



วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal

ปีที่ 15 ฉบับที่ 3 กันยายน - ธันวาคม 2566

ISSN 1906-6627 (Print)

ISSN 2673-0197 (Online)



วารสารวิจัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

คณะกรรมการที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.อุทัยรัตน์ ณ นคร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง จักรใจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.เผด็จศักดิ์ จารยะพันธุ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วารสารวิจัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ ชัยยศ

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ทองหนู่น้อย

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ มะเห

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สงรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพร ธารางกูร

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุคนธ์ ณะระนอง

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

วารสารวิจัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.อลงกต แทนอมทอง

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง จุฑาเกตุ

คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Professor Ir. Dr. Anuar Mat Safar

University Malaysia Perlis, Malaysia

Professor Mitsuhiko Sano

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

Professor Qinghua Zhang

Chongqing University of Posts and Telecommunications, China

Professor Zhangyong Li

Chongqing University of Posts and Telecommunications, China

Professor Clarissa Yvonne Domingo

Central Luzon State University, Philippines

Professor Virginia Venturina

Central Luzon State University, Philippines

Professor Noraine Medina

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ravelina Velasco

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ronaldo Alberto

Central Luzon State University, Philippines

Professor Edilyn Lansangan

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ariel Mactal

Central Luzon State University, Philippines

Associate Professor Dr. David Crookall

University of Nice Sophia Antipolis, France

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

Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Indonesia

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิ่น จันจุฬา

คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
รองศาสตราจารย์ ญัฐวรัตน์ ปภาสีสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาตรี หอมเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ลักขมี วิทยา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริโรตม์ เกตุแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ ดร.เกษรา คูหา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ ประพฤติ พรหมสมบูรณ์

คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิยม กำลังดี

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ แก้วบุญมา

คณะเทคโนโลยีการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหพงศ์ สมวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภิรม ถิ่นทรงกูร

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.กิตติมา ตันติหาชัย

คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

นางสาวกุลิกา ธนะเสวตร

วิทยาลัยการโรงแรมและการท่องเที่ยว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

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

สารบัญ

การประเมินค่าโพลาริเซชันก่อนอ้อยแบบไม่ทำลายด้วย ภาพไฮเปอร์สเปกตรัม อินฟราเรดย่านใกล้	570 - 583
จิรวาส์ เจียรตระกูล แก้วกานต์ พวงสมบัติ อาทิตย์ พวงสมบัติ และ อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล	
การวิเคราะห์ปริมาณของแอลกอฮอล์ในหน่วยร้อยละโดยปริมาตรในเจลแอลกอฮอล์ ชนิดหนืด	584 - 600
วัชรระ แก้วสุวรรณ พงพล หอมอุทัย และ ศักดิ์ชัยบดี ปิ่นศรีทอง	
ผลของเอนไซม์เพกตินเนสและออกซูมิในการสกัดต่อปริมาณแอนโทไซยานินจาก ลูกหว้า (<i>Syzygium cumini</i> Skeels)	601 - 610
รวินิภา ศรีมูล สมยศ สันติมาลัย ศิริจันทร์ ดาใจ และ พรสิณี คาราวงษ์	
Classification of Pattern Partial Discharge (PD) in High Voltage Equipment by Multilayer Perceptron Method	611 - 625
Anantawat Kunakorn, Savinee Ludpa and Peerawut Yutthagowith	
การกระจายของโลหะหนัก (Cd, Pb, Cu และ Zn) ในน้ำ และตะกอนบริเวณปากแม่น้ำ ท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร	626 - 643
รัชชนก จินดาศรี เชษฐพงษ์ เมฆสัมพันธ์ สราวุธ ศรีทองอุทัย อรอังก์ เวชสิทธิ์ ณิชรา ถาวรโสตร์ ชาคริต เรืองสอน และ ภัททิรา เกษมศิริ	
ผลกระทบของขนาดอนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดต่อการขึ้นรูป พลาสติกแบบหมุน	644 - 658
ณรงค์ชัย โอเจริญ นที ศรีสวัสดิ์ และ เอกดิษฐ์ จันทร์ศรี	
การใช้ส่วนกลั่นกรดไขมันที่ผ่านการเอทานอลบางส่วนโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นส่วนผสมดีเซล/ดีโซฮอล์	659 - 676
ศุภวุฒิ เปี่ยมเจริญสุข สุภกิจ เอียดตรง ปริญญา หม่อมพิบูลย์ ฐานันดรศักดิ์ เทพญา และ ชีระยุทธ หลีวิจิตร	
การยืดอายุการเก็บรักษามะนาวและกล้วยน้ำว้าโดยเคลือบผิวด้วยอิมัลชันไคคาร์นูบา	677 - 686
รุ่งทิพย์ จูฑะมงคล ฟาติมาะ เวะลง และ ศรีอุบล ทองประดิษฐ์	

แบบทบทวนแนวคิดจัดการแบบสิ้น: กรณีศึกษางานสอบสวนของสถานีตำรวจภูธรเบตง เกียรติพันธ์ศักดิ์ บิลอับดุลลาห์ และ น้ำทิพย์ ตระกูลเมณี	687 - 701
ผลของแป้งข้าวกล้องไธนาครและผงจิ้งหรีดต่อคุณภาพของเอ็กซ์ทราคตขมิ้นชัน สุภาภิต ชุกกลิ่น	702 - 715
การทดสอบภาวะสารูปดีสำหรับการแจกแจงแคลป 4 พารามิเตอร์ เบญจวรรณ รัตนวงศ์ คณินิจ ประคำมินทร์ และ นิภาดา พากัดดี	716 - 731
การปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน แปลงใหญ่ของเครือข่ายชุมชน กรณีศึกษาอำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี สุภาภรณ์ รัตนเลิศสุพรรณ นิสารัตน์ ตามสมศรี และ อัจฉาณัท รัตนเลิศสุพรรณ	732 - 747
การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินของพื้นที่เลี้ยงกุ้งด้วยเทคนิคภาพถ่ายทางอากาศในพื้นที่อำเภอระโนด จังหวัดสงขลา ณัฐพล แก้วทอง ต่อลาภ การปลื้มจิตร์ ชยณัฐ บัวทองเกื้อ และ กนกกร เทพจันทร์	748 - 760
การศึกษาสถานะที่เหมาะสมการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วระดับชุมชนและต้นแบบเครื่องผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้พลังงานชีวมวล อาริษา โสภการย์ จักรพงษ์ จิตต์จำนงค์ นภารัตน์ เกษตรสมบูรณ์ และ สุทธิณี นิเช็ง	761 - 777
พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการผสมของไหลโดยใช้แกนใบพัดแบบแกนตั้งและแกนใบพัดแบบเอียง วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล	778 - 797
การศึกษาเชิงทดสอบลักษณะของฝาควมแน่นถึงกลิ่นเอทานอลพลังงานรังสีแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมไคฟอนที่มีต่อสมรรถนะการกลั่น หฤษฎ์ คล่องดี และ จารุวัฒน์ เจริญจิต	798 - 814
การออกแบบและพัฒนาเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำสำหรับระบบจัดการฐานข้อมูลคลินิกรักษาตัว คณะวิติ เนื่องวงษา รัชชัย พุ่มพวง ศักดิ์ชัย ก้อนเทียน และ พิชานันท์ วงศ์ศิริธร	815 - 832

การเพิ่มคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเสริมฐานถึงเช่าสีทอง	833 - 848
พรพรรณ รัตนะสัจจะ ดวงหทัย รัตนสังธรรม สามารถ ต่ายขาว สุนทรา เฟื่องฟูง พิษณุ ตั้งสมบัติวิจิตร และ อุทาน บุณศักดิ์ศรี	
การเพิ่มความพร้อมและส่งเสริมศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวา โดยการปรับสภาพด้วยความร้อนและคลื่น	849 - 864
นันท์นัฐ ศรีประเสริฐ และ พรศพงษ์ ศรีประเสริฐ	
สมบัติทางกายภาพและค่าดัชนีโกลซีมิคของแป้งกล้วยดิบและคุณภาพของพาสต้า จากแป้งกล้วยดิบ	865 - 881
นาฎยา อริยสุขโฆมิต และ อโนชา สุขสมบุญ	

การประเมินค่าโพลาไรเซชันท่อนอ้อยแบบไม่ทำลายด้วย ภาพไฮเปอร์สเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้

Non-destructive Evaluation of Polarization in Sugarcane Stalk Using Near Infrared Hyper Spectral Imaging

จิรวาสต์ เจียตระกุล แก้วกานต์ พวงสมบัติ อาทิตย์ พวงสมบัติ และ อนุปันท์ เทอดวงศ์วรกุล *

Jirawat Chiatrakul, Kaewkarn Phuangsobut, Arthit Phuangsobut and Anupun Terdwongworakul *

Received: 3 February 2022, Revised: 24 August 2022, Accepted: 13 September 2022

บทคัดย่อ

เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เป็นเทคนิคที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ประเมินค่าโพลาไรเซชันหรือโพลาไรซ์แบบไม่ทำลายได้ ตลอดระยะเวลาในการประเมินเมื่อเทียบกับวิธีการปกติในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตาม เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เป็นการวัดเฉพาะจุดบนท่อนอ้อยได้เท่านั้น ไม่ครอบคลุมพื้นผิวของตัวอย่าง งานวิจัยนี้จึงเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคภาพไฮเปอร์สเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ ที่สามารถสแกนได้ทั่วพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ และสามารถสร้างภาพในการตรวจสอบค่าโพลาไรเซชันบนพื้นที่ระนาบของผิวท่อนอ้อย ในการศึกษาใช้ท่อนอ้อยพันธุ์ขอนแก่น 3 จำนวน 300 ตัวอย่าง ที่มีอายุการเก็บเกี่ยวระหว่าง 8-11 เดือน จากแปลงในจังหวัดสุพรรณบุรี มีค่าโพลาไรซ์ในช่วง 4.93-23.38 เปอร์เซ็นต์ นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 900-1700 นาโนเมตร โดยตัวอย่างท่อนอ้อยแต่ละท่อนเคลื่อนที่ผ่านไดคัลลิ่งบันทึกลำค่าการดูดกลืนแสงของระบบไฮเปอร์สเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ โดยนำเทคนิค partial least squares regression มาใช้ในการวิเคราะห์สร้างสมการทำนายค่าโพลาไรเซชัน และศึกษาผลกระทบของไขมันผิวท่อนอ้อย ผลการศึกษาพบว่า สมการที่สร้างจากตัวอย่างท่อนอ้อยที่ผ่านการทำความสะอาดพื้นผิวให้สมบูรณ์ในการทำนายดีที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดเท่ากับ 0.83 ข้อผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายเท่ากับ 1.52 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำสมการนี้ไปสร้างภาพการกระจายของค่าโพลาไรซ์บนพื้นที่ระนาบของผิวท่อนอ้อย โดยการทำนายค่าโพลาไรซ์ในแต่ละพิกเซลของภาพไฮเปอร์สเปกตรัม ภาพแสดงการกระจายตัวของโพลาไรซ์แสดงปริมาณโพลาไรซ์ที่สัมพันธ์กันบนพื้นที่ระนาบของผิวท่อนอ้อย และทำให้พบว่า ท่อนอ้อยบริเวณด้านบนลำต้นมีค่าโพลาไรซ์

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

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

น้อยกว่าท่อนอ้อยที่บริเวณด้านล่างลำต้น ผลจากการศึกษานี้แสดงถึงศักยภาพของเทคนิคภาพไฮเปอร์สเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ในการนำไปพัฒนาเป็นเครื่องตรวจวัดค่าโพลาไรเซชันเร็วและไม่ทำลายได้ในอนาคต

คำสำคัญ: อ้อย, โพลาไรเซชัน, อินฟราเรดย่านใกล้, การวัดแบบไม่ทำลาย, ภาพไฮเปอร์สเปกตรัม

ABSTRACT

Near-infrared spectroscopy can be applied to assess polarization (Pol) non-destructively. It can reduce the analysis time compared to conventional methods in the laboratory. However, assessment by near-infrared spectroscopy is a spot measurement on the sugarcane, not covering the surface of the sample. This research applied non-destructive quality analysis using near-infrared hyper spectral imaging technique that can cover the whole surface in scanning to create an image to evaluate the Pol value on the plane area of sugarcane surface. This is an advantage compared to near-infrared spectroscopy techniques. In the study, 300 sugarcane stalks of cultivar Khon Kaen 3 used were harvested at age between 8-11 months from Suphan Buri province. The Pol values of the samples were in the range of 4.93-23.38%. The absorbance of each stalk was measured for in the range of 900-1700 nm. Each cane sample was scanned and measured by placing it on a translational moving platform which conveyed the samples past under the absorbance recording camera of the near-infrared hyperspectral system. The partial least squares regression technique was used to create a Pol prediction equation by studying the effects of wax on the surface of sugarcane. The results showed that the optimal models developed from surface-cleaned sugarcane samples provided the best predictive performance. The determination coefficient was 0.83 and the standard error of prediction was 1.52%. When using the best equation to predict the Pol value of each pixel of the hyperspectral image to create color-mapped image, the color-mapped image visually showed the polarization distribution map with corresponding color over the plane area of the stalk surface. The pol color mapped image revealed that sugarcane at the bottom of the stem had higher Pol value than cane at the top of the stem. The results of this study demonstrated the potential of near-infrared hyperspectral imaging techniques for the future development of fast and non-destructive polarization probes.

Key words: sugar cane, polarization, near infrared, non-destructive measurement, hyperspectral imaging

บทนำ

ค่าโพลาไรเซชัน (Polarization, Pol) หรือค่าร้อยละของน้ำตาลซูโครส เป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพอ้อย เพื่อใช้

คำนวณ ค่า ซี.ซี.เอส. (Commercial Cane Sugar, C.C.S.) ซึ่งหมายถึง ปริมาณร้อยละของน้ำตาลซูโครสบริสุทธิ์ ที่สามารถผลิตเป็นการค้าเชิงพาณิชย์ได้ ซึ่งเป็นสูตรคำนวณตามมาตรฐานสากล คำนวณ

จากน้ำอ้อยที่ได้จากการหีบอ้อย กระบวนการวิเคราะห์หาค่าโพลนั้นเป็นวิธีการที่ต้องทำในห้องปฏิบัติการ โดยเริ่มจากการหีบสกัดน้ำอ้อย กรองและนำน้ำอ้อยมาวัดค่าด้วยเครื่องโพลาริมิเตอร์ที่ค่อนข้างมีความยุ่งยากในเรื่องของการเตรียมตัวอย่างน้ำอ้อย ขั้นตอนการใช้สารเคมี ต้องอาศัยความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน และยังเป็นกระบวนการที่ต้องมีการทำลายตัวอย่าง ในปัจจุบันมีการนำเทคนิคในการตรวจวัดคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรโดยไม่ต้องทำลายตัวอย่าง คือ เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (near-infrared spectroscopy; NIRS) เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณต่าง ๆ ที่เป็นค่าสำหรับบ่งบอกถึงคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตร เป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก และรวดเร็วกว่าวิธีการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการแบบเดิม

เทคนิค NIRS เป็นเทคนิคที่อาศัยการฉายพลังงานแสงจำเพาะไปที่ตัวอย่าง ทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลและเกิดการดูดกลืนพลังงานที่แตกต่างกันไปตามความยาวคลื่นของพลังงาน โมเลกุลของสารที่มีพันธะ C-H, O-H หรือ N-H ที่เป็นองค์ประกอบหลักในผลผลิตเกษตรและอาหารจะมีอันตรกิริยากับพลังงานแสงในย่าน NIR เทคนิค NIRS เป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการใช้ตรวจสอบคุณภาพภายในผลผลิตเกษตร มีความรวดเร็วกว่าวิธีการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีการประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS กับการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบทางเคมีในอ้อยในรูปแบบแตกต่างกัน มีการใช้ NIRS ทำนายค่าซี.ซี.เอส. ในน้ำอ้อยด้วยรูปแบบการวัดแบบส่องผ่าน (Kirasak *et al.*, 2015) และ Taira *et al.* (2010) ได้พัฒนาการวิเคราะห์ค่าโพลจากตัวอย่างชานอ้อยบดละเอียดแทนการวิเคราะห์จากตัวอย่างน้ำอ้อยพบว่า สามารถลดระยะเวลาในการเตรียมตัวอย่าง

และวิเคราะห์ผลลงได้จาก 22 นาที เหลือเพียง 3 นาที และมีค่า SEP เท่ากับ 0.23 เปอร์เซ็นต์ Kamwilaisak *et al.* (2021) ใช้ NIRS เพื่อประเมินคุณภาพอ้อยบดในอ้อยสองพันธุ์ คือพันธุ์ลำปาง 92-11 และขอนแก่น 3 โดยทำการวัดปริมาณ Brix, โพล, ไฟเบอร์ และ ซี.ซี.เอส. มีค่า R^2 เท่ากับ 0.97, 0.90, 0.86 และ 0.82 ตามลำดับ มีค่า RMSEP ของ Brix, โพล, ไฟเบอร์ และ ซี.ซี.เอส. เท่ากับ 0.246 °Brix, 0.512%, 0.353% และ 0.542% ตามลำดับ มีงานวิจัยที่วิเคราะห์คุณภาพอ้อยโดยการไม่ทำลายตัวอย่าง เช่น Taira *et al.* (2021) ได้ศึกษาการใช้เครื่อง NIR แบบพกพาเพื่อตรวจสอบค่าโพลในช่วงความยาวคลื่น 600-1,100 นาโนเมตร พบว่า มีค่า SEP เท่ากับ 1.1% ถึงแม้การวัดด้วยเทคนิค NIRS จะเป็นวิธีการที่รวดเร็ว และไม่ทำลายตัวอย่าง แต่ก็ยังมีข้อจำกัดคือ สามารถวัดการดูดกลืนแสงได้ครั้งละหนึ่งตำแหน่งบนตัวอย่าง ซึ่งไม่ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของตัวอย่างได้ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคภาพไฮเปอร์สเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Hyper Spectral Imaging, NIR-HSI) ซึ่งเป็นการรวมกันของเทคนิค NIRS และเทคนิคของการถ่ายภาพ เพื่อให้ได้ทั้งข้อมูลทางสเปกโตรสโกปีและข้อมูลเชิงพื้นที่ของตัวอย่างที่สแกน NIR-HSI จะทำงานโดยได้ภาพและข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัมในทุกตำแหน่งของตัวอย่างที่ถูกสแกน (Manley, 2014) เทคนิค NIR-HSI มีข้อได้เปรียบเหนือเทคนิค NIRS โดยให้ข้อมูลสเปกตรัมของทุกจุดบนภาพของตัวอย่างจากการสแกนครั้งเดียว เนื่องจากภาพ NIR-HSI มีทั้งข้อมูลสเปกตรัมและเชิงพื้นที่ จึงสามารถสร้างเป็นภาพการกระจายของค่าทางเคมีบนพื้นที่ผิวระนาบของตัวอย่างได้ด้วยการทำแผนที่ภาพ

