99 , 5.85 ± 0.36 , 6.10 ± 0.14 and 6.20 ± 0.07 μM , respectively.

Key words: iridium (III) complex, triphenylphosphine, luminescence activity, anticancer

INTRODUCTION

Currently, Iridium (III) complexes have been widely explored for their photo-physical properties and biological activities (Liu and Sadler, 2014; Lu *et al.*, 2015; Esteruelas *et al.*, 2017). There are variety investigations on LEDs application due to the emissive luminescence intensities of Ir(III) complexes (Zanoni *et al.*, 2015). Moreover, Iridium(III) complex-based chemo-sensors are also used *in vitro* and *in vivo* metal ions detection because of their photophysical properties, for example, large Stoke shift, high quantum yield, and long lifetime of luminescent emission (Ma *et al.*, 2019). The cisplatin complex was recognized for a potent chemotherapeutic drug and cytotoxic effects on cancer cells treatment (Hao *et al.*, 2019; Brown *et al.*, 2019). Many side effects of using cisplatin have affected the patients such as vomiting, hair fall, kidney toxic, and blood test abnormalities, etc. (Xie *et al.*, 2020). Regarding these effects, Iridium(III) complexes have been widely studied for their cytotoxicity against various types of cancer cells because of the promising properties in iron mimicking, less toxic to normal cells and able to penetrate to cancer cells (Komarnicka *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2022). For example, the $[\text{Ir}(\eta^5\text{C}_5\text{Me}_4\text{CH}_2\text{py})(2\text{-phenylpyridine})]\text{PF}_6$ complex where $\text{C}_4\text{Me}_4\text{CH}_2\text{py}$ is 2-((2,3,4,5-tetramethylcyclopenta-1,3-dien-1-yl)methyl)pyridine was studied in its cytotoxicity on A2780, colon tumor cell line (HCT 116) and MCF-7 breast cancer cell line. The results exhibited that complex showed higher growth inhibition potential

than cisplatin for A2780, HCT116 and MCF7 (Conesa *et al.*, 2020). Moreover, the synthesized iridium(III) hydride complex displayed good results for cytotoxicity studies of anticancer activities to A2780 and MCF7 cells with $\text{IC}_{50} = 0.98$ μM and 4.46 μM , respectively (Wang *et al.*, 2019). In our previous work, we have reported the antiproliferative activity of cyclometalated $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{dppm})\text{Cl}]$ against 3 breast cancer cells (Leesakul *et al.*, 2021). This complex displayed the greater response more than cisplatin for those 3 cell lines about 25-160 folds. Therefore, it is interesting to explore anticancer activity of cyclometated Ir(III) complex with other organophosphorus ancillary ligands comparison to the different medicinal drug for cancer treatment. In this present work, the $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex has been synthesized, characterized and studied for its cytotoxicity against 4 breast cancer cells; MCF-7, MDA-MB-231, MDA-MB-468 and BT-549; comparison with doxorubicin which is a chemotherapy medication for cancer treatment. Besides, many works have focused on chemo-sensor application (Liu *et al.*, 2017; Ma *et al.*, 2018). Most of them are ionic complexes of Ir(III) based 2-phenylpyridine derivatives. They have demonstrated to be both turn-on and turn-off luminescent probes (Ru *et al.*, 2014; Ge *et al.*, 2022). Nevertheless, there is very seldom to report for neutral complexes. Therefore, exploring the quenching reactions between the title complex with 6 transition metals and heavy metal ions (Fe^{3+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Co^{2+} and Pb^{2+}) has been our challenge.

MATERIALS AND METHODS

Materials

Chemicals were obtained from commercial sources and used without further purification. Iridium(III)chloride trihydrate, 2-phenylpyridine and Triphenylphosphine were purchased from Merck, Sigma-Aldrich and TCI, respectively. Dichloromethane, diethyl ether and *N,N*-dimethylformamide solvents were A.R. grade and were purchased from Labscan.

Instrumentation

^1H -NMR spectrum in CDCl_3 was obtained from 300 MHz of BRUKER ADVANCE 300 FT-NMR spectrometer. Vibrational frequencies of FTIR spectrum were measured by using Nicolet iS5 FTIR spectrophotometer in the range between $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$. The melting point of the $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex was determined by Thomas-Hoover, Unimelt. The temperatures were scanned between 0 to 360°C . Elemental analysis was performed using CHNS/O analyzer, Flash 2000, ThermoScientific, Italy.

Single crystal XRD pattern of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex was collected by a D8 VENTURE Bruker AXS diffractometer with PHOTON II Charge-Integrating Pixel Array area detector using graphite-monochromated Mo K_α radiation ($\lambda = 0.71073\text{ \AA}$). The diffraction pattern was monitored from 30304 reflections. The softwares SMART, SAINT v8.38A and SADABS were used to interpret the raw data. The structure was solved by SHELXS (Sheldrick, 2015). The anisotropic thermal parameters were refined for non-hydrogen atoms by the anisotropic thermal parameters. A riding model was utilized to refine calculations with all hydrogen atoms placed in ideal positions. The materials and molecular graphics for publication were prepared with the WinGX 2018/3 (Farrugia, 2012) and Mercury 2020.3 (Macrae *et al.*, 2008) programs. Crystal data of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ were deposited in the Cambridge Crystallographic Data Center and can be provided upon request, using the access CCDC code of: 2172804, via: http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif (or from the Cambridge Crystallographic Data Centre, 12 Union Road, Cambridge CB21EZ, U.K.; fax: +44 1223 336 033 or email deposit@ccdc.cam.ac.uk).

The X-ray data are given in the supplementary information.

Synthesis pathway of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2\text{Cl}]_2$ and $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex

Iridium dimer was a precursor for the substitution reaction of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex synthesis. The dimer was synthesized by the reaction between iridium(III) chloride trihydrate and 2-phenylpyridine in 2-ethoxyethanol: distilled H_2O . A mixture of iridium(III) chloride trihydrate (0.1493 g, 0.5 mmol) and 2-phenylpyridine (0.2850 mL, 2 mmol) was refluxed in 2-ethoxyethanol: distilled $\text{H}_2\text{O} = 3:1$ (30:10 mL) for 24 h under Ar gas. After cooling to room temperature, the mixture was filtered and washed with diethyl ether (Xu *et al.*, 2011). The yellow powder of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2\text{Cl}]_2$ was collected and characterized.

Yield: 40.3 %, Melting point: $283\text{--}284^\circ\text{C}$, Anal. Cald (%) for $\text{IrC}_{40}\text{H}_{31}\text{N}_2\text{P}_2\text{Cl}_2$: C 49.28, H 2.99, N 5.23. Found: C 48.41, H 2.96, N 4.94, FTIR (KBr, cm^{-1}) see Figure S1: $\nu_{\text{C-H}}$ 3058, $\nu_{\text{C-H}}$ 756, $\nu_{\text{C=C}}$ 1478, $\nu_{\text{C-N}}$ 1268, $\nu_{\text{C=N}}$ 1605, $\nu_{\text{Ir-N}}$ 735, $\nu_{\text{Ir-Cl}}$ 460. ^1H NMR (300 MHz, $d_6\text{-CDCl}_3$) see Figure S2: 9.23(4H, d, $J = 5.1\text{ Hz}$, H8), 7.87 (4H, d, $J = 7.8\text{ Hz}$, H4), 7.74 (4H, t, $J = 7.80\text{ Hz}$, H3), 7.49 (4H, d, $J = 7.8\text{ Hz}$, H5), 6.76 (8H, m, $J = 8.7\text{ Hz}$, H6/7), 6.56 (4H, t, $J = 7.8\text{ Hz}$, H2), 5.93 (4H, d, $J = 7.5\text{ Hz}$, H1).

The $[\text{Ir}(\text{ppy})_2\text{Cl}]_2$ was used to further react with triphenylphosphine ligand in dichloromethane for synthesizing $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex. A solution of iridium(III) dimer (0.1635 g, 0.5 mmol) and triphenylphosphine (0.0787 g, 2 mmol) was refluxed in 30 mL of dichloromethane for 12 h under Ar atmosphere. The complex was filtered and washed by using diethyl ether for three times.

Yield: 48.3%, Melting point: $358\text{--}360^\circ\text{C}$, Anal. Cald (%) for $\text{Ir}_2\text{C}_{44}\text{H}_{32}\text{N}_4\text{Cl}_2$: C 60.18, H 3.91, N 3.51. Found: C 60.88, H 3.97, N 3.54, FTIR see Figure 4: $\nu_{\text{sp}^2\text{ C-H}}$ 3000, $\nu_{\text{C=C}}$ 2345/1730, $\nu_{\text{C=N}}$ 1650, $\nu_{\text{C-N}}$ 1420, $\nu_{\text{C-C}}$ 1010, $\nu_{\text{C-H}}$ 800-1000, $\nu_{\text{Ir-P}}$ 780, $\nu_{\text{Ir-N}}$ 760, $\nu_{\text{Ir-Cl}}$ 510 cm^{-1} . ^1H NMR (300 MHz, $d_6\text{-CDCl}_3$) see Figure 5: 9.24 (2H, d, $J = 6.04$

Hz, H1), 8.85 (2H, d, $J = 4.92$ Hz, H4), 7.86 (2H, d, $J = 7.83$ Hz, H5), 7.73 (2H, t, $J = 14.76$ Hz, H2), 7.5 (8H, m, H3/6/7/8), 6.84 (5H, m, H9/10/11).

Photo-physical properties

Absorption spectra of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}].\text{CH}_2\text{Cl}_2.\text{H}_2\text{O}$ complex in dichloromethane (CH_2Cl_2) were recorded by TU-1950 model UV-Visible Spectrophotometer. A standard quartz cell of $1 \times 1 \text{ cm}^2$ was used. Deuterium and tungsten lamps were light sources in UV and visible regions, respectively.

Photoluminescence (PL) spectra were monitored by Cary Eclipse Fluorescence spectrometer, Agilent Technology. Relative quantum yield of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}].\text{CH}_2\text{Cl}_2.\text{H}_2\text{O}$ in CH_2Cl_2 was determined using Kotelevskiy equation (Kotelevskiy, 1998; Rosspeintner *et al.*, 2006; Yoopensuk *et al.*, 2012) at 25°C . Diluted concentrations of $5 \mu\text{M}$ of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}].\text{CH}_2\text{Cl}_2.\text{H}_2\text{O}$ sample and coumarin-6 reference standard were prepared in CH_2Cl_2 and ethanol, respectively. Absorbances of both solutions at 350 nm were less than 0.05 for preventing self-quenching reaction. The quantum yield of coumarin-6 in ethanol at 25°C was 0.8 (Drexhage, 1976).

Photo-induced electron transfer between the $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}].\text{CH}_2\text{Cl}_2.\text{H}_2\text{O}$ luminophore and metal ions was carried out using quenching

experiments in dimethyl- formamide (DMF). Samples consisted of a steady concentration of 0.03 mM of the luminophore with various concentrations 0.05 - 0.65 mM of metal ions. Stern-Volmer plot was applied to determine the Stern-Volmer constant, while Job's plot was used to identify the stoichiometry of a binding between iridium(III) luminophore and selective metal ion. Benesi-Hildebrand was manipulated to calculate an apparent constant (K_{app}) of 1:1 binding.

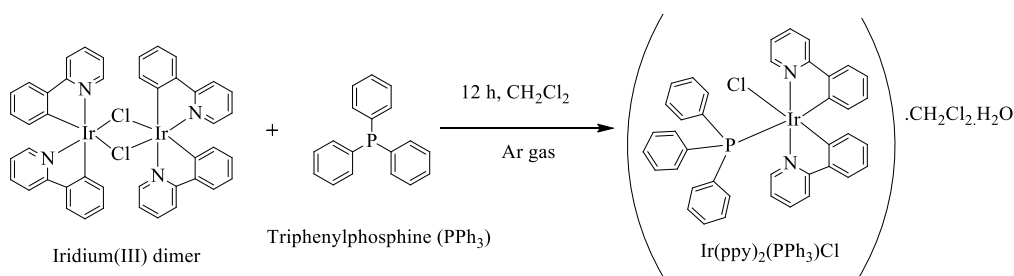
Anticancer assay

The anti-breast cancer activity measurements were carried out using the MTT assay against MCF-7 (ATCC HTB-22), MDA-MB-231 (ATCC HTB-26), MDA-MB-468 (ATCC HTB-132) and BT-549(ATCC HTB-122) cell lines. The cytotoxicity of complex against breast cancer cells was evaluated and compared with doxorubicin as a positive control. IC_{50} values were reported.

RESULTS AND DISCUSSION

Synthesis and characterization

$[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}].\text{CH}_2\text{Cl}_2.\text{H}_2\text{O}$ complex was synthesized by the reaction of iridium (III) dimer with the P-donor ligand of triphenylphosphine in dichloromethane (Scheme 1).



