



วารสาร วิชชา

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ปีที่ 40 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2564

Vol. 40 No. 1 January - June 2021

วารสารวิชาการสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN (Print) : 0125-2380

ISSN (Online) : 2672-958X



Wichcha Journal

Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

www.nstru.ac.th



วารสาร วิชชา WICHA JOURNAL มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช NAKHON SI THAMMARAT RAJABHAT UNIVERSITY

ปีที่ 39 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2563 Vol. 39 No. 2 July – December 2020

เจ้าของ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิต สุขทร รองอธิการบดี
รักษาราชการแทนอธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
บรรณาธิการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมรักษ์ รอดเจริญ
ผู้ช่วยบรรณาธิการ ดร.ธัชชา สามพิมพ์

นโยบาย

1. วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช เป็นวารสารวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตีพิมพ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524
2. วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช เป็นเอกสารวิชาการแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการเผยแพร่ให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงแบบออนไลน์ได้แบบเสรีโดยผ่านกระบวนการประเมินจากผู้ประเมินอิสระ (peer review) ที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง ในรูปแบบผู้ประเมินอิสระและผู้แต่งไม่ทราบชื่อซึ่งกันและกัน (double-blind review)

ขอบเขตงาน

ขอบเขตของบทความวิจัย (research article) และบทความวิชาการ (academic article) ที่ลงตีพิมพ์ในวารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช เป็นบทความในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประกอบด้วยด้านวิทยาศาสตร์กายภาพ วิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และวิศวกรรมศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการและงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. เพื่อเป็นสื่อส่งเสริมการสร้างความรู้และองค์ความรู้ในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อเป็นเวทีนำเสนอผลงานทางวิชาการของบุคลากรในมหาวิทยาลัยและบุคคลทั่วไป

ประเภทบทความ

วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ตีพิมพ์บทความฉบับเต็มในรูปแบบบทความวิจัย (research article) และบทความวิชาการ (academic article) ตามขอบเขตงาน

กระบวนการพิจารณาบทความ

บทความทุกบทความที่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ได้รับการพิจารณาจากผู้ประเมินอิสระ (peer review) ที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง อย่างน้อย 2 ท่าน ในรูปแบบผู้ประเมินอิสระและผู้แต่งไม่ทราบชื่อซึ่งกันและกัน (double-blind review) และบทความหรือข้อคิดเห็นใดๆ ที่ปรากฏในวารสารที่เป็นวรรณกรรมของผู้เขียน บรรณาธิการหรือมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วย

ค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์

วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ไม่เก็บค่าธรรมเนียมในการตีพิมพ์

เกี่ยวกับวารสาร

ชื่อวารสาร : วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
ISSN ฉบับตีพิมพ์ : 0125-2380
ISSN ฉบับอิเล็กทรอนิกส์ : 2672-958X
เว็บไซต์วารสาร : <https://www.tci-thaijo.org/index.php/wichcha/index>

กำหนดเผยแพร่ : เผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ (ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน และฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม)

จัดพิมพ์โดย : สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

เลขที่ 1 หมู่ที่ 4 ตำบลท่าจั่ว อำเภอเมืองนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280

บรรณาธิการที่ปรึกษา ประกอบด้วย

ศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ ไบไม้	ราชบัณฑิต สาขาชีววิทยา
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ	คณะวิศวกรรมศาสตร์
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ กาญจนกิจ	คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.สมปอง เตชะโต	คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สังวรรณ กิจทวี	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.นภาพร ทัศนัยนา	นักวิชาการอิสระ อดีตรองศาสตราจารย์
	คณะวิทยาศาสตร์การกีฬา มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ จรรย์านุกูล	นักวิชาการอิสระ อดีตผู้ช่วยศาสตราจารย์
	คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

กองบรรณาธิการ ประกอบด้วย

ศาสตราจารย์ ดร.เสาวภา อังสุพานิช

ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง จุฑาเกตุ

ศาสตราจารย์ ดร.สุวัจน์ ธัญรส

รองศาสตราจารย์ ดร.ชิตณรงค์ ศิริสถิตย์กุล

รองศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แวศักดิ์

รองศาสตราจารย์ ดร.วัฒนพงศ์ เกิดทองมี

รองศาสตราจารย์ ดร.ศศิโรตม์ เกตุแก้ว

รองศาสตราจารย์ ดร.การุณ ทองประจักษ์

รองศาสตราจารย์ ดร.สุปัญญา จิตตพันธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.นคร กกแก้ว

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงศ์ โอทอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรศักดิ์ สวัสดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สงรักษ์

ดร.ปิยรัชฎ์ ปริญญางษ์ เจริญทรัพย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระยุทธ สุดสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฬามาต ศุภพันธ์

ดร.รุ่งนภา พิมเสน

ดร.ศณัฏฐา อธิระสุนท์

คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร

มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร

มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

สำนักงานโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจาก

พระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรม

ราชกุมารี (อพ.สธ.)

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

คณะวิทยาการจัดการ

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ผู้ประเมินอิสระหรือพิชญพิจารณา (Peer review) ตรวจสอบทางวิชาการประจำฉบับ

รองศาสตราจารย์ ดร.การุณ ทองประจักษ์แก้ว	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.จตุรงค์ ลังกาพินธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร ดิเรกบุษราคัม	สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ จริตงาม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุปียนิตย์ ไม้แพ	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ เตชะเกรียงไกร	คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชูอุปการ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ ชวนยุก	คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.น้อมจิตต์ แก้วไทย อันเดร	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ ภูเก็ม	คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประดินันท์ เอี่ยมสะอาด	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ นพรัตน์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย ศรีช่วย	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงศ์ โอทอง	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สงรักษ์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง
ดร.ทักษิณ ขาวเนียม	คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ดร.ปิยวัฒน์ ปองผดุง	คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและ สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

ดร.วีระเกียรติ ทรัพย์มี

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

วิทยาเขตนครศรีธรรมราช

ดร.สาวิตรี ฤทธิ์ช่วย

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ผู้ตรวจทานภาษาต่างประเทศประจำฉบับ

ดร.ศณัฏฐา ธีระขุนท์ คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ฝ่ายจัดการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรศักดิ์ แก้วอ่อน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมรักษ์ รอดเจริญ

ดร.รัชชา สามพิมพ์

นางณภัคจิรา ทิพย์สุภลักษณ์

นางสาวกนกต์ฤทัย จรจรัส

ปก เลือฉินการพิมพ์

พิมพ์ที่ เลือฉินการพิมพ์

439 ถนนศรีธรรมโศก ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80000

โทร. 090-2895246 e-mail: pued2548@gmail.com

บทความวิจัย

การพัฒนาชุดคำสั่งการทำเหมืองข้อความสำหรับการระบุสัมพันธระหว่างทรานสคริปชันแพคเตอร์และดีเอ็นเอในการแสดงออกของไนโตรจีเนส	1
ลัทธินิรุกษ์ สุนทรารักษ์* เทพปัญญา เจริญรัตน์ และภัทรพร คัมภี	
ประสิทธิภาพของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาในสูตรอาหารสำเร็จรูปต่อการเลี้ยงปลาดุกลูกผสม (<i>Clarias macrocephalus</i> x <i>C. gariepinus</i>) ในกระชัง	16
แจ่มจันทร์ เพชรศิริ* ทวีเดช ไชยนาพงษ์ และธัญญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ	
การสำรวจคุณภาพของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าที่ใช้เพาะเลี้ยงปลาทะเลสวยงาม	31
สุบัณฑิต นิมิตรนั* วรพจน์ แซ่ไคว้ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย	
การพัฒนากระบวนการผลิตไซรัปจากลองกอง	46
จิตารัตน์ จุทอง* รสวันต์ อินทศิริสวัสดิ์ และรัทธา เทพประดิษฐ์	
ผลของสูตรอาหาร สารควบคุมการเจริญเติบโต และชนิดของชิ้นส่วนพืชต่อการเพิ่มปริมาณกระบองเพชรสกุลแมมมิลลาเรียและเฟโรแคคตัส	61
อมรรวณ แก้วยัง วัศพล บัวจันทร์ ผการัตน์ โรจน์ดวง* สุภาวดี งามสูตร และมันทกา วีระพงศ์	
การพัฒนาเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโดนด	76
วรพงศ์ บุญช่วยแทน* ชาตรี หอมเขียว และวรรณพร ชีววุฒิพงศ์1	
สมรรถนะของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายและผิวข้าง	91
นัสรี หะสาเมาะ* ภาณุ พร้อมพุทธานุกร และมนัส อนุศิริ	
ผลของการเสริมสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน <i>Nostoc commune</i> Vaucher TISTR 8870 ต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และการสร้างสีของปลากัด (<i>Betta splendens</i> Regan, 1910)	106
ฐิรารัตน์ แก้วจางง สมรักษ์ รอดเจริญ* อำนวยโชค เวชกุล ธัชชา สามพิมพ์ การุณ ทองประจุแก้ว นัทท์ นันทพงศ์ มานพ อาดำ และเสาวลักษณ์ มาลาวะ	
การพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าวโดยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์ (MABR)	121
เอนก สาระอินทร์* ฌานิกา แซ่แง ชุกกลิ่น และกัตตินาฏ สุกุลสวัสดิพันธ์	
ผลของอัตราการกวนและการให้อากาศต่อการเจริญเติบโตของ <i>Aurantiochytrium</i> sp. FIKU018 ที่เพาะเลี้ยงแบบเฟด-แบทช์ ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ	135
เกศยา คำรังษี เทพปัญญา เจริญรัตน์ ฐิณี สุวรรณสิงห์ และสุปัญญา จิตตพันธ์*	
คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับ	150

การพัฒนาชุดคำสั่งการทำเหมืองข้อความสำหรับการระบุปฏิสัมพันธ์ระหว่าง ทรานสคริปชันแฟกเตอร์และดีเอ็นเอในการแสดงออกของไนโตรจีเนส Text Mining Development Tool for Identification of Transcription Factor and DNA Interactions in Nitrogenase Expression

สิทธิรักษ์ สุนทรารักษ์^{1*} เทพปัญญา เจริญรัตน์¹ และภัทรพร คุ่มภัย¹

Sittirak Soontarak^{1*}, Theppanya Charoenrat¹ and Phataraporn Khumchai¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดคำสั่งการทำเหมืองข้อความและวิเคราะห์เครือข่ายความสัมพันธ์ของยีนโดยระบุคู่ของทรานสคริปชันแฟกเตอร์และดีเอ็นเอที่มีความสำคัญในการแสดงออกของไนโตรจีเนสในไรโซเบียม ผลของการพัฒนาชุดคำสั่งการทำเหมืองข้อความใช้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับแบคทีเรียที่มีความสามารถในการตรึงไนโตรเจน จากฐานข้อมูลทางวิชาการ PubMed เป็นข้อมูลนำเข้าจำนวนทั้งสิ้น 18,011 บทคัดย่อ พัฒนาชุดคำสั่งด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ Java ให้กลายเป็นข้อความรวมได้จำนวน 935,900 บรรทัด และสกัดเป็นประโยคได้ 264,624 ประโยค เมื่อนำข้อความทั้งหมดไปประมวลผลด้วยชุดคำสั่งต่อ พบว่ามีข้อมูลผลลัพธ์เป็นคำสำคัญที่ใช้บ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างยีนจำนวน 39,524 บรรทัด และเป็นรายชื่อยีนหรือรายชื่อโปรตีนจำนวน 51,193 บรรทัด ซึ่งข้อมูลทั้งสองนี้จะแสดงลำดับตำแหน่งและลำดับประโยคที่พบในข้อความรวมในแต่ละบรรทัด ผลสุดท้ายที่ได้จากการประมวลผลชุดคำสั่งการทำเหมืองข้อความ เป็นข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของยีนหรือโปรตีนกับคำสำคัญที่บ่งบอกความสัมพันธ์ของข้อมูลคู่หนึ่งจำนวน 187 บรรทัด นอกจากนี้ยังแสดงข้อความเต็มทั้งประโยคที่ค้นพบความสัมพันธ์ และแสดงคำระยะห่างของข้อมูล (token) ซึ่งบ่งบอกระยะห่างระหว่างคู่ของคำ เมื่อนำข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้จากการทำเหมืองข้อความมาแสดงเป็นภาพเครือข่ายความสัมพันธ์ของยีนด้วยโปรแกรม Cytoscape พบโหนดจำนวน 119 โหนด และเส้นเชื่อมจำนวน 187 เส้นเชื่อม จากการวิเคราะห์การเป็นจุดเชื่อมต่อศูนย์กลางเครือข่าย และพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างโหนด พบว่าโหนดที่เป็นยีน *nifH* และโหนดที่เป็น

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

* Corresponding author e-mail: sittiraksoontarak@gmail.com

Received: 27 November 2020, Revised: 4 January 2021, Accepted: 4 January 2021

โปรตีน NifA มีความสัมพันธ์กันในรูปแบบของยีนและทรานสคริปชันแฟคเตอร์ที่ทำงานร่วมกันในการแสดงออกของไนโตรจีเนส ซึ่งส่งผลต่อการตรึงไนโตรเจนของไรโซเปียม ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านพันธุวิศวกรรมต่อไป

คำสำคัญ: เหมืองข้อความ เครือข่ายความสัมพันธ์ของยีน การตรึงไนโตรเจน

Abstract

The purpose of this research was to develop a text mining program and to analyze gene networks identifying pairs of transcription factor and DNA that were important in nitrogenase expression in *Rhizobium*. The result of text mining implementation used information related to nitrogen-fixing bacteria by searching from the PubMed database. A total of 18,011 abstracts were input data. Text mining program implemented with Java computer language. The program compiled all abstracts into 935,900 lines of the combined text and extracted to 264,624 sentences. When the combined text compiled with the program, it was found that the output data keywords used to indicate gene relationships were 39,524 lines and the output data gene or protein lists were 51,193 lines. Each line of these two data showed the position and sentence order found in the combined text. The final result obtained by text mining implementation was 187 lines of correlation data between keyword and pairs of gene or protein. It also showed the full text of the relationship found and the token value indicated the distance between word pairs. When showing the result obtained from the text mining used to visualize a gene regulatory network using Cytoscape program, 119 nodes and 187 edges were found. When analyzing the network hub nodes and considering the relationship between nodes, it was found that the *nifH* gene nodes and the NifA protein nodes were related in the gene and the transcription factor that work together in the nitrogenase expression. The results affected the nitrogen fixation of *Rhizobium*. This information can be further applied to genetic engineering works.

Keywords: Text mining, Gene network, Nitrogen fixation

บทนำ

ไรโซเบียมเป็นแบคทีเรียที่มีความสามารถในการตรึงไนโตรเจนบนรากพืชและในลำต้นของพืชน้ำบางชนิด ปฏิสัมพันธ์นี้เรียกว่าภาวะพึ่งพาอาศัย (symbiotic) พืชที่พบความสามารถในการตรึงไนโตรเจน เช่น พืชตระกูลถั่วมีไรโซเบียมอาศัยอยู่ภายในปมของระบบราก การผลิตสารประกอบไนโตรเจนช่วยให้พืชเจริญเติบโต เมื่อพืชตายและย่อยสลาย ไนโตรเจนที่ถูกตรึงไว้ในพืชจะถูกปลดปล่อยออกมาเพื่อเป็นปุ๋ยให้กับดินและให้แก่พืชอื่นต่อไป (Postgate, 1998) จัดเป็นการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ไรโซเบียมมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการตรึงไนโตรเจน ได้แก่ ไนโตรจีเนส (nitrogenase) ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในการตรึงไนโตรเจน (Newton, 1993) ทั้งนี้ ไนโตรจีเนสเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการแสดงออกของยีน *nikH* *nifD* และ *nifK* โดยการควบคุมการแสดงออกของยีนในระดับการถอดรหัส (transcription) จะเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างทรานสคริปชันแฟกเตอร์ (transcription factor) และดีเอ็นเอ (Sarkar and Reinhold, 2014) ทรานสคริปชันแฟกเตอร์สามารถช่วยส่งเสริมการแสดงออกของยีนให้เพิ่มมากขึ้น หรือมีความสามารถในการยับยั้งการแสดงออกของยีนได้เช่นกัน การเข้าใจกระบวนการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างทรานสคริปชันแฟกเตอร์กับดีเอ็นเอ เช่น ลักษณะการเข้าจับระหว่างทรานสคริปชันแฟกเตอร์กับดีเอ็นเอ จะช่วยให้เข้าใจลักษณะการแสดงออกของยีนได้ดีขึ้น

ปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีชีวสารสนเทศในการศึกษากระบวนการทางชีววิทยาแบบองค์รวม (systems biology) เช่น การสร้างเครือข่ายควบคุมการแสดงออกของยีน (regulatory network) โดยได้ข้อมูลมาจากการทำเหมืองข้อความ (text mining) และการศึกษาปฏิสัมพันธ์ของโปรตีนที่มีความซับซ้อน จึงมีบทบาทสำคัญในด้านต่าง ๆ ของโครงสร้างและหน้าที่ของเซลล์ ความรู้เหล่านั้นเปิดเผยให้เห็นถึงกลไกของโมเลกุลของกระบวนการทางด้านชีววิทยา (Zhou and He, 2008) ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยให้สามารถระบุทรานสคริปชันแฟกเตอร์ที่สามารถพบได้ในไรโซเบียมสายพันธุ์ต่าง ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของทรานสคริปชันแฟกเตอร์เหล่านั้น หรืออาจทำให้พบทรานสคริปชันแฟกเตอร์ที่โดดเด่นอย่างมากในกระบวนการการควบคุมการแสดงออกของยีน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดคำสั่งการทำเหมืองข้อความสำหรับระบุกลุ่มทรานสคริปชันแฟกเตอร์และยีนที่สำคัญในกระบวนการตรึงไนโตรเจน โดยใช้กระบวนการสร้างเครือข่ายปฏิสัมพันธ์ของยีน ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบทรานสคริปชันแฟกเตอร์เพื่อเอื้อต่อการแสดงออกของไนโตรจีเนสที่ใช้ในการตรึงไนโตรเจนได้มากขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การสืบค้นข้อมูลบทความทางวิชาการจากฐานข้อมูล

สืบค้นบทความทางวิชาการจากฐานข้อมูล PubMed ซึ่งเป็นฐานข้อมูลที่ประกอบไปด้วยวรรณกรรมชีวการแพทย์ วารสารวิทยาศาสตร์ชีวภาพ และหนังสือออนไลน์ นักวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ชีวภาพมักใช้ PubMed เป็นเครื่องมือค้นหาออนไลน์เพื่อเข้าถึงข้อมูลในฐานข้อมูล (Vibert *et al.*, 2009) ในขั้นตอนนี้จะใช้คำสำคัญในการสืบค้นหลายคำ ซึ่งรวมเป็นหลายชุดข้อมูลเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้องกับการตรึงไนโตรเจน ในโตรจีนัส และไรโซเบียม โดยใช้คำสำคัญที่ใช้สืบค้นทั้งหมดมี 7 ชุดดังนี้ (1) rhizobium nitrogen fixation (2) rhizobia nitrogen fixation (3) bacteria nitrogen fixation (4) bacteria nitrogen fixing (5) bacteria nitrogenase (6) rhizobium nitrogenase และ (7) rhizobia nitrogenase

2. การเขียนชุดคำสั่งสำหรับทำเหมืองข้อความ

การพัฒนาชุดคำสั่งในงานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ Eclipse Integrated Development Environment (IDE) (Murphy *et al.*, 2006) รุ่น Eclipse Java Oxygen จากเว็บไซต์ <https://www.eclipse.org/downloads/> พัฒนาขึ้นมาทั้งหมด

2.1 แยกประโยคย่อยออกมาจากบทความและกำหนดลำดับที่ให้กับประโยคย่อย โดยใช้สถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์สำหรับการจัดการข้อมูลที่ไม่มีโครงสร้าง (unstructured information management architecture: UIMA) ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ไม่มีโครงสร้าง การเข้าถึงแหล่งข้อมูลของโครงสร้าง การจัดเก็บข้อมูล การทำดัชนี และการค้นหาข้อมูลจากเนื้อหาความหมายที่ค้นพบ (Ferrucci and Lally, 2004) และใช้เครื่องมือ OpenNLP ในการสร้างคำอธิบายประกอบอย่างอัตโนมัติ เพื่อตรวจสอบขอบเขตของประโยค จัดการเครื่องหมาย จัดการส่วนของคำ แยกส่วนของวลี และแยกวิเคราะห์ประโยค (Wilcock, 2009)

2.2 ดาวน์โหลดย่อคำสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการระบุหาปฏิสัมพันธ์ระหว่างยีนจากเว็บไซต์ <https://www.biomedcentral.com/content/supplementary/1471-2105-10-233-S1.txt> โดยพิจารณาจากคำที่สามารถใช้บ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างยีนและโปรตีน ยีนและยีนโปรตีนและโปรตีนได้

2.3 นำคำสำคัญแต่ละคำไปสืบค้นกับบทความ หากพบว่าคำสำคัญนั้นปรากฏอยู่ในบทความให้แสดงตำแหน่งเริ่มต้นและสิ้นสุดของคำสำคัญ และแสดงลำดับที่ของประโยคย่อยที่พบโดยให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์ข้อความ

2.4 กำหนดนิพจน์ทั่วไป (regular expression) สำหรับหารายชื่อยีนหรือโปรตีนโดยมีรูปแบบดังนี้คือ อักษรตัวแรกเป็นพยัญชนะภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่หรือตัวพิมพ์เล็ก อักษรตัวที่สองและสามเป็นพยัญชนะภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กเท่านั้น อักษรตัวที่สี่เป็นพยัญชนะภาษาอังกฤษ

ตัวพิมพ์ใหญ่หรือตัวพิมพ์เล็กเช่นเดียวกับตัวอักษรแรก จากนั้นสามารถมีตัวเลขต่อท้ายข้อความได้จำนวนหนึ่งถึงสามตัวเลข

2.5 นำนิพจน์ทั่วไปของยีนหรือโปรตีนไปสับคั่นกับบทความ หากพบว่านิพจน์ทั่วไปของยีนหรือโปรตีนนั้นปรากฏอยู่ในบทความให้แสดงตำแหน่งเริ่มต้นและสิ้นสุดของนิพจน์ทั่วไปของยีนหรือโปรตีน และแสดงลำดับที่ของประโยคย่อยที่พบ โดยให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์ข้อความ

2.6 จัดรูปแบบและแสดงไฟล์ข้อความของรายชื่อคำสำคัญที่ได้จากข้อ 2.3 และรายชื่อยีนหรือโปรตีนที่ได้จากข้อ 2.5 ให้อยู่ในรูปแบบลำดับของประโยคย่อย ตั้งแต่ประโยคย่อยที่หนึ่งว่าพบคำสำคัญ ชื่อยีน หรือชื่อโปรตีนใดบ้าง ทำเช่นนี้จนถึงประโยคย่อยสุดท้าย

2.7 สร้างไฟล์ข้อความให้ข้อมูลอยู่ในรูปแบบของไฟล์ tab-separated value (TSV) โดยข้อมูลคอลัมน์แรกเป็นชื่อยีน คั่นด้วยสัญลักษณ์ tab ตามด้วยข้อมูลคอลัมน์ที่สองเป็นชื่อยีน คั่นด้วยสัญลักษณ์ tab แล้วตามด้วยข้อมูลคอลัมน์ที่สามเป็นคำสำคัญที่บ่งบอกปฏิสัมพันธ์ ทำลักษณะเช่นเดียวกันนี้ไปจนครบจำนวนข้อมูลที่ได้มาจากขั้นตอนข้อที่ 2.6 ซึ่งข้อมูลดังกล่าวในแต่ละแถวนี้มีความสัมพันธ์กัน

3. การแสดงภาพและวิเคราะห์เครือข่ายความสัมพันธ์ระหว่างยีน

แสดงภาพของเครือข่ายความสัมพันธ์ด้วยโปรแกรม Cytoscape v3.6.0 จากนั้นวิเคราะห์เครือข่ายความสัมพันธ์จากโหนดที่เป็นจุดเชื่อมต่อศูนย์กลาง (hub node) และวิเคราะห์จุดเชื่อมต่อความสัมพันธ์แรกสุด (first neighbour analysis) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างทรานสคริปชันแฟกเตอร์และดีเอ็นเอที่ส่งผลต่อการแสดงออกของโนโตรจีเนส

ผลการวิจัย

1. ผลการสืบค้นข้อมูลบทความทางวิชาการจากฐานข้อมูล

จากขั้นตอนการสืบค้นข้อมูลบทความทางวิชาการจากฐานข้อมูลเพื่อให้ได้มาซึ่งบทความที่เกี่ยวข้องกับการตรึงไนโตรเจน ไนโตรจีเนส และไรโซเปียม ด้วยคำค้นหาที่แตกต่างกัน ได้ผลดังตารางที่ 1 โดยจากการสืบค้นได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นบทความรวมทั้งสิ้น 18,011 บทความ โดยต่อมาจะนำบทความทั้งหมดนี้มาเรียงต่อกันให้อยู่ในไฟล์ข้อความรวมเป็นไฟล์เดียว เพื่อสะดวกต่อการนำไปเป็นข้อมูลนำเข้าในการเขียนชุดคำสั่งสำหรับการทำเหมืองข้อความของขั้นตอนถัดไป เมื่อนำบทความทั้ง 18,011 บทความมารวมกันไว้เป็นข้อความรวมจะมีจำนวนของบรรทัดรวมทั้งสิ้น 592,645 บรรทัด ซึ่งเป็นข้อมูลขนาดใหญ่

ตารางที่ 1 ชุดของคำที่ใช้สืบค้นในฐานข้อมูล PubMed

คำที่ใช้ในการสืบค้น	จำนวนบทความที่สืบค้นได้
rhizobium nitrogen fixation	1,748
rhizobia nitrogen fixation	846
bacteria nitrogen fixation	7,141
bacteria nitrogen fixing	4,150
bacteria nitrogenase	3,438
rhizobium nitrogenase	500
rhizobia nitrogenase	188
รวม	18,011

2. ผลการเขียนชุดคำสั่งสำหรับทำเหมืองข้อความ

ผลลัพธ์ของชุดคำสั่งนี้ใช้ข้อมูลนำเข้าคือไฟล์ข้อความรวมที่มีบทความ 592,645 บทความที่ได้มาจากการสืบค้นฐานข้อมูลทางวิชาการมาสังกัดเป็นประโยคย่อย ซึ่งได้ผลลัพธ์เป็นไฟล์ข้อความรวมไฟล์ใหม่ที่มีลำดับประโยคและตำแหน่งของประโยคเพิ่มขึ้นมา ทำให้ข้อความรวมใหม่มีจำนวนบทความเพิ่มขึ้นเป็น 935,900 บทความ และสังกัดเป็นประโยคได้ 264,624 ประโยค เช่น จากภาพที่ 1 แสดงข้อความ sentence: 7 ซึ่งหมายถึงข้อความรวมถูกสกัดออกมาเป็นประโยคย่อยลำดับที่ 7 และมีข้อมูลในประโยคแสดงดังภาพ โดยส่วนท้ายของประโยคแสดงข้อความ (449..666) หมายถึงประโยคนี้อักษรตัวแรกเริ่มต้นที่ลำดับ 449 และลงท้ายด้วยตัวอักษรลำดับที่ 666 ของข้อความรวม

```

20 Sentence: 7
21 To analyze microbial communities in environmental samples, this study combined
22 Denaturing Gradient Gel Electrophoresis of amplified 16S rRNA-genes in total
23 genomic DNA extracts from those samples with gene sequencing. [449..666]
24 Sentence: 8
25 The environmental
26 samples studied were oily seawater and soil samples, that had been bioaugmented
27 with natural materials rich in hydrocarbonoclastic bacteria. [667..825]
```

ภาพที่ 1 ผลลัพธ์บางส่วนของชุดคำสั่งในการสกัดประโยคย่อยจากบทความที่เป็นข้อความรวม

ตารางที่ 2 ตัวอย่างตำแหน่งและลำดับของประโยคที่ค้นพบคำสำคัญ

คำสำคัญ (keyword)	ตำแหน่งเริ่มต้น-สิ้นสุด (position)	ลำดับของประโยค (sentence)
bind	15,097-15,101	129
bind	50,852-50,856	431
bind	98,218-98,222	827
binded	11,451,152-11,451,158	100,367
binds	516,729-516,734	4,453
binds	9,386,773-9,386,778	80,732
binding	1,111,019-1,111,026	9,536
binding	8,297,486-8,297,493	71,421
express	732,267-732,274	6,326
express	3,206,236-3,206,243	27,690

จากตารางที่ 2 เป็นผลตัวอย่างบางส่วนของชุดคำสั่งที่ใช้ข้อมูลนำเข้าจากข้อความรวมที่มีการจัดแบ่งลำดับของประโยคไว้เรียบร้อยแล้ว มาประมวลผลข้อมูลด้วยชุดคำสั่งเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นไฟล์ข้อมูลใหม่ ซึ่งมีจำนวนข้อมูลรวมทั้งสิ้น 39,524 บรรทัด โดยข้อมูลบรรทัดแรกสุดเป็นข้อมูลบ่งบอกถึงความหมายที่อยู่ในสดมภ์ของแต่ละบรรทัด ตัวอย่างในบรรทัดที่สองของตารางที่ 2 การทำงานของชุดคำสั่งนี้ค้นพบคำสำคัญคำว่า bind อยู่ในตำแหน่งที่ 15,097 ถึงตำแหน่งที่ 15,101 ของข้อความรวม และพบคำนี้อยู่ในประโยคที่ 129 ของข้อความรวมเช่นกัน โดยคำสำคัญคำเดียวกันสามารถค้นพบได้หลายที่ในข้อความรวม ซึ่งทราบได้ว่าเป็นคำสำคัญคนละคำกันจากการระบุลำดับที่ของประโยคและตำแหน่งที่พบจากในข้อความรวม เช่น คำสำคัญ bind พบได้จากบรรทัดที่ 2 บรรทัดที่ 3 และบรรทัดที่ 4 ซึ่งพบได้จากประโยคลำดับที่ 129 431 และ 827 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ตัวอย่างตำแหน่งและลำดับของประโยคที่ค้นพบรายชื่อยีนหรือโปรตีน

ยีน (gene)	ตำแหน่งเริ่มต้น-สิ้นสุด (position)	ลำดับของประโยค (sentence)
<i>nifH</i>	1,555-1,559	13
<i>ogyO</i>	1,987-1,991	17
BioE	4,858-4,862	45
<i>nzaT</i>	5,052-5,056	47
<i>hydG</i>	5,854-5,858	53
GmbH	10,402-10,406	84
RpoN	14,235-14,239	124

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ยีน (gene)	ตำแหน่งเริ่มต้น-สิ้นสุด (position)	ลำดับของประโยค (sentence)
<i>rpoN</i>	14,431-14,435	125
NtrB	15,475-15,479	131
HydA	22,383-22,387	186

จากตารางที่ 3 เป็นผลตัวอย่างบางส่วนจากการเขียนชุดคำสั่งสำหรับการกำหนดตำแหน่งและลำดับของประโยคที่ค้นพบรายชื่อยีนหรือโปรตีน ซึ่งได้ข้อมูลผลลัพธ์รวมทั้งสิ้น 51,193 บรรทัด โดยข้อมูลบรรทัดแรกสุดเป็นข้อมูลบ่งบอกถึงความหมายที่อยู่ในสดมภ์ของแต่ละบรรทัด ตัวอย่างในบรรทัดที่สองของตารางที่ 3 การทำงานของชุดคำสั่งนี้ค้นพบรายชื่อยีน *nifH* อยู่ในตำแหน่งที่ 1,555 ถึงตำแหน่งที่ 1,559 ของข้อความรวม และพบยีนนี้อยู่ในประโยคที่ 13 ของข้อความรวม ความแตกต่างระหว่างรายชื่อยีนและรายชื่อโปรตีนคือ รายชื่อยีนจะขึ้นต้นด้วยตัวอักษรอังกฤษพิมพ์เล็ก ส่วนรายชื่อโปรตีนจะขึ้นต้นด้วยตัวอักษรอังกฤษพิมพ์ใหญ่ เช่น RpoN และ NtrB

ตารางที่ 4 ตัวอย่างรายชื่อคำสำคัญที่ค้นพบในแต่ละประโยค

ลำดับของประโยค (sentence)	คำสำคัญ (keyword)
122	N/A
123	N/A
124	regulation transcript transcription
125	N/A
126	N/A
127	transcript
128	N/A
129	bind binding regulate regulated transcript
130	express expression transcript
131	bind binding regulate regulated regulation

หมายเหตุ: - N/A คือ ไม่พบข้อมูล

จากตารางที่ 4 เป็นผลตัวอย่างบางส่วนของชุดคำสั่งที่เขียนขึ้นมาเพื่อให้ทราบว่าแต่ละประโยคที่มีในข้อความรวม สามารถพบคำสำคัญที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของยีนหรือโปรตีนได้บ้าง เช่น ผลในตารางที่ 4 บรรทัดที่สี่ แสดงถึงประโยคในข้อความรวมลำดับที่ 124 และพบคำสำคัญดังนี้ regulation transcript และ transcription

ตารางที่ 5 ตัวอย่างรายชื่อยีนที่ค้นพบในแต่ละประโยค

ลำดับของประโยค (sentence)	ยีน (gene)
24,954	N/A
24,955	<i>nifH</i>
24,956	N/A
24,957	N/A
24,958	N/A
24,959	<i>nifH</i>
24,960	<i>nifH nifD nifK</i>
24,961	<i>nifH nifD</i>
24,962	<i>nifD nifD</i>
24,963	<i>nifH nifH</i>

หมายเหตุ: - N/A คือ ไม่พบข้อมูล

จากตารางที่ 5 ผลลัพธ์คล้ายกับข้อมูลในตารางที่ 4 แต่ผลลัพธ์นี้จะเป็นข้อมูลของรายชื่อยีนหรือรายชื่อโปรตีนแทนข้อมูลของคำสำคัญ โดยผลบางส่วนที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 5 นอกจากนี้ ข้อมูลที่อยู่ในสดมภ์คำสำคัญของตารางที่ 4 และข้อมูลในสดมภ์ยีนของตารางที่ 5 อาจพบว่ามี ความสัมพันธ์กันได้หากเป็นข้อมูลที่อยู่ในลำดับประโยคเดียวกัน

ตารางที่ 6 ตัวอย่างรายชื่อยีนหรือโปรตีนและคำสำคัญที่มีความสัมพันธ์กันพร้อมแสดงประโยคที่ค้นพบ

ลำดับของ ประโยค (sentence)	ยีน (gene) 1	คำสำคัญ (keyword)	ยีน (gene) 2	ระยะห่าง ของข้อมูล (token)	ข้อมูลทั้งหมดที่พบ ในประโยค (full-sentence)
206,311	NifA	binding	<i>nifH</i>	10	We now report that the introduction of half turns of the DNA helix into the DNA separating the upstream NifA binding site from the downstream promoter element of the <i>nifH</i> promoter decreases NifA-mediated activation

ตารางที่ 6 (ต่อ)

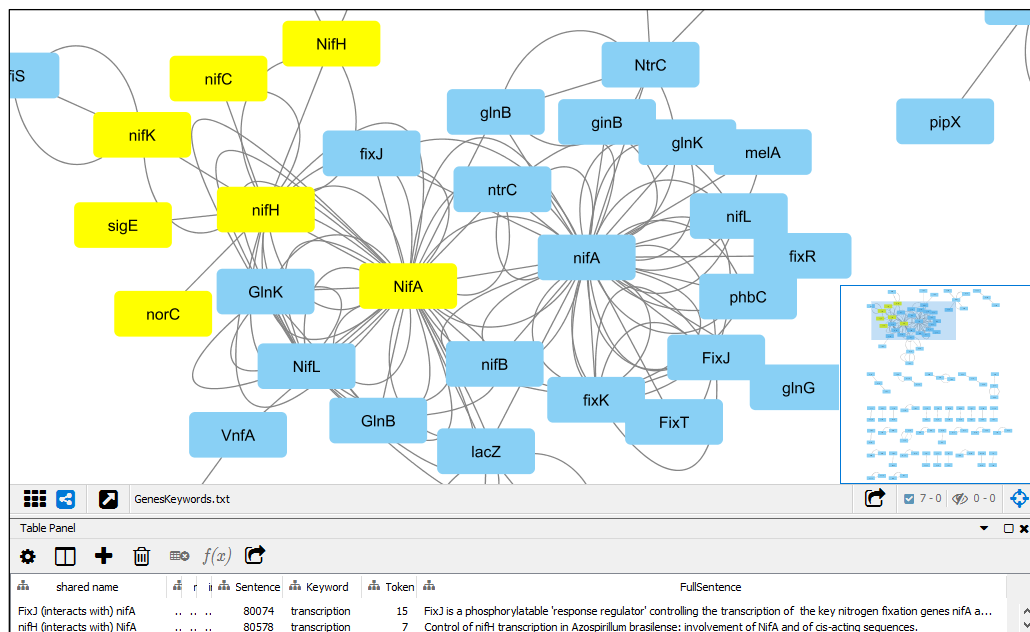
ลำดับของประโยค (sentence)	ยีน (gene) 1	คำสำคัญ (keyword)	ยีน (gene) 2	ระยะห่างของข้อมูล (token)	ข้อมูลทั้งหมดที่พบในประโยค (full-sentence)
252,678	NifA	transcription	<i>nifH</i>	10	to a greater extent than does the introduction of full helical turns. The central domain of <i>Rhizobium meliloti</i> NifA is sufficient to activate transcription from the <i>R. meliloti nifH</i> promoter.

จากตารางที่ 6 เป็นผลตัวอย่างบางส่วนของ การเขียนชุดคำสั่งสำหรับแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรายชื่อยีนหรือรายชื่อโปรตีนที่มีความสัมพันธ์กันด้วยคำสำคัญใดคำสำคัญหนึ่ง ในส่วนค่าของระยะห่างของข้อมูลมีเงื่อนไขว่าข้อมูลแรกที่พบจะต้องเป็นรายชื่อยีนหรือโปรตีนก่อน จากนั้นตามด้วยข้อมูลคำสำคัญเป็นข้อมูลที่สองซึ่งเป็นข้อมูลระหว่างกลางของข้อมูลแรกและข้อมูลที่สามที่เป็นข้อมูลรายชื่อยีนหรือรายชื่อโปรตีน แล้วจึงคำนวณออกมาเป็นค่าระยะห่างของข้อมูล หากค่านี้มีค่าน้อยหมายความว่าระยะห่างของคู่รายชื่อยีนหรือรายชื่อโปรตีนมีระยะห่างน้อย หากค่านี้มีค่ามากหมายความว่าระยะห่างของคู่รายชื่อยีนหรือรายชื่อโปรตีนมีระยะห่างมาก ซึ่งอาจนำมาช่วยพิจารณาความสัมพันธ์ของรายชื่อยีนหรือโปรตีนดังกล่าวได้ เพราะถ้าค่าระยะห่างของข้อมูลสูงมาก เช่นค่าเท่ากับ 100 แสดงว่าคู่ของรายชื่อยีนหรือโปรตีนมีระยะห่างของทั้งสองคำอยู่ถึง 100 ช่องว่าง โดยมีคำสำคัญอยู่ระหว่างกลางของสองคำนี้ในประโยคเพียงประโยคเดียว อาจเลือกที่จะไม่พิจารณาความสัมพันธ์ของข้อความดังกล่าว ข้อมูลในสดมภ์ข้อมูลทั้งหมดที่พบในประโยค สามารถอ่านข้อความได้ทั้งประโยคเพื่อช่วยพิจารณาความสัมพันธ์ของข้อมูลรายชื่อยีนหรือโปรตีน และยังสามารถอ้างอิงกลับไปที่ประโยคข้อความรวมได้ เพื่อหาต่อไปว่ามาจากบทคัดย่อใด ตัวอย่างของข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมทำเหมืองข้อความบางส่วนจากตารางที่ 6 ข้อมูลในสดมภ์ลำดับของประโยค ข้อมูลแรกคือ 206,311 หมายถึงประโยคลำดับที่ 206,311 ในข้อความรวม พบรายชื่อโปรตีน NifA และยีน *nifH* มีความสัมพันธ์กันด้วยคำสำคัญ binding โดยมีระยะห่างเป็นช่องว่างระหว่าง NifA คั่นด้วย expressed แล้วตามด้วย *nifH* อยู่จำนวน 10 ช่องว่างของคำ และมีข้อมูลที่เป็นข้อความทั้งประโยคคือ “We now report that the introduction of half turns of the DNA helix

into the DNA separating the upstream NifA binding site from the downstream promoter element of the *nifH* promoter decreases NifA-mediated activation to a greater extent than does the introduction of full helical turns.” เมื่อดูความหมายของข้อความในประโยคแล้วพบว่า โปรตีน NifA มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการแสดงออกของยีน *nifH* ซึ่งเป็นประโยชน์ในการพิจารณาความสัมพันธ์ของคูยีนดังกล่าว

3. ผลการวิเคราะห์เครือข่ายความสัมพันธ์ระหว่างยีน

จากข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลด้วยชุดคำสั่งของโปรแกรมการทำเหมืองข้อความได้เป็นข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างรายชื่อยีนและโปรตีน นำมาใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับโปรแกรม Cytoscape เพื่อสร้างเป็นเครือข่ายความสัมพันธ์ระหว่างรายชื่อยีนและโปรตีน แสดงให้เห็นเป็นภาพเครือข่ายความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 2 โดยกรอบสี่เหลี่ยมคือโหนด (node) แต่ละโหนดแทนข้อมูลที่เป็นรายชื่อยีนหรือโปรตีน และเส้นเชื่อม (edge) ของแต่ละโหนดแทนความสัมพันธ์ของโหนดดังกล่าว ผลของขั้นตอนนี้พบโหนดทั้งหมด 119 โหนด เป็นรายชื่อโปรตีน 47 โหนด รายชื่อยีน 72 โหนด และเส้นเชื่อมทั้งหมด 187 เส้นเชื่อม จากเครือข่ายความสัมพันธ์ที่แสดงสามารถเลือกโหนดหรือเส้นเชื่อมเพื่อดูรายละเอียดของข้อมูลโหนดนั้นได้ โดยจะแสดงข้อมูลเหมือนกับข้อมูลผลลัพธ์ของโปรแกรมการทำเหมืองข้อความ คือแสดงข้อมูลลำดับของประโยคที่พบในข้อความรวม ค่าระยะห่างของข้อมูล ซึ่งเป็นระยะห่างของรายชื่อยีนหรือโปรตีน รวมถึงแสดงข้อความทั้งประโยคที่เลือกอีกด้วย เพื่อการค้นหาข้อมูลกลับไปยังข้อความในบทความย่อ นำไปถึงวารสารวิชาการต้นทางได้ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เครือข่ายความสัมพันธ์นี้พบว่าที่โหนด *nifA* และ *nifH* เป็นรายชื่อยีนที่พบเส้นเชื่อมความสัมพันธ์จำนวนมาก และที่โหนด NifA ซึ่งเป็นรายชื่อโปรตีนที่พบเส้นเชื่อมความสัมพันธ์จำนวนมากเช่นกัน



ภาพที่ 2 เครือข่ายความสัมพันธ์ระหว่างทรานสคริปชันแฟกเตอร์และยีนที่ได้จากการทำเหมืองข้อความ โดยแสดงออกมาเป็นภาพเครือข่ายด้วยโปรแกรม Cytoscape

การอภิปรายผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การทำเหมืองข้อความสำหรับการระบุปฏิสัมพันธ์ระหว่างทรานสคริปชันแฟกเตอร์และดีเอ็นเอในการแสดงออกของไนโตรจีเนส เนื่องจากการทำเหมืองข้อความ เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการกลั่นกรองข้อมูลสำคัญให้ออกมาได้อย่างรวดเร็วจากวรรณกรรมจำนวนมาก (Przybyla *et al.*, 2016) การทำเหมืองข้อความสามารถนิยามได้ว่าเป็นการค้นหาข้อมูลใหม่ ๆ ที่ยังไม่เคยรู้จักมาก่อน โดยแยกข้อมูลออกจากข้อมูลที่เป็นลายลักษณ์อักษรโดยอัตโนมัติ การสกัดข้อมูลสามารถสกัดปฏิสัมพันธ์ระหว่างยีนกับยีน หรือปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนกับโปรตีนและวิถีทางชีวภาพ โดยถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายคือการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (natural language processing) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่รวบรวมไวยากรณ์และความหมายของภาษา (Ananiadou *et al.*, 2006) งานวิจัยนี้ได้ใช้ระเบียบวิธีการทำเหมืองข้อความตามด้วยการสร้างเครือข่ายความสัมพันธ์ คล้ายกับงานวิจัยของ Song and Chen (2009) ซึ่งทำเหมืองข้อมูลชีวการแพทย์โดยอัตโนมัติเพื่อสกัดข้อมูลการควบคุมของยีน (จำนวนสายพันธุ์ พีโนไทป์ ความสัมพันธ์ของการควบคุมยีน) แตกต่างจากการพัฒนาชุดคำสั่งการทำเหมืองข้อความ จึงได้ข้อมูลที่สกัดออกมาได้ต่างกันไป โดยงานวิจัยนี้ได้ผลลัพธ์จากการประมวลผลชุดคำสั่งเป็นข้อความความสัมพันธ์ระหว่างยีนกับยีน โปรตีนกับโปรตีน หรือยีนกับโปรตีน ซึ่งจะได้ผลที่สอดคล้องกับหัวข้องานวิจัย

มากกว่า โดยต้องการปฏิสัมพันธ์ระหว่างทรานสคริปชันแฟกเตอร์และดีเอ็นเอ ในส่วนของค่าระยะห่างของข้อมูลที่ใช้สำหรับพิจารณาจำนวนของการเว้นวรรคระหว่างคำในประโยค มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 47 จากความสัมพันธ์ระหว่างรายชื่อยีนหรือโปรตีนกับรายชื่อคำสำคัญที่ค้นพบในแต่ละประโยคจำนวน 187 บรรทัด ซึ่งยอมรับได้ว่าที่ค่าระยะห่างของข้อมูล 47 นี้เป็นระยะห่างระหว่างคำในประโยคที่ไม่ได้ห่างมากเกินไป หากพบว่าค่าระยะห่างของข้อมูลมีค่ามากกว่า 100 ไปขึ้นจะไม่พิจารณา เนื่องจากที่ระยะห่างดังกล่าวอาจไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างคำ จากขั้นตอนการแสดงผลด้วยเครือข่ายความสัมพันธ์ของยีนหรือโปรตีน พบว่าโหนด *NifA* และ *nifH* เป็นรายชื่อโปรตีนและยีนที่พบเส้นเชื่อมความสัมพันธ์จำนวนมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ng *et al.*, (2016) ที่กล่าวว่าเครือข่ายความสัมพันธ์ของโปรตีนทรานสคริปชันแฟกเตอร์สามารถวิเคราะห์หาโหนดเพื่อนบ้านแรกสุดที่เชื่อมต่อกับโหนดหรือทรานสคริปชันแฟกเตอร์ที่สนใจ หากมีโหนดเพื่อนบ้านแรกสุดเชื่อมต่อกันแสดงถึงการมีปฏิสัมพันธ์ที่มากเช่นกัน จึงนำผลที่ได้วิเคราะห์ต่อไปด้วยการค้นหาคำกลับไปยังบทความทางวิชาการและทราบถึงยีน *nifH* ที่สามารถแสดงออกเป็นเอ็นไซม์ไนโตรจีเนส โดยมีโปรตีน *NifA* เป็นทรานสคริปชันแฟกเตอร์ที่ช่วยในการแสดงออกของยีน *nifH*

สรุปผลการวิจัย

ผลจากการสืบค้นฐานข้อมูลได้ผลลัพธ์เป็นบทความที่เกี่ยวข้องกับแบคทีเรียที่มีความสามารถในการตรึงไนโตรเจนจำนวน 18,011 บทความ ได้ผลจากการเขียนชุดคำสั่งสำหรับการทำเหมืองข้อความแบ่งเป็นประโยคทั้งหมดจำนวน 264,660 ประโยค ได้ตำแหน่งและลำดับของประโยคที่ค้นพบคำสำคัญจำนวน 39,523 บรรทัด ได้ตำแหน่งและลำดับของประโยคที่ค้นพบรายชื่อยีนหรือโปรตีนจำนวน 51,192 บรรทัด ได้ความสัมพันธ์ระหว่างรายชื่อยีนหรือโปรตีนกับรายชื่อคำสำคัญที่ค้นพบในแต่ละประโยคจำนวน 187 บรรทัด ได้ค่าระยะห่างของข้อมูลสำหรับพิจารณาจำนวนของการเว้นวรรคระหว่างคำในประโยค เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างยีนอย่างคร่าว ๆ นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์เครือข่ายความสัมพันธ์ระหว่างทรานสคริปชันแฟกเตอร์และยีนที่ได้จากการทำเหมืองข้อความมาแสดงเป็นภาพเครือข่าย พบโหนดจำนวน 119 โหนด เป็นรายชื่อโปรตีน 47 โหนด รายชื่อยีน 72 โหนด และเส้นเชื่อมจำนวน 187 เส้นเชื่อม จากการวิเคราะห์การเป็นจุดเชื่อมต่อศูนย์กลางเครือข่ายและพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างโหนด พบว่าโหนดที่เป็นยีน *nifH* และโหนดที่เป็นโปรตีน *NifA* มีความสัมพันธ์กันในรูปแบบของยีนและทรานสคริปชันแฟกเตอร์ที่ทำงานร่วมกันในการแสดงออกของไนโตรจีเนส ซึ่งส่งผลต่อการตรึงไนโตรเจนของไรโซเบียม โดยศึกษากลับไปยังบทความทางวิชาการต้นทางเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านพันธุวิศวกรรมเพื่อใช้ประโยชน์ทางด้านการเกษตร เช่น เพิ่มผลผลิตของพืชด้วยธาตุไนโตรเจน หรือประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม เช่น เพิ่มมูลค่าทางการค้าจากการผลิตปุ๋ยไนโตรเจน

ข้อเสนอแนะ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำเหมืองข้อความและการวิเคราะห์เครือข่ายความสัมพันธ์ ควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการมีปฏิสัมพันธ์ระดับโมเลกุลที่ลึกลงไปถึงความจำเพาะเจาะจงของตำแหน่งและชนิดกรดอะมิโนที่เข้าจับกับบริเวณใดบริเวณหนึ่งของโครงสร้างดีเอ็นเอ ซึ่งอาจนำไปสู่งานทางด้านพันธุวิศวกรรมที่ต้องการออกแบบทรานสคริปชันแฟกเตอร์สำหรับช่วยส่งเสริมการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ไนโตรจีเนส นอกจากนั้นขั้นตอนต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการพัฒนาระเบียบวิธีการทางด้านชีวสารสนเทศ เพื่อศึกษาเพียงการแสดงออกของไนโตรจีเนส หากต้องการศึกษาในเรื่องอื่น ๆ ของสาขาทางด้านชีววิทยา ยังสามารถนำระเบียบวิธีการทางด้านชีวสารสนเทศนี้ ตั้งแต่ขั้นตอนการสืบค้นฐานข้อมูล การพัฒนาชุดคำสั่งโปรแกรมการทำเหมืองข้อความ จนถึงการสร้างเครือข่ายความสัมพันธ์ นำไปประยุกต์หรือใช้เป็นแนวทางการศึกษาข้อมูลที่น่าสนใจได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อาจารย์และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่สนับสนุนและให้ความอนุเคราะห์ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Ananiadou, S., Kell, D.B. and Tsujii, J. (2006). Text mining and its potential applications in systems biology. *Trends in Biotechnology*, 24(12), 571-579.
- Ferrucci, D. and Lally, A. (2004). UIMA: an architectural approach to unstructured information processing in the corporate research environment. *Natural Language Engineering*, 10(3-4), 327-348.
- Murphy, G.C., Kersten, M. and Findlater, L. (2006). How are Java software developers using the Eclipse IDE. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Software*, 23(4), 76-83.
- Newton, W.E. (1993). Nitrogenases: distribution, composition, structure and function. In Palacios, R., Mora, J., Newton, W.E. (Eds.). *New Horizons in Nitrogen Fixation*, pp. 5-18. Springer: Dordrecht.

- Ng, F.S.L., Ruau, D., Wernisch, L. and Gottgens, B. (2016). A graphical model approach visualizes regulatory relationships between genome-wide transcription factor binding profiles. *Briefings in Bioinformatics*, doi: <http://doi.org/10.1093/bib/bbw102>.
- Postgate, J. (1998). *Nitrogen Fixation*. (3rd ed). Cambridge: Cambridge University Press.
- Przybyla, P., Shardlow, M., Aubin, S., Bossy, R., Castilho, R.E., Piperidis, S., McNaught, J. and Ananiadou, S. (2016). Text mining resources for the life sciences. *Database*, doi: <https://doi.org/10.1093/database/baw145>.
- Sarkar, A. and Reinhold-Hurek, B. (2014). Transcriptional profiling of nitrogen fixation and the role of NifA in the diazotrophic endophyte *Azoarcus* sp. strain BH72. *PLOS ONE*, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086527>.
- Song, Y.L. and Chen, S.S. (2009). Text mining biomedical literature for constructing gene regulatory networks. *Interdisciplinary Sciences Computational Life Sciences*, 1(3), 179-186.
- Vibert, N., Ros, C., Bigot, L.L., Ramond, M., Gatefin, J. and Rouet, J. (2009). Effects of domain knowledge on reference search with the PubMed database: An experimental study. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 60(7), 1423-1447.
- Wilcock, G. (2009). *Introduction to Linguistic Annotation and Text Analytics*. California: Morgan and Claypool Publishers.
- Zhou, D. and He, Y. (2008). Extracting interactions between proteins from the literature. *Journal of Biomedical Informatics*, 41(2), 393-407.

ประสิทธิภาพของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาในสูตรอาหารสำเร็จรูป
ต่อการเลี้ยงปลาดุกลูกผสม (*Clarias macrocephalus* x *C. gariepinus*)
ในกระชัง

The Efficiency of Catfish Processing Waste in the Formulated
Diets on Cage Culture of Hybrid Catfish
(*Clarias macrocephalus* x *C. gariepinus*)

แจ่มจันทร์ เพชรศิริ^{1*} ทวีเดช ไชยนาพงษ์¹ และธัญญา พันธุ์ฤทธิ์¹

Jamjun Pechsiri^{1*} Thaweet Chainapong¹ and Thanya Panritdam¹

บทคัดย่อ

การใช้เศษเหลือทิ้งจากการแปรรูปปลาเป็นวัตถุดิบทางเลือกในอาหารปลามีความสำคัญเนื่องจากก่อให้เกิดประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมและลดต้นทุนในการเลี้ยงปลา งานวิจัยนี้จึงศึกษาประสิทธิภาพของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาดุกลูกผสมที่ใช้เป็นแหล่งโปรตีนและไขมันในสูตรอาหารสำเร็จรูปต่อการเจริญเติบโตและทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการเลี้ยงปลาดุกลูกผสม (*Clarias macrocephalus* x *C. gariepinus*) ในกระชัง โดยทดลองเลี้ยงปลาดุกลูกผสมขนาด 4.4-4.5 เซนติเมตร ในกระชังขนาด 2 x 3 x 1 เมตร จำนวน 500 ตัวต่อกระชัง ด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้า (T1) เปรียบเทียบกับการเลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาดุกลูกผสม 25.0 เปอร์เซ็นต์ (T2) เป็นระยะเวลา 3 เดือน เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ผลการศึกษาพบว่า T2 มีน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้ายเท่ากับ 214.3±27.5 กรัม เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มขึ้นเท่ากับ 4,598.9±663.4 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 2.3±0.3 กรัมต่อวัน ซึ่งดีกว่า T1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ที่มีน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้ายเพียง 156.7±20.6 กรัม เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มขึ้นเท่ากับ 3,468.9±547.9 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 1.7±0.2 กรัมต่อวัน นอกจากนี้ยังพบว่า T2 มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (1.1±0.1) ดีกว่า มีอัตราอด (71.7±3.1 เปอร์เซ็นต์) สูงกว่า มีต้นทุนค่าอาหาร (12.18 บาทต่อปลา 1 กิโลกรัม) ถูกกว่า และมีผลตอบแทน

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

* Corresponding author e-mail: jamjun2508@yahoo.com

Received: 25 December 2020, Revised: 17 February 2021, Accepted: 25 February 2021

การลงทุน (171.7 ± 12.5 เปอร์เซ็นต์) สูงกว่า T1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อสูงถึง 1.4 ± 0.1 มีอัตราการรอดเพียง 56.4 ± 8.2 เปอร์เซ็นต์ มีต้นทุนค่าอาหาร 34.77 บาทต่อปลา 1 กิโลกรัม และมีผลตอบแทนการลงทุนเพียง 13.1 ± 12.5 เปอร์เซ็นต์ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเศษเหลือจากการแปรรูปปลาอุกกลุ่มผสมสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งโปรตีนและไขมันในส่วนประกอบของอาหารเม็ดสำเร็จรูป เพื่อเพิ่มการเจริญเติบโต เพิ่มอัตราการรอด ลดอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ลดต้นทุนค่าอาหารและเพิ่มผลตอบแทนการลงทุนในการเลี้ยงปลาอุกกลุ่มผสมในกระชังได้

คำสำคัญ: เศษเหลือจากการแปรรูปปลาอุกกลุ่มผสม อาหารสำเร็จรูป การเลี้ยงในกระชัง ปลาอุกกลุ่มผสม

Abstract

The use of fish processing wastes as alternative feedstuffs in fish diets is gaining importance because of increasing environmental benefits and reducing fish production costs. The present study was carried out to investigate the efficiency of hybrid catfish processing waste as protein and fat sources in the formulated diets on growth performance and economics of hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* x *C. gariepinus*) cultured in a cage. The hybrid catfish with an average initial size of 4.4-4.5 cm. were stocked in 2 x 3 x 1 m cages at 500 fish per cage. They were fed by commercial diet (T1) comparing to a formulated diet containing 25.0% of catfish processing waste (T2) for 3 months. At the end of the experimental period, results showed that T2 fish exhibited a significantly higher ($p < 0.05$) growth rate than those of the T1 fish. The mean final weights (FW), % weight gain (%WG), and average daily gain (ADG) of T2 fish were 214.3 ± 27.5 g, $4,598.9 \pm 663.4\%$, 2.3 ± 0.3 g/day, respectively. On the other hand, FW, %WG, and ADG of T1 fish were 156.7 ± 20.6 g, $3,468.9 \pm 547.9\%$, and 1.7 ± 0.2 g/day, respectively. T2 fish also showed significantly better feed conversion ratio (1.1 ± 0.1), higher survival rate ($71.7 \pm 3.1\%$), lower feed cost (12.18 baht/1 kg of fish), and higher return on investment ($171.7 \pm 12.5\%$) than T1 fish. Feed conversion ratio, survival rate, feed cost, and return on investment return of T1 fish were 1.4 ± 0.1 , only $56.4 \pm 8.2\%$, 34.77 baht/1 kg of fish, and $13.1 \pm 12.5\%$, respectively. This study demonstrated that hybrid catfish processing waste can be used as protein and fat sources in the formulated diets to improve growth performance and survival rate, to reduce feed conversion ratio and feed cost, and to increase the return on investment of hybrid catfish cultured in a cage.