มีการศึกษาที่ประยุกต์ใช้ NIR-HSI กับอ้อยเพื่อพัฒนาระบบสำหรับการระบุความแตกต่าง

ระหว่างส่วนต่าง ๆ ของต้นอ้อย (Aparatana *et al.*, 2020) โดยสามารถจำแนกได้ 98.2% โดยใช้ Support Vector Machine (SVM) ในการวิเคราะห์ งานวิจัยของ Maraphum *et al.* (2020) ศึกษาการใช้เทคนิค NIR-HSI เพื่อสร้างแผนที่การกระจายตัวของค่าปริมาตรและค่าความชื้นในต้นอ้อย มีค่า R^2 เท่ากับ 0.68% และ 0.70% ตามลำดับ การสแกนเป็นแบบหน้าตัดจากการผ่าครึ่งตัวอย่างต้นอ้อยตามแนวยาวซึ่งเป็นการวัดแบบทำลาย พบว่าความหนาแน่นในการกระจายตัวมีค่าที่ต่ำในบริเวณของส่วนที่เป็นข้อตาอ้อย

อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานการใช้เทคนิค NIR-HSI ในการสร้างภาพการกระจายตัวของค่าโพลาไรเซชันในตัวอย่างต้นอ้อยแบบไม่ทำลาย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิค NIR-HSI ในการทำนายค่าปริมาณโพลาไรเซชัน และสร้างภาพการกระจายตัวบนพื้นที่ผิวระนาบต้นอ้อย เพื่อสำหรับใช้ตรวจสอบแบบรวดเร็ว และศึกษาผลกระทบของไบนารีฟิวทอนอ้อยต่อการดูดกลืนแสง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างโดยการเก็บเกี่ยวต้นอ้อยที่มีอายุระหว่าง 8 ถึง 11 เดือน พันธุ์ขอนแก่น 3 จากพื้นที่ อ.หนองหญ้าไซ จ.สุพรรณบุรี (พิกัด 14.827506, 99.760037) จำนวน 100 ลำ โดยสุ่มเลือกให้มีความยาวของลำอ้อยไม่น้อยกว่า 150 เซนติเมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 29.59 มิลลิเมตร สุ่มตัวอย่างต้นอ้อยในแปลง โดยทำการตัดเหนือจากพื้นดินประมาณ 10 เซนติเมตรและตัดใบอ้อยออก จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปยังห้องปฏิบัติการที่ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน แบ่งตัวอย่างอ้อย 1 ลำออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนโคน ส่วนกลาง และส่วนปลาย ความ

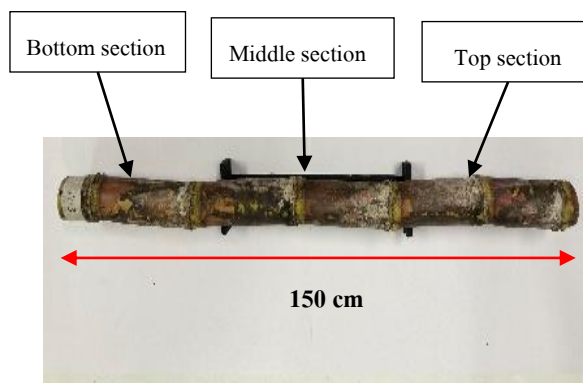
ยาวของแต่ละส่วน 50 เซนติเมตร (ภาพที่ 1) รวมจำนวน 300 ตัวอย่าง เก็บตัวอย่างต้นอ้อยแต่ละส่วนไว้ในที่อุณหภูมิห้อง 25 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมงเพื่อให้มีอุณหภูมิคงที่ ก่อนที่จะนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค NIR-HSI

2. การวัดการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค NIR-HSI

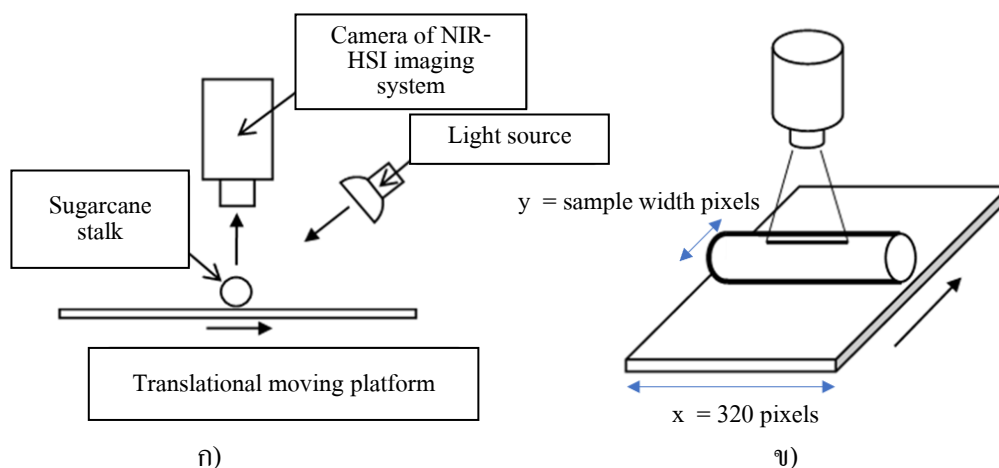
งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของไบนารีฟิวทอนอ้อยต่อการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสแกนตัวอย่างต้นอ้อยแต่ละตัวอย่าง 2 แบบ คือ ต้นอ้อยที่ยังไม่ได้ทำความสะอาดผิว และต้นอ้อยที่ผ่านการทำความสะอาดผิวแล้ว การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค NIR-HSI ใช้เครื่อง NIR hyperspectral imaging (VLNIR-CL-100-N17E, SPECIM SisuCHEMA, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) ที่ติดตั้งชุดหลอดไฟทั้งสเปกตรัมฮาโลเจนขนาด 20 วัตต์ (DECOSTAR, Carrollton, GA, United States) 3 หลอด กล้องถ่ายภาพ CCD (Xeva 992, Xenics Infrared Solution Ltd., Oulu, Finland) และชุดโปรแกรมควบคุมการทำงาน (Specim's LUMO Software Suite, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) รูปแบบการสแกนเป็นแบบ Push-broom โดยสแกนตัวอย่างเป็นแนวเส้นที่ประกอบไปด้วยค่าการดูดกลืนแสง 320 ค่า เมื่อตัวอย่างเคลื่อนผ่านไปด้านใต้กล้อง แนวการสแกนเป็นเส้นดังกล่าวก็จะถูกนำมาต่อกันเป็นภาพสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ดังแสดงในภาพที่ 2ก กล่าวคือ ตัวอย่างต้นอ้อยถูกวางอยู่บนถาดเลื่อน (Translational moving platform) ของเครื่อง ถาดเลื่อนจะนำต้นอ้อยเคลื่อนที่ผ่านใต้กล้องที่มีเซนเซอร์รับแสง มีความเร็วในการเคลื่อนที่ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะห่างระหว่างตัวอย่างต้นอ้อยถึงกล้องถ่ายภาพเท่ากับ 29 เซนติเมตร ข้อมูลการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ และข้อมูลตำแหน่งของตัวอย่างจะถูกรวบรวมและบันทึกอยู่ในรูปแบบของข้อมูล 3 มิติ (Hypercube) โดยข้อมูลของ ตำแหน่งจะอยู่ในรูปของ แกน x (ขนาด 320 Pixel) และแกน y

(ตามความยาวของวัตถุที่เคลื่อนที่ผ่านได้เซนเซอร์รับภาพ) (ภาพที่ 2ข) และในแต่ละพิกเซลจะมีข้อมูลสเปกตรัม (แกน λ) ในช่วงความยาวคลื่น 900 ถึง 1700 นาโนเมตร แต่ละค่าการดูดกลืนแสงห่างกันตามความยาวคลื่นเท่ากับ 3.2 นาโนเมตร รวมทั้งสิ้น 256 ความยาวคลื่น ท่อนอ้อยในแต่ละแบบจะถูก

สแกน 2 ครั้ง โดยหมุนท่อนอ้อยรอบแกน 180 องศา เพื่อสแกนครั้งที่สอง ข้อมูลการดูดกลืนแสงจากการสแกนทั้งสองครั้งในทุกตำแหน่งของพื้นผิวตัวอย่างท่อนอ้อยจะถูกเฉลี่ย เป็นตัวแทนค่าการดูดกลืนแสงหนึ่งตัวอย่าง เพื่อนำไปวิเคราะห์สร้างสมการต่อไป



ภาพที่ 1 ตัวอย่างท่อนอ้อยที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 2 ก) ไดอะแกรมแสดงภาพด้านข้างของ NIR-HIS และ ข) ภาพสามมิติของภาคเลื่อนวางตัวอย่าง

3. การวิเคราะห์ค่าปริมาณโพล

หลังจากที่ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงตัวอย่างท่อนอ้อยด้วยเทคนิค NIR-HSI ตัวอย่างท่อนอ้อยจะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าโพลที่ห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยพืชไร่สุพรรณบุรี กรมวิชาการเกษตร

อ.อุทัย จ.สุพรรณบุรี ด้วยวิธีการสกัดน้ำอ้อยจากตัวอย่างท่อนอ้อย กรองน้ำอ้อยโดยใช้สารช่วยกรอง Celite (Filter Aid) ผ่านเครื่องกรองความดันสูงที่มีความดัน 3.5 บาร์ ด้วยกระดาษกรอง (Whatman No. 91) จนได้น้ำอ้อยปริมาตร 100-120 มิลลิลิตร นำ

ตัวอย่างน้ำอ้อยไปแช่ในเครื่องทำความเย็น อุณหภูมิคงที่ที่ 20 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าโพลด้วยเครื่องโพลาริมิเตอร์ (Saccharomat 202, Schmidt+Haensch, SCHMIDT+HAENSCH GmbH & Co., Berlin, Germany) ดังแสดงลำดับการวิเคราะห์ในภาพที่ 3 (ก-ฉ) ดังนี้

ก) เตรียมตัวอย่างท่อนอ้อย ข) หีบสกัดตัวอย่างน้ำอ้อย ค) ตัวอย่างน้ำอ้อยจากการสกัด

ง) กรองตัวอย่างน้ำอ้อยด้วยการอัดผ่านกระดาษกรอง จ) ตัวอย่างน้ำอ้อยหลังการกรอง ช) แช่ตัวอย่างน้ำอ้อยในเครื่องทำความเย็น และ ฉ) วิเคราะห์หาค่าโพลด้วยเครื่องโพลาริมิเตอร์

หาค่าโพลของท่อนอ้อยแต่ละท่อน 2 ครั้ง แล้วนำค่าเฉลี่ยไปเป็นตัวแทนสำหรับการวิเคราะห์สร้างสมการ



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณโพล

4. การวิเคราะห์ข้อมูลสร้างสมการ

นำภาพการดูดกลืนแสงที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค NIR-HSI มาเลือกเฉพาะในส่วนพื้นผิวอ้อย ไม่รวมในส่วนขอบบริเวณที่เป็นข้อตาอ้อยและพื้นหลัง และคำนวณค่าการดูดกลืนเฉลี่ยของส่วนที่เลือกใช้เป็นตัวแทนค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างท่อนอ้อย โดยใช้โปรแกรม Evince (Prediktera, Umeå, SWEDEN) ในการเลือกส่วนดังกล่าว การวิเคราะห์สร้างสมการทำนายค่าโพลใช้เทคนิค Partial Least Squares Regression (PLSR) โดยใช้โปรแกรม

The Unscrambler (Camo, Norway Version 9.8) ก่อนการวิเคราะห์นำตัวอย่างมาแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มที่ 1 คือ กลุ่มสร้างสมการ (calibration set) จำนวน 200 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ 2 คือ กลุ่มทดสอบสมการ (validation set) จำนวน 100 ตัวอย่าง โดยให้ตัวอย่างทั้งสองกลุ่มมีการกระจายตัวของค่าโพลใกล้เคียงกัน นำค่าการดูดกลืนแสง (ตัวแปรอิสระ) และค่าโพล (ตัวแปรตาม) ของตัวอย่างในกลุ่มสร้างสมการมาสร้างสมการ จากนั้นหาจำนวนแฟกเตอร์ที่เหมาะสมของสมการใช้เทคนิคครอสวาเลชัน

สมการถดถอยวิเคราะห์สร้างจำนวน 2 สมการ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะ โดยสร้างจากค่าการดูดกลืนแสงของท่อนอ้อยที่ไม่ได้กำจัดใบ และจากค่าการดูดกลืนแสงของท่อนอ้อยที่กำจัดใบออกแล้วซึ่งเป็นตัวอย่างท่อนอ้อยชุดเดิม แต่ละสมการจะใช้ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นมาปรับเพื่อลดผลของการกระเจิงแสงในสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ เช่น การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard normal variate, SNV), การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (multiplicative scatter correction, MSC), การทำให้สเปกตรัมเรียบด้วยการเฉลี่ยเคลื่อนที่ (moving average smoothing, MAS) (3 point), การทำให้สเปกตรัมเรียบแบบ Savitzky-Golay (3 point), การทำอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งแบบ Savitzky-Golay (1D) และ การทำอนุพันธ์อันดับที่สองแบบ Savitzky-Golay (segment = 15) (2D) นำสมการที่วิเคราะห์ในทุกกรณีไปใช้ทำนายค่าโพลของตัวอย่างในกลุ่มทดสอบสมการจากค่าการดูดกลืนแสง ในการเลือกสมการที่มีสมรรถนะดีที่สุดจะประเมินจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการทำนาย (standard error of prediction, SEP) และค่า RPD (ratio of standard error of prediction to standard deviation ของตัวอย่างในกลุ่มทดสอบสมการ) (Williams *et al.*, 2019) โดยค่า R^2 และค่า RPD ควรจะมีค่าสูง และค่า SEP ควรจะมีค่าต่ำ

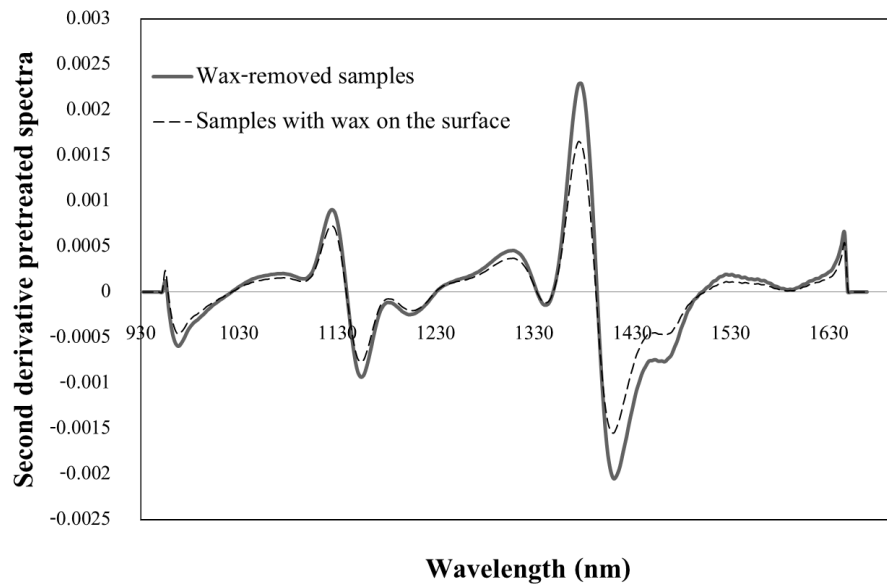
5. การสร้างแผนภาพการกระจายตัวของค่าโพล

ภาพ NIR-HSI ประกอบด้วย พิกเซล และแต่ละพิกเซลจะมีค่าการดูดกลืนแสงตามความยาวคลื่นตั้งแต่ 900 ถึง 1700 นาโนเมตร นำภาพ NIR-HSI มาสร้างแผนภาพแสดงการกระจายตัวของค่าโพลด้วยการนำสมการที่มีสมรรถนะดีที่สุดมาทำนายค่าโพลของแต่ละพิกเซลจากค่าการดูดกลืนแสงของพิกเซลนั้น ๆ แล้วเปลี่ยนค่าโพลเทียบสเกลเป็นระดับสีต่าง ๆ ก็จะได้ภาพการกระจายตัวของค่าโพลการสร้างภาพการกระจายโพลใช้โปรแกรม Matlab R2020b. (MathWork; Co.; U.S.) (License: Kasetsart University) ในการประมวลผล

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ลักษณะของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR ของท่อนอ้อย

โดยทั่วไปสเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR จะมีพีคโค้งมนและไม่เด่นชัด ดังนั้นเพื่อให้พีคมีความเด่นชัดขึ้นจึงนำค่าการดูดกลืนแสงมาปรับด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ การทำอนุพันธ์อันดับที่สอง ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำให้พีคมีความแหลมมากขึ้น และยังทำให้พีคที่ใกล้กัน แยกตัวออกจากกันให้เห็นชัดเจนขึ้น อย่างไรก็ตาม พิกของสเปกตรัมที่ได้จากการปรับด้วยการทำอนุพันธ์อันดับที่สองจะกลับหัวลงด้านล่าง (Miyazawa and Sonoyama, 1998) ภาพที่ 4 แสดงสเปกตรัมที่ผ่านการปรับด้วยการทำอนุพันธ์อันดับที่สอง โดยเปรียบเทียบตัวอย่างที่มีใบและไม่มีใบ



ภาพที่ 4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงปรับด้วยเทคนิคอนุพันธ์อันดับที่สองเปรียบเทียบท่อนอ้อยมีไขและไม่มีไข

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4 พบว่า การทำอนุพันธ์อันดับที่สองช่วยให้สามารถเห็นตำแหน่งของพีคที่ชัดเจนขึ้นที่ตำแหน่ง 968, 1156, 1410 และ 1440 นาโนเมตร ตำแหน่งของพีคในช่วงความยาวคลื่น 968 เกิดจากโอเวอร์โทนอันดับ 2 ของพันธะ O-H ขององค์ประกอบที่เป็นน้ำ ตำแหน่งของพีคในช่วงความยาวคลื่น 1410 และ 1440 นาโนเมตร เป็นโอเวอร์โทนอันดับที่ 1 ของพันธะ O-H ในโครงสร้างของแอลกอฮอล์และน้ำตาล (ซูโครส) (Osborne *et al.*, 1993) เมื่อพิจารณาอิทธิพลของไขมันผิวท่อนอ้อยพบว่า ไขมันส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างท่อนอ้อยที่ไม่มีไข ทั้งนี้สาเหตุมาจากไขมันทำให้เกิดการกระเจิงแสงมากขึ้น (Sanseechan *et al.*, 2018) เป็นสาเหตุให้แสง NIR ส่องผ่านเข้าไปในตัวอย่างไม่ได้น้อยลง มีการสะท้อนกลับออกมามากขึ้น จึงเกิดการดูดกลืนแสงน้อยลง

2. การเปลี่ยนแปลงค่าโพลที่สัมพันธ์กับตำแหน่งการวัดและอายุเก็บเกี่ยว

ค่าโพลของตัวอย่างท่อนอ้อยจำนวน 300 ตัวอย่าง ช่วงอายุการเก็บเกี่ยวระหว่าง 8-11 เดือน

พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 4.93-23.38 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบค่าโพลของตัวอย่างที่มีอายุเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกันและตำแหน่งการวัดตามความยาวท่อนอ้อยที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 2) พบว่าค่าโพลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากอายุ 8 ไปจนถึง 10 เดือน นอกจากนั้น ค่าโพลมีการเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งตามความสูงของท่อนอ้อย โดยในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 8-9 เดือน ค่าโพลจะมีค่าสูงที่บริเวณโคน และมีค่าลดลงที่ตำแหน่งกลาง และปลายตามลำดับ และค่าจะเพิ่มขึ้นตามอายุการเก็บเกี่ยวของอ้อยอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่ออ้อยมีอายุการเก็บเกี่ยวตั้งแต่ 10 เดือน ค่าโพลที่ตำแหน่งส่วนโคนและกลางจะไม่มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่บริเวณส่วนปลายนั้นยังคงมีค่าต่ำกว่าส่วนโคนและส่วนกลาง ดังแสดงในตารางที่ 2 เนื่องจากอ้อยเป็นพืชมีการเจริญเติบโตจากด้านล่างขึ้นบน การเจริญเติบโตและการสะสมน้ำตาลของอ้อยนั้น ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกัน อ้อยที่มีการเจริญเติบโต เริ่มต้นจะมีการสะสมน้ำตาลน้อย เมื่ออ้อยมีอายุมากขึ้นการเจริญเติบโตจะลดลงก็จะทำให้

มีการสะสมน้ำตาลมากขึ้น ในระยะเจริญเติบโต (elongation phase) (อายุ 8-9 เดือน) ส่วนบนของต้นอ้อยจึงมีปริมาณน้ำตาลซูโครสต่ำกว่าส่วนอื่นเพราะเป็นส่วนที่มีการเจริญเติบโต ในขณะที่ส่วนด้านล่างของต้นอ้อยที่เจริญเติบโตมาแล้วจะมีการสะสมปริมาณซูโครสมากขึ้น (Zhu, 1997) เมื่ออ้อยมีอายุ

ตั้งแต่ 10 เดือนจนถึงเก็บเกี่ยว เป็นช่วงที่อ้อยอยู่ในระยะของการแก่และสุก (maturity and ripening phase) ต้นอ้อยมีการเจริญเติบโตที่ช้าลง การเจริญเติบโตจะอยู่ที่บริเวณปลายหรือยอด จึงส่งผลให้ปริมาณน้ำตาลไม่มีความแตกต่างกันในบริเวณโคนและกลางลำต้น

ตารางที่ 1 ค่าสถิติพื้นฐานค่าโพล (%) ของตัวอย่างท่อนอ้อยในกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการ

กลุ่มตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง	ค่าน้อยที่สุด	ค่ามากที่สุด	ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
กลุ่มสร้างสมการ	200	4.93	23.38	17.76±3.63
กลุ่มทดสอบสมการ	100	8.36	23.27	17.72±3.65

ตารางที่ 2 ความแตกต่างค่าโพล (%) เฉลี่ย ตามตำแหน่งความยาวต้นอ้อยและอายุอ้อย

	อายุเก็บเกี่ยว (เดือน)			
	8	9	10	11
ส่วนล่างลำต้น	18.53 a	20.47 a	22.36 a	22.30 a
ส่วนกลางลำต้น	16.62 b	19.57 b	22.29 a	22.07 a
ส่วนบนลำต้น	13.07 c	15.99 c	21.11 b	21.07 b
ค่าเฉลี่ย	16.07	18.68	21.92	21.82
F-test	$p<0.01$	$p<0.01$	$p<0.01$	$p<0.01$
Coefficient of variation (%)	7.57	7.84	2.49	3.85

3. ผลการวิเคราะห์การสร้างสมการทำนายค่าโพล

ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า สมการทำนายค่าโพลของตัวอย่างอ้อยที่ไม่มีไขให้ผลการทำนายที่ดีกว่าสมการที่สร้างจากค่าการดูดกลืนแสง ตัวอย่างอ้อยที่มีไข สาเหตุคือ ตัวอย่างที่ไม่มีไขให้สเปกตรัมที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงกว่า หรือให้ข้อมูลสเปกตรัมที่มากกว่าตัวอย่างที่มีไข ผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sanseechan *et al.* (2018) ที่พบว่าสมการทำนายที่สร้างจากตัวอย่างท่อนอ้อยที่ผ่านการนำเอาไขที่เคลือบผิวออกไปนั้น มี

ประสิทธิภาพในการทำนายค่าความหนาแน่นของท่อนอ้อยมากกว่าสมการที่สร้างมาจากตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการนำไขเคลือบออก

ดังนั้น การวิเคราะห์การสร้างสมการจึงเน้นเฉพาะตัวอย่างที่ไม่มีไขเท่านั้น ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของสมการเปรียบเทียบระหว่างการปรับสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3 โดยสมการสำหรับการทำนายค่าโพลที่สร้างมาจากค่าการดูดกลืนแสงที่ปรับด้วย SNV ร่วมกับ 1D มีความสามารถในการทำนายตัวอย่าง

ในกลุ่มทดสอบสมการที่ดีที่สุดมีค่า $R^2 = 0.83$ SEP = 1.52% และ RPD = 2.33 (ตารางที่ 3) และ ค่าอัตราส่วนระหว่าง SEP ต่อ SEC เท่ากับ 1.15 ซึ่งน้อยกว่า 1.3 แสดงว่า จำนวนแฟกเตอร์ 8 แฟกเตอร์ ของสมการมีความเหมาะสม ไม่ทำให้เกิดการ Overfitting (Cantor *et al.*, 2011) ผลการทำนายค่าโพลในงานวิจัยนี้ ให้ค่า R^2 สูงกว่างานวิจัยที่ทำนายค่าโพลจากอ้อยที่เตรียมเป็นเส้นใยละเอียด ซึ่งให้ค่า $R^2 = 0.71$ (Kirasak *et al.*, 2015) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยโดย Kamwilaisak *et al.* (2021) ให้ค่า $R^2 = 0.93$ และค่า RPD = 3.17 ซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่า ทั้งนี้สาเหตุหนึ่งเนื่องมาจากงานวิจัยของ Kamwilaisak *et al.* (2021)

เตรียมตัวอย่างเป็นอ้อยสับละเอียด ในขณะที่งานวิจัยนี้ ตัวอย่างที่ใช้เป็นท่อนอ้อยสด ซึ่งเปลือกอ้อยส่งผลให้แสง NIR ผ่านไปถึงเนื้ออ้อยได้น้อยลง

ค่าโพลที่ได้จากห้องปฏิบัติการและค่าโพลจากการทำนาย ของกลุ่มข้อมูลสร้างสมการ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.87 ค่า SEC เท่ากับ 1.32% และกลุ่มข้อมูลทดสอบสมการ ค่า R^2 เท่ากับ 0.83 ค่า SEP เท่ากับ 1.52% ดังแสดงในภาพที่ 5 โดยค่า R^2 ที่อยู่ในช่วง 0.82-0.90 นั้น บ่งบอกถึงสมการทำนายมีประสิทธิภาพสำหรับการใช้ตรวจสอบคุณภาพได้ (Williams *et al.*, 2019)

ตารางที่ 3 ค่าทางสถิติแสดงสมรรถนะในการทำนายของสมการในการทำนายค่าโพลจากค่าการดูดกลืนแสงที่ปรับด้วยเทคนิคคณิตศาสตร์แบบต่าง ๆ

เทคนิคที่ใช้ปรับค่าการดูดกลืนแสง*	จำนวนตัวแฟกเตอร์	กลุ่มสร้างสมการ		กลุ่มทดสอบสมการ			RPD
		R^2	SEC (%)	R^2	SEP (%)	Bias (%)	
SM	10	0.86	1.34	0.83	1.53	0.310	2.32
SNV	8	0.87	1.31	0.83	1.54	0.209	2.30
SNV+1D	8	0.87	1.32	0.83	1.52	0.343	2.33
SNV+2D	6	0.83	1.49	0.78	1.61	0.316	2.20
1D	7	0.84	1.44	0.78	1.63	0.298	2.17
2D	6	0.84	1.46	0.79	1.58	0.290	2.24
MAS	10	0.86	1.34	0.81	1.54	0.293	2.31
MAS+1D	7	0.84	1.44	0.78	1.53	0.294	2.31
MAS+2D	6	0.83	1.48	0.79	1.58	0.297	2.24
SM+1D	8	0.85	1.41	0.79	1.61	0.290	2.20
SM+2D	7	0.85	1.43	0.80	1.55	0.293	2.29
SM+SNV	9	0.86	1.37	0.80	1.56	0.326	2.27
MSC	8	0.87	1.31	0.82	1.54	0.266	2.29

*SM = Savitzky-Golay smoothing with 3 smoothing points.

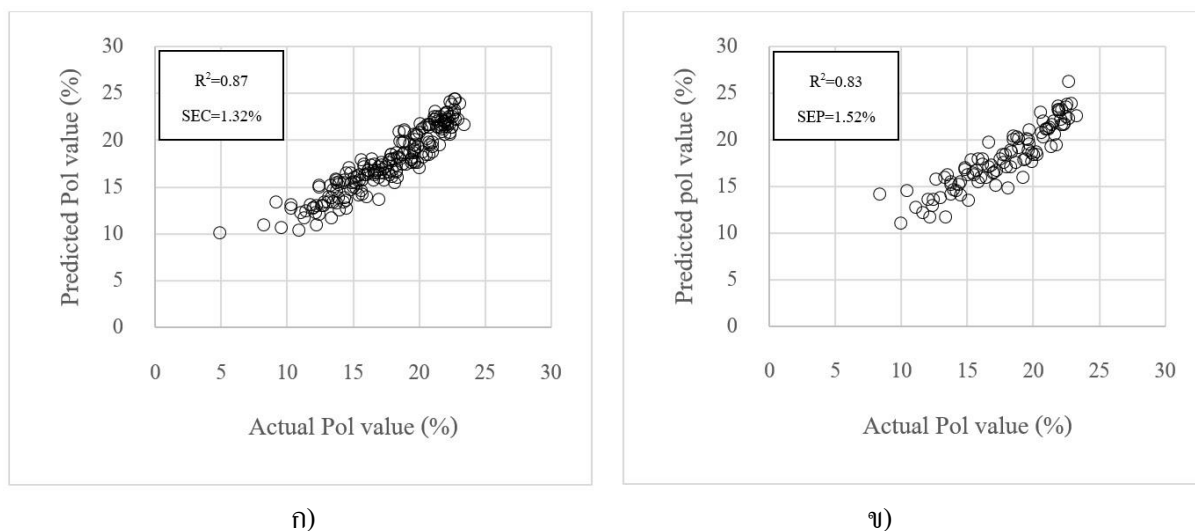
SNV = Standard normal variate.

1D = Savitzky-Golay 1st derivative with 15 smoothing points.

2D = Savitzky-Golay 2nd derivative with 15 smoothing points.

MAS = moving average smoothing with 3 smoothing points.

MSC = multiplicative scatter correction.



ภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลที่วัดจากห้องปฏิบัติการและค่าโพลที่ทำนายจากสมการที่สร้างจากค่าการดูดกลืนแสงปรับด้วยเทคนิคการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานและการทำอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของ ก) กลุ่มสร้างสมการ และ ข) กลุ่มทดสอบสมการ

4. แผนภาพการกระจายตัวของค่าโพล

สมการทำนายค่าโพลในท่อนอ้อยที่ดีที่สุดถูกนำมาใช้ทำนายค่าโพลในแต่ละฟักเซลจากการดูดกลืนแสงที่ปรับด้วย SNV และ 1D ของฟักเซลนั้นและแปลงค่าโพลที่ได้เป็นค่าสีตามสเกลที่กำหนด ดังแสดงบางตัวอย่างในภาพที่ 6 ซึ่งจะเห็นการกระจายตัวของค่าโพลบนตัวอย่างท่อนอ้อย เปรียบเทียบตัวอย่างท่อนอ้อยที่วัดที่ตำแหน่งแตกต่างกันตามความสูง การกระจายตัวของค่าโพลบนตัวอย่างท่อนอ้อย 1 ลำประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนโคน ส่วนกลาง และส่วนปลาย โดยแสดงทั้งสองด้านของตัวอย่างท่อนอ้อย

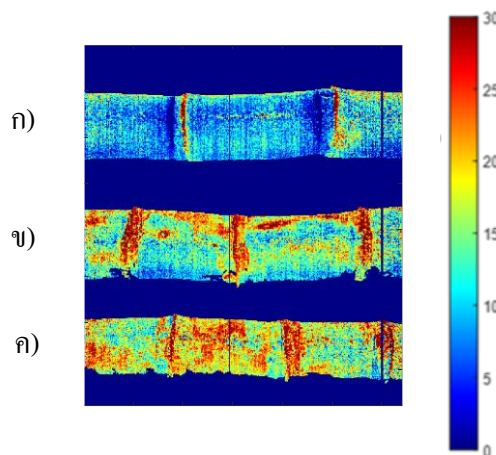
ตัวอย่างในภาพที่ 6 แสดงให้เห็นถึงส่วนโคนของต้นอ้อยเป็น ส่วนที่มีค่าโพลสูงที่สุด (19.98%) เนื่องจากเป็นบริเวณที่ต้นอ้อยใช้สำหรับการกักเก็บอาหาร (น้ำตาล) ร่องลงมาได้แก่

ส่วนกลาง (16.68%) ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่ออ้อยมีอายุการเก็บเกี่ยวที่มากขึ้น และมีค่าน้อยที่สุดบริเวณส่วนปลาย (9.23%) การแสดงการกระจายตัวของค่าโพลนั้น มีแนวโน้มของการกระจายตัวไม่แตกต่างกันทั่วบริเวณพื้นที่ผิวของท่อนอ้อย แต่จะพบการทำนายค่าโพลที่อาจผิดพลาดบริเวณตำแหน่งที่เป็นข้อตาอ้อย และบริเวณพื้นผิวที่มีคราบสีดำ หรือบริเวณที่ถูกแมลงศัตรูอ้อยทำลาย เนื่องจากในขั้นตอนของการจัดการเฉลี่ยข้อมูลของการดูดกลืนแสงนั้น ได้ทำการตัดในส่วนของบริษัทของบริเวณข้อตาอ้อย และรอยเปื้อนออกไป นอกจากนั้น ยังมีความคลาดเคลื่อนของค่าโพลที่ทำนายบริเวณขอบของภาพตัวอย่าง ที่เป็นส่วนของผิวโค้งของตัวอย่างท่อนอ้อยเนื่องจากความโค้งของรูปทรงกระบอกของตัวอย่างท่อนอ้อยที่ทำให้ระยะห่างมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อ

ตัวอย่างอ้อยเคลื่อนที่ผ่านได้กล้อง ระยะห่างที่ไกลที่สุดจะอยู่ที่บริเวณขอบของท่อนอ้อยทั้งสองด้าน

แผนภาพการกระจายตัวของค่าโพลมีประโยชน์ ช่วยให้สามารถพิจารณาเปรียบเทียบค่าโพลได้ทุกตำแหน่งบนตัวอย่าง ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นข้อดีของเทคนิค NIR-HSI ที่เหนือกว่าเทคนิค NIRS ทั่วไป อย่างไรก็ตาม เครื่องมือ NIR-HSI ที่ใช้ในการศึกษาถูกออกแบบมาสำหรับตัวอย่างที่มีพื้นผิวเรียบ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการสร้างภาพการกระจายได้สำหรับตัวอย่างที่มีผิวโค้ง ตัวอย่างงานวิจัยที่แก้ปัญหาคือการใช้เทคนิค NIR-HSI กับท่อนอ้อย ได้แก่งานของ Maraphum *et al.* (2020) ซึ่งทำ

ให้ตัวอย่างท่อนอ้อยมีผิวหน้าเรียบด้วยการผ่าครึ่ง ท่อนอ้อยตามความยาวก่อนนำมาสแกน ซึ่งช่วยลดความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่าทางเคมีบริเวณขอบท่อนอ้อยได้ แต่ก็เพิ่มกระบวนการเตรียมตัวอย่างที่ต้องนำท่อนอ้อยมาผ่าด้วยเช่นกัน ดังนั้น เพื่อให้การวัดค่าสามารถทำได้โดยไม่มีการทำลายตัวอย่าง หรือการเตรียมตัวอย่าง และลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากผิวโค้งของตัวอย่างรูปทรงกระบอก ควรมีการพัฒนาเทคนิคของการสแกนด้วยการหมุนตัวอย่างรูปทรงกระบอกเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากตัวอย่างที่มีผิวโค้ง



ภาพที่ 6 แผนภาพการกระจายค่าโพลของท่อนอ้อยที่ตำแหน่ง ก) ส่วนบนลำต้น (ค่าเฉลี่ยโพล= 9.23%)
ข) ส่วนกลางลำต้น (ค่าเฉลี่ยโพล= 16.68%) และ ค) ส่วนล่างลำต้น (ค่าเฉลี่ยโพล= 19.98%)

สรุป

เทคนิค NIR-HSI ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายค่าปริมาณของค่าโพลหรือค่าร้อยละของน้ำตาลซูโครสในตัวอย่างท่อนอ้อย สมการ PLSR ที่พัฒนามาจากตัวอย่างท่อนอ้อยที่ผ่านการทำความสะอาดพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการทำนายที่ดีมากกว่าสมการทำนายที่พัฒนามาจากตัวอย่างท่อนอ้อยที่ไม่ผ่านการทำความสะอาดพื้นผิว เนื่องมาจาก

ผลของการสะท้อนและการกระเจิงแสงของคราบไไขที่เคลือบพื้นผิวท่อนอ้อย การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิค NIR-HSI สร้างแผนภาพการกระจายของค่าโพลของตัวอย่าง ซึ่งช่วยให้สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าโพลได้ทุกตำแหน่งบนตัวอย่างได้อย่างรวดเร็ว และยังสามารถพัฒนาต่อยอดไปใช้กับผลผลิตทางการเกษตรอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ควรมีการพัฒนาเทคนิคการสแกนเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากตัวอย่างที่มี

ผิวกิ่ง งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นศักยภาพของเทคนิค NIR-HSI ในการนำมาทำนายค่าโพลจากท่อนอ้อยสดโดยตรง

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากโครงการปริญญาเอกเฉลิมพระเกียรติทรงครองราชย์ 70 ปี จากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) (ARDA) ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และศูนย์วิจัยพืชไร่สุพรรณบุรี กรมวิชาการเกษตร สำหรับการสนับสนุนห้องปฏิบัติการ สิ่งอำนวยความสะดวก และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Aparatana, K., Saengprachatanarug, K., Izumikawa, Y., Nakamura, S. and Taira, E. 2020. Development of sugarcane and trash identification system in sugar production using hyperspectral imaging. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 28(3): 133-139.

Cantor, S.L., Hoag, S.W., Ellison, C.D., Khan, M.A. and Lyon, C R. 2011. NIR spectroscopy applications in the development of a compacted multiparticulate system for modified release. **Aaps Pharmscitech** 12(1): 262-278.

Kamwilaisak, K., Jutakradsada, P., Iamamornphanth, W., Saengprachatanarug, K., Kasemsiri, P., Konyai, S. and Chindaprasit, P. 2021. Estimation of sugar content in sugarcane (*Saccharum* spp.) variety lumpang 92-11 (lk 92-11) and khon kaen 3 (kk 3) by near

infrared spectroscopy. **Engineering Journal** 25(3): 69-83.

Kirasak, K., Sansayawichai, T., Ponragdee, W. and Thipyawat, A. 2015. Determination of commercial cane sugar (ccs) using near infrared spectroscopy. **Thai Agricultural Research Journal** 33(2): 159-168. (in Thai).

Manley, M. 2014. Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: non-destructive analysis of biological materials. **Chemical Society Reviews** 43(24): 8200-8214.

Maraphum, K., Saengprachatanarug, K., Aparatana, K., Izumikawa, Y. and Taira, E. 2020. Spatial mapping of Brix and moisture content in sugarcane stalk using hyperspectral imaging. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 28(4): 167-174.