Scheme 1 Synthesis pathway $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}].\text{CH}_2\text{Cl}_2.\text{H}_2\text{O}$ complex

In order to confirm the structure of studied complex, results from single crystal XRD, FTIR ^1H -NMR and elemental analysis techniques were investigated. The crystallographic data of the $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}].\text{CH}_2\text{Cl}_2.\text{H}_2\text{O}$ complex are displayed in Table 1. The complex shows distorted octahedral geometry with two molecules of 2-phenylpyridine (ppy) ligand, single molecule of triphenylphosphine

and one Cl^- ligand (Figure 1). The $\text{C}_{\text{pyridine}}$ of these two rings are in *cis* orientation, while $\text{N}_{\text{pyridine}}$ are in *trans* position. Selected bond lengths and bond angles of this complex are shown in Table 2. Bond lengths of Ir-C (C22 and C11), Ir-N (N1 and N2), Ir-Cl and Ir-P are $2.026(11)$, $2.025(12)$, $2.048(10)$, $2.078(9)$, $2.493(3)$ and $2.410(3) \text{ \AA}$, respectively, corresponding to the related structure reported by (Orpen *et*

al.,2006; Wang *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2009). Bond angles of coordination around iridium(III) ion deviate from 90 ° and 180 °. The angles of C11-Ir1-N1 and C22-Ir1-N2 are 80.6(5) ° and 80.5(5) °, respectively. It is very slightly different from related literatures; C29-Ir1-N1 and C40-Ir1-N2 are 80.5(3) ° and 79.9(3) ° for [Ir(ppy)₂(PPh₃)Cl].CH₂Cl₂.H₂O and 80.81(9) ° in [IrH{κ³-C,N,(C-H)(C₆H₄-py-Ph)}(PⁱPr₃)₂].BF₄ (Castro-Rodrigo *et al.*, 2019). The N1-Ir1-P1 and N2-Ir1-P1 are 89.0(3) ° and 99.2(3) °, respectively similar to the report from Wang and co-worker (Wang *et al.*, 2005). For C22-Ir1-Cl1, C1-Ir1-P17 and N1-Ir1-N2 angles are in between 169.7-174.4 °, respectively

which deviates from ideal 180 °. Intramolecular π-π stacking between pyridine (C12-C16) and a phenyl ring of phosphine molecule (C23-C26), Cg4...Cg7 = 3.674 Å and C-H...π of C40-H40...Cg6 = 2.833 Å are observed (Figure 2). Moreover, two weak intramolecular H-bond interaction viz. C12-H12...Cl1 = 3.349(15) Å and C30-H30...Cl1 = 3.279(12) Å are monitored. For intermolecular interactions, H-bonds of C41-H41A...Cl1 = 3.74(2), O1-H1A...O1 = 3.08(15) and O1-H1B...O1 = 3.08(15) Å are found. In addition, C-H...π of C8-H8...Cg8 = 2.988 Å are also detected (Figure 3).

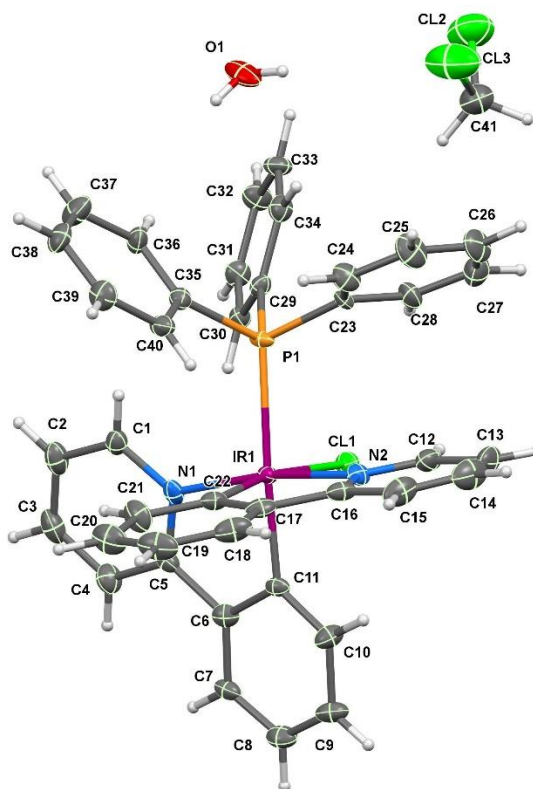


Figure 1 An ORTEP structure of the [Ir(ppy)₂(PPh₃)Cl].CH₂Cl₂.H₂O complex with numbered

Table 1 Crystallographic data of the [Ir(ppy)₂(PPh₃)Cl].CH₂Cl₂.H₂O complex

Empirical formula	C ₄₀ H ₃₁ ClIrN ₂ P, CH ₂ Cl ₂ , H ₂ O
Formula weight	901.23
Wavelength	0.71073 Å
Crystal system	Monoclinic
Space group	<i>P</i> 2 ₁ / <i>C</i>
Unit cell dimensions	<i>a</i> = 10.0757(10) Å <i>b</i> = 15.0507(13) Å <i>c</i> = 24.640(2) Å <i>α</i> = 90 ° <i>β</i> = 99.570(4) ° <i>γ</i> = 90 °
Temperature	296(2) K
<i>Z</i>	4
Density (calculated)	1.625 Mg/m ³
Absorption coefficient	3.920 mm ⁻¹
Volume	3684.6(6) Å ³
Goodness-of-fit on <i>F</i> ²	1.107
Final <i>R</i> indices [<i>I</i> > 2σ(<i>I</i>)]	<i>R</i> 1 = 0.0663 <i>wR</i> 2 = 0.1664
<i>R</i> indices (all data)	<i>R</i> 1 = 0.0682 <i>wR</i> 2 = 0.1679

Table 2 Selected bond lengths (Å) and angle (°) for the [Ir(ppy)₂(PPh₃)Cl].CH₂Cl₂.H₂O complex

Lengths			
Ir(1)-N(1)	2.048(10)	Ir(1) -Cl(1)	2.493(3)
Ir(1)-N(2)	2.078(9)	Ir(1) -C(22)	2.026(12)
Ir(1)-P(1)	2.410(3)	Ir(1) -C(11)	2.025(12)
Angles			
C(22)-Ir(1)-C(11)	87.0(4)	N(1)-Ir(1)-P(1)	89.0(3)
C(22)-Ir(1)-N(1)	93.1(4)	N(2)-Ir(1)-P(1)	99.2(3)
C(11)-Ir(1)-N(1)	80.6(5)	C(22)-Ir(1)-Cl(1)	169.7(3)
C(22)-Ir(1)-N(2)	80.5(5)	C(11)-Ir(1)-Cl(1)	84.3(3)
C(11)-Ir(1)-N(1)	91.7(4)	N(1)-Ir(1)-Cl(1)	91.1(3)
N(1)-Ir(1)-N(2)	170.3(4)	N(2)-Ir(1)-Cl(1)	94.1(3)
C(22)-Ir(1)-P(1)	98.5(3)	P(1)-Ir(1)-Cl(1)	90.12(9)
C(11)-Ir(1)-P(1)	174.4(3)		

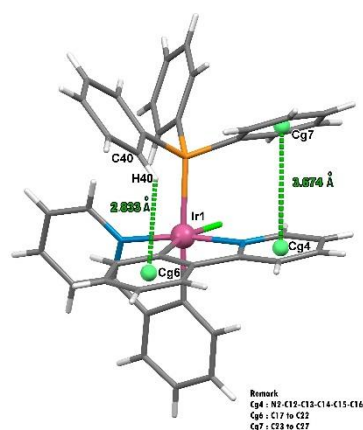


Figure 2 Intramolecular interactions of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex

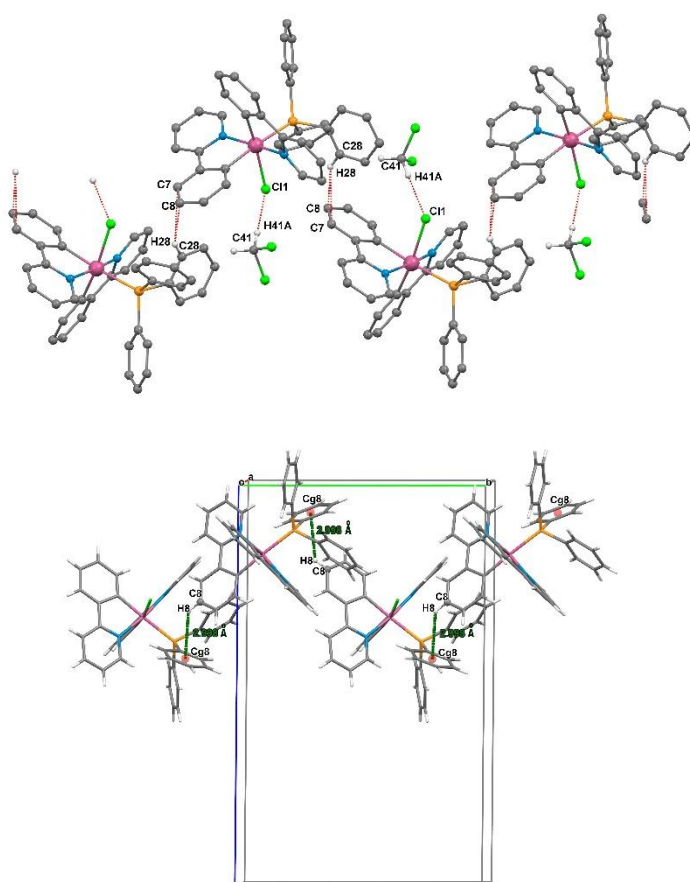


Figure 3 Intermolecular interactions of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex

Table 3 Hydrogen bonds for $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex [$\text{\AA}$ and $^\circ$].

D-H...A	d(D-H)	d(H...A)	d(D...A)	<(DHA)
C(12)-H(12)...Cl(1)	0.93	2.70	3.349(15)	127.8
C(41)-H(41A)...Cl(1)#1	0.97	2.77	3.74(2)	173.8
C(30)-H(30)...Cl(1)	0.93	2.79	3.279(12)	113.8
O(1)-H(1A)...O(1)#2	1.07(16)	2.51(14)	3.08(15)	113(10)
O(1)-H(1B)...O(1)#2	0.86(4)	2.59(12)	3.08(15)	117(11)

Symmetry transformations used to generate equivalent atoms: #1 -x, y+1/2, -z+1/2 #2 -x+1, -y+2, -z+1

FTIR spectrum (Figure 4) of the $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex exhibited characteristic peaks during 1650-450 cm^{-1} range. The vibrational frequencies of the coordination between iridium(III) metal center and donating atoms of N(ppy), P(PPh_3) and Cl were found at 698, 736 and 522 cm^{-1} ,

respectively. ^1H -NMR spectrum (Figure 5) of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex was measured in CDCl_3 . The coupling signals presented the chemical shift mainly in 6.5-9.5 ppm range corresponding to numbers of protons of pyridine rings from ppy ligand and phenyl rings from PPh_3 ligand.

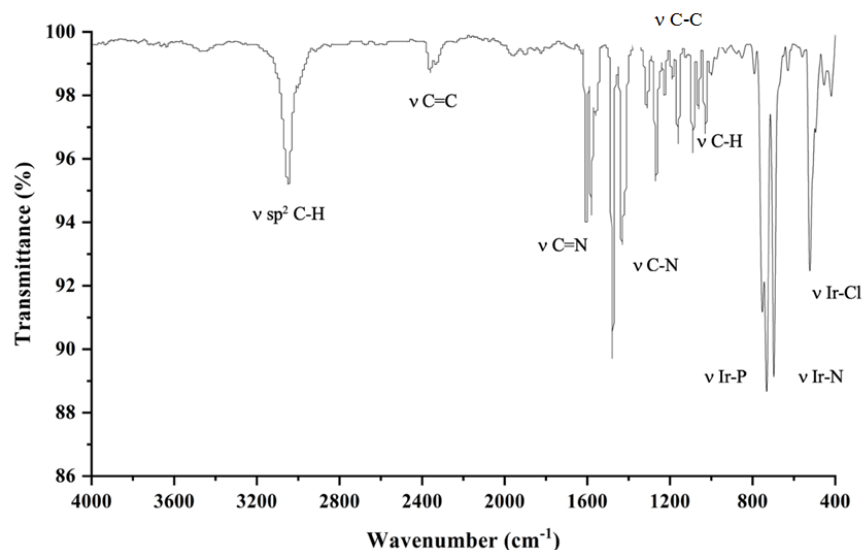


Figure 4 FTIR spectrum of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex

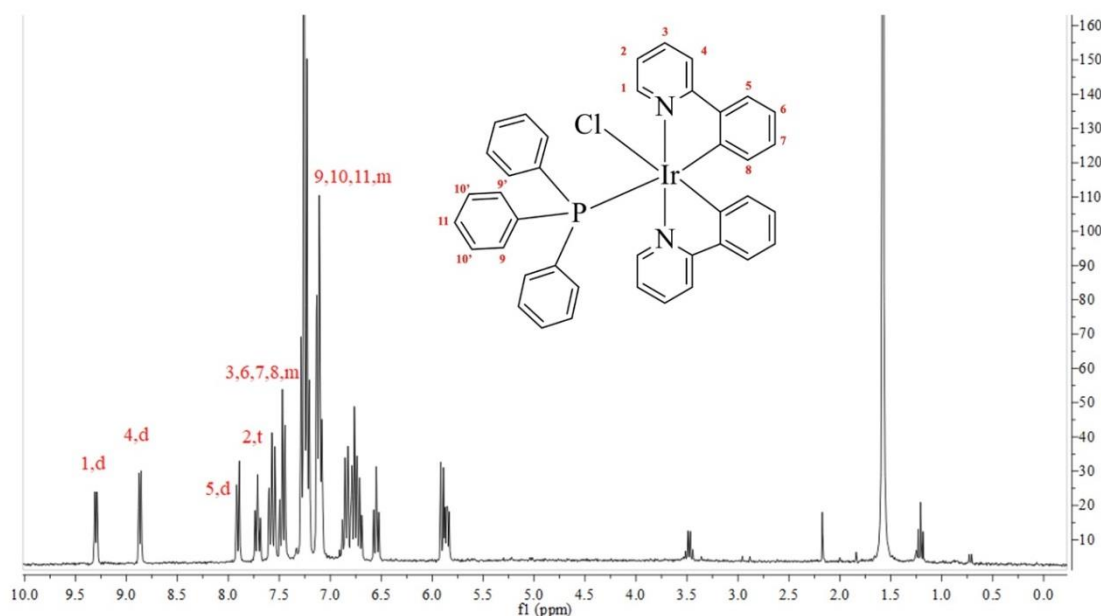


Figure 5 ^1H -NMR spectrum of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex

Photo-physical properties and quenching reaction

The UV-Visible spectrophotometer was used to study the electronic spectra of complex. Absorption spectrum of 0.2 mM of

$[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ dimethylformamide (DMF) solution was measured. The absorption spectrum of the Iridium(III) complex showed an absorption band at λ_{max} 388 nm (Figure 6)

with molar extinction coefficient (ϵ) of $1781 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ defined the transition from charge transfers (CTs) transition in the complex (Leesakul *et al.*, 2021). The emission spectrum

of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ displayed a luminescent band at 489 nm and a shoulder at 525 nm when excited at 350 nm (Figure 6) in dimethylformamide (DMF) solvent.