Keywords: Hybrid catfish processing waste, Formulated diets, Cage culture, Hybrid catfish

บทนำ

ปลาอุกกลมผสม (hybrid catfish) (*Clarias macrocephalus* × *C. gariepinus*) หรือปลาอุกปักก้อยเป็นปลาน้ำจืดที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจเป็นอันดับสองของประเทศไทยรองจากปลานิล ทั้งเชิงผลผลิตและมูลค่า ปี พ.ศ. 2562 มีผลผลิตประมาณ 100,000 ตัน คิดเป็นมูลค่าประมาณ 5,000 ล้านบาท (กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติการประมง, 2562) เป็นปลาที่เจริญเติบโตเร็ว เนื้อปลามีรสชาติดี มีลักษณะใกล้เคียงกับเนื้อของปลาอุกก้อย สามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้หลากหลาย เช่น ปลาอุกตากแห้ง และปลาอุกร้า ซึ่งเป็นอาหารพื้นบ้านของภาคใต้ที่กำลังได้รับความนิยมและมีการขยายตัวอย่างมาก ปี พ.ศ. 2560 เฉพาะจังหวัดพัทลุงสามารถแปรรูปและจำหน่ายปลาอุกร้าได้มากถึง 720 ตันต่อปี (อัสวิน, 2560) ซึ่งการแปรรูปปลาอุกร้า 400 กิโลกรัม ต้องใช้ปลาอุกสด 1,000 กิโลกรัม จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการขยายตัวของปลาอุกร้าส่งผลให้ความต้องการวัตถุดิบปลาอุกสดมากขึ้น 2.5 เท่า แต่ปัญหาสำคัญในการเลี้ยงปลาอุกกลมผสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเลี้ยงในกระชังในแหล่งน้ำสาธารณะ คือไม่สามารถใช้อาหารเสริมพวกอาหารสดได้เหมือนกับการเลี้ยงในบ่อดิน ต้องเลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปเพียงชนิดเดียวเท่านั้น ซึ่งส่วนใหญ่ใช้อาหารเม็ดสำเร็จรูปชนิดลอยที่มีโปรตีน 30-35 เปอร์เซ็นต์ (วีรภัทร และคณะ, 2558) ซึ่งราคาขึ้นอยู่กับปริมาณโปรตีนในอาหาร ทำให้ต้นทุนในการผลิตประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ ของต้นทุนรวมเป็นค่าอาหาร (รุ่งกานต์ และคณะ, 2557) ดังนั้นหากเกษตรกรสามารถที่จะผลิตอาหารสำเร็จรูปสำหรับเลี้ยงปลาขึ้นใช้เองได้ จะสามารถลดต้นทุนในการเลี้ยงปลาได้อย่างมาก แต่สิ่งสำคัญในการผลิตอาหารปลาคือวัตถุดิบที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบในสูตรอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัตถุดิบที่เป็นแหล่งโปรตีนและไขมัน ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตและต้นทุนค่าอาหาร (Hien *et al.*, 2018) ในอุตสาหกรรมผลิตอาหารสัตว์น้ำส่วนใหญ่จะใช้ปลาป่นเป็นแหล่งโปรตีนและน้ำมันปลาเป็นแหล่งไขมันในสูตรอาหาร แต่ปัจจุบันปริมาณปลาป่นและน้ำมันปลามีปริมาณลดลงทำให้มีราคาสูงขึ้น (Hodar *et al.*, 2020) ทั่วโลกจึงตระหนักในการอนุรักษ์และการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด การนำเศษเหลือทิ้งจากการแปรรูปสัตว์น้ำมาใช้เป็นแหล่งโปรตีนทดแทนการใช้ปลาป่นในสูตรอาหารสัตว์น้ำจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดต้นทุนการผลิตและใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด เช่น นำเศษเหลือทิ้งจากการแปรรูปปลา knife fish (*Chitala ornate*) ทดแทนปลาป่นในสูตรอาหารสำหรับเลี้ยงปลานิล (*Oreochromis niloticus*) ระยะวัยรุ่น (Abarra *et al.*, 2017) ดังนั้นหากเกษตรกรสามารถใช้แหล่งวัตถุดิบอาหารที่มีคุณภาพและราคาถูก เช่น เศษเหลือจากการแปรรูปผลิตภัณฑ์ในท้องถิ่น ก็จะทำให้ได้อาหารปลาที่มีคุณภาพและมีราคาถูก

จากการศึกษากระบวนการแปรรูปปลาอุก เช่น ปลาอุกตากแห้งและปลาอุกร้า จะใช้เฉพาะส่วนของลำตัวเท่านั้น ทำให้มีเศษเหลือทิ้งเป็นส่วนหัว 19.78 เปอร์เซ็นต์ และเครื่องใน 4.84 เปอร์เซ็นต์

(สายใจ, 2556) เมื่อนำเศษเหลือดังกล่าวมาต้มและบีบอัดเอาส่วนที่เป็นของแข็งไปอบและบดละเอียด และวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการพบว่าประกอบด้วยโปรตีนประมาณ 36 เปอร์เซ็นต์ ไขมันประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ เถ้าประมาณ 38 เปอร์เซ็นต์ และแคลเซียม 13-15 เปอร์เซ็นต์ (Likitrattanaporn, 2016) นอกจากนี้ Effiong and Fakunle (2013) รายงานว่าเครื่องในปลาตุกแอฟริกัน (*C. gariepinus*) ประกอบไปด้วยกรดลิโนเลอิก (linoleic acid) สูงถึง 13.52 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนที่มีความจำเป็นสำหรับปลาเนื่องจากปลาไม่สามารถสังเคราะห์ได้เองต้องได้รับจากอาหารเท่านั้น จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเศษเหลือจากการแปรรูปปลาตุกมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เกษตรกรสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบที่เป็นแหล่งโปรตีนและไขมันในการผลิตอาหารปลาสำเร็จรูปใช้เองได้ แต่อย่างไรก็ตามเศษเหลือดังกล่าวมีเถ้าในปริมาณที่สูง ซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และการเจริญเติบโตของปลาได้ ดังนั้นหากต้องการนำเศษเหลือจากการแปรรูปปลาตุกมาใช้เป็นส่วนผสมในสูตรอาหารปลา ต้องมีกระบวนการที่ทำให้ปริมาณเถ้าลดลง และต้องคำนวณปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในสูตรอาหารให้มีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลา

งานวิจัยนี้จึงนำเศษเหลือจากการแปรรูปปลาตุกกลุ่มผสมมาผ่านกระบวนการเพื่อลดปริมาณเถ้าและนำไปเป็นวัตถุดิบในส่วนผสมของอาหารเม็ดสำเร็จรูป ที่มีคุณค่าทางโภชนาการที่เหมาะสม ต่อความต้องการของปลากลุ่มผสม เปรียบเทียบการเจริญเติบโต อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ อัตรารอด ต้นทุนค่าอาหาร กับการเลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้า เพื่อลดต้นทุนค่าอาหารและเพิ่มปริมาณผลผลิต ให้แก่เกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์น้ำ ตลอดจนเป็นแนวทางในการจัดการเศษเหลือทิ้งจากการแปรรูปปลาตุก ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สร้างความยั่งยืนให้แก่การเลี้ยงสัตว์น้ำต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (randomize completely block design, RCBD) โดยให้พื้นที่แหล่งน้ำที่ทางกะซังเป็นบล็อก คือ บล็อกที่ 1 พื้นที่ในทะเลน้อย ความลึกของน้ำประมาณ 1.5 เมตร บล็อกที่ 2 พื้นที่ในคลองสาขาของทะเลน้อย ความลึกของน้ำประมาณ 1.5 เมตร บล็อกที่ 3 บ่อดินขนาด 2.5 ไร่ ความลึกของน้ำประมาณ 1.2 เมตร ซึ่งแต่ละพื้นที่เลี้ยงปลากลุ่มผสมด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปต่างกัน ประกอบด้วย 2 ชุดการทดลองคือ ชุดการทดลองที่ 1 (T1) เลี้ยงปลาด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้า และชุดการทดลองที่ 2 (T2) เลี้ยงปลาด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาตุกกลุ่มผสม

2. การเตรียมปลาทดลอง

ซื้อลูกพันธุ์ปลากลุ่มผสมขนาดประมาณ 2 นิ้ว จำนวน 3,600 ตัว จากฟาร์มเอกชนในตำบลลำปำ อำเภอเมือง จังหวัดพัทลุง นำมาปรับสภาพโดยเลี้ยงในกระชังขนาด 2 x 3 x 1 เมตร ที่ทาง

ในแหล่งน้ำในพื้นที่ศึกษา กระชังละ 1,200 ตัว เลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปปลาเล็กเป็นเวลา 2 สัปดาห์ คัดขนาด นับจำนวนและชั่งน้ำหนัก แล้วนำมาปล่อยในกระชังขนาด $2 \times 3 \times 1$ เมตร ที่กางในพื้นที่แหล่งน้ำที่กำหนด พื้นที่ละ 2 กระชัง ๆ ละ 500 ตัว

3. การเตรียมอาหารทดลอง

อาหารที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิดคืออาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้าชนิดลอย (บริษัท เจริญโภคภัณฑ์อาหาร จำกัด มหาชน, ประเทศไทย) ประกอบด้วยโปรตีน 25.9 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 4.4 เปอร์เซ็นต์ กาก 5.4 เปอร์เซ็นต์ ความชื้น 10.0 เปอร์เซ็นต์ และอาหารเม็ดสำเร็จรูปชนิดจมที่ผลิตเองโดยใช้วัตถุดิบจากเศษเหลือทิ้งจากการแปรรูปปลาดุกผสมเป็นแหล่งโปรตีนและไขมัน ซึ่งมีวิธีการเตรียมดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมวัตถุดิบอาหารทดลองจากเศษเหลือทิ้งจากการแปรรูปปลาดุกผสม ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนเครื่องในนำมาสกัดน้ำมันโดยวิธีการใช้ความร้อน เคี้ยวจนกระทั่งกลายเป็นน้ำมัน และส่วนของหัวปลานำมาต้มเพื่อหยุดการทำงานของเอนไซม์และจุลินทรีย์ (Likitrattanaporn, 2016) รวมถึงป้องกันการปนเปื้อนจากเชื้อโรค (Sotolu, 2009) แล้วแยกเอาส่วนกะโหลกและกระดูกแข็งออกบางส่วน นำไปอบให้แห้ง บดให้ละเอียด นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตามวิธีของ AOAC (2000) และนำไปเป็นส่วนผสมในสูตรอาหารร่วมกับน้ำต้มปลา และวัตถุดิบชนิดอื่นดังตารางที่ 1

3.2 การทำอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของเศษเหลือทิ้งจากการแปรรูปปลาดุกผสม โดยชั่งส่วนประกอบของสูตรอาหารดังตารางที่ 1 ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม หลังจากนั้นนำเข้าเครื่องอัดเม็ดผ่านหน้าแวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 มิลลิเมตร นำอาหารเม็ดที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วิเคราะห์ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้าของอาหารทดลองตามวิธีของ AOAC (2000) ได้ผลดังตารางที่ 1 เก็บใส่ถุงสำหรับนำไปใช้เป็นอาหารปลาทดลอง

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของสูตรอาหารและองค์ประกอบทางเคมีของอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาดุกผสม

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
หัวปลาดุกผสม ต้ม อบและบดละเอียด	25.0
กากถั่วเหลือง	34.0
รำละเอียด	25.5
แป้งมันสำปะหลัง	10.0
วิตามินรวม*	0.5
น้ำมันปลา	5.0
รวม	100.0

ตารางที่ 1 (ต่อ)

องค์ประกอบจากการวิเคราะห์ (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง)	
น้ำต้มปลา	35
ความชื้น	11.3±0.1
โปรตีน	30.0±0.8
ไขมัน	12.1±0.1
เถ้า	9.1±0.1

หมายเหตุ : - กากถั่วเหลืองกิโลกรัมละ 14.8 บาท รำละเอียด กิโลกรัมละ 11 บาท แป้งมันสำปะหลัง กิโลกรัมละ 24 บาท วิตามินรวมกิโลกรัมละ 200 บาท

- * วิตามินรวม ประกอบด้วยวิตามินผสมและแร่ธาตุรวมในปริมาณต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ดังต่อไปนี้ วิตามินเอ 500,000 หน่วยสากล วิตามินดี3 100,000 หน่วยสากล วิตามินอี 5,000 มิลลิกรัม วิตามินเค 1,000 มิลลิกรัม วิตามินบี1 3,000 มิลลิกรัม วิตามินบี2 800 มิลลิกรัม วิตามินบี6 1,000 มิลลิกรัม วิตามินบี12 10 มิลลิกรัม วิตามินซี 200,000 มิลลิกรัม แมงกานีส 600 มิลลิกรัม สังกะสี 7,850 มิลลิกรัม ทองแดง 2,500 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัส 4,800 มิลลิกรัม แคลเซียม 6,000 มิลลิกรัม ซิลิเนียม 10 มิลลิกรัม เหล็ก 310 มิลลิกรัม แมกนีเซียม 540 มิลลิกรัม โคบอลต์ 500 มิลลิกรัม สือเดมจนครบ 1,000 กรัม

4. การทดลองและการเก็บข้อมูล

4.1 อาหารและการให้อาหาร

ให้อาหารตามชุดการทดลองคืออาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้า (T1) และอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมพิเศษเหลือจากการแปรรูปปลาตุ๊กผสม (T2) วันละ 2 ครั้ง คือ เวลา 9.00 น. และ 16.00 น. ให้ปลากินจนอิ่ม จดบันทึกอาหารที่ให้ ทดลองเป็นระยะเวลา 3 เดือน

4.2 การเก็บข้อมูล

ตรวจวัดคุณภาพน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิ โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยใช้ pH มิเตอร์ ออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen: DO) และความเป็นด่าง (alkalinity) โดยใช้ไตเตรชัน (titration method) ตามวิธีของ APHA (1995) และความโปร่งแสง (transparency) โดยใช้เซคิดีสก์ (secchi disc) สุ่มตัวอย่างปลาจำนวน 50 ตัวต่อกระชัง ซึ่งน้ำหนักปลาทดลอง ทุก ๆ 1 เดือน เป็นระยะเวลา 3 เดือน และเมื่อสิ้นสุดการทดลองซึ่งน้ำหนักผลผลิตรวมต่อกระชัง นับจำนวนปลาที่เหลือรอด และปริมาณอาหารทั้งหมดที่ปลากิน เพื่อนำมาคำนวณหาน้ำหนักเฉลี่ยต่อตัว เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (percentage weight gain: PWG%) น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อวัน (average daily gain: ADG กรัมต่อวัน) อัตรารอด (survival rate: SV%) อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (feed

conversion ratio: FCR) และวิเคราะห์ต้นทุนค่าอาหารและผลตอบแทนการลงทุน โดยใช้สูตรในการคำนวณดังนี้

$$\text{น้ำหนักเฉลี่ยต่อตัว (กรัม)} = \frac{\text{น้ำหนักทั้งหมด}}{\text{จำนวนปลา}}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{\text{น้ำหนักปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง} - \text{น้ำหนักปลาเมื่อเริ่มต้นการทดลอง}}{\text{น้ำหนักปลาเมื่อเริ่มต้น}} \times 100$$

$$\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อวัน (กรัมต่อวัน)} = \frac{\text{น้ำหนักปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง} - \text{น้ำหนักปลาเมื่อเริ่มต้นการทดลอง}}{\text{ระยะเวลาการเลี้ยง (วัน)}}$$

$$\text{อัตราการรอด (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{\text{จำนวนปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง}}{\text{จำนวนปลาเมื่อเริ่มต้น}} \times 100$$

$$\text{อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ} = \frac{\text{น้ำหนักอาหารที่ปลากินทั้งหมด}}{\text{น้ำหนักปลาทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น}}$$

$$\text{ต้นทุนค่าอาหาร (บาทต่อกระชัง)} = \text{น้ำหนักอาหารที่ปลากินทั้งหมด (กก.)} \times \text{ราคาอาหาร (บาท)}$$

$$\text{รายได้ (บาทต่อกระชัง)} = \text{น้ำหนักปลาทั้งหมด (กก.)} \times \text{ราคาปลา (บาท)}$$

$$\text{กำไรสุทธิ (บาทต่อกระชัง)} = \text{รายได้} - \text{ต้นทุนทั้งหมด}$$

$$\text{ผลตอบแทนต่อการลงทุน} = \frac{\text{กำไรสุทธิ}}{\text{ต้นทุนทั้งหมด}} \times 100$$

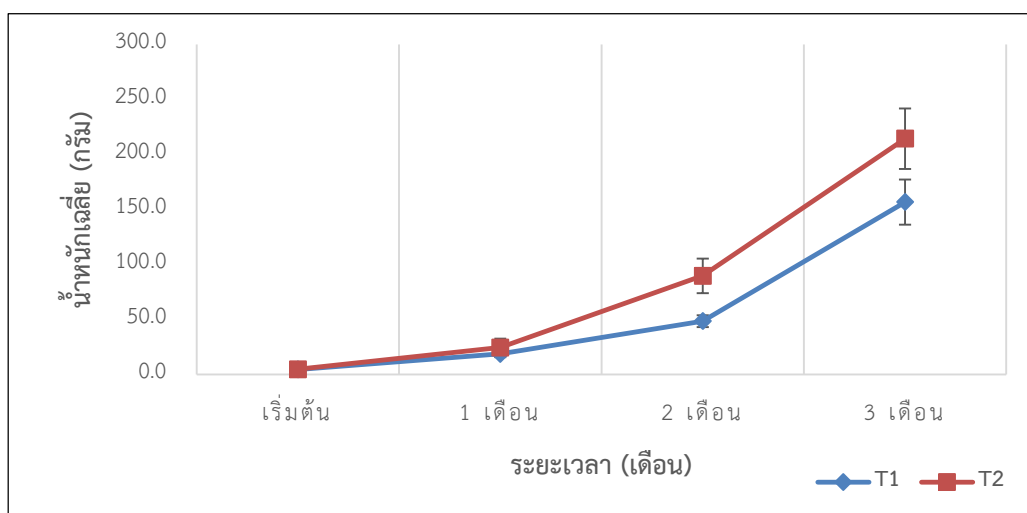
5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทดสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูลโดยใช้ shapiro-wilk normality test วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของอัตราการเจริญเติบโต อัตรารอด อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ต้นทุนและผลตอบแทนการลงทุน และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของชุดทดลองทั้ง 2 กลุ่มที่เป็นอิสระจากกัน ด้วยสถิติทดสอบแบบที (t-test for independent samples) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for windows

ผลการวิจัย

จากการวัดคุณภาพน้ำในพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 แหล่งพบว่าอุณหภูมิมีค่าระหว่าง 30.0-31.5 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-ด่างมีค่าระหว่าง 6.7-7.9 ออกซิเจนละลายมีค่าระหว่าง 5.2-5.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นด่างมีค่าระหว่าง 99.4-115.9 มิลลิกรัมต่อลิตร และความโปร่งแสงมีค่าระหว่าง 56.7-58.3 เซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นที่ศึกษาต่างกัน ไม่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตและอัตรารอดของปลาทดลอง แต่ชุดการทดลองต่างกัน มีอัตราการเจริญเติบโต อัตราการเปลี่ยนอาหาร

เป็นเนื้อ อัตรารอด และผลตอบแทนการลงทุน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) น้ำหนักเฉลี่ยของปลาทดลอง ชุดการทดลองที่ 1 และ 2 ที่ระยะเวลา 1 เดือน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) มีค่าเท่ากับ 18.6 ± 3.1 กรัม และ 24.4 ± 8.2 กรัม ตามลำดับ แต่ที่ระยะเวลา 2 และ 3 เดือน ชุดการทดลองที่ 2 มีน้ำหนักเฉลี่ย เท่ากับ 89.6 ± 15.8 และ 214.3 ± 27.5 กรัม ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าชุดการทดลองที่ 1 ที่มีน้ำหนักเฉลี่ยเพียง 48.4 ± 5.3 และ 156.7 ± 20.6 กรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 1) นอกจากนี้ชุดการทดลองที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อวัน อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อและอัตรารอด มากกว่าชุดการทดลองที่ 1 (ตารางที่ 2)



ภาพที่ 1 น้ำหนักเฉลี่ยของปลาดุกกลุ่มสมที่เลี้ยงในกระชังด้วยอาหารต่างกันที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ตารางที่ 2 น้ำหนักเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และอัตรารอดของปลาดุกกลุ่มสมที่เลี้ยงในกระชังด้วยอาหารต่างกัน

ดัชนี	อาหารทดลอง	
	อาหารสำเร็จรูปเชิงการค้า	อาหารสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาดุกกลุ่มสม
น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น (กรัม)	4.4 ± 0.1^a	4.5 ± 0.1^a
น้ำหนักเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (กรัม)	156.7 ± 20.6^b	214.3 ± 27.5^a
เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (เปอร์เซ็นต์)	$3,468.9 \pm 547.9^b$	$4,598.9 \pm 663.4^a$
น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อวัน (กรัมต่อวัน)	1.7 ± 0.2^b	2.3 ± 0.3^a
อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ	1.4 ± 0.1^a	1.1 ± 0.1^b
อัตรารอด (เปอร์เซ็นต์)	56.4 ± 8.2^b	71.7 ± 3.1^a

หมายเหตุ: - ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวนอนเดียวกันที่กำกับด้วยอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อพิจารณาต้นทุนค่าอาหาร พบว่าชุดการทดลองที่ 2 มีต้นทุนค่าวัตถุดิบอาหารเพียง 10.96 บาทต่อกิโลกรัม ต้นทุนค่าอาหารต่อการผลิตปลา 1 กิโลกรัมเท่ากับ 12.18 ± 0.3 บาท ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองที่ 1 ที่มีราคาอาหารกิโลกรัมละ 24.75 บาท และต้นทุนค่าอาหารต่อการผลิตปลา 1 กิโลกรัมเท่ากับ 34.77 ± 3.2 บาท ทำให้ชุดการทดลองที่ 2 มีต้นทุนทั้งหมดซึ่งคิดเฉพาะต้นทุนค่าอาหารและค่าลูกพันธุ์ต่ำกว่าชุดการทดลองที่ 1 ส่วนรายได้คิดจากราคาปลาที่ขายได้ 50 บาทต่อกิโลกรัม พบว่าชุดการทดลองที่ 2 มีรายได้ กำไร และผลตอบแทนการลงทุนสูงกว่าชุดการทดลองที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ต้นทุน กำไร และผลตอบแทนการลงทุนของการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมที่เลี้ยงในกระชังด้วยอาหารต่างกัน

ดัชนี	อาหารทดลอง	
	อาหารสำเร็จรูปเชิงการค้า	อาหารสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาดุกลูกผสม
ราคาอาหาร (บาทต่อกก.)	24.75	10.96
ค่าอาหารต่อน้ำหนักปลา (บาทต่อกก.)	34.77 ± 3.2^a	12.18 ± 0.3^b
ต้นทุนค่าอาหาร (บาทต่อกระชัง)	$1,443.8 \pm 189.0^a$ (74.3 เปอร์เซ็นต์)	907.5 ± 74.0^b (64.5 เปอร์เซ็นต์)
ต้นทุนทั้งหมด (บาทต่อกระชัง)	$1,943.8 \pm 189.0^a$	$1,407.5 \pm 74.0^b$
รายได้ (บาทต่อกระชัง)	$2,213.5 \pm 449.6^b$	$3,829.1 \pm 366.9^a$
กำไร (บาทต่อกระชัง)	269.7 ± 260.7^b	$2,421.6 \pm 295.4^a$
ผลตอบแทนการลงทุน (เปอร์เซ็นต์)	13.1 ± 12.5^b	171.7 ± 12.5^a

หมายเหตุ: - ค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวนอนเดียวกันที่กำกับด้วยอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

การอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการศึกษาพบว่าคุณภาพน้ำในพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 แหล่ง มีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาของธนกร และคณะ (2561) ที่รายงานว่าคุณภาพน้ำของการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในกระชัง มีอุณหภูมิระหว่าง 27.9-29.1 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด-ด่างมีค่าระหว่าง 6.8-7.5 ออกซิเจนละลายมีค่าระหว่าง 5.6-6.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นด่างมีค่าระหว่าง 165.0-167.8 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับ

การเจริญเติบโตพบว่าปลาดุกลูกผสมที่เลี้ยงด้วยอาหารสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาดุกลูกผสม มีน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อวันใกล้เคียงกับปลาดุกลูกผสมที่เลี้ยงในกระชังที่ทางในบ่อดินด้วยอาหารผสมสดที่มีส่วนผสมของไส้ไก่ 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ที่มีระดับโปรตีน 29.94 เปอร์เซ็นต์ และไขมันประมาณ 12.59 เปอร์เซ็นต์ ที่มีอัตราการเจริญเติบโต 2.27 ± 0.12 - 2.38 ± 0.15 กรัมต่อวัน (วีรภัทร และคณะ, 2558) ซึ่งดีกว่าปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้า ทั้งนี้เนื่องมาจากอาหารสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาดุกลูกผสมมีคุณค่าทางโภชนาการที่เหมาะสมต่อความต้องการของปลาดุกลูกผสมที่ต้องการโปรตีน 35.0 ± 5.0 เปอร์เซ็นต์ (ธนาภรณ์, 2557) ไขมัน 4.0-10.0 เปอร์เซ็นต์ (พิเชต, 2557) ส่วนอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้าประกอบด้วยโปรตีนเพียง 25.9 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 4.4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าความต้องการของปลาดุกลูกผสม จึงทำให้การเจริญเติบโตของปลาลดลงหรือหยุดชะงักเนื่องจากโปรตีนเป็นสารอาหารที่มีบทบาทต่อการเจริญเติบโต เช่นเดียวกับปลาดุกอูย ที่พบว่าการเจริญเติบโตของปลาเพิ่มขึ้นเมื่อเลี้ยงด้วยอาหารที่มีระดับโปรตีนที่สูงขึ้น (Hien *et al.*, 2018) อีกทั้งไขมันก็เป็นสารอาหารที่เป็นแหล่งพลังงานและกรดไขมันที่จำเป็นซึ่งมีบทบาทต่ออัตราการเจริญเติบโตเช่นกัน สอดคล้องกับผลการศึกษาในปลาสวาย (*Pangasianodon hypophthalmus*) ที่พบว่าปลาที่ได้รับอาหารที่มีไขมัน 3.0 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่มีไขมัน 12.0 เปอร์เซ็นต์ (Sivaramakrishnan *et al.*, 2017) ประกอบกับมีรายงานว่าเครื่องในปลาดุกแอฟริกันประกอบไปด้วย กรดไขมันเลวสูงถึง 13.52 เปอร์เซ็นต์ (Effiong and Fakunle, 2013) ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าไขมันที่สกัดจากเครื่องใน (viscera oil) ปลาดุกลูกผสมที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมในอาหารสำเร็จรูปที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบไปด้วยกรดไขมันเลวในปริมาณมากจึงมีผลทำให้ปลาที่ได้รับอาหารที่มีส่วนผสมของน้ำมันปลาดุกลูกผสมมีอัตราการเจริญเติบโตดี เนื่องจากไขมันเลวเป็นกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนที่มีความจำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์ของสัตว์มีกระดูกสันหลังทุกชนิดรวมไปถึงปลาด้วย (Al-Souti, *et al.*, 2012) สอดคล้องกับการเจริญเติบโตของปลานิลที่เลี้ยงด้วยอาหารที่ใช้แหล่งไขมันจากน้ำมันปลาน้ำจืด พบว่ามีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่าอาหารที่ใช้แหล่งไขมันจากน้ำมันถั่วเหลือง (ธีระวัฒน์ และคณะ, 2561)

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อพบว่าปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาดุกลูกผสมมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อดีกว่าปลาดุกลูกผสมที่เลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้า จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อสอดคล้องกับอัตราการเจริญเติบโต คือปลาที่มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นสูงมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อต่ำ แสดงว่าปลาสามารถนำอาหารที่ให้ไปใช้ในการสร้างกล้ามเนื้อได้ดีจึงทำให้การเจริญเติบโตได้ดีด้วยเช่นกัน นอกจากนี้อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อนอกจากขึ้นอยู่กับปริมาณโปรตีนในอาหารแล้วยังขึ้นอยู่กับแหล่งโปรตีนในอาหารอีกด้วย (Mohanta *et al.*, 2013) จากผลการศึกษา

แสดงว่าเศษเหลือจากการแปรรูปปลาดุกกลุ่มสมเป็นแหล่งโปรตีนที่มีคุณภาพ สอดคล้องกับผลการศึกษาของวีรภัทร และคณะ (2558) ที่รายงานว่าปลาดุกกลุ่มสมที่เลี้ยงในกระชังที่กางในบ่อดินด้วยอาหารผสมสดที่มีส่วนผสมของไส้ไก่ 35 เปอร์เซ็นต์ ที่มีระดับโปรตีน 29.94 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ 1.18 ± 0.07 ส่วนปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้ามีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อที่สูงกว่าคือ 1.31 ± 0.17 และสอดคล้องกับผลการศึกษาของสรารุ และสุธี (2561) ที่รายงานว่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาดุกกลุ่มสมที่เลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปร่วมกับการเสริมอาหารช่วงกลางคืนด้วยแมลงมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อเท่ากับ 1.09 ± 0.06 ซึ่งต่ำกว่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อของปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้าที่มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อสูงถึง 1.60 ± 0.03

อัตราการพบว่าปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาดุกกลุ่มสมมีอัตราการอดใกล้เคียงกับอัตราการอดของปลาดุกกลุ่มสมที่เลี้ยงในกระชังที่กางในบ่อดินด้วยอาหารผสมสดที่มีส่วนผสมของไส้ไก่ 25 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ที่มีอัตราการอดระหว่าง 72.22-73.33 เปอร์เซ็นต์ (วีรภัทร และคณะ, 2558) ซึ่งสูงกว่าปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้ามีอัตราการอดเพียง 56.4 ± 8.2 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุอาจเนื่องมาจากปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้ามีปริมาณโปรตีนและไขมันน้อยกว่าความต้องการ เนื่องจากปริมาณโปรตีนและไขมันในอาหารนอกจากมีผลต่อการเจริญเติบโตแล้วยังมีผลต่ออัตราการอดด้วย ปลาที่ได้รับอาหารที่มีปริมาณโปรตีนไม่เพียงพอทำให้ปลาต้องใช้โปรตีนในร่างกายเพื่อรักษาการทำงานที่เพื่อความอยู่รอด (Hien *et al.*, 2018) จึงทำให้มีอัตราการอดน้อยกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่มีโปรตีนเพียงพอต่อความต้องการ สอดคล้องกับผลการศึกษาในปลาดุกอุย ที่พบว่าระดับโปรตีนในอาหารมีผลต่ออัตราการอด คือปลาที่ได้รับอาหารโปรตีน 30-35 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการอดมากกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่มีโปรตีน 25 เปอร์เซ็นต์ (Hien *et al.*, 2018) นอกจากนี้ปลาที่ได้รับอาหารที่มีปริมาณไขมันน้อยทำให้ปลาได้รับกรดไขมันที่จำเป็นในปริมาณที่น้อยตามไปด้วย ซึ่งมีผลต่ออัตราการอดเนื่องจากกรดไขมันที่จำเป็นในไขมันมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการต่าง ๆ ในร่างกาย ได้แก่ กระบวนการทำงานของภูมิคุ้มกันทั้งแบบจำเพาะเจาะจงและไม่จำเพาะเจาะจง อีกทั้งยังสามารถป้องกันโรคของสัตว์น้ำที่มาจากปรสิตภายนอกได้ (Zuo *et al.*, 2012) อาจเป็นไปได้ว่าอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาดุกกลุ่มสมมีส่วนผสมของน้ำมันปลาที่สกัดจากเครื่องในอุดมไปด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (Effiong and Fakunle, 2013) จึงทำให้ปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาดุกกลุ่มสมมีอัตราการอดสูงกว่าปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้าที่นิยมใช้แหล่งไขมันจากน้ำมันพืชแทนน้ำมันปลา สอดคล้องกับผลการทดลองในปลา silver catfish (*Rhamdia quelen*) ที่ทดสอบให้ปลาได้รับเชื้อแบคทีเรีย *Aeromonas hydrophila* พบว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ใช้แหล่งไขมันจากน้ำมันตับปลา (cod liver oil) มีอัตราการอดสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่มีแหล่งไขมันจาก

น้ำมันพืช พวบน้ำมันดอกทานตะวัน (sunflower oil) น้ำมันลินสีด (linseed oil) น้ำมันคาโนลา (canola oil) และน้ำมันมะพร้าว (coconut oil) (Vargas *et al.*, 2013)

ต้นทุนและผลตอบแทนที่ได้จากการเลี้ยงปลาตู้ลูกผสมด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาตู้ลูกผสม เมื่อคำนวณจากสัดส่วนปริมาณอาหารที่กินต่อน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น พบว่ามีต้นทุนค่าอาหารต่อการผลิตปลา 1 กิโลกรัมเพียง 12.18 บาท ซึ่งต่ำกว่าการเลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้าที่มีต้นทุนค่าอาหารต่อการผลิตปลา 1 กิโลกรัมสูงถึง 34.77 บาท จะเห็นได้ว่าการเลี้ยงปลาด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาตู้ลูกผสมทำให้ต้นทุนค่าอาหารต่อการผลิตปลา 1 กิโลกรัมลดลง 22.59 บาท หรือลดลง 64.97 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ได้ผลตอบแทนการลงทุนสูงถึง 171.7 ± 12.5 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การเลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้ามีผลตอบแทนการลงทุนเพียง 13.1 ± 12.5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาตู้ลูกผสมช่วยลดต้นทุนค่าวัตถุดิบที่เป็นแหล่งโปรตีนและแหล่งไขมันซึ่งอาหารสัตว์น้ำที่ใช้แหล่งโปรตีนจากปลาป่นและแหล่งไขมันจากน้ำมันตับปลาจะมีราคาแพง คล้ายคลึงกับการนำเศษเหลือจากการแปรรูปทางการเกษตรมาใช้เลี้ยงไส้เดือนดินและนำมาเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนการใช้ปลาป่นในสูตรอาหาร ทำให้ได้อาหารสัตว์น้ำราคาถูกที่มีคุณภาพ สัตว์น้ำเจริญเติบโตเร็วขึ้นและมีกำไรเพิ่มมากขึ้น (Musyoka *et al.*, 2020)

สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าอาหารปลาสำเร็จรูปชนิดเม็ดแบบจมน้ำที่ใช้เศษเหลือจากการแปรรูปปลาตู้ลูกผสมเป็นแหล่งโปรตีนและแหล่งไขมัน ประกอบด้วยโปรตีน 30.0 ± 0.8 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 12.1 ± 0.1 เปอร์เซ็นต์ เกล็ด 9.1 ± 0.1 เปอร์เซ็นต์ และความชื้น 11.3 ± 0.1 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพดีกว่าอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้าที่ประกอบด้วยโปรตีน 25.9 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 4.4 เปอร์เซ็นต์ กาก 5.4 เปอร์เซ็นต์ และความชื้น 10 เปอร์เซ็นต์ ทั้งในด้านการเจริญเติบโต อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ อัตรารอด ต้นทุนค่าอาหาร และผลตอบแทนการลงทุน ทำให้ต้นทุนค่าอาหารต่อการผลิตปลา 1 กิโลกรัมลดลง 64.97 เปอร์เซ็นต์ มีผลตอบแทนการลงทุนสูงกว่าการเลี้ยงด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้า 158.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถนำไปเป็นแนวทางในการใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์น้ำเศรษฐกิจชนิดอื่นได้

ข้อเสนอแนะ

หากเกษตรกรเลี้ยงปลาตู้ลูกผสมด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปเชิงการค้าที่มีระดับโปรตีนต่ำกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ ไขมันต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ควรเสริมด้วยอาหารสด เช่น ไส้ไก่ หรือเศษปลาสด เพื่อเพิ่มสารอาหารให้เพียงพอต่อความต้องการของปลาตู้ลูกผสม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยทักษิณ ที่สนับสนุนทุนวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณเกษตรกรที่ร่วมดำเนินการทดลองเลี้ยงปลาตุ๊กผสมในกระชัง ตลอดจนผู้ประกอบการแปรรูปปลาดุกร้าชุมชนทะเลน้อยที่สนับสนุนเศษเหลือทิ้งจากการแปรรูป เพื่อนำมาใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติการประมง. (2562). *สถิติการประมงแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2560*. กรุงเทพฯ: กองนโยบายและยุทธศาสตร์พัฒนาการประมง.
- ธนากร เหมาะสถล ดวงใจ พิสุทธิธำราชัย และวรพงษ์ นลินานนท์. (2561). ผลของนมหมักกรดในสูตรอาหารเลี้ยงปลาดุกปักก้อยในกระชัง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 20(1), 28-35.
- ธนาภรณ์ จิตตपालพงศ์. (2557). *การสร้างสูตรอาหารสัตว์น้ำและสูตรอาหารสัตว์น้ำเศรษฐกิจ*. กรุงเทพฯ: ราชการบริหารส่วนกลาง.
- ธีระวัฒน์ รัตนพจน์ เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน สุตาพร ตงศิริ และดวงพร อมรเลิศพิศาล. (2561). องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปลาน้ำจืดและผลของประสิทธิภาพต่อการเจริญเติบโตในปลานิล. *วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร*, 35(2)(พิเศษ), 11-20.
- พิเชต พลายเพชร. (2557). งานวิจัยด้านอาหารสำหรับการเลี้ยงปลาดุกอ้อยเทศ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 3(2), 52-70.
- รุ่งกานต์ กล้าหาญ บัณฑิต ยวงสร้อย และจิตตรา วีระกุล. (2557). การเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และคุณภาพเนื้อของปลาดุกผสมที่ได้รับอาหารผสมฟักทอง. *แก่นเกษตร*, 42(1)(พิเศษ), 785-791.
- วีรภัทร ผ่องศรี นิวุฒิ หวังชัย ดวงพร อมรเลิศพิศาล และสุตาพร ตงศิริ. (2558). ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของปลาดุกผสม (Clarias macrocephalus x Clarias gariepinus) ที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมไส้ไก่. *วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง*, 9(2), 12-22.
- สรารุช เย็นเอง และสุชี เกื้อเกตุ. (2561). การศึกษาอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการแลกเนื้อของปลาดุกผสมที่เลี้ยงโดยให้อาหารสำเร็จรูปร่วมกับการเสริมอาหารช่วงกลางคืนด้วยแมลงบินจากกับดักเครื่องดูดแมลงอัตโนมัติ. *วารสารวิชาการสถาบันการอาชีวศึกษาเกษตร*, 2(2), 19-29.
- สายใจ วิบูลย์พันธ์. (2556). *การพัฒนากระบวนการผลิตปลาดุกร้าเชิงพาณิชย์*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยทักษิณ, พัทลุง.

- อัสนี ภัทรวรรณ. (1 พฤศจิกายน 2560). “ปลาตุกร้า” พื้ทุงแต่งตัวขึ้น GI สะพัดกว่า 230 ล้านบาท. *เทคโนโลยีชาวบ้าน*, 30, หน้า 102.
- Abarra, S. T., Velasquez, S. F., Velasquez, K. D. D. C., Felipe, J. L. F., Tayamen, M. M. and Ragaza, J. A. (2017). Replacement of fishmeal with processed meal from knife fish *Chitala ornata* in diets of juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture Reports*, 5, 76-83.
- Al-Souti, A., Al-Sabahi, J., Soussi, B. and Goddard, S. (2012). The effects of fishoil-enriched diets on growth, feed conversion and fatty acid content of red hybrid tilapia, *Oreochromis* sp. *Food Chemistry*, 133(3), 723-727.
- AOAC. (2000). *Official methods of analysis*. (17th ed). Gaithersburg: The Association of Official Analytical Chemists.
- APHA. (1995). *Standard methods for the examination of water and waste water*. (10th ed). Washington: American Public Health Association.
- Effiong, B. N. and Fakunle, J. O. (2013). Fatty acid composition of catfish (*Clarias gariepinus*) viscera oil. *Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 8(1), 299-301.
- Hien, T. T. T., Tuan, L., Tu, T. L. C. and Tam, B. M. (2018). Dietary protein requirement of bighead catfish (*Clarias macrocephalus* Gunther, 1864) fingerling. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 8(11), 200-205.
- Hodar, A. R., Vasava, R. J., Mahavadiya, D. R. and Joshi, N. H. (2020). Fish meal and fish oil replacement for aqua feed formulation by using alternative sources: a review. *Journal of Experimental Zoology, India*, 23(1), 13-21.
- Likitrattanaporn, C. (2016). Development of fishmeal production from catfish processing waste. *International Journal of GEOMATE*, 11(6), 2874-2878.
- Mohanta, K. N., Subramanian, S. and Korikanthimath, V. S. (2013). Evaluation of different animal protein sources in formulating the diets for blue gourami, *Trichogaster trichopterus* fingerlings. *Journal of Aquaculture Research and Development*, 4(2), 1-7.
- Musyoka, S. N., Liti, D., Ogello, E. O., Meulenbroek, P. and Waidbacher, H. (2020). Earthworm, *Eisenia fetida*, bedding meal as potential cheap fishmeal replacement ingredient for semi-intensive farming of Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture Research*, 51(6), 2359-2368.

- Sivaramakrishnan, T., Sahu, N.P., Jain, K.K., Muralidhar, A.P., Saravanan, K., Ferosekhan, S., Praveenraj, J. and Artheeswaran, N. (2017). Optimum dietary lipid requirement of *Pangasianodon hypophthalmus* juveniles in relation to growth, fatty acid profile, body indices and digestive enzyme activity. *Aquaculture International*, 25(2), 941-954.
- Sotolu, A.O. (2009). Comparative utilizations of fish waste meal with imported fishmeal by African catfish (*Clarias gariepinus*). *American-Eurasian Journal of Scientific Research*, 4(4), 285-289.
- Vargas, R.J., Dotta, G., Mouriño, J.L., da Silva, B.C. and Fracalossi, D.M. (2013). Dietary lipid sources affect freshwater catfish jundiá, *Rhamdia quelen*, survival, when challenged with *Aeromonas hydrophila*. *Acta Scientiarum Animal Sciences*, 35(4), 349-355.
- Zuo, R., Ai, Q., Mai, K., Xu, W., Wang, J., Xu, H., Liufu, Z. and Zhang, Y. (2012). Effects of dietary docosahexaenoic to ecosapentaenoic acid ratio (DHA/EPA) on growth, nonspecific immunity, expression of some immune related genes and disease resistance of large yellow croaker (*Larmichthys crocea*) following natural infestation of parasites (*Cryptocaryon irritans*). *Aquaculture*, 334-337, 101-110.

การสำรวจคุณภาพของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าที่ใช้เพาะเลี้ยง ปลาทะเลสวยงาม

Survey on Quality of Commercial Probiotic Products Used for Marine Culture of Ornamental Fish

สُبันติต นิมรัตน์^{1*} วรพจน์ แซ่ไควว² และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย³

Subuntith Nimrat^{1*} Worapod Sae-Kow² and Verapong Vuthiphandchai³

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจคุณภาพผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าที่ใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงปลาทะเลสวยงามจำนวน 5 ผลิตภัณฑ์ โดยประเมินจากรายละเอียดที่ระบุบนฉลาก ความสามารถในการย่อยสลายอาหารประเภทโปรตีน ไขมันและแป้ง และความสามารถในการลดปริมาณแอมโมเนียในน้ำทะเล จากการศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์นำเข้าจากต่างประเทศ และแสดงรายละเอียดชื่อผลิตภัณฑ์ ชื่อ สถานที่ผลิต ชื่อผู้นำเข้า ขนาดบรรจุ รวมถึงวิธีการใช้ ขนาดการใช้และอัตราส่วนการใช้ไว้บนฉลาก แต่ไม่แสดงวันผลิตและช่วงเวลาที่เกิดผลิตภัณฑ์ ไม่เสื่อมสลายไว้บนฉลาก ทำให้ทุกผลิตภัณฑ์ไม่ผ่านมาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พ.ศ. 2559 ผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกเพียง 3 ชนิด (ร้อยละ 60) เท่านั้นที่ระบุปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตบนฉลาก และผลิตภัณฑ์ 2 ชนิด (ร้อยละ 40) ที่มีปริมาณแบคทีเรียน้อยกว่าที่โฆษณาบนฉลาก โปรตีนเป็นสารอาหารเพียงชนิดเดียวที่ถูกย่อยได้ด้วยผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกเกือบทุกยี่ห้อ ยกเว้นผลิตภัณฑ์ D และผลิตภัณฑ์ E เพียงชนิดเดียวสามารถย่อยสลายทั้งโปรตีน แป้งและไขมันได้ และสุดท้ายผลิตภัณฑ์ B เป็นผลิตภัณฑ์เดียวที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณแอมโมเนียได้สูงที่สุด โดยลดปริมาณแอมโมเนียได้ถึงร้อยละ 86.15 ในระยะเวลา 15 วัน ในขณะที่ผลิตภัณฑ์อื่นลดปริมาณแอมโมเนียได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น (น้อยกว่าร้อยละ 10) การศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์

¹ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

² โครงการวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

³ ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

*Corresponding author email: subunti@buu.ac.th

Received: 19 January 2021, Revised: 9 March 2021, Accepted: 30 March 2021

โพรไบโอติกส่วนใหญ่ที่จำหน่ายในประเทศไทยไม่ผ่านมาตรฐานและไม่มีประสิทธิภาพสำหรับการเตรียมระบบบำบัดของเสียในตู้เลี้ยงปลาทะเลสวยงาม

คำสำคัญ: โพรไบโอติก ปลาสวยงาม แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต

Abstract

The objective of this study was to investigate the qualities of five commercial probiotic products for culture of marine ornamental fish by examining label information, *in vitro* ability of nutrient digestion (proteins, carbohydrates, and lipids), and effectiveness of ammonia reduction in seawater. All samples were imported probiotic products and showed information of product names, production sites, importer names, contents, including instructions, usage sizes, and usage ratio on their labels. However, all product samples did not meet the standards according to the Notification of the Ministry of Agriculture and Cooperatives (2016) due to the absence of manufactured dates and expiry dates on their labels. There were only 3 probiotic products (60%) declaring total viable count of bacteria on the labels by which 2 products (40%) contained the viable count less than those labeled on the products. Only protein was digested by almost all probiotic products, except product D. Only product E could digest all tested nutrients (protein, carbohydrate, and lipid). Finally, only product B was the most effective product to reduce ammonia. It showed 86.15% of ammonia reduction within 15-day incubation while other products exhibited low efficacy of ammonia reduction (<10%). This study indicated that most probiotic products sole in Thailand did not meet the standard and were ineffective for setting up the wastewater treatment system in the aquarium of marine ornamental fish.

Keywords: Probiotic, Ornamental fish, Ammonia, Nitrite, Nitrate

บทนำ

ปัจจุบันการเลี้ยงปลาทะเลสวยงามได้รับความนิยมอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นการเลี้ยงภายในครอบครัว ร้านอาหาร โรงแรม สถานที่ราชการและหน่วยงานต่าง ๆ เนื่องจากตู้ปลาทะเลสวยงามสร้างความสวยงาม ความเพลิดเพลินให้แก่ผู้พบเห็น จากการประเมินด้านการตลาดพบว่ามูลค่าการค้าขายปลาทะเลสวยงามทั่วโลกเพิ่มจากประมาณ 24-40 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ในช่วงทศวรรษที่ 1980 มาเป็นมากกว่า 300 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปัจจุบัน (Palmtag, 2017) โดยมีปลาทะเลสวยงามประมาณ 20-30 ล้านตัวถูกจำหน่ายทั่วโลกในแต่ละปี ในตลาดโลกมีการค้าปลาทะเลสวยงามกว่า 1,471 ชนิด แยกเป็นตระกูลได้ประมาณ 10 ตระกูล โดยตระกูลที่ได้รับความนิยมเลี้ยงมากที่สุด ได้แก่ ตระกูลปลาสลิดหิน (Pomacentridae) เช่น ปลาสลิดหิน (damselfish) ปลาการ์ตูน (anemonefish) เป็นต้น ปลาทะเลสวยงามเหล่านี้มีส่วนแบ่งการตลาดเกือบร้อยละ 50 ของปลาทะเลสวยงามที่เลี้ยงกันทั่วโลก (Dhaneesh *et al.*, 2013) สำหรับประเทศไทยมีมูลค่าการค้าปลาทะเลสวยงาม โดยเฉพาะปลาการ์ตูนประมาณ 12 ล้านบาทหรือประมาณร้อยละ 24 ของมูลค่าจำหน่ายทั้งหมด ซึ่งคาดว่าความต้องการปลาการ์ตูนในประเทศไทยสูงถึงประมาณ 240,000 ตัวต่อปี

ตามปกติแล้วการเลี้ยงปลาทะเลสวยงามต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในระบบนิเวศทางทะเล และมีทักษะการเพาะเลี้ยงปลาทะเลมากพอสมควร เนื่องจากข้อจำกัดในการเลี้ยงหลายประการ ได้แก่ การเลือกตู้ปลาที่ต้องมีลักษณะพิเศษ ลักษณะอาหาร ตลอดจนการป้องกันการเกิดโรค เป็นต้น ปัญหาสำคัญอีกประการหนึ่ง คือ การจัดการคุณภาพน้ำในตู้เลี้ยงปลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารประกอบไนโตรเจน ตามปกติแล้วตู้ปลาต้องมีสิ่งขับถ่ายจากปลาทะเลสวยงามและเศษอาหารที่เหลือจากการกินของเสียจำพวกโปรตีนเหล่านี้เกิดการเปลี่ยนรูปจากสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์ที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ คือ แอมโมเนียและไนไตรต์ (NO_2^-) โดยอาศัยกิจกรรมของแบคทีเรีย (Gay, 2005) ดังนั้นการเลี้ยงปลาทะเลจึงจำเป็นต้องมีการเตรียมระบบบำบัดของเสียเหล่านี้ การเตรียมระบบกรองน้ำต้องใช้วัสดุกรองที่มีพื้นผิวมาก เช่น ลูกบอลชีวภาพ กรวดปะการัง เพื่อเป็นที่ยึดเกาะและเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ที่มีบทบาทในการลดความเป็นพิษของสารประกอบไนโตรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างการเลี้ยงปลาทะเลสวยงาม (Gay, 2005)

ปัจจุบันการเตรียมระบบบำบัดน้ำเสียในการเลี้ยงปลาทะเลเล็กมีการนำจุลินทรีย์โพรไบโอติกทางการค้ามาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจนและลดระยะเวลาในการเตรียมระบบบำบัด โดยเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางว่าโพรไบโอติกสร้างประโยชน์ต่อสุขภาพของสัตว์น้ำผ่านกลไกต่าง ๆ ได้แก่ การแข่งขันยึดเกาะภายในทางเดินอาหารของสัตว์น้ำกับเชื้อก่อโรค การผลิตสารยับยั้งเชื้อก่อโรค การปรับปรุงประสิทธิภาพของเอนไซม์ย่อยอาหาร การสังเคราะห์วิตามินและสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ การกระตุ้นภูมิคุ้มกันของสัตว์น้ำ ตลอดจนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Ringø, 2020) แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกหลายชนิดที่จำหน่าย

ในประเทศไทย เช่น โพรไบโอติกที่ใช้ในการเลี้ยงกุ้งทะเลมักมีคุณสมบัติไม่สอดคล้องกับที่ระบุไว้บนฉลาก ไม่ว่าจะเป็นปริมาณเซลล์จุลินทรีย์ที่มีชีวิตต่ำกว่าปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งทะเล ชนิดของจุลินทรีย์ไม่ตรงตามระบุไว้บนฉลากผลิตภัณฑ์ และการขาดความสามารถในการผลิตเอนไซม์ย่อยอาหารและการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรค เป็นต้น (สุบัณฑิต และคณะ, 2550; Nimrat and Vuthiphandchai, 2011) คุณภาพของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าเป็นปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทต่อประสิทธิภาพ การทำงานของจุลินทรีย์โพรไบโอติกและสุขภาพของสัตว์น้ำ ในปัจจุบันยังไม่มีรายงานถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าที่ใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงปลาทะเลสวยงามที่จำหน่ายในประเทศไทย ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจคุณภาพผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าที่ใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงปลาทะเลสวยงาม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การบันทึกลักษณะและรายละเอียดบนฉลากผลิตภัณฑ์

จดบันทึกลักษณะและรายละเอียดบนฉลากของตัวอย่างผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้า ได้แก่ ประเทศที่ผลิต วันผลิต วันหมดอายุ ปริมาณแนะนำให้ใช้ ขนาดบรรจุและปริมาณแบคทีเรียที่ระบุ

2. การนับปริมาณแบคทีเรียโพรไบโอติกในผลิตภัณฑ์ทางการค้า (ดัดแปลงจาก สุบัณฑิต และคณะ, 2550)

นับปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตในผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกด้วยเทคนิค spread plate โดยนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกจำนวน 5 ผลิตภัณฑ์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว หรือ 1 กรัม สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นผง เจือจางแบบ 10 เท่า ในน้ำทะเลปราศจากเชื้อ (sterile seawater) จากนั้นดูดตัวอย่างจากแต่ละระดับความเจือจางปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ marine agar เกลี่ยตัวอย่างให้ทั่วผิวน้ำอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยแท่งแก้วสามเหลี่ยม บ่มจานเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง แล้วนับจำนวนโคโลนีของแบคทีเรียที่เจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อ และคำนวณเป็น colony forming unit ต่อกรัมหรือมิลลิลิตร (CFU ต่อกรัมหรือมิลลิลิตร) ของตัวอย่าง

3. ความสามารถในการย่อยสลายอาหารประเภทโปรตีน ไขมัน และแป้ง (ดัดแปลงจาก Nimrat and Vuthiphandchai, 2011)

นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าแต่ละชนิดมาปรับปริมาณแบคทีเรียให้เท่ากับ 10^4 CFU ต่อกรัม หรือ 10^4 CFU ต่อมิลลิลิตร ด้วยน้ำทะเลปราศจากเชื้อ แล้วดูสารตัวอย่าง ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ลงบนผิวน้ำอาหารเลี้ยงเชื้อ skim milk agar tributyrin agar และ starch agar เพื่อทดสอบความสามารถในการย่อยสลายสารอาหารโปรตีน ไขมัน และแป้ง ตามลำดับ (ทำการ

ทดลอง 3 ข้าง) นำจานเพาะเชื้อบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 72 ชั่วโมง ตรวจสอบความสามารถในการย่อยสลายโปรตีนและไขมันด้วยการวัดขนาดวงใสรอบโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อ skim milk agar และ tributyrin agar ตามลำดับ และวงใสรอบโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อ starch agar หลังการเทรตด้วยสารละลายไอโอดีน และคำนวณประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอาหารจากขนาดของวงใสรอบโคโลนีต่อขนาดโคโลนี หากผลิตภัณฑ์ใดให้อัตราส่วนที่มีค่ามากแสดงว่าเกิดการย่อยสลายที่ดี

4. ความสามารถในการลดปริมาณแอมโมเนียของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้า

ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแอมโมเนียของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าแต่ละชนิด ดำเนินการทดสอบในขวดซีรัมขนาด 150 มิลลิลิตร จำนวน 7 ขวด โดยจะมีการแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดดังนี้

ชุดที่ 1 คือ ชุดทดลอง (active) ประกอบด้วยขวดซีรัมขนาด 150 มิลลิลิตร จำนวน 3 ขวด ที่เติมน้ำทะเลปราศจากเชื้อปริมาตร 100 มิลลิลิตร และแอมโมเนียมคลอไรด์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นเติมผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าตามอัตราส่วนที่ระบุไว้บนฉลาก

ชุดที่ 2 คือ ชุดควบคุมแบบฆ่าเชื้อ (sterile) เป็นชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เกิดจากการดูดซับของเซลล์แบคทีเรีย ซึ่งประกอบด้วยขวดซีรัมขนาด 150 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด ที่เติมน้ำทะเลปราศจากเชื้อปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วเติมผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าตามอัตราส่วนที่ระบุไว้บนฉลาก หลังจากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อภายในหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที และเติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ปราศจากเชื้อความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชุดที่ 3 คือ ชุดควบคุมแบบที่ไม่ใส่เชื้อ (background) เป็นชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนียนอกเหนือจากกิจกรรมของแบคทีเรีย ประกอบด้วยขวดซีรัมขนาด 150 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด ที่เติมน้ำทะเลปราศจากเชื้อปริมาตร 100 มิลลิลิตร และแอมโมเนียมคลอไรด์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ไม่เติมผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าลงไปในช่วงซีรัม

เก็บตัวอย่างในแต่ละชุดการทดลองของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าแต่ละชนิด ตลอดระยะเวลา 15 วันของการบ่มที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 องศาเซลเซียส) ซึ่งเป็นระยะเวลาเฉลี่ยที่มักใช้ในการเตรียมระบบกรองชีวภาพของตู้เลี้ยงปลาทะเลสวยงาม มาตกตะกอนด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที แล้วนำส่วนใสที่ได้มาตรวจวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ด้วยเทคนิคการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 640 543 และ 410 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ โซเดียมไนไตรต์และโพแทสเซียมไนเตรต เป็นสารละลายมาตรฐาน ตามลำดับ (มันสิน, 2538; Strickland and Parson, 1972; American Water Works Association and Water Pollution Control Federation, 1980)

5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค one-way analysis of variance (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วย Duncan's multiple range test ด้วยโปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 19.0

ผลการวิจัย

1. รายละเอียดบนฉลาก คุณสมบัติเบื้องต้นและปริมาณแบคทีเรีย

ผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกที่จำหน่ายในท้องตลาดเป็นผลิตภัณฑ์ที่นำเข้าจากต่างประเทศทั้งหมด โดยนำเข้ามาจากสหรัฐอเมริกา 4 ผลิตภัณฑ์ และฝรั่งเศส 1 ผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์เหล่านี้อยู่ในรูปของของเหลว 4 ผลิตภัณฑ์ และผง 1 ผลิตภัณฑ์ ไม่มีการระบุวันผลิตและวันหมดอายุ ยกเว้นผลิตภัณฑ์ A เท่านั้นที่ระบุวันหมดอายุบนฉลาก ปริมาณการใช้ต่อครั้งและราคามีความแตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ ต้นทุนในการใช้แต่ละครั้งอยู่ที่ประมาณ 0.03 ถึง 2.00 บาทต่อน้ำในตู้เลี้ยงปลาทะเล 1 ลิตร โพรไบโอติก 3 ยี่ห้อเท่านั้น (ร้อยละ 60) ที่ระบุปริมาณแบคทีเรียบนฉลาก ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ A B และ E เมื่อตรวจนับปริมาณแบคทีเรียพบว่า ผลิตภัณฑ์โพรไบโอติก 2 ยี่ห้อ (ร้อยละ 40) มีปริมาณแบคทีเรียน้อยกว่าที่ระบุไว้บนฉลาก ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ B ($8 \pm 1.0 \times 10^5$ CFU ต่อกรัม) และ E ($2 \pm 0.4 \times 10^3$ CFU ต่อมิลลิลิตร) ส่วนผลิตภัณฑ์ C และ D มีปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตต่ำมาก คือ $1.4 \pm 0.8 \times 10^2$ CFU ต่อมิลลิลิตร และไม่พบการเจริญของแบคทีเรีย ตามลำดับ (ตารางที่ 1)

2. ความสามารถในการย่อยสลายอาหารของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้า

ผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าแต่ละชนิดมีความสามารถในการย่อยสลายอาหารแตกต่างกัน โดยโปรตีนเป็นสารอาหารเพียงชนิดเดียวที่ถูกย่อยได้ด้วยผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกเกือบทุกยี่ห้อ ยกเว้นผลิตภัณฑ์ D ที่ไม่พบการเจริญของเชื้อ ส่วนแป้งถูกย่อยสลายได้ด้วยผลิตภัณฑ์ E เท่านั้น และผลิตภัณฑ์โพรไบโอติก 3 ยี่ห้อ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ A B และ E สามารถย่อยสลายไขมันได้ตามตารางที่ 2

3. ความสามารถในการลดปริมาณแอมโมเนีย

ผลิตภัณฑ์ A สามารถลดปริมาณแอมโมเนียในน้ำทะเลได้เพียงเล็กน้อย จากปริมาณเริ่มต้นเท่ากับ 1.30 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 1.18 ± 0.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันที่ 15 ของการทดลอง โดยคิดเป็นการลดลงเพียงร้อยละ 9.23 เท่านั้น (ตารางที่ 3) ปริมาณไนไตรต์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยมีปริมาณอยู่ในช่วง 0.0004 ± 0.0002 ถึง 0.0018 ± 0.0010 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนไนเตรดมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ในวันสุดท้ายของการทดลอง

ตารางที่ 1 รายละเอียดบนฉลาก คุณสมบัติเบื้องต้นและปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าที่ใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงปลาทะเลสวยงาม

ผลิตภัณฑ์ โพรไบโอติก	ประเทศที่ผลิต	ลักษณะ ผลิตภัณฑ์	วัน ผลิต*	วัน หมด อายุ*	ปริมาณที่ ใช้ต่อน้ำ 1 ลิตร*	ขนาด บรรจุ	ราคาต่อ หน่วยบรรจุ (บาท)	ต้นทุนต่อ น้ำ 1 ลิตร (บาท)	ปริมาณแบคทีเรียที่ ระบุบนฉลาก	ปริมาณ แบคทีเรียที่ตรวจ นับได้
A	สหรัฐอเมริกา	น้ำ	ไม่ระบุ	ระบุ	0.26 มิลลิลิตร	450 มิลลิลิตร	800	0.46	10^6 เซลล์	$3 \pm 0.8 \times 10^7$ CFU ต่อมิลลิลิตร
B	สหรัฐอเมริกา	ผง	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	0.01 กรัม	80 กรัม	250	0.03	4×10^7 เซลล์ต่อซองชา หรือ 9.5×10^6 เซลล์ ต่อกรัม	$8 \pm 1.0 \times 10^5$ CFU ต่อกรัม
C	สหรัฐอเมริกา	น้ำ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	0.125 มิลลิลิตร	250 มิลลิลิตร	400	0.20	ไม่ระบุ	$1.4 \pm 0.8 \times 10^2$ CFU ต่อมิลลิลิตร
D	สหรัฐอเมริกา	น้ำ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	0.025 มิลลิลิตร	500 มิลลิลิตร	1,000	0.05	ไม่ระบุ	NG
E	ฝรั่งเศส	น้ำ	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	0.025 มิลลิลิตร	1.5 มิลลิลิตร	120	2.00	5×10^7 เซลล์ต่อแอมพูล หรือ 3.33×10^7 เซลล์ ต่อมิลลิลิตร	$2 \pm 0.4 \times 10^3$ CFU ต่อมิลลิลิตร

หมายเหตุ: - * ประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พ.ศ. 2559 เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์การแสดงฉลากและข้อความในฉลาก สำหรับอาหารสัตว์ควบคุมเฉพาะ พ.ศ. 2559 ได้กำหนดให้แสดงวัน เดือน ปี ที่ผลิต วัน เดือน ปี ที่ล่วงอายุและวิธีใช้ ขนาดการใช้ และอัตราการใช้บนฉลากผลิตภัณฑ์

- NG คือ ไม่พบการเจริญของแบคทีเรีย

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าในการย่อยสลายโปรตีน ไขมันและแป้ง

ผลิตภัณฑ์โพรไบโอติก	ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอาหาร		
	โปรตีน	แป้ง	ไขมัน
A	++	x	+
B	+*	x *	+*
C	++++	x	x
D	NG	NG	NG
E	+	+	+++

หมายเหตุ: - x ไม่มีการย่อยสลายสารอาหาร

- + ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอาหารได้ 0.01-0.50
- ++ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอาหารได้ 0.51-0.70
- +++ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอาหารได้ 0.71-1.00
- ++++ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอาหารได้ 1.01-2.00
- NG คือ ไม่พบการเจริญของแบคทีเรีย
- * พบเชื้อรากลุ่มราสาย (Mold) เจริญปกคลุมผิวหน้าอาหาร

ผลิตภัณฑ์ B เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณแอมโมเนีย โดยมีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เหลือเพียง 0.18 ± 0.09 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นการลดลงถึงร้อยละ 86.15 ในวันที่ 15 ของการทดลอง (ตารางที่ 3) ส่วนไนไตรต์พบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และไนเตรตมีปริมาณสูงที่สุดในวันที่ 7 ของการทดลอง (0.3507 ± 0.0231 มิลลิกรัมต่อลิตร) หลังจากนั้นลดลงเหลือ 0.1507 ± 0.0306 มิลลิกรัมต่อลิตร ในวันสุดท้ายของการทดลอง ผลิตภัณฑ์ C และ D เป็นผลิตภัณฑ์ที่ลดปริมาณแอมโมเนียได้เล็กน้อย ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ A โดยทั้งสองผลิตภัณฑ์นี้ลดปริมาณแอมโมเนียได้เพียงร้อยละ 0.77 และ 6.15 ตามลำดับ (ตารางที่ 3) และผลิตภัณฑ์ E เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายแอมโมเนียในน้ำทะเล เนื่องจากปริมาณแอมโมเนียไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อบ่มตัวอย่างนาน 15 วัน โดยมีปริมาณแอมโมเนียเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คิดเป็นร้อยละ 101.54 ส่วนไนไตรต์พบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และไนเตรตมีปริมาณลดลงเล็กน้อยในวันสุดท้ายของการทดลอง (ตารางที่ 3)

อภิปรายผลการวิจัย

1. รายละเอียดบนฉลาก คุณสมบัติเบื้องต้นและปริมาณแบคทีเรีย

ความหลากหลายของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าที่ใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงปลาทะเลสวยงามในประเทศไทยยังมีไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์สำหรับการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล การศึกษาในครั้งนี้พบว่าผลิตภัณฑ์ทั้ง 5 ยี่ห้อ เป็นผลิตภัณฑ์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ โดยนำเข้ามาจากสหรัฐอเมริกาและฝรั่งเศส ถึงแม้ว่าผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทุกตัวอย่างได้แสดงรายละเอียดชื่อผลิตภัณฑ์ ชื่อ สถานที่ผลิต ชื่อผู้นำเข้า ขนาดบรรจุ รวมถึงวิธีการใช้ ขนาดการใช้และอัตราส่วนการใช้ไว้บนฉลาก แต่ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนดบางประการ เนื่องจากตามประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พ.ศ. 2559 ได้กำหนดให้แสดงวันผลิตและเวลาที่ผลิตภัณฑ์ไม่เสื่อมสลายไว้บนฉลากผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์และไนเตรดในน้ำทะเลที่เติมผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทั้ง 5 ชนิดตลอดระยะเวลา 15 วัน

ผลิตภัณฑ์ โพรไบโอติก	ระยะเวลา การบ่ม (วัน)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
		แอมโมเนีย	ไนไตรต์	ไนเตรด
A	15 นาที	1.30±0.00 ^d	0.00 ^a	0.00 ^a
	3	0.91±0.18 ^a	0.0018±0.0010 ^{ab}	0.1040±0.1039 ^b
	7	1.15±0.28 ^c	0.0009±0.0002 ^a	0.3107±0.0462 ^c
	11	1.09±0.16 ^{bc}	0.0016±0.0014 ^{ab}	0.3307±0.0902 ^c
	15	1.18±0.26 ^c	0.0004±0.0002 ^a	0.3707±0.0416 ^c
B	15 นาที	1.30±0.00 ^c	0.00 ^a	0.00 ^a
	3	0.68±0.09 ^b	0.0019±0.0009 ^c	0.1173±0.1332 ^{bc}
	7	0.67±0.23 ^b	0.0009±0.0001 ^b	0.3507±0.0231 ^d
	11	0.20±0.16 ^a	0.0020±0.0009 ^c	0.0907±0.0115 ^b
	15	0.18±0.09 ^a	0.0004±0.0002 ^a	0.1507±0.0306 ^c
C	15 นาที	1.30±0.00 ^c	0.00 ^a	0.00 ^a
	3	1.01±0.11 ^a	0.0013±0.0007 ^c	0.2173±0.1102 ^b
	7	1.27±0.05 ^c	0.0007±0.0003 ^b	0.2173±0.1677 ^b
	11	1.17±0.06 ^b	0.0004±0.0002 ^{ab}	0.3240±0.0400 ^c
	15	1.29±0.03 ^c	0.0004±0.0002 ^{ab}	0.2040±0.0529 ^b

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ผลิตภัณฑ์ โพรไบโอติก	ระยะเวลา การบ่ม (วัน)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)		
		แอมโมเนีย	แอมโมเนีย	แอมโมเนีย
D	15 นาที	1.30±0.00 ^d	0.00 ^a	0.00 ^a
	3	0.98±0.05 ^a	0.0012±0.0008 ^c	0.1707±0.0231 ^b
	7	1.23±0.12 ^c	0.0007±0.0003 ^{ab}	0.3040±0.0200 ^c
	11	1.16±0.09 ^b	0.0001±0.0001 ^a	0.3073±0.0513 ^c
	15	1.22±0.07 ^c	0.0003±0.0001 ^a	0.1840±0.0000 ^b
E	15 นาที	1.30±0.00 ^c	0.00 ^a	0.00 ^a
	3	1.04±0.07 ^a	0.0012±0.0009 ^a	0.1907±0.0306 ^b
	7	1.19±0.06 ^b	0.0006±0.0003 ^a	0.3773±0.0503 ^c
	11	1.19±0.06 ^b	0.0001±0.0000 ^a	0.3540±0.0300 ^c
	15	1.32±0.14 ^c	0.0002±0.0000 ^a	0.2173±0.0416 ^b

หมายเหตุ: - ตัวอักษรในแนวตั้งของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อตรวจนับปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตในผลิตภัณฑ์พบว่าผลิตภัณฑ์โพรไบโอติก 2 ยี่ห้อ ยกเว้นผลิตภัณฑ์ A มีปริมาณต่ำกว่าที่ระบุไว้บนฉลาก และมี 2 ยี่ห้อที่ไม่ระบุปริมาณจุลินทรีย์พบเซลล์แบคทีเรียที่มีชีวิตต่ำมาก ($\leq 10^2$ CFU ต่อมิลลิลิตร) จากการสำรวจผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในประเทศไทยก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกส่วนใหญ่มักมีคุณสมบัติไม่ตรงตามที่โฆษณาไว้บนฉลาก เช่น ผลิตภัณฑ์สำหรับเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลมีปริมาณแบคทีเรียน้อยกว่าที่ระบุไว้บนฉลาก (สุบัณฑิต และคณะ, 2550) ในทำนองเดียวกัน Nimrat and Vuthiphandchai (2011) ยังรายงานว่าโพรไบโอติกสำหรับการเลี้ยงกุ้งทะเลในประเทศไทย 12 ยี่ห้อ มีปริมาณและชนิดของจุลินทรีย์ไม่สอดคล้องกับที่ระบุไว้บนฉลาก และมักมีปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตต่ำกว่าปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล รวมทั้งไม่สามารถยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคในกุ้งได้ การสูญเสียเซลล์ที่มีชีวิตในผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัยในระหว่างกระบวนการผลิต การขนส่งและการเก็บรักษา เช่น อุณหภูมิสูง การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง แรงดันออกซิเจนสูง ปริมาณออกซิเจนต่ำ การได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ต การเปลี่ยนแปลงความดันอากาศ สภาพการเก็บรักษาที่ไม่เหมาะสมของร้านค้าและผู้ใช้ เป็นต้น (Morales and Ruiz, 2016) ปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตต่ำกว่าที่ระบุไว้บนฉลากในการศึกษาครั้งนี้ยังอาจเกี่ยวข้องกับการใช้อาหาร Marine agar ในการตรวจนับ อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดนี้เหมาะสมในการเพาะแบคทีเรียทางทะเลกลุ่ม

เซทเทอร์โรโทรป เนื่องจากอุณหภูมิด้วยสารอินทรีย์และแร่ธาตุต่าง ๆ ที่คล้ายคลึงกับน้ำทะเลเป็นแหล่งของสารอาหารและพลังงาน หากปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตที่พบได้น้อยในผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกเกี่ยวข้องกับปัจจัยนี้ย่อมชี้ให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์โพรไบโอติก A เท่านั้น มีความเหมาะสมในการเพาะเลี้ยงปลาทะเลสวยงามโดยไม่พิจารณาถึงคุณสมบัติด้านอื่น เพราะประกอบไปด้วยแบคทีเรียที่เจริญได้ดีในสิ่งแวดล้อมทางทะเล ตามปกติแล้วคุณภาพของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์โพรไบโอติกและสุขภาพของสัตว์น้ำ ดังนั้นปริมาณเซลล์ที่มีชีวิตที่ลดลงของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกย่อมทำให้ไม่มีประสิทธิภาพและทำให้ผู้เพาะเลี้ยงปลาทะเลสวยงามสิ้นเปลืองต้นทุนในการเลี้ยง

2. ความสามารถในการย่อยสารอาหารของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้า

โปรตีน แป้ง และไขมันเป็นสารอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโต การทำงานของระบบภายในร่างกายและโครงสร้างของเซลล์สัตว์น้ำ การศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ทุกชนิด ยกเว้น ผลิตภัณฑ์ D ที่ไม่พบการเจริญของเชื้อ สามารถย่อยสลายโปรตีนได้ ส่วนแป้งและไขมันถูกย่อยสลายได้ด้วยผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกเพียง 1 และ 3 ผลิตภัณฑ์เท่านั้น ตามลำดับสอดคล้องกับการศึกษาของ Nimrat and Vuthiphandchai (2011) พบว่าผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกที่ผลิตหรือนำเข้าเพื่อจำหน่ายในประเทศไทยเพียงร้อยละ 50 เท่านั้น ที่มีความสามารถในการย่อยสลายโปรตีน แป้งและไขมัน และบางผลิตภัณฑ์ไม่สามารถย่อยสารอาหารใดได้เลย การย่อยสลายโปรตีน แป้งและไขมันของจุลินทรีย์ต้องอาศัยกิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอส อะไมเลสและไลเปส การย่อยสลายโปรตีนได้แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้าเหล่านี้จะมีบทบาทในการส่งเสริมการย่อยโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบหลักและมีปริมาณสูงในอาหารปลาได้ โดยเป็นที่ยอมรับกันว่าการเติมโพรไบโอติกที่มีความสามารถในการย่อยสลายโปรตีน แป้งและไขมันจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสารอาหาร การดูดซึมสารอาหารและทำให้สุขภาพโดยรวมของสัตว์น้ำดีขึ้น (Ringø, 2020) การศึกษาในครั้งนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์โพรไบโอติก B มีการปนเปื้อนด้วยเชื้อรา เนื่องจากพบการเจริญของเชื้อราในกลุ่มราสายบนอาหารเลี้ยงเชื้อทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ตรวจสอบความสามารถในการย่อยสารอาหารทั้ง ๆ ที่ฉลากผลิตภัณฑ์ไม่ได้ระบุว่ามีการเป็นส่วนประกอบ เชื้อราบางชนิด ได้แก่ *Aphanomyces invadans* *Saprolegnia* sp. *Fusarium solani* *Ichthyophonus hoferi* *Exophiala* sp. *Achlya* sp. และ *Branchiomyces* sp. จัดเป็นเชื้อฉวยโอกาสก่อโรคในสัตว์ทะเลที่อยู่ในสภาวะเครียด เช่น เพาะเลี้ยงแบบหนาแน่น ขาดสารอาหาร ติดเชื้อจากเชื้อก่อโรคและภูมิคุ้มกันต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อคุณภาพน้ำไม่ดี การติดเชื้อราสามารถทำให้ปลาตายได้ภายใน 2-3 วัน (Yanong, 2003) ดังนั้นผู้ผลิตจึงควรมีความระมัดระวังในการตรวจสอบคุณภาพสินค้าก่อนการจัดจำหน่าย รวมทั้งควรมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตบางขั้นตอนเพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อรา

3. ความสามารถในการลดปริมาณแอมโมเนียของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทางการค้า

ผลิตภัณฑ์ B เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณแอมโมเนียได้สูงที่สุด โดยลดได้ถึงร้อยละ 86.15 ในช่วงระยะเวลา 15 วัน ในขณะที่ผลิตภัณฑ์อื่นนั้นลดปริมาณแอมโมเนียได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น การลดปริมาณแอมโมเนียได้อย่างมีประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ B น่าจะเป็นผลมาจากผลิตภัณฑ์นี้มีลักษณะเป็นผง ซึ่งสามารถคงสภาพและรักษาคุณสมบัติของแบคทีเรียโพรไบโอติกได้ดีกว่ารูปแบบของเหลว (Lahtinen *et al.*, 2005) นอกจากนี้ปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตที่ตรวจนับได้ในผลิตภัณฑ์นี้ยังมีปริมาณสูง ($8 \pm 1.0 \times 10^5$ CFU ต่อกรัม) เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อื่นยกเว้นผลิตภัณฑ์ A เมื่อนำผลิตภัณฑ์นี้มาเติมลงในขวดซีรัมที่มีน้ำทะเลปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำให้มีปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตประมาณ 8×10^2 CFU ต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีปริมาณมากกว่าผลิตภัณฑ์ C D และ E ที่มีปริมาณแบคทีเรียต่ำมาก (< 10 CFU ต่อมิลลิลิตร) ปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตสูงนี้อาจเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ B สามารถย่อยสลายแอมโมเนียได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาชนิดของแบคทีเรียที่ระบุบนฉลากผลิตภัณฑ์ B พบว่าประกอบด้วยแบคทีเรียสกุล *Bacillus* เป็นหลักตามปกติแล้วแบคทีเรียกลุ่มนี้มักถูกนำมาใช้เป็นแบคทีเรียโพรไบโอติกสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากเป็นแบคทีเรียไม่ก่อโรค ไม่สร้างสารพิษต่อสัตว์น้ำ กระตุ้นภูมิคุ้มกันได้ดี มีความสามารถในการผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิด มีความทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี เจริญง่ายและเจริญได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งปรับปรุงคุณภาพน้ำได้ดี (Ringø, 2020) แบคทีเรียกลุ่มนี้หลายชนิด เช่น *Bacillus flexus* *B. subtilis* *B. cereus* และ *B. licheniformis* สามารถลดปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์ที่มีความเป็นพิษในน้ำที่ใช้เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยอาศัยกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน (Kim *et al.*, 2005) สอดคล้องกับผลการศึกษาในครั้งนี้ที่พบว่าปริมาณแอมโมเนีย ไนเตรตและไนไตรต์ในน้ำทะเลที่เติมผลิตภัณฑ์ B มีค่าลดลงและต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้สำหรับการเพาะเลี้ยงปลาทะเล แต่อย่างไรก็ตามการลดปริมาณแอมโมเนียอย่างสมบูรณ์จนกลายเป็นก๊าซไนโตรเจนของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกนี้ก็ควรมีการศึกษาเพื่อยืนยันประสิทธิภาพต่อไป ผลิตภัณฑ์ A สามารถลดปริมาณแอมโมเนียได้ดีกว่าผลิตภัณฑ์อื่นที่อยู่ในรูปของเหลว ทั้งนี้อาจเกิดจากมีปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตอยู่ในผลิตภัณฑ์สูง ($3 \pm 0.8 \times 10^7$ CFU ต่อมิลลิลิตร) เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อื่นที่อยู่ในรูปของเหลวเหมือนกัน และยังประกอบไปด้วยแบคทีเรียในสกุล *Bacillus* เป็นแบคทีเรียหลักตามที่ระบุไว้บนฉลากผลิตภัณฑ์ ส่วนผลิตภัณฑ์ D นั้นสามารถลดปริมาณแอมโมเนียได้ร้อยละ 6.15 ทั้ง ๆ ที่ไม่พบแบคทีเรียที่มีชีวิตในผลิตภัณฑ์ การลดลงดังกล่าวอาจเกิดจากกิจกรรมของเอนไซม์หรือสารชนิดอื่น ๆ ที่เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ (Jung *et al.*, 2004)

ผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกสามารถนำมาช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยการติดตั้งเป็นระบบกรองน้ำชีวภาพ เช่น ลูกบอลชีวภาพ กรวดปะการัง เพื่อให้เป็นสิ่งยึดเกาะของจุลินทรีย์ที่จะช่วยกำจัดของเสียไม่ว่าจะเป็นสิ่งขับถ่ายหรือเศษอาหารที่เหลือจากการกินให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นพิษต่อสัตว์

น้ำผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชันและดีไนทริฟิเคชัน แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกสำหรับการเพาะเลี้ยงปลาทะเลสวยงามที่จำหน่ายในปัจจุบันส่วนใหญ่ไม่มีคุณสมบัติในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ดังนั้นผู้เพาะเลี้ยงปลาทะเลสวยงามจึงต้องพิจารณาอย่างรอบคอบถึงความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์และค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในการซื้อผลิตภัณฑ์โพรไบโอติก ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่สำรวจในครั้งนี้ล้วนนำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งน่าจะได้รับการพัฒนาภายใต้สภาพอากาศที่แตกต่างจากประเทศไทยที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้ไม่มีประสิทธิภาพเมื่อนำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงปลาสวยงามในประเทศไทย ดังนั้นจึงน่าจะมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกสำหรับการเพาะเลี้ยงปลาทะเลสวยงามที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อมในประเทศไทยต่อไป

สรุปผลการวิจัย

ผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกทั้งหมดแสดงรายละเอียดชื่อผลิตภัณฑ์ ชื่อ สถานที่ผลิต ชื่อผู้นำเข้า ขนาดบรรจุ รวมถึงวิธีการใช้ ขนาดการใช้และอัตราส่วนการใช้ไว้บนฉลาก แต่ยังคงไม่ผ่านมาตรฐานเนื่องจากไม่แสดงวันผลิตและช่วงเวลาที่มีผลิตภัณฑ์ไม่เสื่อมสลายไว้บนฉลาก ตามประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พ.ศ. 2559 ผลิตภัณฑ์เพียง 3 ยี่ห้อ (ร้อยละ 60) ระบุปริมาณแบคทีเรียที่มีชีวิตบนฉลาก และผลิตภัณฑ์ 2 ยี่ห้อ (ร้อยละ 40) ที่มีปริมาณแบคทีเรียน้อยกว่าที่โฆษณาบนฉลาก โปรตีนเป็นสารอาหารเพียงชนิดเดียวที่ถูกย่อยได้ด้วยผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกเกือบทุกยี่ห้อ ยกเว้น ผลิตภัณฑ์ D ที่ไม่พบการเจริญของเชื้อ และมีผลิตภัณฑ์ E เพียงชนิดเดียวที่สามารถย่อยสลายทั้งโปรตีน แป้งและไขมันได้ ผลิตภัณฑ์ B เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณแอมโมเนียได้สูงที่สุด (ร้อยละ 86.15) ในขณะที่ผลิตภัณฑ์อื่นลดปริมาณแอมโมเนียได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น (น้อยกว่าร้อยละ 10) แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาในระดับหลอดทดลอง ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาประสิทธิภาพในการลดปริมาณแอมโมเนียในระบบการเพาะเลี้ยงปลาทะเลต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา และขอขอบคุณ ภาควิชาจุลชีววิทยา และภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และสถานที่ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- ประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์การแสดงผลากและข้อความในฉลาก
สำหรับอาหารสัตว์ควบคุมเฉพาะ พ.ศ. 2559. (2559, 13 มกราคม). *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่ม
133 ตอนพิเศษ 9 ง. หน้า 3.
- มันสิน ตันทุลเวศน์. (2538). *คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- สุบัณฑิต นิมรัตน์ มานพ กาญจนบุรากร ปิยาภรณ์ สมสมักร นเรศ เชื้อสุวรรณ ปฏีมา ชัยพิริยะศักดิ์
และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย. (2550). คุณสมบัตินของผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกที่จำหน่ายในประเทศไทย
และต่างประเทศ. *วารสารการประมง*, 60(1), 27-34.
- American Water Works Association and Water Pollution Control Federation. (1980).
Standard method for the examination of water and wastewater (15th ed).
Washington D.C.: American Public Health Association.
- Dhaneesh, K.V., Vinoth, R., Ghosh, S., Gopi, M., Ajith Kumar, T.T. and Balasubramanian,
T. (2013). Chapter 17: Hatchery production of marine ornamental fishes: an
alternate livelihood option for the island community at Lakshadweep. In
Sundaresan, J., Sreekes, S., Ramanathan, A.L. and Boojh, R. (Eds.). *Climate
change and island and coastal vulnerability*, pp. 253-265. Dordrecht: Springer.
- Gay, J. (2005). *The perfect aquarium*. London: Octopus.
- Jung, J.Y., Chung, Y.C., Shin, H.S. and Son, D.H. (2004). Enhanced ammonia nitrogen
removal using consistent biological regeneration and ammonia exchange of
zeolite in modified SBR process. *Water Research*, 38(2), 347-354.
- Kim, J.K., Park, K., Cho, K.S., Nam, S.W., Park, T.J. and Bajpai, R. (2005). Aerobic
denitrification-denitrification by heterotrophic *Bacillus* strains. *Bioresource
Technology*, 96(17), 1897-1906.
- Lahtinen, S.J., Gueimonde, M., Ouwehand, A.C., Reinikainen, J.P. and Salminen, S.J.
(2005). Probiotic bacteria may become dormant during storage. *Applied and
Environmental Microbiology*, 71(3), 1662-1663.
- Morales, M.E. and Ruiz, M.A. (2016). Chapter 16: Microencapsulation of probiotic cells:
applications in nutraceutical and food industry. In Grumezescu, A.M. (Ed).
Nanotechnology in the agro-food industry volume 4: nutraceuticals, pp. 627-
668. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.

- Nimrat, S. and Vuthiphandchai, V. (2011). *In vitro* evaluation of commercial probiotic products used for marine shrimp cultivation in Thailand. *African Journal of Biotechnology*, 10(22), 4643-4650.
- Palmtag, M.R. (2017). The marine ornamental species trade. In Calado, R., Olivotto, I., Oliver, P.M., and Holt, J. (Eds). *Marine ornamental species aquaculture*, pp. 3-14. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Ringø, E. (2020). Probiotics in shellfish aquaculture. *Aquaculture and Fisheries*, 5(1), doi: <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2019.12.001>.
- Strickland, J.D.H. and Parson, T.R. (1972). *A practical handbook of seawater analysis* (2nd ed). Ottawa: Fisheries Research Board of Canada Bulletin.
- Yanong, R.P.E. (2003). Fungal diseases of fish. *Veterinary Clinics: Exotic Animal Practice*, 6(2), 377-400.

การพัฒนากระบวนการผลิตไซรัปจากลองกอง Development of Longkong Syrup Processing

ธิดารัตน์ จูทอง^{1*} รสวันต์ อินทรศิริสวัสดิ์¹ และรุทรดา เทพประดิษฐ์¹

Thidarat Juthong^{1*} Rossawan Intarasirisawat¹ and Rutrada Theppradit¹

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นเพื่อพัฒนากระบวนการผลิตไซรัปลองกองซึ่งเป็นไซรัปที่ให้ความหวานตามธรรมชาติที่มีความหวานและกลิ่นรสเฉพาะของลองกอง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเตรียมผลลองกองด้วยเทคนิค sous-vide ต่อคุณภาพทางกายภาพ ศึกษาผลของระดับความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเนสร่วมกับอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดน้ำลองกองต่อปริมาณผลผลิต และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไซรัปลองกองในระหว่างการเก็บรักษา จากการทดลองพบว่าการให้ความร้อนด้วยวิธี sous-vide ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที สามารถยับยั้งปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ได้เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมและชุดที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน จากนั้นศึกษาปริมาณเอนไซม์เพคตินเนส อุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัดน้ำลองกองที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มผลผลิตของน้ำลองกองที่สกัดได้ โดยทดลองหาอิทธิพลที่มีผลต่อการสกัดน้ำลองกองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design) ที่มี 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเนส (X_1) อุณหภูมิในการสกัด (X_2) และระยะเวลาในการสกัด (X_3) พบว่าเอนไซม์เพคตินเนสที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.75 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมน้ำลองกองเนื่องจากให้ผลผลิตน้ำลองกองสูงช่วงร้อยละ 89.5-91.0 จากนั้นนำน้ำลองกองไปทำการระเหยน้ำในระบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนได้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 65 องศาบริกซ์ ($^{\circ}$ Brix) แล้วศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไซรัปลองกองเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 45 วัน พบว่าไซรัปลองกองมีสีคล้ำขึ้น โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีทั้งหมด (ΔE) เป็น 92.54 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสีของตัวอย่างเริ่มต้น นอกจากนี้ค่าความชื้นของไซรัปลองกองเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 29.72 เป็นร้อยละ 41.99 แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และปริมาณยีสต์และรา

คำสำคัญ: ลองกอง ไซรัปลองกอง เพคตินเนส

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตรและชีวภาพ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

* Corresponding author e-mail: thidarat@tsu.ac.th

Received: 17 November 2020, Revised: 11 April 2021, Accepted: 21 April 2021

Abstract

This research focused on the development of Longkong syrup processing. Longkong syrup can be used as a natural sweetener with unique Longkong sweet tastes and flavors. The objective of this research was 1) to study the effect of pretreatments using the Sous-vide technique on the resulting Longkong juice appearance, 2) to study the effect of pectinase concentrations, incubation temperatures and times on % yield of Longkong juice extraction and 3) to study the change of Longkong syrup during storage. The results revealed that using the Sous-vide technique at 90 °C for 15 min was appropriate for preparing Longkong juice to inhibit enzymatic browning reaction when compared to without heating and control samples. Then, an appropriate condition to extract Longkong juice was analyzed by using Box-Behnken design. The pectinase concentrations (X_1), incubation temperatures (X_2) and times (X_3) were used as factors to perform. The condition of 0.75% pectinase, incubation at 40 °C for 180 min was obtained with the highest yield of 89.5-91.0%. Subsequently, Longkong juice was evaporated by using a vacuum dryer at 50 °C till a total soluble solid of 65 °Brix. Longkong syrup was stored at room temperature for 45 days. The results showed that Longkong syrup was darker and the total color difference overall (ΔE) was 92.54 when compared to the color value of the initial Longkong syrup. Moreover, the moisture content of Longkong syrup increased from 29.72% to 41.99% but there was no change in pH, total microbial count and yeast and mold count.

Keywords: Longkong, Longkong syrup, Pectinase

บทนำ

ลองกอง (*Aglaia dookkoo* Griff.) เป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทย ปลูกมากที่สุดในพื้นที่ภาคใต้ รองลงมาคือภาคตะวันออกและภาคเหนือ ตามลำดับ โดยมีพื้นที่เพาะปลูกรวมทั้งหมด 260,330 ไร่ และมีปริมาณผลผลิตรวม 117,046 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) แหล่งผลิตสำคัญอยู่ที่จังหวัดจันทบุรี นครศรีธรรมราช ชุมพร ยะลาและนราธิวาส ผลผลิตส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 98 บริโภคภายในประเทศ อีกร้อยละ 2 ส่งออกจำหน่ายประเทศแถบอาเซียน สถิติปี พ.ศ. 2562 รายงานว่าประเทศไทยส่งออกผลผลิตลองกองสดไปจำหน่ายยังประเทศคู่ค้าสำคัญ คือ เวียดนาม สิงคโปร์ และกัมพูชา ปริมาณรวมทั้งสิ้น 1,408 ตัน มูลค่ารวม 31 ล้านบาท (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2563)

ลองกองเป็นพืชอยู่ในวงศ์ Meliaceae จัดอยู่ในกลุ่ม non-climacteric fruit คือไม่สามารถนำมาบ่มให้สุกได้ จึงนิยมเก็บเกี่ยวภายหลังจากผลสุก เปลือกเปลี่ยนเป็นสีเหลืองแล้ว ผลลองกองสุกจะมีรสหวานอมเปรี้ยว มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดประมาณ 16-18 องศาบริกซ์ ($^{\circ}\text{Brix}$) (Venkatachalam and Meenune, 2012) มีกรดอินทรีย์ ได้แก่ maleic acid citric acid malic acid และ glycolic acid เป็นองค์ประกอบ (Chairgulprasert *et al.*, 2006) ภายหลังการเก็บเกี่ยวคุณภาพของลองกองสดจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง โดยหลังจากเก็บเกี่ยว 4-5 วัน เปลือกลองกองจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ผลเริ่มหลุดร่วงจากช่อ มีการสูญเสีย น้ำ เกิดกลิ่นรสผิดปกติและเน่าเสียได้ง่าย (Sangkasanya and Meenune, 2010) ทำให้ช่วงเดือนสิงหาคมถึงตุลาคมเป็นช่วงที่มีผลผลิตลองกองออกสู่ตลาดมากที่สุด (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2563) มีราคาจำหน่ายต่ำตามกลไกตลาด ผลลองกองที่มีลักษณะปรากฏไม่เป็นที่ต้องการจำนวนมากถูกคัดทิ้ง จากปัญหาข้างต้นจึงได้มีงานวิจัยมากมายศึกษาการใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลลองกองสด (Venkatachalam and Meenune, 2012; วาสนา และคณะ, 2557) และศึกษาการใช้ประโยชน์จากผลลองกองที่ไม่ผ่านมาตรฐานมีลักษณะปรากฏไม่เป็นที่ต้องการโดยการนำไปแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า เช่น ผลิตภัณฑลองกองแช่อิ่มอบแห้ง น้ำลองกองพร้อมดื่ม แยมและเยลลี่ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2558) และลองกองแผ่นอบแห้ง (ธิดารัตน์ และคณะ, 2560) เป็นต้น

ไซรัปผลไม้ (fruit syrup) หรือน้ำเชื่อมผลไม้ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยมีผลไม้เป็นส่วนประกอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 45 มีความข้นหนืดเป็นเนื้อเดียวกัน มีกลิ่นรสผลไม้และมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ไม่น้อยกว่า 65 องศาบริกซ์ ตามมาตรฐานของสถาบันมาตรฐานศรีลังกา (Sri Lanka Standards Institution; SLS 730) (มะลิวัลย์, 2554) มีค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (water activity: A_w) ต่ำ มีผลทำให้ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้เน่าเสียได้ ไซรัปผลไม้จึงเก็บรักษาไว้ได้นาน ปัจจุบันมีไซรัปทางการค้าแปรรูปจากผลไม้หลายชนิด เช่น ไซรัปเมเปิล ไซรัปอินทผลัม ไซรัปน้ำอ้อย นิยมนำไปเจือจางเป็นเครื่องดื่ม และใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์อาหารให้ความหวานและกลิ่นรสเฉพาะ (มะลิวัลย์, 2554; Alsenaien *et al.*, 2015) เมื่อพิจารณาสมบัติของลองกอง การนำไปแปรรูปเป็นไซรัปอาจเป็นแนวทางหนึ่งเพื่อช่วยแก้ไขปัญหาข้างต้นได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเตรียมผลลองกองด้วยเทคนิค sous-vide ต่อคุณภาพทางกายภาพ ศึกษาผลของระดับความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเอสเอร์ร่วมกับอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไซรัปลองกอง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไซรัปลองกองในระหว่างการเก็บรักษา โดยไซรัปลองกองที่เตรียมในการทดลองเป็นไซรัปที่ไม่มีการเติมน้ำตาลทรายหรือน้ำเชื่อม จึงเป็นสารให้ความหวานตามธรรมชาติทางเลือกหนึ่งที่มีความหวานและกลิ่นรสเฉพาะของลองกอง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบและการเก็บรักษา

ลองกองระยะบรีโคมแบบตัดสดเป็นข้อ ระยะสุก ผลสีเหลือง ไม่หลุดร่วง ชี้อจากอำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง คัดแยกผลลองกองที่ชำ เน่าเสียและเนื้อเยื่อฉีกขาดออก จากนั้นปอกเปลือก

ผลลองกองและนำผลลองกองบรรจุในถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส จนกระทั่งนำมาทดลองขึ้นต่อไป

2. ศึกษากระบวนการเตรียมน้ำลองกอง

การศึกษากระบวนการเตรียมน้ำลองกอง โดยแบ่งเป็น 3 ชุดการทดลอง ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 ชุดควบคุม ซึ่งเป็นตัวอย่างลองกองที่ปอกเปลือก บรรจุในถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

ชุดการทดลองที่ 2 ชุดที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน โดยนำลองกองที่ปอกเปลือกแช่ในสารละลายคลอรีนที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร บรรจุในถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส

ชุดการทดลองที่ 3 ชุดที่ลวกด้วยวิธี sous-vide โดยนำลองกองที่ปอกเปลือกแช่ในสารละลายคลอรีนที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร บรรจุในถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เมื่อทำการทดลองจึงนำผลลองกองไปบรรจุแบบสุญญากาศ แล้วทำละลายน้ำแข็งโดยเปิดน้ำไหลผ่าน จนอุณหภูมิถึงกลางประมาณ 25 ± 2 องศาเซลเซียส แล้วนำไปลวกด้วยวิธี sous-vide ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

นำลองกองทั้ง 3 ชุดการทดลองมาบิบบิ้นโดยใช้ผ้าขาวบาง จะได้ส่วนของน้ำลองกองและเนื้อลองกอง นำไปวิเคราะห์ค่าสี L^* , a^* และ b^* ค่าการส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เอนไซม์เพคตินเอสต่อผลผลิตของน้ำลองกอง

นำน้ำลองกองและเนื้อลองกองที่ผ่านการเตรียมโดยการลวกด้วยวิธี sous-vide ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที มาศึกษาปริมาณเอนไซม์เพคตินเอส (iKnowZyme Pectinase, บริษัท ริช ไบโอเทคโนโลยี จำกัด) อุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัดน้ำลองกองที่เหมาะสมที่ให้ผลผลิตสูงสุด โดยออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design) ที่มี 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเอส (X_1) อุณหภูมิในการสกัด (X_2) และระยะเวลาในการสกัด (X_3) โดยกำหนดรหัสของปัจจัย (coded variable) แทนค่าจริงของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง (real variable) แสดงดังตารางที่ 1 จากนั้นนำตัวอย่างที่สกัดด้วยเอนไซม์เพคตินเอสไปให้ความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที เพื่อหยุดการทำงานของเอนไซม์

4. ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของไซร้ปลองกอง

คัดเลือกสภาวะในการสกัดที่ทำให้ได้ผลผลิตของน้ำลองกองสูงสุดมาใช้ในการผลิตไซร้ปลองกอง แล้วนำน้ำลองกองที่ได้ไปประเหยน้ำด้วยวิธีระเหยแบบสุญญากาศโดยเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนได้ไซร้ปลองกองที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ 65-70 องศาบริกซ์ จากนั้นนำตัวอย่างไซร้ปลองกองที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าสี (L^* , a^* , b^*) โดยใช้เครื่องวัดสี konica minolta (รุ่น CR-20 S/N2001295, สหรัฐอเมริกา) และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solid; TSS) โดยใช้เครื่อง hand refractometer

ตารางที่ 1 ชุดการทดลองศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำลองกอง วางแผนการทดลองแบบ Box-Behnken design ที่มี 3 ปัจจัย

ชุดการทดลอง	รหัสของปัจจัย (coded variables)			ค่าจริงของปัจจัย (real variables)		
	ความเข้มข้นเอนไซม์ (X_1)	อุณหภูมิ (X_2)	ระยะเวลา (X_3)	ความเข้มข้นเอนไซม์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิ (นาท)	ระยะเวลา (นาท)
1	-1	0	1	0.50	40	240
2	1	1	0	1.00	50	180
3	0	0	0	0.75	40	180
4	0	1	-1	0.75	50	120
5	0	-1	1	0.75	30	240
6	1	-1	0	1.00	30	180
7	0	-1	-1	0.75	30	120
8	0	0	0	0.75	40	180
9	0	1	1	0.75	50	240
10	0	0	0	0.75	40	180
11	1	0	-1	1.00	40	120
12	1	0	1	1.00	40	240
13	-1	-1	0	0.50	30	180
14	-1	1	0	0.50	50	180
15	0	0	0	0.75	40	180
16	-1	0	-1	0.50	40	120
17	0	0	0	0.75	40	180

5. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไซรปลองกองในระหว่างการเก็บรักษา

ผลิตไซรปลองกองจากสภาวะที่คัดเลือกไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษา โดยเก็บรักษาไซรปลองกอง ประมาณ 30 กรัม บรรจุในขวดแก้วมีฝาปิด เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 วัน สุ่มเก็บตัวอย่างในวันที่ 0 15 30 และ 45 วัน เพื่อวิเคราะห์สมบัติของไซรปลองกองดังนี้

5.1 สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าสี ($L^* a^* b^*$) โดยรายงานเป็นค่าความแตกต่างของค่าสี (ΔE) (Tobolkova *et al.*, 2013) เมื่อเปรียบเทียบค่าสีกับวันที่ 0 โดยคำนวณได้ ดังนี้

$$\Delta E = \sqrt{(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2}$$

เมื่อ $L^*_1 a^*_1$ และ b^*_1 เป็นค่าสีของตัวอย่างเริ่มต้น

$L^*_2 a^*_2$ และ b^*_2 เป็นค่าสีของตัวอย่างที่ผ่านการเก็บรักษา ณ เวลาใด ๆ

5.2 สมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณความชื้น และปริมาณกรดทั้งหมด

5.3 สมบัติทางจุลินทรีย์ ได้แก่ ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ปริมาณยีสต์และรา

6. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การศึกษากระบวนการเตรียมตัวอย่างน้ำลองกองและการเปลี่ยนแปลงของไซรปลองกองในระหว่างการเก็บรักษา โดยทำการวางแผนการทดลองแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design) แต่ละสิ่งทดลองทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ analysis of variance (ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างโดยใช้ duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS สำหรับการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนห์เคน (Box-Behnken) วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป โดยการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-square: R^2) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

ผลการวิจัย

1. การศึกษาวิธีการเตรียมน้ำลองกอง

เมื่อเปรียบเทียบผลของการเตรียมผลลองกองโดยไม่ผ่านการล้างด้วยสารละลายคลอรีนและการให้ความร้อน (ชุดควบคุม) การเตรียมผลลองกองโดยการล้างด้วยสารละลายคลอรีนแต่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (ชุดไม่ผ่านการให้ความร้อน) และการเตรียมผลลองกองโดยการล้างด้วยสารละลายคลอรีนแล้วนำไปให้ความร้อนด้วยเทคนิค sous-vide ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที (ชุดการลวกด้วยวิธี sous-vide) ต่อลักษณะปรากฏของเนื้อและน้ำลองกอง พบว่าเนื้อและน้ำลองกองที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีไม่ผ่านการให้ความร้อน มีสีน้ำตาลซึ่งเหมือนกับชุดควบคุมเมื่อวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ขณะที่การเตรียมด้วยวิธีผ่านการลวกด้วยเทคนิค sous-vide จะได้น้ำลองกองที่มีลักษณะเป็นของเหลวข้นลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และไม่เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าสีพบว่าชุดควบคุมกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนมีค่า L^* a^* b^* และค่าการส่องผ่านของแสงไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการลวกด้วยเทคนิค sous-vide จะมีค่า L^* และค่าการส่องผ่านของแสงสูงกว่า (ตารางที่ 2) แต่พบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของชุดควบคุม (16 องศาบริกซ์) มีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนและตัวอย่างที่ผ่านการลวกด้วยเทคนิค sous-vide (14 องศาบริกซ์) สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง มีค่าช่วง 4.11-4.17 ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 2 ค่าสีและค่าการส่องผ่านของแสงของตัวอย่างน้ำลองกองที่เตรียมโดยวิธีแตกต่างกัน

ตัวอย่าง	ค่าสี			การส่องผ่าน ของแสง
	L*	a*	b*	
1. ชุดควบคุม	12.83±0.40 ^b	-1.15±0.34 ^a	10.65±1.90 ^a	1.02±0.07 ^b
2. ชุดไม่ผ่านการให้ความร้อน	13.42±0.17 ^{ab}	-1.06±0.37 ^a	10.92±2.05 ^a	1.16±0.04 ^b
3. ชุดการลวกด้วยวิธี sous-vide	13.87±0.05 ^a	-2.38±0.60 ^b	1.71±0.76 ^b	2.16±0.29 ^a

หมายเหตุ: - ตัวอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 3 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและความเป็นกรด-ด่าง ของตัวอย่างน้ำลองกองที่เตรียมโดยวิธีแตกต่างกัน

ตัวอย่าง	ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์)	ความเป็นกรด-ด่าง (pH)
1. ชุดควบคุม	16.0±0.0 ^a	4.17±0.00 ^a
2. ชุดไม่ผ่านการให้ความร้อน	14.0±0.0 ^b	4.11±0.00 ^a
3. ชุดการลวกด้วยวิธี sous-vide	14.0±0.0 ^b	4.16±0.00 ^a

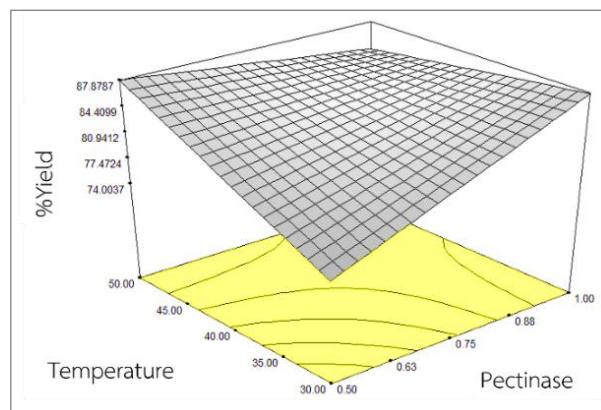
หมายเหตุ: - ตัวอักษรต่างกันแสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

2. ศึกษาผลของความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเอส อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยเนื้อลองกองต่อผลผลิตของน้ำลองกอง

เมื่อนำลองกองที่ผ่านกระบวนการเตรียมด้วยวิธี sous-vide มาบดคั้นเอาส่วนเนื้อและน้ำมาศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเอนไซม์เพคตินเอส อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด และระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดที่ระดับต่าง ๆ จากการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่ 3 8 10 15 และ 17 ซึ่งใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเอสที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.75 อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด 40 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด 180 นาที จะให้ผลผลิตน้ำลองกองช่วงร้อยละ 89.5-91.0 โดยปริมาตร (ตารางที่ 4) ซึ่งเป็นช่วงผลผลิตน้ำลองกองที่สูงกว่าการใช้ปัจจัยในการสกัดในชุดการทดลองอื่น ๆ และการเพิ่มระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดเป็น 240 นาที ไม่มีผลให้ผลผลิตน้ำลองกองเพิ่มขึ้น และเมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบที่ระยะเวลาการสกัดเท่ากันที่ 180 นาที พบว่าทั้งการลดและการเพิ่มอุณหภูมิจาก 40 องศาเซลเซียสมีแนวโน้มทำให้ผลผลิตน้ำลองกองลดลง แต่การเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเอสจากร้อยละ 0.50 เป็น 0.75 และ 1.00 มีแนวโน้มทำให้ผลผลิตน้ำลองกองเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 1) ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเอสที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.75 อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด 40 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด 180 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เอนไซม์เพคตินเอสในการเตรียมน้ำลองกองสำหรับการทำไซรับลองกองในขั้นต่อไป

ตารางที่ 4 ผลของความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเนส อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดต่อผลผลิตน้ำตาลองกองที่สกัดได้ เมื่อวางแผนการทดลองแบบ Box-Behnken design

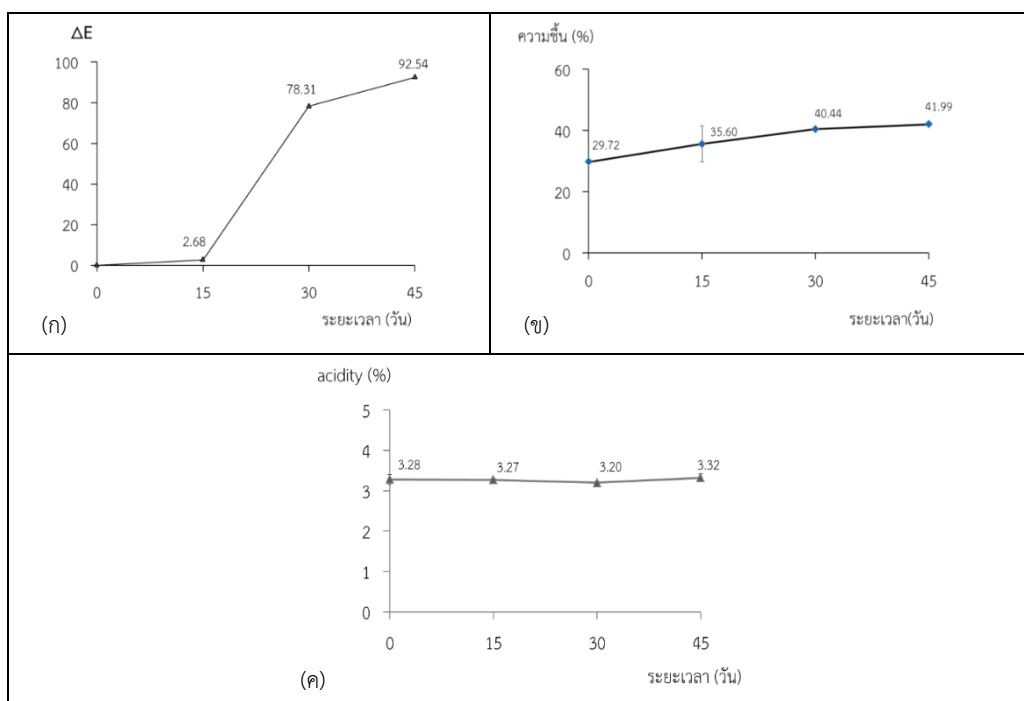
ชุดการทดลองที่	ปัจจัยที่ศึกษา			ผลผลิตน้ำตาลองกอง (ร้อยละโดยปริมาตร)
	ความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเนส (X_1 : ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (X_2 : องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด (X_3 : นาที)	
1	0.50	40	240	85.0
2	1.00	50	180	85.0
3	0.75	40	180	91.0
4	0.75	50	120	74.5
5	0.75	30	240	76.0
6	1.00	30	180	79.0
7	0.75	30	120	76.0
8	0.75	40	180	90.0
9	0.75	50	240	86.0
10	0.75	40	180	89.5
11	1.00	40	120	73.0
12	1.00	40	240	87.0
13	0.50	30	180	82.0
14	0.50	50	180	80.0
15	0.75	40	180	89.5
16	0.50	40	120	85.0
17	0.75	40	180	90.0



ภาพที่ 1 ผลผลิตน้ำตาลองกองที่สกัดโดยใช้เอนไซม์เพคตินเนสความเข้มข้นต่าง ๆ ร่วมกับอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดที่แตกต่างกัน เมื่อใช้ระยะเวลาในการสกัด 180 นาที

3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไซรปลองกองในระหว่างการเก็บรักษา

เมื่อนำตัวอย่างน้ำลองกองที่เตรียมได้ไประเหยด้วยวิธีระเหยแบบสุญญากาศโดยเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนได้ไซรปลองกองที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ 65-70 องศาบริกซ์ จะได้ไซรปลองกองที่มีสีน้ำตาลอ่อน ลักษณะใส มีความข้นหนืด มีรสหวานและกลิ่นรสเฉพาะของลองกอง เนื่องจากการระเหยน้ำหรือการทำให้เข้มข้นภายใต้สภาวะสุญญากาศทำให้อาหารสัมผัสกับความร้อนที่ไม่สูง น้ำจากอาหารสามารถระเหยได้เร็ว ดังนั้นจึงยังคงรักษากลิ่นรสและลักษณะปรากฏของตัวอย่างอาหารได้ดี (Potter and Hotchkiss, 1995) ในการเก็บรักษาไซรปลองกองที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 วัน โดยเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ในวันที่ 0 15 30 และ 45 วัน พบว่าไซรปลองกองมีการเปลี่ยนแปลงของสีอย่างรวดเร็ว จะเห็นว่าค่า ΔE ซึ่งคำนวณโดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าสี L^* a^* และ b^* กับวันเริ่มต้น (วันที่ 0) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังการเก็บ 15 วันเป็นต้นไป ซึ่งมีค่า ΔE เป็น 78.31 และ 92.54 เมื่อเก็บรักษานาน 30 และ 45 วัน ตามลำดับ ดังภาพที่ 2 (ก) ซึ่งจะพบว่าไซรปลองกองมีสีคล้ำ เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้พบว่าค่าความชื้นของไซรปลองกองเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 29.72 เป็น 41.99 ดังภาพที่ 2 (ข) แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณกรดซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 3.2-3.3 ดังภาพที่ 2 (ค) ค่าความเป็นกรด-ด่างซึ่งมีค่าเป็น 4 และมีปริมาณแบคทีเรียทั้งหมดและปริมาณยีสต์และราน้อยกว่า 3×10^2 โคโลนีต่อกรัมตลอดการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 วัน



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของค่าสี (ΔE) (ก) ความชื้น (ข) และปริมาณกรด (ค) ของไซรปลองกองเมื่อเก็บการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 วัน

การอภิปรายผลการวิจัย

จากการทดลองเพื่อศึกษาวิธีการเตรียมน้ำลอมกอนจะเห็นได้ว่าตัวอย่างลอมกอนในชุดควบคุม และชุดที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์จะเกิดขึ้นเมื่อเนื้อเยื่อพืชหรือเซลล์ถูกทำลายทางกล เช่น การปอกเปลือก การหั่น เป็นต้น ทำให้สารประกอบโมโนฟีนอลที่อยู่ในเซลล์พืชสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศในสภาวะที่มีเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (polyphenoloxidase: PPO) ทำให้ได้เป็นสาร o-diphenol และถูกออกซิไดซ์ต่อเป็น o-quinone ซึ่งสารนี้สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนต่อเนื่องกับสารประกอบฟีนอลหรือกรดอะมิโน ได้เป็นสารประกอบสีน้ำตาล (นิธิยา, 2545) การควบคุมปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งอาจเลือกให้เหมาะสมกับตัวอย่างอาหาร เช่น การใช้ความร้อนหรือสารเคมี ในการทำลายหรือยับยั้งเอนไซม์ การกำจัดออกซิเจน หรือการเปลี่ยนแปลงสัณฐานที่มีตามธรรมชาติ (นิธิยา, 2545) ดังนั้นจากการทดลองพบว่าการเตรียมน้ำลอมกอนด้วยวิธีผ่านการลวกด้วยเทคนิค sous-vide ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เป็นสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้ สำหรับ sous-vide เป็นเทคนิคการให้ความร้อนโดยนำอาหาร มาบรรจุในถุงพลาสติกแบบปิดสนิทและบรรจุแบบสุญญากาศ แล้วนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อน ที่อุณหภูมิช่วง 65-95 องศาเซลเซียส (Zavadlav *et al.*, 2020) ระดับอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนอาจขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบและวัตถุประสงค์ของการให้ความร้อน สำหรับวัตถุดิบกลุ่มพืช ซึ่งอุดมไปด้วยวิตามิน เกลือแร่ และสารพฤกษเคมีต่าง ๆ ซึ่งละลายน้ำได้ดี อาจเกิดการสูญเสียได้ง่าย หากให้ความร้อนแบบดั้งเดิม เนื่องจากผนังเซลล์พืชถูกทำลายทำให้สารต่าง ๆ ไหลออกจากเซลล์ แต่เทคนิค sous-vide สามารถลดการสูญเสียได้ (Baldwin, 2012) จากการประยุกต์ใช้เทคนิค Sous-vide ในการลวกผักพบว่าสามารถลดปฏิกิริยาออกซิเดชันและลดการสูญเสียสารสำคัญที่ละลายน้ำได้ (Kuriakose *et al.*, 2016) ดังนั้นเทคนิค sous-vide จึงนำมาใช้ในการเตรียมน้ำลอมกอนก่อนบีบคั้นแยกน้ำ และเนื้อ ซึ่งสามารถยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลที่อาจเกิดจากการทำงานของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสได้ เพื่อป้องกันมิให้ผลิตภัณฑ์ที่รับลองกอนที่จะพัฒนาต่อไปมีสีน้ำตาลดำคล้ำจึงคัดเลือกวิธีการนี้ในการเตรียมน้ำลอมกอน

เมื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเนส อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยเนื้อลอมกอนต่อผลผลิตของน้ำลอมกอนโดยมีสมมติฐานคือการใช้เอนไซม์เพคตินเนสสามารถสกัดน้ำลอมกอนได้ผลผลิตสูง เนื่องจากเอนไซม์เพคตินเนสสามารถย่อยสลายเพคตินซึ่งเป็นองค์ประกอบในผนังเซลล์พืช โดยทั่วไปผนังเซลล์ของผลไม้ประกอบด้วยเซลลูโลส เพคติน และเฮมิเซลลูโลส (Kumar, 2015) ดังนั้นการใช้เอนไซม์เพื่อย่อยสลายหรือกำจัดเซลลูโลส เพคติน หรือเฮมิเซลลูโลสจะทำให้คุณภาพของน้ำผลไม้ดีขึ้นและเพิ่มผลผลิตในการสกัด (Nawawi *et al.*, 2017) โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้ มีการประยุกต์ใช้เอนไซม์เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดน้ำจากผลไม้ Tochi *et al.* (2009) ใช้เอนไซม์เพคตินเนสร่วมกับเฮมิเซลลูโลสในการเตรียมน้ำสับปะรด โดยบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่าทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 9-13 น้ำสับปะรดมีความหนืดลดลงและสีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไม่ใช้เอนไซม์ นอกจากนี้ยังใช้เอนไซม์ในขั้นตอนการเตรียมน้ำผลไม้สำหรับผลิตไซรัปผลไม้ Phomkong

et al. (2015) ได้ศึกษาการผลิตไซรัปจากขนุน จำนวน 3 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ทองประเสริฐ พันธุ์มาเลเซีย และพันธุ์พื้นเมืองของจังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งทำการผลิตไซรัปโดยการเติมเอนไซม์ทางการค้า ซึ่งประกอบด้วยเอนไซม์ผสมหลายชนิด ได้แก่ เพคติเนส เซลลูเลส อัลฟาอะไมเลส และโปรติเอส โดยทำการบ่มที่ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ก่อนนำไปประเหยในสภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนได้ไซรัปที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเป็น 72 องศาบริกซ์ โดยไซรัปจากขนุนพันธุ์มาเลเซียมีน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด ไซรัปจากขนุนพันธุ์ทองประเสริฐมีปริมาณสารสำคัญสูงที่สุด El-Shamouby *et al.* (2009) ศึกษาการใช้เอนไซม์ผสมของเพคติเนสและเซลลูเลส ความเข้มข้นร้อยละ 1 ต่อน้ำหนักอินทผลัมในสัปดาห์น้ำตาลเพื่อผลิตไซรัปอินทผลัมพบว่าเมื่ออัตราการสกัดมากกว่าร้อยละ 80 เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำตาลอินทผลัมในอัตรา 3 ต่อ 1 และบ่มกับเอนไซม์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง โดยทำให้ไซรัปมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเป็นร้อยละ 65.6-70.7 ในขณะที่การไม่เติมเอนไซม์จะได้ไซรัปที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเป็นร้อยละ 50.5-56.3 นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้เอนไซม์เพคติเนสและเซลลูเลสในการผลิตไซรัปอินทผลัมซึ่งสามารถสกัดน้ำตาลจากผลอินทผลัมได้ดี ลดความหนืดของสารละลายที่สกัดได้ และทำให้ไซรัปอินทผลัมที่ได้มีความใสเพิ่มขึ้น (Abbes *et al.*, 2015; Ahdno and Jafarizadeh-Malmiri, 2017)

เมื่อนำตัวอย่างน้ำตาลองที่เตรียมได้ประเหยด้วยวิธีระเหยแบบสุญญากาศโดยเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Surin *et al.* (2014) ได้เปรียบเทียบการผลิตไซรัปลำไย 3 วิธี ได้แก่ การให้ความร้อนโดยตรง การใช้ไอน้ำ และการระเหยภายใต้สภาวะสุญญากาศ พบว่าการผลิตไซรัปลำไยโดยการให้ความร้อนโดยตรงที่อุณหภูมิสูงกว่า 180 องศาเซลเซียส ทำให้น้ำตาลซูโครสถูกย่อยเป็นกลูโคสและฟรุคโตส ซึ่งทำให้โปรตอนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ไซรัปมีค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำกว่าการผลิตที่ควบคุมไม่ให้อุณหภูมิเกิน 80 องศาเซลเซียส โดยการใช้สภาวะสุญญากาศร่วม นอกจากนี้ไซรัปลำไยมีสีน้ำตาล-แดงเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดซึ่งเป็นปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ทำให้เกิดสารเมลานอยดินและสารประกอบฟีนอลิก ดังนั้นการระเหยภายใต้สภาวะสุญญากาศมีความเหมาะสมในการผลิตไซรัปลำไยเนื่องจากให้กลิ่นรสที่ดี สีน้ำตาลอ่อน และความหวานที่เป็นที่ยอมรับ (Surin *et al.*, 2014) และสามารถประยุกต์สำหรับการระเหยน้ำในการผลิตไซรัปจากผลไม้อื่น ๆ ได้

จากการเก็บรักษาไซรัปลองกองที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 วัน พบว่าไซรัปลองกองมีการเปลี่ยนแปลงของสีอย่างรวดเร็วซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Farrokhi *et al.* (2012) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษาซูโครสไซรัปแบบ light syrup ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณ 30 องศาบริกซ์ และ thick syrup ซึ่งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดมากกว่า 50 องศาบริกซ์ ที่ผลิตจากหัวบีท (sugar beet) โดยเก็บตัวอย่างทุก 22 วัน เพื่อวิเคราะห์ค่าคุณภาพทางเคมีและกายภาพ โดยวัดค่าสีจากการวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร พบว่าค่าสีของไซรัปทั้งแบบ light syrup และ thick syrup มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น และพบการเปลี่ยนแปลงค่าสีอย่างชัดเจนเมื่อเก็บรักษาหลัง 22 วัน โดยส่วนใหญ่การเปลี่ยนแปลงสีของน้ำเชื่อมหรือไซรัปเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นทำให้มีสีคล้ำหรือสีเข้มขึ้น ซึ่งอาจเกิดสภาวะในการเก็บ

รักษาที่ไม่เหมาะสมโดยเฉพาะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง (Farrokhi *et al.*, 2012) นอกจากนี้ Solis-Fuentes *et al.* (2016) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของฟรุคโตสไซรัปในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องพบว่ามีความชื้นขึ้น ในขณะที่การเก็บรักษาที่ 8 องศาเซลเซียส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ และ Thakur *et al.* (2018) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไซรัปมะขามป้อมที่ได้จากการเตรียมด้วยเนื้อผลไม้ร้อยละ 35 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณ 65 องศาบริกซ์ โดยเก็บรักษาในขวดแก้วและขวด PET (polyethylene terephthalate) ที่อุณหภูมิห้องและในตู้เย็น เป็นเวลา 6 เดือน พบว่าการเก็บรักษาไซรัปที่อุณหภูมิต่ำทำให้ไซรัปมะขามป้อมเกิดการเปลี่ยนแปลงช้ากว่าอุณหภูมิห้อง แต่ชนิดของขวดไม่มีผลต่อการเก็บรักษา จากการที่ไซรัปมีสีคล้ำหรือสีเข้มในระหว่างการเก็บรักษาเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์หรือปฏิกิริยาเมลลาร์ด ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อน้ำตาลรีดิวซ์ได้รับความร้อนในสภาวะที่มีน้ำกับเอมีน แล้วจะเกิดสารประกอบต่าง ๆ ซึ่งมีผลต่อสี กลิ่น และรสชาติของอาหาร โดยน้ำตาลรีดิวซ์จะทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีโนในโมเลกุลของแอมโมเนีย กรดอะมิโน หรือโปรตีน ได้เป็นไกลโคซิลเอมีน และจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจนได้สารสีน้ำตาล เกิดสารใหม่ ได้แก่ ไฮดรอกซิเมทิลเฟอฟูรัล สามารถวัดความเข้มของสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นโดยวัดที่ความยาวคลื่นช่วง 420-490 นาโนเมตร การยับยั้งปฏิกิริยาเมลลาร์ดสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกำจัดสารตั้งต้น ได้แก่ น้ำตาลและกรดอะมิโน การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ การลดพีเอช การใช้สารเคมี เช่น สารประกอบ ซัลไฟต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น (นิธิยา, 2545)

สรุปผลการวิจัย

วิธีการเตรียมเนื้อลองกองก่อนนำไปสกัดด้วยเอนไซม์เพคตินเอสที่เหมาะสม คือ วิธี sous-vide เนื่องจากสามารถยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์ได้ ทำให้น้ำลองกองมีสีน้ำตาลน้อยกว่าวิธีแบบคั้นสด สภาวะที่เหมาะสมในการใช้เอนไซม์เพคตินเอสในการเตรียมน้ำลองกองคือ การใช้เอนไซม์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.75 อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 180 นาที จะให้ผลผลิตน้ำลองกองสูงที่สุด เมื่อนำน้ำลองกองมาระเหยน้ำในสภาวะสุญญากาศเป็นไซรัปและเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 45 วัน พบว่าไซรัปลองกองมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านสีอย่างรวดเร็วจากการศึกษาครั้งนี้จะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการผลิตไซรัปลองกอง เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับลองกอง เพิ่มความหลากหลายของผลิตภัณฑ์แปรรูปจากลองกอง ซึ่งมีประโยชน์ต่อการเพิ่มศักยภาพของเกษตรกรผู้ปลูกลองกอง วิชาหกิจชุมชนหรือผู้ประกอบการเชิงพาณิชย์ต่าง ๆ ได้ ดังนั้น เพื่อเป็นการพัฒนาให้ผลิตภัณฑ์ไซรัปลองกองมีความคงตัวในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง จึงต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ ซึ่งอาจใช้ได้หลายวิธี เช่น การกำจัดสารตั้งต้น การลดค่าความเป็นกรด-ด่าง การใช้สารเคมี เช่น สารประกอบซัลไฟต์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น นอกจากการการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี สารสำคัญในไซรัปลองกอง และการยอมรับทางประสาทสัมผัสก็ยังคงจำเป็นสำหรับการพัฒนาไซรัปลองกองในขั้นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณแหล่งทุนซึ่งสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนา มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ภายใต้สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปี 2561 ขอขอบคุณ คณะอุตสาหกรรมเกษตรและชีวภาพ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง สำหรับการสนับสนุน งานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมส่งเสริมการเกษตร. (2563). *หนังสือการจัดชั้นคุณภาพของผลไม้ (ทุเรียน มังคุด เงาะ ลองกอง ลำไย และลิ้นจี่)*. สืบค้นเมื่อ 11 กุมภาพันธ์ 2564, จาก: <https://esc.doae.go.th/wp-content/uploads/2020/08/%E0%B8%AB%E0%B8%99%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%88%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B8%8A%E0%B8%B1%E0%B9%89%E0%B8%99%E0%B8%84%E0%B8%B8%E0%B8%93%E0%B8%A0%E0%B8%B2%E0%B8%9E%E0%B8%9C%E0%B8%A5%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%89.pdf>.
- ธิดารัตน์ จุทอง ภัทรดา สมพงษ์ และอุราภรณ์ เรืองวัชรินทร์. (2560). การพัฒนาผลิตภัณฑ์ลองกองแผ่นอบแห้งเสริม *Lactobacillus casei* TISTR 1463 ที่ห่อหุ้มด้วยอัลจินตด้วยวิธีเอนแคปซูเลชัน. *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์*, 9(9), 63-72.
- นิธิยา รัตนานพนธ์. (2545). *เคมีอาหาร*. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- มะลิวัลย์ ไชโย. (2554). *การเปรียบเทียบคุณภาพของไซรัปกล้วยที่ผลิตจากน้ำตาลทรายและน้ำอ้อย*. สารนิพนธ์วิทยาศาสตรศึกษามหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ.
- วาสนา พิทักษ์พล ศศิธร สวยสม และหทัยทิพย์ นิมิตรเกียรติไกล. (2557). ผลของเมทิลจัสโมเนตและไคโทซานต่อคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลลองกอง. *แก่นเกษตร*, 42(ฉบับพิเศษ), 589-595.
- สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. (2558). *ผลิตภัณฑ์แปรรูปลองกอง*. สืบค้นเมื่อ 22 มิถุนายน 2564, จาก: <http://waa.inter.nstda.or.th/stks/pub/2015/20150911-Technology-show%202-2558-Food-Beverage-10.pdf>.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2562). *ลองกอง: เนื้อที่ยืนต้น เนื้อที่ให้ผล ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ ปี 2562*. สืบค้นเมื่อ 11 กุมภาพันธ์ 2564, จาก: [http://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/longkong62\(1\).pdf](http://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/longkong62(1).pdf).
- Abbes, F., Masmoudi, M., Kchaou, W., Danthine, S., Blecker, C., Attia, H. and Besbes, S. (2015). Effect of enzymatic treatment on rheological properties, glass temperature transition and microstructure of date syrup. *LWT-Food Science and Technology*, 60(1), 339-345.