Miyazawa, M. and Sonoyama, M. 1998. Second derivative near infrared studies on the structural characterization of proteins. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 6(A): A253-A257.

Osborne, B.G., Fearn, T. and Hindle, P.H. 1993. **Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis**. Longman Scientific and Technical, Harlow.

Sanseechan, P., Panduangnate, L., Saengprachatanarug, K., Wongpichet, S., Taira, E. and Posom, J. 2018. A portable near infrared spectrometer as a non-destructive tool for rapid screening of solid density stalk in a sugarcane breeding program. **Sensing and Bio-sensing Research** 20: 34-40.

- Taira, E., Ueno, M. and Kawamitsu, Y. 2010. Automated quality evaluation system for net and gross sugarcane samples using near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 18(3): 209-215.
- Taira, E., Ueno, M., Saengprachatanarug, K. and Kawamitsu, Y. 2013. Direct sugar content analysis for whole stalk sugarcane using a portable near infrared instrument. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 21(4) : 281-287.
- Williams, P., Manley, M. and Antoniszyn, J. 2019. **Near infrared technology: getting the best out of light**. African Sun Media, Stellenbosch.
- Zhu, Y.J., Komor, E. and Moore, P.H. 1997. Sucrose accumulation in the sugarcane stem is regulated by the difference between the activities of soluble acid invertase and sucrose phosphate synthase. **Plant Physiology** 115(2): 609-616.

การวิเคราะห์ปริมาณของแอลกอฮอล์ในหน่วยร้อยละโดยปริมาตร ในเจลแอลกอฮอล์ชนิดหนืด

Analysis of Alcohol Content in Viscous Alcohol Gel Expressed as Percent by Volume

วัชรระ แก้วสุวรรณ* ทรงพล หอมอุทัย และ ศักดิ์ชัยบดี ปิ่นศรีทอง*

Watchara Kaewsuwan, Songpol Homutai and Sakchai Bordee Pinsritong*

Received: 22 January 2022, Revised: 21 June 2022, Accepted: 27 June 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาวิธีวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ในหน่วยร้อยละโดยปริมาตรของเมทานอล ไอโซโพรพานอล และเอทานอลในเจลแอลกอฮอล์ชนิดหนืดที่ไม่สามารถเปิดให้ได้ปริมาตรที่แน่นอน โดยการศึกษาจะใช้วิธีวัดค่าความหนาแน่นที่แท้จริงของเจลแอลกอฮอล์ เพื่อเปลี่ยนจากน้ำหนักเป็นปริมาตรเจล จากนั้นตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ด้วยเครื่องเสดสเปซ ร่วมกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดเฟลม ไอออไนเซชัน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดสอบใช้เวลาการตรวจวัดเพียง 15 นาทีสำหรับทั้ง 3 สารประกอบ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกคำนวณเป็นร้อยละโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์แต่ละชนิดในเจลแอลกอฮอล์ด้วยสมการที่สร้างขึ้น วิธีการมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ในช่วงที่ศึกษาครอบคลุมตามเกณฑ์ที่กำหนดของกระทรวงสาธารณสุขที่กำหนดเมทานอลในตัวอย่างไม่เกินร้อยละ 5 โดยปริมาตร และเอทานอลควรมีในตัวอย่างมากกว่าร้อยละ 70 โดยปริมาตร คือเมทานอลมีช่วงการวิเคราะห์ร้อยละ 0.04 - 7.06 โดยปริมาตรและเอทานอลช่วงการวิเคราะห์ร้อยละ 0.48 - 96.62 โดยปริมาตร ส่วนไอโซโพรพานอลจะศึกษาช่วงการวัดที่ปริมาณน้อยเช่นเดียวกับเมทานอล เนื่องจากมักพบในตัวอย่างจริงในช่วงปริมาณน้อย ค่าร้อยละการได้กลับคืนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 95.05 ± 3.89 ถึง 97.71 ± 5.18 สำหรับ เมทานอล ไอโซโพรพานอล และ 99.58 ± 2.57 ถึง 100.02 ± 2.19 สำหรับเอทานอล ค่าความเที่ยงของการวัดเท่ากับ 3.49 - 5.36% สำหรับเมทานอล ไอโซโพรพานอล และ 0.95 - 1.84% สำหรับเอทานอล

คำสำคัญ: เจลแอลกอฮอล์, ความหนาแน่นที่แท้จริง, เสดสเปซ, แก๊สโครมาโทกราฟี

สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

Office of Scientific Instrument and Testing, Prince of Songkla University, Hat Yai Campus, Songkhla 90110, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): Sakchai Bordee.s@psu.ac.th

ABSTRACT

This work to study method for analyzing alcohol content expressed as percentage by volume of alcohol, namely methanol, isopropanol and ethanol in a viscous alcohol gel that cannot be pipetted to exact volume. In this study, the true density of alcohol gel was measured to change from weight to gel volume. The researchers then measured the alcohol content with a headspace-gas chromatography flame ionization detector. Under the optimum conditions, the test took only 15 min for all three compounds. The results were calculated as a percentage by volume of each alcohol in the alcohol gel using the generated equation. There was a linear relationship between concentration and response. The range studied according to the criteria regulated by the Ministry of Public Health, methanol content does not exceed 5% by volume, while ethanol content should be more than 70% by volume. The analysis range of methanol and ethanol percentage by volume were 0.04 - 7.06 and 0.48 - 96.62 respectively, whereas isopropanol studied the small measurement range as same as methanol. This was because they are often found small quantities in real samples. The percentage recovery ranged from 95.05 ± 3.89 to 97.71 ± 5.18 for both methanol and isopropanol and 99.58 ± 2.57 to 100.02 ± 2.19 for ethanol. The precision of method was 3.19 - 5.36% for both methanol and isopropanol and 0.95 - 1.84% for ethanol.

Key words: alcohol gel, true density, headspace, gas chromatograph

บทนำ

ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขประเทศไทย ปี 2563 เรื่อง ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดมือที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนประกอบเพื่อสุขอนามัย กำหนดไว้ว่า “ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดมือที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนประกอบเพื่อสุขอนามัย” หมายความว่า ผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ และหรือ ไอโซโพรพานอล ตั้งแต่หรือมากกว่าร้อยละ 70 โดยปริมาตร (volume by volume, %v/v) (Ministry of Public Health, 2020) เนื่องจากชนิดและปริมาณของแอลกอฮอล์ มีผลต่อการยับยั้งเชื้อโรค ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการวัดเชิงคุณภาพและทดสอบปริมาณร้อยละโดยปริมาตรที่เหมาะสมเพื่อให้ทราบปริมาณแอลกอฮอล์สำหรับใช้ทำความสะอาดมือเพื่อป้องกันเชื้อโรคต่างๆ โดยเฉพาะเชื้อโรคโควิด 19 ที่กำลังมีการระบาดอยู่ในปัจจุบัน (Fallica *et al.*, 2021)

ซึ่งผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดมือที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนประกอบมีผลิตภัณฑ์หลายรูปแบบ เช่น เจลของเหลว และสเปรย์ เป็นต้น ซึ่งในการวัดปริมาณตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ที่ระบุปริมาณแอลกอฮอล์ส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์เป็นหน่วยร้อยละโดยปริมาตร กรณีตัวอย่างที่เป็นเจล ตัวอย่างจะมีลักษณะข้นและเหนียว การสุ่มเลือกตัวอย่างเจลที่มีลักษณะเหนียวให้ได้ปริมาตรที่ถูกต้องตามต้องการค่อนข้างทำได้ยาก ซึ่งหากสุ่มเลือกไม่ถูกวิธีจะทำให้ปริมาตรที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง ในงานวิจัยนี้จึงได้สนใจศึกษาหาวิธีการวัดปริมาณร้อยละโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์เจลแอลกอฮอล์ชนิดเหนียว โดยเลือกการชั่งน้ำหนักตัวอย่างเจล และศึกษาหาความหนาแน่นที่แท้จริงของเจลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในประเทศไทย และยังไม่

รายงานวิจัยใดรายงานค่าไว้เพื่อนำค่าความหนาแน่นที่แท้จริงมาเปลี่ยนน้ำหนักตัวอย่างที่ชั่งได้เป็นปริมาตรที่ถูกต้องเพื่อให้การรายงานผลสอดคล้องตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข โดยแอลกอฮอล์ส่วนประกอบที่จะศึกษาหาปริมาณคือ ไอโซโพรพานอล และเอทานอล เพื่อตรวจสอบปริมาณว่ามีมากกว่าร้อยละ 70 โดยปริมาตรหรือไม่ พร้อมกับวัดปริมาณสารที่แสดงความเป็นพิษหาปริมาณมากคือ เมทานอลที่เป็นสารเปลี่ยนแปลงสภาพ (denaturant) จากไอโซโพรพานอล และเอทานอล โดยตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขประเทศไทย ปี 2561 กำหนดไว้ว่ามีเมทานอลในเครื่องสำอางพร้อมใช้ได้สูงสุดไม่เกินร้อยละ 5 โดยปริมาตรของเอทานอลและไอโซโพรพานอล และกรณีเป็นเครื่องสำอางที่ใช้บริเวณรอบดวงตาไม่เกินร้อยละ 1 โดยปริมาตร (Ministry of Public Health, 2018) เพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค

สำหรับเครื่องมือในการทดสอบปริมาณแอลกอฮอล์ทั้งเมทานอล ไอโซโพรพานอล และเอทานอลในผลิตภัณฑ์เจลแอลกอฮอล์ คือเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ร่วมกับตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชัน (GC-FID) เนื่องจากมีความจำเพาะและให้สัญญาณการตอบสนองที่ดีกับสารอินทรีย์ระเหยง่ายกลุ่มแอลกอฮอล์ (Tiscione *et al.*, 2011) แต่เนื่องจากการตรวจวิเคราะห์จำเป็นต้องมีการเตรียมตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์เพื่อลดสารรบกวน หรือเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารที่สนใจอยู่ในช่วงที่สามารถตรวจวัดได้ โดยเทคนิคการเตรียมตัวอย่างหาปริมาณแอลกอฮอล์ในเจลแอลกอฮอล์ มีทั้งการเจือจางตัวอย่างแล้วทดสอบโดยตรงสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Thitisaksakul *et al.*, 2021; Vivon and Nakniyom, 2021) ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายและรวดเร็ว อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์บางชนิดจะมีส่วนผสมอื่น ๆ อยู่ด้วย เช่น สารแต่งสี สารเพิ่มความหนืด สารก่อก่อ

เป็นต้น สารเหล่านี้อาจปนเปื้อนเข้าสู่เครื่องมือวิเคราะห์ได้ (FDA, U.S. Food and Drug Administration, 2020; Jing *et al.*, 2020) อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพ ได้ทั้งทางบวกและทางลบ คือ ได้ค่ามากหรือน้อยกว่าความเป็นจริง และสารเคมีส่วนผสมหลายชนิด มักมีจุดเดือดค่อนข้างสูงทำให้ตกค้างบริเวณหัวฉีด (Dhandapani and abaji, 2020) เป็นผลให้โหนดอร์และคอลัมน์ของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีเสื่อมสภาพการใช้งาน (Chun *et al.*, 2016) จากปัญหาดังกล่าวเทคนิคที่น่าสนใจในการเตรียมตัวอย่างและการสกัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยสารปนเปื้อนที่มีจุดเดือดสูงไม่ปนเปื้อนเข้าสู่เครื่องมือวิเคราะห์คือ เทคนิคเฮดสเปซ (Headspace, HS) ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการสกัดเพื่อวิเคราะห์สารระเหยง่าย อย่างเช่น แอลกอฮอล์ (Tiscione *et al.*, 2011; SHIMADZU, 2020) หลักการจะเป็นการให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างในภาชนะปิดจนสารที่สนใจวิเคราะห์กระจายตัวเข้าสู่สถานะสมดุลระหว่างเฟสสองเฟสคือ เฟสของตัวอย่างและเฟสของบริเวณเฮดสเปซ โดยสารแอลกอฮอล์ส่วนประกอบจะอยู่ในลักษณะของแก๊สในเฟสเฮดสเปซและของเหลวในเฟสของเจลแอลกอฮอล์ จากนั้นนำสารที่อยู่ในเฟสของเฮดสเปซไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ทำให้ไม่มีผลของสารรบกวนจากสารแต่งสี สารเพิ่มความหนืดของเจลเข้าสู่ระบบวิเคราะห์ (Snow and Slack, 2002; Ji *et al.*, 2006) วิธีการเตรียมตัวอย่างแบบเฮดสเปซร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจึงถูกเลือกใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ทั้ง 3 ชนิดในตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์

ดังนั้นโดยสรุปในงานวิจัยนี้จะศึกษาหาวิธีวิเคราะห์ปริมาณของแอลกอฮอล์ในหน่วยร้อยละโดยปริมาตรในเจลแอลกอฮอล์ชนิดตัวอย่างที่มีลักษณะหนืด โดยการชั่งน้ำหนักตัวอย่างแล้ว

เปลี่ยนเป็นปริมาตรด้วยค่าความหนาแน่นที่แท้จริง แล้วตรวจวัดความเข้มข้นด้วยเทคนิคเฮดสเปซ ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ พร้อมกับการสร้างสมการคำนวณผลให้เหมาะกับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ใน ตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมดเป็น ตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์ชนิดชนิดที่มีการส่งทดสอบ ณ สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยภาครัฐและเอกชน ช่วงปี 2563 - 2564 จำนวน 23 ตัวอย่าง

2. สารเคมีที่ใช้

สารมาตรฐาน เมทานอล ไอโซโพรพานอล และเอทานอลซื้อจาก Merck KGaA (Darmstadt, Germany) น้ำปราศจากไอออน (DI) ผลิตจากเครื่อง ทำน้ำบริสุทธิ์ Milli-Q (Merck KGaA, Darmstadt, Germany)

3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟร่วมกับตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชัน ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น 6850 โดยสภาวะการทดสอบ คอลัมน์ที่ใช้ในการแยกสารคือ HP-Innowax ความยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.32 มิลลิเมตร ความหนาของฟิล์ม 0.25 ไมโครเมตร อุณหภูมิห้องของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบคงที่ 50 °C เป็นเวลา 9 นาที ตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชันอุณหภูมิ 160 °C อัตราไหลแก๊สไฮโดรเจน แอร์ชีโร และไนโตรเจน เท่ากับ 30, 300, 25 mL/min ตามลำดับ อุณหภูมิหัวฉีด 150 °C สัดส่วนสารเข้าคอลัมน์ 1 ต่อ 50 ใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สพาอัตราไหล 1 mL/min เครื่องเฮดสเปซยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น HP 7694 สภาวะที่ใช้แสดงดังตารางที่ 1 เครื่องวัดความหนาแน่นที่แท้จริง (True density analyzer) ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น AccuPyc II 1340 เครื่องชั่ง 5 ตำแหน่งยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น AT261

ตารางที่ 1 สภาวะในการทดสอบของเครื่องเฮดสเปซ

สภาวะ	ค่าที่ตั้ง	สภาวะ	ค่าที่ตั้ง
Equilibrium temperature	80 °C	Loop fill time	0.5 นาที
Equilibrium time	15 นาที	Loop eq. time	0.05 นาที
Loop temperature	95 °C	Pressurization time	0.1 นาที
Transfer line temperature	150 °C	Injection time	1.0 นาที
Vial shaking	on	Vial pressure	15.2 psi
Loop size:	0.25 mL	Carrier pressure	4.5 psi

4. การศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมของเทคนิคเฮดสเปซ

เวลาในการสกัดเป็นเวลาที่เหมาะสมที่ให้สารที่วิเคราะห์เกิดการเคลื่อนที่จนเข้าสู่สมดุล (Equilibrium time) ระหว่างเฟสของตัวอย่างและเฟส

ของเฮดสเปซ โดยในการศึกษาจะเตรียมสารมาตรฐานผสมความเข้มข้น 0.6 mL/L สำหรับเมทานอล ไอโซโพรพานอล และ 39.2 mL/L สำหรับเอทานอลปริมาตร 100 mL แบ่งสารมาตรฐานใส่ขวด

เฮกสเปชวอดละ 2 mL จำนวน 5 ขวดต่อเวลาที่ศึกษา โดยช่วงเวลาที่ศึกษา คือ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที หลังจากได้สภาวะที่เหมาะสมของเวลาในการสกัดแล้ว จะศึกษาประสิทธิภาพของวิธีก่อนการนำไปประยุกต์ใช้กับตัวอย่างจริง

5. การศึกษาประสิทธิภาพของวิธี (Analytical performances)

การศึกษาประสิทธิภาพของวิธีจะศึกษาตาม แนวปฏิบัติมาตรฐานของ AOAC ปี 2016 (AOAC, 2016) สำหรับการทดสอบเชิงปริมาณกรณีสารที่สนใจเป็นองค์ประกอบหลักในตัวอย่างที่ตรวจวัด โดยมีรายการที่ศึกษาดังนี้

5.1 ความเป็นเส้นตรงของช่วงการวิเคราะห์ (Applicable range)

ศึกษาโดยการเตรียมสารมาตรฐาน ช่วงความเข้มข้นของเครื่องมือคือ 0.02 - 4.00 mL/L ของเมทานอล ไอโซโพรพานอลและ 0.27 - 54.00 mL/L ของเอทานอลในตัวทำละลายน้ำ DI ซึ่งจะสอดคล้องตามปริมาณแอลกอฮอล์ส่วนประกอบที่มักพบในตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์และสอดคล้องตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขเรื่องปริมาณแอลกอฮอล์ส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดมือ หลังจากนั้นนำสารมาตรฐานแต่ละความเข้มข้นปริมาตร 2 mL ใส่ในขวดเฮกสเปช จำนวน 3 ขวดต่อความเข้มข้น ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HS-GC-FID ผลของสัญญาณที่ได้จากเครื่องนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดและสัญญาณการตอบสนองที่ได้ แล้วพิจารณาช่วงความเป็นเส้นตรง โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่ามากกว่า 0.995 (Van *et al.*, 2002)

5.2 ขีดจำกัดการตรวจวัด (Limit of detection: LOD) และขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantification, LOQ)

ขีดจำกัดการตรวจวัดคือความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ ทำได้โดยการเพิ่มสารมาตรฐานในตัวทำละลายน้ำ DI แล้วทำการวัด 10 ซ้ำและให้อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าหรือเท่ากับสาม (Signal to noise ratio, $S/N \geq 3$) และขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณ คือระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณสารให้มีความถูกต้องและแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทำโดยการเพิ่มสารมาตรฐานในตัวทำละลายน้ำ DI แล้วทำการวัด 10 ซ้ำ และให้อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าหรือเท่ากับสิบ ($S/N \geq 10$) (Shrivastava, 2011; Jullakan *et al.*, 2020)

5.3 ความแม่นยำ (Accuracy)

ศึกษาในรูปแบบร้อยละการได้กลับคืน (% Recovery) คำนวณจากความเข้มข้นของค่าที่วัดได้ของสารมาตรฐานที่เติมลงไปรวมกับความเข้มข้นที่มีอยู่เดิม (Spike sample) หักลบความเข้มข้นที่มีอยู่เดิม (Unspike) แล้วหารด้วยความเข้มข้นที่เติมลงไป คำนวณเป็นค่าร้อยละการได้กลับคืนจากการเติมสารมาตรฐานลงในตัวอย่าง