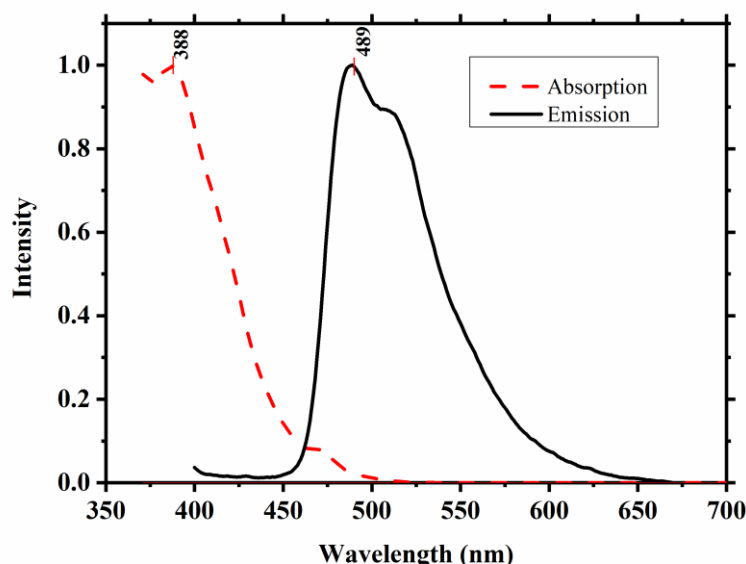


Figure 6 Absorption and emission spectra of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ in DMF

Quenching reaction between $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex and various metal ions (Fe^{3+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Co^{2+} and Pb^{2+}) were investigated in DMF with the concentration range of 5×10^{-5} to $6.5 \times 10^{-4} \text{ M}$. It was found that the Ir(III) complex was selective to Fe(III) as shown in Figure 7. The luminescence intensities of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex gradually decreased corresponding to the increasing concentrations of Fe(III) solution, while others did not obviously show the quenching behavior (Figure 8). In addition, the interfering tests of Ir(III) with a presence of Fe(III) and other metal ions, as shown in Figure 8, were studied through recording the luminescence quenching ratio on Fe(III) with the addition of other interfering metal ions. It was found that all other metal ions did not interfere with the detection of Fe(III). The presence of Fe(III) enormously quenched the luminescence of our studied complex. Quenching efficiency was above 95 % with 0.2 mM of Ir(III) complex and the detection limit (DL) was $18.4 \mu\text{M}$. Stern-Volmer plot was used to determine the Stern-Volmer constant (K_{SV}) which tells

how good of electron transfer from Ir(III) to Fe(III). This plot is a relative between I_0/I (y-axis) versus $[Q]$ (x-axis) where I_0 is the intensity of Ir(III) without quencher, it is the intensity of Ir(III) with presence of each concentration of Fe(III) solution, and $[Q]$ is the concentration of quencher. The SV plot showed a non-linear with a curve bending upward to the y-axis (Figure 9) which can occur either from ground state complex formation or inner filter effect (Leesakul *et al.*, 2017). Nevertheless, the K_{SV} can be determined from the linear plot up to $2.0 \times 10^{-4} \text{ M}$ of the concentration of Fe(III) (inset of Figure 9). Regarding Stern-Volmer equation, $I_0/I = K_{\text{SV}}[Q]$, observed K_{SV} was 9330.26 M^{-1} .

To determine the stoichiometry of binding between the Ir(III) and Fe(III), Job plot was studied. There are in general three normal methods studying for complex ions: the method of continuous variations (Job's method), the mole-ratio methods, and the slope-ratio method (Harvey, 2013). It is one of the popular methods for ions in solution which indicates whether the formation is a 1:1 complex or not. The Job plot corresponds

to the mole fraction of the Fe(III) bound to the Ir(III) complex. Job plot for recent work is presented in Figure 10. For this graph, the maximum in the curve is the plot exhibited the maximum crossing point at $\chi = 0.5$. It revealed a 1:1 metal ion to complex binding stoichiometry.

In order to identify a binding constant (K_b) from the quenching reaction, modified

$$\frac{1}{I_0 - I} = \frac{1}{I_0 - I_c} + \frac{1}{(I_0 - I_c)[Q] K_b} \quad (1)$$

Benesi-Hildebrand plot (Figure 11) indicated the formation of a 1:1 complex (linear plot). With present study, the binding constant

Benesi-Hildebrand equation (1) was applied. This constant shows how good Fe(III) and Ir(III) complex are bound together. The parameter I_0 is initial fluorescence intensity of complex without quencher; I_c is fluorescence intensity of quencher bounded with complex; I is fluorescence intensity of complex in each concentration of quencher; and $[Q]$ is concentration of metal ion.

was $8.41 \times 10^3 \text{ M}^{-1}$ indicating high binding affinity between Ir(III) complex and Fe(III).

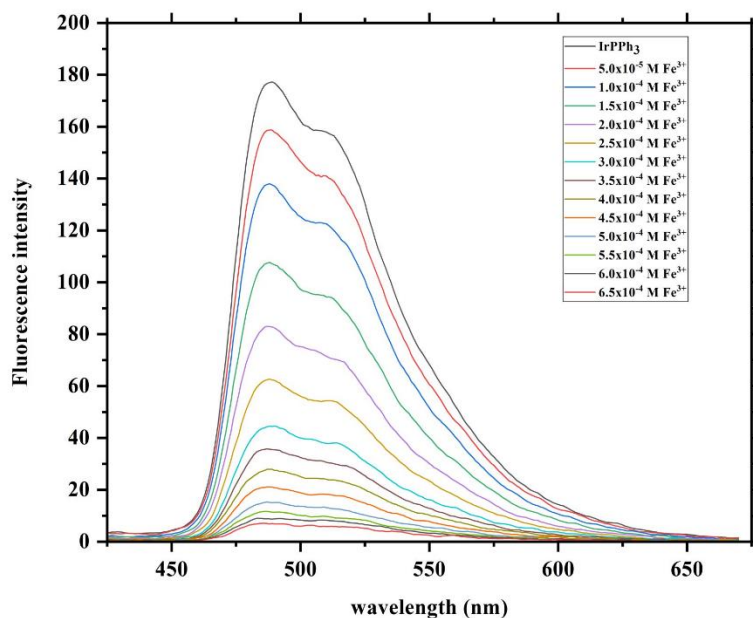


Figure 7 Quenching reaction between $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ and various concentrations of Fe(III) (5×10^{-5} to $6.5 \times 10^{-4} \text{ M}$) in DMF

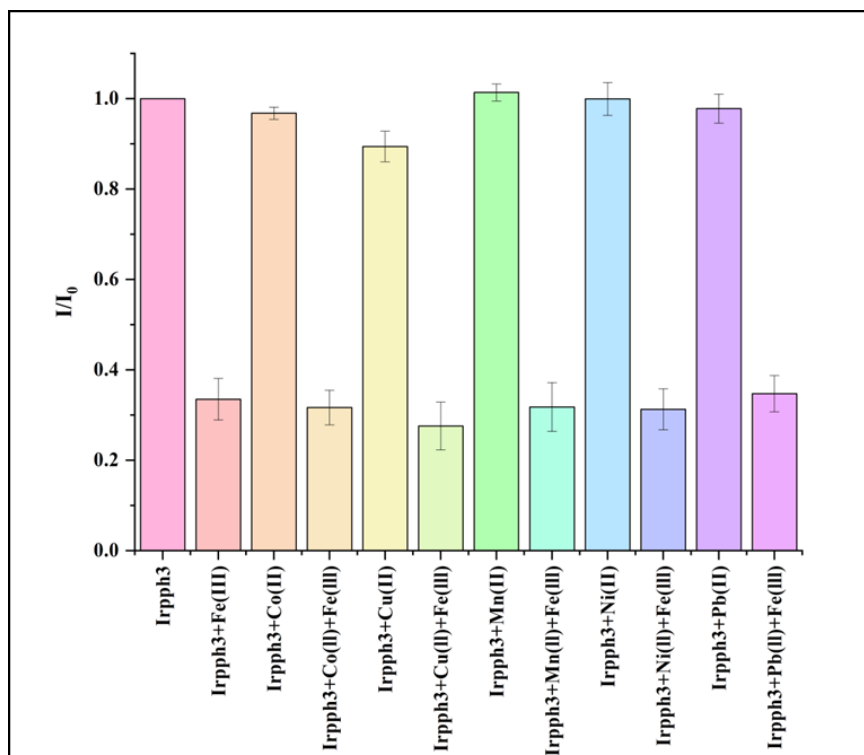


Figure 8 Luminescence spectra bar graph representation of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex solution upon addition of various metal cations.

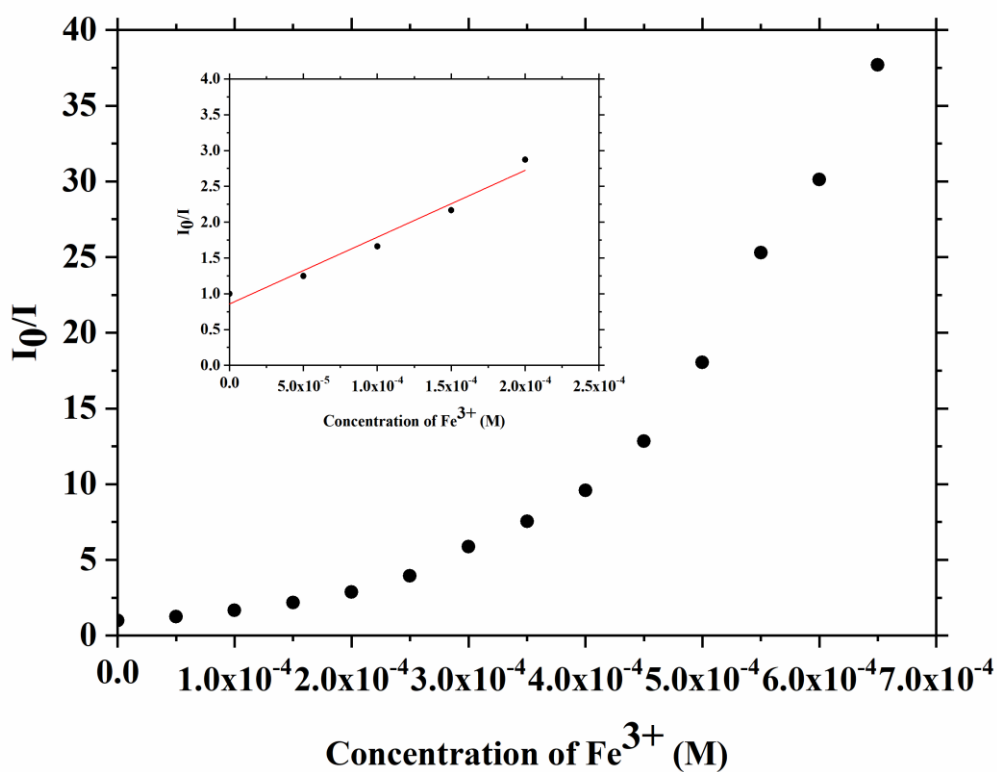


Figure 9 Stern-Volmer plot from quenching reaction between $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ and various concentrations of Fe(III)

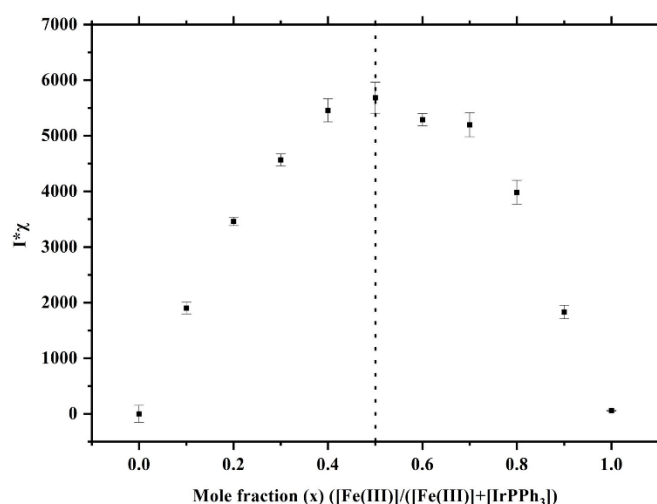


Figure 10 Job's plot (mole fraction) for determining the stoichiometry of the complex between $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Fe}(\text{III})$.