- Ahdno, H. and Jafarizadeh-Malmiri, H. (2017). Development of a sequenced enzymatically pre-treatment and filter pre-coating process to clarify date syrup. *Food and Bioproducts Processing*, 101, 193-204.
- Alsenaien, W. A. A. , Alamer, R. A. , Tang, Z. X. , Albahrani, S. A. A. , Al-Ghannam, M. A. and Aleid, S. M. (2015). Substitution of sugar with dates powder and date syrup in cookies making. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 8(1), 8-13.
- Baldwin, D.E. (2012). Sous-vide cooking: A review. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 1(1), 15-30.
- Chairgulprasert, V., Krisornpornsan, B. and Hamad, A. (2006). Chemical constituents of the essential oil and organic acids from longkong (*Aglaia dookkoo* Griff.) fruits. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 28(2), 321-326.
- El-Sharnouby, G.A., Al-Eid, S.M. and Al-Otaibi, M.M. (2009). Utilization of enzymes in the production of liquid sugar from dates. *African Journal of Biochemistry Research*, 3(3), 041-047.
- Farrokhi, F., Mizani, M. and Honarvar, M. (2012). Study of probable physicochemical changes during the storage of light and thick sucrose syrups. *World Applied Sciences Journal*, 18(5), 715-721.
- Kuriakose, S.P., Krishnan, A. and Rawson, A. (2016). Advantages and limitations of sous vide processing of vegetables. *International Journal of Science, Environment*, 5(4), 1964-1967.
- Kumar, S. (2015). Role of enzymes in fruit juice processing and its quality enhancement. *Advanced in Applied Science Research*, 6(6), 114-124.
- Nawawi, M.H., Mohammad, R., Tahir, P. and Saad, W.Z. (2017). Extracellular xylanopectinolytic enzymes by *Bacillus subtilis* ADI1 from EFB's compost. *International Scholarly Research Notices*, doi: <https://doi.org/10.1155/2017/7831954>.
- Phomkong, W., Wachum, M. and Inree, R. (2015). Quality Jackfruit syrup using different jackfruit varieties. *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, 17(2), 9-16.
- Potter, N.N. and Hotchkiss, J.H. (1995). *Food Science*. (5th ed). New York: Chapman & Hall.
- Sangkasanya, S. and Meenune, M. (2010). Physical, chemical and sensory quality of longkong (*Aglaia dookkoo* Griff.) as affected by storage at different atmospheres. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, 3(1), 64-74.

- Solis-Fuentes, J.A., Ayala-Tirado, R.C. and Duran-de-Bazua, M.C. (2016). Thermal and storage stability of color in juice and fructose syrup sugar cane. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 75(2), 82-88.
- Surin, S., Thakeow, P., Seesuriyachan, P., Angeli, S. and Phimolsiripol, Y. (2014). Effect of extraction and concentration processes on properties of Longan syrup. *Journal of Food Science and Technology*, 5(19), 2062-2069.
- Thakur, N.S., Thakur, N., Hamid, H. and Thakur, A. (2018). Studied on development and storage quality evaluation of vitamin C rich syrup prepared from wild aonla (*Phyllanthus emblica* L.) fruits. *The Pharma Innovation Journal*, 7(2), 167-172.
- Tobolkova, B., Durec, J., Belajova, E., Mihalikova, M., Polovka, M., Suhaj, M., Dasko, L. and Simko, P. (2013). Effect of light conditions on physico-chemical properties of pineapple juice with addition of small pineapple pieces during storage. *Journal of Food and Nutrition Research*, 52(3), 181-190.
- Tochi, B.N., Wang, Z., Xu, S.Y. and Zhang, W. (2009). The influence of a pectinase and pectinase/hemicellulases enzyme preparations on percentage pineapple juice recovery, particulates and sensory attributes. *Pakistan Journal of Nutrition*, 8(8), 1184-1189.
- Venkatachalam, K. and Meenune, M. (2012). Physical and chemical quality changes of longkong (*Aglaia dookoo* Griff.) during passive modified atmospheric storage. *International Food Research Journal*, 19(3), 795-800.
- Zavadlav, S., Blaží, M., Van de Velde, F., Vignatti, C., Fenoglio, C., Piagentini, A.M., Pirovani, M.E., Perotti, C.M., Kovacevic, D.B. and Putnik, P. (2020). Sous-vide as a technique for preparing healthy and high- quality vegetable and seafood products. *Foods*, 9(11), 1537, doi: <https://doi.org/10.3390/foods9111537>.

ผลของสูตรอาหาร สารควบคุมการเจริญเติบโต และชนิดของชิ้นส่วนพืชต่อ
การเพิ่มปริมาณกระบองเพชรสกุลแมมมิลลาเรียและเฟโรแคคตัส
Effect of Culture Media, Plant Growth Regulators and Types of
Explant on Proliferation of the Genus *Mammillaria* and *Ferocactus*

อมรรณ แก้วยัง¹ วัศพล บัวจันทร์¹ ผกัรัตน์ โรจน์ดวง^{1,3*} สุภาวดี รามสูตร^{2,3}
และมันทกา วีระพงศ์^{2,3}

Amornwan Keawyoung¹, Watsapon Buajun¹, Phakarat Rotduang^{1,3*}
Supawadee Ramasoot^{2,3} and Mantaka Werapong^{2,3}

บทคัดย่อ

การเพาะเลี้ยงชิ้นส่วนของกระบองเพชรสกุลแมมมิลลาเรียและเฟโรแคคตัส มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดชิ้นส่วนพืชและสูตรอาหารต่อการเจริญเติบโตของกระบองเพชรสกุลแมมมิลลาเรียและเฟโรแคคตัส หลังจากเพาะเลี้ยง 4 สัปดาห์ พบว่าต้นอ่อนของ *Mammillaria plumose* Pink Flower (ขนาด 5 มิลลิเมตร) แบบเต็ม (full) และต้นอ่อนของ *M. microthele* (ขนาด 5 มิลลิเมตร) แบบผ่าครึ่ง (half) ที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS (Murashige and Skoog) ½MS และ ¼MS มีอัตราการรอดชีวิตสูงสุด 100 เปอร์เซ็นต์ *M. microthele* (ขนาด 5 มิลลิเมตร) แบบเต็มที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร ½MS และ ¼MS มีอัตราการรอดชีวิตสูงสุด 100 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ต้นอ่อนของ *Ferocactus cylindraceus* (ขนาด 5 มิลลิเมตร) แบบผ่าครึ่งที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS และ ¼MS และต้นอ่อนของ *F. cylindraceus* (ขนาด 5 มิลลิเมตร) แบบเต็มที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS และ ¼MS มีอัตราการรอดชีวิตสูงสุด 100 เปอร์เซ็นต์ หลังจากเพาะเลี้ยง 12 สัปดาห์ พบว่า *M. plumosa* Pink Flower แบบผ่าครึ่งและแบบเต็มมีการเจริญเติบโตได้ดีที่สุดในอาหารสูตร ½MS ส่วน *M. microthele* แบบผ่าครึ่งและแบบเต็มมีการเจริญเติบโตได้ดีในอาหารสูตร ¼MS และ MS สำหรับ *F. cylindraceus* แบบผ่าครึ่งและแบบเต็มมีการเจริญเติบโตได้ดีในสูตรอาหาร ½MS และ MS สำหรับการศึกษาผลของระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของ BA (N₆-Benzyladenine) ต่อการชักนำยอดและการเพิ่มปริมาณ

¹ สาขาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

² สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

³ หน่วยวิจัยความหลากหลายและเทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตร

* Corresponding author e-mail: phakarat.r@gmail.com

Received: 1 February 2021, Revised: 18 May 2021, Accepted: 20 May 2021

กระบองเพชร โดยนำแคลลัสของ *M. plumose* Pink Flower และ *M. microthele* 0.5 กรัม มาเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS เติม BA เข้มข้น 0.0 0.5 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากเพาะเลี้ยง 4 สัปดาห์ พบว่า *M. plumose* Pink Flower และ *M. microthele* ที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS เติม BA 1 มิลลิกรัมต่อลิตร มีน้ำหนักแคลลัสมากที่สุด 4.44 กรัม และ 5.15 กรัม ตามลำดับ ส่วน *M. plumosa* Pink Flower และ *M. microthele* ที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS เติม BA เข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการสร้างยอดสูงสุด 1.56 ยอดต่อชิ้นส่วน

คำสำคัญ: แมมมิลลาเรีย เฟโรแคคตัส N_6 -Benzyladenine (BA) การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ แคลลัส

Abstract

In vitro cactus propagation of the genus *Mamillaria* and *Ferocactus* were to study types of explant and culture media on plant growth of this objective studies. The explants (0.5 mm size) of two genus cactus were cut and uncut longingly with a sharp sterilized surgical blade and cultured on MS (Murashige and Skoog), $\frac{1}{2}$ MS and $\frac{1}{4}$ MS medium. After 4 weeks of culture, the result showed that the plantlet of *Mammillaria plumose* Pink Flower (0.5 mm size) was uncut longingly with a sharp sterilized surgical blade and the plantlet of *M. microthele* (0.5 mm size) was cut longingly with a sharp sterilized surgical blade cultured on MS, $\frac{1}{2}$ MS and $\frac{1}{4}$ MS medium gave the highest survival rate at 100%. The plantlet of *M. microthele* (0.5 mm size) was uncut longingly with a sharp sterilized surgical blade cultured on $\frac{1}{2}$ MS and $\frac{1}{4}$ MS medium gave the highest survival rate at 100%. While the plantlet of *Ferocactus cylindraceus* (0.5 mm size) was cut longingly with a sharp sterilized surgical blade cultured on MS and $\frac{1}{4}$ MS medium and the plantlet of *F. cylindraceus* (0.5 mm size) was uncut longingly with a sharp sterilized surgical blade cultured on MS and $\frac{1}{4}$ MS gave the highest survival rate at 100%. After 12 weeks of culture, the result showed that *M. plumosa* Pink Flower was cut and uncut longingly with a sharp sterilized surgical blade cultured on $\frac{1}{2}$ MS medium gave the highest plant growth. While *M. microthele* was cut and uncut longingly with a sharp sterilized surgical blade cultured on $\frac{1}{4}$ MS and MS medium gave the highest plant growth. For *F. cylindraceus* was cut and uncut longingly with a sharp sterilized surgical blade cultured on $\frac{1}{2}$ MS and MS medium gave the highest plant growth. For effect of various concentration of BA (N_6 -Benzyladenine) on shoot induction and cactus proliferation. The callus (0.5 g) of *M. plumose* Pink Flower and *M. microthele* were cultured on MS medium supplemented

with 0.0, 0.5 and 1.0 mg/L. After 4 weeks of culture, the result showed that *M. Plumose* Pink Flower and *M. microthele* were cultured on MS medium supplemented with 1 mg/L BA gave the highest of fresh weight at 4.44 g and 5.15 g, respectively. While *M. plumosa* Pink Flower and *M. microthele* were cultured on MS medium supplemented with 0.5 mg/L BA gave the highest shoot formation at 1.56 shoots/explant.

Keywords: *Mammillaria*, *Ferocactus*, N₆-Benzyladenine (BA), Tissue culture, Callus

บทนำ

กระบองเพชรสกุลแมมมิลลาเรีย (*Mammillaria*) มีมากกว่า 200 สายพันธุ์ เจริญเติบโตได้ทั้งแบบเดี่ยวและแบบกลุ่ม บางต้นสูงกว่า 3 ฟุต บางสายพันธุ์ต้นโตเต็มวัยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6-8 นิ้ว สูง 4-6 นิ้ว ลักษณะดอกส่วนใหญ่เป็นสีชมพู มีไม่กี่สายพันธุ์ที่ออกดอกสีสดฉูดฉาดมีหนามมาก แต่บางชนิดมีหนามสั้นและไม่แหลม เป็นสกุลที่พบเห็นได้ทั่วไปตามร้านค้า ได้รับความนิยมมากที่สุด เพราะสามารถออกดอกได้ จึงนิยมเลี้ยงกันมาก (ภวพล, 2562) ส่วนกระบองเพชรสกุลเฟโรแคตัส (*Ferocactus*) มีอยู่ประมาณ 35 สายพันธุ์ มีดอกเมื่ออายุมาก มีถิ่นกำเนิดอยู่ทางตะวันออกเฉียงใต้ของอเมริกาและเม็กซิโก รูปร่างกลมแป้นหรือกลมเตี้ย บางชนิดสูงได้ถึง 3 เมตร สันลำต้นเป็นเหลี่ยม ๆ มีร่องลึก สันหนามไม่แยกกัน สีลำต้นสีเขียวเข้มถึงสีเขียวอมฟ้า ลำต้นเดี่ยว ต้นอ่อนไม่มีหน่อ เว้นแต่ชนิดเฟโรแคตัสโรบัสตัสและเฟโรแคตัสฟลาโวไวเรนที่สามารถแตกหน่อได้ตั้งแต่อายุยังน้อย ต้นหนามค่อนข้างใหญ่ มีหนามด้านข้างและหนามกลาง มีลักษณะโค้งเป็นตะขอ หนามมีหลายสี เช่น เหลืองชมพู ส้มหรือแสด และแดง (วชิรพงศ์, 2540)

เนื่องจากกระบองเพชรสกุลแมมมิลลาเรียและเฟโรแคตัสเป็นที่ต้องการทางตลาดสูง (ภวพล, 2560) เพราะเป็นไม้ประดับที่มีความสวยงาม แต่มีการขยายพันธุ์ล่าช้า ปกติจะขยายพันธุ์ด้วยการปักชำ การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ และเสี่ยงต่อการเกิดโรคพืช (เศรษฐมนตร์, 2557) จึงมีการขยายพันธุ์ด้วยเทคนิควิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อให้มีจำนวนมากในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชเป็นศาสตร์ด้านเทคโนโลยีชีวภาพและมีการพัฒนาอย่างกว้างขวาง ปัจจุบันมีการนำไปใช้ในด้านการปรับปรุงพันธุ์และขยายพันธุ์พืชในเชิงการค้า (สุภาวดี, 2559) โดยเฉพาะการเพาะเลี้ยงแคลลัส (callus) สามารถขยายพันธุ์เพื่อชักนำให้เกิดต้นพืชปริมาณมากและทนทานต่อสภาพแวดล้อม (ยุทธนา, 2556) และการนำฮอร์โมนในกลุ่มไซโทไคนินช่วยชักนำการเพิ่มปริมาณต้นอ่อนที่นิยมใช้ ได้แก่ benzyladenine (BA) ซึ่งมีส่วนช่วยในการเร่งการขยายตัวของเซลล์และส่งเสริมการสร้างการเจริญของตาข้าง (สิริภัทร์, 2560) ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาชนิดขึ้นส่วนพืชและสูตรอาหารต่อการเจริญเติบโตของกระบองเพชรสกุลแมมมิลลาเรียและเฟโรแคตัส และศึกษาระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของ BA (N₆-Benzyladenine) ต่อการชักนำยอดและการเพิ่มปริมาณของกระบองเพชรสกุลแมมมิลลาเรียและเฟโรแคตัส

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาชนิดของชิ้นส่วนพืชและสูตรอาหารต่อการเจริญเติบโตของกระบองเพชรสกุลแมมมิลลาเรียและเฟโรแคคตัส

นำต้นอ่อนของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. plumosa* Pink Flower *M. microthela* และ *F. cylindraceus* ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อจากศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ขนาด 5 มิลลิเมตร ทั้งแบบผ่าครึ่ง (half) และแบบเต็ม (full) มาวางเลี้ยงบนอาหารสูตร MS (Murashige and Skoog, 1962) ½MS และ ¼MS อาหารทุกสูตรเติมน้ำตาล 30 กรัมต่อลิตร และผงวุ้น 8 กรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 5.7 นึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที วางเลี้ยงในสภาพความเข้มแสง 3,000 ลักซ์ เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส ทำการทดลองสูตรอาหารละ 10 ขวด ขวดละ 1 ชิ้นส่วน ทำการเปลี่ยนถ่ายอาหารทุก ๆ 1 เดือน เป็นระยะเวลา 3 เดือน พร้อมทั้งสังเกตและบันทึกผลการทดลอง ได้แก่ เปอร์เซ็นต์การรอดชีวิต จำนวนราก ความยาวราก ความยาวต้น จำนวนยอด และน้ำหนักแคลลัส วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี duncan's multiple range test (DMRT)

2. ศึกษาระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของ BA และสูตรอาหารต่อการชักนำยอดและการเพิ่มปริมาณของกระบองเพชรสกุลแมมมิลลาเรีย

นำแคลลัสของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. plumosa* Pink Flower และ *M. microthela* ที่ได้จากการศึกษาตอนที่ 1 น้ำหนัก 0.5 กรัม มาเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS เต็ม BA เข้มข้น 0.0 0.5 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมน้ำตาล 30 กรัมต่อลิตร และผงวุ้น 8 กรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่าเท่ากับ 5.7 นึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที วางเลี้ยงในสภาพความเข้มแสง 3,000 ลักซ์ เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส ทำการทดลองสูตรอาหารละ 3 ข้าง ๆ ละ 10 ขวด ทำการเปลี่ยนถ่ายอาหารทุก ๆ 1 เดือน เป็นระยะเวลา 3 เดือน พร้อมทั้งสังเกตและบันทึกผลการทดลอง ได้แก่ เปอร์เซ็นต์การรอดชีวิต จำนวนราก ความยาวราก ความยาวต้น จำนวนยอด และน้ำหนักแคลลัส วางแผนการทดลองแบบ CRD เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT

ผลการวิจัย

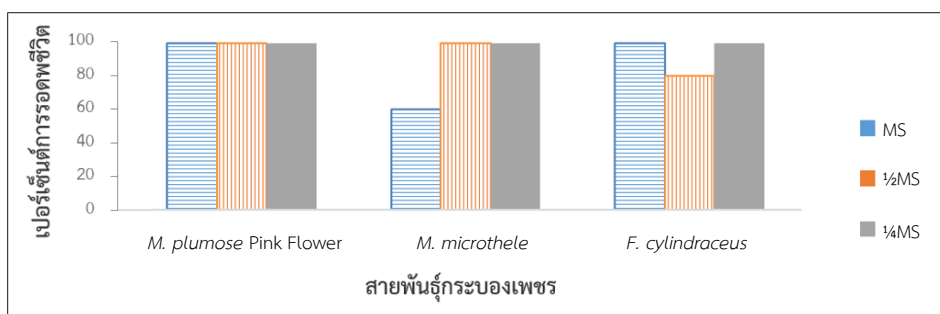
1. ศึกษาชนิดของชิ้นส่วนพืชและสูตรอาหารต่อการเจริญเติบโตของกระบองเพชรสกุลแมมมิลลาเรียและเฟโรแคคตัส

1.1 อัตราการรอดชีวิต

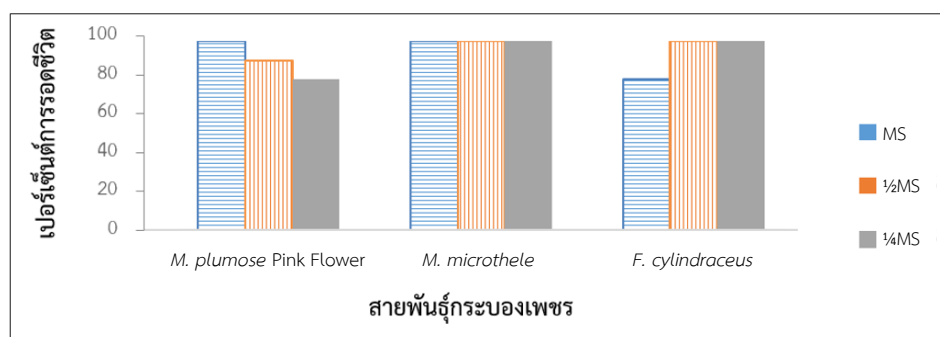
จากการเพาะเลี้ยงชิ้นส่วนกระบองเพชรสกุลแมมมิลลาเรียและเฟโรแคคตัสแบบผ่าครึ่งและแบบเต็มบนอาหารสูตร MS ½MS และ ¼MS เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ พบว่าการเพาะเลี้ยง

ชิ้นส่วนแบบผ่าครึ่งของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. plumosa* Pink Flower บนอาหารสูตร MS $\frac{1}{2}$ MS และ $\frac{1}{4}$ MS มีอัตราการรอดชีวิตสูงสุด 100 เปอร์เซ็นต์ กระบองเพชรสายพันธุ์ *M. microthele* บนอาหารสูตร $\frac{1}{2}$ MS และ $\frac{1}{4}$ MS มีอัตราการรอดชีวิตสูงสุด 100 เปอร์เซ็นต์ และบนอาหารสูตร MS มีอัตราการรอดชีวิต 60 เปอร์เซ็นต์ และกระบองเพชรสายพันธุ์ *F. cylindraceus* บนอาหารสูตร MS และ $\frac{1}{4}$ MS มีอัตราการรอดชีวิตสูงสุด 100 เปอร์เซ็นต์ และบนอาหารสูตร $\frac{1}{2}$ MS มีอัตราการรอดชีวิต 80 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 1 จากอัตราการรอดชีวิตของกระบองเพชรทั้ง 3 สายพันธุ์ พบว่าชนิดชิ้นส่วนแบบผ่าครึ่งมีอัตราการรอดชีวิตสูงสุดในสูตรอาหาร $\frac{1}{4}$ MS

ส่วนการเพาะเลี้ยงชิ้นส่วนแบบเต็มของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. plumosa* Pink Flower บนอาหารสูตร MS มีอัตราการรอดชีวิตสูงสุด 100 เปอร์เซ็นต์ และบนอาหารสูตร $\frac{1}{2}$ MS มีอัตราการรอดชีวิต 90 เปอร์เซ็นต์ กระบองเพชรสายพันธุ์ *M. microthele* บนอาหารทุกสูตรมีอัตราการรอดชีวิตสูงสุด 100 เปอร์เซ็นต์ และกระบองเพชรสายพันธุ์ *F. cylindraceus* บนอาหารสูตร $\frac{1}{2}$ MS และ $\frac{1}{4}$ MS มีอัตราการรอดชีวิตสูงสุด 100 เปอร์เซ็นต์ และบนอาหารสูตร MS มีอัตราการรอดชีวิต 80 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 2 จากผลอัตราการรอดชีวิตของกระบองเพชรทั้ง 3 สายพันธุ์ พบว่าชนิดชิ้นส่วนแบบเต็มมีอัตราการรอดชีวิตที่ใกล้เคียงกันในสูตรอาหาร MS $\frac{1}{2}$ MS และ $\frac{1}{4}$ MS แสดงให้เห็นว่าสูตรอาหารทั้ง 3 สูตร มีความเหมาะสมต่อการรอดชีวิตของกระบองเพชร



ภาพที่ 1 เปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตของกระบองเพชรชนิดชิ้นส่วนแบบผ่าครึ่งหลังจากเพาะเลี้ยง 4 สัปดาห์

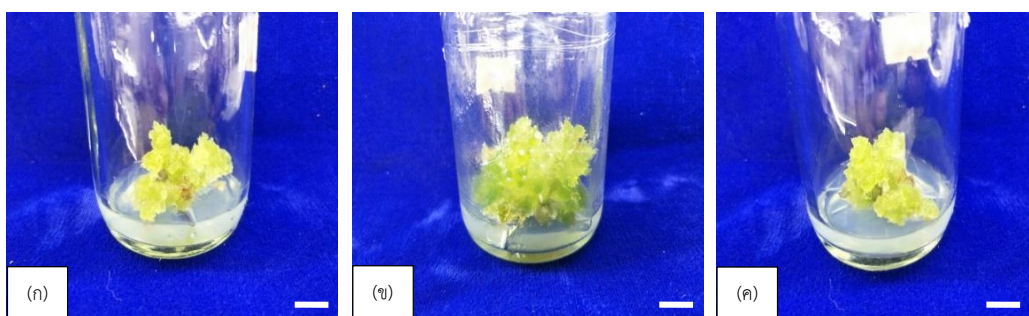


ภาพที่ 2 เปอร์เซ็นต์การรอดชีวิตของกระบองเพชรชนิดชิ้นส่วนแบบเต็มหลังจากเพาะเลี้ยง 4 สัปดาห์

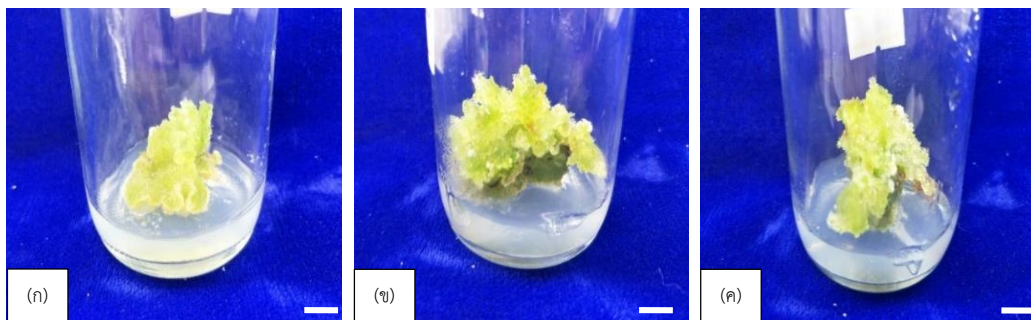
1.2 การเจริญเติบโตของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. plumosa* Pink Flower

จากการเพาะเลี้ยงกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. plumosa* Pink Flower บนอาหารสูตร MS $\frac{1}{2}$ MS และ $\frac{1}{4}$ MS เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ พบว่าชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบผ่าครึ่งที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร $\frac{1}{2}$ MS และชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบเต็มที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร $\frac{1}{4}$ MS มีการชักนำให้เกิดจำนวนรากมากที่สุด 2.25 และ 2.40 รากต่อชิ้นส่วน ตามลำดับ ชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบผ่าครึ่งที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร $\frac{1}{2}$ MS และชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบเต็มที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS มีการชักนำความยาวรากมากที่สุด 8.75 และ 11.25 มิลลิเมตรต่อชิ้นส่วน ตามลำดับ ชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบผ่าครึ่งที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร $\frac{1}{4}$ MS และชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบเต็มที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร $\frac{1}{2}$ MS ให้ความยาวต้นมากที่สุด 17.00 และ 12.85 มิลลิเมตรต่อชิ้นส่วน ตามลำดับ ชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบผ่าครึ่งและแบบเต็มที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร $\frac{1}{4}$ MS ให้จำนวนยอดมากที่สุด 1.40 และ 0.30 ยอดต่อชิ้นส่วน ตามลำดับ ชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบผ่าครึ่งที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร $\frac{1}{4}$ MS และชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบเต็มที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร $\frac{1}{2}$ MS มีน้ำหนักแคลลัสมากที่สุด 1.40 และ 0.27 กรัมต่อชิ้นส่วน ตามลำดับ ดังภาพที่ 3 และ 4

จากผลการเจริญเติบโตของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. plumosa* Pink Flower แสดงให้เห็นว่าอาหารสูตร $\frac{1}{2}$ MS มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกระบองเพชรมากที่สุดทั้งชนิดชิ้นส่วนแบบผ่าครึ่งและแบบเต็มคือมีการเพิ่มจำนวนราก ความยาวราก ความยาวต้น จำนวนยอด และน้ำหนักแคลลัสสูงสุด สำหรับกระบองเพชรแบบผ่าครึ่งด้านจำนวนรากและความยาวราก มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ด้านความยาวต้น จำนวนยอดและน้ำหนักแคลลัสไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและกระบองเพชรแบบเต็มด้านการเพิ่มจำนวนราก ความยาวราก ความยาวต้น จำนวนยอด และน้ำหนักแคลลัส ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 3 การเจริญเติบโตของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. plumosa* Pink Flower ที่ใช้ชิ้นส่วนแบบผ่าครึ่งเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS (ก) $\frac{1}{2}$ MS (ข) และ $\frac{1}{4}$ MS (ค) เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ (bar = 0.5 cm)



ภาพที่ 4 การเจริญเติบโตของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. plumosa* Pink Flower ที่ใช้ชิ้นส่วนแบบเต็ม เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS (ก) $\frac{1}{2}$ MS (ข) และ $\frac{1}{4}$ MS (ค) เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ (bar = 0.5 cm)

ตารางที่ 1 การเจริญเติบโตของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. plumosa* Pink Flower ที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS $\frac{1}{2}$ MS และ $\frac{1}{4}$ MS เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์

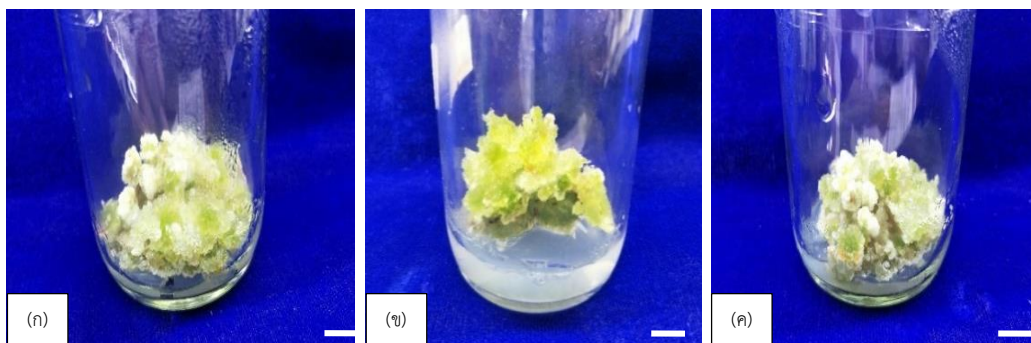
ชนิดของ ชิ้นส่วนพืช	สูตร อาหาร	การเจริญเติบโต				
		จำนวนราก (ราก)	ความยาวราก (มิลลิเมตร)	ความยาวต้น (มิลลิเมตร)	จำนวนยอด (ยอด)	น้ำหนักแคลลัส (กรัม)
แบบผ่าครึ่ง (half)	MS	0.00 ^{bc}	0.00 ^{bc}	14.00 ^a	1.00 ^a	0.90 ^a
	$\frac{1}{2}$ MS	2.25 ^a	8.75 ^a	14.37 ^a	0.37 ^a	0.96 ^a
	$\frac{1}{4}$ MS	0.00 ^b	0.00 ^b	17.00 ^a	1.40 ^a	1.40 ^a
F-test		*	*	non-sig	non-sig	non-sig
แบบเต็ม (full)	MS	2.12 ^a	11.25 ^a	9.37 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a
	$\frac{1}{2}$ MS	2.14 ^a	6.42 ^a	12.85 ^a	0.14 ^a	0.27 ^a
	$\frac{1}{4}$ MS	2.40 ^a	6.80 ^a	11.38 ^a	0.30 ^a	0.21 ^a
F-test		non-sig	non-sig	non-sig	non-sig	non-sig

หมายเหตุ: - * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

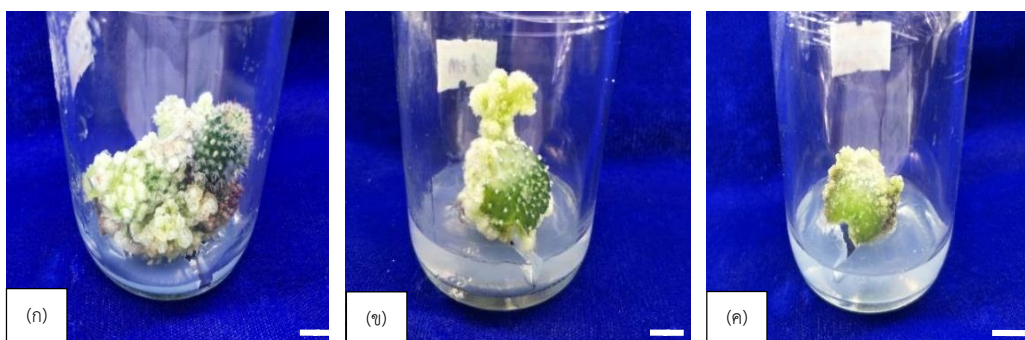
1.3 การเจริญเติบโตของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. microthele*

จากการเพาะเลี้ยงกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. microthele* บนอาหารสูตร MS $\frac{1}{2}$ MS และ $\frac{1}{4}$ MS เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ พบว่าชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบผ่าครึ่งและแบบเต็ม ที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร $\frac{1}{4}$ MS มีการชักนำให้เกิดจำนวนรากมากที่สุด 0.43 และ 2.22 รากต่อชิ้นส่วนตามลำดับ ชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบผ่าครึ่งที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร $\frac{1}{4}$ MS และชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบเต็มที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร $\frac{1}{2}$ MS มีการชักนำความยาวรากมากที่สุด 0.71 และ 18.00 มิลลิเมตรต่อชิ้นส่วน ตามลำดับ ชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบผ่าครึ่งที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร $\frac{1}{4}$ MS

และชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบเต็มทีเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS มีการชักนำความยาวต้นมากที่สุด 7.85 และ 15.00 มิลลิเมตรต่อชิ้นส่วน ตามลำดับ ชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบผ่าครึ่งทีเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร $\frac{1}{4}$ MS และชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบเต็มทีเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS มีการชักนำจำนวนยอดมากที่สุด 2.71 และ 0.22 ยอดต่อชิ้นส่วน ตามลำดับ ชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบผ่าครึ่งทีเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS และชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบเต็มทีเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร $\frac{1}{2}$ MS มีน้ำหนักแคลลัสมากที่สุด 7.14 และ 3.82 กรัมต่อชิ้นส่วน ตามลำดับ ดังภาพที่ 5 และ 6 จากผลการเจริญเติบโตแสดงให้เห็นว่าจำนวนราก ความยาวราก และความยาวต้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่จำนวนยอดและน้ำหนักแคลลัสมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนอาหารสูตร MS ส่งผลต่อด้านจำนวนราก ความยาวราก และจำนวนยอดไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ด้านความยาวต้นและน้ำหนักแคลลัสมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางที่ 2



ภาพที่ 5 การเจริญเติบโตของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. microthela* ที่ใช้ชิ้นส่วนแบบผ่าครึ่งทีเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS (ก) $\frac{1}{2}$ MS (ข) และ $\frac{1}{4}$ MS (ค) เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ (bar = 0.5 cm)



ภาพที่ 6 การเจริญเติบโตของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. microthela* ที่ใช้ชิ้นส่วนแบบเต็มทีเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS (ก) $\frac{1}{2}$ MS (ข) และ $\frac{1}{4}$ MS (ค) เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ (bar = 0.5 cm)

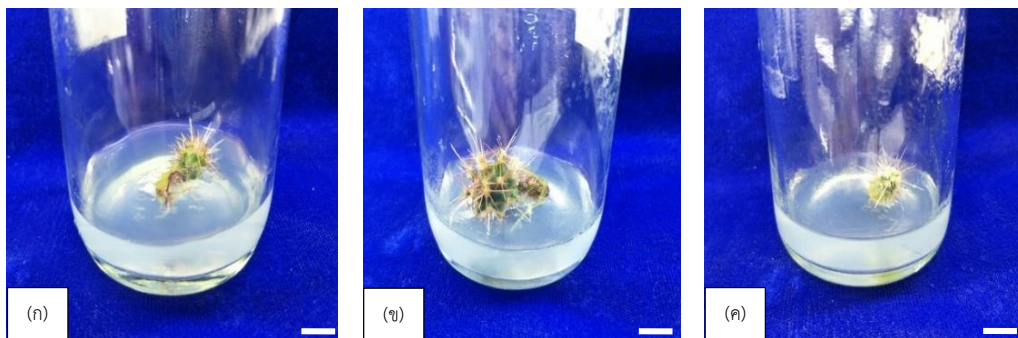
ตารางที่ 2 การเจริญเติบโตของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. microthela* ที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ½MS และ ¼MS เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์

ชนิดของ ชิ้นส่วนพืช	สูตร อาหาร	การเจริญเติบโต				
		จำนวนราก (ราก)	ความยาวราก (มิลลิเมตร)	ความยาวต้น (มิลลิเมตร)	จำนวนยอด (ยอด)	น้ำหนักแคลลัส (กรัม)
แบบผ่าครึ่ง (half)	MS	0.00 ^a	0.00 ^a	2.00 ^a	0.20 ^b	7.14 ^a
	½MS	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00 ^{bc}	6.07 ^{ab}
	¼MS	0.43 ^a	0.71 ^a	7.85 ^a	2.71 ^a	1.95 ^b
F-test		ns	ns	ns	*	*
แบบเต็ม (full)	MS	1.11 ^a	15.71 ^a	15.00 ^a	0.22 ^a	0.41 ^b
	½MS	1.25 ^a	18.00 ^a	3.75 ^b	0.00 ^a	3.82 ^a
	¼MS	2.22 ^a	12.22 ^a	10.33 ^{ab}	0.00 ^a	0.08 ^{bc}
F-test		ns	ns	*	ns	*

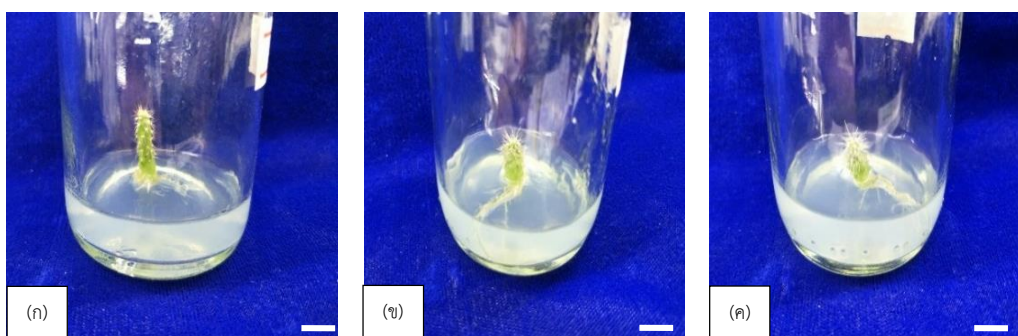
หมายเหตุ: - * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

1.4 การเจริญเติบโตของกระบองเพชรสายพันธุ์ *F. cylindraceus*

จากการเพาะเลี้ยงกระบองเพชรสายพันธุ์ *F. cylindraceus* บนอาหารสูตร MS ½MS และ ¼MS เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ พบว่าชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบผ่าครึ่งที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร ½MS และชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบเต็มที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร ¼MS มีการชักนำให้เกิดจำนวนรากมากที่สุด 2.00 และ 2.67 รากต่อชิ้นส่วน ตามลำดับ ชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบผ่าครึ่งที่เพาะเลี้ยงบนอาหาร ½MS และชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบเต็มที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS มีการชักนำความยาวรากมากที่สุด 18.00 และ 40.00 มิลลิเมตรต่อชิ้นส่วน ตามลำดับ ชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบผ่าครึ่งที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS และชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบเต็มที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร ¼MS มีการชักนำความยาวต้นมากที่สุด 15.71 และ 15.56 มิลลิเมตรต่อชิ้นส่วน ตามลำดับ และชิ้นส่วนกระบองเพชรแบบผ่าครึ่งและแบบเต็มไม่มีการเจริญเติบโตในส่วนของยอดและการเพิ่มน้ำหนักแคลลัส ดังภาพที่ 7 และ 8 จากผลการเจริญเติบโตทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าสูตรอาหาร ½MS มีความเหมาะสมมากที่สุดต่อการเจริญเติบโตของชิ้นส่วนแบบผ่าครึ่ง และจะเห็นได้ว่าสูตรอาหาร MS ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตในส่วนของยอดและการเพิ่มจำนวนแคลลัส และการเพิ่มจำนวนราก ความยาวราก และความยาวต้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนอาหารสูตร MS มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของชิ้นส่วนแบบเต็มมากที่สุด คือ ด้านการเพิ่มจำนวนราก ความยาวราก และความยาวต้น ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางที่ 3



ภาพที่ 7 การเจริญเติบโตของกระบองเพชรสายพันธุ์ *F. cylindraceus* แบบผ่าครึ่งที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS (ก) ½MS (ข) และ ¼MS (ค) เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ (bar = 0.5 cm)



ภาพที่ 8 การเจริญเติบโตของกระบองเพชรสายพันธุ์ *F. cylindraceus* แบบเต็มที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS (ก) ½MS (ข) และ ¼MS (ค) เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ (bar = 0.5 cm)

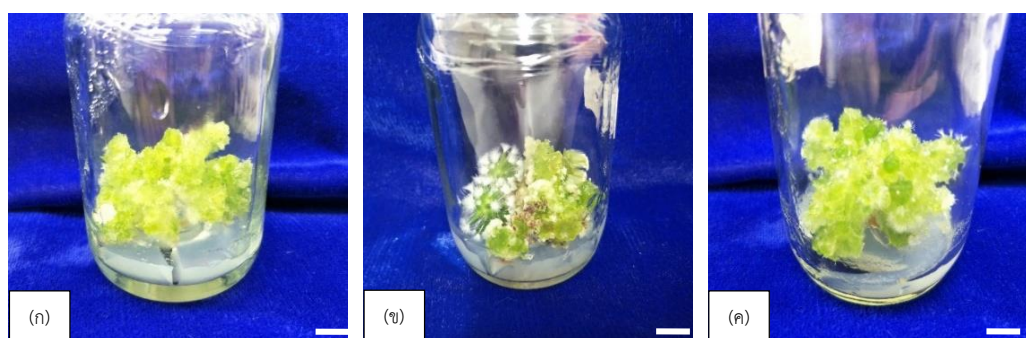
ตารางที่ 3 การเจริญเติบโตของกระบองเพชรสายพันธุ์ *F. cylindraceus* ที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS ½ MS และ ¼ MS เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์

ชนิดของ ชิ้นส่วนพืช	สูตร อาหาร	การเจริญเติบโต				
		จำนวนราก (ราก)	ความยาวราก (มิลลิเมตร)	ความยาวต้น (มิลลิเมตร)	จำนวนยอด (ยอด)	น้ำหนักแคลลัส (กรัม)
แบบผ่าครึ่ง (half)	MS	1.43	15.71	15.71	0.00	0.00
	½MS	2.00	18.00	10.00	0.00	0.00
	¼MS	1.11	12.22	11.44	0.00	0.00
F-test		ns	ns	ns		
แบบเต็ม (full)	MS	2.66	40.00	15.00	0.00	0.00
	½MS	2.00	30.00	13.75	0.00	0.00
	¼MS	2.67	38.89	15.56	0.00	0.00
F-test		ns	ns	ns		

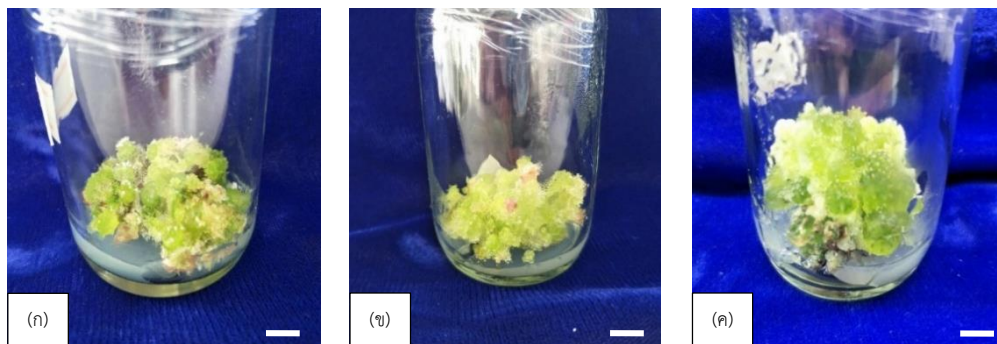
หมายเหตุ: - ns ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

2. ศึกษาระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของ BA และสูตรอาหารต่อการชักนำยอดและการเพิ่มปริมาณของกระบองเพชรสกุลแมมมิลลาเรีย

จากการนำแคลลัสของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. plumose* Pink Flower และ *M. microthele* ที่ได้จากการศึกษาในตอนแรก น้ำหนัก 0.5 กรัม มาเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS เติม BA 0.0 0.5 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ๆ ละ 10 ขวด และบันทึกผลการเปลี่ยนแปลง พบว่ากระบองเพชรสายพันธุ์ *M. plumose* Pink Flower ที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS เติม BA 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลต่อการเพิ่มปริมาณแคลลัสมากที่สุดคือ 4.44 กรัม รองลงมาอาหารสูตร MS เติม BA 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีน้ำหนักของแคลลัส 3.45 กรัม และอาหารสูตร MS ที่ปราศจาก BA มีน้ำหนักแคลลัสน้อยที่สุด คือ 2.24 กรัม สูตรอาหารที่มีผลต่อการเกิดจำนวนยอดมากที่สุดคือ อาหารสูตร MS เติม BA 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีจำนวน 1.56 ยอด รองลงมาคืออาหารสูตร MS เติม BA 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีจำนวน 1.40 ยอด และอาหารสูตร MS ที่ปราศจาก BA ไม่มีผลต่อการชักนำให้เกิดยอดของแคลลัส ส่วนกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. microthele* ในอาหารสูตร MS เติม BA 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลต่อการเพิ่มปริมาณแคลลัสมากที่สุดคือ 5.15 กรัม และสูตรอาหารที่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณแคลลัสน้อยที่สุดคืออาหารสูตร MS ที่ปราศจาก BA ซึ่งมีน้ำหนักแคลลัสน้อยที่สุด คือ 3.07 กรัม สูตรอาหารที่มีผลต่อการเกิดจำนวนยอดมากที่สุดคืออาหารสูตร MS เติม BA 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีจำนวน 1.56 ยอด และอาหารสูตร MS ที่ปราศจาก BA จะไม่มีผลต่อการชักนำให้เกิดยอดของแคลลัส ดังภาพที่ 9 และ 10 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางที่ 4



ภาพที่ 9 ผลของสูตรอาหารและระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของ BA ที่มีการชักนำยอดและการเพิ่มปริมาณของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. plumose* Pink Flower ที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS+BA 0.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (ก) MS+BA 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) และ MS+BA 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค) เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ (bar = 0.5 cm)



ภาพที่ 10 ผลของสูตรอาหารและระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของ BA ที่มีการชักนำยอดและการเพิ่มปริมาณของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. microthale* ที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS+BA 0.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (ก) MS+BA 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข) และ MS+BA 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค) เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ (bar = 0.5 cm)

ตารางที่ 4 ผลของสูตรอาหารต่อน้ำหนักสดแคลลัสและจำนวนยอดของกระบองเพชรสกุลแมมมิลลาเรียและเฟโรแคคตัส

สายพันธุ์	สูตรอาหาร MS + BA (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักสดแคลลัส (กรัม)	จำนวนยอด (ยอด)
<i>M. plumosa</i> Pink Flower	0.0	2.24 ^a	0.00
	0.5	3.45 ^b	1.56 ^a
	1.0	4.44 ^c	1.40 ^a
F-test		*	*
<i>M. microthale</i>	0.0	3.07 ^b	0.00
	0.5	3.25 ^b	1.56 ^a
	1.0	5.15 ^{bc}	1.40 ^a
F-test		*	*

หมายเหตุ * มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$

การอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการศึกษานิตของชิ้นส่วนพืชและสูตรอาหารต่อการเจริญเติบโตของกระบองเพชรสกุลแมมมิลลาเรียและเฟโรแคคตัส พบว่ามีผลการเจริญเติบโตที่แตกต่างกันเนื่องจากกระบองเพชรแต่ละสายพันธุ์และแต่ละชนิดของชิ้นส่วนพืชมีความต้องการอาหารสูตร MS ที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน โดยกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. plumosa* Pink Flower แบบผ่าครึ่งและแบบเต็มมีการเจริญเติบโตได้ดีที่สุดในอาหารที่ความเข้มข้นเดียวกันคือ $\frac{1}{2}$ MS เพราะเป็นอาหารสูตร MS ที่มี

ความความเข้มข้นของสารประกอบในสูตรอาหารครั้งหนึ่ง ซึ่งมีความเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของ ขึ้นส่วนพืชแบบผ่าครึ่ง เพราะเนื้อเยื่อของพืชจะมีผิวสัมผัสกับอาหารมากขึ้น *M. microthale* แบบ ผ่าครึ่งและแบบเต็มมีการเจริญเติบโตได้ดีในอาหารสูตร ¼MS และอาหารสูตร MS *F. cylindraceus* แบบผ่าครึ่งและแบบเต็มมีการเจริญเติบโตได้ดีในอาหารสูตร ½MS และอาหารสูตร MS เพราะอาหาร สูตร ½MS มีความความเข้มข้นของสารประกอบในสูตรอาหารครั้งหนึ่ง ซึ่งมีความเหมาะสมกับการ เจริญเติบโตของขึ้นส่วนพืชแบบผ่าครึ่งเพราะเนื้อเยื่อของพืชจะมีผิวสัมผัสกับอาหารมากขึ้น และ ขึ้นส่วนแบบเต็มเจริญเติบโตได้ดีในอาหารสูตร MS เพราะมีความเข้มข้นของสารประกอบในสูตร อาหารมากกว่าขึ้นส่วนแบบเต็มจึงสามารถดูดซึมสารอาหารได้ดีกว่า ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัย ของ Bhau and Waklu (2015) ได้ทำการศึกษาวิธีการในการขยายพันธุ์ที่ให้ผลผลิตที่มากขึ้นใน ระยะเวลาที่รวดเร็วซึ่งได้เลือกวิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อในสภาพปลอดเชื้อ โดยผลการวิจัยพบว่าการใช้ ตายอดในการขยายพันธุ์ซึ่งได้รับการพัฒนาในไม้ประดับพวกแคคตัส *Coryphantha elephantidens* (Lem.) ในสูตรอาหาร MS มีผลต่อการชักนำยอดและการเจริญเติบโตของยอด จากขึ้นส่วนพืชแต่ละ ชนิดสำหรับขึ้นส่วนพืชที่ตัดตามยาว เมื่อเพาะเลี้ยงบนสูตรอาหาร MS ที่ประกอบด้วย BAP 1.49 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการเกิดยอดมากที่สุด ชนิดของขึ้นส่วนพืชเป็นที่น่าสนใจในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ ชนิดของแหล่งคาร์บอนที่ใช้ในอาหารมีผลมากต่อการเจริญเติบโตของยอดและน้ำหนักแห้ง น้ำหนัก แห้งของยอดสูงสุดได้จากการเพาะเลี้ยงในอาหารที่มีซูโครส 9 เปอร์เซ็นต์

จากผลการเจริญเติบโตทั้งหมดของกระบองเพชรสายพันธุ์ *M. plumose* Pink Flower และ *M. microthale* แสดงให้เห็นว่าสารควบคุมการเจริญเติบโต (BA) มีผลต่อการเพิ่มปริมาณแคลลัสและ จำนวนยอด ซึ่ง BA จะควบคุมการแบ่งเซลล์ การขยายตัวและการเปลี่ยนแปลงของเซลล์พืช โดยจะ กระตุ้นการสร้างยอดจากตายอดยังมีความเข้มข้นของ BA มาก จะมีการสร้างยอดได้มาก (ทวีศักดิ์, 2559) ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของนุรมา และคณะ (2559) ที่ศึกษาผลของสารควบคุมการ เจริญเติบโตต่อการชักนำแคลลัสและยอดของฮาโวเทียในหลอดทดลอง โดยศึกษาผลของไซโตไคนิน และออกซินต่อการเพิ่มปริมาณแคลลัสของฮาโวเทีย บนสูตรอาหาร MS พบว่า BA ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับ NAA ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดแคลลัส 100 เปอร์เซ็นต์ และ เกิดจุดสีเขียว 100 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำแคลลัสที่มีจุดสีเขียวเพาะเลี้ยงบนอาหารที่ปรับความเข้มข้น ของธาตุอาหาร (MS ½MS และ ¼MS) ปรากฏว่าสารควบคุมการเจริญเติบโต เป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า MS free ให้อัตราการเกิดยอด 75 เปอร์เซ็นต์ และจำนวนการเกิดยอด 3.33 ยอดต่อขึ้นส่วน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สรุปผลการวิจัย

จากการเพาะเลี้ยงต้นอ่อนของ *M. plumosa* Pink Flower ขนาด 5 มิลลิเมตร แบบผ่าครึ่งบนอาหารสูตร MS ½MS และ ¼MS และแบบเต็มในอาหารสูตร MS *M. microthale* แบบผ่าครึ่งในอาหารสูตร MS ½MS และ ¼MS และแบบเต็มในอาหารสูตร ½MS และ ¼MS *F. cylindraceus* แบบผ่าครึ่งในสูตรอาหาร MS และ ¼MS และแบบเต็มในอาหารสูตร MS และ ¼MS มีอัตราการรอดชีวิตสูงสุด 100 เปอร์เซ็นต์ หลังจากเพาะเลี้ยง 12 สัปดาห์ พบว่า *M. plumosa* Pink Flower แบบผ่าครึ่งและแบบเต็มมีการเจริญเติบโตดีที่สุดในการอาหารสูตร ½MS *M. microthale* แบบผ่าครึ่งและแบบเต็มมีการเจริญเติบโตได้ดีในอาหารสูตร ¼MS และ MS *F. cylindraceus* แบบผ่าครึ่งและแบบเต็มมีการเจริญเติบโตได้ดีในสูตรอาหาร ½MS และ MS สำหรับการศึกษาระดับความเข้มข้นของ BA ต่อการชักนำยอดและการเพิ่มปริมาณกระบองเพชร โดยนำแคลลัสของ *M. plumosa* Pink Flower และ *M. microthale* 0.5 กรัม มาเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS เติม BA 0.0 0.5 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า *M. plumose* Pink Flower และ *M. microthale* ที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS เติม BA 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีน้ำหนักแคลลัสมากที่สุด 4.44 และ 5.15 กรัม ตามลำดับ ส่วน *M. plumosa* Pink Flower และ *M. microthale* ที่เพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS เติม BA 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการสร้างยอดสูงสุด 1.56 ยอดต่อชิ้นส่วน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช ศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ที่เอื้อเฟื้อในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- ทวีศักดิ์ แสงอุดม. (2559). *สารควบคุมการเจริญเติบโตพืชและแนวทางการใช้กับไม้ผล*. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยพืชสวน.
- นุรมา มาสากิ สุริรัตน์ เย็นซ้อน และสมปอง เตชะโต. (2559). ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตต่อการชักนำแคลลัสและยอดของฮาโวเทียในหลอดทดลอง. *วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์*, 3(2), 76-82.
- ภวพล ศุภนันถนันทน์. (2560). *Cactus & Succulent mania รวมพลคนรักแคคตัสและไม้อวบน้ำ*. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์บ้านและสวน.
- ภวพล ศุภนันถนันทน์. (2562). *แคคตัส*. (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์บ้านและสวน.
- ยุทธนา สุจิรา. (2556). *การเพาะเลี้ยงแคลลัส*. กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- วชิรพงศ์ หวลบุตตา. (2540). *แคคตัสไม้ดอกไม้ประดับ*. กรุงเทพฯ: บริษัทอมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.