โดยปกติการศึกษาร้อยละการได้กลับคืนในตัวอย่างของเหลว ของแข็งหรือของเหลวหนืด ตัวอย่าง unspike และ spike sample ต้องชั่งน้ำหนักให้ใกล้เคียงกันเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่ากันได้ง่าย และจำเป็นอย่างมากสำหรับสารที่สนใจที่มีอยู่ในตัวอย่างในสัดส่วนปริมาณมาก ซึ่งในทางปฏิบัติจริงค่อนข้างทำได้ยากในการชั่งตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์เพื่อการ spike ให้มีน้ำหนักเท่ากับตัวอย่าง unspike ที่ชั่งไว้เริ่มแรก เพราะลักษณะตัวอย่างที่มีลักษณะหนืดทำให้ควบคุมน้ำหนักยาก ต้องใช้เวลานาน ซึ่งเวลานานขึ้นอาจทำให้แอลกอฮอล์ส่วนประกอบ

ระเหยออกไปจากเจลทำให้ค่าที่ได้ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงคือมีค่าลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่าน้ำหนักจริงช่วงน้ำหนัก 95 - 105 mg ที่ซึ่งได้ของเจลแอลกอฮอล์ สำหรับทั้ง unspike และ spike sample โดย spike sample จะเติมสารมาตรฐานตามช่วงความเป็นเส้นตรงที่ 3 ระดับความเข้มข้นคือระดับ 1 เข้มข้น 0.3 mL/L ระดับ 2 เข้มข้น 0.9 และระดับ 3 เข้มข้น 1.5 mL/L สำหรับเมทานอล ไอโซโพรพานอล และระดับ 1 เข้มข้น 15.0 mL/L ระดับ 2 เข้มข้น 21.0 และระดับ 3 เข้มข้น 27.0 mL/L สำหรับเอทานอลลงในตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์ที่ชั่งน้ำหนักไว้ ปรับปริมาตรด้วยตัวทำละลายน้ำ DI ให้ได้ปริมาตร 5 mL แต่ละระดับความเข้มข้นของ spike sample จะนำมาคำนวณร้อยละการได้กลับคืนโดยใช้สมการที่ออกแบบขึ้นเองสำหรับสมการที่ 1 และ

สมการที่ 2 ที่ได้ดัดแปลงจากสมการคำนวณค่าร้อยละการได้กลับคืนตาม AOAC (1998) โดยค่าร้อยละการได้กลับคืนของการสกัดสารที่ยอมรับได้อ้างอิงจาก AOAC (2016) คืออยู่ในช่วง 90-107% สำหรับช่วงความเข้มข้นของเมทานอล ไอโซโพรพานอลของระดับความเข้มข้นที่ 1 ของ spike sample (ความเข้มข้นของสัญญาณตรวจวัด 0.01%) และอยู่ในช่วง 95-105% สำหรับช่วงความเข้มข้นของเมทานอล ไอโซโพรพานอลของระดับความเข้มข้นที่ 2 - 3 ของ spike sample (ความเข้มข้นของสัญญาณตรวจวัด 0.1%) และอยู่ในช่วง 97 - 103% สำหรับช่วงความเข้มข้นของเอทานอล ที่ระดับความเข้มข้นที่ 1 - 3 ของ spike sample (ความเข้มข้นของสัญญาณตรวจวัด 1.0%) (AOAC, 2016)

$$C_{su} = \frac{(W_{sp} - W_u) \times C_U}{W_u} \quad \text{สมการที่ 1}$$

$$\% \text{ Recovery} = \left(\frac{C_F - (C_U + C_{su})}{C_A} \right) \times 100 \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ C_{su} คือ ความเข้มข้นส่วนต่างจากการชั่งน้ำหนักระหว่าง spike sample และ unspike หน่วย mL/L
 W_{sp} คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐานลงไป (spike sample) หน่วย mg
 W_u คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ไม่มีการเติมสารมาตรฐาน (unspike) หน่วย mg
 C_F คือ ความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ของสารที่เติมรวมกับที่มีอยู่เดิม (spike sample) หน่วย mL/L
 C_U คือ ความเข้มข้นของสารในตัวอย่างที่ไม่มีการเติมสารมาตรฐาน (unspike) หน่วย mL/L
 C_A คือ ความเข้มข้นของสารมาตรฐานที่เติมลงไปในการตรวจวัด หน่วย mL/L

5.4 ความเที่ยง (Precision)

ศึกษาในรูปแบบร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นที่ตรวจพบจากเครื่อง HS-GC-FID ของแอลกอฮอล์ส่วนประกอบในตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์ที่เติมสารมาตรฐาน 3 ระดับความเข้มข้น (ช่วงความเข้มข้นเดียวกับการศึกษาร้อยละการได้กลับคืน) ความเข้มข้นละ 2 ซ้ำ และทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วรายงานความสามารถในการทดสอบซ้ำในรูปแบบ

%RSD โดยค่าความเที่ยงที่ยอมรับได้ควรน้อยกว่า 6% ของระดับความเข้มข้นที่ 1 และน้อยกว่า 8% ของระดับความเข้มข้นที่ 2 - 3 สำหรับช่วงความเข้มข้นของเมทานอล ไอโซโพรพานอล และน้อยกว่า 4% สำหรับช่วงความเข้มข้นของเอทานอล (AOAC, 2016)

6. ขั้นตอนการหาความหนาแน่นของตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์

วิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์ด้วยเครื่อง True density analyzer โดยตัวเครื่องใช้หลักการการแทนที่พื้นที่ว่างในถ้วยใส่ตัวอย่างด้วยแก๊สฮีเลียม เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง กระบวนการวิเคราะห์เริ่มจากการชั่งถ้วยใส่ตัวอย่างขนาดปริมาตร 3.5 มิลลิลิตรบนเครื่องชั่ง 5 ตำแหน่ง ใส่ตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์ประมาณ 2 ใน 3 ของถ้วยใส่ตัวอย่าง บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน หลังจากนั้นนำถ้วยใส่ตัวอย่างใส่ลงในเครื่อง True density analyzer ทำการทดสอบ 10 รอบ จากนั้นบันทึกค่าความหนาแน่นเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบในหน่วย g/mL

7. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์

การชั่งตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์จะทำการชั่งตัวอย่างลงในขวดเสตสเปซที่ใช้วิเคราะห์โดยตรง ซึ่งเป็นขวดปากกว้าง ง่ายในการเติมตัวอย่างที่เป็น

ลักษณะเหลวหนืด และลดการถ่ายโอนภาชนะวิเคราะห์ช่วยลดการระเหยของแอลกอฮอล์ โดยน้ำหนักที่ชั่งช่วงน้ำหนัก 95 - 105 mg จากนั้นบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน เติมตัวทำละลายน้ำ DI เพื่อปรับปริมาตรให้ได้ 2 mL โดยปริมาณของตัวทำละลายน้ำ DI ที่ใช้ในการปรับปริมาตรจะคำนวณจากสมการที่ 3 จากนั้นเขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสมสาร (Vortex mixer) ประมาณ 0.5 นาทีแล้วนำสารละลายตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์ในขวดเสตสเปซไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HS-GC-FID

เมื่อได้ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง HS-GC-FID เทียบหาความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ส่วนประกอบแต่ละชนิด ซึ่งคือ เมทานอล ไอโซโพรพานอล และเอทานอล จากสมการเส้นตรงของช่วงการวิเคราะห์ของเครื่องมือ จากนั้นนำความเข้มข้นที่ได้มาคำนวณเป็นความเข้มข้นร้อยละโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ในเจลแอลกอฮอล์ด้วยสมการที่ 4

$$V_{\text{solvent}} = 2 - \frac{W_s}{d_{\text{gel}}} \quad \text{สมการที่ 3}$$

เมื่อ V_{solvent} = ปริมาตรสารละลาย DI ที่ใช้ปรับปริมาตร หน่วย mL
 W_s = น้ำหนักตัวอย่างที่ชั่งได้ หน่วย g
 d_{gel} = ความหนาแน่นของเจลแอลกอฮอล์ หน่วย g/mL

$$\%v/v = \left(\frac{C_{\text{Alc}} \times V_{\text{sol}} \times d_{\text{gel}}}{W_s} \right) \times 100 \quad \text{สมการที่ 4}$$

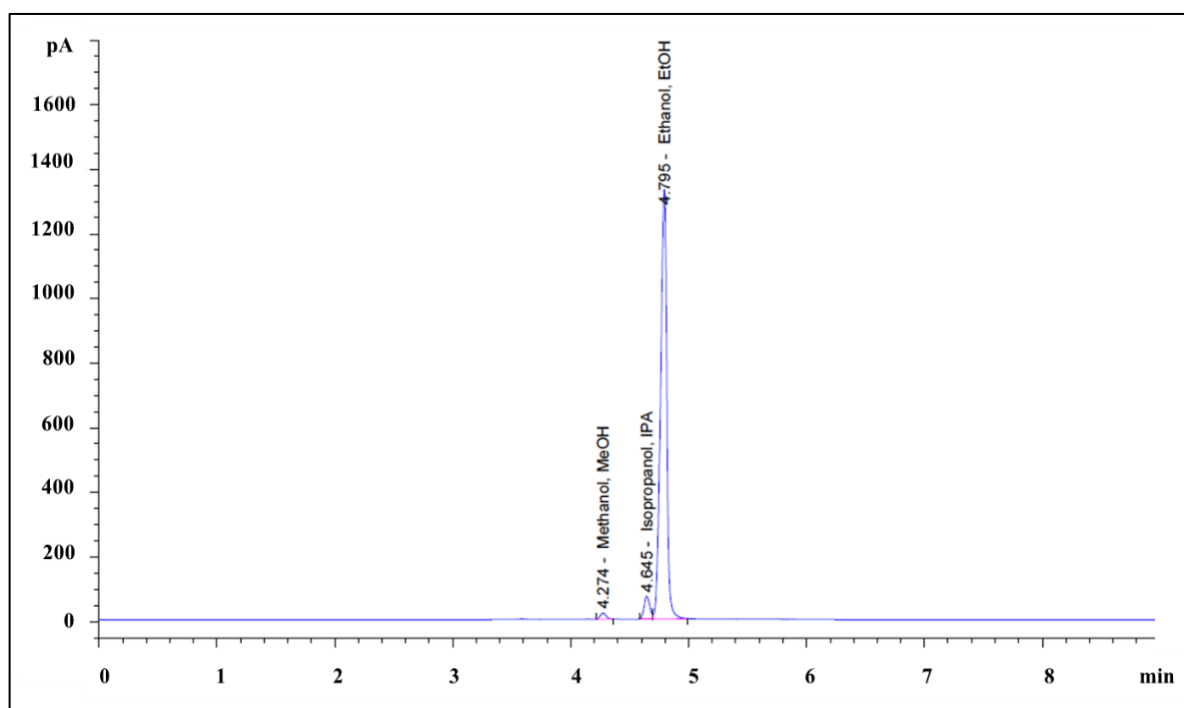
เมื่อ $\%v/v$ = ร้อยละ โดยปริมาตรของแอลกอฮอล์แต่ละชนิด
 C_{Alc} = ความเข้มข้นแอลกอฮอล์ที่วิเคราะห์ได้ หน่วย mL/L
 V_{sol} = ปริมาตรสารละลายรวมในขวดเสตสเปซ หน่วย L
 d_{gel} = ความหนาแน่นของเจลแอลกอฮอล์ หน่วย g/mL
 W_s = น้ำหนักตัวอย่างที่ชั่งได้ หน่วย g

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการทดสอบความจำเพาะของแอลกอฮอล์

ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ในเจล เมื่อใช้สภาวะการวิเคราะห์ของเครื่อง HS-GC-FID แสดงโครมาโทแกรมของตัวอย่างดังภาพที่ 1 ซึ่งโครมาโทแกรมที่ได้ให้พิกของสัญญาณแยกออกจากกันได้ชัดเจน มีค่าเวลาในการคงอยู่ (Retention time) ของเมทานอล ไอโซโพรพานอล และเอทานอล เท่ากับ 4.274, 4.645 และ 4.795 นาทีตามลำดับและค่าการแยก

(Resolution) มีค่ามากกว่า 1.5 ทุกสารประกอบ ซึ่งแสดงถึงการแยกของพิกของสัญญาณได้ชัดเจนการซ้อนทับกันของพิกน้อยกว่า 0.15% ค่าความสมมาตร (Symmetry) ของสัญญาณของพิก ซึ่งเป็นค่าแสดงความสมมาตรของพิกอยู่ในช่วง 0.84 - 1.49 สำหรับจำนวนชั้นการแยกของสาร (Plate) แสดงประสิทธิภาพของคอลัมน์อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการแยกสารด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีจำนวน Plate ที่ได้อยู่ในช่วง 37,912 - 42,022 plate (Harris, 2010; Constantinos, 2018)



ภาพที่ 1 โครมาโทแกรมของเมทานอล ไอโซโพรพานอล และเอทานอลในตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์

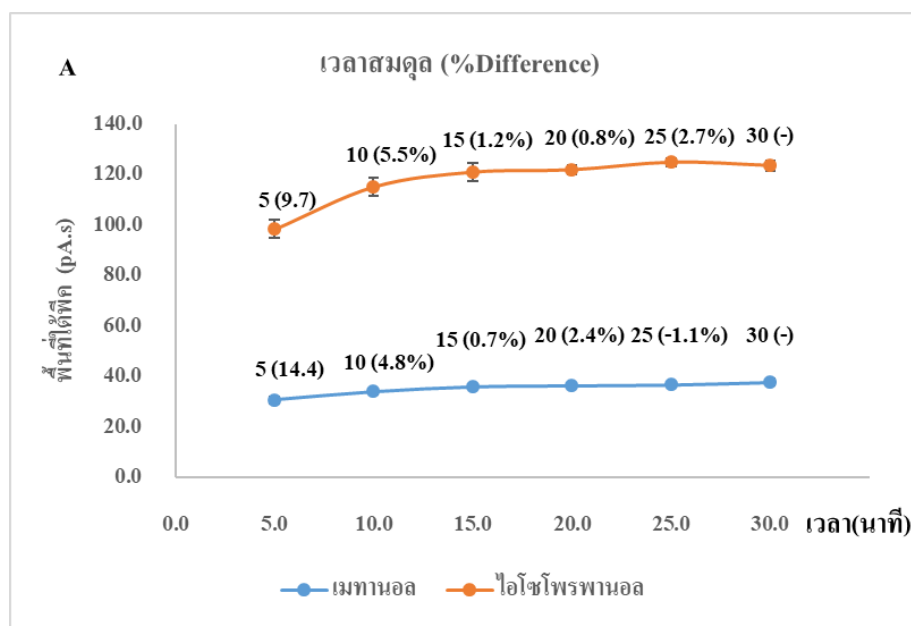
2. เวลาที่เหมาะสมของเทคนิคเสตสเปซ

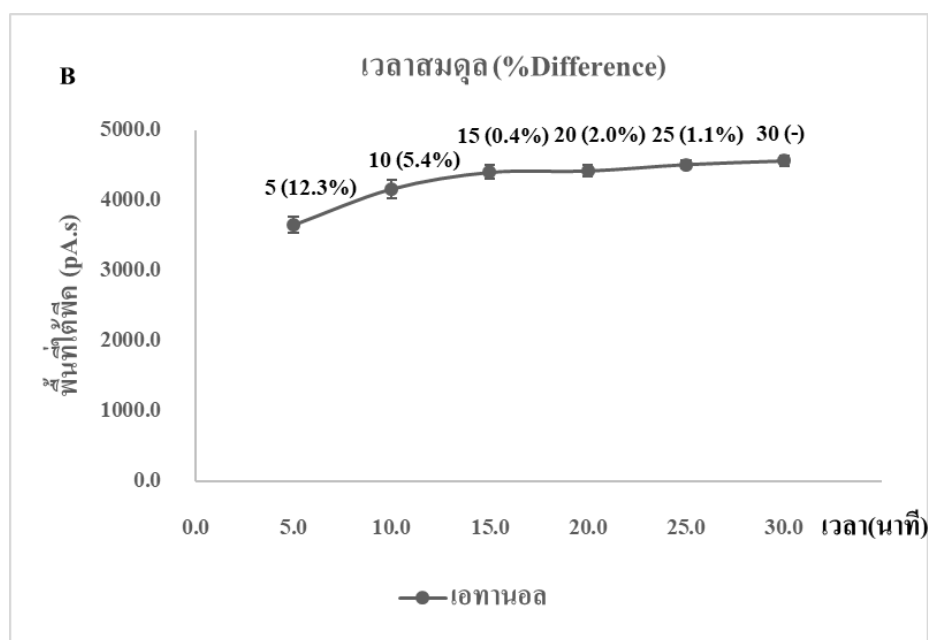
จากการศึกษาเวลาที่เหมาะสมของเทคนิคเสตสเปซโดยเลือกความเข้มข้นที่ศึกษาและตรวจวัดโดยเครื่อง HS-GC-FID จำลองการวิเคราะห์ให้สอดคล้องกับกรณีการวิเคราะห์ตัวอย่างจริง สำหรับปริมาณความเข้มข้นหลังคำนวณเป็นร้อยละโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ในเจลแอลกอฮอล์ด้วยสมการที่ 4 จะได้ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร

(%v/v) ที่ความเข้มข้นตรวจพบ 0.6 mL/L สำหรับเมทานอล ไอโซโพรพานอล และร้อยละ 70 โดยปริมาตร (%v/v) ที่ความเข้มข้นตรวจพบ 39.2 mL/L สำหรับเอทานอล (C_{Alc}) เมื่อปริมาตรสารละลายในขวดเสตสเปซ 0.002 L (V_{sol}) (กำหนดความหนาแน่น 0.8946 g/mL (d_{gel}) และน้ำหนักตัวอย่าง 0.10000 g (W_s))

เนื่องจากเวลาในการวิเคราะห์ของเทคนิค HS-GC-FID มาจากสองส่วนคือ เวลาสมดุลของการสกัดสารด้วยเทคนิคเฮดสเปซ และเวลาการวิเคราะห์ของเครื่อง GC-FID ซึ่งเวลาการวิเคราะห์ห้ต่อตัวอย่างมีผลต่อเวลาการวิเคราะห์รวม ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายการวิเคราะห์ที่เพิ่มขึ้นหากเวลาการวิเคราะห์ต่อตัวอย่างนานขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาแสดงดังภาพที่ 2 เวลาสมดุลที่เหมาะสมของการสกัดด้วยเทคนิคเฮดสเปซหาได้จากร้อยละความต่าง (%Difference) ซึ่งคำนวณจาก $100 - ((\text{พื้นที่พีคของเวลาศึกษาตั้งต้น} / \text{พื้นที่พีคของเวลาศึกษาถัดไป}) \times 100)$ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเวลาการสกัดที่นานขึ้น ร้อยละความต่างของแอลกอฮอล์ทั้ง 3 สารประกอบจะลดลงด้วย (ดังข้อมูลในวงเล็บของแต่ละเวลาสกัดดังภาพที่ 2) จนถึงสมดุลที่เวลา 15 นาทีร้อยละความต่างกับเวลาสกัดถัดไปของแอลกอฮอล์ทั้ง 3 สารประกอบจะมีค่าประมาณร้อยละ 1 ซึ่งมีความแตกต่างกันน้อย แต่เวลาการสกัดที่นานเกินไป (20, 25 และ 30 นาที) จะส่งผลต่อเวลาในการวิเคราะห์ และหากเลือกเวลาการสกัดที่น้อยกว่า 15 นาที (เวลา 5 และ 10 นาที) นอกจากผล