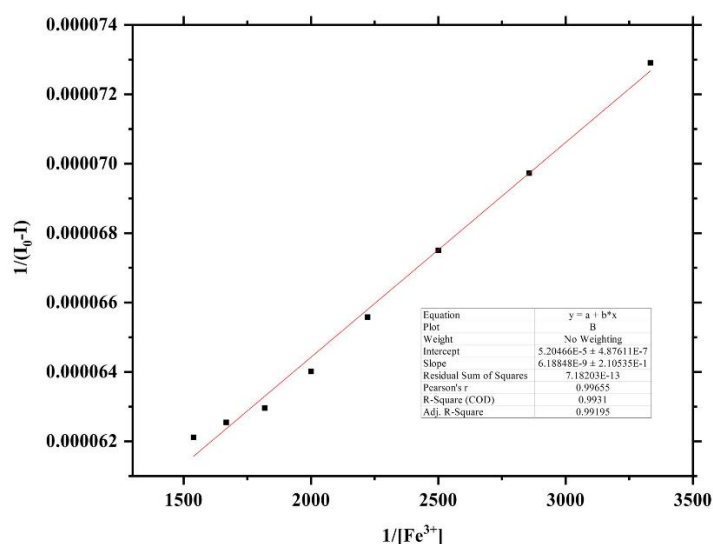


Figure 11 Benesi-Hidebrand plot of $\text{Fe}(\text{III})$ luminescence titration between $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ and various concentrations of $\text{Fe}(\text{III})$

Anticancer properties

The anticancer activity of $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex was studied by MTT assay against human breast cancer cell lines such as MCF-7, MDA-MB-231, MDA-MB-468 and BT-549. The IC_{50} values were determined as shown in Table 3. The $[\text{Ir}(\text{ppy})_2(\text{PPh}_3)\text{Cl}]\cdot\text{CH}_2\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ complex is able to inhibit breast cancer cell line growth

with IC_{50} values 7.03 ± 0.99 , 5.85 ± 0.36 , 6.10 ± 0.14 and 6.20 ± 0.07 μM for MCF-7, MDA-MB-231, MDA-MB-468 and BT-549 cell lines, respectively. Notably, the growth inhibition of MDA-MB-231 cell line presented the lowest IC_{50} value. Nevertheless, the IC_{50} values were all higher than those tested with Doxorubicin, an effective anticancer drug.

Table 3 IC₅₀ values (μM) in various breast cancer cell lines after treatment with [Ir(ppy)₂(PPh₃)Cl] complex for 48 h

Complexes	IC ₅₀ (μM)			
	MCF-7	MDA-MB-231	MDA-MB-468	BT-549
[Ir(ppy) ₂ (PPh ₃)Cl].CH ₂ Cl ₂ .H ₂ O	7.03 ± 0.99	5.85 ± 0.36	6.10 ± 0.14	6.20 ± 0.07
Doxorubicin	1.20 ± 0.11	1.27 ± 0.02	1.14 ± 0.01	0.88 ± 0.05

CONCLUSION

The [Ir(ppy)₂(PPh₃)Cl].CH₂Cl₂.H₂O complex was characterized by single crystal X-ray diffraction, elemental analysis and spectroscopic techniques. This study summarizes that the distorted Ir(III) complex adopted distorted octahedral geometry. The complex is a photoactive agent giving a large luminescence band between 450-650 nm. A significant turn-off luminescence against Fe(III) is observed when Fe(III) concentration increased. Owing to Job's plot and modified Benesi-Hildebrand, 1:1 ratio binding between the studied complex and Fe(III) is presented. Moreover, the complex possesses good cytotoxic activity against four breast cancer cells, but less than Doxorubicin for 5-7 times

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank to *Science Achievement Scholarship of Thailand*, SAST for financial support for graduate study and research budget for Master Degree study for Ms.Rattanyu Kongpan. NL is grateful for partial financial support under contract number SCI64020775 from Prince of Songkla University and facility from Division of Physical Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University. Authors would like thank Ms.Jutamat Hemtanon and Ms.Yasamin Manraden for their preliminary work on Ir(III) complex with PPh₃ ligand.

REFERENCES

- Brown, A., Kumar, S. and Tchounwou, P.B. 2019. Cisplatin-Based Chemotherapy of Human Cancers. **Journal of Cancer Science & Therapy** 11(4): 97.
- Castro-Rodrigo, R., Esteruelas, M.G., Gómez-Bautista, D., Lezáun, V., López, A.M., Oliván, M. and Oñate, E. 2019. Influence of the Bite Angle of Dianionic C,N,C-Pincer Ligands on the Chemical and Photophysical Properties of Iridium(III) and Osmium(IV) Hydride Complexes. **Organometallics** 38(19): 3707-3718.
- Chen, W., Cai, X., Sun, Q., Guo, X., Liang, C., Tang, H., Huang, H., Luo, H., Chen, L. and Chen, J. 2022. Design and synthesis of aptamer-cyclometalated iridium(III) complex conjugate targeting cancer cells. **European Journal of Medicinal Chemistry** 236(1): 114335.
- Conesa, J.J., Carrasco, A.C., Rodríguez-Fanjul, V., Yang, Y., Carrascosa, J.L., Cloetens, P., Pereiro, A. and Pizarro, A.M. 2020. Unambiguous Intra-cellular Localization and Quantification of a Potent Iridium Anticancer Compound by Correlative 3D Cryo X-Ray Imaging. **Angewandte Chemie International Edition** 59(3): 1270-1278.
- Drexhage, K.H. 1976. Fluorescence Efficiency of Laser Dyes. **Journal of Research of the National Bureau of Standards. Section A, Physics and Chemistry** 80A(3): 421-428.
- Esteruelas, M.A., Oñate, E. and Palacios, A.U. 2017. Identification of an iridium(III) complex with anti-bacterial and anti-cancer activity. **Journal of Organometallic Chemistry** 36(9): 1743-1755.
- Farrugia, L.J. 2012. WinGX and ORTEP for Windows: an update. **Journal of Applied Crystallography** 45(4): 849-854.
- Ge, Z., Tong, X., Huang, Y., Li, W., Li, H., Lu, A. and Li, T. 2022. Highly Luminescent Dinuclear Iridium(III) Complexes Containing Phenanthroline-Based Neutral Ligands as Chemosensors for Cu²⁺ Ion. **Organometallics** 41(6): 706-715.

- Hao, H., Liu, X., Ge, X., Zhao, Y., Tian, X., Ren, T., Wang, Y., Zhao, C. and Liu, Z. 2019. Half-sandwich iridium(III) complexes with α -picolinic acid frameworks and antitumor applications. **Journal of Inorganic Biochemistry** 192(1): 52-61.
- Harvey, D. 2013. **Spectrophotometric Studies of Complex Ions**. Chemistry LibreTexts. Available Source: https://chem.libretexts.org/Courses/Providence_College/CHM_331_advanced_Analytical_Chemistry_1, June 29, 2020.
- Komarnicka, U.K., Niorettini, A., Koziół, S., Pucelik, B., Barzowska, A., Wojtala, D., Ziółkowska, A., Lesiów, M., Kyzioł, A., Caramori, S., Porchia, M. and Bieńko, A. 2022. Two out of Three Musketeers Fight against Cancer: Synthesis, Physicochemical, and Biological Properties of Phosphino Cu^I, Ru^{II}, Ir^{III} Complexes. **Pharmaceuticals (Basel, Switzerland)** 15(2): 169.
- Kotelevskiy, S.I. 1998. The true refractive index correction to the fluorescence intensity in the commercial fluorescence spectrophotometer. **Journal of Luminescence** 79(3): 211-214.
- Leesakul, N., Kullawanichaiyanan, K., Mutić, S., Guzsvány, V., Nhukeyaw, T., Ratanaphan, A., Saithong, S., Konno, T., Sirimahachai, U. and Promarak, V. 2021. A photoactive iridium(III) complex with 3-methyl-2-phenyl pyridine and 1,1-bis (diphenylphosphino) methane: Synthesis, structural characterization and cytotoxicity in breast cancer cells. **Journal of Coordination Chemistry** 74(14): 2380-2394.
- Leesakul, N., Masen, D. and Grampp, G. 2017. Fluorescence Quenching Reaction of Chlorophyll a by Tris(acetylacetonate) iron(III) in Various Solvents. **Sains Malaysiana** 46(9): 1369-1377.
- Liu, Z., Bian, Z. and Huang, C. 2009. Luminescent Iridium Complexes and Their Applications, pp. 113-142. In Bozec, H. and Guerchais, V., eds. **Molecular Organometallic Materials for Optics**. Springer Berlin, Heidelberg.
- Liu, Z. and Sadler, P.J. 2014. Organo-iridium Complexes: Anticancer Agents and Catalysts. **Accounts of Chemical Research** 47(4): 1174-1185.
- Liu, J., Wang, W., Li, G., Wang, R., Leung, C. and Ma, D. 2017. Luminescent Iridium(III) Chemo- sensor for Tandem Detection of F⁻ and Al³⁺. **ACS Omega** 2(12): 9150-9155.
- Lu, L., Lui, L., Chao, W., Zhong, H., Wang, M., Chen, X., Lu, J., Li, R., Ma, D. and Leung, C. 2015. Identification of an iridium(III) complex with anti-bacterial and anti-cancer activity. **Scientific Reports** 5(1): 14544.
- Ma, D., NG, H., Wong, S., Vellaisamy, K., Wu, K. and Leung, C. 2018. Iridium(III) complexes as reaction based chemosensors for medical diagnostics. **Dalton Transactions** 47(43): 15278-15282.
- Ma, D., Wong, S., Kang, T., Ng, H., Han, Q. and Leung, C. 2019. Iridium(III)-based chemosensors for the detection of metal ions. **Methods** 168(1): 3-17.
- Macrae, C.F., Bruno, I.J., Chisholm, J.A., Edgington, P.R., McCabe, P., Pidcock, E., Rodriguez-Monge, L., Taylor, R., Van De Streek, J. and Wood, P.A. 2008. *Mercury CSD 2.0* - new features for the visualization and investigation of crystal structures. **Journal of Applied Crystallography** 41(2): 466-470.
- Orpen, A.G., Brammer, L., Allen, F.H., Kennard, O., Watson, D.G. and Taylor, R. 2006. **Typical Interatomic Distances in Organic Compounds and Organometallic Compounds and Coordination Complexes of the d- and f-block metals**. Wiley, New York.
- Rosspointner, A., Angulo, G., Weiglhofer, M., Landgraf, S. and Grampp, G. 2006. Photophysical properties of 2,6-dicyano-N,N,N',N'-tetramethyl-p-phenylenediamine. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry** 183(1): 225-235.
- Ru, J., Guan, L., Tang, X., Dou, W., Yao, X., Chen, W., Liu, Y., Zhang, G., Liu, W., Meng, Y. and Wang, C. 2014. Turn-on Phosphorescent Chemodosimeter for

- Hg²⁺ Based on a Cyclometalated Ir(III) Complex and Its Application in Time-Resolved Luminescence Assays and Live Cell Imaging. **Inorganic chemistry** 53(21): 11498-11506.
- Sheldrick, G.M. 2015. Crystal structure refinement with SHELXL. **Acta Crystallographica Section C** 71(1): 3-8.
- Wang, Y., Tang, A., Wang, Y., Xu, X. and Teng, F. 2005. Chlorobis[2-(2-pyridyl)phenyl-κ²N,C1](triphenylphosphine-κP) iridium(III) dichloromethane sesquisolvate. **Acta Crystallographica Section E** 61(4): 778-780.
- Wang, X., Zhang, J., Zhao, X., Wei, W. and Zhao, J. 2019. Imaging and proteomic study of a clickable iridium complex. **Metallomics** 11(8): 1344-1352.
- Xie, Y., Zhang, S., Ge, X., Ma, W., He, X., Zhao, Y., Ye, J., Zhang, H., Wang, A. and Liu, Z. 2020. Lysosomal-targeted anticancer half-sandwich iridium(III) complexes modified with lonidamine amide derivatives. **Applied Organometallic Chemistry** 34(5): e5589.
- Xu, M., Zhou, R., Che, G., Wang, G., Wang, Z. and Xiao, Q. 2011. Synthesis and characterization of blue phosphorescent cyclometalated Ir(III) complexes containing 2-(imidazol-2-yl)pyridine as ancillary ligand. **Journal of Luminescence** 131(5): 909-914.
- Yoopensuk, S., Tongying, P., Hansongnorn, K., Pakawatchai, C., Saithong, S., Tantirungrotechai, Y. and Leesakul, N. 2012. Photoactive azoimine dyes: 4-(2-Pyridylazo)-*N,N*-diethylaniline and 4-(2-pyridylazo)-*N,N*-dimethylaniline: Computational and experimental investigation. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy** 86(1): 538-546.
- Zanoni, K., Coppo, P., Amaral, R. and Iha, N. 2015. Ir(III) complexes designed for light-emitting devices: beyond the luminescence color array. **Dalton Transactions** 44(33): 14559-14573.

การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้จากไม้ไผ่ด้วยการประยุกต์ใช้ เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคั่นเซ Design and Development of Bamboo Table and Chair Set Products with the Application of Quality Function Deployment Technique and Kansei Engineering

จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล^{1*}, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2}, ชาทรี หอมเขียว^{1,2}, อภิพล ทองมั่ง, กำเนิดว่า¹ และ ปรีชญา ชุมศรี³
Julaluk Rodjananugoon^{1*}, Surasit Rawangwong^{1,2}, Chatree Homkhiew^{1,2}, Apichon Thongmung Kamnerdwam¹
and Preechaya Chumsri³

Received: 22 June 2021, Revised: 4 February 2022, Accepted: 1 March 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับวิศวกรรมคั่นเซ เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่ให้ตรงตามความต้องการของลูกค้า อีกทั้งช่วยส่งเสริมการยกระดับผลิตภัณฑ์ชุมชนของกลุ่มผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ ตำบลน่าน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยสำรวจความต้องการของลูกค้าผู้ใช้ผลิตภัณฑ์และกลุ่มผู้จำหน่ายจำนวน 114 ราย จากนั้นแปลงความต้องการของลูกค้าเข้าสู่เมทริกซ์ของเทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ 2 เมทริกซ์ คือ เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ และเมทริกซ์การแปลงการออกแบบ และนำเทคนิควิศวกรรมคั่นเซมาใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อแสดงถึงอารมณ์ ความรู้สึกของลูกค้า ต่อมานำผลการวิเคราะห์มาทำการออกแบบผลิตภัณฑ์ พบว่าผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่แบบใหม่ มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปแบบ วัสดุ ความสะดวก คุณภาพ การตลาด และสื่อถึงความรู้สึก เรียบง่าย มีสไตล์ และสวยงาม ซึ่งมีความสอดคล้องกับความรู้สึกและความต้องการของลูกค้า ผลการวิจัยนี้พบว่าความพึงพอใจของลูกค้าที่มีต่อ

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

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

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

² Materials Processing Technology Research Unit, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

³ สาขาการตลาด คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

³ Department of Marketing, Faculty of Business Administration, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

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

ผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่แบบใหม่ มีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านรูปทรงหลากหลายและมีจุดเด่นมากที่สุดเป็นอันดับแรก โดยระดับความพึงพอใจมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.71 จัดอยู่ในระดับดีมาก และมีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านการใช้วัสดุจากธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอันดับสอง โดยระดับความพึงพอใจมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.68 ซึ่งอยู่ในระดับดีมาก

คำสำคัญ: การออกแบบผลิตภัณฑ์, การกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ, วิศวกรรมคันเซ, ไม้ไผ่, ชุดโต๊ะเก้าอี้

ABSTRACT

This research employed quality function deployment and Kansei engineering to redesign and develop bamboo table and chair set products that better corresponded to the needs of customers. The results of the research can help upgrade the local products and increase marketing strategies for bamboo furniture production group in Nam Noi Sub-district, Hat Yai District, Songkhla Province. This research surveyed the customer's needs who used the product and 114 manufacturers and incorporated the customers' needs in the analysis of QFD's 2 matrixes: product planning and design deployment. Kansei Engineering was adopted to analyze the customers' emotions and feelings when using the products. The results of the analysis of the results show that the design and development of new bamboo table and chair set products. There are changes in style, material, convenience, quality, marketing and it also conveys a feeling of simplicity, style and beauty which is in line with the feelings and needs of customers. This research found that the customers had the highest satisfaction in terms of shapes and various features of the redesigned product at the very high level ($\bar{X} = 4.71$), followed by using natural and environmentally friendly materials at the very high level ($\bar{X} = 4.68$).