- เศรษฐมนตร์ กาญจนกุล. (2557). *ร้อยพรรณพฤกษาแคคตัส*. กรุงเทพฯ: บริษัทอมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.
- สิริภัทร พรหมณีย์. (2560). *เทคนิคการเพาะเลี้ยงเซลล์และเนื้อเยื่อพืชเพื่อการขยายและปรับปรุงพันธุ์*. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุภาวดี งามสูตร. (2559). *ตำราการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช*. นครศรีธรรมราช: มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช.
- Bhau, B.S. and Wakhlu, A.K. (2015). A highly efficient *in vitro* propagation protocol forelephant tusk cactus: *Coryphantha elephantidens* (Lem.). *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 13(2), 215-219.
- Murashige, T. and Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobaccotissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473-497.

การพัฒนาเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด

The Development of Splitting Flesh and Fibers Palmyra Fruit Machine

วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1*} ชาตรี หอมเขียว² และวรรณพร ชีววุฒิพงศ์¹

Worapong Boonchouytan^{1*} Chatree Homkiew²
and Watthanaphon Cheewawuttipong¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ต้นแบบเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยจากผลตาลโตนด โดยที่เครื่องต้นแบบประกอบด้วยชุดโครงเครื่อง ชุดดึงเส้นใยผลตาลโตนด และชุดถังปั่นแยกเนื้อผลตาลโตนด ปัจจัยการทดลองประกอบด้วยความเร็วรอบ 3 ระดับ คือ 150 250 และ 350 รอบต่อนาที และน้ำหนักผลตาลโตนดสุก 3 ระดับ คือ 5 10 และ 15 กิโลกรัม ใช้ปริมาณน้ำ 15 ลิตร และเวลาในการปั่น 20 นาที ผลการทดลองพบว่าการแยกเนื้อผลตาลโตนดโดยใช้ความเร็วรอบที่ 350 รอบต่อนาที และใช้น้ำหนักผลตาลโตนดสุก 15 กิโลกรัม ได้น้ำหนักเท่ากับ 6.757 กิโลกรัม ซึ่งได้น้ำหนักเนื้อผลตาลโตนดมากที่สุดของการทดลอง ส่วนการแยกเส้นใยผลตาลโตนดพบว่า ภายในเวลา 5 นาที สามารถแยกเส้นใยผลตาลโตนดได้เฉลี่ย 0.571 กิโลกรัม และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกเนื้อผลตาลโตนดระหว่างแรงงานคนกับเครื่องจักร พบว่าเครื่องจักรมีประสิทธิภาพมากกว่าแรงงานคนเท่ากับ 92.85 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่าปัจจัยหลักมีผลต่อค่าน้ำหนักเนื้อผลตาลโตนดสุกที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (α) = 0.05 เช่นเดียวกับปัจจัยร่วม

คำสำคัญ: กรรมวิธีการแยก เครื่องแยก เส้นใยผลตาลโตนด ผลตาลโตนด

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* Corresponding author e-mail: worapong.b@rmutsv.ac.th

Received: 27 April 2021, Revised: 20 May 2021, Accepted: 20 May 2021

Abstract

The objective of this research was to obtain a prototype of splitting flesh and fiber separator from palm fruit machine. The prototype consisted of the chassis set, the palm fiber pulling set, and the spinning cylinder splitting flesh of Palmyra fruit set. Experimental factors consisted of 3 rotation speeds: 150, 250, and 350 rpm, and 3 grades of ripe palmyra fruit weights: 5, 10 and 15 kg. The amount of water used was 15 liters and the rotation time was 20 minutes. The results showed that using the splitting flesh of Palmyra fruit at 350 rpm and 15 kg of ripe palmyra fruit weight got the weight of 6.757 kg, which was the highest weight of the fruit gained in the experiment. In separating the palmyra fruit fibers, it was found that within 5 minutes, an average of 0.571 kg of fruit fiber was extracted. When comparing the efficiency of palmyra fruit separation between human labor and machine, it was found that the machines were 92.85 percent more efficient than human labor. In addition, the statistical analysis found that the main factor had the same effect as the contributing factor on the weight of the ripe palmyra fruit at the confidence level of 95% (α) = 0.05.

Keywords: Separation method, Splitting machine, Palmyra fruit fiber, Palmyra Fruit

บทนำ

ตาลโตนดจัดเป็นพืชที่มีความสัมพันธ์กับเศรษฐกิจและสังคมไทยชนิดหนึ่ง ซึ่งนอกจากจะสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกรในท้องถิ่นแล้วยังก่อให้เกิดอุตสาหกรรมแปรรูปต่อเนื่องเป็นผลิตภัณฑ์สินค้ามากมายอีกทั้งยังเป็นส่วนหนึ่งในวิถีชีวิตคนไทย (สำนักงานการเกษตรจังหวัดสงขลา, 2558) ประโยชน์จากตาลโตนดมีอย่างมากมายทั้งในด้านอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร หัตถกรรม งานฝีมือ สิ่งประดิษฐ์ การเกษตร และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ เพราะตาลโตนดสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้แทบทุกส่วนก็ว่าได้ และยังใช้ประโยชน์ได้หลากหลายรูปแบบ (กาญจนา และคณะ, 2554) ส่วนผลตาลโตนดสุกจะมีกลิ่นหอมเนื้อเป็นสีเหลืองนำไปทำขนมตาล เส้นใยที่ยังติดอยู่กับเมล็ดหลังจากการแยกเนื้อซึ่งผลตาลโตนดสุกจะให้เส้นใยลูกตาลคิดเป็นน้ำหนักร้อยละ 23-37 เปอร์เซ็นต์ ของผล เส้นใยตาลโตนดมีองค์ประกอบคือ ลิโนิน 12.20 เปอร์เซ็นต์ เซลลูโลส 62.90 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 18.42 เปอร์เซ็นต์ และเพกติน 1.55 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีปริมาณเซลลูโลสสูง (จันทร์เพ็ญ และพิทักษ์, 2556) จากการ

ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ทำให้ทราบลักษณะภายในตามภาคตัดขวางของเส้นใยลูกตาลว่ามีลักษณะเป็นรูปรีเกือบกลม มีลูเมนเห็นได้ชัดเจน ผนังเซลล์ค่อนข้างบาง (พิทักษ์ และคณะ, 2552)

ในปัจจุบันวิธีการแยกเนื้อผลตาลโตนดสุกและเส้นใยผลตาลโตนดมีหลายวิธี เช่น การต้มเนื้อผลตาลโตนด และวิธีการขยี้ลูกตาล เพื่อนำไปแปรรูปทำขนมตาลหรือจำหน่ายนั้นกระทำได้โดยวิธีการต้มแล้วใช้ตะกร้าหรือช้อนในการขยี้และชูดเพื่อแยกเนื้อผลตาลโตนดออก ส่วนเส้นใยผลตาลโตนดใช้แรงงานคนในการตัดหรือดึงออกจากกะลาซึ่งมีกระบวนการที่ยุ่งยากเพราะเนื้อผลตาลโตนดและเส้นใยผลตาลโตนดที่ติดอยู่กับผลตาลโตนดนั้นมีความเหนียวมากทำให้เสียเวลาและแรงงานในการแยกเนื้อตาลและเส้นใยผลตาลโตนด (วรพงศ์ และคณะ, 2559) จากการศึกษาเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนดที่เกี่ยวข้องนั้น เช่น (1) เครื่องแยกเนื้อตาลสุก (จตุรงค์ และคณะ, 2559) เพื่อลดเวลาและแรงงานในการแยกเนื้อตาลสุก และช่วยพัฒนาผลิตภัณฑ์วิสาหกิจชุมชนของประเทศไทยให้มีความเข้มแข็ง จากผลการทดสอบพบว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ดีที่ความเร็วรอบที่ใช้ขับเคลื่อนชุดแยกเนื้อตาล 280 รอบต่อนาที มีเปอร์เซ็นต์การแยกเนื้อตาลสุก 96.8 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถในการทำงาน 37.9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (2) การออกแบบและสร้างเครื่องแยกเส้นใยลูกตาลสุก (จตุรงค์ และคณะ, 2559) เพื่อลดเวลาและแรงงานในการแยกเส้นใยจากเมล็ดตาลสุก จากผลการทดสอบพบว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ดีที่ความเร็วรอบของชุดแยกเส้นใยลูกตาล 400 รอบต่อนาที มีเปอร์เซ็นต์การแยกเส้นใยลูกตาลสุก 94.3 ± 1.5 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถในการทำงาน 4.8 ± 0.3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.68 กิโลวัตต์-ชั่วโมง จากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมพบว่าเมื่อใช้เครื่องต้นแบบทำงาน 1,440 ชั่วโมงต่อปี มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของเครื่อง 9 บาทต่อกิโลกรัม ระยะเวลาคืนทุน 6 เดือน และการใช้งานที่จุดคุ้มทุน 164 ชั่วโมงต่อปี (3) การออกแบบและสร้างเครื่องขยี้ผลตาลโตนดเพื่อการแปรรูปอาหาร (อรุณ และคณะ, 2559) หาประสิทธิภาพของเครื่องขยี้ผลตาลโตนด และหาความพึงพอใจของผู้ใช้เครื่องขยี้ผลตาลโตนด พบว่าเครื่องออกแบบให้สามารถใช้งานได้สะดวกและใช้งานได้จริง ช่วยลดเวลาในกระบวนการขยี้ลูกตาลโตนดและการใช้แรงงานคนซึ่งวัสดุที่ใช้ทำด้วยสแตนเลสโดยคำนึงถึงความสะดวกและปลอดภัยความเร็วรอบของมอเตอร์ 100 รอบต่อนาที ทำให้ผิวของเนื้อตาลแยกออกจากเส้นใยตาลได้ดี ในการขยี้ผลตาลโตนดที่น้ำหนัก 1.6 กิโลกรัมต่อครั้ง ได้เนื้อตาลเฉลี่ย 306 กรัม คิดเป็น 1.3 เท่าของแรงงานคนที่ขยี้เนื้อตาล ส่วนของเวลาในการขยี้ผลตาลโตนด มีเวลาเฉลี่ย 5.6 นาที คิดเป็น 8.3 เท่าของแรงงานคนที่ขยี้เนื้อตาล จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้น เครื่องแยกเนื้อตาลสุกสามารถแยกได้แค่เนื้อตาลโตนดเพียงอย่างเดียวหรือเครื่องแยกเส้นใยตาลโตนดก็สามารถแยกได้แค่เส้นใยตาลโตนดเพียงอย่างเดียวเช่นกัน ส่วนเครื่องที่สร้างขึ้นใหม่นี้ จะมีการทำงานสองกระบวนการในเครื่องเดียว คือ แยกเนื้อผลตาลโตนดและเส้นใยผลตาลโตนด

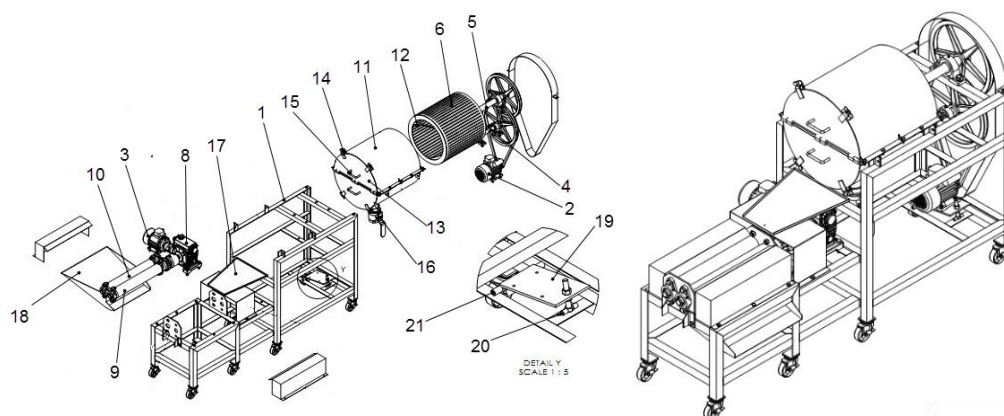
ดังนั้นจึงได้คิดค้นออกแบบและสร้างเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ต้นแบบเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยจากผลตาลโตนด สำหรับผลิตเนื้อผลตาลโตนด และผลิตเส้นใยผลตาลโตนด เพื่อนำผลิตที่ได้ไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ขนมตาล กระดาษที่สามารถทำเองได้ และใช้ในงานหัตถกรรม งานบรรจุภัณฑ์ สร้างรายได้ให้กับชุมชน ภายใต้ขอบเขต เครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนดประกอบด้วย 2 ชุด คือชุดแยกเนื้อผลตาลโตนดและชุดแยกเส้นใยผลตาลโตนด

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนของการออกแบบ พัฒนา และทดสอบประสิทธิภาพเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การออกแบบและคำนวณชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ

สำหรับกระบวนการแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนดของเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนดตามการประดิษฐ์นี้ (วรพงศ์ และคณะ, 2559) แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แบบเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด

ที่มา: วรพงศ์ และคณะ, 2559

2. ส่วนประกอบของเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด

2.1 ชุดโครงเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนดได้ออกแบบมีขนาด 526 x 1,164 x 750 มิลลิเมตร โดยมีชุดแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนดยึดติดอยู่ แสดงดังภาพที่ 2



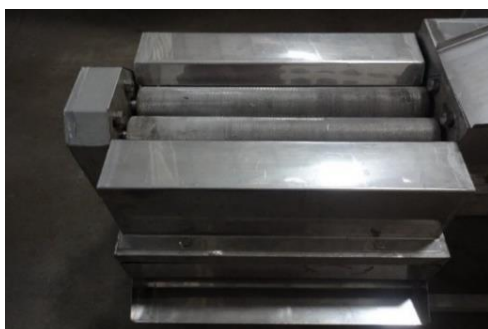
ภาพที่ 2 ชุดโครงเครื่อง

2.2 ชุดถังปั่นแยกเนื้อผลตาลโตนด โดยมีการออกแบบเพลามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.81 มิลลิเมตร และความยาว 425 มิลลิเมตร โดยประกอบติดกับถังปั่นแยกเนื้อผลตาลโตนด โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตร ยาว 350 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ชุดถังปั่นแยกเนื้อผลตาลโตนด

2.3 ชุดดึงเส้นใยผลตาลโตนดมีการออกแบบโดยลูกกลิ้งหมุนเข้าหากัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้ง 75 มิลลิเมตร และความยาว 450 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ชุดดึงเส้นใยผลตาลโตนด

3. วิธีการทดสอบเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด

การทดสอบในการแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด ใช้ผลตาลโตนดสุกเป็นวัตถุดิบในการแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด โดยการใช้ถังปั่นเนื้อผลตาลโตนดในการแยกเนื้อ และใช้เพลลาในการดึงเส้นใยผลตาลโตนด การทดสอบประสิทธิภาพการแยกเนื้อผลตาลโตนด โดยการนำผลตาลโตนดสุก น้ำหนัก 5 10 และ 15 กิโลกรัม มาทดสอบปั่นแยกเนื้อผลตาลโตนดโดยใช้ความเร็วรอบ 3 ระดับ คือ 150 250 และ 350 รอบต่อนาที โดยใส่น้ำในการทดสอบ 15 ลิตร หรือประมาณครึ่งถังของเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด ใช้เวลาในการปั่น 20 นาที ผลการทดสอบที่ได้เป็นค่าน้ำหนักของเนื้อผลตาลโตนด โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

3.1 เตรียมผลตาลโตนดสุกโดยการปอกเปลือกสีดำออก แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลตาลโตนดสุกที่ปอกเปลือกสีดำแล้ว

3.2 เตรียมถังปั่นในการแยกเนื้อผลตาลโตนด ในการทดลองเครื่องครั้งนี้ โดยการนำผลตาลโตนดสุกใส่ลงไป และใส่น้ำตามไป แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การเตรียมถังปั่นในการแยกเนื้อผลตาลโตนด

- 3.3 ทำการปิดฝาช่องใส่ผลตาลโตนดของถังป่นในการแยกเนื้อผลตาลโตนด
- 3.4 ติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยทำการต่อปลั๊กไฟเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยใช้กระแสไฟฟ้า 220 โวลต์ กดปุ่ม start เพื่อป่นแยกเนื้อผลตาลโตนด โดยใช้เวลาในการป่น 20 นาที
- 3.5 เมื่อครบ 20 นาที กดปุ่ม stop เปิดฝาช่องใส่ผลตาลโตนดออก
- 3.6 เปิดท่อเอาเนื้อออกจากถังป่น ลงบนที่กรองแบบละเอียด
- 3.7 นำผลตาลโตนดที่แยกเนื้อเสร็จแล้ว ใส่ลงในชุดตักเส้นใยผลตาลโตนดต้องการ
- 3.8 ในขั้นตอนนี้เมื่อได้เนื้อและเส้นใยผลตาลโตนดที่แยกเสร็จแล้ว นำมาชั่งน้ำหนัก

ผลการวิจัย

จากการปรับปรุงแก้ไขและทดลองเครื่องจักรจนมั่นใจในประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องแล้ว ขั้นตอนของผลการทดลองจะดำเนินการทดลองโดยการชั่งเนื้อตาล และตัดเส้นใยตาลเป็นเส้น โดยที่ผลตาลโตนดจะทำการปอกเปลือกออกเรียบร้อยแล้ว เปรียบเทียบการทำงานระหว่างเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนดกับแรงงานคน 1 คน ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

1. การศึกษาการทำงานด้วยแรงงานคน

จากการทดลองด้วยแรงงานคนในการขยี้ผลตาลโตนด โดยการนำผลตาลโตนดสุกมาขยี้แล้วจับเวลาใน 20 นาที แล้วขยี้จนกว่าจะเห็นว่าเนื้อของผลตาลโตนดติดอยู่ที่กะลามผลตาลโตนดน้อยที่สุดแล้วทำการกรองเนื้อผลตาลโตนดออกจากน้ำ จากนั้นนำเนื้อตาลโตนดที่แยกเสร็จแล้วมาชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกผลจนครบ 5 ครั้ง ต่อมานำผลตาลโตนดที่แยกเนื้อเสร็จแล้วนำมาแยกเส้นใยด้วยการตัดด้วยกรรไกร จับเวลา 5 นาที และบันทึกผลจนครบ 5 ครั้ง จึงได้ผลการทดลองด้วยแรงงานคน แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดลองการขยี้และการตัดเส้นใยผลตาลโตนดด้วยแรงงานคน

ครั้งที่	การขยี้ผลตาลโตนด		การตัดเส้นใยผลตาลโตนด	
	เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	เวลา (นาที)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)
1	20	0.485	5	0.131
2	20	0.496	5	0.151
3	20	0.478	5	0.177
4	20	0.469	5	0.187
5	20	0.488	5	0.191
ค่าเฉลี่ย	20	0.483	5	0.167

จากการทดลองด้วยแรงงานคน พบว่าการทดลองการขี้นผลตาลโตนดด้วยแรงงานคนในเวลา 20 นาที จะได้เนื้อผลตาลโตนดสุกเฉลี่ย 0.483 กิโลกรัม และการตัดเส้นใยผลตาลโตนดด้วยแรงงานคนในเวลา 5 นาที แล้วสามารถตัดเส้นใยผลตาลโตนดได้เฉลี่ย 0.167 กิโลกรัม

2. การศึกษาการทำงานด้วยเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด

การทดสอบประสิทธิภาพการแยกเนื้อผลตาลโตนด โดยการนำผลตาลโตนดสุกน้ำหนัก 5 10 และ 15 กิโลกรัม มาทดสอบปั่นแยกเนื้อผลตาลโตนดโดยใช้ความเร็วรอบ 3 ระดับ คือ 150 250 และ 350 รอบต่อนาที ใส่ น้ำ ในการทดสอบประมาณ 15 ลิตร หรือประมาณเกือบครึ่งถังของเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด ใช้เวลาในการปั่น 20 นาที ผลการทดสอบที่ได้เป็นค่าน้ำหนักของเนื้อผลตาลโตนด ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3 ส่วนการทดสอบประสิทธิภาพการแยกเส้นใยผลตาลโตนด โดยการนำเอาผลตาลโตนดสุกที่ผ่านการแยกเนื้อออกแล้วมาเป็นวัสดุทดลอง ใช้เวลาการหมุนแยกเส้นใยตาลโตนด 5 นาที ผลการทดสอบที่ได้เป็นค่าน้ำหนักของเส้นใยผลตาลโตนด แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการแยกเนื้อผลตาลโตนด

ครั้งที่	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	น้ำหนักผลตาลโตนดสุก (กิโลกรัม)	เวลา (นาที)	ผลการทดลอง (กิโลกรัม)
1	150	5	20	0.696
2	150	10	20	1.857
3	150	15	20	3.076
4	250	5	20	0.743
5	250	10	20	2.857
6	250	15	20	4.985
7	350	5	20	0.927
8	350	10	20	3.838
9	350	15	20	6.757

จากผลการทดสอบการแยกเนื้อผลตาลโตนดด้วยเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด พบว่า การแยกเนื้อผลตาลโตนดโดยใช้ความเร็วรอบสูงที่ 350 รอบต่อนาที ใช้ผลตาลโตนด 15 กิโลกรัม น้ำ 15 ลิตร และเวลา 20 นาที ได้น้ำหนักเท่ากับ 6.757 กิโลกรัม ซึ่งมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองสภาวะอื่น ๆ ส่วนผลการทดสอบประสิทธิภาพการแยกเส้นใยผลตาลโตนดด้วยเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด พบว่าในเวลา 5 นาที สามารถการแยกเส้นใยผลตาลโตนดได้เฉลี่ย 0.571 กิโลกรัม

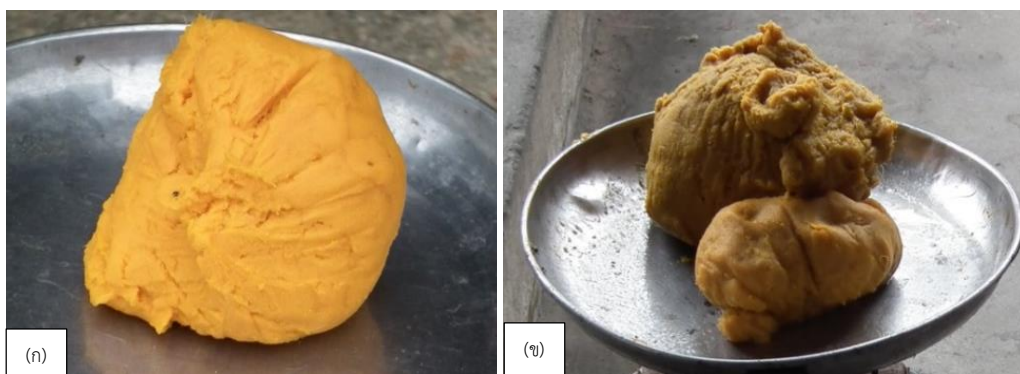
3. การเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างเครื่องกับแรงงานคน

จากการทดลองการการแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด เปรียบเทียบระหว่างแรงงานคน กับเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด โดยผลการทดลองแยกเนื้อผลตาลโตนดด้วยเครื่องแยกเนื้อ และเส้นใยผลตาลโตนด มีความสามารถในการแยกเนื้อผลตาลโตนดได้ 20.271 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แรงงานคนมีความสามารถในการขยี้เนื้อผลตาลโตนดได้เพียง 1.449 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ส่วนการแยก เส้นใยผลตาลโตนดด้วยเครื่องแยกเส้นใยผลตาลโตนดสามารถแยกเส้นใยผลตาลโตนดได้ 6.852 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แรงงานคนมีความสามารถในการตัดเส้นใยผลตาลโตนดได้ 2.004 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และเมื่อแรงงานคนปฏิบัติงานเป็นระยะเวลาหนึ่งผู้ปฏิบัติงานจะมีความเมื่อยล้าเกิดขึ้น ในขณะที่ เครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนดสามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่อง แสดงดังตารางที่ 3

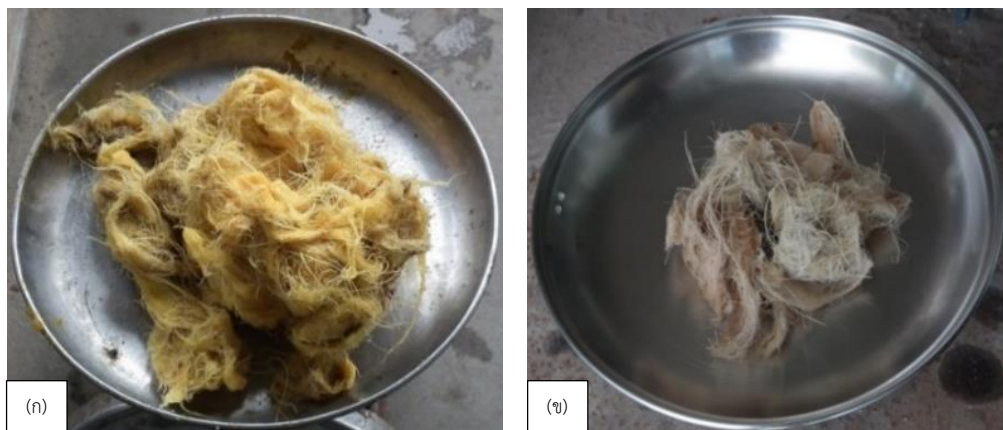
ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบในการแยกเนื้อผลตาลโตนดระหว่างเครื่องกับแรงงานคน

ลักษณะการทำงาน	แยกเนื้อผลตาลโตนด		แยกเส้นใยผลตาลโตนด	
	เวลา (ชั่วโมง)	กิโลกรัมต่อชั่วโมง	เวลา (ชั่วโมง)	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
เครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด	1	20.271	1	6.852
แรงงานคน	1	1.449	1	2.004

จากตารางที่ 3 สามารถแสดงลักษณะการแยกเนื้อผลตาลโตนดและการแยกเส้นใยผลตาลโตนดด้วยเครื่องกับแรงงานคน แสดงดังภาพที่ 7 และ 8 ตามลำดับ



ภาพที่ 7 ลักษณะการแยกเนื้อผลตาลโตนดด้วยเครื่อง (ก) และแรงงานคน (ข)



ภาพที่ 8 ลักษณะการแยกเส้นใยผลตาลโตนดด้วยเครื่อง (ก) และแรงงานคน (ข)

การอภิปรายผลการวิจัย

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการตรวจสอบจากความถูกต้องของตัวแบบ (model adequacy checking) ด้วยโปรแกรมคำนวณทางสถิติ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบค่าน้ำหนักของเนื้อผลตาลโตนดสุก แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดลองแยกเนื้อผลตาลโตนดสุกของเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	น้ำหนักผลตาลโตนดสุก (กิโลกรัม)	เวลา (นาที)	ผลการทดลอง (กิโลกรัม)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
150	5	20	0.696	0.565	0.711
150	10	20	1.857	1.758	1.945
150	15	20	3.076	3.103	3.133
250	5	20	0.743	0.786	0.786
250	10	20	2.857	2.957	2.917
250	15	20	4.985	4.885	4.876
350	5	20	0.927	0.967	0.921
350	10	20	3.838	3.966	3.936
350	15	20	6.757	6.889	6.885

1. การตั้งสมมุติฐานการทดลอง

1.1 ผลกระทบของปัจจัยหลัก (main effect)

ทดสอบสมมุติฐานของอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนด กำหนดให้ $\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3$ คือ ความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนดที่ 150 250 และ 350 รอบต่อนาที ตามลำดับ

$H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนดไม่มีผลต่อค่าน้ำหนักเนื้อตาลโตนดสุก

$H_1 : \alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลของความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนดมีผลต่อค่าน้ำหนักเนื้อตาลโตนดสุก

ทดสอบสมมุติฐานอิทธิพลของปัจจัยน้ำหนักผลตาลโตนดสุก กำหนดให้ $\beta_1 \beta_2 \beta_3$ คือ น้ำหนักผลตาลโตนดสุกที่ 5 10 และ 15 กิโลกรัม ตามลำดับ

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของน้ำหนักผลตาลโตนดสุกไม่มีผลต่อค่าน้ำหนักเนื้อตาลโตนดสุก

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$ สำหรับบางระดับ อิทธิพลน้ำหนักผลตาลโตนดสุกมีผลต่อค่าน้ำหนักเนื้อตาลโตนดสุก

1.2 ผลกระทบของปัจจัยร่วม (factor interaction effect)

ทดสอบสมมุติฐานอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนดกับปัจจัยน้ำหนักผลตาลโตนดสุก กำหนดให้ $\alpha\beta_1 \alpha\beta_2 \alpha\beta_3$ คือ ปัจจัยความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนดกับปัจจัยน้ำหนักผลตาลโตนดสุก

$H_0 : \alpha\beta_1 = \alpha\beta_2 = \alpha\beta_3$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนดกับปัจจัยน้ำหนักผลตาลโตนดสุกไม่มีผลต่อค่าน้ำหนักเนื้อตาลโตนดสุก

$H_1 : \alpha\beta_1 \neq \alpha\beta_2 \neq \alpha\beta_3$ สำหรับทุกระดับ อิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนดกับปัจจัยน้ำหนักผลตาลโตนดสุกมีผลต่อค่าน้ำหนักเนื้อตาลโตนดสุก

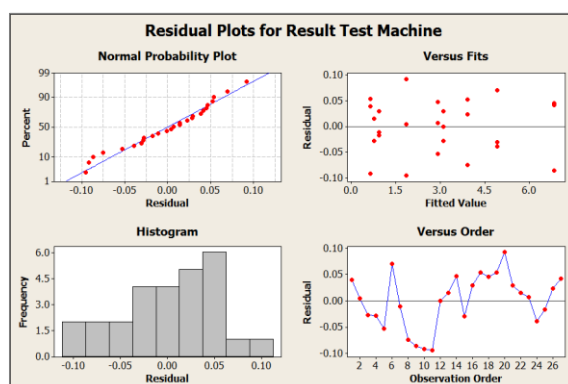
จากการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าน้ำหนักเนื้อผลตาลโตนดสุก จากปัจจัยหลักความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนด (rotation speed) และน้ำหนักตาลโตนดสุก (feed palmyra) และปัจจัยร่วมความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนดกับน้ำหนักตาลโตนดสุก (rotation speed * feed palmyra) แสดงดังตารางที่ 5 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 99.58 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่า ความผันแปรต่าง ๆ ของการทดลองที่สามารถควบคุมได้ (controllable) เช่น ปัจจัยความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนดกับปัจจัยน้ำหนักตาลโตนดสุกหรือปัจจัยต่าง ๆ ที่กำหนดให้คงที่ ในการทดลอง มีค่าเท่ากับ 99.58 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือประมาณ 0.42 เปอร์เซ็นต์ เกิดจากปัจจัย

ต่าง ๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ (uncontrollable) ดังนั้นการออกแบบการทดลองครั้งนี้ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (two-way ANOVA)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	p-value
rotation speed	2	18.489	18.489	9.245	2478.51	< 0.001
feed palmyra	2	78.073	78.073	39.037	10465.71	< 0.001
rotation speed *	4	8.982	8.982	2.245	602.00	< 0.001
feed palmyra						
error	18	0.067	0.067	0.004		
total	26	105.612				
S = 0.0610734 R-Sq = 99.58% R-Sq (adj) = 99.39%						

การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ ได้แก่ การแจกแจงแบบปกติของข้อมูล (normal) ความเป็นอิสระ (independence) และความแปรปรวนคงตัว (constant variance) จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางสถิติ พบว่าเป็นไปตามข้อกำหนดการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบการทดลอง

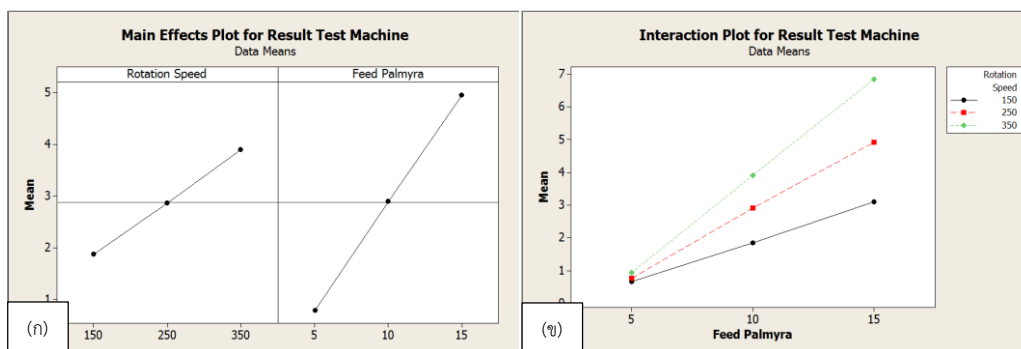
2. ทดสอบสมมติฐานของการทดลอง

อิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโดนดกับปัจจัยน้ำหนักตาลโดนดสูงและอันตรกิริยา หรือผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย มีผลต่อค่าน้ำหนักเนื้อผลตาลโดนดสูง

2.1 ผลกระทบของปัจจัยหลัก (main effect)

ทดสอบสมมติฐานของอิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนด จากข้อมูลในตารางที่ 5 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (two-way ANOVA) ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า p -value ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่า α (α) = 0.05 ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่า อิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนดมีผลต่อค่าน้ำหนักเนื้อผลตาลโตนดสุกที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ทดสอบสมมติฐานอิทธิพลของปัจจัยน้ำหนักตาลโตนดสุก จากข้อมูลแสดงดังตารางที่ 5 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า p -value ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่า α (α) = 0.05 ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้ว่าอิทธิพลของปัจจัยน้ำหนักตาลโตนดสุกมีผลต่อค่าน้ำหนักเนื้อผลตาลโตนดสุกที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้แสดงดังภาพที่ 10 (ก) ซึ่งปัจจัยความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนดกับปัจจัยน้ำหนักตาลโตนดสุกเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าน้ำหนักเนื้อผลตาลโตนดสุก จากภาพที่ 10 (ก) จะเห็นว่าที่ความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนดเพิ่มขึ้นทำให้ค่าน้ำหนักเนื้อผลตาลโตนดสุกมีค่ามากขึ้นด้วย ส่วนน้ำหนักตาลโตนดสุกจะเห็นได้ว่าถ้าน้ำหนักตาลโตนดสุกมากขึ้นจะให้ค่าน้ำหนักเนื้อผลตาลโตนดสุกมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าน้ำหนักเนื้อผลตาลโตนดสุก

(ก) ปัจจัยหลัก (ข) ปัจจัยร่วม

2.2 ผลกระทบของปัจจัยร่วม (factor interaction effect)

ทดสอบสมมติฐานอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนดกับปัจจัยน้ำหนักตาลโตนดสุก จากข้อมูลแสดงดังตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอันตรกิริยาด้วยตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง ปฏิเสธ H_0 เนื่องจากค่า p -value ซึ่งมีค่าน้อยกว่า

เมื่อเทียบกับค่า $\alpha (\alpha) = 0.05$ ทำให้มีข้อมูลสนับสนุนได้อธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนดกับปัจจัยน้ำหนักตาลโตนดสูงมีผลต่อค่าน้ำหนักเนื้อผลตาลโตนดสูงที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ สามารถอธิบายเพิ่มเติม แสดงดังภาพที่ 10 (ข) การเพิ่มค่าของปัจจัยความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนดกับปัจจัยน้ำหนักตาลโตนดสูงส่งผลให้มีค่าน้ำหนักเนื้อผลตาลโตนดสูงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องมาจากแรงหมุนเหวี่ยงที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดการหมุนเหวี่ยงเนื้อตาลโตนดไปกระทบกับถังปั่นมากขึ้น ทำให้เกิดการหลุดออกของเนื้อตาลโตนดสูงที่มากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้เมื่อน้ำหนักผลตาลโตนดสูงที่ใส่เข้าไปในถังปั่นเพิ่มขึ้นก็จะทำให้มีเนื้อผลตาลโตนดสูงเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องมาจากเนื้อตาลโตนดที่ใส่เข้าไปเกิดการหมุนชนกัน การเสียดสีกัน การกระทบกันภายในถังปั่นมากขึ้นทำให้เนื้อตาลโตนดสูงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองด้วยแรงงานคนในการขยี้ผลตาลโตนด โดยการนำผลตาลโตนดสูงมาขยี้ด้วยเวลา 20 นาที และขยี้จนกว่าเห็นว่าเนื้อของผลตาลโตนดติดอยู่ที่กะลาผลตาลโตนดน้อยที่สุด จากนั้นทำการกรองเนื้อตาลโตนดออกจากน้ำ จึงนำเนื้อตาลโตนดที่แยกเสร็จแล้วนำมาชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกผลจนครบ 5 ครั้ง ต่อมานำผลตาลโตนดที่แยกเนื้อเสร็จแล้วมาแยกเส้นใยด้วยการตัดด้วยกรรไกร จับเวลา 5 นาที ทำการบันทึกผลจนครบ 5 ครั้ง จึงได้ผลการทดลองจากแรงงานคน โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การทดสอบประสิทธิภาพการแยกเนื้อผลตาลโตนดด้วยเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด พบว่าการแยกเนื้อผลตาลโตนดโดยใช้ความเร็วรอบสูงที่ 350 รอบต่อนาที ใช้ลูกตาลโตนด 15 กิโลกรัม น้ำ 15 ลิตร และเวลา 20 นาที ได้น้ำหนัก 6.757 กิโลกรัม ซึ่งมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองสภาวะอื่น ๆ ส่วนผลการทดสอบประสิทธิภาพการแยกเส้นใยผลตาลโตนดด้วยเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด พบว่าในเวลา 5 นาที สามารถการแยกเส้นใยผลตาลโตนดได้เฉลี่ย 0.571 กิโลกรัม

2. เครื่องแยกเส้นใยผลตาลโตนดสามารถแยกเส้นใยผลตาลโตนดได้ 6.852 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ในขณะที่แรงงานคนมีความสามารถในการตัดเส้นใยผลตาลโตนดได้ 2.004 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เพราะเมื่อแรงงานคนปฏิบัติงานเป็นระยะเวลาหนึ่งผู้ปฏิบัติงานจะมีความเมื่อยล้าเกิดขึ้น ในขณะที่เครื่องแยกเนื้อและเส้นใยตาลโตนดสามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่อง

3. ปัจจัยหลัก ได้แก่ ความเร็วรอบการปั่นเนื้อผลตาลโตนด และน้ำหนักตาลโตนดสูง มีผลต่อค่าน้ำหนักเนื้อผลตาลโตนดสูง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ($\alpha) = 0.05$ เช่นเดียวกับปัจจัยร่วม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) รหัสโครงการ PRP5905010560

เอกสารอ้างอิง

- กาญจนา บุญส่ง พจนารถ บังเขียว อรอนงค์ ศรีพาทกุล และชนานุช เงินทอง. (2554). *แนวทางการสืบสานวัฒนธรรมตาลเมืองเพชรที่เอื้อต่อวิถีชีวิตของชุมชนบ้านลาด อำเภอบ้านลาด จังหวัดเพชรบุรี*. กรุงเทพฯ: กรมส่งเสริมวัฒนธรรม กระทรวงวัฒนธรรม.
- จตุรงค์ ลังกาพันธ์ สุณัน ปานสาคร ภูรินทร์ อัครกุลธร สุกฤษฎี สร้อยแมน และสุภณัฐ สร้อยแมน. (2559). การออกแบบและสร้างเครื่องแยกเนื้อตาลสุก. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคล รัษฎบุรี*, 14(1), 47-54.
- จตุรงค์ ลังกาพันธ์ สุณัน ปานสาคร ภูรินทร์ อัครกุลธร สุกฤษฎี สร้อยแมน และสุภณัฐ สร้อยแมน. (2559). การออกแบบและสร้างเครื่องแยกเส้นใยลูกตาลสุก. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลรัษฎบุรี*, 14(2), 37-44.
- จันทร์เพ็ญ ชุมแสง และพิทักษ์ อุปัญญา. (2556). การสร้างมูลค่าเพิ่มวัสดุเหลือทิ้งจากตาลโตนด. *รายงานวิจัย*. มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์.
- พิทักษ์ อุปัญญา อรสา แถบเกิด และจุฑามาศ ชื่อนาค. (2552). *การเพิ่มมูลค่าเส้นใยลูกตาลเป็นสิ่งทอธรรมชาติ เพื่อผลิตภัณฑ์ผ้าทอมือจากเส้นใยลูกตาล*. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา.
- วรพงศ์ บุญช่วยแทน ชาตรี หอมเขียว และวรรณพร ชีววุฒิพงศ์. (2559). *การออกแบบและสร้างเครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนดและพัฒนาเส้นใยผลตาลโตนดเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์กระดาษพื้นบ้านตำบลท่าหิน อำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา*. กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน).
- วรพงศ์ บุญช่วยแทน ชาตรี หอมเขียว และวรรณพร ชีววุฒิพงศ์. (2559). เครื่องแยกเนื้อและเส้นใยผลตาลโตนด. *อนุสิทธิบัตรไทย เลขที่ 12394*. กรุงเทพฯ: กรมทรัพย์สินทางปัญญา กระทรวงพาณิชย์.
- สำนักงานการเกษตรจังหวัดสงขลา. (2558). *ตาลโตนด (palmyra palm) ประโยชน์ และสรรพคุณตาลโตนด*. สืบค้นเมื่อ 17 ตุลาคม 2562, จาก: <https://puechkaset.com>.
- อรุณ สุขแก้ว วิมล บุญรอด และสุจิตต์ สิงห์พันธุ์. (2559). การออกแบบและสร้างเครื่องขี้ผลตาลโตนดเพื่อการแปรรูปอาหาร. *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 54*. กรุงเทพฯ.

สมรรถนะของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายและผิวข้าง Performance of Base and Shaft Grouted Steel Micropiles

นัสรี หะสาเมา^{1*} ภาณุ พร้อมพุทธานกู¹ และมนัส อนุศิริ¹

Nasree Hasamoh^{1*} Panu Promputthangkoon¹ and Manus Anusiri¹

บทคัดย่อ

บทความนี้แสดงผลการศึกษาสมรรถนะของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายและผิวข้าง เสาเข็มที่ทดสอบเป็นท่อเหล็กกลมกลวงมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 9 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ยาว 2 เมตร การศึกษาเริ่มต้นโดยกดเสาเข็มเหล็กให้จมลงในชั้นดินทรายที่ระดับความลึก 1.80 เมตร จากนั้นจึงทำการทดสอบ 2 รูปแบบ ประกอบด้วยเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูน และเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายและผิวข้าง สำหรับเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูน การอัดฉีดได้กำหนดขนาดความดันที่ 5 บาร์ จากนั้นทิ้งให้น้ำปูนแข็งตัวเป็นเวลา 28 วัน แล้วจึงทำการทดสอบหาน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มตามมาตรฐาน ASTM D 1143-81 จากการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (ultimate load) ของเสาเข็มเหล็กที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนโดยใช้วิธี Davisson พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.31 ตัน มีการทรุดตัวเท่ากับ 5.75 มิลลิเมตร ในขณะที่วิธี Terzaghi มีค่าเท่ากับ 2.58 ตัน มีการทรุดตัวเท่ากับ 9 มิลลิเมตร แต่สำหรับเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูน ผลการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยโดยวิธี Davisson พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.33 ตัน มีการทรุดตัวเท่ากับ 5.80 มิลลิเมตร และวิธี Terzaghi มีค่าเท่ากับ 2.61 ตัน มีการทรุดตัวเท่ากับ 9 มิลลิเมตร จากการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเสาเข็มเหล็กที่มีการอัดฉีดน้ำปูนมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยมากกว่าเสาเข็มเหล็กที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูน ทั้งนี้เนื่องจากปูนที่ยึดเกาะเสาเข็มมีส่วนช่วยเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างดินกับเสาเข็มทำให้มีการรับน้ำหนักได้ดีขึ้น

คำสำคัญ: เสาเข็มไมโครไพล์เหล็ก อัดฉีดน้ำปูน กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาวิทยาลัเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตสงขลา

* Corresponding author e-mail: firefox_me@live.com

Received: 7 May 2021, Revised: 26 May 2021, Accepted: 27 May 2021

Abstract

This paper presented the results obtained from the performance of steel micropiles grouted with cement both at the base and along the shaft. The tested hollow steel piles were 9 cm in diameter, 3 mm thick, and 2 m. long. The study began by pressing the steel piles into the sand level at the depth of 1.80 m. Then, two types of test were performed, including a normal pile and a pile with both base and shaft grouts. For the latter, the grouting process was carried out using the pressure of 5 bars; the grout then was left for 28 days to set up. After that, pile load test was conducted according to the ASTM D 1143-81 standard. From the analysis of the ultimate load of pile capacity for the normal pile with respect to Davisson's method, it was found that the ultimate pile capacity was 2.31 tons with the settlement of 5.75 mm. When employing Terzaghi's method, however, the ultimate pile capacity and respective settlement were 2.58 tons and 9 mm. For the grouted pile, Davisson's method yielded the ultimate pile capacity and settlement of 2.33 tons and 5.80 mm, respectively. For Terzaghi's method, however, it was observed that the ultimate pile capacity was 2.61 tons, while its corresponding settlement was 9 mm. From these results, it indicated that the grouted steel pipe pile has greater ultimate pile capacity than that of the normal pile. This was because the grout adhered to the pile could increase the friction between surround soil and pile shaft thereby increased the pile capacity.

Keywords: Steel pipe micro pile, Cement grout, Ultimate pile capacity

บทนำ

ปัจจุบันเสาเข็มไมโครไพล์เป็นทางเลือกหนึ่งในการก่อสร้างที่ต้องการความรวดเร็วหรือพื้นที่การก่อสร้างที่มีการจำกัดพื้นที่ ซึ่งเสาเข็มไมโครไพล์มีความสะดวกในการเข้าไปทำงานในพื้นที่เล็ก ๆ ได้เนื่องจากเป็นเครื่องจักรขนาดเล็ก รวมทั้งยังสามารถทำการก่อสร้างต่อได้ทันทีหลังจากงานก่อสร้างเสาเข็มแล้วเสร็จ และยังสามารถตอกเสาเข็มใกล้เคียงอาคารเดิมได้โดยส่งผลกระทบต่อเสาเข็มชนิดอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตามเสาเข็มไมโครไพล์นั้นไม่เป็นที่นิยมมากนัก เนื่องจากมีความสามารถในการรับกำลังได้น้อย ซึ่งบางครั้งในการก่อสร้างมีความจำเป็นต้องการใช้เสาเข็มไมโครไพล์ที่รับน้ำหนักได้มากกว่าปกติที่รับได้

ในปัจจุบันมีการวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบสมรรถนะเสาเข็มไมโครไพล์ในด้านต่าง ๆ เช่น การใช้เทคนิคจัดกลุ่มเสาเข็มไมโครไพล์เป็นวงกลมเพื่อเสริมความสามารถในการรับแรงดัดให้แก่ฐานราก (Abdollahi and Mortezaei, 2015) การเสริมความยาวเสาเข็มตอกโดยใช้เสาเข็มไมโครไพล์ตอกลงไปในช่องว่างของเสาเข็มตอกชนิดกลวงเพื่อทดสอบสมรรถนะต่าง ๆ (Justo *et al.*, 2017) ทั้งนี้เพื่อลดข้อจำกัดของเสาเข็มไมโครไพล์ในด้านสมรรถนะการใช้งานในก่อสร้าง นอกจากนี้ยังมีการวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของคลื่นแผ่นดินไหวที่ส่งผลต่อฐานรากขนาดเล็กอีกมากมาย

Meyerhof (1951) กล่าวว่าความสามารถกำลังแบกทานของเสาเข็มนั้นแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือแรงเสียดทานรอบเสาเข็ม (Q_u) และแรงดันที่ปลายเสาเข็ม (Q_p) ซึ่งในภาคปฏิบัติแล้วจะเกี่ยวข้องกัน ในการช่วยรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม Francis *et al.* (1961) ได้ทำการวัดค่าการส่งถ่ายน้ำหนักแบกทานจากเสาเข็มสี่เหลี่ยมขนาด 6x6 นิ้ว ในชั้นดินตะกอนและชั้นหิน ผลการศึกษาพบว่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเกือบทั้งหมดถูกถ่ายไปยังชั้นดินโดยรอบตัวเสาเข็มเกือบทั้งหมด

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการเพิ่มสมรรถนะของเสาเข็มไมโครไพล์ให้สามารถรับกำลังแบกทานได้มากขึ้นจากปกติโดยการอัดฉีดน้ำปูนที่ผิวข้างและปลายเสาเข็ม เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมฐานราก ซึ่งจะทำให้การทดสอบสมรรถนะของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็ก โดยใช้เสาเข็มไมโครไพล์เหล็กกลมกลวงโดยทำการทดสอบเป็น 2 ประเภทด้วยกันประกอบด้วยเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูน และเสาเข็มมีการอัดฉีดน้ำปูนที่ผิวข้างและปลายเสาเข็ม โดยการอัดฉีดน้ำปูนจะทำการอัดฉีดด้วยเครื่องอัดฉีดแรงดันสูงผ่านท่อเสริมที่จะต้องติดตั้งเพิ่มเติมก่อนการตอกเสาเข็ม จากนั้นทำการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มทั้งสองประเภท พร้อมทั้งสังเกตพฤติกรรมของเสาเข็มเพื่อนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบเสาเข็มมีการอัดฉีดน้ำปูนกับไม่มีการอัดฉีดน้ำปูน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและทดลองเทคนิคการอัดฉีดน้ำปูน และเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนและไม่มีการอัดฉีดน้ำปูน

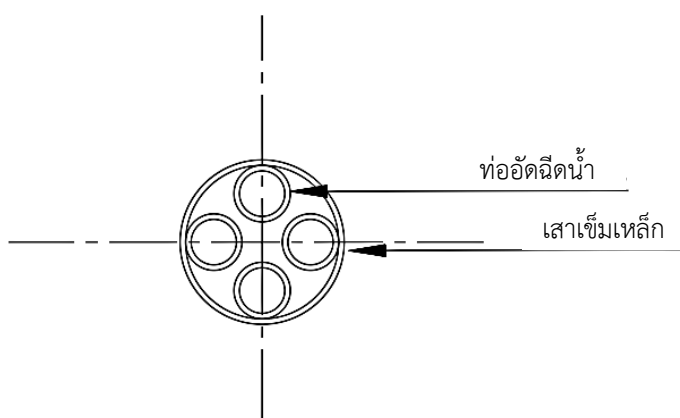
วิธีดำเนินการวิจัย

เตรียมพื้นที่สำหรับการทดสอบ โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้พื้นที่บริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตสงขลา ทำการเจาะเก็บตัวอย่างชั้นดินบริเวณที่จะทำการทดสอบโดยใช้สว่านมือในการเก็บตัวอย่างดิน ทำการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ตามมาตรฐาน ASTM D 854-00 (American Society for Testing and Materials, 2014) การกระจายตัวของเม็ดดิน ตามมาตรฐาน ASTM D 422-63 (American Society for Testing and Materials, 1998) เพื่อจำแนกประเภทดิน

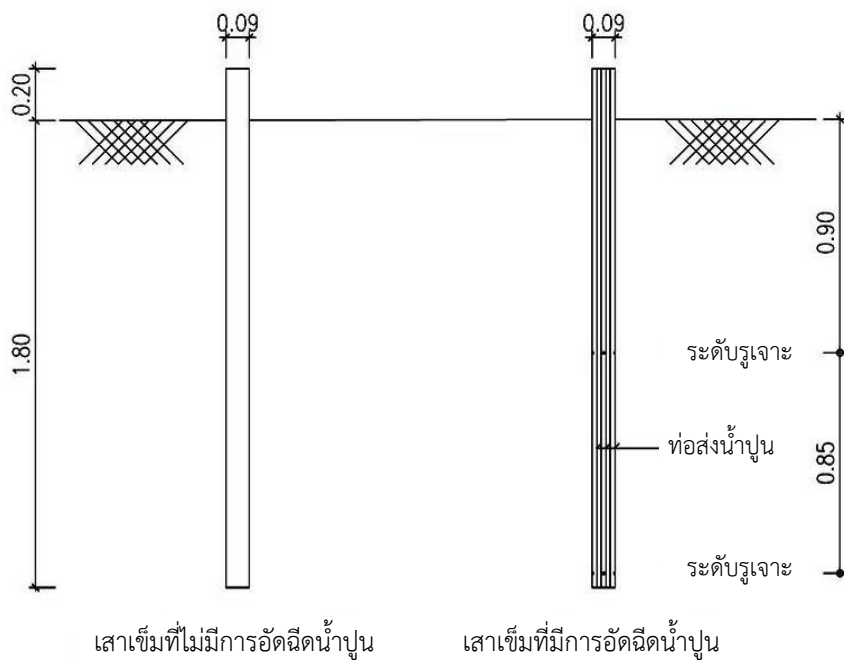


ภาพที่ 1 การเก็บตัวอย่างดินด้วยสว่านมือ

เตรียมเสาเข็มเหล็กที่จะทำการอัดฉีดน้ำปูนโดยใช้ท่ออัดฉีดน้ำปูนเหล็กกลมกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.10 เซนติเมตร ความยาว 2.00 เมตร นำมาเชื่อมยึดติดกับเสาเข็มจำนวน 4 ด้าน โดยเว้นระยะห่างระหว่างแต่ละท่ออย่างเท่า ๆ กัน ที่บริเวณภายในเสาเข็ม แสดงดังภาพที่ 2 ที่ปลายท่ออัดฉีดน้ำปูนจะใช้แผ่นเหล็กเชื่อมปิดช่องว่างเพื่อป้องกันดินจากภายนอก และใช้สว่านเจาะรูด้านข้างท่ออัดฉีดน้ำปูนขนาด 13/32 นิ้ว จำนวนด้านละ 1 รู ที่ระดับความลึก 0.90 เมตร และ 1.75 เมตร จากผิวดิน เพื่ออัดฉีดน้ำปูนเพื่อให้ น้ำปูนสามารถไหลออกมาทางช่องเปิดดังกล่าว แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 ตำแหน่งติดตั้งท่ออัดฉีดน้ำปูนและลำดับการอัดฉีดน้ำปูน



ภาพที่ 3 การติดตั้งเสาเข็มที่ใช้ในการทดสอบ

เมื่อเตรียมการเสาเข็มแล้วเสร็จจึงทำการการติดตั้งเสาเข็มโดยใช้รถแบคโฮ (excavator) กัดเสาเข็มโดยให้ปลายเสาเข็มอยู่ต่ำกว่าระดับดินเดิม 1.80 เมตร เมื่อเสาเข็มอยู่ในระดับที่ต้องการแล้ว จะทำการอัดฉีดน้ำปูนซีเมนต์เฟสอัตราส่วน W/C ratio 0.70 ด้วยแรงดัน 5 บาร์ ลงในท่อตามลำดับ การอัดฉีดน้ำปูน แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การอัดฉีดน้ำปูนเข้าท่อ

หลังจากทำการอัดฉีดน้ำปูนแล้วเสร็จปล่อยตัวอย่างทิ้งไว้ให้น้ำปูนแข็งตัวเป็นเวลา 28 วัน แล้วทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ ผลการทดสอบกำลังมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 178.64 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นจึงเริ่มทำการทดสอบ static load test ตามมาตรฐาน ASTM D 1143-81 (American Society for Testing and Materials, 1994) เพื่อหาสมรรถนะของเสาเข็ม โดยการทดสอบด้วยวิธีแพลตฟอร์มให้น้ำหนัก โดยใช้แม่แรงให้แรงกระทำที่หัวเสาเข็มโดยตรง พร้อมบันทึกการทรุดตัวดังภาพที่ 5 การทดสอบจะค่อย ๆ เพิ่มน้ำหนักบรรทุกร้อยละ 25 ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดต่อครั้ง โดยจะคองน้ำหนักไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมง โดยหากอัตราการทรุดตัวเกินกว่า 0.25 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงนั้นจะต้องคองน้ำหนักบรรทุกทดสอบต่อไปอีก 1 ชั่วโมง รวมเป็น 2 ชั่วโมง จึงทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไป และเมื่อเสาเข็มถึงจุดวิบัติแล้วจะคองน้ำหนักต่อไปอีก 12 ชั่วโมง รวมเป็น 14 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการลดน้ำหนักบรรทุกร้อยละ 25 ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดต่อครั้งในทุก ๆ ชั่วโมง และเมื่อถอนน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดจะใช้ dial gauge วัดค่าการทรุดตัวต่อไปอีก 12 ชั่วโมง เพื่อหาค่าการคืนตัวถาวรของเสาเข็ม โดยการทดสอบ static load test ในแต่ละตัวอย่างนั้นใช้ระยะเวลาในการทดสอบอยู่ในช่วงระหว่าง 1-2 วัน ผลการทดสอบที่ได้จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม



ภาพที่ 5 การทดสอบ static load test

เมื่อการทดสอบ static load test บันทึกค่าและสังเกตพฤติกรรมเสาเข็มแล้วเสร็จจากนั้นทำการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มสรุปผลการทดสอบ และทำการขุดดินรอบ ๆ เสาเข็มเพื่อศึกษาคุณลักษณะน้ำปูนที่ทำการอัดฉีดเข้าไปในเสาเข็ม

ผลการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการทดสอบในการเพิ่มประสิทธิภาพของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กโดยการอัดฉีดน้ำปูนบริเวณปลายและผิวข้างของเสาเข็มและเปรียบเทียบกับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูน โดยการศึกษาได้เริ่มจากเก็บตัวอย่างดินบริเวณที่จะทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินบริเวณที่จะทำการทดสอบ และทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มซึ่งจากการศึกษาสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. คุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างดินของพื้นที่บริเวณที่ใช้ในการทดสอบมีความอ่อนแอเฉพาะของเม็ดดินเท่ากับ 2.66 และจากการจำแนกดินแบบ USCS ตามมาตรฐาน ASTM D 2487-17 (American Society for Testing and Materials, 2017) ดินจัดอยู่ในประเภทดินทรายละเอียดที่ไม่ดีหรือ poorly graded sand

2. ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มแบบไม่อัดฉีดน้ำปูนโดยให้น้ำหนักบรรทุกมีผลการขึ้นน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่ไม่อัดฉีดน้ำปูนดังตารางที่ 1 และผลการถอนน้ำหนักบรรทุกและการคืนตัวของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่ไม่อัดฉีดน้ำปูนดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 การขึ้นน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่ไม่อัดฉีดน้ำปูน

น้ำหนักบรรทุก (ตัน)	การทรุดตัว เมื่อขึ้นน้ำหนัก (มิลลิเมตร)	การทรุดตัว เมื่อค้ำน้ำหนักไว้ 1 ชั่วโมง (มิลลิเมตร)	การทรุดตัว เมื่อค้ำน้ำหนักไว้ 2 ชั่วโมง (มิลลิเมตร)	การทรุดตัว เมื่อค้ำน้ำหนักไว้ 14 ชั่วโมง (มิลลิเมตร)
0.625	0.680	0.710	-	-
1.250	1.590	1.660	-	-
1.875	2.880	3.120	3.150	-
2.500	6.070	8.180	8.620	9.680

ตารางที่ 2 การถอนน้ำหนักบรรทุกและการคืนตัวของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่ไม่อัดฉีดน้ำปูน

น้ำหนักบรรทุก (ตัน)	การคืนตัวเมื่อถอน น้ำหนัก (มิลลิเมตร)	การคืนตัวเมื่อถอนน้ำหนัก 1 ชั่วโมง (มิลลิเมตร)	การคืนตัวถาวร (มิลลิเมตร)
1.875	9.570	9.550	-
1.250	9.230	9.200	-
0.625	8.680	8.660	-
0.000	7.590	7.520	7.48

3. ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่อัดฉีดน้ำปูนโดยให้น้ำหนักบรรทุกมีผลการขึ้นน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่ไม่อัดฉีดน้ำปูนดังตารางที่ 3 และผลการถอนน้ำหนักบรรทุกและการคืนตัวของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่อัดฉีดน้ำปูนดังตารางที่ 4

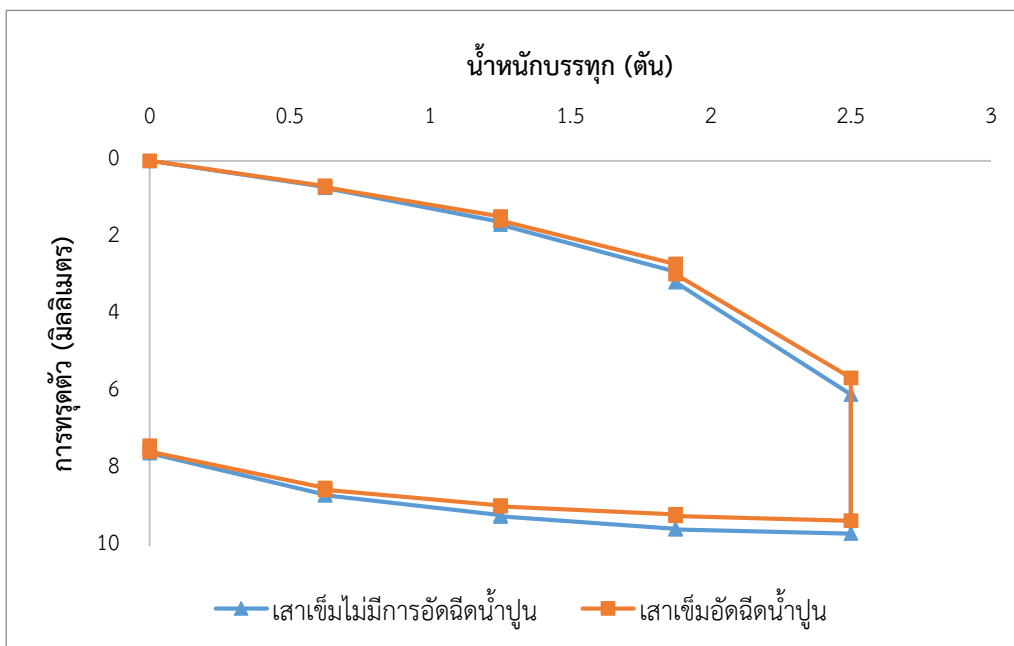
ตารางที่ 3 การขึ้นน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัวของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่อัดฉีดน้ำปูน

น้ำหนักบรรทุก (ตัน)	การทรุดตัว เมื่อขึ้นน้ำหนัก (มิลลิเมตร)	การทรุดตัว เมื่อคงน้ำหนักไว้ 1 ชั่วโมง (มิลลิเมตร)	การทรุดตัว เมื่อคงน้ำหนักไว้ 2 ชั่วโมง (มิลลิเมตร)	การทรุดตัว เมื่อคงน้ำหนักไว้ 14 ชั่วโมง (มิลลิเมตร)
0.625	0.660	0.690	-	-
1.250	1.450	1.550	-	-
1.875	2.680	2.920	2.950	-
2.500	5.640	7.840	8.310	9.340

ตารางที่ 4 การถอนน้ำหนักบรรทุกและการคืนตัวของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่อัดฉีดน้ำปูน

น้ำหนักบรรทุก (ตัน)	การคืนตัวเมื่อถอน น้ำหนัก (มิลลิเมตร)	การคืนตัวเมื่อถอนน้ำหนัก 1 ชั่วโมง (มิลลิเมตร)	การคืนตัวถาวร (มิลลิเมตร)
1.875	9.220	9.180	-
1.250	8.970	8.950	-
0.625	8.540	8.490	-
0.000	7.550	7.480	7.400

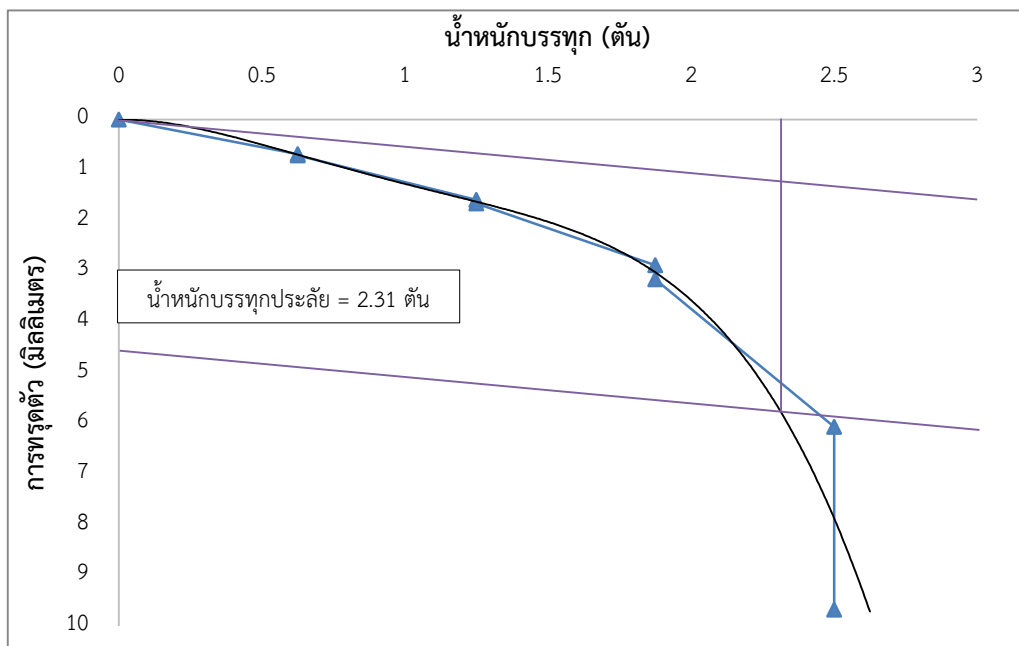
จากตารางผลการให้น้ำหนักบรรทุกและการถอนน้ำหนักบรรทุกสำหรับเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กแบบตัวอย่างทดสอบชนิดไม่อัดฉีดน้ำปูนดังตารางที่ 1 และ 2 แบบตัวอย่างทดสอบชนิดอัดฉีดน้ำปูนดังตารางที่ 3 และ 4 สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่มีการอัดฉีดน้ำปูนและไม่มีการอัดฉีดน้ำปูน แสดงดังภาพที่ 6



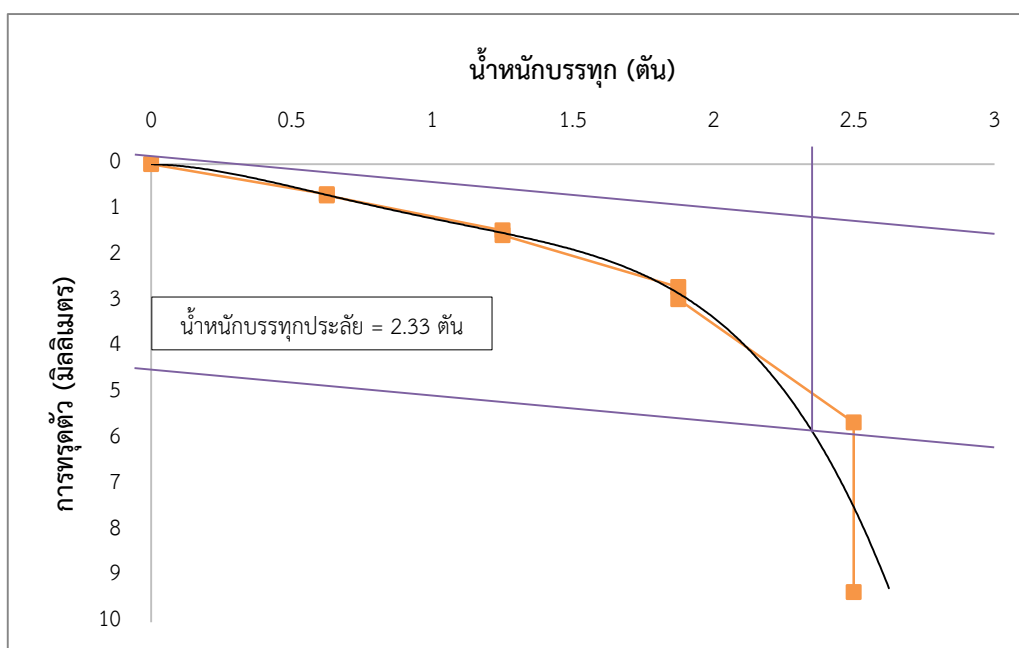
ภาพที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการดูดตัวกับน้ำหนักบรรจุของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่มีการอัดฉีดน้ำปูนและไม่มีการอัดฉีดน้ำปูน

4. ผลการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มสำหรับการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาวเคราะห์กำลังรับน้ำหนักสูงสุดโดยวิธี Davisson (1973) และวิธี Terzaghi (1967) โดยมีผลการวิเคราะห์ดังนี้

4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรจุของเสาเข็มจากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากกราฟ Davisson จะมีค่าออฟเซตจากเส้นอีลาสติก เท่ากับ $3.81 + 90/120 = 4.56$ มิลลิเมตร เสาเข็มเหล็กไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนจะได้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรจุประลัย (ultimate load) เท่ากับ 2.31 ตัน โดยมีการดูดตัวเท่ากับ 5.75 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 7 และเสาเข็มเหล็กอัดฉีดน้ำปูนจะได้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรจุประลัย (ultimate load) เท่ากับ 2.33 ตัน โดยมีการดูดตัวเท่ากับ 5.80 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 8

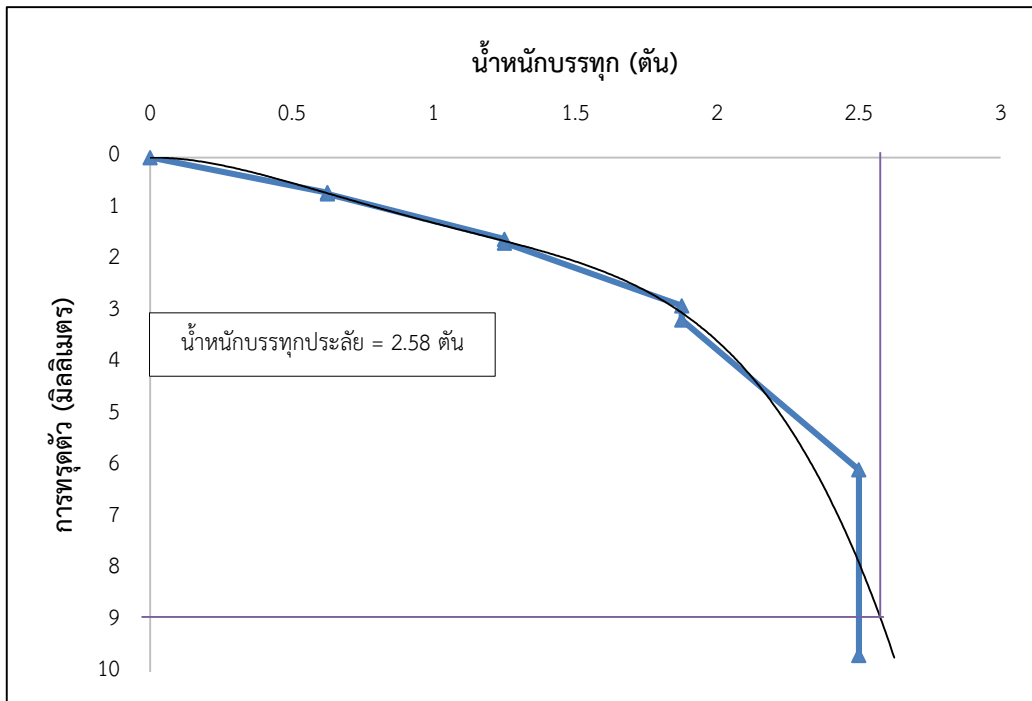


ภาพที่ 7 กราฟกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มเหล็กไม่อัดฉีดน้ำปูนโดยวิธี Davisson (1973)



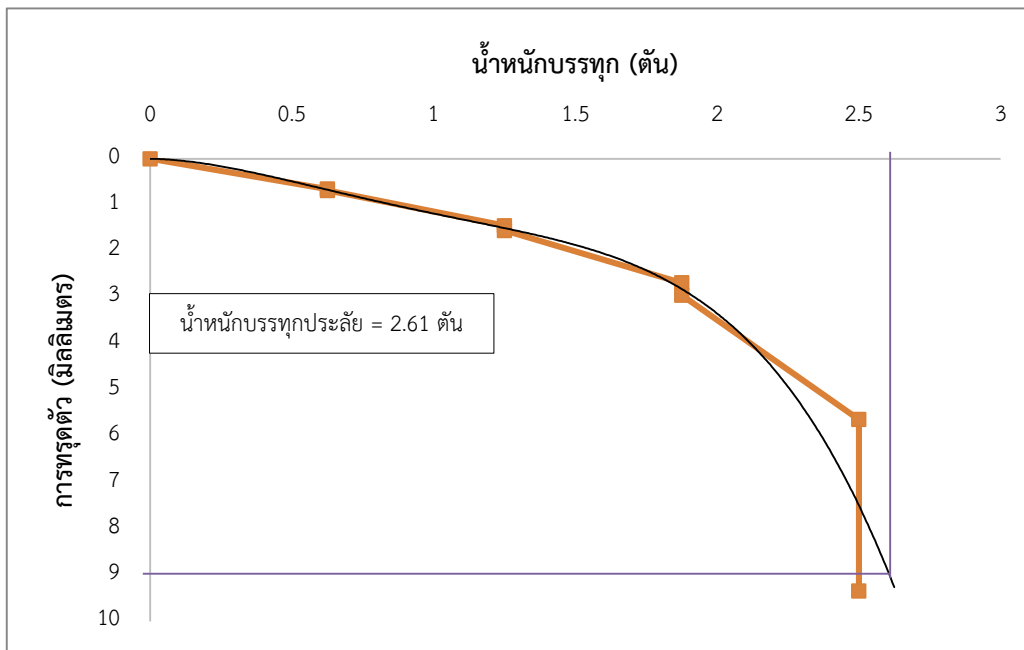
ภาพที่ 8 กราฟกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มเหล็กอัดฉีดน้ำปูนโดยวิธี Davisson (1973)

4.2 Terzaghi (1967) ได้ให้นิยามค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มโดยอาศัยการทรุดตัวเป็นเกณฑ์ โดยถือว่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิกฤติของเสาเข็มเป็นน้ำหนักบรรทุกทดสอบเสาเข็มที่ทำให้ระยะการทรุดตัวของเสาเข็มเป็นร้อยละ 10 ของเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม เสาเข็มโครไฟท์เหล็กที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก เท่ากับ 90 มิลลิเมตร ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้การทรุดตัวของเสาเข็มเท่ากับ 9 มิลลิเมตร เป็นน้ำหนักบรรทุกสูงสุดตามวิธี Terzaghi (1967) แสดงดังภาพที่ 9 และภาพที่ 10



ภาพที่ 9 กราฟกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มเหล็กไม่อัดฉีดน้ำปูนโดยวิธี Terzaghi (1967)

จากกราฟที่ 9 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มเหล็กไม่อัดฉีดน้ำปูนโดยวิธี Terzaghi (1967) จะได้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 2.58 ตัน โดยมีการทรุดตัวเท่ากับ 9.00 มิลลิเมตร



ภาพที่ 10 กราฟกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มเหล็กอัดฉีดน้ำปูนโดยวิธี Terzaghi (1967)

จากกราฟที่ 10 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มเหล็กไม่อัดฉีดน้ำปูนโดยวิธี Terzaghi (1967) จะได้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 2.61 ตัน โดยมีการทรุดตัวเท่ากับ 9.00 มิลลิเมตร

5. ผลการศึกษาการอัดฉีดน้ำปูน การทดสอบนี้ได้ทำการอัดฉีดน้ำปูนผ่านท่ออัดฉีดน้ำปูนให้น้ำปูนยัดเกาะส่วนปลายและผิวข้างของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของเสาเข็มไมโครไพล์เหล็ก โดยการทดสอบได้ใช้ความดันในการอัดฉีดน้ำปูนเข้าท่อที่ระดับความดัน 5 บาร์ ซึ่งเมื่อทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มแล้วเสร็จได้ทำการขุดเสาเข็มเหล็กขึ้นมาดูปริมาณน้ำปูนที่เกาะส่วนปลายและผิวข้างของเสาเข็มแสดงดังภาพที่ 11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีปริมาณน้ำปูนที่ยึดเกาะผิวข้างมีความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ส่วนที่ปลายเสาเข็มไม่มีน้ำปูนแผ่ออกจากท่ออัดฉีดน้ำปูนเนื่องจากแรงดันดินที่ปลายเสาเข็มมีมากกว่าที่ผิวข้างเสาเข็ม



ภาพที่ 11 ปริมาณน้ำปูนที่ยึดเกาะเสาเข็มโครไฟล์เหล็ก

การอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาผลการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มไมโครไฟล์เหล็กที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนและการอัดฉีดน้ำปูนพบว่าการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยโดยวิธี Davisson (1973) เสาเข็มไมโครไฟล์เหล็กที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเท่ากับ 2.31 ตัน โดยมีการทรุดตัวเท่ากับ 5.75 มิลลิเมตร ในขณะที่เสาเข็มไมโครไฟล์เหล็กที่มีการอัดฉีดน้ำปูนมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเท่ากับ 2.33 ตัน โดยมีการทรุดตัวเท่ากับ 5.80 มิลลิเมตร

สำหรับการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยโดยวิธี Terzaghi (1967) เสาเข็มไมโครไฟล์เหล็กที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (ultimate load) เท่ากับ 2.58 ตัน โดยมีการทรุดตัวเท่ากับ 9.00 มิลลิเมตร ในขณะที่เสาเข็มไมโครไฟล์เหล็กที่มีการอัดฉีดน้ำปูนมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเท่ากับ 2.61 ตัน โดยมีการทรุดตัวเท่ากับ 9.00 มิลลิเมตร จากผลการวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยทั้งสองรูปแบบ พบว่าเสาเข็มเหล็กที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนจะมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยน้อยกว่าเสาเข็มเหล็กที่มีการอัดฉีดน้ำปูนเล็กน้อย เนื่องจากเสาเข็มเหล็กที่มีการอัดฉีดน้ำปูนมีปริมาณน้ำปูนที่ยึดเกาะผิวข้างเสาเข็มเป็นตัวช่วยในการต้านแรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับผิวดินทำให้เสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยดีกว่าเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูน ทั้งนี้กำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มเหล็กที่มีการอัดฉีดน้ำปูนมีค่าสูงกว่าเสาเข็มเหล็กที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนเพียงเล็กน้อย

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาค้นคว้านี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างดินบริเวณที่จะทำการทดสอบด้วยสว่านมือและนำตัวอย่างดินหาคุนสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม ทำการกดเสาเข็มลงสู่ชั้นดินและทำการอัดฉีดน้ำปูน

สำหรับตัวอย่างเสาเข็มแบบมีการอัดฉีดน้ำปูนทั้งให้น้ำปูนแข็งตัว 28 วัน แล้วจึงทำการทดสอบ static load test นำผลการทดสอบวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยโดยวิธี Davisson (1973) และ Terzaghi (1967) จากนั้นทำการขุดดินรอบ ๆ เสาเข็มเพื่อศึกษาลักษณะน้ำปูนที่ยึดติดกับเสาเข็มจากการศึกษาสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินบริเวณที่ใช้ในการทดสอบมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.66 ชนิดของดินอยู่ในดินประเภทดินทราย

2. การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยโดยวิธี Davisson (1973) เสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเท่ากับ 2.31 ตัน โดยมีการทรุดตัวเท่ากับ 5.75 มิลลิเมตร และเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่มีการอัดฉีดน้ำปูนมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเท่ากับ 2.33 ตัน โดยมีการทรุดตัวเท่ากับ 5.80 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

3. การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยโดยวิธี Terzaghi (1967) เสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเท่ากับ 2.58 ตัน โดยมีการทรุดตัวเท่ากับ 9.0 มิลลิเมตร และเสาเข็มไมโครไพล์เหล็กที่มีการอัดฉีดน้ำปูนมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเท่ากับ 2.61 ตัน โดยมีการทรุดตัวเท่ากับ 9.0 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถรับกำลังแบกทานได้มากกว่าเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนเพียงเล็กน้อย

4. การขุดดินรอบ ๆ เสาเข็มเพื่อศึกษาลักษณะน้ำปูนที่ยึดติดกับเสาเข็ม พบว่าการอัดฉีดน้ำปูนที่ความดัน 5 บาร์ที่วัดจากเครื่องอัดฉีดน้ำปูนทำให้น้ำปูนที่ยึดเกาะกับผิวข้างเหล็กเสาเข็มมีปริมาณน้อยโดยมีความยาวเพียงประมาณ 10 เซนติเมตร และยึดเกาะเพียงด้านเดียว ซึ่งความดันดังกล่าวนี้ไม่เพียงพอสำหรับการกระจายน้ำปูนให้ยึดเกาะเสาเข็มให้ทั่วถึงและมีปริมาณมากพอ ส่วนบริเวณปลายเสาเข็มนั้นไม่มีน้ำปูนเกาะ เนื่องจากการตอกเสาเข็มนั้นมีผลทำให้ดินโดยรอบที่บริเวณปลายเสาเข็มแน่นตัวขึ้นอย่างมาก

ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาการอัดฉีดน้ำปูนเข้าท่อส่งน้ำปูนที่มีความดันมากกว่า 5 บาร์ เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำปูนให้ยึดเกาะเสาเข็มเหล็กมากขึ้น หรือศึกษาวิธีการอัดฉีดน้ำปูนแบบใหม่เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของน้ำปูนเพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเสาเข็มกับชั้นดินโดยรอบให้มากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขต สงขลา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการทดสอบ รวมถึงอาจารย์และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่สนับสนุน และให้ความอนุเคราะห์ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Abdollahi, K. and Mortezaei, A. (2015). A new expression for determining the bending stiffness of circular micropile groups. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 77, 58-70.
- American Society for Testing and Materials. (1994). *ASTM D 1143-81 (reapproved 1994): standard test method for piles under static axial compressive load*. Retrieved 14 April 2019, from: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D1143-81R87E1.htm>.
- American Society for Testing and Materials. (1998). *ASTM D 422-63: standard test method for particle-size analysis of soils*. Retrieved 14 April 2019, from: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D422-63R98.htm>.
- American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM D 854-00: standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*. Retrieved 14 April 2019, from: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D854-00.htm>.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM D 2487-17: standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)*. Retrieved 14 April 2019, from: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D2487-17.htm>.
- Davissom, M.T. (1973). *Static load testing. Helical screw foundation system design manual for new construction*. Chicago: Illinois Institute of Technology.
- Francis, A.J., Savory, N.R., Stevens, L.K. and Trollope, D.H. (1961). *The behaviour of slender point-bearing piles in soft soil, symposium on design of tall buildings*. Hong Kong: University of Hong Kong.
- Justo, E., Vázquez-Boza, M., Justo, J.L. and Arcos, J.L. (2017). An elastoplastic model for the analysis of a driven pile extended with a micropile. *Computers and Geotechnics*, 87, 10-19.
- Meyerhof, G.G. (1951). The ultimate bearing capacity of foundation, *Geotechnique*, 2(4), 301-332.
- Terzaghi, K. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*, (2nd ed). New York: John Wiley & Sons.

ผลของการเสริมสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Nostoc commune* Vaucher
TISTR 8870 ต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร
และการสร้างสีของปลากัด (*Betta splendens* Regan, 1910)
Effects of cyannobacteria, *Nostoc commune* Vaucher
TISTR 8870 supplementation on growth, feed utilization and
coloration of Siamese fighting fish (*Betta splendens* Regan, 1910)

ฐิรารัตน์ แก้วจำนง¹ สมรักษ์ รอดเจริญ^{1*} อำนวยโชค เวชกุล¹ รัชชา สามพิมพ์²
การุณ ทองประจุแก้ว³ นัทธ์ นันทพงศ์⁴ มานพ อาดำ¹ และเสาวลักษณ์ มาลาวั⁴

Thirarat Kaewchamnong¹, Somrak Rodjaroen^{1*}, Amnuaychok Wetchakul¹,
Thatcha Sampim², Karun Thongprajukaew³, Nutt Nuntapong⁴, Manop Adam¹
and Saowalak Malawa⁴

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และการสร้างสีของปลากัด (*Betta splendens* Regan, 1910) ที่เลี้ยงด้วยอาหารเสริมสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Nostoc commune* Vaucher TISTR 8870 โดยเลี้ยงปลากัดอายุ 6 สัปดาห์ (0.72 ± 0.09 กรัม) ด้วยอาหารที่มีสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *N. commune* Vaucher TISTR 8870 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน 5 ระดับ คือ 0.0 1.0 2.5 5.0 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์ แต่ละชุดการทดลองมี 15 ซ้ำ เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่าปลากัดที่เลี้ยงด้วยอาหารไม่เสริมสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *N. commune* Vaucher TISTR 8870 และที่มีการเสริมสาหร่าย 1 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเฉลี่ย ความยาวเพิ่มขึ้นเฉลี่ย น้ำหนักเพิ่มขึ้นต่อวัน และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่มขึ้นต่อวันดีที่สุดและมีความแตกต่างกัน

¹ สาขาเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

² สาขานวัตกรรมชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

³ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพและวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

⁴ สาขาวิชาวาริชศาสตร์และนวัตกรรมการจัดการ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

* Corresponding author e-mail: somrak_25@hotmail.com

Received: 18 May 2021, Revised: 1 June 2021, Accepted: 2 June 2021

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับทุกชุดการทดลอง ยกเว้นอัตราการรอดตายที่ทุกชุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 100 ± 0.00 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ พบว่าชุดการทดลองที่มีการเสริมสาหร่าย 1 เปอร์เซ็นต์ มีค่าต่ำที่สุดและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง และความเป็นสีเหลืองของสีผิวของปลากัดที่เลี้ยงด้วยอาหารที่เสริมและไม่เสริมสาหร่ายสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *N. commune* Vaucher TISTR 8870 ซึ่งพบว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) กิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์เอนไซม์เพปซินและโคโมทรูปซินไม่มีความแตกต่างกัน แต่กิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ไลเปสมีค่าสูงในปลาในชุดควบคุมและปลาที่ได้รับสาหร่ายที่ระดับ 1.0 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์ ($p > 0.05$) คุณภาพน้ำในการเลี้ยงปลากัดพบว่าค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง และค่าอุณหภูมิมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยพบว่าชุดควบคุม มีค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง ต่ำสุดอยู่ที่ 6.24 ± 0.10 และค่าอุณหภูมิ น้ำพบว่าที่เสริมสาหร่าย 2.5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าอุณหภูมิต่ำสุดคือ 26.34 ± 0.03 องศาเซลเซียส ส่วนค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและแอมโมเนียไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) กับทุกชุดการทดลอง ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าอาหารปลากัดที่มีการเสริมสาหร่าย 1.0 เปอร์เซ็นต์มีค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อต่ำสุดซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการเลี้ยงปลากัดเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ: *Nostoc commune* การเจริญเติบโต ปลากัด

Abstract

The objective of this research was to study the growth, feed utilization, and coloration of Siamese fighting fish (*Betta splendens* Regan, 1910) fed with *Nostoc commune* Vaucher TISTR 8870 supplemented diets. The 6-week-old fish (0.72 ± 0.09 g) were fed with experimental diets containing five inclusion levels of *N. commune* (0.0, 1.0, 2.5, 5.0 and 10.0%), comprising fifteen fish each, over eight-week duration. The fish fed control and 1.0% *N. commune* containing diets exhibited superior average body weight, average body length, daily weight gain and percentage of daily weight gain, as compared to remaining treatments ($p < 0.05$), while survival rate was $100 \pm 0.00\%$ in all dietary treatments. Significantly positive feed conversion ratio was obtained in fish fed 1.0% *N. commune* containing diet relative to remaining treatments ($p < 0.05$). The lightness, redness and yellowness did not differ between fish fed

control and *N. commune* containing diets ($p > 0.05$). Specific activities of pepsin and chymotrypsin were not different, whereas specific activity of lipase was high in fish fed control diet and the diets containing 1.0 and 2.5% *N. commune* ($p > 0.05$). The differences in average pH and temperature were found over experimental duration ($p < 0.05$). The lowest pH (6.24 ± 0.10) and temperature (26.34 ± 0.03 °C) were recorded in respective treatments of control and 2.5% *N. commune* containing diet. There was no statistical difference in dissolved oxygen ammonia concentration in all dietary groups ($p > 0.05$). Findings from the current study indicate that fish fed diet containing 1.0% *N. commune* contributes the lowest conversion ratio, reducing the cost for commercial production of Siamese fighting fish farming.

Keywords: *Nostoc commune*, Growth, *Betta splendens*

บทนำ

สาหร่ายเห็ดดลาบ (*Nostoc commune* Vaucher) เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่พบได้ทั่วไป มีลักษณะเป็นแผ่นแบนบาง มีการเจริญเติบโตเป็นแบบเส้นสายและมีเมือกห่อหุ้ม มีสีเขียวแกมน้ำเงินจนถึงสีเขียวอมเหลือง ขนาดของสาหร่ายจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่เจริญเติบโต สาหร่ายชนิดนี้นิยมนำมาบริโภคเป็นอาหาร และมีสมบัติทางเภสัชกรรมในการลดการอักเสบ แก้ไขโรคตาบอดกลางคืน และรักษาแผลไฟไหม้น้ำร้อนลวก (Qiu *et al.*, 2002) การศึกษาข้อมูลทางโภชนาการของสาหร่ายเห็ดดลาบที่พบในธรรมชาติ พบว่า มีปริมาณโปรตีน 20 เปอร์เซ็นต์ โดยมีกรดอะมิโนจำเป็นครบถ้วน มีไขมันต่ำและมีใยอาหารสูงถึง 43 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสาหร่ายที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ พบว่ามีวิตามินเอและกรดอะมิโนจำเป็นเพิ่มขึ้น แต่มีใยอาหารลดลง 17 เท่า (อาภารัตน์, 2546.)

การใช้สาหร่ายเป็นแหล่งวัตถุดิบอาหารมีรายงานในสัตว์น้ำหลายชนิด (Thongprajukaew *et al.*, 2011; Rountos *et al.*, 2019; Sattanathan *et al.*, 2020) โดยเฉพาะการนำสาหร่ายมาผสมในอาหารสัตว์น้ำ ทั้งการเสริมแบบทดแทนสัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอาหาร หรือการเสริมเพื่อปรับปรุงสีและกระตุ้นการสร้างภูมิคุ้มกัน (เทพรัตน์ และคณะ, 2554) ทั้งนี้หวังผลว่าจะสามารถช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโต อัตราการรอด ลดอัตราการแลกเนื้อ และเพิ่มภูมิคุ้มกัน (Peiiaflorida and Golez, 1996)

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ คาดว่าสามารถหาระดับปริมาณสาหร่าย *N. commune* TISTR 8870 ที่เหมาะสมสำหรับใช้เสริมในอาหารปลากัดที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้

อาหารในปลากัด ตลอดจนสามารถส่งเสริมให้มีการนำสาหร่ายชนิดนี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์น้ำต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *N. commune* Vaucher TISTR 8870 และการเตรียมสาหร่ายแห้ง

นำหัวเชื้อสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *N. commune* Vaucher TISTR 8870 จากคลังสาหร่าย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) เลี้ยงในอาหารสูตร BG-11 ในพลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร โดยเติมอาหารปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปวางบนเครื่องเขย่าเลี้ยงสาหร่าย ความเร็ว 150 รอบต่อนาที โดยให้ความเข้มแสง 1,000 ลักซ์ จากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ช่วงรับแสงมืด : สว่าง เท่ากับ 12 : 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 28 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 สัปดาห์ (อดิศักดิ์, 2559) เมื่อได้ความหนาแน่นของเชื้อเพียงพอ นำเชื้อไปขยายต่อใน พลาสติก 500 มิลลิลิตร ที่บรรจุอาหารปริมาตร 200 มิลลิลิตร แล้วนำไปเลี้ยงที่สภาวะเหมือนเดิม จนได้ปริมาตรของเชื้อเพียงพอสำหรับการทดลองขั้นต่อไป หลังจากนั้นนำตัวอย่างสาหร่ายไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Delta 2-24 LSC; Martin Christ Gefriertrocknungsanlagen GmbH, Osterode am Harz, Germany) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และนำตัวอย่างเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2. การผลิตอาหารทดสอบ และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

บดวัตถุดิบอาหารให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรง นำวัตถุดิบอาหาร ได้แก่ ปลาป่น กากถั่วเหลือง กากเตนข้าวสาลี ตับหมึกป่น และแป้งสาลี มาผสมให้เข้ากัน หลังจากนั้นนำส่วนผสมดังกล่าวผสมกับวัตถุดิบอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 และเติมน้ำ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก อัดเม็ดอาหารให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปบรรจุในถุงพอลิเอทิลีนและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และสุ่มอาหารจำนวน 100 กรัม มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตามวิธีการของ AOAC (2005) ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ไขมัน เยื่อใย และเถ้า สำหรับปริมาณของไนโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรก (เปอร์เซ็นต์) คำนวณจาก $100 - (\text{โปรตีน} + \text{ไขมัน} + \text{เยื่อใย} + \text{เถ้า})$ ส่วนพลังงานรวม (gross energy, กิโลจูลต่อกรัม) คำนวณจาก $(\text{ไนโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรก} \times 17.2) + (\text{โปรตีน} \times 23.6) + (\text{ไขมัน} \times 39.5)$ (Bureau *et al.*, 2002) ทั้งนี้อาหารทดสอบทั้ง 5 สูตร มีปริมาณโปรตีน (isonitrogenous) ไขมัน (isolipidic) และพลังงานรวม (isoenergetic) ที่ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 สูตรอาหารและองค์ประกอบทางเคมีของอาหารที่เสริมด้วยสาหร่ายสีเขียวแกมเงิน *N. commune* Vaucher สำหรับใช้เลี้ยงปลากัด

รายการ	ระดับของสาหร่าย (เปอร์เซ็นต์)				
	0.0	1.0	2.5	5.0	10.0
วัตถุดิบอาหาร					
ปลาป่น	30	30	30	30	30
กากถั่วเหลืองกะเทาะเปลือก	20	19	17	15	10
กลูเตนข้าวสาลี	12	12	12	12	12
ตับหมึกป่น	5	5	5	5	5
แป้งสาลี	20	20	20	20	20
เลซิทิน	2	2	2	2	2
น้ำมันปลา	1	1	1	1	1
น้ำมันถั่วเหลือง	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
โคลีนคลอไรด์	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
วิตามินและแร่ธาตุรวม	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
อินซูลิน	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
ไดแคลเซียมฟอสเฟต	1	1	1	1	1
สาหร่ายแห้ง	0	1	2.5	5	10
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1
องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์ ของอาหาร)					
โปรตีน	42.57	41.59	42.07	42.18	41.05
ไขมัน	9.66	10.35	10.38	10.11	9.85
เยื่อใย	6.03	6.18	6.16	6.15	6.20
เถ้า	9.81	10.27	10.67	10.80	11.40
ไนโตรเจนฟรีเอกซ์แทรก	31.93	31.61	30.72	30.76	31.50
พลังงานรวม (กิโลจูล/กรัม)	19.35	19.34	19.31	19.24	19.00

3. การเลี้ยงปลากัด

ออกแบบการทดลอง 5 ชุดการทดลอง แต่ละชุดการทดลองมี 15 ซ้ำ คือ เลี้ยงด้วยอาหารปลากัด (ชุดควบคุม) และเลี้ยงด้วยอาหารปลากัดเสริมด้วยสาหร่าย 1.0 2.5 5.0 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นำปลากัดเพศผู้สีแดงทั้งตัวอายุ 6 สัปดาห์ จากแหล่งฟาร์มปลากัดในจังหวัดนครศรีธรรมราชมาเลี้ยงเพื่อปรับสภาพเป็นเวลา 1 สัปดาห์ โดยเลี้ยงปลากัดในขวดโหลขนาด 5.0 x

7.0 x 10.8 เซนติเมตร จำนวน 15 ขวดต่อชุดการทดลอง ซึ่งเติมน้ำ 300 มิลลิลิตร ใช้ถุงพลาสติกสีดำ ปิดขวดโหลในตอนกลางคืนเพื่อป้องกันการรบกวนและศัตรูของปลา โดยให้อาหาร 5.0 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักตัวจำนวน 2 ครั้งต่อวัน (07.00 และ 18.00 น.) ให้รับแสงธรรมชาติ 12 ชั่วโมงต่อวัน และ มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ 80 เปอร์เซ็นต์ทุกวัน และเก็บข้อมูลต่าง ๆ (น้ำหนักและความยาว) ทุก 2 สัปดาห์ รวมทั้งคุณภาพของน้ำเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์

4. การศึกษาการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และประสิทธิภาพการให้อาหาร

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ให้ปลาอดอาหารเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และสลับปลาด้วยน้ำมัน กานพลู หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักและวัดความยาวของปลาทุกตัว ($n = 15$) นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณอัตรา การแลกเนื้อ (feed conversion ratio: FCR) น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้น (weight gain: WG) น้ำหนักปลา ที่เพิ่มขึ้นต่อวัน (average daily gain: ADG) อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate: SGR) เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (percentage weight gain) อัตราการรอด (survival rate) และ ความยาวเพิ่มเฉลี่ยของปลา (length gain: LG) โดยใช้สูตรในการคำนวณดังนี้

4.1 อัตราการแลกเนื้อ

$$= \frac{\text{น้ำหนักอาหารที่ปลากินทั้งหมด (กรัม)}}{\text{น้ำหนักปลาทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น (กรัม)}}$$

4.2 น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้น (กรัม)

$$= \text{น้ำหนักปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (กรัม)} - \text{น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)}$$

4.3 น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้นต่อวัน (กรัมต่อวัน)

$$= \frac{\text{น้ำหนักปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (กรัม)} - \text{น้ำหนักปลาเริ่มต้น (กรัม)}}{\text{จำนวนวันที่เลี้ยง}}$$

4.4 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (เปอร์เซ็นต์ต่อวัน)

$$= \frac{[\ln \text{ น้ำหนักปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (กรัม)} - \ln \text{ น้ำหนักปลาเมื่อเริ่มต้นการทดลอง (กรัม)}] \times 100}{\text{จำนวนวันที่เลี้ยง}}$$

4.5 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (เปอร์เซ็นต์)

$$= \frac{[\text{น้ำหนักปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (กรัม)} - \text{น้ำหนักปลาเมื่อเริ่มการทดลอง (กรัม)}] \times 100}{\text{น้ำหนักปลาเมื่อเริ่มการทดลอง (กรัม)}}$$

4.6 อัตราการรอด (เปอร์เซ็นต์)

$$= \frac{\text{จำนวนปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง}}{\text{จำนวนปลาเมื่อเริ่มการทดลอง}} \times 100$$

4.7 ความยาวเพิ่มเฉลี่ยของปลา (เซนติเมตร)

$$= \text{ความยาวปลาเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (เซนติเมตร)} - \text{ความยาวปลาเมื่อเริ่มต้น (เซนติเมตร)}$$

5. คุณภาพน้ำ

วิเคราะห์คุณภาพน้ำในทุกสัปดาห์ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ และแอมโมเนียไนโตรเจน ตามวิธีการของ APHA *et al.* (1998)

6. ความเข้มสี

ตรวจสอบความเข้มสีของปลากัด ($n = 15$) บริเวณส่วนกลางของลำตัวโดยใช้เครื่องมือวัดสี (Miniscan EZ, Hunter Associates Laboratory, Reston VA, USA) พารามิเตอร์ที่ตรวจสอบได้แก่ ค่าความแดง (a^*) ค่าสีเหลือง (b^*) และความสว่าง (L^*)

7. กิจกรรมของเอนไซม์ย่อยอาหาร

สกัดเอนไซม์ย่อยจากท่อทางเดินอาหารของปลากัด ($n = 10$) ตามวิธีการของ Thongprajukaew *et al.* (2011) โดยนำท่อทางเดินอาหารมาสกัดในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ โดยใช้เครื่องปั่นละเอียดเนื้อเยื่อ หลังจากนั้นนำสารละลายไปหมุนเหวี่ยงที่ $15,000 \times g$ เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และดูดสารละลายส่วนใสซึ่งเป็นเอนไซม์สกัด นำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อทดสอบกิจกรรมของเอนไซม์ย่อยอาหารต่อไป สำหรับปริมาณโปรตีนในเอนไซม์สกัดวิเคราะห์ตามวิธีการของ Lowry *et al.* (1951)

ศึกษากิจกรรมของเอนไซม์เพปซินตามวิธีการที่ดัดแปลงมาจาก Worthington (1993) โดยเติม hemoglobin ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลอง หลังจากนั้นเปิดเอนไซม์สกัดปริมาตร 100 ไมโครลิตร แล้วผสมให้เข้ากัน นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที หยุดปฏิกิริยาด้วยการเติมกรดไตรคลอโรอะซิติก ความเข้มข้น 5.0 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน หลังจากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ $12,000 \times g$ ที่อุณหภูมิห้อง นาน 5 นาที ดูดส่วนใสของตัวอย่าง และวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร โดย 1 ยูนิตของเอนไซม์เพปซินมีค่าเท่ากับ 1 หน่วยของค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้น

ศึกษากิจกรรมของเอนไซม์ไคโมทริปซินตามวิธีการของ Rungruangsak-Torrissen *et al.* (2006) โดยเติม 0.10 มิลลิโมลาร์ *N*-Succinyl-Ala-Ala-Pro-Phe-*p*-nitroanilide ที่ละลายในฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 8 ปริมาตร 350 ไมโครลิตร ลงในหลอดทดลอง หลังจากนั้นเติมเอนไซม์ปริมาตร 50 ไมโครลิตร แล้วผสมให้เข้ากัน บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที หยุดปฏิกิริยาด้วยการเติมกรดอะซิติก ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 400 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 410 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ *p*-nitroanilide

ศึกษากิจกรรมของเอนไซม์ไลเปสตามวิธีการของ Winkler and Stuckmann (1979) โดยผสม *p*-nitrophenyl palmitate ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 200 ไมโครลิตร กับสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์พีเอช 8 ปริมาตร 800 มิลลิลิตร และเอนไซม์สกัดปริมาตร 10 ไมโครลิตร ให้เข้ากัน

บ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที หยุดปฏิกิริยาโดยเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 250 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน ปั่นเหวี่ยงที่ 13,000 ×g นาน 15 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน ของ *p*-nitrophenol

8. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (completely randomized design: CRD) ทำการทดลอง 15 ซ้ำ รายงานผลข้อมูลในรูปของค่าเฉลี่ย ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน โดยวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วย one-way ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของชุดทดลองด้วย Turkey HSD test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) แสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยใช้ pearson correlation coefficient (r) และวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาสมการเชิงเส้นโดยใช้ regression analysis (Zar, 1996) ด้วยโปรแกรม SPSS for windows version 12.0

ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย

1. การเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารของปลากัด

ผลจากการทดลองเลี้ยงปลากัดอายุ 6 สัปดาห์ มีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 0.70-0.75 กรัม ต่อตัว ด้วยอาหารที่เสริมสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *N. commune* Vaucher TISTR 8870 ที่ระดับต่างกัน 5 ระดับ คือ 0.0 1.0 2.5 5.0 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เป็นระยะเวลานาน 8 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่า น้ำหนักสุดท้าย น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อวัน เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น และความยาวมาตรฐาน มีค่าสูงสุดในปลาที่ได้อาหารสูตรที่ไม่เติมสาหร่ายและสูตรที่เติมสาหร่าย 1.0 เปอร์เซ็นต์ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับทุกชุดการทดลอง (ตารางที่ 2) นอกจากนั้นยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *N. commune* Vaucher TISTR 8870 ในอาหารที่ระดับสูงขึ้นทำให้การเจริญเติบโต (น้ำหนักเฉลี่ยต่อตัว) ของปลากัดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจเกิดจากความเข้มข้นของสาหร่ายในอาหารที่เพิ่มมากเกินไปมีผลต่อกลิ่นอาหาร ส่งผลทำให้ปลากัดกินอาหารลดลง นอกจากนั้นยังมีผลต่อความสมดุลของกรดอะมิโนรวมในอาหารที่ได้รับอาหารที่มีกรดอะมิโนที่ไม่สมดุลจึงมีผลทำให้เกิดการเจริญเติบโตของปลาตกลงได้และยังส่งผลต่อการเผาผลาญอาหาร เช่นเดียวกับการศึกษาของ Liao *et al.* (1993) ซึ่งพบว่าอาหารเสริมสไปรูลินา 5.0 เปอร์เซ็นต์ มีผลทำให้อัตราการเจริญเติบโตของกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) ต่ำกว่าชุดควบคุม

ค่าอัตราแลกเนื้อของปลากัดโดยเสริมสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *N. commune* Vaucher TISTR 8870 ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน 5 ระดับ คือ 0.0 1.0 2.5 5.0 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่าที่ระดับ 1.0 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อต่ำที่สุด รองลงมาคือ 0.0

2.5 5.0 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.51 ± 0.02 1.31 ± 0.03 2.29 ± 0.13 3.10 ± 0.14 และ 3.17 ± 0.14 ตามลำดับ และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับชุดการทดลอง (ตารางที่ 2)

อัตราการรอดของปลากัดพบว่าทุกชุดการทดลองมีอัตราการรอดเท่ากัน คือ 100 ± 0.00 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 2) ซึ่งแตกต่างจากสุนิรัตน์ และคณะ (2555) ศึกษาอัตราการรอดตายของปลาหมอสี (*Pseudotropheus lombardoi*) ที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมไซยาโนแบคทีเรีย *N. commune* สดและแห้ง โดยพบว่าปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมเซลล์ *N. commune* ทั้งสดและแห้งมีอัตราการรอดไม่แตกต่างกันและมีอัตราการรอดสูงกว่าปลาที่ไม่ได้รับ *N. commune* ส่วนปลาที่ได้รับเชื้อ *Aeromonas hydrophila* พบว่าปลาที่ได้รับเซลล์ *N. commune* ทั้งสดและแห้ง ที่ระดับ 15 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการรอดสูงกว่าปลาที่ไม่ได้รับ *N. commune* ซึ่งมีแนวโน้มว่า *N. commune* สามารถเพิ่มภูมิคุ้มกันให้กับปลาหมอสีได้ และนอกจากนั้นยังพบว่าเซลล์สดมีแนวโน้มที่จะเพิ่มภูมิคุ้มกันได้ดีกว่าเซลล์แห้ง

ตารางที่ 2 อัตราการรอด การเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้อาหารของปลากัดที่เลี้ยงด้วยอาหารเสริมสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *N. commune* Vaucher TISTR 8870 ในระดับที่ต่างกัน เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์

พารามิเตอร์	ระดับของสาหร่าย (เปอร์เซ็นต์)				
	0.0	1.0	2.5	5.0	10.0
อัตราการรอด (เปอร์เซ็นต์)	100	100	100	100	100
น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)	0.74 ± 0.10^a	0.75 ± 0.06^a	0.71 ± 0.09^a	0.71 ± 0.09^a	0.70 ± 0.09^a
น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)	1.55 ± 0.06^a	1.54 ± 0.01^a	1.24 ± 0.09^b	1.11 ± 0.04^{bc}	1.09 ± 0.07^c
น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม)	0.81 ± 0.01^a	0.79 ± 0.02^a	0.53 ± 0.04^b	0.40 ± 0.03^c	0.39 ± 0.02^c
น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (เปอร์เซ็นต์)	112.81 ± 12.08^a	107.12 ± 3.14^a	77.53 ± 2.19^b	62.01 ± 9.45^c	57.63 ± 4.84^c
น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อวัน (กรัมต่อวัน)	1.54 ± 0.05^a	4.74 ± 0.05^{ab}	1.53 ± 0.01^a	1.23 ± 0.05^b	1.08 ± 0.07^c

ตารางที่ 2 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ระดับของสาหร่าย (เปอร์เซ็นต์)				
	0.0	1.0	2.5	5.0	10.0
ความยาวมาตรฐาน (เซนติเมตร)					
อัตราการเจริญเติบโต จำเพาะ (เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักตัวต่อวัน)					
อัตราการแลกเนื้อ	4.87±0.02 ^a	4.74±0.05 ^{ab}	4.64±0.05 ^{bc}	4.51±0.03 ^c	4.53±0.11 ^c
	3.14±0.33 ^a	3.05±0.30 ^a	2.16±0.28 ^b	1.99±0.22 ^b	2.00±0.26 ^b
	1.51±0.02 ^c	1.31±0.03 ^d	2.29±0.13 ^b	3.10±0.14 ^a	3.17±0.14 ^a

หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ($n = 15$)

- ตัวยกที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2. สีของปลากัดที่เลี้ยงด้วยอาหารเสริมสาหร่ายในอัตราส่วนที่ต่างกัน

เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเข้มสีแดง (a^*) และค่าความเข้มสีเหลือง (b^*) ของสีผิวบริเวณลำตัวของปลากัดทุกชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 3) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานทดลองของปาริชาติ และคณะ (2563) ศึกษาผลของสไปรูไลนาต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต อัตราการรอด ความเข้มสีผิว และการสะสมแคโรทีนอยด์ของปลาสอดแดง (*Xiphophorus hellerii*) ด้วยอาหารที่มีระดับสไปรูไลนาแตกต่างกัน 4 ระดับ โดยชุดควบคุมคืออาหารที่ไม่เสริมสไปรูไลนา และอาหารที่เสริมสไปรูไลนา 1.0 3.0 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์ เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ พบว่าสีผิวน้ำลำตัวของปลาสอดแดงที่เลี้ยงด้วยอาหารที่เสริมด้วยสไปรูไลนาในความเข้มข้นที่ต่างกันไม่มีผลต่อความเข้มสีผิวน้ำลำตัวปลาเมื่อเปรียบเทียบกับปลาสอดแดงที่เลี้ยงด้วยอาหารที่ไม่มีการเสริมด้วยสไปรูไลนา ในขณะที่สุนิรัตน์ และคณะ (2555) พบว่าปลาหมอสีที่เลี้ยงด้วยอาหารผสม *N. commune* มีสีสวยงามกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับ และสีจะสวยงามและสดใสมากขึ้นเมื่อได้รับปริมาณ *N. commune* เพิ่มขึ้น อติศักดิ์ และคณะ (2561) รายงานว่าปลาทองที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมสาหร่าย *Hapalosiphon welwitschii* TISTR 8237 ปริมาณ 0.5-5.0 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่ระดับ 2.5 เปอร์เซ็นต์มีค่าความสว่างสูงที่สุดและมีความแตกต่างจากปลาทองในชุดทดลองอื่น ๆ ส่วนค่าสีเหลืองและสีแดงไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ปลาทองจะเปลี่ยนแปลงแคโรทีนอยด์จากอาหารและสะสมในรูปของแอสตาแซนทินและเบต้าแคโรทีนเป็นหลัก จึงทำให้เกิดสีส้มและสีเหลืองใน

ปลาทอง แต่สำหรับ *N. commune* Vaucher TISTR 8870 อาจจะมีเบต้าแคโรทีนและแอสตาแซนทีน ในจำนวนที่ไม่เพียงพอจึงไม่สามารถเร่งสีเหลืองและสีแดงของปลากัดอย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ความเข้มของระดับสีแดง สีเหลือง และความสว่างของปลาแต่ละชนิดอาจจะมีผล ที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงถือได้ว่าการเลือกชนิดของสารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์ที่เหมาะสมสำหรับการ พัฒนาความเข้มสีของปลาแต่ละชนิดจึงมีความสำคัญอย่างมากในการแสดงออกของสีบนผิวปลา

ตารางที่ 3 ความเข้มสีของปลากัดที่ได้รับอาหารที่เลี้ยงด้วยอาหารเสริมสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *N. commune* Vaucher TISTR 8870 ในระดับที่ต่างกัน เป็นเวลา 8 สัปดาห์

พารามิเตอร์	ระดับของสาหร่าย (เปอร์เซ็นต์)				
	0.0	1.0	2.5	5.0	10.0
ความสว่าง	15.71±0.74 ^a	17.46±1.10 ^a	18.90±1.79 ^a	17.03±1.59 ^a	16.45±1.12 ^a
ความแดง	27.38±1.16 ^a	28.09±1.00 ^a	26.98±0.88 ^a	27.12±1.25 ^a	27.96±1.16 ^a
ความเหลือง	18.55±1.40 ^a	17.23±1.04 ^a	14.86±1.05 ^a	15.55±0.93 ^a	18.06±1.18 ^a
ความแดงต่อความเหลือง	1.56±0.10 ^a	1.68±0.08 ^a	1.93±0.15 ^a	1.80±0.10 ^a	1.63±0.10 ^a

หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ($n = 15$)

- ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3. กิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ย่อยอาหารในปลากัดที่เลี้ยงด้วยอาหารเสริมสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *N. commune* Vaucher TISTR 8870

ผลการศึกษาพบว่ากิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์เพปซินและโคโมทรูปซินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในทุกชุดการทดลอง (ตารางที่ 5) เอนไซม์ไลเปสพบว่าปลากัดที่เสริมสาหร่าย 1 เปอร์เซ็นต์มีกิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ไลเปสสูงที่สุด รองลงมา คือ 0.0 1.0 2.5 5.0 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 116.40±6.60 126.35±12.33 102.89±6.94 91.84±5.23 และ 85.84±30.35 ยูนิตต่อมิลลิกรัมโปรตีน ตามลำดับ ซึ่งปลากัดที่เสริมสาหร่าย 1.0 และ 0.0 เปอร์เซ็นต์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับทุกชุดการทดลอง แต่ปลากัดที่เสริมสาหร่าย 0.0 1.0 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 4) อติศักดิ์ (2559) รายงานว่าปลาทองออแรนดาที่ได้รับอาหารผสมสาหร่าย *H. welwitschii* TISTR 8237 มีกิจกรรมของเอนไซม์อะไมเลสสูงสุด คือ ที่ระดับ 5.0 เปอร์เซ็นต์ ต่ำสุด คือ 0.0 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเอนไซม์อะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ย่อยคาร์โบไฮเดรตให้เป็นน้ำตาล ซึ่งในสาหร่าย *H. welwitschii* TISTR 8237 มีแป้งสูงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของระดับสาหร่ายกิจกรรมของ

เอนไซม์อะไมเลสก็จะเพิ่มขึ้นไปด้วย ในขณะที่เอนไซม์แพปซินพบว่าในปลาทองออแรนดาที่ได้รับอาหารผสมสาหร่าย *H. welwitschii* TISTR 8237 ที่มีกิจกรรมของเอนไซม์แพปซินสูงสุด คือ ระดับ 2.5 เปอร์เซ็นต์ ต่ำสุด คือ 0.0 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4 กิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ย่อยอาหารในปลากัดที่เลี้ยงด้วยอาหารเสริมสาหร่ายสีเขียว และ ก ม
น้ำเงิน *N. Commune* Vaucher TISTR 8870 ในอัตราส่วนที่ต่างกัน เป็นเวลา 8 สัปดาห์

เอนไซม์ ย่อยอาหาร	ระดับของสาหร่าย (เปอร์เซ็นต์)				
	0.0	1.0	2.5	5.0	10.0
แพปซิน	60.87±7.43 ^a	61.76±5.45 ^a	70.06±11.43 ^a	79.88±7.39 ^a	79.54±5.49 ^a
ไคโมทริปซิน	0.68±0.02 ^a	0.64±0.02 ^a	0.69±0.05 ^a	0.61±0.01 ^a	0.61±0.03 ^a
ไลเปส	116.40±6.60 ^{ab}	126.35±12.33 ^a	102.89±6.94 ^{abc}	91.84±5.23 ^{bc}	85.84±30.35 ^c

หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ($n = 10$)

- ตัวยกที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4. คุณภาพน้ำในช่วงระยะเวลาการเลี้ยงปลากัด

ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง และค่าอุณหภูมิ น้ำ พบว่า มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยชุดควบคุม (ไม่เสริมสาหร่าย) มีค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง ต่ำสุด คือ 6.24 ± 0.10 อุณหภูมิ น้ำพบว่าชุดที่เสริมสาหร่าย 2.5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าต่ำสุด คือ 26.34 ± 0.03 องศาเซลเซียส แต่ค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำพบว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งคุณภาพน้ำมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลากัด (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 คุณภาพน้ำในระหว่างการเลี้ยงปลากัดด้วยอาหารเสริมสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *N. commune* Vaucher TISTR 8870 ในอัตราส่วนที่ต่างกัน เป็นเวลา 8 สัปดาห์

พารามิเตอร์	ระดับของสาหร่าย (เปอร์เซ็นต์)				
	0.0	1.0	2.5	5.0	10.0
ความเป็นกรด-ด่าง	6.24 ± 0.10^b	6.65 ± 0.08^a	6.57 ± 0.03^a	6.63 ± 0.06^a	6.03 ± 0.10^b
ปริมาณออกซิเจน ละลายในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	6.03 ± 0.11^a	6.25 ± 0.07^a	6.05 ± 0.19^a	5.78 ± 0.13^a	5.93 ± 0.12^a

ตารางที่ 5 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ระดับของสาหร่าย (เปอร์เซ็นต์)				
	0.0	1.0	2.5	5.0	10.0
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	26.36±0.03 ^b	26.38±0.03 ^{ab}	26.34±0.03 ^b	26.46±0.02 ^a	26.38±0.03 ^{ab}
แอมโมเนีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1.33±0.18 ^a	1.80±0.40 ^a	1.33±0.44 ^a	1.10±0.38 ^a	1.07±0.15 ^a

หมายเหตุ: - ตัวยกที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

สรุปผลการวิจัย

การเจริญเติบโตของปลากัดที่เลี้ยงด้วยอาหารเสริมสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *N. commune* Vaucher TISTR 8870 ที่ระดับต่างกัน 5 ระดับ คือ 0.0 1.0 2.5 5.0 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เป็นระยะเวลานาน 8 สัปดาห์ ผลการศึกษาพบว่าปลากัดที่เลี้ยงด้วยอาหารสูตรควบคุม (ไม่เสริมสาหร่าย) กับสูตรเสริมสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *N. commune* Vaucher TISTR 8870 1.0 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำหนักเฉลี่ย ความยาวเฉลี่ย น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้นต่อวัน เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะดีที่สุดและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ พบว่าสูตรอาหารที่เสริมสาหร่าย 1.0 เปอร์เซ็นต์ มีค่าต่ำที่สุด ส่วนค่าสีพบว่าการเสริมสาหร่ายในอาหารปลาไม่มีผลต่อการเพิ่มค่าความเข้มสีของปลากัด เช่นเดียวกันกับกิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ย่อยอาหารพบว่าเอนไซม์เพปซินและโคโมทรูปซินไม่มีความแตกต่างกัน แต่เอนไซม์ไลเปสพบว่าชุดการทดลองที่เสริมสาหร่าย 1.0 เปอร์เซ็นต์ มีกิจกรรมจำเพาะสูงที่สุดและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าปลากัดที่เลี้ยงด้วยอาหารเสริมสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *N. commune* Vaucher TISTR 8870 1.0 เปอร์เซ็นต์ มีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อต่ำสุดซึ่งจะช่วยลดต้นทุนด้านอาหารในการเลี้ยงปลากัดต่อไป

เอกสารอ้างอิง

เทพรัตน์ อึ้งเศรษฐพันธ์ ยุวดี พิรพรพิศาล และนิวุฒิ หวังชัย. (2554) ผลของการเสริม *Spirulina platensis* ในอัตราที่ต่างกันต่อการเจริญเติบโตและโครงสร้างกรดไขมันของปลานิลแดง (*Oreochromis mossambicus* x *O. niloticus*). การประชุมวิชาการสาหร่ายและแพลงก์ตอนแห่งชาติ ครั้งที่ 5. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- ปาริชาติ นิลวิเชียร อานนท์ สรรพจักร และนิรันดร์ ภาณุ. (2563). ผลของสไปรูลิनाต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต อัตราการอดตาย ความเข้มข้นสีผิวและการสะสมแคโรทีนอยด์ของปลาสอดแดง. *แก่นเกษตร*, 48 (ฉบับพิเศษ 1), 953-958.
- สุนิรัตน์ เรืองสมบุญ คักดิ์ชัย ชูโชติ และปวีณา ทวีกิจการ. (2555). การใช้อาหารผสมไซยาโนแบคทีเรีย *Nostoc commune* สดและแห้งในการเลี้ยงปลาหมอสี Kenyi cichlid, *Pseudotropheus lombardoi*. *วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*, 40, 208-217.
- อดิศักดิ์ เกลี้ยงตะพงศ์ การุณ ทองประจุแก้ว และสมรักษ์ รอดเจริญ. (2561). การเจริญเติบโตของปลาทองออเรนดา (*Carassius auratus*) ที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Hapalosiphon welwitschii* TISTR 8237. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*. 10(3), 356-367.
- อดิศักดิ์ เกลี้ยงตะพงศ์. (2559). *สภาวะที่เหมาะสมในการเลี้ยงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน Hapalosiphon sp. เพื่อเป็นอาหารปลาทองออเรนดา (Carassius auratus)*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง, ตรัง.
- อาภารัตน์ มหาพันธ์. (2546). *การเพาะเลี้ยงสาหร่ายน้ำจืด*. กรุงเทพฯ: ศูนย์จุลินทรีย์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- AOAC. (2005). *Official methods of analysis*. (18th ed.) Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- APHA, AWWA and WPCF. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. (20th ed.) Washington, DC: Water Pollution Control Federation.
- Bureau, D.P., Kaushik, S.J. and Cho, C.Y. (2002). Bioenergetics. In Halver, J.E. and Hardy, R.W. (Eds.). *Fish Nutrition*, pp. 1-59. San Diego: Academic Press Inc.
- Liao, W.L., Nur, E., Borhan, S., Okada, S., Matsui, T. and Yamaguchi, K. (1993). Pigmentation of culture black tiger prawn by feeding a *Spirulina* sp. supplemented diet. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 59(1), 165-159.
- Lowry, O.H., Rosenbrough, N.J., Farr, A.L. and Randall, R.J. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 193(1), 265-275.
- Peiaflorida, V.D. and Golez, V.D. (1996). Use of seaweed meals from *Kappaphycus alvarezii* and *Gracilaria heteroclada* as binders in diets for juvenile shrimp *Penaeus monodon*. *Aquaculture*, 143(3-4), 393-401.