ร้อยละความต่างที่มีค่ามากกว่าแล้ว เมื่อตัวอย่างสกัดแล้วเสร็จด้วยเครื่อง HS จะต้องวิเคราะห์ห้ต่อด้วย GC-FID ที่ใช้เวลาวิเคราะห์ 9 นาที เวลาทำงานของแกนกลหีบสลับขวดเฮดสเปซ 1 นาที และเวลาหลังทดสอบ (Post run) ของเครื่อง GC-FID เพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากการทดสอบครั้งก่อนหน้า (Carry over) 2 นาที สรุปการสกัดด้วย HS ที่เวลา 5 หรือ 10 นาทีก็จะมีเวลาในการวิเคราะห์ร่วมกับเครื่อง GC-FID ไม่น้อยกว่า 13 นาที ดังนั้นเวลาที่ศึกษา 15 นาทีจึงถูกเลือกเป็นเวลาสมดุลที่เหมาะสมของเครื่อง HS ซึ่งสอดคล้องตามเวลาในการวิเคราะห์ของเครื่อง GC-FID ที่ใช้เวลาในการวิเคราะห์แยกพีคได้ภายใน 5 นาทีสำหรับเวลาการตรวจวัดของเครื่อง GC-FID ทั้งหมด 9 นาที ซึ่งในกระบวนการวิเคราะห์แบบอัตโนมัติการสกัดด้วยเครื่อง HS และการวิเคราะห์สารด้วยเครื่อง GC-FID จะดำเนินการควบคู่กันตั้งแต่การฉีดสารครั้งที่สองเป็นต้นไป ทำให้เวลาการวิเคราะห์จริงคือประมาณ 15 นาทีต่อการวิเคราะห์เช่นกัน





ภาพที่ 2 ผลของเวลาสมมูลในการสกัด (A) เมทานอล ไอโซโพรพานอล และ (B) เอทานอล (n = 5)

3. การศึกษาประสิทธิภาพของวิธี (Analytical performances)

3.1 ช่วงความเป็นเส้นตรง

จากผลการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานและพื้นที่ผิวที่ได้ออกแต่ละความเข้มข้น แสดงข้อมูลดังตารางที่ 2 พบว่าในช่วงความเข้มข้น 0.02, 0.04, 0.20, 1.00, 2.00 และ 4.00 mL/L ของเมทานอล ไอโซโพรพานอล และ 0.27, 0.54, 2.70, 13.50, 27.00 และ 54.00 mL/L ของเอทานอลมีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มากกว่า 0.9990 และเมื่อใช้สมการที่ 4 ในการคำนวณช่วงความเป็นเส้นตรงของวิธีจะครอบคลุมตามเกณฑ์ที่กำหนดของกระทรวงสาธารณสุขที่กำหนดเมทานอลในตัวอย่างไม่เกินร้อยละ 5 โดยปริมาตร และเอทานอลควรมีในตัวอย่างมากกว่าร้อยละ 70 โดยปริมาตร คือเมทานอลมีช่วงการวิเคราะห์ร้อยละ 0.04 - 7.06 โดยปริมาตร และเอทานอลช่วงการวิเคราะห์ร้อยละ 0.48 - 96.62 โดยปริมาตร ส่วนไอโซโพรพานอลจะศึกษาช่วงการวัดที่ปริมาณน้อยเช่นเดียวกับเมทานอล เนื่องจากมัก

พบในตัวอย่างจริงในช่วงปริมาณน้อย แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่พัฒนาขึ้นสามารถบอกร้อยละโดยปริมาตรในช่วงที่ครอบคลุมการใช้งาน คือช่วงความเข้มข้นต่ำ สำหรับเมทานอลที่เป็นสารต้องห้ามที่ไม่ควรมีเกินร้อยละ 5 โดยปริมาตรและไอโซโพรพานอลที่เป็นแอลกอฮอล์ปนเปื้อนในเอทานอลจากขั้นตอนการผลิต และวิธีการมีช่วงการวิเคราะห์ที่กว้างเมื่อเทียบกับรายงานวิจัยที่มีรายงานก่อนหน้านี้คือช่วงร้อยละ 50 - 100 โดยปริมาตร (Thitisaksakul *et al.*, 2021) สำหรับเอทานอลที่เป็นสารที่ต้องการให้มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 70 โดยปริมาตร เพื่อการยับยั้งหรือฆ่าเชื้อโรค

3.2 ขีดจำกัดการตรวจวัด และขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณ

จากการศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดที่ให้สัญญาณของสารต่อสัญญาณรบกวน $S/N \geq 3$ และ $S/N \geq 10$ เพื่อหา LOD และ LOQ ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2 โดย LOD, LOQ ที่เครื่องมือวัดได้ของเมทานอล และเอทานอล มีค่าเท่ากับ 0.01 และ 0.02 mL/L ตามลำดับ และเมื่อนำมาคำนวณ LOD, LOQ

ของวิธีด้วยสมการที่ 4 จะได้เท่ากับร้อยละ 0.02 และ 0.04 โดยปริมาตร ตามลำดับ ส่วนของไอโซโพรพานอล แสดง LOD, LOQ ที่เครื่องมือวัดได้คือ 0.005 และ 0.01 mL/L และคำนวณขีดจำกัดของวิธีด้วยข้อกำหนดเดียวกันแสดง LOD, LOQ ของวิธีร้อยละ 0.01 และ 0.02 โดยปริมาตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพียงพอสำหรับการตรวจวัดสารที่สนใจที่เป็นองค์ประกอบหลักในตัวอย่าง โดยขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณที่ต่ำของเมทานอล และเอทานอล เมื่อเทียบกับรายงานวิจัยที่มีการรายงานก่อนหน้านี้ที่มีขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 1.81 - 1.76 โดยปริมาตร (Vivon and Nakniyom, 2021) ทำให้วิธีที่นำเสนอมีความสามารถในการวิเคราะห์สารปนเปื้อนปริมาณน้อยได้ดี

3.3 ร้อยละการได้กลับคืนและความเที่ยงของวิธี

จากการวิเคราะห์ตัวอย่าง unspike และ spike sample แสดงผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ (C_{AIC}) ของ เมทานอล ไอโซโพรพานอล และเอทานอลด้วยเครื่อง HS-GC-FID และได้แสดงการคำนวณเป็นหน่วยร้อยละโดยปริมาตร (%v/v) ด้วยสมการคำนวณที่ 4 พร้อมค่าความเที่ยง (Precision) แสดงข้อมูลที่ได้ ดังตารางที่ 3 ค่าความเที่ยงของการวิเคราะห์แอลกอฮอล์ทั้ง 3 ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 3.81 - 5.30 และ 3.19 - 5.36% สอดคล้องตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของ AOAC (2016) (น้อยกว่า 6 หรือ 8% ตามแต่ระดับความเข้มข้นตรวจวัด) สำหรับเมทานอล ไอโซโพรพานอลตามลำดับ และ 0.95 - 1.84% สอดคล้องตามเกณฑ์ คือน้อยกว่า 4% สำหรับเอทานอล

ตารางที่ 2 แสดงช่วงความเป็นเส้นตรง ขีดจำกัดการตรวจวัด และขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณของ เมทานอล ไอโซโพรพานอล และเอทานอล

พารามิเตอร์	เมทานอล	ไอโซโพรพานอล	เอทานอล
ช่วงความเป็นเส้นตรงของเครื่องมือ (mL/L)	0.02 - 4.00	0.02 - 4.00	0.27 - 54.00
ช่วงความเป็นเส้นตรงของวิธี (%v/v)	0.04 - 7.16	0.04 - 7.16	0.48 - 96.62
กราฟมาตรฐาน (Calibration curve)	$y = 54.49x + 1.26$	$y = 182.57x + 9.86$	$y = 113.68x + 58.06$
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)	0.9998	0.9990	0.9995
LOD ของเครื่องมือ (mL/L)	0.01	0.005	0.01
LOD ของวิธี (%v/v)	0.02	0.01	0.02
LOQ ของเครื่องมือ (mL/L)	0.02	0.01	0.02
LOQ ของวิธี (%v/v)	0.04	0.02	0.04

หมายเหตุ น้ำหนักตัวอย่าง $W_s = 0.10000$ g ความหนาแน่น $d_{gel} = 0.8946$ g/mL ปริมาตรสารละลาย $V_{sol} = 0.002$ L

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นที่วัดได้ของแอลกอฮอล์ส่วนประกอบในเจลแอลกอฮอล์

W_s (g)	เมทานอล			ไอโซโพรพานอล			เอทานอล		
	Spike (mL/L)	C_{Alc} (mL/L)	%v/v	Spike (mL/L)	C_{Alc} (mL/L)	%v/v	Spike (mL/L)	C_{Alc} (mL/L)	%v/v
0.10422± 0.00066	-	-	-	-	-	-	-	16.17 ± 0.26	28.00 ± 0.43
0.10429± 0.00059	0.3	0.29 ± 0.02	0.51 ± 0.03	0.3	0.29 ± 0.02	0.49 ± 0.02	15.0	31.15 ± 0.30	53.90 ± 0.51
0.09707± 0.00150	0.9	0.86 ± 0.04	1.59 ± 0.06	0.9	0.85 ± 0.03	1.58 ± 0.07	21.0	35.98 ± 0.59	66.88 ± 1.15
0.10119± 0.00128	1.5	1.44 ± 0.05	2.57 ± 0.11	1.5	1.44 ± 0.07	2.57 ± 0.13	27.0	42.75 ± 0.79	76.24 ± 0.48
Precision (%RSD)		3.81 - 5.30			3.19 - 5.36			0.95 - 1.84	

หมายเหตุ ความหนาแน่น $d_{gel} = 0.9022$ g/mL ปริมาตรสารละลาย $V_{sol} = 0.002$ L

และเมื่อนำผลของความเข้มข้นแอลกอฮอล์ส่วนประกอบที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง HS-GC-FID แต่ละระดับความเข้มข้นที่เดิมสารมาตรฐานลงไปทำการคำนวณผลร้อยละการได้กลับคืนด้วยสมการที่ 1 - 2 ที่สร้างขึ้น พบว่าร้อยละการได้กลับคืนของเมทานอล ไอโซโพรพานอล และเอทานอล ในเจลแอลกอฮอล์แสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งค่าร้อยละการได้กลับคืนเฉลี่ยสำหรับเมทานอล ไอโซโพรพานอลที่ระดับความเข้มข้นที่ 1 อยู่ในช่วง 95.27±5.11 ถึง

97.71±5.18 สอดคล้องตามเกณฑ์ที่ยอมรับตาม AOAC (2016) คือช่วง 90-107% ระดับความเข้มข้นที่ 2 - 3 อยู่ในช่วง 95.05±3.89 ถึง 96.12±4.69 สอดคล้องตามเกณฑ์ที่ยอมรับตาม AOAC (2016) คือช่วง 95-105% และสำหรับเอทานอลค่าร้อยละการได้กลับคืนเฉลี่ยในช่วง 99.58±2.57 ถึง 100.02±2.19 สอดคล้องตามเกณฑ์ที่ยอมรับตาม AOAC (2016) คือช่วง 97-103%

ตารางที่ 4 ร้อยละการได้กลับคืนและความเที่ยงของการวิเคราะห์ เมทานอล ไอโซโพรพานอล เอทานอล

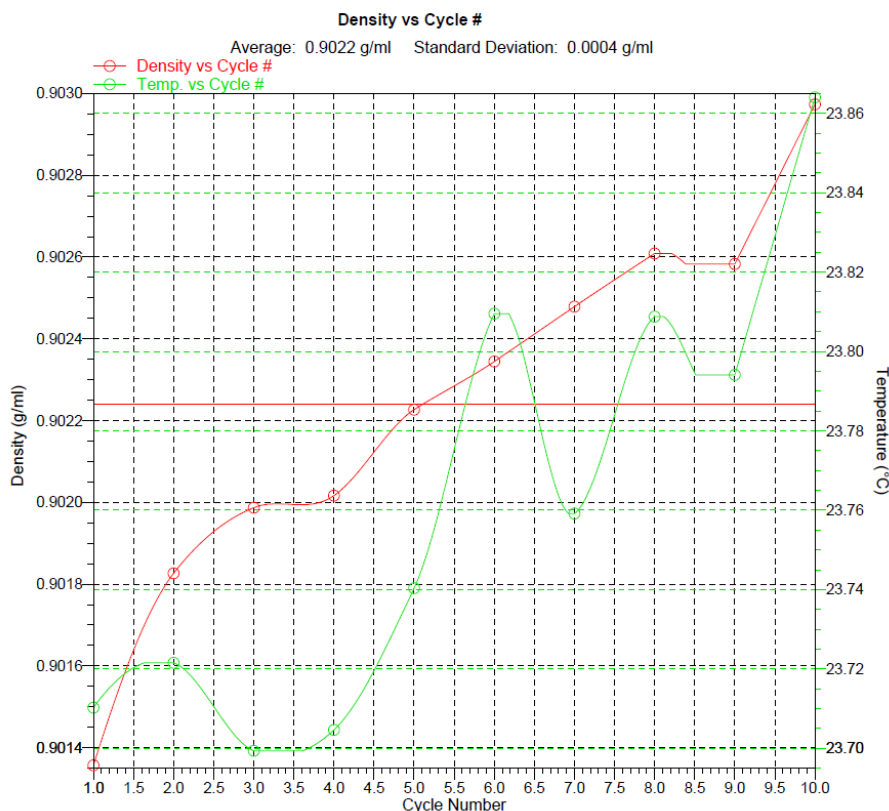
Spike	เมทานอล		ไอโซโพรพานอล		เอทานอล	
	%Recovery	($\bar{x}$ ±SD)	%Recovery	($\bar{x}$ ±SD)	%Recovery	($\bar{x}$ ±SD)
ระดับ 1	93.67 - 103.55	97.71±5.18	91.42 - 101.07	95.27±5.11	98.01 - 101.73	99.78±1.87
ระดับ 2	91.11 - 98.89	95.05±3.89	92.22 - 97.91	95.23±3.04	98.06 - 102.56	99.58±2.57
ระดับ 3	92.00 - 99.23	95.95±3.66	91.33 - 100.70	96.12±4.69	97.82 - 102.13	100.02±2.19

หมายเหตุ $\bar{x}$ = ค่าเฉลี่ย, SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4. ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์

จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์ที่มีการส่งทดสอบ ณ สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ แสดงตัวอย่าง

การวิเคราะห์หาความหนาแน่นที่แท้จริงจากการทดสอบ 10 รอบ ดังภาพที่ 3 ซึ่งแสดงค่าความหนาแน่นเฉลี่ยที่แท้จริงเท่ากับ 0.9022 g/mL ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 23.76 °C ใช้เวลาในการทดสอบ 24 นาทีต่อตัวอย่าง



ภาพที่ 3 แสดงตัวอย่างการวัดค่าความหนาแน่นที่แท้จริงของตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์ด้วยเครื่อง True density analyzer

5. ผลการการศึกษาตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์

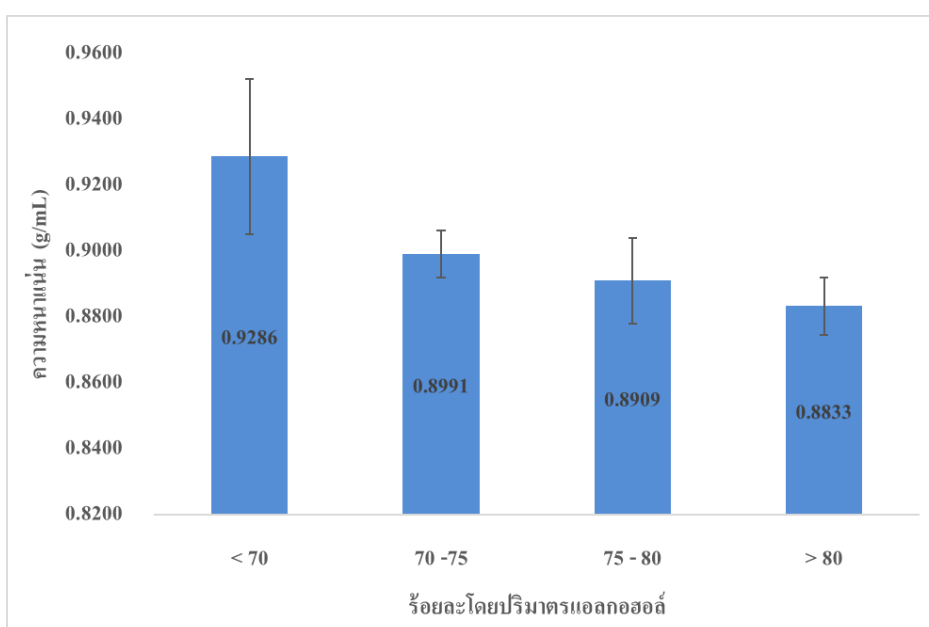
ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยปริมาตรของเมทานอล ไอโซโพรพานอล และเอทานอลในเจลแอลกอฮอล์ โดยใช้สมการที่ 4 ในการคำนวณเพื่อเป็นการสร้างความมั่นใจในการใช้ผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคว่ามีปริมาณแอลกอฮอล์ ไอโซโพรพานอล และเอทานอลมากพอที่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้จริง และยังมีปริมาณเมทานอลไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดที่ทำให้เกิดอันตรายจากความเป็นพิษ นอกจากนี้ข้อมูลยังเป็นประโยชน์กับผู้ผลิตที่ต้องการควบคุมคุณภาพ

ของผลิตภัณฑ์ จากผลการทดสอบทั้งหมด 23 ตัวอย่าง มี 20 ตัวอย่าง ที่มีปริมาณร้อยละโดยปริมาตรรวมของไอโซโพรพานอลและเอทานอลในเจลแอลกอฮอล์เกิน 70 และมี 3 ตัวอย่าง ที่ไม่ผ่านตามเกณฑ์ประกาศของกระทรวงสาธารณสุข โดยทุกตัวอย่างที่ตรวจวัดมีปริมาณเมทานอลไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดคือไม่เกินร้อยละ 5 โดยปริมาตร

จากการทดสอบค่าความหนาแน่นที่แท้จริงจำนวน 23 ตัวอย่าง จัดเรียงข้อมูลตามร้อยละโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ที่ทดสอบได้ จากนั้นแบ่ง

ข้อมูลเป็น 4 ช่วงตามร้อยละโดยปริมาตรของ แอลกอฮอล์ที่ตรวจวัดได้ แสดงข้อมูลดังภาพที่ 4 จาก ข้อมูลแสดงผลค่าความหนาแน่นของตัวอย่างเทียบกับ ปริมาณแอลกอฮอล์ที่ทราบปริมาณจากการ ทดสอบด้วยเครื่อง HS-GC-FID ทำให้ทราบ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นต่อปริมาณ แอลกอฮอล์ในตัวอย่างเจลคือค่าความหนาแน่นที่วัด ได้มากขึ้นจะแปรผกผันกับปริมาณแอลกอฮอล์ที่ น้อยลง ซึ่งหากคิดเฉพาะค่าความหนาแน่นของ ตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์ที่มีร้อยละโดยปริมาตรของ