Key words: product design, quality function deployment, Kansei engineering, bamboo, table and chair set

บทนำ

ไผ่ (Bamboo) เป็นพืชที่มีความสำคัญด้านความหลากหลายทางชีวภาพ ระบบนิเวศ เศรษฐกิจ และสังคมไทย ในประเทศไทยพบชนิดไผ่ที่หลากหลายขึ้นกระจายตามภูมิภาคต่างๆ โดยไผ่แต่ละชนิดมีบทบาทสำคัญที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์จากไม้ไผ่ โดยเฉพาะการแปรรูปไม้ไผ่เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ไม้ประสานเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น ปัจจุบันธุรกิจมีการแข่งขันทางการตลาดสูงมาก โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มี

ผู้ผลิตมากมาย ทำให้ลูกค้ามีโอกาสในการตัดสินใจเลือกซื้อและเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตมากขึ้น โดยผู้ผลิตทุกรายล้วนมีเป้าหมายให้ผลิตภัณฑ์ของตนสามารถครองใจลูกค้าให้มากที่สุด ดังนั้น กลยุทธ์ที่ผู้ผลิตคำนึงถึงมากที่สุดคือกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองและตรงตามความต้องการของลูกค้า เพราะการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ถูกต้องตามความต้องการของลูกค้าจะส่งผลให้กระบวนการผลิตสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้อง (Pinta and Kengpol, 2003)

ตามที่คณะผู้วิจัยได้ลงพื้นที่สำรวจกลุ่มผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ ตำบลน่าน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา พบว่ากลุ่มผู้ผลิตพบปัญหาข้อร้องเรียนของลูกค้าในด้านคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐาน และผลิตภัณฑ์มีรูปแบบเดิมๆ และ

ราคาจำหน่ายที่ไม่สูงมากนัก ดังภาพที่ 1 ดังนั้น กลุ่มผู้ผลิตมีความต้องการพัฒนารูปแบบผลิตภัณฑ์เพื่อลดข้อร้องเรียนจากลูกค้า อีกทั้งเพื่อตอบสนองต่อความต้องการและสร้างความพึงพอใจของลูกค้ามากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 1 ผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่แบบเดิม

ปัจจุบันมีนักวิจัยและองค์กรต่างๆ ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment; QFD) เพื่อปรับปรุงและพัฒนาด้านต่างๆ เช่น การประยุกต์ใช้เทคนิค QFD เพื่อปรับปรุงกระบวนการทางธุรกิจคล้ายงาพารา (Srichan and Sasananan, 2017) หลังจากปรับปรุง พบว่าคะแนนความพึงพอใจของลูกค้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้มีการประยุกต์ใช้เทคนิค QFD เพื่อปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์ เช่น การประยุกต์ใช้เทคนิค QFD ในการออกแบบอุปกรณ์เฝ้าระวังผู้ป่วย (Meemongkol et al., 2012) ผลที่ได้พบว่าข้อกำหนดคุณลักษณะของชิ้นส่วนสามารถนำไปออกแบบอุปกรณ์ให้มีรูปร่างและการใช้งานที่ตรงกับความต้องการและถูกต้องต่อวิธีการพยาบาลผู้ป่วย นอกจากนี้มีงานวิจัยที่นำเทคนิค QFD ปรับปรุงการออกแบบผลิตภัณฑ์ของข้าวสารเพื่อเป็นของที่ระลึก (Sinthavalai and Ruengrong, 2018) ผลที่ได้คือคุณสมบัติการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่สามารถออกแบบและทำผลิตภัณฑ์ต้นแบบ และเมื่อประเมินความพึงพอใจ พบว่า ลูกค้ามีความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์ของข้าวรวงงานแต่งและของขวัญ/ของฝากสูงขึ้น สำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรม

คั่นเซ Kumpang and Kasemset (2012) ได้นำเทคนิควิศวกรรมคั่นเซมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิค QFD เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวพารับอยส์ส่งผลให้การออกแบบผลิตภัณฑ์ครอบคลุมความต้องการของลูกค้าได้มากขึ้น และทำให้ข้าวพารับอยส์เป็นที่นิยมมากขึ้น ต่อมา Yodwangjai (2014) ได้ออกแบบและพัฒนาเก้าอี้รับประทานอาหารด้วยหลักการวิศวกรรมคั่นเซ ผลการวิจัยพบว่า ความต้องการของลูกค้าที่มีต่อเก้าอี้รับประทานอาหารมี 3 คำ คือ คุสบาย อ่อนโยน และทันสมัย

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้จากไม้ไผ่แบบใหม่ โดยการประยุกต์ใช้เทคนิค QFD ร่วมกับวิศวกรรมคั่นเซ เพื่อให้ได้ข้อกำหนดทางเทคนิคและข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์สำหรับการออกแบบที่ตรงกับความต้องการของลูกค้าด้านคุณภาพและด้านความรู้สึกของลูกค้ามากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์จากไม้ไผ่ของกลุ่มผู้ผลิตดังกล่าวอีกด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่แบบใหม่ที่ตรงตามความต้องการของลูกค้า โดยนำข้อมูลจากแบบสอบถามมาวิเคราะห์และสรุปข้อกำหนดสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลอยู่ในช่วงเดือนพฤษภาคม ถึงมิถุนายน 2563 ซึ่งสามารถสรุปวิธีการดำเนินงานวิจัย 5 ขั้นตอนดังนี้

1. การสำรวจความต้องการของลูกค้า

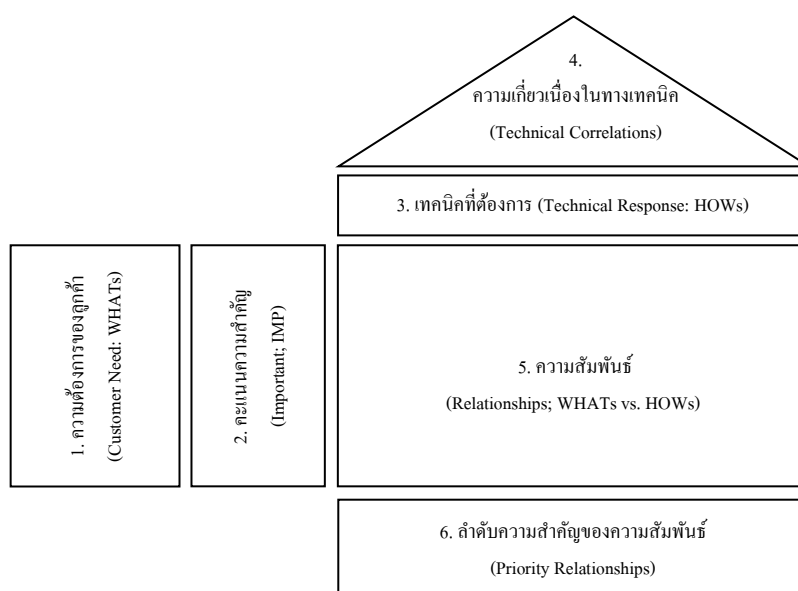
ขั้นตอนนี้เป็นการค้นหาเสียงของลูกค้า (Voice of Customer; VOC) เกี่ยวกับลักษณะของผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่ ด้วยวิธีการสัมภาษณ์กลุ่มตัวแทนจำหน่าย ลูกค้า นักท่องเที่ยว และกลุ่มผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ จำนวน 114 ตัวอย่าง โดยใช้แบบสอบถามชุดที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นคำถามปลายเปิดเพื่อสำรวจความต้องการลูกค้าในมิติต่างๆ ได้แก่ รูปแบบ วัสดุที่ใช้ในการผลิต คุณภาพ ราคา ประโยชน์ใช้สอย และเกณฑ์การตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

2. การประยุกต์ใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ

เทคนิค QFD เป็นเทคนิคที่ประยุกต์ใช้ในการออกแบบ ปรับปรุง และพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้อย่างเหมาะสม ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดย Akao (1990) สำหรับงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค QFD จำนวน 2 เมทริกซ์ดังนี้

1) การประยุกต์ใช้เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ (Product Planning) หรือบ้านคุณภาพ (House of Quality; HOQ) ดังภาพที่ 2 มีส่วนวิเคราะห์หลักๆ ทั้งหมด 6 ส่วน ดังนี้ (Akao, 1990; Chan and Wu, 2002)

1.1) ส่วนความต้องการของลูกค้าหรือส่วนที่ 1 ของบ้านคุณภาพ ดังภาพที่ 2 เป็นการนำผลจากการสำรวจความต้องการของลูกค้ามาเรียบเรียงใหม่ และจัดกลุ่มข้อมูลด้วยแผนผังกลุ่มเชื่อมโยง (Affinity Diagram) จากนั้นใช้แผนภูมิต้นไม้ (Tree Diagram) ช่วยในการจัดการข้อมูลเพื่อไม่ให้เกิดความสับสน และให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้น



ภาพที่ 2 โครงสร้างบ้านคุณภาพที่ทำการวิเคราะห์ (ดัดแปลงจาก Sinthavalai *et al.*, 2016)

1.2) ส่วนคะแนนความสำคัญหรือส่วนที่ 2 ของบ้านคุณภาพ ดังภาพที่ 2 เป็นการนำถ้อยคำความต้องการของลูกค้าที่เรียบเรียงใหม่มาพัฒนาเป็นแบบสอบถามที่ 2 เพื่อสำรวจความสำคัญของความต้องการลูกค้า จากกลุ่มลูกค้าจำนวน 139 ตัวอย่าง จากนั้นประเมินระดับความสำคัญของความต้องการลูกค้าด้วยค่าเฉลี่ยเรขาคณิตซึ่งจะใช้เป็นค่าคะแนนความสำคัญ (Important; IMP)

1.3) ส่วนเทคนิคที่ต้องการหรือส่วนที่ 3 ของบ้านคุณภาพ ดังภาพที่ 2 เป็นการระดมสมองของผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ผลิต เพื่อกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิคที่ตอบสนองต่อความต้องการของกลุ่มลูกค้า พร้อมกำหนดเป้าหมายโดยใช้สัญลักษณ์ ดังนี้ ↑ ยิ่งมากยิ่งดี ○ เป้าหมายเหมาะสม และ ↓ ยิ่งน้อยยิ่งดี

1.4) ส่วนความเกี่ยวเนื่องในทางเทคนิคหรือส่วนที่ 4 ของบ้านคุณภาพ ดังภาพที่ 2 เป็นการระดมสมองร่วมกันทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดความเกี่ยวเนื่องของเทคนิคที่นำมาใช้ในตัวแทนลักษณะเฉพาะทางคุณภาพ โดยใช้สัญลักษณ์แทนความสัมพันธ์ ดังนี้ ถ้ามีความสัมพันธ์ต่อกันมาก

แทนด้วย “O” และถ้ามีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย แทนด้วย “X” สุดท้ายถ้าไม่มีความสัมพันธ์ต่อกันให้เว้นเป็น “ช่องว่าง”

1.5) ส่วนความสัมพันธ์หรือส่วนที่ 5 ของบ้านคุณภาพ ดังภาพที่ 2 เป็นการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดทางเทคนิคกับความต้องการของลูกค้าในแต่ละคู่ โดยค่าคะแนนเป็นตัวเลข 1, 3 และ 9 แทนความสัมพันธ์ คือมีความสัมพันธ์น้อยมีความสัมพันธ์ปานกลาง และมีความสัมพันธ์มาก ตามลำดับ

1.6) ส่วนลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์หรือส่วนที่ 6 ของบ้านคุณภาพ ดังภาพที่ 2 เป็นการจัดลำดับความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิค (Technical Requirement) เพื่อให้ผู้พัฒนาผลิตภัณฑ์ทราบความต้องการและตัวแทนข้อกำหนดทางเทคนิคที่ต้องได้รับการเอาใจใส่อย่างมาก ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนย่อยๆ คือ ค่าน้ำหนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ (Absolute Technical Requirement Important) ดังสมการที่ (1) และค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ (Relative Technical Requirement Important) ดังสมการที่ (2)

$$I_A = \sum (I_C \times W) \quad (1)$$

เมื่อ I_A คือ ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์, I_C คือ ค่าความสัมพันธ์ของข้อกำหนดทางเทคนิคต่อความต้องการของลูกค้า และ W คือ ค่าลำดับที่ของการให้น้ำหนักเริ่มต้น

$$IMP = \frac{I_A}{\sum (I_A)} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ IMP = ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ

2) การประยุกต์ใช้เมทริกซ์การแปลงการออกแบบ (Design Deployment) เป็นการพิจารณาถึงส่วนประกอบย่อยที่สามารถตอบสนองต่อเทคนิคที่ได้จากเมทริกซ์

การวางแผนผลิตภัณฑ์ (Pirom *et al.*, 2019) ดังนั้นขั้นตอนในการประยุกต์ใช้เมทริกซ์การแปลงการออกแบบมีส่วนวิเคราะห์หลักๆ ทั้งหมด 5 ส่วน ดังนี้

2.1) การเลือกข้อกำหนดทางเทคนิค ในการเลือกข้อกำหนดทางเทคนิคจากบ้านคุณภาพมาแปลงเป็นข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อยได้เลือกข้อกำหนดทางเทคนิคทุกข้อมาใส่ทางช่องซ้ายมือของเมทริกซ์การแปลงการออกแบบ (Homkhiew *et al.*, 2012)

2.2) ระบุค่าความสำคัญ (Important; IMP) นำค่า IMP จากการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบในสวนบ้านคุณภาพ มาใส่ช่องซ้ายมือติดกับข้อกำหนดทางเทคนิค

2.3) วิเคราะห์ข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อย (Part Characteristics) เป็นการระดมสมองร่วมกันทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อยและข้อกำหนดทางเทคนิคที่ส่งผลต่อความต้องการของลูกค้า พร้อมกำหนดเป้าหมายข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อย โดยใช้สัญลักษณ์เช่นเดียวกับขั้นตอนการประยุกต์ใช้บ้านคุณภาพ

2.4) สร้างเมทริกซ์ความสัมพันธ์ (Relationships) โดยให้ค่าระดับคะแนนความสัมพันธ์แบบตัวเลข 1, 3, 9 เช่นเดียวกับขั้นตอนการประยุกต์ใช้บ้านคุณภาพ

2.5) คำนวณลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ (Priority Relationships) มีวิธีการคำนวณเช่นเดียวกับบ้านคุณภาพ และมีการคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อยโดยเปรียบเทียบเพื่อวัดผลคุณลักษณะว่ามีความสำคัญมากหรือน้อยเพียงใด โดยข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อยที่มีความสำคัญจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบและผลิตผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ต่อไป

$$IOC = \frac{\sum R}{N}$$

3. การประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซ (Kansei Engineering; KE)

วิศวกรรมคันเซ ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1970 โดย Mitsuo Nagamachi มหาวิทยาลัยอิโรชิมา ประเทศญี่ปุ่น (Nagamachi, 2001) ในปัจจุบันนักวิจัยหลายท่านได้พัฒนาและบูรณาการวิธีการต่างๆ เข้ากับแนวความคิดวิศวกรรมคันเซ เพื่อครอบคลุมและแก้ไขปัญหาในหลายๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นในด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากไม้ไผ่ (Achmad and Taufiq, 2015) หรือด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์สำหรับผู้สูงอายุ (Kuo *et al.*, 2017) ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้นำวิศวกรรมคันเซมาวิเคราะห์เพื่อช่วยให้การออกแบบผลิตภัณฑ์สามารถครอบคลุมความต้องการของลูกค้าได้มากยิ่งขึ้น โดยแบ่งขั้นตอนการวิจัยออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

1) การเลือกกลุ่มผู้บริโภค โภคเป้าหมายและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพัฒนา คือ กลุ่มร้านค้าตัวแทนจำหน่าย ลูกค้าที่เป็นนักท่องเที่ยว และกลุ่มผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพัฒนา คือ ผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่

2) การกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึก โดยรวบรวมค่าแสดงความรู้สึกที่สอดคล้องกับรูปแบบผลิตภัณฑ์ จากนั้นเก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ 3 จากผู้เชี่ยวชาญด้านการผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ และผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบจำนวน 25 ท่าน เพื่อคัดเลือกค่าแสดงความรู้สึกที่สื่อถึงรูปแบบผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่ โดยการวิเคราะห์ค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item Objective Congruence; IOC) ดังสมการที่ (3)

(3)

เมื่อ IOC คือ ค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างคำถามกับจุดประสงค์ ΣR คือ ผลรวมคะแนนการพิจารณาจากผู้เชี่ยวชาญ และ N คือ จำนวนผู้เชี่ยวชาญ

จากนั้นคัดเลือกค่าแสดงความรู้สึกละดับ IOC มากกว่า 0.5 เนื่องจากสามารถแสดงถึงความเที่ยงตรงและยอมรับได้ แต่ปฏิเสธค่า IOC น้อยกว่า 0.5 เพราะเป็นค่าที่มีการปรับปรุงหรือไม่ยอมรับ (Srisatidnarakul, 2012)

3) การกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ โดยรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพัฒนาในมิติต่างๆ ใช้แบบสอบถามชุดที่ 4 เพื่อสำรวจและคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญต่อความรู้สึกละดับของผู้บริโภคและการออกแบบผลิตภัณฑ์ จำนวน 75 ตัวอย่างและวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ จากนั้นพิจารณาเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีค่าเฉลี่ยมากกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากการประเมินทั้งหมดเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ

4) การกำหนดภาพตัวแทนภาพผลิตภัณฑ์ โดยรวบรวมภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์จากนิตยสารและสื่ออินเทอร์เน็ต จำนวน 67 ภาพ จากนั้นประยุกต์ใช้แผนภาพความสัมพันธ์ ในการแบ่งกลุ่มภาพผลิตภัณฑ์ออกเป็นกลุ่มตามขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นเลือกภาพผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ตรงกับขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มากที่สุดมาเป็นภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ เพื่อนำไปใช้เป็นองค์ประกอบในแบบสอบถามที่ 5

5) การประเมินผลการสอบถามด้วยหลักการทางสถิติและสรุปผล เป็นการสังเคราะห์ผลจากแบบสอบถามที่ 5 ที่ผ่านการประเมินจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 35 ตัวอย่าง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกละดับกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ด้วยเครื่องมือทางสถิติ คือ ทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 (Quantification Theory Type 1; QT1) ซึ่งงานวิจัย

Pimapunsi (2011); Yodwangjai (2014) พบว่า เป็นวิธีการที่ใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกละดับกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้กันมาก

4. การออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

นำข้อมูลจากขั้นตอนก่อนหน้ามาสรุปเป็นข้อกำหนดเชิงเทคนิคและข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะ เพื่อส่งให้กับทีมออกแบบได้ดำเนินการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่ จากนั้นดำเนินการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

5. การประเมินความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์

นำต้นแบบผลิตภัณฑ์แบบใหม่มาทำการสำรวจความพึงพอใจของกลุ่มลูกค้าเป้าหมาย จำนวน 150 ตัวอย่าง ด้วยแบบสอบถามที่ 6 ว่ามีผลระดับคะแนนความพึงพอใจอยู่ในระดับเกณฑ์การให้คะแนนใดของแต่ละประเด็น จากนั้นคำนวณค่าเฉลี่ยเพื่อเปรียบเทียบคะแนนความพึงพอใจของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์แบบใหม่ในแต่ละประเด็น

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากการศึกษารูปแบบผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่แบบเดิมๆ พบว่าผลิตภัณฑ์แบบเดิมมีการออกแบบที่มีรูปแบบที่ธรรมดา และไม่มีการตกแต่งเพิ่มเติม อีกทั้งมีการผลิตที่ไม่มีคุณภาพ ดังภาพที่ 1 ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค QFD ร่วมกับเทคนิควิศวกรรมคั่นเซสำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่แบบใหม่ โดยมีผลการวิจัยดังต่อไปนี้

1. ผลการประยุกต์ใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ

1) ผลการประยุกต์ใช้เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ พบว่ามีรายละเอียดของผลการดำเนินงาน 6 ส่วน ดังนี้

1.1) ส่วนความต้องการของลูกค้า พบว่าความต้องการของลูกค้าจากการสัมภาษณ์และประเมินแบบสอบถามที่ 1 พบว่าจำนวนคุณลักษณะความ

ต้องการของลูกค้าทั้งหมด 22 ความต้องการ ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มความต้องการเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ รูปแบบ วัสดุ ความสะดวก คุณภาพ และการตลาด แสดงดังส่วนที่ 1 ของบ้านคุณภาพในภาพที่ 3

1.2) ส่วนคะแนนความสำคัญ นำค่า IMP ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยเรขาคณิตที่ได้จากแบบสอบถามที่ 2 มาใส่ตรงกับความต้องการของลูกค้าแต่ละประเด็น ดังภาพที่ 3 ของบ้านคุณภาพ ทั้งนี้พบว่าลูกค้าได้ให้ความสำคัญกับปัจจัยในด้านรูปแบบเป็นอันดับหนึ่ง คือ รูปทรงหลากหลายและมีจุดเด่น โดยมีค่าคะแนนเฉลี่ย 3.97 คะแนน

1.3) ส่วนเทคนิคที่ต้องการ จากการระดมสมองของผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ พบว่าสามารถกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิคได้ 18 ข้อกำหนด ดังภาพที่ 3 ของบ้านคุณภาพ

1.4) ส่วนความเกี่ยวเนื่องทางเทคนิค จากการระดมสมองของฝ่ายต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง พบว่าผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์แต่ละ

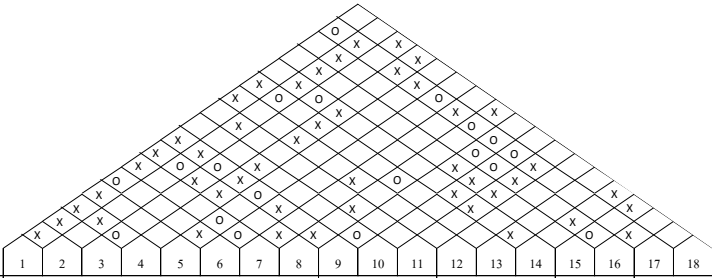
ข้อกำหนดมีความสัมพันธ์ที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 3 ของบ้านคุณภาพ

1.5) ส่วนความสัมพันธ์ ในการให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของลูกค้าและข้อกำหนดทางเทคนิคของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ พบว่าได้ผลการให้คะแนนความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 3 ซึ่งการให้คะแนนได้ทำการเปรียบเทียบแบบเป็นคู่ๆ โดยใช้การระดมสมองของผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่

1.6) ส่วนลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ พบว่ามีข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ และโดยเปรียบเทียบจำนวน 12 ข้อ จากจำนวนทั้งหมด 18 ข้อ ซึ่งเกี่ยวข้องกับ รูปแบบ วัสดุ ความสะดวก คุณภาพและการตลาด ให้ค่าอิทธิพลสะสมมากกว่า 80 เปอร์เซนต์ตามหลักการแผนภาพพาวเรโด (Sinthavalai and Ruengrong, 2018) ข้อกำหนดดังกล่าวจึงนำไปวิเคราะห์ในเฟสต่อไป ดังภาพที่ 4

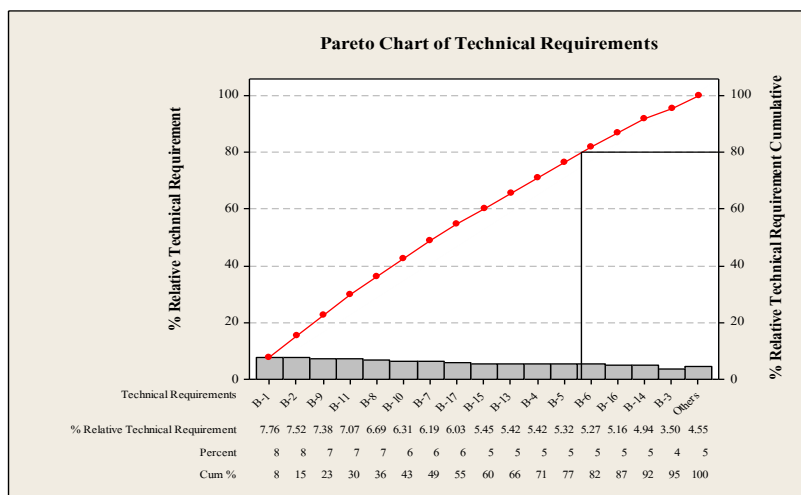
สัญลักษณ์ด้านความเกี่ยวเนื่องในทางเทคนิค	
สัญลักษณ์	ความหมาย
O	มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก
X	มีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย
ช่องว่าง	ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

สัญลักษณ์ค่าการเคลื่อนไหวของเป้าหมาย	
สัญลักษณ์	ความหมาย
↑	ยิ่งมากยิ่งดี
○	เป้าหมายเหมาะสม
↓	ยิ่งน้อยยิ่งดี