- Qiu, B., Liu, J., Liu, Z. and Liu, S. (2002). Distribution and ecology of the edible cyanobacterium Ge-Xian-Mi (*Nostoc*) in rice fields of Hefeng Country in China. *Journal of Applied Phycology*, 14, 423-429.
- Rountos, K.J., Kim, J.J., Hattenrath-Lehmann, T.K. and Gobler, C.J. (2019). Effects of the harmful algae, *Alexandrium catenella* and *Dinophysis acuminata*, on the survival, growth, and swimming activity of early life stages of forage fish. *Marine Environmental Research*, 148, 46-56.
- Rungruangsak-Torrissen, K., Moss, R., Andresen, L.H., Berg, A. and Waagbø, R. (2006). Different expressions of trypsin and chymotrypsin in relation to growth in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Fish Physiology and Biochemistry*, 32(1), 7-23.
- Sattanathan, G., Palanisamy, T., Padmapriya, S. Arumugam, V.A., Park, S., Kim, I.H. and Balasubramanian, B. (2020). Influences of dietary inclusion of algae *Chaetomorpha aerea* enhanced growth performance, immunity, haematological response and disease resistance of *Labeo rohita* challenged with *Aeromonas hydrophila*. *Aquaculture Reports*, 17, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100353>.
- Thongprajukaew, K., Kovitvadhi, U., Kovitvadhi, S., Somsueb, P. and Rungruangsak-Torrissen, K. (2011). Effects of different modified diets on growth, digestive enzyme activities and muscle compositions in juvenile Siamese fighting fish (*Betta splendens* Regan, 1910). *Aquaculture*, 322-323, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.10.006>.
- Winkler, U.K. and Stuckmann, M. (1979). Glycogen, hyaluronate and some other polysaccharides greatly enhance the formation of exolipase by *Serratia marcescens*. *Journal of Bacteriology*, 138(3), 663-670.
- Worthington, V. (1993). *Worthington enzyme manual. Enzymes and related biochemicals*. New Jersey: Worthington Chemical.
- Zar, J.H. (1996). *Biostatistical analysis*. (3rd ed.) Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

การพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าวโดยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ แบบแผ่นกั้นประยุกต์ (MABR)

Development of Biogas Production Systems from Rice Scraps by Modified Anaerobic Baffle Reactors (MABR)

เอนก สวาวินทร์^{1*} ฌานิกา แซ่แง ชุกลิน¹ และกัตตินาฏ สกุลสวัสดิพันธ์¹

Aneak Sawain^{1*} Chanika Saenge Chooklin¹ and Kattinat Sagulsawasdipan¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าวโดยระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพและบำบัดน้ำเสีย ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่า 20 ลิตรต่อสัปดาห์ (0.08 ลิตรต่อลิตรน้ำเสีย) ผลการคำนวณการผลิตก๊าซชีวภาพจากค่าซีโอดีที่ถูกกำจัดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.03-0.24 ลิตรต่อกรัมซีโอดี ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพยาวนานขึ้น ระบบนี้สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้อากาศทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ 88.9) นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดของแข็งตกตะกอน (ร้อยละ 99.7) ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการตกตะกอนในระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องหมั่นเวียนน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบ สำหรับผสมกับวัตถุดิบก่อนป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นการรักษาอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์

คำสำคัญ: เศษอาหาร เศษข้าว ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ ก๊าซชีวภาพ

¹ สาขาวิทยาศาสตร์ทางทะเลและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

* Corresponding author e-mail: aneak.ene@gmail.com, aneak.s@rmuts.ac.th

Received: 12 May 2021, Revised: 1 June 2021, Accepted: 3 June 2021

Abstract

This research was demonstrated the potential of biogas production from rice scraps by the modified anaerobic baffle reactor system applied from automotive gas cylinders for biogas production and wastewater treatment. The results demonstrated the potential of the system to produced more than 20 liters of biogas per week (0.08 liters per liter of wastewater). The calculation of biogas production from the COD removal was found between 0.03 - 0.24 liters per gram of COD, tends to increase as the duration of the biogas production system is longer. This system can degrade organic matter in anaerobic condition, that high COD removal efficiency (88.9%). It was also highly efficient in removal of settleable solids (99.7%), as a consequence of the sedimentation process in the modified anaerobic baffle reactor system. However, it is necessary to circulate the wastewater effluent from the system to be mixed with raw materials before being fed into the biogas production system, in order to maintain the food to microorganisms (F/M) ratio.

Keywords: Food waste, Rice scraps, Anaerobic reactors, Biogas

บทนำ

จากการนำเสนอนโยบายเศรษฐกิจในรูปแบบ bio-circular-green economy (BCG) และมีการกล่าวถึงเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) ที่ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและความต้องการลดปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอน การนำขยะหรือของเสียกลับมาใช้ใหม่ในห่วงโซ่อุปทานและครอบคลุมความต้องการทางด้านพลังงานทดแทนของชุมชนและสถานประกอบการในท้องถิ่น เพื่อช่วยในการจัดการขยะและส่งเสริมประสิทธิภาพของการใช้ประโยชน์ทรัพยากร เป็นการนำรูปแบบเศรษฐกิจหมุนเวียนไปใช้อย่างเหมาะสม เนื่องจากวิธีนี้เป็น การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตทางชีวภาพ จึงมีทั้งการผลิตพลังงานทดแทนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ และผลิตภัณฑ์ชีวภาพ (เช่น ก๊าซชีวภาพ ปุ๋ยหมัก) ที่มีความคุ้มค่า (Diamantis *et al.*, 2021; Vlachokostas *et al.*, 2020) ทั้งนี้การแสวงหาข้อได้เปรียบของแหล่งวัตถุดิบที่มีความแตกต่างกัน สำหรับการจัดการพลังงานทดแทน ก่อให้เกิดความสนใจอย่างแพร่หลายในระดับโลก ในการใช้สารอินทรีย์ต่าง ๆ ของเสีย รวมถึงเศษอาหารเพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ (Barati *et al.*, 2017; Mirmohamadsadeghi *et al.*, 2019) ซึ่งเป็นการอาศัยกระบวนการย่อยสลาย

แบบไม่ใช้อากาศของวัสดุสารอินทรีย์ผ่านกระบวนการที่มีความซับซ้อนของปฏิกิริยาทางชีวเคมี โดยอาศัยจุลินทรีย์ (Mirmohamadsadeghi *et al.*, 2019; Rajaeifar *et al.*, 2017) โดยของเสียส่วนหนึ่งที่มีการทิ้งจากครัวเรือน คือ เศษอาหาร ที่มีความชื้นสูง ซึ่งประกอบด้วยของแข็งระเหยง่าย และมีความเค็ม หากปล่อยให้เกิดกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศก็อาจถือเป็นแหล่งของเสียที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การปลดปล่อยกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ รวมถึงการดึงดูดสัตว์ร้าย (หรือสัตว์ที่เป็นพาหะนำโรค) ให้เข้ามากินเศษอาหาร หรือแม้กระทั่งมีโอกาสของการเกิดการปนเปื้อนของน้ำใต้ดิน (Yasin *et al.*, 2013) ที่อาจส่งผลกระทบต่อคนในชุมชน โดยแนวทางการนำเศษอาหารไปใช้ประโยชน์ มีงานศึกษาวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ (Florkowski *et al.*, 2018; Qi *et al.*, 2021; Ahamed *et al.*, 2015)

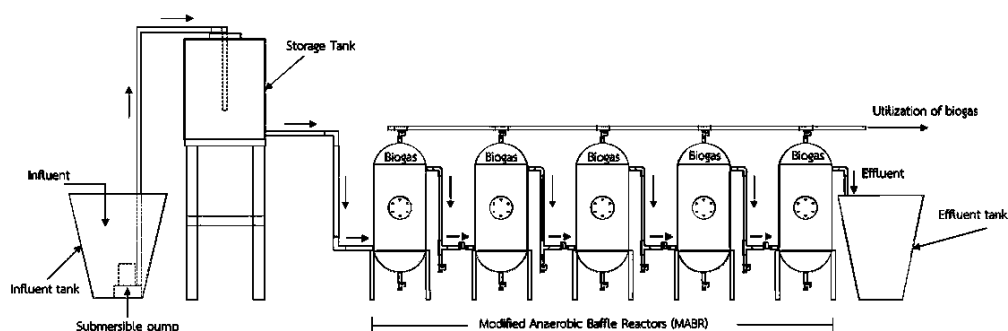
งานวิจัยนี้จึงเป็นการพัฒนาแนวทางการใช้ประโยชน์ของเสียที่เป็นเศษอาหาร โดยจำกัดเฉพาะเศษข้าวที่เหลือจากการบริโภคทั้งที่มาจากครัวเรือน โรงอาหาร (โรงเรียน มหาวิทยาลัย ร้านอาหาร หรือสถานที่อื่น ๆ) เนื่องจากเศษข้าวมีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตที่สามารถอาศัยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพให้เป็นก๊าซชีวภาพได้ โดยใช้ระบบถังปฏิกิริยาร้อยอากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์มีศักยภาพรองรับการบำบัดของเสียหรือน้ำเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง (Ahamed *et al.*, 2015) เนื่องจากการเดินระบบมีการผสมผสานสำหรับรองรับกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศที่ประกอบด้วยไฮโดรไลซิส (hydrolysis) การหมัก (fermentation) และเมทาโนจิซิส (methanogenesis) (Malakahmad *et al.*, 2011, Barber and Stuckey, 1999) ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าวสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทนในครัวเรือน ซึ่งเป็นการสนับสนุนการพัฒนาระบบเศรษฐกิจในรูปแบบ BCG ที่มีการสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจในรูปแบบเศรษฐกิจหมุนเวียน ผ่านกระบวนการใช้ประโยชน์ทรัพยากรต่าง ๆ ซึ่งหมายถึงการใช้ของเสียที่เกิดขึ้นจากภาคอุตสาหกรรมและในครัวเรือนหรือชุมชนให้เกิดประโยชน์ และมีความคุ้มค่ามากที่สุด ประกอบกับการสนับสนุนการพัฒนานวัตกรรมพลังงานสีเขียว (green energy) เพื่อตอบสนองการพัฒนาประเทศที่มีความยั่งยืนต่อไปในอนาคต โดยมีการคำนึงถึงและผลานความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุอุปกรณ์

งานวิจัยนี้ทำการประกอบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าว แสดงดังภาพที่ 1 โดยการดัดแปลงรูปแบบการใช้งานจากระบบถังปฏิกิริยาร้อยอากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพและบำบัดน้ำเสีย (อนุสิทธิบัตรไทย เลขที่ 15998) (เอนก, 2563 ก) ขนาดถังปฏิกิริยาร้อยอากาศปริมาตร 50 ลิตร จำนวน 5 ถัง (ปริมาตรส่วนของถังปฏิกิริยาร้อยอากาศ

รวม 250 ลิตร) ซึ่งภายในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศบรรจุยางในรถจักรยานยนต์สำหรับเสริมประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย (อนุสิทธิบัตรไทย เลขที่ 16651) (เอนก, 2563 ข) เพื่อทำการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าว และทำการทดสอบการจุดติดไฟของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ด้วยชุดเตาก๊าซชีวภาพ (อนุสิทธิบัตรไทย เลขที่ 16985) (เอนก, 2563 ค) เพื่อทดสอบศักยภาพและระยะเวลาการจุดติดไฟ โดยการดำเนินงานวิจัยทำการทดลองเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพจำนวน 3 ชุด และนำข้อมูลผลการทดลองที่ได้จากการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับการคำนวณค่าทางสถิติ เพื่อพิจารณาถึงศักยภาพการกำจัดของเสีย การผลิตก๊าซชีวภาพ และเสนอแนะแนวทางการดำเนินงานหรือการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป



ภาพที่ 1 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าว

ที่มา: ดัดแปลงจาก เอนก (2563 ก)

2. วัตถุดิบ

งานวิจัยนี้ใช้วัตถุดิบเศษข้าวจากโรงอาหารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง และจากหอพักนักศึกษา โดยทำการแยกเศษข้าวจากเศษอาหารประเภทอื่น ๆ เนื่องจากเศษข้าวที่เหลือจากการบริโภคสามารถละลายน้ำได้ดี ซึ่งส่งผลดีต่อกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ทั้งนี้การเตรียมวัตถุดิบสำหรับการป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการนำเศษข้าวผสมกับน้ำสะอาดและทำการกวนผสม เพื่อให้ได้วัตถุดิบเป็นเศษข้าวละลายน้ำที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีอยู่ระหว่าง 2,000-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมน้ำในถังพักเพื่อรอทำการป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ในส่วนของน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์ม การดำเนินงานวิจัยนี้ได้ขอความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจากสถานประกอบการโรงงานน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่งในจังหวัดตรัง

3. การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

การเริ่มต้นเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (start-up biogas production systems) ดำเนินการโดยการนำวัตถุดิบซึ่งเป็นเศษข้าวละลายน้ำ ผสมกับน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์ม ที่มีจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซชีวภาพอยู่แล้ว โดยใช้ น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์มปริมาณร้อยละ 40 โดยปริมาตร ทำการผสมกับเศษข้าวละลายน้ำปริมาณร้อยละ 60 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นการดัดแปลงวิธีการเริ่มต้นเดินระบบ โดยใช้ น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์มผลิตก๊าซชีวภาพ (เอนก และคณะ, 2558; Zwain *et al.*, 2013) เพื่อลดระยะเวลาการผลิตก๊าซชีวภาพให้เร็วขึ้น

การเดินระบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพหลังจากทำการการเริ่มต้นเดินระบบในครั้งแรก โดยใช้ น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์มเป็นส่วนผสม ในครั้งถัดมาทุก ๆ 1 สัปดาห์ เป็นการเติมวัตถุดิบเข้าสู่ระบบโดยการใช้ น้ำเสียที่ออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพปริมาณร้อยละ 40 โดยปริมาตร (ทดแทนน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์ม) ผสมกับเศษข้าวละลายน้ำปริมาณร้อยละ 60 ซึ่งเป็นการหมุนเวียนน้ำเสีย หรือการใช้เชื้อเพลิงน้ำเสีย ที่ออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นการรักษาระดับปริมาณของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ โดยในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีลักษณะการเดินระบบในรูปแบบแบทช์ (batch) ทำให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีระยะเวลาสำหรับกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์เท่ากับ 7 วัน (168 ชั่วโมง) สอดคล้องกับลักษณะการก่อเกิดของเสีย คือ เศษข้าว ที่ไม่ได้มีการเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดทั้งวัน ส่งผลให้การควบคุมดูแลระบบในลักษณะแบทช์ ทำงานได้ง่ายกว่าในสถานการณ์จริง โดยงานวิจัยนี้ดำเนินการทดลองเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพโดยการใช้วัตถุดิบเศษข้าวละลายน้ำและน้ำเสียจากการหมุนเวียนกลับมาผสมและเติมเข้าสู่ระบบใหม่ในปริมาณ 100 ลิตร ในแต่ละสัปดาห์ เพื่อทำการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพตลอดระยะเวลาดำเนินการทดลองต่อเนื่อง 6 สัปดาห์ โดยทำการคำนวณปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการวัดความสูงของน้ำในถังพักน้ำเสีย (storage tank) และทำการทดสอบเบื้องต้นสำหรับการจุดติดไฟของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ เพื่อพิจารณาถึงระยะเวลาสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

4. การประเมินศักยภาพระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

งานวิจัยนี้ทำการประเมินศักยภาพระบบผลิตก๊าซชีวภาพโดยการเก็บข้อมูลปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ ศักยภาพการจุดติดไฟในทุก ๆ 1 สัปดาห์ เพื่อแสดงถึงศักยภาพของการนำไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากขยะประเภทเศษอาหารถูกมองว่าเป็นปัญหาจากการเพิ่มภาระการกำจัดในหลายพื้นที่ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรวมถึงการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Florkowski *et al.*, 2018) การประเมินศักยภาพการกำจัดสารอินทรีย์จากการวิเคราะห์วัตถุดิบในรูปของคุณภาพน้ำเสียที่ปล่อยเข้าสู่ระบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีพารามิเตอร์

สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย คือ สี (color) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ (temperature) ออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen: DO) ซีโอดี (chemical oxygen demand: COD) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (total suspended solids: TSS) และปริมาณของแข็งตกตะกอน (settable solid) ตามมาตรฐานวิธีการวิเคราะห์ (APHA *et al.*, 2012) และใช้ค่าซีโอดีสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ และศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาณสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีที่ถูกกำจัด

ผลการวิจัย

1. คุณลักษณะสมบัติของวัตถุดิบ

เมื่อผสมเศษข้าวกับน้ำสะอาดและทำการกวนผสม ทำให้ได้วัตถุดิบสำหรับป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในรูปของเหลวที่มีลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบแสดงดังตารางที่ 1 โดยลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบมีลักษณะสีขาวขุ่น และมีตะกอน ลักษณะทางเคมีของวัตถุดิบค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าเป็นด่างเล็กน้อย (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.57 ± 0.23) อุณหภูมิใกล้เคียงกับสภาพอากาศทั่วไป (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 30.13 ± 0.53 องศาเซลเซียส) เนื่องจากการทดลองในสภาพอากาศปกติ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำของวัตถุดิบก่อนป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีปริมาณต่ำกว่า 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.96 ± 0.31 มิลลิกรัมต่อลิตร ในส่วนของปริมาณสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีที่เป็นส่วนสำคัญของการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $2,511 \pm 232$ มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งในรูปของค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและของแข็งตกตะกอนซึ่งเป็นเศษข้าวที่ละลายน้ำได้ไม่หมดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 374 ± 41 และ 184 ± 22 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

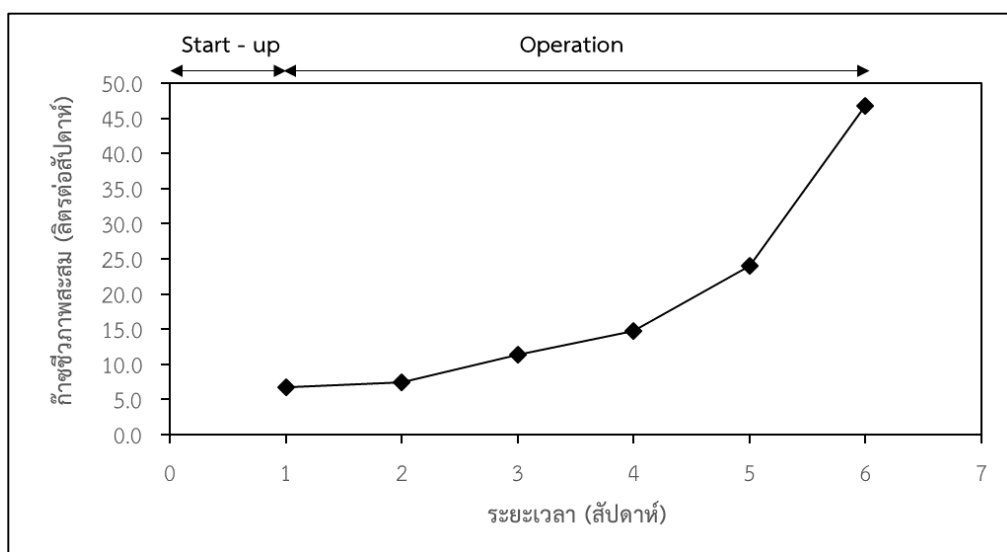
ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบ

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์
สี	ขาวขุ่น
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	8.20-9.00
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	29.0-31.5
ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2.30-3.45
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2,000-3,000
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	300-460
ของแข็งตกตะกอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	150-240

หมายเหตุ:- การเตรียมวัตถุดิบ โดยการผสมเศษข้าวกับน้ำสะอาด ควบคุมความเข้มข้นของเศษข้าวละลายน้ำให้มีค่าซีโอดีอยู่ระหว่าง 2,000-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลจากการเริ่มต้นเดินระบบในครั้งแรกเป็นการผสมน้ำเสียจากถังปฏิกิริยาไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์มกับวัตถุดิบเศษข้าวละลายน้ำ และทำการป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในรูปแบบของระบบถังปฏิกิริยาไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์ พบว่ามีการเกิดก๊าซชีวภาพได้ตั้งแต่ในช่วงสัปดาห์แรก (หลังเริ่มต้นเดินระบบ 2 วัน) ผลจากการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาดำเนินการทดลอง พบว่าก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่สัปดาห์แรก แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในช่วงระยะเวลาเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในแต่ละสัปดาห์เพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 20 ลิตรต่อสัปดาห์ เมื่อระยะเวลาหลังทำการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพผ่านไป 4 สัปดาห์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงระบบมีศักยภาพและความเสถียรมากขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปหลายสัปดาห์ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการปรับสภาพของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบให้เข้ากับสภาพใหม่ จนสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณมากขึ้น และมีความสม่ำเสมอ ผลการทดสอบเบื้องต้นการใช้ก๊าซชีวภาพสำหรับจุดติดไฟด้วยชุดเตาก๊าซชีวภาพแสดงดังภาพที่ 3 พบว่าก๊าซชีวภาพสามารถจุดติดไฟได้ดี โดยระยะเวลาในการจุดติดไฟขึ้นอยู่กับปริมาณการกักเก็บก๊าซชีวภาพและการควบคุมปริมาณการปล่อยก๊าซชีวภาพ ซึ่งจากการทดสอบระยะเวลาการจุดติดไฟด้วยชุดเตาก๊าซชีวภาพ เมื่อควบคุมปริมาณการปล่อยก๊าซชีวภาพที่ทำให้เกิดเปลวไฟที่มีความสูงประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่กักเก็บไว้ในระบบถังปฏิกิริยา

ไรร้อยอากาศ 100 ลิตร จะสามารถจุดติดได้ระยะเวลาประมาณ 30 นาที ในสภาวะอากาศปกติ ซึ่งสามารถพิจารณาแนวทางการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้



ภาพที่ 3 การทดสอบการจุดติดไฟของก๊าซชีวภาพจากเศษข้าวด้วยชุดเตาก๊าซชีวภาพ

3. การประเมินศักยภาพระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีสีดำแต่มีปริมาณตะกอนน้อยมาก ผลจากการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับก่อนเข้าระบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.77 ± 0.27) อุณหภูมิใกล้เคียงกับสภาพอากาศโดยรอบ (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 29.42 ± 0.82 องศาเซลเซียส) ในส่วนของค่าออกซิเจนละลายน้ำมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นผลจากการผ่านกระบวนการหมักในระบบถังปฏิกรณ์ไรร้อยอากาศ ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีมีค่าลดลงอย่างมากเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบ โดยซีโอดีของน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 278 ± 24 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของแข็งในรูปของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และของแข็งตกตะกอนมีปริมาณลดลงเช่นเดียวกัน โดยปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และของแข็งตกตะกอนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 209 ± 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.467 ± 0.205 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณของแข็งตกตะกอนมีปริมาณลดลงอย่างมาก

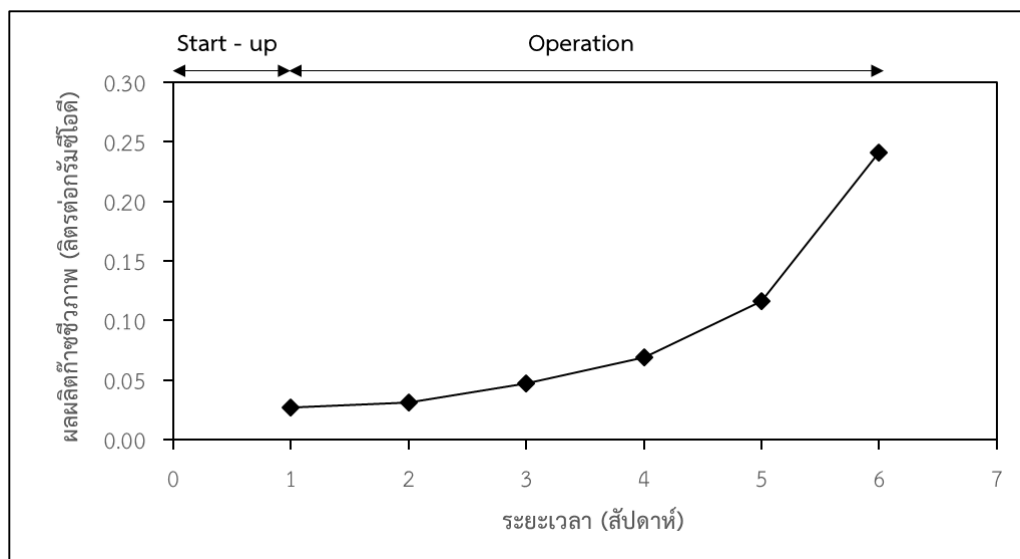
ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์
สี	ดำ
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	7.30-8.20
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	28.0-30.5
ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 1.0
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	240-310
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	150-270
ของแข็งตกตะกอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.2-1.0

การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดของเสีย เมื่อทำการทดลองใช้วัตถุดิบเป็นเศษข้าว
 ละลายน้ำ พบว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพในรูปแบบระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จาก
 ถังบรรจุก๊าซรถยนต์มีศักยภาพในการบำบัดของเสียผ่านกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบ
 โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีร้อยละ 88.9 ± 1.1 แต่มีศักยภาพการกำจัด
 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการปนเปื้อนสารแขวนลอยที่เป็นของเสีย
 ส่วนที่เหลือและตะกอนของจุลินทรีย์ที่ไหลออกมาพร้อมกับน้ำเสีย โดยประสิทธิภาพการกำจัดของแข็ง
 แขวนลอยทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 37.6 ± 11.3 ซึ่งผลจากการปนเปื้อนสารแขวนลอยที่เป็นตะกอน
 ของจุลินทรีย์และไหลออกมาพร้อมกับน้ำเสีย ส่งผลทำให้ปริมาณจุลินทรีย์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ
 ลดลงหากไม่ทำการหมุนเวียนน้ำกลับ อย่างไรก็ตามระบบนี้มีศักยภาพในการกำจัดของแข็งตกตะกอน
 สูงมาก ซึ่งสังเกตได้จากผลการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งตกตะกอนที่มีค่าเฉลี่ยร้อยละ
 99.7 ± 0.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงระบบผลิตก๊าซชีวภาพในรูปแบบระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น
 ประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์มีศักยภาพในการดักตะกอนผ่านกระบวนการตกตะกอนของของแข็ง
 ให้ติดค้างอยู่ในระบบ ส่งผลทำให้มีปริมาณของแข็งตกตะกอนลดลงอย่างมาก จากการคำนวณปริมาณ
 ผลผลิตก๊าซชีวภาพจากค่าซีโอดีที่ถูกกำจัด (ภาพที่ 4) พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.03-0.24 ลิตรต่อกรัม
 ซีโอดี โดยในช่วงเริ่มต้นเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจะมีปริมาณน้อยแต่จะ
 มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีระยะเวลาผ่านไปนานขึ้น

ตารางที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัด

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
ซีโอดี	88.9 ± 1.1
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	37.6 ± 11.3
ของแข็งตกตะกอน	99.7 ± 0.1



ภาพที่ 4 ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพจากสารอินทรีย์ในรูปค่าชีโอต์ที่ถูกกำจัด

การอภิปรายผลการวิจัย

การดำเนินงานทดลองเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าว ในส่วนของผลของการเตรียมวัตถุดิบ พบว่าปริมาณของแข็งที่ปนเปื้อนในวัตถุดิบส่งผลต่อการเกิดปัญหาการอุดตันของระบบท่อ การเดินระบบจึงควรควบคุมให้มีปริมาณตะกอยไม่มากจนเกินไป เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาการอุดตันของระบบท่อ หากมีปริมาณตะกอนของแข็งปริมาณมากอาจใช้วิธีการแยกของแข็งตกตะกอนออกจากวัตถุดิบก่อนป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้มีความเสถียรมากขึ้น โดยในส่วนของ การเดินระบบโดยใช้น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์ม แสดงให้เห็นถึงวิธีการและศักยภาพของการใช้น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์มมีส่วนช่วยในการเริ่มต้นเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และทำให้เกิดก๊าซชีวภาพได้เร็วขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของเอนก และคณะ (2558) และ Zwain *et al.* (2013) ที่มีการนำของเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์มมาใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพทำให้เกิดก๊าซชีวภาพได้เร็วขึ้นเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามการปรับสภาพของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซชีวภาพต้องอาศัยระยะเวลาในการปรับสภาพให้เข้ากับสภาวะใหม่ โดยเฉพาะกลุ่มจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทน (CH_4) รวมถึงชนิดของสารอินทรีย์ที่ต่างไปจากเดิม ซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพที่สามารถจุดติดไฟได้ โดยผลการดำเนินงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพผ่านไปนานมากขึ้น

ผลการดำเนินงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าว โดยระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพและบำบัดน้ำเสียที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่า 20 ลิตรต่อสัปดาห์ (0.08 ลิตรต่อลิตรน้ำเสีย) โดยอาศัยการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีการนำไปใช้ทั่วโลก เพื่อเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงาน (Westerholm *et al.*, 2020) อีกทั้งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีสูง (เฉลี่ยร้อยละ 88.9 ± 1.1) ซึ่งอยู่ในช่วงประสิทธิภาพของการกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มคาร์โบไฮเดรต (Barber and Stuckey, 1999) อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพของการกำจัดของแข็งตกตะกอนสูงเช่นเดียวกัน (เฉลี่ยร้อยละ 99.7 ± 0.1) ซึ่งเป็นผลจากการที่ระบบมีศักยภาพในการกักเก็บตะกอนให้อยู่ในระบบผ่านกระบวนการตกตะกอนในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ แต่ผลจากการมีตะกอนจุลินทรีย์ปนเปื้อนออกมาพร้อมกับน้ำเสียที่ไหลออกมาจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยค่อนข้างต่ำ (เฉลี่ยร้อยละ 37.6 ± 11.3) และส่งผลให้ต้องมีการหมุนเวียนน้ำกลับไปผสมกับวัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อรักษาระดับปริมาณจุลินทรีย์ ผลการคำนวณปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากค่าซีโอดีที่ถูกกำจัดพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.03-0.24 ลิตรต่อกรัมซีโอดี ซึ่งแนวโน้มมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพนานขึ้น โดยเป็นผลจากความต้องการระยะเวลาในการปรับสภาพของจุลินทรีย์ให้เข้ากับสภาวะใหม่ ซึ่งการปรับสภาพของเสียหรือการเตรียมวัตถุดิบให้อยู่ในสภาวะละลายน้ำ เป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีส่วนช่วยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบสามารถเกิดขึ้นได้ดี ในส่วนของน้ำเสียที่ออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพยังต้องทำการบำบัด เนื่องจากยังมีความสกปรกสูงที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นรบกวน ซึ่งอาจจำเป็นต้องเพิ่มเติมกระบวนการเติมอากาศ กระบวนการบำบัดด้วยพืชน้ำ หรือ กระบวนการบำบัดรูปแบบอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้กับน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ให้มีปริมาณความสกปรกลดน้อยลงและเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับน้ำเสียจนไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หรืออาจพิจารณาถึงแนวทางการนำน้ำหลังจากการบำบัดไปใช้หมุนเวียนก่อให้เกิดประโยชน์ต่อไป

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงแนวทางการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าว โดยการใช้งานระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์ เนื่องจากผลการดำเนินงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ผ่านกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ ผลิตเป็นก๊าซชีวภาพที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับเป็นพลังงานทดแทนแก๊ส LPG ได้ จึงสามารถใช้เป็นวิธีการประยุกต์ใช้งานสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าว รวมถึงเป็นแนวทางการพัฒนานวัตกรรม สิ่งประดิษฐ์ เพื่อสนับสนุนการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียในครัวเรือนหรือชุมชน

ประเภทอื่น ๆ ก่อให้เกิดกระบวนการใช้ทรัพยากรในชุมชนอย่างคุ้มค่า โดยผลการดำเนินงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงผลผลิตก๊าซชีวภาพสามารถนำไปใช้งานในสถานการณ์จริงได้ในระดับครัวเรือน อย่างไรก็ตามระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดของการเดินระบบที่ต้องอาศัยทักษะความเข้าใจของผู้ควบคุมดูแลระบบ ซึ่งสามารถพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้มีความสะดวกในการเดินระบบและมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริงในครัวเรือนหรือชุมชนมากยิ่งขึ้น รวมถึงการพัฒนากระบวนการเก็บกักก๊าซชีวภาพให้สามารถนำไปใช้งานได้ยาวนานตามความประสงค์ของผู้ใช้ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์สร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียในครัวเรือนหรือชุมชน สนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจในรูปแบบ BCG หรือ การพัฒนานวัตกรรมพลังงานสีเขียว ในระดับชุมชน ตลอดจนการพัฒนาชุมชนให้มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หรือเป็นแนวทางการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เป็นผลจากการพัฒนาเศรษฐกิจและชุมชน เพื่อนำไปสู่การพัฒนาประเทศให้มีความยั่งยืนทางด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมต่อไปในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ยังอาจต้องมีการศึกษาหรือพัฒนาเพิ่มเติมถึงกระบวนการควบคุมดูแลระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อให้มีศักยภาพในการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพ หรือการเพิ่มความสะดวกในการควบคุมดูแล เช่น การออกแบบติดตั้งเพิ่มเติมระบบควบคุมอัตโนมัติ หรือการพัฒนาในรูปแบบอื่น ๆ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณหน่วยงาน สาขาวิทยาศาสตร์ทางทะเลและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย รวมถึงผู้ช่วยวิจัย และนักศึกษา ในการสนับสนุนการดำเนินงานวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จในการดำเนินงาน

เอกสารอ้างอิง

- เอนก สวาทอินทร์. (2563 ก). ระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์ สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพและบำบัดน้ำเสีย. *อนุสิทธิบัตรไทย เลขที่ 15998*. กรุงเทพฯ: กรมทรัพย์สินทางปัญญา กระทรวงพาณิชย์.
- เอนก สวาทอินทร์. (2563 ข). ยางในรถจักรยานยนต์สำหรับเสริมประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย. *อนุสิทธิบัตรไทย เลขที่ 16651*. กรุงเทพฯ: กรมทรัพย์สินทางปัญญา กระทรวงพาณิชย์.
- เอนก สวาทอินทร์. (2563 ค). ชุดเตาก๊าซชีวภาพ. *อนุสิทธิบัตรไทย เลขที่ 16985*. กรุงเทพฯ: กรมทรัพย์สินทางปัญญา กระทรวงพาณิชย์.

- เอนก สวาทอินทร์ ชุติณัฐ สุจริต มณีรัตน์ สุทธิวงศ์ และศรีัญญา พูลเขาล้าน. (2558). ผลของอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตเส้นขนมจีนกับน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันปาล์มที่มีต่อการเริ่มเกิดก๊าซชีวภาพ. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่ 7. (หน้าที่ 312-321). นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.
- Ahamed, A., Chen, C.L., Rajagopal, R., Wu, D., Mao, Y., Ho, I.j.R., Lim, J.W. and Wang, J.Y. (2015). Multi-phased anaerobic baffled reactor treating food waste. *Bioresource Technology*, 182, 239-244.
- APHA, AWWA and WEF. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. (22nd ed). Washington, DC: American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF).
- Barber, W.P. and Stuckey, D.C. (1999). The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review. *Water Research*, 33(7), 1559-1578.
- Barati, M.R., Aghbashlo, M., Ghanavati, H., Tabatabaei, M., Sharifi, M., Javadirad, G., Dadak, A. and Soufiyan, M.M. (2017). Comprehensive exergy analysis of a gas engine-equipped anaerobic digestion plant producing electricity and biofertilizer from organic fraction of municipal solid waste. *Energy Conversion and Management*, 151(1), 753-763.
- Diamantis, V., Eftaxias, A., Stamatelatou, K., Noutsopoulos, C., Vlachokostas, C. and Aivasidis, A. (2021). Bioenergy in the era of circular economy: Anaerobic digestion technological solutions to produce biogas from lipid-rich wastes. *Renewable Energy*, 168, 438-447.
- Florkowski, W.J., Us, A. and Klepacka, A.M. (2018). Food waste in rural households support for local biogas production in Lubelskie Voivodship (Poland). *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 46-52.
- Malakahmad, A., Ezlin, A.B.N., and Ahahrom Md.Z. (2011). Study on performance of a modified anaerobic baffled reactor to treat high strength wastewater. *Journal of Applied Sciences*, 11(8), 1449-1452.

- Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K., Tabatabaei, M. and Aghbashlo, M. (2019). Biogas production from food wastes: A review on recent developments and future perspectives. *Bioresource Technology Reports*, 7, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100202>.
- Qi, W.K., Liu, L.F., Shi, Q., Wang, C., Li, Y.Y. and Peng, Y. (2021). Detailed composition evolution of food waste in an intermittent self-agitation anaerobic digestion baffled reactor. *Bioresource technology*, 320(Part A), doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124342>.
- Rajaeifar, M.A., Ghanavati, H., Dashti, B.B., Heijungs, R., Aghbashlo, M. and Tabatabaei, M. (2017). Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 414-439.
- Vlachokostas, C., Achillas, C., Agnantiaris, I., Michailidou, A. V., Pallas, C., Feleki, E. and Moussiopoulos, N. (2020). Decision support system to implement units of alternative biowaste treatment for producing bioenergy and boosting local bioeconomy. *Energies*, 13(9), doi: <https://doi.org/10.3390/en13092306>.
- Westerholm, M., Liu, T. and Schnurer, A. (2020). Comparative study of industrial-scale high-solid biogas production from food waste: Process operation and microbiology. *Bioresource Technology*, 304, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122981>.
- Yasin, N.H.M., Mumtaz, T. and Hassan, M.A. (2013). Food waste and food processing waste for biohydrogen production: A review. *Journal of Environmental Management*, 130, 375-385.
- Zwain, H.M., Hassan, S.R., Zaman, N.Q., Aziz, H.A. and Dahlan, I. (2013). The start-up performance of modified anaerobic baffled reactor (MABR) for the treatment of recycled paper mill wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(1-2), 61-64.

ผลของอัตราการกวนและการให้อากาศต่อการเจริญเติบโตของ
Aurantiochytrium sp. FIKU018 ที่เพาะเลี้ยงแบบเฟด-แบทช์
 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

Effect of Agitation and Aeration on the Growth of
Aurantiochytrium sp. FIKU018 Fed-batch Cultured in Bioreactor

เกศยา คำรังษี¹ เทพปัญญา เจริญรัตน์¹ ณัฐินี สุวรรณสิงห์¹ และสุเพญญา จิตตพันธ์^{1*}
 Katsaya Khumrangsee¹ Theppanya Charoenrat¹ Natinee Suvanasingha¹
 and Supenya Chittapun^{1*}

บทคัดย่อ

การกวนและการให้อากาศเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อเซลล์และการเจริญเติบโตของเซลล์ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราการกวนและการให้อากาศต่อการเจริญเติบโตของ *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพโดยเพาะเลี้ยง *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 แบบเฟด-แบทช์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 22 ลิตรด้วยอาหาร GYP ในระยะแบทช์ และอาหาร GYP feed และ glucose feed ในช่วงเฟด-แบทช์ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.0 และแปรผันอัตราการกวนที่ 450-800 รอบต่อนาที และอัตราการให้อากาศ 0-1.5 วีวีเอ็ม เก็บตัวอย่างทุก 4 ชั่วโมง เพื่อตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงหาปริมาณน้ำหนักรวมเซลล์แห้ง และวิเคราะห์ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ พบว่าอัตราการกวนที่ 450 รอบต่อนาที ร่วมกับอัตราการให้อากาศที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของเซลล์ ทำให้สามารถเพาะเลี้ยงเซลล์ในระบบเฟด-แบทช์ได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 64 ชั่วโมง โดยมีค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเท่ากับ 0.21 ต่อชั่วโมง ค่าน้ำหนักรวมเซลล์แห้งสูงสุดเท่ากับ 30.50 ± 0.44 กรัมต่อลิตร และผลได้ของเซลล์จากสับสเตรตเมื่อสิ้นสุดกระบวนการเพาะเลี้ยงในระบบเฟด-แบทช์ด้วยอาหารเหลว glucose Feed เท่ากับ 0.45 ± 0.05 กรัมเซลล์ต่อกรัมกลูโคส ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนากระบวนการเพาะเลี้ยง *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 ในถังปฏิกรณ์เพื่อพัฒนาไปสู่ระดับอุตสาหกรรมต่อไป

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

* Corresponding author e-mail: supenyac@tu.ac.th, chittapun@gmail.com

Received: 18 May 2021, Revised: 2 June 2021, Accepted: 4 June 2021

คำสำคัญ: การหมัก อัตราการกวน อัตราการให้อากาศ ค่าการละลายของออกซิเจน

Abstract

Agitation and aeration are important factors, which play a vital role in cell characteristics and cell growth during cultivation in the bioreactor. This research aimed to study the effects of agitation and aeration rates on the growth of *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 cultured in the fermenter. The fed-batch cultivation of *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 was conducted in a 22 L bioreactor, feeding with GYP medium in batch phase and with GYP feed and glucose feed during the fed-batch stage. The process was operated at 30°C, pH 6.0 under different agitation (450-800 rpm) and aeration (0-1.5 vvm) rates. The sample was collected every 4 h to measure the absorbance, determine dry cell weight and analyze the concentration of reducing sugar. The results showed that the stirring rate of 450 rpm and associated with an appropriate aeration rate, which adjusted according to the cell growth was proper to enabled the fed-batch cell culture to continue for 64 h with the specific growth rate of 0.21 h^{-1} and the maximum dry cell weight of $30.50 \pm 0.44\text{ g/L}$. The yield at the end of the culture in the fed-batch system was $0.45 \pm 0.05\text{ g cell/g glucose}$. This finding can be used as fundamental data to develop *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 cultivation in the bioreactor for further upscale to the industrial level.

Keywords: Fermentation, Agitation rate, Aeration rate, Dissolved oxygen

บทนำ

Aurantiochytrium เป็นจุลินทรีย์ในกลุ่มของทรอสโทไคทริดส์ (Thraustochytrids) ที่ได้รับความสนใจในการใช้ประโยชน์ทางด้านโภชนศาสตร์มากมาย เนื่องจากสามารถผลิตกรดไขมันไม่อิ่มตัว (polyunsaturated fatty acids) ได้ในปริมาณสูง โดยเฉพาะกรดโดโคซาเฮกซาอีโนอิก หรือดีเอชเอ (docosahexaenoic acid: DHA) ที่สามารถสะสมได้ปริมาณมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณกรดไขมันทั้งหมด (Raghukumar, 2008) ดีเอชเอเป็นกรดไขมันซึ่งเป็นโครงสร้างสำคัญของเยื่อหุ้มเซลล์ เนื้อเยื่อสมอง และดวงตา (Zeng *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2015) ดีเอชเอมีผลต่อพัฒนาการของสมองในทารกและเด็กแรกเกิด โดยจะสะสมอยู่ในรูปของพลาสมาฟอสโฟลิพิด (plasma phospholipid) ทารกสามารถรับดีเอชเอได้ตั้งแต่วัยในครรภ์และยังสามารถรับผ่านทางสารอาหารจากมารดา (Romeu-Nadal *et al.*, 2008) นอกจากนี้ดีเอชเอยังช่วยลดอัตราเสี่ยงของการเกิดโรคหลอดเลือด

หัวใจตีบ (coronary artery diseases) โรคเบาหวาน (diabetes) โรคหัวใจ (cardiovascular diseases) และโรคทางระบบประสาท (neuropsychiatric disorders) เช่น ภาวะสมองเสื่อม (cognitive decline) โรคอัลไซเมอร์ (alzheimer) และโรคซึมเศร้า (depression) ได้อีกด้วย (Yaguchi *et al.*, 1997; Chin *et al.*, 2006; Chatdumrong *et al.*, 2007; Chi *et al.*, 2009) เนื่องจากชีวมวลของ *Aurantiochytrium* สามารถใช้เป็นแหล่งดีเอชเอทดแทนดีเอชเอที่ผลิตจากปลาทะเลได้ การเพาะเลี้ยง *Aurantiochytrium* เพื่อผลิตชีวมวลและนำไปใช้ประโยชน์จึงได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยมากขึ้น การพัฒนาต้นแบบ กระบวนการเพาะเลี้ยง *Aurantiochytrium* เพื่อผลิตชีวมวลนั้นมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการ เช่น ชนิดของสารอาหาร ความเข้มข้นของสารอาหาร ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ การกวน และการให้อากาศ จากปัจจัยที่กล่าวมาการกวนและการให้อากาศเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญซึ่งส่งผลกระทบต่อเซลล์ *Aurantiochytrium* และการถ่ายเทมวลสารในระบบ ซึ่งส่งผลต่อชีวมวลที่ผลิตได้ โดยเซลล์ *Aurantiochytrium* มีรูปร่างกลม ผนังบาง และสะสมไขมันภายในเซลล์ (Honda *et al.*, 1998; Yokoyama and Honda, 2007) เมื่อมีการสะสมไขมันเป็นปริมาณมากอาจทำให้เยื่อหุ้มเซลล์อ่อนแอ และแตกได้ (Jakobsen *et al.*, 2008) รวมทั้งการเจริญเติบโตของ *Aurantiochytrium* เป็นแบบทวิคูณ (successive bipartition) ซึ่งมีการแบ่งเซลล์อย่างรวดเร็ว จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเพิ่มอัตราการกวนมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของออกซิเจนและอาหารในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ และอัตราการกวนที่มากกว่า 400 รอบต่อนาที ช่วยให้ *Aurantiochytrium limacinum* mh0186 ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเจริญเติบโตได้ดี (Nagono *et al.*, 2009) ส่วนอัตราการให้อากาศมีผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลของออกซิเจนในระบบ ซึ่งอัตราการให้อากาศที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ปริมาตรอาหาร ความดันในระบบ และอุณหภูมิ ระหว่างการเพาะเลี้ยง (เทพปัญญา และวรสิทธิ์, 2553) ฉะนั้นอัตราการกวนและการให้อากาศที่เหมาะสมแก่ระบบนอกจากจะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเซลล์และช่วยให้ปริมาณออกซิเจนในระบบมีเพียงพอการนำไปใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมแล้ว ยังส่งเสริมการเจริญเติบโตอีกด้วย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราการกวนและอัตราการให้อากาศต่อการเจริญเติบโตของ *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 ที่เพาะเลี้ยงแบบเฟด-แบทช์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาต้นแบบกระบวนการเพาะเลี้ยงเพื่อผลิตชีวมวล *Aurantiochytrium* ให้ได้ ปริมาณสูงต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. จุลินทรีย์และอาหารเลี้ยงเชื้อ

งานวิจัยนี้ใช้จุลินทรีย์ *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีวภาพสาหร่าย คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และอาหารเลี้ยงเชื้อ คืออาหารแข็งและอาหารเหลว GYP ที่ละลายในน้ำทะเลสังเคราะห์ที่มีความเค็ม 15 กรัมต่อลิตร โดยอาหารแข็งใช้สำหรับเก็บรักษาเชื้อประกอบด้วย กลูโคส 4 กรัมต่อลิตร ยีสต์สกัด 2 กรัมต่อลิตร เพป्टอน 1 กรัมต่อลิตร และผงวุ้นความเข้มข้น 15 กรัมต่อลิตร และอาหารเหลวใช้สำหรับเพาะเลี้ยงเชื้อ ประกอบด้วย กลูโคส 30 กรัมต่อลิตร ยีสต์สกัด 10 กรัมต่อลิตร เพป्टอน 20 กรัมต่อลิตร และเติม ยาปฏิชีวนะคลอแรมฟินิคอล (chloramphenicol) ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. การเตรียมกล้าเชื้อสำหรับเพาะเลี้ยงระดับถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ

แยกโคโลนีเดี่ยวจากอาหารแข็งลงในอาหารเหลว GYP ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ในพลาสติก ขนาด 125 มิลลิลิตร เพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส บนเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ในสภาวะที่ไม่มีแสง เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และเพิ่มขนาดการเพาะเลี้ยงทุก 72 ชั่วโมง เป็นปริมาตร 50 และ 100 มิลลิลิตร ในพลาสติกขนาด 250 และ 500 มิลลิลิตร ตามลำดับ

3. ศึกษาผลของอัตราการกวนและอัตราการให้อากาศต่อการเจริญเติบโตของ *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 ในถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ

เมื่อเพาะเลี้ยงเซลล์ในพลาสติกขนาด 500 มิลลิลิตร จนครบ 72 ชั่วโมง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ปรับให้มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1 จากนั้นถ่ายเชื้อ 600 มิลลิลิตร (10 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยง) ลงในถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ (sartorius stedim BIOSTAT® C plus) ขนาด 22 ลิตร โดยเพาะเลี้ยงในอาหารเหลว GYP ปริมาตร 6 ลิตร ควบคุมสภาวะการเพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พีเอช 6.0 โดยระบบที่ 1 ควบคุมอัตราการกวน เริ่มต้นที่ 800 รอบต่อนาที และอัตราการให้อากาศ 0-1 ลิตรต่อลิตร.นาที่ (วีวีเอ็ม) และระบบที่ 2 ควบคุมอัตราการกวนเริ่มต้นที่ 450 รอบต่อนาที และอัตราการให้อากาศ 0-1.5 ลิตรต่อลิตร.นาที่ (วีวีเอ็ม) สุ่มเก็บตัวอย่างน้ำหมักจากทั้ง 2 ระบบ ทุก 4 ชั่วโมง จนกระทั่งกลูโคสถูกใช้จนหมด จึงเพาะเลี้ยงเซลล์ต่อเนื่องด้วยระบบเฟด-แบทช์ โดยการเติมอาหารเหลว GYP feed และอาหารเหลว glucose feed ตามลำดับ ใช้ระบบ DOT STAT ควบคุมอัตราการเติมอาหาร และเพาะเลี้ยงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.0 อัตราการกวน 450 รอบต่อนาที อัตราการให้อากาศ 1-1.5 วีวีเอ็ม เก็บตัวอย่างทุก 2-4 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำตาลถูกใช้หมด ตัวอย่างที่ได้นำมาตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงหาปริมาณน้ำหนักรีดเซลล์แห้ง และวิเคราะห์ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์

4. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

4.1 ตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยการนำตัวอย่างน้ำหมักมาเจือจางในอัตราส่วนที่เหมาะสมด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (OD_{600}) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (SP-880 Metertech Inc.)