แอลกอฮอล์ผ่านตามเกณฑ์กระทรวงสาธารณสุขคือ มากกว่าร้อยละ 70 โดยปริมาตร (ข้อมูลลำดับที่ 2 - 4 ของภาพที่ 4) จะมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ $0.8946 \pm 0.0107 \text{ g/mL}$ ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้นี้ นักวิจัย นักศึกษา หรือผู้ที่สนใจที่ต้องการตรวจวัดร้อยละ โดย ปริมาตรของแอลกอฮอล์ด้วยเครื่อง HS-GC-FID หรือเทคนิค direct GC-FID แต่ไม่มีเครื่องวัดความ หนาแน่นที่แท้จริงประจำห้องปฏิบัติการ สามารถใช้ ข้อมูลจากการศึกษานี้ ประยุกต์ใช้เพื่อเปลี่ยนน้ำหนัก เจลแอลกอฮอล์ที่ชั่งได้เป็นปริมาตร ได้ในเบื้องต้น



ภาพที่ 4 ช่วงร้อยละโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ต่อความหนาแน่นเฉลี่ยของเจลแอลกอฮอล์

สรุป

วิธีวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณของแอลกอฮอล์ ในหน่วยร้อยละโดยปริมาตรในเจลแอลกอฮอล์ โดย วิธี HS-GC-FID ที่พัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาคาณิ ตัวอย่างเจลที่มีลักษณะหนืดไม่สามารถเปิดตัวอย่าง ด้วยปริมาตรที่แน่นอนได้ เปลี่ยนเป็นการชั่งน้ำหนัก ตัวอย่างตามที่ใช้อย่างแท้จริง แล้วทำการเปลี่ยนเป็นปริมาตร ด้วยความหนาแน่นที่แท้จริง จากนั้นทำการปรับ ปริมาตรเพื่อการสกัดในขวดเขย่าสเปกก่อนนำไป

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HS-GC-FID ภายใต้อุปกรณ์ ที่เหมาะสม ทั้งนี้สภาวะของ GC ให้ประสิทธิภาพการ แยกที่ดี สารแยกออกจากกันได้ชัดเจนไม่มีการ ซ้อนทับของพีค การเตรียมตัวอย่างทำได้ง่ายเพียงชั่ง ตัวอย่างเจลในภาชนะที่ต้องการทดสอบโดยตรงไม่ ต้องถ่ายโอนภาชนะหลายรอบ และสามารถคำนวณ ผลปริมาณแอลกอฮอล์ที่ตรวจพบจากเครื่อง GC-FID เปลี่ยนเป็นร้อยละโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ในเจล แอลกอฮอล์ได้ง่ายโดยใช้สูตรการคำนวณที่สร้างขึ้น วิธีการที่พัฒนาแสดงชัดเจนจำกัดการตรวจวัดที่ต่ำ และ

ช่วงการวิเคราะห์ที่กว้างเพียงพอต่อการใช้งาน ความแม่นยำและความเที่ยงของการวิเคราะห์อยู่ในเกณฑ์ยอมรับ วิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นนี้มีความสะดวก ไม่ต้องเตรียมตัวอย่างให้ยุ่งยาก ใช้เวลาในการสกัดและวิเคราะห์เพียง 15 นาที ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้ในการตรวจวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ทำให้ทราบว่ามีปริมาณแอลกอฮอล์ ไอโซโพรพานอล และเอทานอลมากพอที่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้จริงและไม่มีปริมาณเมทานอลมากเกินไปเกินเกณฑ์ที่กำหนดที่ทำให้เกิดอันตรายจากความเป็นพิษ เพื่อเป็นประโยชน์กับผู้ผลิตที่ต้องการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เป็นทางเลือกให้กับผู้ที่สนใจวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีลักษณะขุ่นหนืด มีสารเคมีองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์หลากหลาย

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 1998. **Peer-Verified Methods Program Manualon Policies and Procedures.** Association of Official Analytical Chemists.
- AOAC. 2016. **Guidelines for Standard Method Performance Requirements.** Association of Official Analytical Chemists.
- Chun, H.J., Poklis, J.L., Poklis, A. and Wolf, C.E. 2016. Development and Validation of a Method for Alcohol Analysis in Brain Tissue by Headspace Gas Chromatography with Flame Ionization Detector. **Journal of Analytical Toxicology** 40(8): 653-658.
- Constantinos, E. 2018. **Chromatographic Separations.** Available Source: http://195.134.76.37/applets/AppletChrom/AppL_Chrom2.html, January 5, 2022.
- Dhandapani, R. and abaji, R.E. 2020. **Fast Analysis of Alcohol-Based Sanitizers by GC-FID using Zebron™ ZB-WAXPLUS™ GC**

ชนิด ไม่เหมาะในการฉีดสารเข้าเครื่องมือโดยตรงได้นำวิธีการไปประยุกต์ใช้เพื่อการวิเคราะห์งานในลักษณะเดียวกันต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนบุคลากรสร้างผลงานจากการแก้ปัญหาหน้างานผู้งานวิจัย ทีมผู้วิจัยต้องขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

Columns. Applications. Available Source :<https://phenomenex.blob.core.windows.net/documents/fc5a2c40-f03b-4a3d-ba12-357f318fab50.pdf>, January 7, 2022.

Fallica, F., Leonardi, C., Toscano, V., Santonocito, D., Leonardi, P. and Puglia, C. 2021. Assessment of Alcohol-Based Hand Sanitizers for Long-Term Use, Formulated with Addition of Natural Ingredients in Comparison to WHO Formulation 1. **Pharmaceutics** 13(4): 571.

FDA, U.S. Food and Drug Administration. 2020. **Direct Injection Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS) Method for the Detection of Listed Impurities in Hand Sanitizers.** U.S. Food and Drug Administration. Available Source: <https://www.fda.gov/media/141501/download>, February 16, 2022.

- Harris, D.C. 2010. Gas chromatography, pp. 565-594. In Fiorillo, J., ed. **Quantitative Chemical Analysis**. Freeman and Company, New York.
- Ji, J., Deng, C., Shen, W. and Zhang, X. 2006. Field analysis of benzene, toluene, ethylbenzene and xylene in water by portable gas chromatography-microflame ionization detector combined with headspace solid-phase microextraction. **Talanta** 69(4): 894-899.
- Jing, J.L.J., Pei, Yi, T., Bose, R.J.C., McCarthy, J.R., Tharmalingam, N. and Madheswaran, T. 2020. Hand Sanitizers: A Review on Formulation Aspects, Adverse Effects, and Regulations. **International Journal of Environmental Research and Public Health** 17(9): 1-17.
- Jullakan, S., Bunkoed, O. and Pinsrithong, S. 2020. Solvent-assisted dispersive liquid-solid phase extraction of organophosphorus pesticides using a polypyrrole thin film-coated porous composite magnetic sorbent prior to their determination with GC-MS/MS. **Microchimica Acta** 187(677): 1-10.
- Ministry of Public Health. 2018. **Determine the names, quantities and conditions of substances that may be used as ingredients in the manufacture of cosmetics**. Thai government gazette. Available Source: <https://www.fda.moph.go.th>, January 5, 2022. (in Thai)
- Ministry of Public Health. 2020. **Defines the characteristics of alcohol-based cosmetics for hand hygiene that are prohibited to be produced, imported or sold**. Thai government gazette. Available Source: <https://www.fda.moph.go.th>, January 5, 2022. (in Thai)
- SHIMADZU. 2020. **Determination of Alcohol Content in Hand Sanitizers by Headspace GC-FID**. Application News. Available Source: https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com.an/files/pim/pim_document_file/applications/application_note/13627/ad0235.pdf, January 7, 2022.
- Shrivastava, A. 2011. Methods for the determination of limit of detection and limit of quantitation of the analytical methods. **Chronicles of Young Scientists** 2(1): 21-25.
- Snow, N.H. and Slack, G.C. 2002. Head-space analysis in modern gas chromatography. **Trends in Analytical Chemistry** 21(9-10): 608-617.
- Thitisaksakul, N., Paengma, S., Parasindecha, I., Muenhong, P., Jarungsirawat, R., Daodee, S. and Tessiri, T. 2021. Analysis of Alcohol Content in Alcohol-based Hand Sanitizer Product from Khon Kaen Province. **Isan journal of phamacertical sciences** 17(3): 59-73. (in Thai)
- Tiscione, N.B., Alford, I., Yeatman, D.T. and Shan, X. 2011. Ethanol analysis by headspace gas chromatography with simultaneous flame-ionization and mass spectrometry detection. **Journal of Analytical Toxicology** 35(7): 501-511.
- Van Loco, J., Elskens, M., Croux, C. and Beernaert, H. 2002. Linearity of calibration curves: use and misuse of the correlation coefficient.

Accreditation and Quality Assurance

7(7): 281-285.

Vivon, M. and Nakniyom, W. 2021. Method Validation of Alcohol Contents in Alcohol-based Hand Sanitizer Products Using Gas-chromatography. **Bulletin of the Department of Medical Sciences** 62(3): 268-280. (in Thai)

ผลของเอนไซม์เพกตินเอสและอุณหภูมิในการสกัดต่อปริมาณแอนโทไซยานิน จากลูกหว้า (*Syzygium cumini* Skeels)

Effect of Pectinase Enzyme and Extraction Temperature on Anthocyanins Content from Black Plum (*Syzygium cumini* Skeels)

รวินิภา ศรีมูณ^{1*}, สมยศ สันติมาลัย², ศิริจันทร์ ตาใจ¹ และ พรสินี ดาราพงษ์¹

Rawinipa Srimoon^{1*}, Somyod Santimalai², Sirichan Tachai¹ and Pornsinee Darapong¹

Received: 20 September 2021, Revised: 12 July 2022, Accepted: 25 July 2022

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณเอนไซม์เพกตินเอสและอุณหภูมิ ต่อการสกัดแอนโทไซยานินจากลูกหว้า (*Syzygium cumini* Skeels) โดยใช้เอนไซม์เพกตินเอสความเข้มข้นร้อยละ 0.05-0.5 โดยปริมาตร และอุณหภูมิ 3 ระดับ คือ อุณหภูมิห้อง (32-35 องศาเซลเซียส), 50 และ 60 องศาเซลเซียส เทียบกับวิธีสกัดแบบดั้งเดิม (ไม่ใช้เอนไซม์) ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการสกัดแอนโทไซยานินขึ้นกับความเข้มข้นของเอนไซม์และอุณหภูมิ เมื่อเพิ่มปริมาณเอนไซม์เพกตินเอสและอุณหภูมิ ปริมาณแอนโทไซยานินที่สกัดได้ในรูป cyanidin-3-glucoside เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดเมื่อใช้เอนไซม์เข้มข้นร้อยละ 0.2 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (11.76 ± 0.012 มิลลิกรัม Cyd-3-glu ต่อกรัม) สูงกว่าการสกัดแบบดั้งเดิมซึ่งไม่ใช้เอนไซม์ที่อุณหภูมิเดียวกัน 39 เท่า ($p < 0.05$) ปริมาณแอนโทไซยานินจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของเอนไซม์มากกว่าร้อยละ 0.2 และอุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่วนฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยสรุป การใช้เอนไซม์เพกตินเอสในสภาวะที่เหมาะสมทำให้ได้ปริมาณแอนโทไซยานินมากขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์เพื่อพัฒนาการสกัดน้ำลูกหว้าให้ได้แอนโทไซยานินสูงสุดต่อไป

คำสำคัญ: แอนโทไซยานิน, เอนไซม์เพกตินเอส, ลูกหว้า

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี ตำบลพลวง อำเภอเขาชะเมา จันทบุรี 22210

¹ Department of Applied Science and Biotechnology, Faculty of Agro-Industrial Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-OK, Chanthaburi Campus, Pluang, Khaokitchakoot, Chanthaburi 22210, Thailand.

² สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตรบูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี ตำบลพลวง อำเภอเขาชะเมา จันทบุรี 22210

² Department of Electrical Engineering, Faculty of Integrated-Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-OK, Chanthaburi Campus, Pluang, Khaokitchakoot, Chanthaburi 22210, Thailand.

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

ABSTRACT

The objective of this research was to study the effect of pectinase enzyme and extraction temperature on anthocyanins content from black plum (*Syzygium cumini* Skeels) using the 0.05-0.5% by volume of enzyme concentration and three levels of extraction temperature: room temperature (32-35 °C), 50 and 60 °C, compared with traditional maceration (non-enzymatic). The results showed that the extraction efficiency depended on enzyme concentration and temperature. Total anthocyanin as cyanidin-3-glucoside rose when the enzyme concentration and extraction temperature increased. The extraction using 0.2% of pectinase at 50 °C yielded the highest anthocyanin content (11.76 ± 0.012 mg Cyd-3-glu/g), 39-folds higher than that of non-enzymatic maceration at the same temperature ($p < 0.05$). The extraction efficiency decreased as the temperature increased because of the enzyme inactivation and anthocyanin decomposition at high temperature. When the concentration of pectinase was over 0.2% and temperature was over 50 °C, anthocyanin contents decreased. In addition, at higher temperature total phenolic content increased but DPPH antioxidant capacity decreased significantly ($p < 0.05$). In conclusion, pectinase-assisted extraction at the appropriate conditions provided higher concentration of anthocyanins for black plum extraction. It is possible to be applied in extracted black plum juice with higher anthocyanins.

Key words: anthocyanins, pectinase enzyme, Black plum (*Syzygium cumini* Skeels)

บทนำ

แอนโทไซยานิน (Anthocyanins) เป็นสารต้านออกซิเดชันประเภทสารประกอบฟีนอลิกในกลุ่มฟลาโวนอยด์ พบมากในผักและผลไม้สีม่วงแดง เช่น เบอร์รี่ องุ่น และกะหล่ำม่วง รูปแบบที่พบมากที่สุดคือ cyanidin-3-glucoside (Chia *et al.*, 2008) มีรายงานบ่งชี้ว่าแอนโทไซยานินสามารถป้องกันการเกิดมะเร็งโรคหลอดเลือดหัวใจ และการติดเชื้อบางชนิดได้ รวมทั้งมีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย (Tiwarei *et al.*, 2010; Oancea and Oprean, 2011) ปริมาณแอนโทไซยานินที่มีผลต่อสุขภาพแตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น การศึกษาของ Guo *et al.* (2016) พบว่าเมื่อรับประทานสารสกัดแอนโทไซยานินวันละ 7.5 มิลลิกรัม ติดต่อกันทุกวัน ช่วยลดปริมาณไขมันในเลือดในคนที่เป็

นโรคอ้วนได้ ในขณะที่ Zhang *et al.* (2020) รายงานว่าผู้ป่วยที่มีภาวะคอเลสเตอรอลในเลือดสูงถ้าได้รับสารสกัดแอนโทไซยานินปริมาณ 320 มิลลิกรัม วันละ 2 ครั้ง ติดต่อกัน 12 สัปดาห์ สามารถลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือดลงได้ การดื่มน้ำผลไม้ที่มีแอนโทไซยานินสูง เช่น น้ำลูกพลัม หรือน้ำเชอร์รี่วันละ 200-300 มิลลิลิตร ติดต่อกัน 12 สัปดาห์ ช่วยลดความดันโลหิตลงได้ 1.6-7.7 มิลลิเมตรปรอท (Igwe *et al.*, 2017; Kent *et al.*, 2017)

แอนโทไซยานินสลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ความเสถียรของโมเลกุลขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ โครงสร้างทางเคมี ความเป็นกรดด่าง อุณหภูมิ สภาพในการเก็บรักษา รวมไปถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการแปรรูป การศึกษาเกี่ยวกับสถานะที่เหมาะสมในการสกัดแอนโทไซยานินจากพืชจึงมีความสำคัญ เนื่องจากจะช่วยรักษาสภาพของแอนโทไซยานินไว้ได้มากที่สุด การสกัดด้วยเอนไซม์ (Enzymatic extraction) เป็นวิธีการที่นิยมใช้

ในการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดสารจากตัวอย่างพืช โดยเฉพาะเอนไซม์เพกตินเอส (Pectinase) ที่จะไปย่อยสลายพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic bond) ที่อยู่ระหว่างกรดกาแลกทูโรนิก (Galacturonic acid) ในโมเลกุลของเพกตินซึ่งเป็นองค์ประกอบในผนังเซลล์ปฐมภูมิของพืชให้สั้นลง (Verma *et al.*, 2018) ส่งผลให้สารออกฤทธิ์สำคัญที่อยู่ในพืชถูกสกัดออกมาได้มากตามไปด้วย โดยเฉพาะกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก แอนโทไซยานิน และฟลาโวนอยด์ (Demir *et al.*, 2001; Zuorro *et al.*, 2016) อีกทั้งเป็นวิธีการที่ไม่ใช้ความร้อนทำให้ลดการสลายตัวของสารที่สนใจ Khandare *et al.* (2011) ทดลองใช้เอนไซม์เพกตินเอสจาก *Aspergillus niger* Teigh ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 พบว่า ช่วยเพิ่มปริมาณแอนโทไซยานินที่สกัดได้ในน้ำเบตลักแครอท (*Daucus carota* ssp. *Sativus*) ได้ 2 เท่า เพิ่มปริมาณสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และความสามารถในการต้านออกซิเดชันได้ร้อยละ 27, 46 และ 30 ตามลำดับ นอกจากนี้เอนไซม์เพกตินเอสแล้วยังมีการใช้เอนไซม์ชนิดอื่นในการสกัดสารต้านออกซิเดชัน ตัวอย่างเช่น เอนไซม์เซลลูเลส เฮมิเซลลูเลส ไชลานเอส อราบิแนนส เป็นต้น แต่ประสิทธิภาพของเอนไซม์เพกตินเอสจะสูงกว่าเอนไซม์ตัวอื่น Pontillo *et al.* (2021) ใช้เอนไซม์หลายชนิดสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากใบโรสแมรี่ (*Rosmarinus officinalis* L.) พบว่าเอนไซม์เพกตินเอสให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระดีพีพีเอชสูงสุด (15.2 ± 0.3 มิลลิกรัมต่อกรัม และ IC_{50} เท่ากับ 14.3 ± 0.8 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ) เมื่อเทียบกับเอนไซม์แอลคาเลส เซลลูเลส เฮมิเซลลูเลส เบนตูลานเนส ไชลานเอส โดไชลานเอส และอะราบิแนนส

การวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณเอนไซม์เพกตินเอสและอุณหภูมิต่อการสกัดแอนโทไซยานินจากลูกหว้า (*Syzygium cumini* Skeels) เทียบกับการสกัดแบบดั้งเดิมที่ไม่ใช้เอนไซม์

(Traditional maceration) ลูกหว้าเป็นผลไม้ที่พบมากในจังหวัดจันทบุรี มีสีม่วงเข้มเนื่องจากมีแอนโทไซยานินสูง โดยเฉพาะในระยะผลสุก รสชาติหวานอมเปรี้ยว นิยมนำมาทำเครื่องดื่มน้ำผลไม้ และไวน์มีประโยชน์ในการรักษาเบาหวาน หลอดลมอักเสบ และโรคที่เกี่ยวข้องกับทางเดินปัสสาวะ (Neelwame *et al.*, 2007) ซึ่งผลจากการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในพัฒนาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแอนโทไซยานินจากลูกหว้าโดยใช้เอนไซม์เพกตินเอส โดยสามารถคงปริมาณแอนโทไซยานิน รวมไปถึงสารประกอบฟีนอลิกและสมบัติในการต้านออกซิเดชันของลูกหว้าไว้ได้มากที่สุด