ความต้องการของผู้บริโภค			No.																				
			No.	↑	↑	○	○	○	○	○	○	○	↑	↑	↓	↑	○	↑	↑	○	○		
รูปแบบ	รูปทรงหลากหลายและมีจุดเด่น	A-1	3.97	9	3	1	3	3	3	9				3		3		1		3			
	ใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย	A-2	3.83	3	9		1			1	1			3		3	1	3	3	3			
	ขนาดเหมาะสม	A-3	3.83	3	1	1	9				1		1	1	1	3	3			1	1		
	ลวดลายสวยงาม	A-4	3.81	1					9	9	3	3								1			
	น้ำหนักเบา	A-5	3.75	1	1	9	1				1	3	1	1		1	3						
	สีสันสวยงาม	A-6	3.56	3					9	3	9	1								1			
	มีการตกแต่งเพิ่มเติม	A-7	3.45	3	1	1			1	9	9	1			3	1			1	1			
วัสดุ	วัสดุที่ไม่เป็นอันตราย	A-8	3.80		1						1	3				1							
	มีการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม	A-9	3.79	1	1			3		1			9	3	3		1			1			
	ใช้วัสดุจากธรรมชาติเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	A-10	3.66		3				3	3		1	9	3	1	1			3	3	1		
	วัสดุที่มีคุณภาพ	A-11	3.62	1	3						1		9	3	3				3	3	3		
	ใช้อุปกรณ์ยึดประกอบที่เหมาะสม	A-12	3.52	3	3						1		3	9			1	3	3	3			
ความสะดวก	เคลื่อนย้ายได้สะดวก	A-13	3.76		3	3	3				1					3	9				1		
	เหมาะสมกับการใช้งาน	A-14	3.75	3	3	1	3	1			3		3	3		9	3	1	1				
	มีอุปกรณ์เสริมช่วยในการอำนวยความสะดวก	A-15	3.63	1	3	1	1				9					1	1			1			
	ทำความสะอาดง่าย	A-16	3.59				1				3	1			9								
คุณภาพ	มีความแข็งแรงทนทาน	A-17	3.68	3	3	1	1					3	9	3			1	3	3	3			
	งานประกอบที่มีคุณภาพ	A-18	3.66	3	1		1				1		3	3				9	3	3			
	ไม่เป็นเชื้อรา	A-19	3.32		1							3			3				3	1			
	ปลวกและมอดไม่กินเนื้อไม้	A-20	3.25		1						1	3	3	1					3	1			
อื่นๆ	ราคาที่เหมาะสม	A-21	3.73	3			1	3	1	1	3		3	3		3		3	3	9			
	มีบริการหลังการขาย	A-22	3.47	1		1	1				3						3			1	9		
ลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์					1	2	16	10	12	13	7	5	3	6	4	17	11	15	9	14	8	18	รวม
ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์					156.8	152.1	70.8	109.6	107.6	106.4	125.2	135.3	149.1	127.6	142.9	53.2	109.6	99.9	110.2	104.4	121.8	38.8	2021.46
ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคเปรียบเทียบ					7.76	7.52	3.50	5.42	5.32	5.27	6.19	6.69	7.38	6.31	7.07	2.63	5.42	4.94	5.45	5.16	6.03	1.92	100
เป้าหมายทางด้านเทคนิค					มีรูปทรงให้เลือกอย่างน้อย 2 รูปทรง	สามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลาย	น้ำหนักไม่เกิน 50 กิโลกรัมต่อชุด	พื้นที่ในการติดตั้ง ไม่เกิน 3 ตารางเมตร	สีและผิวเคลือบไม่หลุดลอกภายใน 2 ปี	มีความหนาให้เลือกอย่างน้อย 2 มม	มีการตกแต่งเพื่อความสวยงาม	มีการเสริมอุปกรณ์เพื่อเพิ่มหน้าที่ในการใช้งาน	ใช้ไม้ที่เป็นวัสดุโครงสร้างหลัก	อุปกรณ์โครงสร้างไม้เนื้อแข็ง ไม่ต่ำกว่า 5 ปี	อุปกรณ์ยึดประกอบไม้เนื้อแข็ง ไม่ต่ำกว่า 5 ปี	สามารถทำความสะอาดได้ง่าย	สามารถใช้งานได้ทั้งสะดวกและไม่เกิดความยุ่งยากจัด	สามารถรองรับการปรับนอนหรือการเคลื่อนย้ายได้ง่าย	ไม่เกิดผุกร่อนในงานประกอบ	อายุการใช้งานมากกว่า 5 ปี	มีราคาไม่เกิน 10,000 บาทต่อชุด	มีการรับประกัน 1 ปี หลังการขาย	

ภาพที่ 3 เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านคุณภาพ



ภาพที่ 4 การเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์และโดยเปรียบเทียบ

2) ผลการประยุกต์ใช้เมทริกซ์การแปลงการออกแบบ การนำข้อกำหนดทางเทคนิคที่ผ่านการจัดเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญโดยเปรียบเทียบจากเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์มาทำการแปลงให้กลายเป็นข้อกำหนดของส่วนประกอบย่อยของเมทริกซ์การแปลงการออกแบบ โดยสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

2.1) ข้อกำหนดทางเทคนิค และค่า IMP พบว่าได้เลือกข้อกำหนดทางเทคนิคทุกข้อจากเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการจัดเรียงลำดับความสำคัญจากค่ามากไปหาค่าน้อย จากนั้นจะนำข้อกำหนดทางเทคนิค และค่า IMP ทั้งหมดอยู่ทางช่องซ้ายมือของเมทริกซ์การแปลงการออกแบบ ดังภาพที่ 5

ย่อยที่มีความสำคัญมากที่สุด รองลงมา ได้แก่ ความคงทนของอุปกรณ์จับยึด ขนาดของชิ้นส่วน ความหลากหลายของรูปแบบวัสดุ/ชิ้นส่วน ราคาของชิ้นส่วนและวัสดุตกแต่ง อายุการใช้งาน การเคลื่อนย้าย วัสดุตกแต่ง น้ำหนักของวัสดุและชิ้นส่วน สีของชิ้นส่วน และความสะดวกในการใช้งานตามลำดับ

2. ผลการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซ

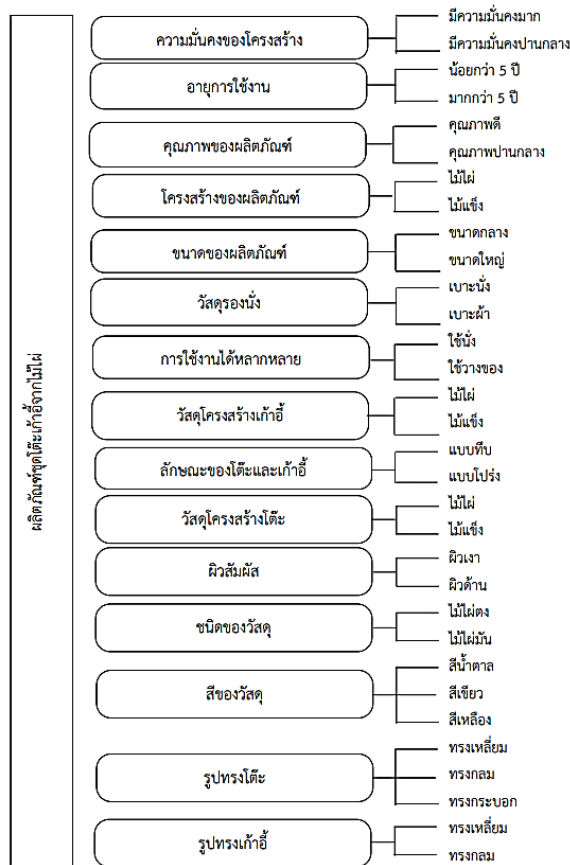
หลังจากได้ข้อกำหนดเชิงเทคนิคของการประยุกต์ใช้เทคนิค QFD เรียบร้อยแล้ว จากนั้นดำเนินการ

ประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซสำหรับผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่ ซึ่งมีผลการวิจัยดังต่อไปนี้

1) ผลการกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึกพบว่ามีการแสดงความรู้สึกที่ผ่านการประเมิน ($IOC > 0.5$) และสื่อถึงความรู้สึกเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่ จำนวน 15 คำ จากจำนวนทั้งหมด 56 คำ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึกสำหรับผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่ จำนวน 15 คำ

Kansei Words	IOC	Kansei Words	IOC	Kansei Words	IOC	Kansei Words	IOC
1. แข็งแรง	0.96	5. เรียบง่าย	0.68	9. ทันสมัย	0.60	13. ดีไซน์เก๋	0.60
2. เอกสิทธิ์	0.92	6. น่าสนใจ	0.64	10. สบายตา	0.60	14. มีความลงตัว	0.56
3. มีสไตล์	0.80	7. ร่วมสมัย	0.64	11. สวย	0.60	15. โดดเด่น	0.52
4. แปลกใหม่	0.72	8. มีคุณค่า	0.64	12. สร้างสรรค์	0.60		



ภาพที่ 6 ผลการกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

2) ผลการกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ พบว่าจากการสำรวจข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ 4 มีระดับค่าเฉลี่ยคะแนนประเมินคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 26 คุณลักษณะเท่ากับ 4.25 ดังนั้น คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีระดับคะแนนมากกว่าค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้มีจำนวน 15 คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก ดังภาพที่ 6

3) ผลจากการรวบรวมภาพผลิตภัณฑ์จากสื่ออินเทอร์เน็ตจำนวน 9 เว็บไซต์ ได้แก่ Pinterest, Bamboovietnam, Pradubamboo, Readthecloud, Livingbamboo, Ksbamboo, Bambutico, Naibann, Exbali ตลอดจน จนวนารสารและนิตยสารที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีรูปผลิตภัณฑ์จำนวนทั้งหมด 67 ภาพ จากนั้นแบ่งกลุ่มภาพผลิตภัณฑ์ด้วยแผนภาพความสัมพันธ์ ตามขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่กำหนดไว้และดำเนินการเปรียบเทียบจำนวนคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ เพื่อหาภาพผลิตภัณฑ์ที่ตรงกับขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มากที่สุดมาเป็นภาพตัวแทน

ผลิตภัณฑ์ ดังนั้นสรุปได้ว่ามีภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์จำนวนทั้งสิ้น 5 รูป ดังภาพที่ 7

4) ผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 พบว่ามีค่าแสดงความรู้สึกที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดและมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงพหุคูณ (MCC^2) มากกว่า 0.5 (Schütte, 2002) อยู่จำนวน 8 คำ ได้แก่ เอกลักษณ์ มีสไตล์ เรียบง่าย น่าสนใจ สวย สร้างสรรค์ มีความลงตัว และโดดเด่น ดังนั้นนำข้อมูลทั้ง 8 คำที่ผ่านเกณฑ์ไปวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์หลัก (Partial Correlation Coefficient, PCC) และหาค่าความสัมพันธ์ย่อย (Category Score, CS) ด้วยโปรแกรม Minitab รุ่น 16 จากนั้นคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่มีค่า CS บวกในแต่ละด้านและมีค่า p -Value น้อยกว่า 0.05 เพื่อนำมาออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ตรงความรู้สึกทั้ง 8 ความรู้สึก ดังตารางที่ 2 ซึ่งผลการวิจัยสอดคล้อง Yodwangjai

(2014) ที่นำหลักการวิศวกรรมคันเซบะประยุกต์ใช้ในการออกแบบเก้าอี้รับประทานอาหาร ด้วยการวิเคราะห์ทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 พบว่าค่า

แสดงความรู้สึกของผู้บริโภคที่มีต่อเก้าอี้รับประทานอาหารมี 3 ค่า คือ ดุสบาย อ่อนโยน และทันสมัย



ภาพที่ 7 ภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่ที่ผ่านการคัดเลือก

ตารางที่ 2 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบ						ค่าแสดงความรู้สึกที่สื่อถึงคุณลักษณะผลิตภัณฑ์	ภาพแนวทางการออกแบบ	MCC ²
	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	PCC	p-Value	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	CS	P-Value			
1	ขนาดของผลิตภัณฑ์	1.082	0.007	ขนาดกลาง	2.412	0.044	เรียบง่าย	ภาพที่ 4	0.52
				ขนาดใหญ่	1.427	0.011			
		1.477	0.000	ขนาดกลาง	0.702	0.043	มีความลงตัว	ภาพที่ 2	0.54
				ขนาดใหญ่	2.426	0.003			
2	โครงสร้างของผลิตภัณฑ์	1.094	0.034	ไม้ไผ่	1.838	0.033	เอกลักษณ์	ภาพที่ 3	0.57
		0.827	0.034		0.951	0.025	สวย	ภาพที่ 2	0.52
3	รูปทรงของโต๊ะ	0.703	0.048	ทรงกลม	4.410	0.014	มีสไตล์	ภาพที่ 2	0.56
		0.829	0.034	ทรงเหลี่ยม	1.737	0.004	เรียบง่าย	ภาพที่ 4	0.52
				ทรงกลม	1.277	0.029			
		1.230	0.043	ทรงเหลี่ยม	1.664	0.001	สร้างสรรค์	ภาพที่ 2	0.63
				ทรงกลม	1.690	0.002			
		1.672	0.005	ทรงเหลี่ยม	2.166	0.008	มีความลงตัว	ภาพที่ 2	0.54
4	วัสดุรองนั่ง	0.673	0.046	เบาะผ้า	5.118	0.004	เรียบง่าย	ภาพที่ 4	0.52
				เบาะหนัง	3.922	0.011			
		1.129	0.005	เบาะหนัง	0.816	0.048	น่าสนใจ	ภาพที่ 2	0.52
5	ลักษณะผลิตภัณฑ์	6.910	0.000	แบบโปร่ง	0.899	0.048	โดดเด่น	ภาพที่ 2	0.66
6	ความมั่นคงของโครงสร้าง	1.384	0.024	มั่นคงมาก	1.790	0.001	สร้างสรรค์	ภาพที่ 2	0.63

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดเชิงเทคนิคและเชิงคุณลักษณะสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้จากไม้ไผ่