4.2 หาปริมาณน้ำหนักรเซลล์แห้ง โดยนำตัวอย่างน้ำหมักปริมาตร 1 มิลลิลิตร มาปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนเซลล์ด้วยเครื่องเซนตริฟิวจ์ (microcentrifuge) ที่ความเร็ว 10000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ล้างตะกอนเซลล์ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.9 เปอร์เซ็นต์ 2 ครั้ง นำตะกอนเซลล์ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชั่งด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

4.3 วิเคราะห์ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยสารละลายกรดไคนโตรซาลิไซลิก (DNS) (Miller, 1959) โดยนำตัวอย่างส่วนที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงมาเจือจางในอัตราส่วนที่เหมาะสมผสมตัวอย่างปริมาตร 500 ไมโครลิตรกับสารละลายกรดไคนโตรซาลิไซลิกปริมาตร 500 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นแช่ในน้ำเย็นเป็นเวลา 5 นาที เติมน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร คำนวณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์เทียบกับกราฟมาตรฐานของกลูโคส

5. การวิเคราะห์ข้อมูล

การหาปริมาณน้ำหนักรเซลล์แห้งและการวิเคราะห์ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ทำ 3 ซ้ำ และนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ข้อมูลที่ได้นำมาเขียนกราฟ และการเจริญเติบโตจำเพาะโดยใช้โปรแกรม sigma plot version 11.0

ผลการวิจัย

1. การเจริญเติบโตของ *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 ที่เพาะเลี้ยงแบบเฟด-แบทช์ ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

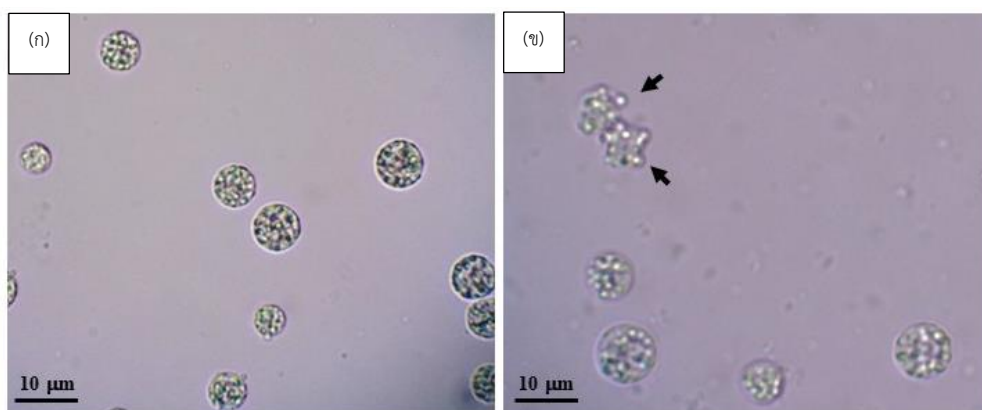
1.1 การเพาะเลี้ยงเซลล์ด้วยอัตราการกวนที่ 450-800 รอบต่อนาที และอัตราการให้อากาศ 0-1.5 วีวีเอ็ม

เริ่มต้นกระบวนการเพาะเลี้ยงเซลล์ *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแบทช์เป็นเวลา 28 ชั่วโมง ด้วยอาหารเหลว GYP ปริมาตร 4 ลิตร โดยควบคุมอัตราการกวนเท่ากับ 800 รอบต่อนาที และอัตราการให้อากาศเท่ากับ 1 วีวีเอ็ม หลังจากถ่ายกล้ำเชื้อลงสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ เซลล์มีค่าการดูดกลืนแสงและน้ำหนักรเซลล์แห้งเริ่มต้นเท่ากับ 1.01 และ 0.37 ± 0.15 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อเพาะเลี้ยงเซลล์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าเซลล์มีการเจริญเติบโตลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าการดูดกลืนแสงและน้ำหนักรเซลล์แห้งน้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณ

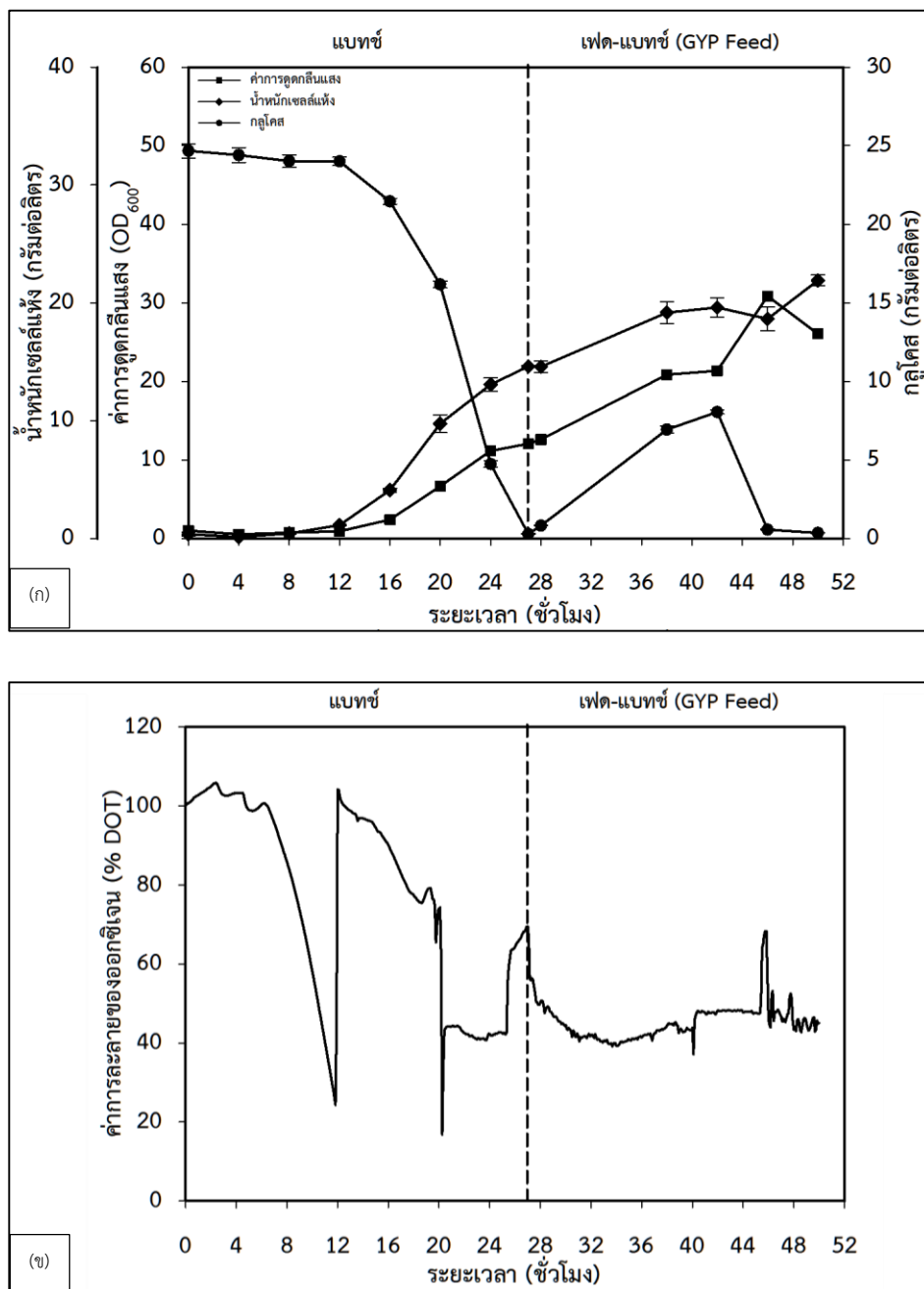
เซลล์เริ่มต้น เมื่อศึกษาลักษณะเซลล์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบว่ามีเศษเซลล์จำนวนมากกระจายตัวในน้ำหมัก (cell debris) และผนังเซลล์บางส่วนถูกทำลาย (ภาพที่ 1) ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์ได้รับผลกระทบจากแรงเฉือน (shear force) ที่เกิดจากความเร็วยรอบของใบกวนที่มากเกินไป จึงปรับลดอัตราการกวนลงเหลือ 600 รอบต่อนาที และปิดการให้อากาศแก่ระบบชั่วคราว เพื่อให้ระบบมีอัตราการถ่ายเทมวลของออกซิเจนเข้าสู่เซลล์เหมาะสมกับปริมาณเซลล์ เมื่อเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าเซลล์ใช้ออกซิเจนในระบบอย่างต่อเนื่อง กระทั่งค่าการละลายของออกซิเจน (dissolved oxygen tension; DOT) ลดลงเหลือ 20 เปอร์เซ็นต์ จึงปรับอัตราการให้อากาศเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้นเป็น 0.5 วีวีเอ็ม เพื่อให้ปริมาณออกซิเจนในระบบมีเพียงพอที่เซลล์จะนำไปใช้ในกระบวนการสร้างพลังงานและเผาผลาญสารอาหาร เพื่อการเจริญเติบโต เมื่อเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 20 ชั่วโมง ค่าการละลายของออกซิเจนในระบบลดลงเหลือ 20 เปอร์เซ็นต์อีกครั้ง แสดงให้เห็นว่าเซลล์มีการเจริญเติบโตและนำออกซิเจนไปใช้จนทำให้ออกซิเจนในระบบลดลง จึงปรับอัตราการให้อากาศเข้าสู่ระบบเพิ่มเป็น 1 วีวีเอ็ม เมื่อเพาะเลี้ยงเซลล์เป็นเวลา 24 ชั่วโมงปรากฏว่าค่าการละลายของออกซิเจนในระบบมีค่าลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากเซลล์มีความหนาแน่นน้อยและมีอัตราการเจริญเติบโตน้อย จึงปรับลดอัตราการกวนลงเท่ากับ 450 รอบต่อนาที เพื่อให้เหมาะสมกับความหนาแน่นของเซลล์ และให้เซลล์สามารถใช้อาหารและออกซิเจนในการเจริญเติบโตได้อย่างเหมาะสม เมื่อเพาะเลี้ยงแบบแบทช์เป็นเวลา 27 ชั่วโมง เซลล์ใช้แหล่งคาร์บอนจนหมด ส่งผลให้ค่าการละลายของออกซิเจนในระบบเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากเซลล์ลดการนำออกซิเจนไปใช้สำหรับกระบวนการหายใจและสังเคราะห์พลังงานในการเจริญเติบโต หลังสิ้นสุดกระบวนการเพาะเลี้ยงแบบแบทช์ เซลล์มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเท่ากับ 12.06 และมีปริมาณน้ำหนักเซลล์แห้งสูงสุดเท่ากับ 14.60 ± 0.10 กรัมต่อลิตร

จากนั้นเพาะเลี้ยงเซลล์ต่อเนื่องในระบบเฟด-แบทช์ด้วยอาหารเหลว GYP feed ปริมาตร 1 ลิตร ด้วยรูปแบบการเติมอาหารแบบคงที่ (constant feed) เพื่อเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและความหนาแน่นของเซลล์ ควบคุมอัตราการกวนคงที่เท่ากับ 450 รอบต่อนาที และอัตราการให้อากาศคงที่ที่ 1 วีวีเอ็ม ระหว่างการเพาะเลี้ยงในชั่วโมงที่ 28-40 พบว่าเซลล์ใช้ออกซิเจนในการเจริญเติบโตน้อยลง ส่งผลให้ค่าการละลายของออกซิเจนในระบบมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย จึงทำการเพิ่มอัตราการให้อาหารเข้าสู่ระบบ ส่งผลให้ปริมาณกลูโคสมีค่าสูงขึ้น (ภาพที่ 2) หลังจากนั้นหยุดการเติมอาหารเข้าสู่ระบบการเพาะเลี้ยงชั่วคราว เพื่อทดสอบว่าเซลล์ยังสามารถนำแหล่งคาร์บอนที่เหลืออยู่ในระบบไปใช้ในการเจริญเติบโตได้หรือไม่ หลังจากเพาะเลี้ยงต่อเนื่องเป็นเวลา 50 ชั่วโมง พบว่าเซลล์มีค่าการเจริญเติบโตคงที่และลดลงตามลำดับ จากผลการทดลองที่เกิดขึ้นทำให้ไม่สามารถดำเนินการเพาะเลี้ยงแบบเฟด-แบทช์ โดยใช้ระบบ DOT STAT ควบคุมอัตราการเติมอาหาร เนื่องจากเซลล์มีการเจริญเติบโตและการใช้แหล่งคาร์บอนน้อยจึงทำให้อัตราการใช้ออกซิเจนต่ำจนทำให้ค่าการละลายของออกซิเจนเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนไม่สามารถใช้สัญญาณจากค่า DOT มาใช้ในการควบคุมการเติมสารสเตรตในระบบ DOT STAT การที่เชื้อมีการเจริญเติบโตช้ามากและหยุดการเจริญเติบโตใน

ระยะเวลาสั้นทั้งที่ในระบบยังคงมีสารอาหารมากเกินไปเป็นการแสดงให้เห็นถึงความไม่สมบูรณ์ของเซลล์ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของเซลล์ได้กล้างจุลทรรศน์เมื่อเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ภาพที่ 1 ข) ที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ามีเซลล์แตก ทั้งนี้ถึงแม้ว่าจะมีการปรับลดอัตราการกวนจาก 800 รอบต่อนาที เป็น 600 รอบต่อนาที และ 450 รอบต่อนาที ตามลำดับแล้วก็ตาม แต่ระบบที่เซลล์ผ่านทำให้มีความอ่อนแอมาแล้วก็เป็นเรื่องที่ยากที่จะฟื้นฟูความแข็งแรงของเซลล์จนสามารถทำให้เซลล์กลับมาเจริญเติบโตอย่างเต็มประสิทธิภาพอีกครั้ง หลังสิ้นสุดกระบวนการเพาะเลี้ยง เซลล์มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเท่ากับ 26.05 และมีน้ำหนักเซลล์แห้งสูงสุดเท่ากับ 21.90 ± 0.46 กรัมต่อลิตร จากการศึกษาการเพาะเลี้ยงเซลล์ *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพด้วยอัตราการกวนที่ 450-800 รอบต่อนาทีและอัตราการให้อากาศ 0-1 วีวีเอ็ม แสดงให้เห็นว่าอัตราการถ่ายเทมวลของออกซิเจนตลอดกระบวนการเพาะเลี้ยงไม่ได้จำกัด แต่ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เซลล์เสียหายจนการเพาะเลี้ยงสิ้นสุดลงในระยะเวลาสั้น คือ แรงเฉือนที่เกิดจากการกวนด้วยอัตราที่สูงเกินไป (800 รอบต่อนาที) ดังนั้นเพื่อทดสอบสมมติฐานนี้ผู้วิจัยจึงทำการทดลองถัดไปโดยลดค่าอัตราการกวนเป็น 450 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นค่าอัตราการกวนที่ทำให้เกิดการผสมอย่างทั่วถึง



ภาพที่ 1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเซลล์ *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 ที่เพาะเลี้ยงแบบแบทช์ด้วยอาหารเหลว GYP ด้วยอัตราการกวน 800 รอบต่อนาที (ก) เริ่มต้น (ข) 4 ชั่วโมง และถูกตรึงแสดงให้เห็นลักษณะเซลล์แตก



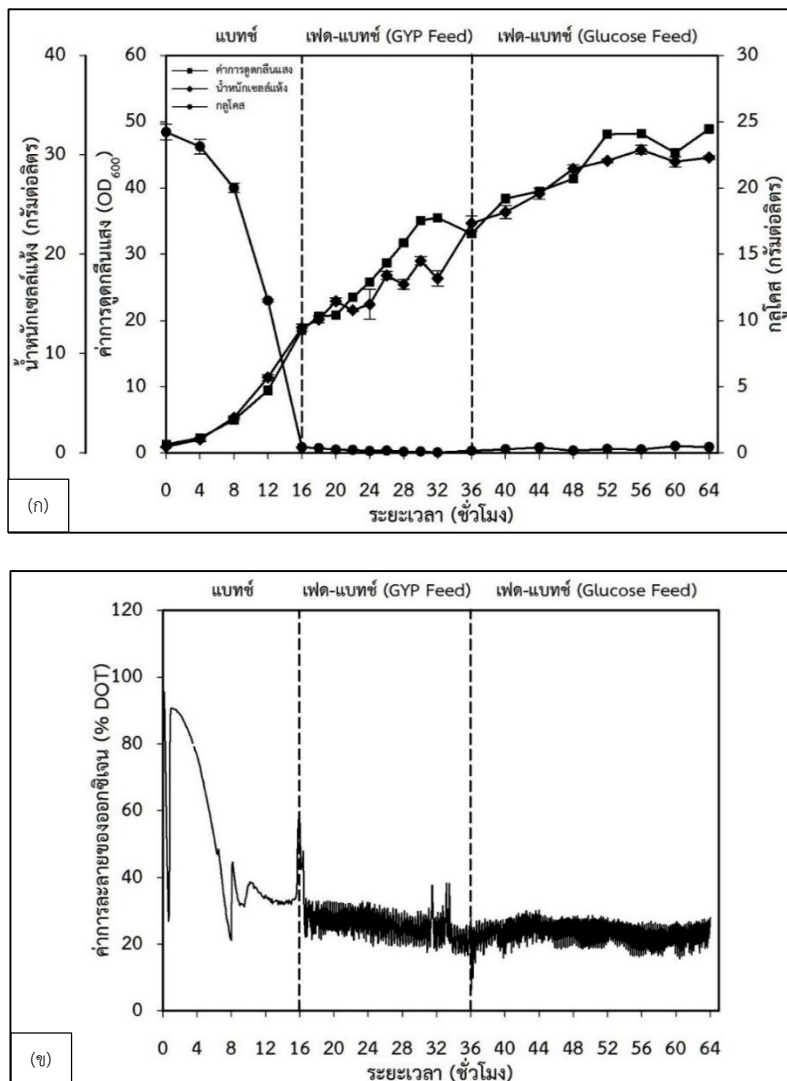
ภาพที่ 2 การเจริญเติบโตของ *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ระบบเฟด-แบบทซ์ด้วยอัตราการกวน 450-800 รอบต่อนาที และอัตราการให้อากาศ 0-1 วีวีเอ็ม เป็นระยะเวลา 52 ชั่วโมง (ก) การเจริญเติบโตและความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ในระบบเพาะเลี้ยง (ข) ค่าการละลายของออกซิเจนในระบบเพาะเลี้ยง

1.2 เพาะเลี้ยงเซลล์ด้วยอัตราการกวนที่ 450 รอบต่อนาที และอัตราการให้อากาศ 0-1.5 วีวีเอ็ม

เริ่มต้นกระบวนการเพาะเลี้ยงเซลล์ *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบแบทช์เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ด้วยอาหารเหลว GYP ปริมาตร 6 ลิตร ควบคุมอัตราการกวนคงที่เท่ากับ 450 รอบต่อนาทีตลอดการเพาะเลี้ยง และปรับอัตราการให้อากาศเริ่มต้นเท่ากับ 1 วีวีเอ็ม หลังถ่ายกล้ำเชื้อลงสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ เซลล์มีค่าการดูดกลืนแสงและน้ำหนักรวมเซลล์แห้งเริ่มต้นเท่ากับ 1.29 และ 0.63 ± 0.06 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ หลังจากเก็บเกี่ยวเซลล์ในชั่วโมงเริ่มต้นของการเพาะเลี้ยง ทำการปิดอัตราการให้อากาศชั่วคราวเพื่อให้เซลล์นำออกซิเจนในระบบมาใช้ในการเผาผลาญสารอาหารและสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ และเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง กระทั่งปริมาณออกซิเจนลดลงเหลือ 20 เปอร์เซ็นต์ ในช่วง 30 นาทีแรกของการเพาะเลี้ยง ปรับอัตราการให้อากาศเข้าสู่ระบบเพิ่มเป็น 0.5 วีวีเอ็ม เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนในระบบ เมื่อเพาะเลี้ยงเซลล์เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง ปริมาณออกซิเจนภายในระบบถูกนำไปใช้ในการเจริญเติบโตจนมีค่าลดลงเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์อีกครั้ง จึงปรับอัตราการให้อากาศเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้นเป็น 1 วีวีเอ็ม เมื่อเพาะเลี้ยงเซลล์แบบแบทช์เป็นเวลา 16 ชั่วโมง พบว่าเซลล์ใช้แหล่งคาร์บอนจนหมด โดยปริมาณกลูโคสในระบบมีค่าลดลง (ภาพที่ 3) ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในระบบมีค่าสูงขึ้น เซลล์มีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วง 0-12 ชั่วโมงแรก และมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเท่ากับ 0.21 ต่อชั่วโมง หลังสิ้นสุดกระบวนการเพาะเลี้ยงแบบแบทช์เซลล์มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเท่ากับ 18.55 มีน้ำหนักรวมเซลล์แห้งสูงสุดเท่ากับ 12.60 ± 0.36 กรัมต่อลิตร และผลได้ของเซลล์จากสับสเตรต (Y_{xs}) ในช่วงการเพาะเลี้ยงแบบแบทช์ เท่ากับ 0.40 ± 0.04 กรัมต่อกรัม

จากนั้นเพาะเลี้ยงเซลล์ต่อเนื่องในระบบเฟด-แบทช์ด้วยอาหารเหลว GYP feed ปริมาตร 1 ลิตร เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเซลล์ เติมน้ำอาหารเข้าสู่ระบบโดยใช้ระบบ DOT STAT หลังจากเติมน้ำอาหารเข้าสู่ระบบ ปรับลดอัตราการให้อากาศลงเหลือ 0.5 วีวีเอ็ม เมื่อเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 20 ชั่วโมง เซลล์มีค่าการดูดกลืนแสงคงที่ จึงปรับอัตราการให้อากาศเพิ่มเป็น 1 วีวีเอ็ม ส่งผลให้เซลล์ตอบสนองต่อออกซิเจนที่ป้อนเข้าสู่ระบบมากขึ้น และเซลล์มีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 3) เมื่อเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 36 ชั่วโมง เซลล์ใช้แหล่งคาร์บอนจนหมดส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในระบบมีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง โดยเซลล์มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 33.1 น้ำหนักรวมเซลล์แห้งสูงสุดเท่ากับ 23.10 ± 0.75 กรัมต่อลิตร และผลได้ของเซลล์จากสับสเตรตในช่วงการเพาะเลี้ยงแบบเฟด-แบทช์ด้วยอาหารเหลว GYP feed เท่ากับ 0.74 ± 0.06 กรัมต่อกรัม จากนั้นเพาะเลี้ยงต่อด้วยอาหารเหลว glucose feed ปริมาตร 1 ลิตร หลังจากเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 44 ชั่วโมง เซลล์มีค่าการดูดกลืนแสงและน้ำหนักรวมเซลล์แห้งคงที่ จึงปรับอัตราการให้อากาศเข้าสู่ระบบเพิ่มเป็น 1.5 วีวีเอ็ม เพื่อให้มีออกซิเจนเพียงพอในการนำไปใช้สร้างพลังงาน เจริญเติบโต และสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อเพาะเลี้ยงเซลล์เป็นเวลา 56 ชั่วโมง พบว่าเซลล์มีอัตราการเจริญเติบโตและการใช้ออกซิเจนคงที่ จึงหยุดกระบวนการ

เพาะเลี้ยงและเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ เซลล์มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเท่ากับ 48.2 น้ำหนักเซลล์แห้งสูงสุดเท่ากับ 30.50 ± 0.44 กรัมต่อลิตร และผลได้ของเซลล์จากสับสเตรตเมื่อสิ้นสุดกระบวนการเพาะเลี้ยงในระบบเฟด-แบทช์ด้วยอาหารเหลว glucose feed เท่ากับ 0.45 ± 0.05 กรัมต่อกรัมจากการเพาะเลี้ยงเซลล์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพด้วยอัตราการกวนคงที่ 450 รอบต่อนาที ร่วมกับการให้อากาศที่เหมาะสม ส่งผลให้เซลล์สามารถเจริญเติบโตได้อย่างต่อเนื่อง ช่วยให้ปริมาณชีวมวลที่ผลิตได้มากขึ้น



ภาพที่ 3 การเจริญเติบโตของ *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 ที่เพาะเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพระบบเฟด-แบทช์ด้วยอัตราการกวน 450 รอบต่อนาที และอัตราการให้อากาศ 0-1.5 วีวีเอ็ม เป็นระยะเวลา 64 ชั่วโมง (ก) การเจริญเติบโตและความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ในระบบเพาะเลี้ยง (ข) ค่าการละลายของออกซิเจนในระบบเพาะเลี้ยง

การอภิปรายผลการวิจัย

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอัตราการกวน 450 รอบต่อนาที ร่วมกับการปรับอัตราการให้อากาศตามการเจริญเติบโตของเซลล์เหมาะสมในการเพาะเลี้ยง *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 แบบเฟด-แบทช์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ เนื่องจากไม่พบเซลล์แตกในระหว่างกระบวนการเพาะเลี้ยงและการถ่ายเทมวลของออกซิเจนอยู่ในระดับที่สูงจนไม่พบปัญหาการจำกัดออกซิเจน ซึ่งพิจารณาได้จากการที่ตลอดระยะเวลาของการเพาะเลี้ยงไม่มีช่วงใดเลยที่ค่าออกซิเจนละลายลดลงต่ำกว่า 15 เปอร์เซ็นต์จากข้อมูลเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าแรงเฉือนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสำเร็จของการเพาะเลี้ยงออแรนทิโอไคเตรียม อัตราการกวนที่สูงจนทำให้เกิดแรงเฉือนที่ทำให้เซลล์แตกเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องหลีกเลี่ยง ซึ่งค่าอัตราการกวนที่ใช้ในงานวิจัยนี้แตกต่างจากงานวิจัยที่มีการเพาะเลี้ยงทรอสโทโคตริดส์ในระบบเฟด-แบทช์ที่เคยรายงานมา ทั้งนี้ในแต่ละงานวิจัยมีการปรับรูปแบบอัตราการกวนและอัตราการให้อากาศเหมาะสมแตกต่างกัน เนื่องจากการกวนและการให้อากาศมีผลต่อปริมาณออกซิเจนและการถ่ายเทมวลสารในระบบ ฉะนั้นด้วยปริมาตรของอาหารและชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ในระบบเพาะเลี้ยงแตกต่างกัน จึงมีผลให้อัตราการกวนและอัตราการให้อากาศแตกต่างกันไปเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Chi *et al.* (2009) ที่เพาะเลี้ยง *Schizochytrium limacinum* SR21 ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพระบบแบทช์เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ด้วยการควบคุมค่าการละลายของออกซิเจนเท่ากับ 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษพบว่าเมื่อเพาะเลี้ยงเซลล์ด้วยปริมาณออกซิเจนที่สูงในช่วงแรกส่งผลให้เซลล์เจริญเติบโตได้ดี และเมื่อลดปริมาณออกซิเจนในระบบลงภายหลังของการเพาะเลี้ยง ทำให้เซลล์สามารถสะสมไขมันได้มากขึ้น เมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยงเซลล์ผลิตชีวมวลสูงสุด เท่ากับ 37.9 กรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ren *et al.* (2010) ที่ศึกษาการเจริญเติบโตของ *Schizochytrium* sp. ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพระบบเฟด-แบทช์ด้วยการแปรผันอัตราการให้อากาศ โดยควบคุมอัตราการให้อากาศเริ่มต้นในปริมาณสูง และปรับลดลงในภายหลัง เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตชีวมวลและไขมันของเซลล์ เป็นเวลา 132 ชั่วโมง ส่งผลให้เซลล์ผลิตชีวมวลสูงสุดเท่ากับ 71 กรัมต่อลิตร นอกจากนั้น Qu *et al.* (2010) และ Chang *et al.* (2013) ศึกษาการเพิ่มผลผลิตดีเอชเอจาก *Schizochytrium* sp. ด้วยการควบคุมค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของออกซิเจน (K_La) พบว่าการเพาะเลี้ยงเซลล์โดยควบคุมค่า K_La ที่สูงส่งผลให้เซลล์สามารถเจริญเติบโตได้รวดเร็วและผลิตชีวมวลได้ปริมาณมาก ในขณะที่ค่า K_La ต่ำส่งผลให้เซลล์ผลิตไขมันและดีเอชเอได้ในปริมาณสูง เมื่อสิ้นสุดการเพาะเลี้ยง พบว่าเซลล์สามารถผลิตชีวมวลได้สูงสุด เท่ากับ 92.72 และ 151.4 กรัมต่อลิตร เมื่อเพาะเลี้ยงเซลล์เป็นเวลา 160 และ 96 ชั่วโมงตามลำดับ ผลการศึกษาจากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น พบว่าการให้อากาศที่มากขึ้นในช่วงแรกของกระบวนการเพาะเลี้ยงเซลล์ส่งผลให้เซลล์สามารถเจริญเติบโตได้ดีและช่วยเพิ่มความหนาแน่นของเซลล์ได้ ซึ่งค่า K_La เป็นค่าที่สัมพันธ์กับอัตราการถ่ายเทมวลของออกซิเจนในน้ำหมักโดยสามารถอธิบายได้ดังสมการ (1)

$$\frac{dC}{dt} = \text{OTR} = K_L a \Delta C = K_L a (C^* - C) \quad (1)$$

เมื่อ OTR คือ อัตราการถ่ายเทมวลออกซิเจน (oxygen transfer rate) (มิลลิกรัมต่อลิตร. ชั่วโมง)

K_L คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของออกซิเจน (เมตรต่อวินาที)

a คือ สัดส่วนระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาตรของฟองอากาศ (เมตร⁻¹)

ΔC คือ ความเข้มข้น driving force (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C^* คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนภายใต้สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

t คือ เวลา (วินาที)

จากสมการ (1) แสดงให้เห็นว่าอัตราการถ่ายเทมวลของออกซิเจนมีความเกี่ยวข้องกับ 3 ตัวแปรสำคัญ คือ K_L , a และ ΔC ในทางปฏิบัติการหาค่า K_L และ a ทำได้ยาก ดังนั้นจึงมีการรวมตัวแปรทั้งสองเข้าด้วยกันเป็น $K_L a$ โดยเรียกตัวแปรใหม่นี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนเชิงปริมาตร (ชั่วโมง⁻¹) ทั้งนี้ ค่า $K_L a$ เป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพของถังหมักในการถ่ายเทมวลของออกซิเจนซึ่งมีความสำคัญในการออกแบบถังหมักและกระบวนการหมัก ค่า $K_L a$ เป็นค่าที่ขึ้นกับการออกแบบถังหมักและการดำเนินการหมัก ปัจจัยที่มีผลต่อค่า $K_L a$ ได้แก่ อัตราการให้อากาศ อัตราการกวน ความดันย่อยของออกซิเจนในอากาศที่ใช้เติม และการเติมสารต้านการเกิดฟอง ในขณะที่อุณหภูมิและความดันรวมในถังหมักเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า C^* อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ ตลอดกระบวนการเพาะเลี้ยงค่าออกซิเจนละลายมีค่าสูงกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าออกซิเจนไม่จำกัด หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าอัตราการถ่ายเทมวลของออกซิเจนมีค่าสูงกว่าอัตราการใช้ออกซิเจน ดังนั้นค่าออกซิเจนละลายของระบบจึงเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่เป็นภาพสะท้อนให้เห็นว่าอัตราการกวนและอัตราการให้อากาศมีค่าที่เหมาะสมหรือไม่ อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการกวนอาจส่งผลให้แรงเฉือนสูงขึ้นจนส่งผลเสียต่อเซลล์ (เทพปัญญา และวรสิทธิ์, 2553)

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้พบว่าอัตราการกวนที่ 450 รอบต่อนาทีร่วมกับการควบคุมอัตราการให้อากาศที่ 0-1.5 วีวีเอ็ม เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยง *Aurantiochytrium* sp. FIKU018 ในระบบเฟด-แบชท์ ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ โดยอัตราการกวนที่ 450 รอบต่อนาทีนอกจากไม่ทำให้เซลล์ได้รับความเสียหายแล้วยังทำให้เซลล์สามารถเจริญเติบโตและผลิตชีวมวลได้ในปริมาณมาก รวมทั้งการควบคุมอัตราการให้อากาศที่เหมาะสมช่วยให้อัตราการถ่ายเทมวลของออกซิเจนตลอดกระบวนการเพาะเลี้ยงไม่ได้

จำกัด ทำให้เซลล์เจริญเติบโตได้ดี ซึ่งข้อมูลนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาระบบการเพาะเลี้ยงให้สามารถผลิตชีวมวลและสะสมดีเอชเอปริมาณสูง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ 2564 รหัสโครงการ TUFF03/2564 ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่อำนวยความสะดวกในการวิจัยทั้งสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือในการศึกษาวิจัยนี้ และขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทนา ไพรบูรณ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์จุลินทรีย์ในการศึกษารั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- เทพปัญญา เจริญรัตน์ และวรสิทธิ์ โทจำปา. (2553). *ปฏิบัติการเทคโนโลยีการหมัก*. ปทุมธานี: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- Chang, G., Gao, N., Tian, G., Wu, Q., Chang, M. and Wang, X. (2013). Improvement of docosahexaenoic acid production on glycerol by *Schizochytrium* sp. S31 with constantly high oxygen transfer coefficient. *Bioresource Technology*, 142, 400-406.
- Chatdumrong, W., Yongmanitchai, W., Limtong, S. and Worawattanamatekul, W. (2007). Optimization of docosahexaenoic acid (DHA) production and improvement of astaxanthin content in a mutant *Schizochytrium limacinum* isolated from mangrove forest in Thailand. *Kasetsart Journal (Natural Science)*, 41(2), 324-334.
- Chi, Z., Liu, Y., Frear, C. and Chen, S. (2009). Study of a two-stage growth of DHA-producing marine algae *Schizochytrium limacinum* SR21 with shifting dissolved oxygen level. *Applied Microbiology Biotechnology*, 81(6), 1141-1148.
- Chin, H.J., Shen, T.F., Su, H.P. and Ding, S.T. (2006). *Schizochytrium limacinum* SR-21 as a source of docosahexaenoic acid: optimal growth and use as a dietary supplement for laying hens. *Australian Journal of Agricultural Research*, 57(1), 13-20.
- Honda, D., Yokochi, T., Nakahara, T., Erata, M. and Higashihara, T. (1998). *Schizochytrium limacinum* sp. nov., a new thraustochytrid from a mangrove area in the west Pacific Ocean. *Mycological Research*, 102(4), 439-448.

- Jakobsen, N.A., Aasen, M.I., Josefsen, D.K. and Strøm, R.A. (2008). Accumulation of docosahexaenoic acid-rich lipid in thraustochytrid *Aurantiochytrium* sp. strain T66: effects of N and P starvation and O₂ limitation. *Applied Microbiology Biotechnology*, 80(2), 297-306.
- Nagano, N., Taoka, Y., Honda, D. and Hayashi, M. (2009). Optimization of culture conditions of growth and docosahexaenoic acid production by a marine Thraustochytrid, *Aurantiochytrium limacinum* mh0186. *Journal of Oleo Science*, 58(12), 623-628.
- Qu, L., Ji, J.X., Ren, J.L., Nie, K.Z., Feng, Y., Wu, J.W., Ouyang, K.P. and Huang, H. (2010). Enhancement of docosahexaenoic acid production by *Schizochytrium* sp. using a two-stage oxygen supply control strategy based on oxygen transfer coefficient. *Letter in Applied Microbiology*, 52(1), 22-27.
- Raghukumar, S. (2008). Thraustochytrid marine protists: production of PUFAs and other emerging technologies. *Marine Biotechnology*, 10(6), 631-640.
- Ren, J.L., Ji, J.X., Huang, H., Qu, L., Feng, Y., Tong, Q.Q. and Ouyang, K.P. (2010). Development of stepwise aeration control strategy for efficient docosahexaenoic acid production by *Schizochytrium* sp. *Applied Microbiology Biotechnology*, 87(5), 1649-1656.
- Romeu-Nadal, M., Castellote, A.I., López-Sabater, M.C. (2008). Effect of cold storage on vitamins C and E and fatty acids in human milk. *Food Chemistry*, 106(1), 65-70.
- Song, X., Zang, X. and Zhang, X. (2015). Production of high docosahexaenoic acid by *Schizochytrium* sp. using low-cost raw materials from food industry. *Journal of Oleo Science*, 64(2), 197-204.
- Yaguchi T., Tanaka S., Yokochi T., Nakahara T., Higashihara T. (1997). Production of high yields of docosahexaenoic acid by *Schizochytrium* sp. strain SR21. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 74(11), 1431-1434.
- Yokoyama, R. and Honda, D. (2007). Taxonomic rearrangement of the genus *Schizochytrium* sensu lato based on morphology, chemotaxonomic characteristics, and 18S rRNA gene phylogeny (Thraustochytriaceae, Labyrinthulomycetes): Emendation for *Schizochytrium* and erection of *Aurantiochytrium* and *Oblongichytrium* gen. nov. *Mycoscience*, 48(4), 199-211.

- Zeng, Y., Ji, X.J, Lian, M., Ren, L.J., Jin, L.J, Ouyang, P.K. and Huang, H. (2011). Development of a temperature shift strategy for efficient docosahexaenoic acid production by a marine fungoid protist, *Schizochytrium* sp. HX-308. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 164(3), 249-255.

**คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับสำหรับผู้นิพนธ์
เพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช**

วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช จัดทำขึ้นเพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่บทความวิจัย (research article) และบทความวิชาการ (academic article) ของคณาจารย์ บุคลากร นักศึกษา ภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยฯ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะรับตีพิมพ์บทความในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประกอบด้วย ด้านวิทยาศาสตร์กายภาพ วิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งมีกลุ่มเป้าหมายคือคณาจารย์ นักศึกษา และนักวิจัยทั้งในและนอกสถาบัน ทั้งนี้วารสารมีกำหนดตีพิมพ์เผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 ในเดือนมกราคม-มิถุนายน และฉบับที่ 2 ในเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม

บทความทุกบทความที่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช “ต้องไม่เคยได้รับการตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างการเสนอเพื่อพิจารณาเผยแพร่ในวารสารฉบับอื่น” พร้อมทั้งได้รับการพิจารณาจากผู้ประเมินอิสระ (peer review) ที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง อย่างน้อย 2 ท่าน แบบผู้ประเมินอิสระและผู้แต่งไม่ทราบชื่อกันและกัน (double-blind review) และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ ทั้งนี้ บทความอาจถูกดัดแปลง แก้ไขคำ สำนวน รูปแบบการอ้างอิง รูปแบบการนำเสนอ และอื่น ๆ (ซึ่งไม่เกี่ยวกับเนื้อหาหรือสาระสำคัญ) ตามที่กองบรรณาธิการเห็นสมควร และผู้เขียนต้องรับผิดชอบในเนื้อหาของบทความ โดยกองบรรณาธิการวารสารวิชา และมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ไม่จำเป็นต้องรับผิดชอบใด ๆ

การเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับ

- พิมพ์เป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้
- การใช้ภาษาไทยให้ยึดหลักการใช้คำศัพท์และการเขียนทับศัพท์ภาษาอังกฤษตามหลักของราชบัณฑิตยสถาน ควรหลีกเลี่ยงการเขียนภาษาอังกฤษปนกับภาษาไทยในข้อความ ยกเว้นกรณีจำเป็น เช่น ศัพท์ทางวิชาการที่ไม่มีคำแปลหรือคำที่ใช้แล้วทำให้เข้าใจง่ายขึ้น คำศัพท์ภาษาอังกฤษที่เขียนปนภาษาไทยให้ใช้ตัวเล็กทั้งหมด ยกเว้นชื่อเฉพาะ
- สำหรับต้นฉบับภาษาอังกฤษควรได้รับการตรวจสอบความถูกต้องด้านการใช้ภาษาจากผู้เชี่ยวชาญด้านภาษาเป็นเบื้องต้นก่อน

- ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 15 หน้า รวมตาราง ภาพและเอกสารอ้างอิง
ควรระบุเลขหน้าให้ชัดเจนและจัดให้อยู่ในรูปแบบเดียวกันทั้งฉบับ

2. รายละเอียดตัวอักษรและรูปแบบการพิมพ์

- จัดพิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word ขนาดของต้นฉบับใช้กระดาษขนาด Executive (18.41 × 26.67 เซนติเมตร)
- ตั้งค่าหน้ากระดาษสำหรับการพิมพ์
 - ด้านบน 2.5 เซนติเมตร ด้านล่าง 2.5 เซนติเมตร
 - ด้านซ้าย 2.3 เซนติเมตร ด้านขวา 2.5 เซนติเมตร
- พิมพ์คอลัมน์เดียวกระจายเต็มบรรทัด
- ตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาดตัวอักษร 15

3. ส่วนประกอบในบทความ

3.1 บทความวิจัย (research article) เป็นบทความที่เป็นผลงานต่อเนื่อง สกัดมาจากงานวิจัยที่เสร็จสมบูรณ์แล้วซึ่งผู้เขียนได้ดำเนินการด้วยตนเอง
ประมวลสรุปกระบวนการวิจัยให้มีความกระชับและสั้น

3.1.1 ส่วนประกอบตอนต้น

- ชื่อเรื่อง (title) ควรสั้น กระชับรัด ไม่ยาวจนเกินไป ให้เขียนชื่อเรื่องเป็นภาษาไทยก่อนแล้วตามด้วยภาษาอังกฤษในบรรทัดถัดไป
- ชื่อผู้เขียนบทความ (authors and co-authors) ให้ระบุชื่อเต็ม-นามสกุลเต็มทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ สำหรับภาษาอังกฤษใช้อักษรตัวพิมพ์ใหญ่เฉพาะอักษรตัวแรกของชื่อตัวและนามสกุล ถ้ามีผู้วิจัยหลายคนให้ใส่ลำดับเลข พร้อมระบุที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ และชื่อหน่วยงานของผู้วิจัยที่ส่วนล่างของหน้าแรก และให้ใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ที่ตำแหน่งผู้ประสานงานหลัก (corresponding author) พร้อมทั้งระบุอีเมลสำหรับติดต่อ (e-mail: address)
- บทคัดย่อ (abstract) ให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ความยาวไม่เกินอย่างละ 300 คำ บทคัดย่อที่เขียนควรสั้น ตรงประเด็น และให้สาระสำคัญเท่านั้น โดยเรียงลำดับบทคัดย่อภาษาไทยก่อนตามด้วยบทคัดย่อภาษาอังกฤษ
- คำสำคัญ (keywords) ให้ใช้คำที่ปรากฏอยู่ในเนื้อเรื่องซึ่งเป็นตัวแทนบอกวิธีการวิจัย ประเด็นที่วิจัย ผลการวิจัย การใช้ประโยชน์หรือสถานที่ที่ทำวิจัย คำสำคัญนี้ให้เขียนทั้งในภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ในตอนท้ายบทคัดย่อของแต่ละภาษาอย่างละไม่เกิน 5 คำ

3.1.2 เนื้อหาในบทความวิจัย ให้มีองค์ประกอบดังนี้

- บทนำ (introduction) อธิบายถึงที่มา ความสำคัญของปัญหา และเหตุผลที่นำไปสู่การศึกษาวิจัย ให้ข้อมูลทางวิชาการที่มีการตรวจเอกสาร (literature review) โดยระบุถึงแหล่งที่มาของข้อมูล (อ้างอิง) และจุดมุ่งหมายที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งวัตถุประสงค์ของการวิจัย
- วิธีดำเนินการวิจัย (research methods) อธิบายกระบวนการดำเนินการวิจัย โดยบอกรายละเอียดวัสดุ วิธีการศึกษา สิ่งที่น่าสนใจ จำนวน ลักษณะเฉพาะของตัวอย่างที่ศึกษา ตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษา อธิบายแบบแผนการวิจัย การสุ่มตัวอย่าง วิธีการเก็บข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล และสถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐาน
- ผลการวิจัย (results) รายงานผลการวิจัยให้ได้ใจความชัดเจนและตรงประเด็นโดยยึดแนวทางตามวัตถุประสงค์เป็นหลัก ควรอธิบายผลการวิจัยด้วยคำบรรยายเป็นหลัก แต่ถ้ามีตัวเลขหรือตัวแปรมากควรนำเสนอเป็นภาพและตาราง แทรกในเนื้อหา พร้อมอธิบายผลการวิจัยให้ได้สาระครบถ้วน
- การอภิปรายผลการวิจัย (discussion) เป็นการชี้แจงผลการวิจัยว่าตรงกับวัตถุประสงค์/สมมติฐานของการวิจัย สอดคล้องหรือขัดแย้งกับผลการวิจัยของผู้อื่นที่มีอยู่ก่อนหรือไม่ อย่างไร เหตุผลใดจึงเป็นเช่นนั้น และให้จบด้วยข้อเสนอแนะที่จะนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ หรือทิ้งประเด็นคำถามการวิจัย ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไป
- สรุปผลการวิจัย (conclusion) สรุปผลการวิจัยให้ได้ใจความชัดเจนและตรงประเด็น
- ข้อเสนอแนะ (suggestion) (ถ้ามี)
- กิตติกรรมประกาศ (acknowledgements) ให้ระบุว่างานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนหรือความช่วยเหลือจากองค์กรใด และบุคคลใดบ้าง
- เอกสารอ้างอิง (references) ให้ระบุเฉพาะเอกสารที่ผู้เขียนบทความได้นำมาอ้างอิงในบทความวิจัยอย่างครบถ้วน โดยระบุรายละเอียดและใช้รูปแบบการเขียนที่ถูกต้องครบถ้วน (ตามข้อ 4) จัดเรียงลำดับตามตัวอักษร โดยเรียงเอกสารภาษาไทยก่อนและตามด้วยเอกสารภาษาอังกฤษ

3.2 บทความทางวิชาการ (academic article) เป็นบทความที่ผู้เขียนได้เรียบเรียงโดยศึกษาค้นคว้าจากเอกสาร งานแปล และผลงานจากประสบการณ์ของผู้เขียนหรือได้รับการถ่ายทอดจากผู้อื่น มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ องค์ความรู้ การเสนอความคิดเห็นที่มีคุณค่า และเป็นประโยชน์ทางวิชาการของสาขาต่าง ๆ

3.2.1 ส่วนประกอบตอนต้น

➤ ชื่อเรื่อง (title) ควรสั้นกะทัดรัด ไม่ยาวจนเกินไป ให้เขียนชื่อเรื่องเป็นภาษาไทยก่อนแล้วตามด้วยภาษาอังกฤษในบรรทัดถัดไป

➤ ชื่อผู้เขียน (authors and co-authors) ให้ระบุชื่อเต็ม-นามสกุลเต็มทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ สำหรับภาษาอังกฤษใช้อักษรตัวพิมพ์ใหญ่เฉพาะอักษรตัวแรกของชื่อตัวและนามสกุล ถ้ามีผู้วิจัยหลายคนให้ใส่ลำดับเลข พร้อมระบุที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ และชื่อหน่วยงานของผู้วิจัยที่ส่วนล่างของหน้าแรก และให้ใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ที่ตำแหน่งผู้ประสานงานหลัก(corresponding author) พร้อมทั้งระบุอีเมลสำหรับติดต่อ (e-mail: address)

➤ สารสังเขป (summary) เป็นการย่อเนื้อความของบทความทั้งเรื่องให้สั้นได้เนื้อหาสาระครบถ้วน

➤ คำสำคัญ (keywords) ให้ใช้คำที่ปรากฏอยู่ในเนื้อเรื่องซึ่งเป็นตัวแทนบอกวิธีการ สิ่งที่ศึกษา ผลการศึกษา สาขา การใช้ประโยชน์และสถานที่ คำสำคัญให้เขียนทั้งคำสำคัญภาษาไทย และภาษาอังกฤษแต่ละชุดไม่เกิน 5 คำ

3.2.2 เนื้อหา (main text) ในบทความทางวิชาการมีองค์ประกอบดังนี้

➤ บทนำ (introduction) กล่าวถึงความน่าสนใจของเรื่องที่น่าสนใจก่อนเข้าสู่เนื้อหา

➤ เนื้อความ (content) ควรนำเสนอพัฒนาการของเรื่องได้อย่างน่าสนใจ และเนื้อเรื่องมีเนื้อหาใหม่เหมาะสมกับสภาพปัจจุบัน

➤ สรุป (conclusion) เป็นการย่อเฉพาะข้อมูลจากเนื้อความให้สั้นได้เนื้อหาสาระของเนื้อความครบถ้วน

➤ เอกสารอ้างอิง (references) ให้ระบุเฉพาะเอกสารที่ผู้เขียนบทความได้นำมาอ้างอิงในบทความวิชาการอย่างครบถ้วนรูปแบบของการเขียนเอกสารอ้างอิงให้จัดทำตามที่ระบุไว้ในข้อ 4 (เอกสารอ้างอิง)

3.3 ตารางและภาพประกอบ ให้จัดแทรกไว้ในเนื้อเรื่องโดยคัดเลือกเฉพาะที่จำเป็นเท่านั้น โดยเนื้อหาและคำอธิบายในตารางและภาพสามารถใช้ภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งเท่านั้น

- ตาราง เมื่อวางรูปตารางข้อมูลเรียบร้อยแล้วต้อง “กำกับ” ไว้ที่ด้านบนของตารางด้วยข้อความที่เป็น “ตารางที่... (เว้น 1 บรรทัด และตามด้วยชื่อตารางหรือคำอธิบายสั้น ๆ)” ส่วน “ที่มา” ของตาราง (ถ้ามี) ให้อยู่ด้านล่างของตาราง “ที่มา: ... (เว้น 1 บรรทัดและตามด้วยอ้างอิง” (ชื่อ, ปี) ดังตัวอย่าง

ตารางที่ 1 จำนวนฟัน เส้นผ่านศูนย์กลาง และความเร็วยรอบของจานโซ่

จานโซ่	จำนวนฟัน	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (mm)	ความเร็วยรอบ (pm)
ตัวที่ 1 ติดกับมอเตอร์	20	59	600
ตัวที่ 2 รับกำลังจากมอเตอร์	14	70	700
ตัวที่ 3 ต่อจากมอเตอร์	30	85	800

ที่มา: จารุณี (2559)

- ภาพประกอบ จัดกึ่งกลางหน้ากระดาษ เป็นภาพที่ใช้ประกอบเนื้อหา เมื่อจัดภาพเสร็จแล้วต้อง “กำกับ” ไว้ที่ได้ภาพด้วยข้อความที่เป็น “ภาพที่.. (เว้น 1 บรรทัด และตามด้วยชื่อภาพหรือคำอธิบายภาพประกอบสั้น ๆ)” และบรรทัดที่ถัดลงมาคือ “ที่มา..” ใช้รูปแบบเดียวกับตารางทุกประการ ดังตัวอย่าง

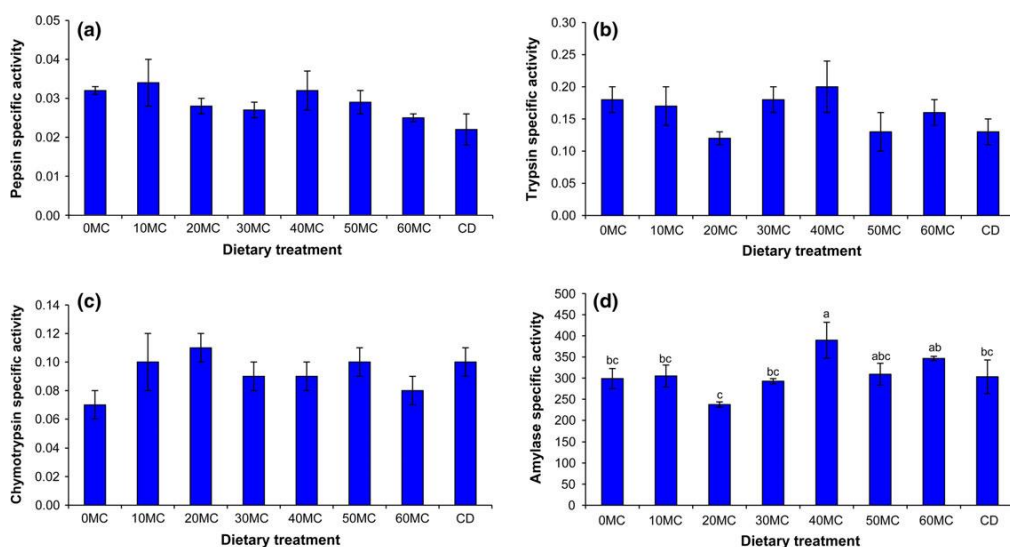


Figure 1 The specific activities (U/mg protein) of pepsin (a), trypsin (b), chymotrypsin (c) and amylase (d) in giant freshwater prawns subjected to various dietary replacements of protein from fish meal with mackerel condensate (MC). The data are expressed as mean $\pm$ SEM ($n = 3$). Different superscripts indicate significant differences between groups ($p < 0.05$). CD, commercial diet.

Source: Wattanakul *et al.* (2017)

ตารางสรุปรูปแบบการพิมพ์ส่วนประกอบของบทความ

ส่วนประกอบ ของบทความ	ลักษณะ ของตัวอักษร	ขนาด ของตัวอักษร	รูปแบบ การจัดหน้าบทความ
ชื่อเรื่อง			
1) ภาษาไทย	หนา	18 pt.	กึ่งกลาง
2) ภาษาอังกฤษ	หนา	18 pt.	กึ่งกลาง
ชื่อผู้เขียนบทความ	หนา	15 pt.	ชิดขวา
บทคัดย่อ			
1) ภาษาไทย	ปกติ	15 pt.	
2) ภาษาอังกฤษ	ปกติ	15 pt.	
คำสำคัญ	หัวข้อตัวหนา และคำสำคัญปกติ	15 pt.	ชิดซ้าย
เชิงอรรถ	ปกติ	13 pt.	ชิดซ้าย
หัวข้อหลัก	หนา	15 pt.	ชิดซ้าย (ไม่มีตัวเลขกำกับ)
หัวข้อย่อย	หนา	15 pt.	1. ชิดซ้าย (1.5 ซม.)
	ปกติ	15 pt.	1.1 ชิดซ้าย (2 ซม.)
	ปกติ	15 pt.	1.1.1 ชิดซ้าย (2.75 ซม.)
เนื้อหา	ปกติ	15 pt.	
ตาราง	ปกติ	15 pt.*	
หมายเหตุ	ปกติ	(*ขึ้นอยู่กับ	
ที่มา	ปกติ	ข้อมูล)	

4. การอ้างอิง (References)

วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราชใช้รูปแบบการอ้างอิงที่ดัดแปลงมาจากสมาคมจิตวิทยาแห่งสหรัฐอเมริกา (American Psychological Association: APA) ดังนี้

4.1 การอิงในเนื้อหา (in-text citation) ใช้การอ้างอิงแบบ “นาม-ปี” ทั้งนี้ให้ใส่ชื่อผู้แต่ง และปีที่พิมพ์ เช่นเดียวกับการอ้างอิงท้ายบทความ

4.1.1 การเขียนอ้างอิงก่อนเนื้อหา

ต้นฉบับเป็นภาษาไทย: จิรวัฒน์ (2554) ข้อความ.....

ต้นฉบับเป็นภาษาอังกฤษ: Tomson (2014) ข้อความ.....

4.1.2 การเขียนเนื้อหาการอ้างอิง

ต้นฉบับเป็นภาษาไทย: ข้อความ..... (จิรวัดน์, 2554)

ต้นฉบับเป็นภาษาอังกฤษ: ข้อความ..... (Tomson, 2014)

กรณีมีผู้แต่งคนเดียว

1) ต้นฉบับเป็นภาษาไทย: ชื่อ/(ปี พ.ศ.)

2) ต้นฉบับเป็นภาษาอังกฤษ: ชื่อสกุล/(ปี ค.ศ.)

กรณีมีผู้แต่ง 2 คน

1) ต้นฉบับเป็นภาษาไทย: ชื่อคนที่ 1/และชื่อคนที่ 2/(ปี พ.ศ.)

2) ต้นฉบับเป็นภาษาอังกฤษ: ชื่อสกุลคนที่ 1/and/ชื่อสกุลคนที่ 2/(ปี ค.ศ.)

กรณีมีผู้แต่งมีตั้งแต่ 3 คนขึ้นไป

1) ต้นฉบับเป็นภาษาไทย: ชื่อคนที่ 1/และคณะ/(ปี พ.ศ.)

2) ต้นฉบับเป็นภาษาอังกฤษ: ชื่อสกุลคนที่ 1/*et al.*/(ปี ค.ศ.)

4.2 การอ้างอิงท้ายบทความ (reference section)

หนังสือที่ตีพิมพ์เป็นรูปเล่ม (print version)
ชื่อ/ชื่อสกุล/(ปีที่พิมพ์)/ชื่อหนังสือ/(ครั้งที่พิมพ์)/สถานที่พิมพ์:/สำนักพิมพ์.
ตัวอย่าง
กรณีตีพิมพ์ครั้งแรก
สรเมธี วชิรปราการ. (2551). <i>เปิดชีวิตเทวดานางฟ้าไขปริศนาแดนสวรรค์</i> . นนทบุรี: สมาร์ทบุ๊ก.
Almond, G.A. and Powell, B.G. (1976). <i>Comparative political today</i> . Boston: Little Brown and Company.
กรณีตีพิมพ์ครั้งที่ 2 เป็นต้นไป
เจือจันทร์ จงสถิต และรุ่งเรือง สุชาติพิทย์. (2550). <i>การสังเคราะห์งานวิจัยคุณลักษณะและกระบวนการปลูกฝังจริยธรรมของประเทศต่าง ๆ</i> . (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: ชุมมนุสสรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
Carpenter, J.W., Mashima, T.Y. and Rupiper, D.J. (2001). <i>Exotic animal formulary</i> . (2 nd ed). Philadelphia: W.B. Saunders Company.

หนังสือที่ออนไลน์ (electronic book)
ชื่อ/ชื่อสกุล/(ปีที่ออนไลน์)/ชื่อหนังสือ/สืบค้นเมื่อ/วัน/เดือน/ปี,/จาก:/http:..... .
The World Society for the Protection of Animals. (2013). <i>The Cayman Turtle Farm: A continued case for change</i> . Retrieved 10 July 2017, from: https://d31j74p4lpxrfpcloudfront.net/sites/default/files/us_files/turtle_a_continued_case_for_change_report.pdf .
วารสาร (journal)
ชื่อ/ชื่อสกุล/(ปีที่พิมพ์)/ชื่อบทความ/ชื่อวารสาร/ปีที่หรือเล่มที่ (ฉบับที่)/หน้าแรก-หน้าสุดท้าย.
ตัวอย่าง กรณีที่วารสารมีเลขหน้า สมรักษ์ รอดเจริญ และกรุณ ทองประจักษ์. (2559). สภาวะการเลี้ยงและองค์ประกอบทางเคมีของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (<i>Nostoc commune</i> TISTR 8870) ที่ผ่านการดัดแปรด้วยคลื่นไมโครเวฟ. <i>วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย</i>, 8(2), 219-229. Palazzo, A.J., Cory, T.J. and Hardy, S.E. (2003). Root growth and metal uptake in four grasses grown on Zn-contaminated soil. <i>Journal of Environmental Quality</i>, 32(3), 834-840. กรณีที่วารสารไม่มีเลขหน้า Whan-air, W., Thongprajukaew, K., Salaeharae, T. and Yoonram, K. (2018). Identification of wild and farmed broadhead catfish (<i>Clarias macrocephalus</i> Günther, 1864) based on morphometry, digestive indexes and flesh quality. <i>Journal of Oceanology and Limnology</i>, doi: https://doi.org/10.1007/s00343-018-7205-7.
นิตยสารหรือหนังสือพิมพ์
ชื่อ/ชื่อสกุล/(วัน/เดือน/ปี)/ชื่อบทความ/ชื่อนิตยสารหรือหนังสือพิมพ์/ปีที่/หน้า.
ตัวอย่าง มาลินี ป่องกัน. (3 กรกฎาคม 2560). ลงทะเบียนคนจน. <i>มติชน</i>, 50, หน้า 12.

บทหนึ่งในหนังสือ (book chapter)
ชื่อ/ชื่อสกุลผู้เขียนบท./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทหรือตอน./ใน/ชื่อ/ชื่อสกุลบรรณาธิการ./ ชื่อหนังสือ./ หน้าแรก-หน้าสุดท้ายของบท./สถานที่พิมพ์./สำนักพิมพ์.
ตัวอย่าง มาลีนนท์ วุฒิจักร. (2560). สหราชอาณาจักร. ใน บัณฑิต คิตติ. <i>เกษตรหน้าใหม่</i>, หน้า 100-110. กรุงเทพฯ: อุดมศิลป์. Zambonino-Infante, J., Gisbert, E., Sarasquete, C., Navarro, I., Gutiérrez, J. and Cahu, C.I. (2009). Ontogeny and physiology of the digestive system of the marine fish larvae. In Cyrino, J.E.O., Bureau, D. and Kapoor, B.G. (Eds.). <i>Feeding and digestive function of fish</i>, pp. 277–344. Enfield: Science Publishers, Inc.
วิทยานิพนธ์
ชื่อ/ชื่อสกุล./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อวิทยานิพนธ์./ระดับวิทยานิพนธ์./ชื่อมหาวิทยาลัย./เมืองที่ตั้งมหาวิทยาลัย.
ตัวอย่าง จงลักษณ์ จิมนับใจ. (2550). <i>สมรรถนะแห่งตนต่อการเฝ้าระวังโรคความดันโลหิตสูงของอาสาสมัครสาธารณสุขอำเภอหนามื่น จังหวัดน่าน</i>. วิทยานิพนธ์พยาบาลศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่. Mirera, D.O. (2013). Capture-based mud crab (<i>Scylla serrata</i>) aquaculture and artisanal fishery in East Africa-Practical and ecological perspectives. Ph.D. thesis in Environmental Science. Linnaeus University, Kalmar.
เว็บไซต์ (website)
ชื่อผู้จัดทำ./ (ปีที่ออนไลน์)./ชื่อเรื่อง./สืบค้นเมื่อ/วัน/เดือน/ปี./จาก:/http:..... .
ตัวอย่าง อรรถศิษฐ์ วงศ์ณโรจน์. (2542). <i>ความอุดมสมบูรณ์ของดิน</i>. สืบค้นเมื่อ 2 ตุลาคม 2542, จาก: http://158.108.200.11/scil/009hom~1/009421/chap1.html. Adkins, J. (2016). <i>Marine scientist devotes career to reversing trend of by catch</i>. Retrieved 1 July 2018, from: https://phys.org/news/2016-03-marine-scientist-devotes-career-reversing.html.

รายงานการประชุม
ชื่อ/ชื่อสกุล./ (ปีที่พิมพ์)/ชื่อเรื่อง./ชื่อการประชุมหรือการสัมมนา./สถานที่พิมพ์.
ตัวอย่าง สุรยุทธ แจ้งเกิด. (2559). ความมั่นคงทางอาหารของชุมชนบ้านบางปรก. การประชุมวิชาการ ความมั่นคงทางอาหารแห่งชาติ. กรุงเทพฯ.
รายงานการวิจัย
ชื่อ/ชื่อสกุล./ (ปีที่พิมพ์)/ชื่อเรื่อง./รายงานวิจัย./ชื่อมหาวิทยาลัย.
ตัวอย่าง จันทิมา ชั่งสิริพร พรศิริ แก้วประดิษฐ์ และพฤกระยา พงศ์ยี่หล้า. (2559). การผลิตถ่านกัมมันต์ จากถ่านไม้ยางพาราที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลสำหรับงานเครื่องกรองน้ำ. รายงานวิจัย. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
บทหนึ่งในหนังสือการประชุม (proceeding) และเอกสารการสัมมนา
ชื่อ/ชื่อสกุล./ (ปีที่พิมพ์)/ชื่อบทความหรือบท./ใน/ชื่อการประชุมหรือการสัมมนา/(หน้าแรก-หน้า สุดท้าย)/เมืองที่พิมพ์:/หน่วยงานที่จัดทำ.
ตัวอย่าง กรวรรณ มากสุข. (2555). วาทกรรมความงามของเด็กมัธยมศึกษาแห่งหนึ่งในจังหวัด นครศรีธรรมราช. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏวิจัย ครั้งที่ 3 (หน้า 22-35). นครศรีธรรมราช: มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช.
บทคัดย่อในการประชุมวิชาการ (abstract in conference)
ชื่อ/ชื่อสกุล./ (ปีที่พิมพ์)/ชื่อบทความ./ในบทคัดย่อ/ชื่อการประชุม/(หน้า)/เมืองที่พิมพ์:/หน่วยงานที่ จัดทำ.
Kovitvadhi, A., Chandang, P., Luapan, J., Sriyaphai, P., Buahom, R., Cham-iam, T., Leelehapongsathon, K., Tirawattanawanich, C. and Thongprajukaew, K. (2018). Screening three cricket species (<i>Gryllus bimaculatus</i> , <i>Acheta domestica</i> and <i>Modicogryllus confirmata</i>) for broiler diets by <i>in vitro</i> digestibility techniques. In <i>Abstract of the 6th Mediterranean Poultry Summit</i> (pp. 62). Torino: The Mediterranean Poultry Network of the World's Poultry Science Association.



วารสาร วิชชา

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ISSN (Print) : 0125-2380

ISSN (Online) : 2672-958X



Wichcha Journal

Nakhon Si Thammarat Rajabhat University