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์	รายละเอียด
1	รูปแบบของผลิตภัณฑ์	รูปแบบผลิตภัณฑ์มีดีไซน์ที่หลากหลายตรงตามสนิยมของกลุ่มลูกค้า
2	การใช้ประโยชน์	ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบที่รองรับการใช้งานได้หลากหลาย
3	วัสดุในการผลิต	มีการออกแบบโดยใช้วัสดุโครงสร้างเป็นไม้ไผ่ และผ่านการอบน้ำยาป้องกันแมลง อีกทั้งมีการพ่นให้แห้ง เพื่อความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์
4	ความคงทนและทนทานของอุปกรณ์จับยึด	ผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่มีการออกแบบโดยใช้ไม้แข็งมาเป็นวัสดุของอุปกรณ์จับยึด เพื่อเสริมความทนทาน
5	อุปกรณ์เสริม	ผลิตภัณฑ์มีการเสริมอุปกรณ์เพื่อเพิ่มหน้าที่ในการใช้งาน
6	ความคงทน ทนทาน และความมั่นคงของวัสดุโครงสร้าง	ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบโดยใช้เทคนิคการเข้ามูมไม้ไผ่แบบขัดกลอน เพื่อสร้างความแข็งแรงทนทานของโครงสร้าง
7	การตกแต่งผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์มีการใช้วัสดุตกแต่งที่เหมาะสมและสวยงาม เช่น ผ้า หนัง กระดาษ เป็นต้น
8	ราคาของผลิตภัณฑ์	มีการกำหนดราคาที่เหมาะสมตามต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการผลิตและต้นทุนการตลาด
9	คุณภาพของงานประกอบ	ผลิตภัณฑ์มีสภาพเรียบร้อยและไม่มีตำหนิที่เกิดจากการขึ้นรูป และมีความพิถีพิถันในการขึ้นรูปอย่างมีคุณภาพและสวยงาม
10	ความสะดวกในการใช้งาน	ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบให้มีขนาดกลางที่สามารถใช้งานได้สะดวกและไม่เกิดความรู้สึกติดขัด
11	ขนาดของผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์มีขนาดกลาง โดยมีพื้นที่ในการติดตั้งไม่เกิน 3 ตารางเมตร เพื่อสามารถให้พื้นที่ให้นั่งได้อย่างสบาย อีกทั้งมีการออกแบบขนาดของชิ้นส่วนให้เหมาะสมตามขนาดสัดส่วนและสรีระของกลุ่มเป้าหมาย
12	สีสันทนของผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์มีการใช้สีของไม้และสีเคลือบไม้ โดยความคงทนของสีต้องไม่หลุดลอกภายใน 2 ปี
13	ความหลากหลายของรูปแบบวัสดุ/ชิ้นส่วน	ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบชิ้นส่วนให้มีรูปแบบที่หลากหลาย เพื่อเพิ่มความสวยงาม ซึ่งเป็นสิ่งหนึ่งที่สามารถดึงดูดความสนใจของลูกค้าได้
14	อายุการใช้งาน	ผลิตภัณฑ์มีการใช้วัสดุเคลือบผิวที่มีคุณภาพ โดยไม่ลอกหรือขีดภายในระยะเวลา 3 ปี เพื่อความสวยงามของผลิตภัณฑ์
15	การเคลื่อนย้าย	ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบให้มีน้ำหนักที่เหมาะสม และมีขนาดกลาง เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย
16	น้ำหนักของวัสดุและชิ้นส่วน	มีการเลือกใช้วัสดุและชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักเหมาะสม เพื่อความเหมาะสมของการใช้งาน
17	โครงสร้างของผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบให้มีการใช้วัสดุโครงสร้างเป็นไม้ไผ่เป็นหลัก เพื่อความแข็งแรง
18	รูปทรงของโต๊ะ	ผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่ มีรูปทรงของโต๊ะกลางเป็นลักษณะทรงกลมที่ดูเรียบง่าย
19	วัสดุรองนั่ง	ผลิตภัณฑ์มีการเลือกใช้วัสดุผ้ามาเป็นวัสดุรองนั่งเป็นหลัก เพื่อความสะดวกสบายของผู้ใช้งาน
20	ลักษณะของผลิตภัณฑ์	ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบให้มีลักษณะแบบโปร่ง และมีลวดลายที่สวยงาม

3. ผลการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้จากไม้ไผ่

จากการแปลงความต้องการของลูกค้าด้วยเทคนิค QFD พบว่าสามารถสรุปข้อกำหนดในส่วนของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ได้ 12 ข้อ และเมทริกซ์การแปลงการออกแบบ 11 ข้อ รวมถึงข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะจากวิศวกรรมการคำนวณ จำนวน 6 ข้อ สำหรับการออกแบบร่วมกัน เพื่อแสดงให้เห็นถึงอารมณ์และความรู้สึกของลูกค้า ดังนั้นสามารถสรุปข้อกำหนดในการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะ

เก้าอี้จากไม้ไผ่ได้จำนวน 20 ข้อ จากจำนวนทั้งหมด 29 ข้อ เนื่องจากมีข้อกำหนด 9 ประเด็นที่คล้ายคลึงกัน ดังตารางที่ 3 จากนั้นส่งข้อกำหนดเชิงเทคนิคและเชิงคุณลักษณะ 20 ข้อ ให้กับทีมออกแบบได้ดำเนินการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่อไป ซึ่งในการออกแบบครั้งนี้ได้ออกแบบได้ใช้คำแสดงความรู้สึกสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ 3 คำ ได้แก่ เรียบง่าย มีสไตล์ และสวยงาม เนื่องจากเป็นคำแสดงความรู้สึกที่สื่อถึงผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้ไม้ไผ่มากที่สุด มาเป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบ อีกทั้งได้นำ

แรงบันดาลใจต่างๆ มาใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์แบบใหม่ตรงตามความต้องการของลูกค้ามากที่สุด แสดงดังภาพที่ 8(ก) หลังจากนั้นส่ง

แบบผลิตภัณฑ์กลุ่มผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไฟได้ทำการ ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบพร้อมตกแต่ง ดังภาพที่ 8(ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 8 ผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้จากไม้ไฟ

4. ผลการประเมินความพึงพอใจ

หลังจากได้ดำเนินการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชุด โต๊ะเก้าอี้ไม้ไฟเรียบร้อยแล้ว จากนั้นได้นำผลิตภัณฑ์ ต้นแบบไปสำรวจความพึงพอใจของลูกค้าที่มีต่อ ผลิตภัณฑ์แบบใหม่ ด้านรูปแบบ วัสดุ ความสะดวก คุณภาพและการตลาด ซึ่งการสำรวจจะใช้กลุ่มลูกค้า และผู้ผลิตเป้าหมายจำนวน 150 ท่าน ผลการวิจัย พบว่ากลุ่มลูกค้าและกลุ่มผู้ผลิตมีความพึงพอใจใน คุณลักษณะด้านรูปทรงที่มีความหลากหลายและมี จุดเด่นมากที่สุดเป็นอันดับแรก โดยมีระดับความพึง พพอใจอยู่ในระดับดีมากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.71 ซึ่ง ผลการประเมินความพึงพอใจมีความสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Sinthavalai and Ruengrong (2018) และ Pirom *et al.* (2019) คือโดยทั่วไปการออกแบบและ พัฒนาผลิตภัณฑ์ พบว่าประเด็นความสวยงาม มี จุดเด่น และความหลากหลายของรูปแบบผลิตภัณฑ์ จะมีผลต่อความพึงพอใจของลูกค้าเป็นสำคัญ ใน ส่วนระดับความพึงพอใจในประเด็นรองลงมา คือ คุณลักษณะด้านใช้วัสดุจากธรรมชาติและเป็นมิตรต่อ สิ่งแวดล้อม โดยมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดี มากและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.68

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค QFD ร่วมกับ วิศวกรรมคั่นแซสำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ ชุดโต๊ะเก้าอี้จากไม้ไฟ เพื่อเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และสร้างความพึงพอใจของลูกค้า งานวิจัยนี้ได้แปลง ความต้องการของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์เข้าสู่เมทริกซ์ ของเทคนิค QFD 2 เมทริกซ์ คือ เมทริกซ์การวางแผน ผลิตภัณฑ์ และเมทริกซ์การแปลงการออกแบบ พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้าน รูปแบบ วัสดุ ความสะดวก คุณภาพ และการตลาด จากนั้นจึงนำเทคนิควิศวกรรมคั่นแซ มาร่วมในการ วิเคราะห์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงอารมณ์ ความรู้สึกของ ลูกค้า ผลการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคั่นแซ พบว่าค่า แสดงความรู้สึกที่ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุด โต๊ะเก้าอี้ไม้ไฟ ประกอบด้วย 3 คำหลักๆ คือ เรียบง่าย มีสไตล์ และสวยงาม สุดท้ายจากการวิจัยครั้งนี้ พบว่า ลูกค้ามีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านรูปทรงหลากหลาย และมีจุดเด่นมากที่สุดเป็นอันดับแรก โดยระดับความ พึงพอใจมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.71 จัดอยู่ในระดับดีมาก และมีความพึงพอใจในคุณลักษณะด้านใช้วัสดุจาก

ธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอันดับสอง โดยระดับความพึงพอใจมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.68 ซึ่งอยู่ในระดับดีมาก

โดยข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้พบว่า ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หรือสินค้าหัตถกรรมพื้นบ้านประเภทอื่นๆ อีกทั้งควรนำเทคนิค QFD และวิศวกรรมคั่นเซมาประยุกต์ใช้และปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง เพื่อสร้างความมั่นใจ และทันกับการเปลี่ยนแปลงรวมทั้งสถานการณ์ต่างๆ ที่เปลี่ยนไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปี 2563 ขอขอบคุณผู้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ไผ่ วิทยาลัยฯ ตลอดจนผู้เชี่ยวชาญที่มอบแบบทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนดำเนินงานสำเร็จลุล่วง และขอบคุณกลุ่มลูกค้าที่ให้ความร่วมมือในการตอบแบบสอบถาม และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Achmad, S. and Taufiq, I. 2015. Design of Innovative Alarm Clock Made from Bamboo with Kansei Engineering Approach. **Agriculture and Agricultural Science Procedia** 3: 184-188.
- Akao, Y. 1990. **Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design**. Productivity Press, Cambridge, MA.
- APK Online. n.d. **เฟอร์นิเจอร์ศิลปะไม้ไผ่**. Available Source: <https://www.apkonline.net/th/bamboo-art-furniture/app.bamboo.art.furniture>, June 28, 2020. (in Thai)
- Bambu Vietnam. n.d. **Bamboo furniture: Sofa BSO-069**. Available Source: <https://bamboovietnam.com/product/bs0-069/>, June 25, 2020.
- Bambu Vietnam. n.d.. **Bamboo furniture: Sofa BSO-068**. Available Source: <https://bamboovietnam.com/product/bs0-068/>, June 25, 2020.
- Chan, L.K. and Wu, M.L. 2002. Quality Function Deployment: a Comprehensive Review of its Concepts and Methods. **Journal Quality Engineering** 15(1): 23-35.
- Exbali. n.d. **Bamboo dining furniture collection: Dining set BMDIN-4**. Available Source: https://www.exbali.com/bali_furniture/bali-bamboo/bamboo_dining_I.htm, June 26, 2020.
- Homkhiew, C., Ratanawilai, T. and Pochana, K. 2012. Application of a Quality Function Deployment Technique to Design and Develop Furniture Products. **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 34(6): 663-668.
- Kumpong, N. and Kasemset, C. 2012. Application of Kansei Engineering in Food Product Development Framework: A Case Study of Parboiled Rice, pp. 2030-2037. **In IE Network Conference 2012**. Phetchaburi, Thailand. (in Thai)
- Kuo, H.C., Ching, C.L., Ya, L., Po, P. and Jia, X. H. 2017. Kansei Approach for the Design of Functional Products for the Elderly. **European Journal of Multidisciplinary Studies** 2(6): 23-30.
- Meemongkol1, M., Junsong1, P. and Santiamorntut, W. 2012. Application of Quality Function Deployment Technique for searching of

- Device Characteristic and Design of Health Care Monitoring Device. **KKU Research Journal** 17(4): 515-527. (in Thai)
- Nagamachi, M. 2001. **Research on Kansei Engineering: Selected papers on Kansei Engineering.** Nakamoto Printing, Hiroshima.
- Pimapunsri, K. 2011. New Product Development Using Kansei Engineering, pp. 331-337. *In The 2th National Conference of Industrial Operations Development 2011 (CIOD 2011).* Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Pinta, A. and Kengpol, A. 2003. The Improvement of Product by Using Quality Function Deployment (QFD) Technique: A Case Study of an Educational Wood Toy Factory. **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok** 13(4): 36-42. (in Thai)
- Pinterest. n.d. **Dining table with chairs, bamboo and glass, 70's.** Available Source: <https://www.pinterest.it/pin/733453489302218867/>, July 28, 2020.
- Pirom, T., Rawangwong, S., Thongkamkaew, A. and Hutyee, C. 2019. Design and Developed Product the Kindergarten Classroom Furniture with Rubber Wood Using Quality Function Development. **The Journal of Industrial Technology** 15(3): 76-92. (in Thai)
- Schütte, S. 2002. Designing Feelings into Products: Integrating Kansei Engineering Methodology in Product Development. Master Thesis of Mechanical Engineering, Linkoping University, Sweden.
- Sinthavalai, R., Boonchu, P. and Polmai, S. 2016. An Application of House of Quality (HOQ) in Improving a Package of Medical Equipment. **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok** 26(3): 437-450. (in Thai)
- Sinthavalai, R. and Ruengrong, S. 2018. An Application of House of Quality (HOQ) for Designing Rice Product as a Souvenir. **Naresuan University Journal: Science and Technology** 26(3): 36-51. (in Thai)
- Srichan, A. and Sasananan, M. 2017. Application of Quality Function Deployment Technique for Improving Business Process: Case Study of Rubber Seedlings Business. **Thai Science and Technology Journal** 25(4): 714-722. (in Thai)
- Srisatidnarakul, B. 2012. **Development and validation of research instruments: psychometric properties.** Chulalongkorn University Press, Bangkok. (in Thai)
- Yodwangjai, S. 2014. Product Design and Development for Dinner Chair of Kansei Engineering Engineerin. **KKU Engineering Journal** 41(2): 191-200. (in Thai)