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์

สารเคมีที่ใช้ในการวิจัยเป็นเกรดวิเคราะห์ (AR grade): โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) กรดแอซิดิก (CH_3COOH) และ โซเดียมแอซิดเตต (CH_3COONa) ของ Univar Ajax Finechem Australia โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ของ Univar Ajax Finechem New Zealand สารละลาย Folin-Ciocalteu phenol reagent ของ Loba Chemie India กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เอทานอล (Ethanol) และเมทานอล (Methanol) ของ Merck Germany ดีพีพีเอช (DPPH หรือ 2,2-diphenyl-1-picryl hydrazyl) โทรล๊อกซ์ (Trolox) กรดแกลลิก (Gallic acid) และเอนไซม์เพกตินเอส (Pectinase from *Aspergillus aculeatus*) ของ Sigma-Aldrich USA สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ของ Libra S22 Biochrom

2. การเตรียมตัวอย่างลูกหว้าและสารสกัดตัวอย่าง

ตัวอย่างลูกหว้า (*Syzygium cumini* Skeels) จากอำเภอเขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรี เก็บช่วงต้นเดือนมิถุนายนซึ่งเป็นช่วงที่ต้นหว้าให้ผลมาก เลือกเก็บในระยะผลสุก ล้างให้สะอาด แล้วนำมาศึกษาทันที แบ่งตัวอย่างลูกหว้าเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 สกัดด้วย

วิธีดั้งเดิมหรือมาซเชอเรนชัน (Maceration) ใช้ลูกหว้าสด 50 กรัม ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายปริมาตร 1 ลิตร (ใช้น้ำสกัดเนื่องจากผลการศึกษานำไปใช้พัฒนาการสกัดน้ำลูกหว้าสำหรับรับประทาน) คิดเป็นอัตราส่วนลูกหว้า:ตัวทำละลาย=5:100 โดยมวลต่อปริมาตร ทำการสกัดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แปรค่าอุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิห้อง (32-35 องศาเซลเซียส) , 50 และ 60 องศาเซลเซียส ชุดที่ 2 สกัดด้วยเอนไซม์เพคตินเนส จาก *Aspergillus aculeatus* ลูกหว้าสด 50 กรัม ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายปริมาตร 1 ลิตร เช่นเดียวกับชุดที่ 1 ออกแบบการทดลองเป็น 3×4 factorial in RCBD โดยศึกษาปัจจัย 2 ปัจจัยร่วมกัน ปัจจัยที่ 1 คือ อุณหภูมิในการสกัด 3 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิห้อง (อยู่ระหว่าง 32-35 องศาเซลเซียส), 50 และ 60 องศาเซลเซียส และปัจจัยที่ 2 คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.5 โดยปริมาตร ตามลำดับ ทำการสกัดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้น นำสารละลายไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เพื่อหยุดการทำงานของเอนไซม์ (โดยปกติเอนไซม์เพคตินเนสจาก *Aspergillus* sp. สามารถทำงานได้ดีที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส pH 8.2 และพบว่ายังสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แต่ประสิทธิภาพการทำงานต่ำลง (Khatri *et al.*, 2015) แต่ในการทดลองนี้ใช้อุณหภูมิในช่วง 30-60 องศาเซลเซียส และไม่ได้ปรับ pH ของตัวอย่าง) ทุกการ

ทดลองนำไปวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินรวมในรูปของ cyanidin-3-glucoside ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระดีพีพีเอช (DPPH assay)

3. การวิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินรวม สารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระดีพีพีเอช

วิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานินรวมใช้วิธี pH difference ตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Golmohamadi *et al.* (2013): ปิเปตสารสกัดจากชุดการทดลองที่ 1 (การสกัดแบบดั้งเดิมด้วยวิธีมาซเชอเรนชัน) และชุดการทดลองที่ 2 (การสกัดด้วยการเติมเอนไซม์เพคตินเนสความเข้มข้นต่าง ๆ) มาทริทเมนต์ละ 2 มิลลิลิตร แบ่งใส่หลอดทดลอง 2 หลอด หลอดละ 1 มิลลิลิตร หลอดที่ 1 เติมน้ำละลาย KCl-HCl pH 1 ปริมาตร 4 มิลลิลิตร หลอดที่ 2 เติมน้ำละลาย acetate buffer pH 4.5 ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 และ 700 นาโนเมตร ทั้งนี้ กำหนดปริมาณแอนโทไซยานินรวมในรูป cyanidin-3-glucoside (mg Cyd-3-glu/g) มวลโมเลกุล 449.2 กรัมต่อโมล สภาพการดูดกลืนโมลาร์ เท่ากับ 26,900 ลิตรต่อเซนติเมตรต่อโมล (Golmohamadi *et al.*, 2013) ดังสมการที่ (1)

$$\text{ปริมาณแอนโทไซยานินรวม (mg/g)} = \left[\frac{(A_{520, \text{pH}1} - A_{700, \text{pH}1}) - (A_{520, \text{pH}4.5} - A_{700, \text{pH}4.5})}{\text{molar extinction coefficient}} \right] \times \text{MW.} \times 1000 \quad (1)$$

เมื่อ $A_{520, \text{pH1}}$ และ $A_{700, \text{pH1}}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 และ 700 นาโนเมตร ที่ pH 1 ตามลำดับ $A_{520, \text{pH4.5}}$ และ $A_{700, \text{pH4.5}}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 และ 700 นาโนเมตร ที่ pH 4.5 ตามลำดับ MW. และ molar extinction coefficient คือ มวลโมเลกุลและสภาพการดูดกลืนโมลาร์ของแอนโทไซยานินในรูป cyanidin-3-glucoside ตามลำดับ

วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมด้วยวิธี Folin-Ciocalteu phenol reagent ตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Wong *et al.* (2006): ปิเปตสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกหรือสารสกัด ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย 10 % v/v Folin-Ciocalteu phenol reagent 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 3 นาที เติมสารละลาย 7.5 % w/v Na_2CO_3 2 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร คำนวณปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมในรูปมิลลิกรัมเทียบกับกรดแกลลิกต่อกรัม (mg GAE/g)

วิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH assay โดยใช้วิธีการที่ดัดแปลงจาก Shimada *et al.* (1992): ผสมสารละลายมาตรฐาน Trolox เข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรหรือสารสกัดปริมาตรต่าง ๆ กับสารละลาย DPPH เข้มข้น 0.04 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 4.5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 5.0 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดนาน 10 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร รายงานฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในรูปของ EC_{50} (Effective concentration) หรือความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระที่ทำให้อนุมูล DPPH ลดลงร้อยละ 50 และค่า TEAC (Trolox equivalent antioxidant capacity) ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g)

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

แต่ละการทดลองทำซ้ำ 3 ซ้ำ รายงานผลในรูปของค่าเฉลี่ย (mean $\pm$ SD.) ทดสอบความแตกต่าง

ของค่าเฉลี่ยโดยใช้สถิติ ANOVA ด้วย Duncan's multiple range test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลของเอนไซม์เพคตินเนสและอุณหภูมิที่มีต่อการสกัดแอนโทไซยานินจากลูกหว้าเทียบกับการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิมแบบมาเซอร์ชันซึ่งไม่ใช่เอนไซม์แสดงใน Table 1 ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเนสระหว่างร้อยละ 0.05-0.2 ปริมาณแอนโทไซยานินที่สกัดได้ในรูปของ Cyd-3-glu เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่จะลดลงเมื่อใช้เอนไซม์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5 สำหรับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH (ในรูปของค่า EC_{50} และ TEAC) จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์จนถึงร้อยละ 0.2 และจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์เป็นร้อยละ 0.5 เช่นเดียวกัน สำหรับผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องซึ่งอยู่ระหว่าง 32-35 องศาเซลเซียส จนถึง 50 องศาเซลเซียส ปริมาณแอนโทไซยานินมีค่าเพิ่มขึ้นทุกระดับความเข้มข้นของเอนไซม์ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60 องศาเซลเซียส ปริมาณแอนโทไซยานินกลับลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ในขณะที่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการสกัดแอนโทไซยานินจากลูกหว้าขึ้นกับปริมาณเอนไซม์เพคตินเนสและอุณหภูมิที่ใช้สกัด (Figure 1) เมื่อใช้เอนไซม์เพคตินเนสที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.2 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณแอนโทไซยานินที่สกัดได้สูงสุด เท่ากับ 11.76 ± 0.012 มิลลิกรัม Cyd-3-glu ต่อกรัม สูงกว่าการสกัดแบบดั้งเดิมซึ่งไม่ใช่เอนไซม์ที่อุณหภูมิเดียวกันถึง 39 เท่า เนื่องจาก

ลูกหว้ามีปริมาณเพกตินสูง เอนไซม์เพกตินเนสจะช่วยสลายพันธะไกลโคซิดิกในโมเลกุลเพกตินทำให้ผนังเซลล์สลายตัวได้ดี จึงสามารถสกัดแอนโทไซยานินและสารประกอบฟีนอลิกออกมาได้มากขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นเอนไซม์สูงกว่าร้อยละ 0.2 ปริมาณแอนโทไซยานินที่สกัดได้ลดลงประมาณร้อยละ 32 เนื่องจากเอนไซม์ที่มากเกินไปจะไปสลายพันธะในแอนโทไซยานินไกลโคไซด์ในโครงสร้างของแอนโทไซยานินทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินลดลงเมื่อใช้เอนไซม์ที่ระดับความเข้มข้นสูง ๆ (Landbo and Meyer, 2004) แต่เอนไซม์ดังกล่าวมีผลน้อยมากต่อการสลายตัวของสารต้านอนุมูลอิสระตัวอื่นเมื่อเทียบกับการสลายตัวของแอนโทไซยานิน ผลการศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับ Khandare *et al.* (2011) ซึ่งพบว่าเมื่อใช้เอนไซม์เพกตินเนสจาก *Aspergillus niger* Teigh เข้มข้นร้อยละ 0.2 เพิ่ม

ปริมาณสารฟอลิฟินอลและฟลาโวนอยด์ที่สกัดได้จากเปลือกแครอท ร้อยละ 27 และ 46 ตามลำดับ เพิ่มปริมาณแอนโทไซยานินได้ 2 เท่า และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นร้อยละ 30 ในขณะที่ Sagu *et al.* (2014) ใช้เอนไซม์เพกตินเนสสกัดน้ำกล้วยหอมซึ่งเป็นผลไม้ที่มีเพกตินสูง โดยใช้เอนไซม์เข้มข้นร้อยละ 0.03 อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส สกัดนาน 108 นาที น้ำกล้วยหอมที่ได้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมสูงกว่าไม่ใช้เอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญ Yazdi *et al.* (2018) ทดลองใช้เอนไซม์ผสมระหว่างเพกตินส เซลลูเลส และแทนเนส สกัดสารต้านอนุมูลอิสระจากถั่วพิสตาชิโอ (*Pistacia vera* L.) พบว่าเพิ่มปริมาณสารสกัดได้ร้อยละ 112 และสารสกัดมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระดีฟิฟิเอชสูงกว่าไม่ใช้เอนไซม์ร้อยละ 71

Table 1 Total anthocyanins, total phenolic compounds and DPPH antioxidant activity of black plum extract using enzymatic extraction with pectinase and traditional maceration method (n=3)

Temperature	Traditional maceration	Concentration of pectinase in enzymatic extraction			
		0.05%	0.1%	0.2%	0.5%
Total anthocyanins (mg Cyd-3-glu/g)					
Room temperature	0.35±0.006 ^a	7.26±0.079 ^b	7.17±0.336 ^b	8.75±0.187 ^c	6.62±0.057 ^d
50 °C	0.30±0.001 ^a	11.59±0.013 ^e	9.08±0.017 ^f	11.76±0.012 ^e	8.01±0.010 ^g
60 °C	0.64±0.007 ^h	5.23±0.005 ⁱ	5.33±0.006 ⁱ	5.96±0.010 ^j	5.47±0.007 ^k
Total phenolic compounds (mg GAE/g)					
Room temperature	0.008±0.000 ^a	3.31±0.043 ^b	3.43±0.013 ^c	4.99±0.008 ^d	3.70±0.004 ^e
50 °C	0.007±0.000 ^a	4.62±0.038 ^f	4.71±0.058 ^f	5.08±0.082 ^g	4.91±0.012 ^d
60 °C	0.010±0.000 ^a	7.84±0.077 ^h	7.55±0.011 ⁱ	7.55±0.145 ⁱ	7.59±0.118 ⁱ
DPPH radical scavenging activity; EC ₅₀ (mg/mL)					
Room temperature	335.88±2.134 ^a	40.07±0.091 ^b	45.60±3.495 ^c	38.55±0.341 ^d	40.73±0.110 ^b
50 °C	364.38±1.695 ^e	74.93±2.796 ^f	55.91±0.258 ^g	51.21±0.331 ^h	53.15±0.714 ⁱ
60 °C	192.70±0.465 ^j	81.74±1.323 ^k	64.67±0.825 ^l	59.55±0.422 ^m	62.91±0.642 ⁿ

Table 1 (continued)

Temperature	Traditional maceration	Concentration of pectinase in enzymatic extraction			
		0.05%	0.1%	0.2%	0.5%
DPPH radical scavenging activity; TEAC (mg/g)					
Room temperature	1.42±0.009 ^a	5.96 ±0.014 ^b	5.26±0.386 ^c	6.19±0.055 ^d	5.86±0.016 ^b
50 °C	1.31±0.006 ^c	3.19±0.118 ^f	4.27±0.019 ^g	4.66±0.030 ^h	4.49±0.061 ⁱ
60 °C	2.48±0.006 ^j	2.92±0.048 ^k	3.69±0.047 ^l	4.01±0.029 ^m	3.79±0.039 ^l

Treatments with the superscript ^(a,b,c,...) in each row or column were significantly different ($p<0.05$).

Room temperature in this study was between 32-35 °C.

ปริมาณเอนไซม์และอุณหภูมิที่ใช้สกัดมีความสัมพันธ์กันเนื่องจากเอนไซม์เป็นสารประเภทโปรตีน เมื่อได้รับความร้อนสูงเกินไปเอนไซม์จะเสียสภาพ ทำให้การทำงานของเอนไซม์ต่ำลง จากผลการทดลองในครั้งนี้เห็นได้ว่า อุณหภูมิส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัดโดยใช้เอนไซม์เพกตินเอส เมื่อใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการสกัดลดลงทุกความเข้มข้นของเอนไซม์ (ลดลงร้อยละ 31-54) ความร้อนทำให้เอนไซม์เพกตินเอส ซึ่งเป็นสารประเภทโปรตีนทำงานได้น้อยลง การศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับ Khatri *et al.* (2015) ซึ่งรายงานว่า เอนไซม์เพกตินเอสจะทำงานได้ดีที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แต่จะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 70 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ Ngadze *et al.* (2018) ใช้เอนไซม์เพกตินเอสสกัดสารประกอบฟีนอลิกจาก *Strychnos cocculoides* ได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส นอกจากนี้แอนโทไซยานินยังเป็นสารสลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ปริมาณที่สกัดได้จึงต่ำลง อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (polyphenoloxidase) จะทำงานได้น้อยลงที่อุณหภูมิสูง ทำให้การสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิกลดลง (Srimoon, 2020) แต่ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับปริมาณแอนโทไซยานิน

นั่นคือ ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเนื่องจากถูกหว่ามีปริมาณแอนโทไซยานินสูงและเป็นสารสำคัญที่ทำให้ถูกหว่ามีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เมื่อแอนโทไซยานินลดลง ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจึงลดลงด้วย

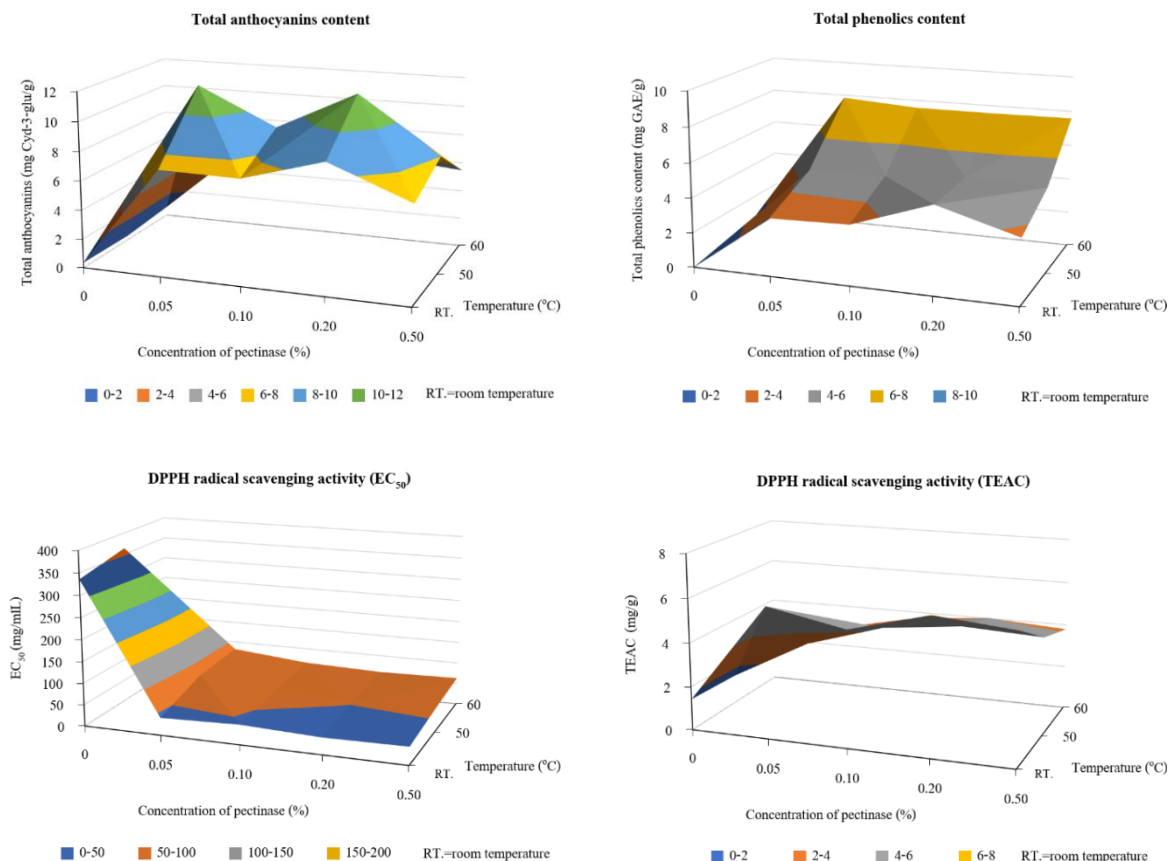


Figure 1 The effect of pectinase concentration and extraction temperature on total anthocyanins, total phenolic contents and DPPH radical scavenging activity (EC₅₀ and TEAC) of black plum extract

การใช้เอนไซม์ในการสกัดร่วมกับตัวทำละลายอาจนำไปประยุกต์ใช้กับเทคนิคการสกัดรูปแบบใหม่ๆ ที่ไม่ใช้ความร้อนได้ เช่น การสกัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก สนามไฟฟ้าแบบพัลส์ หรือการใช้คลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากลดโอกาสการสลายตัวของสารต้านอนุมูลอิสระลงได้ ซึ่งเป็นแนวทางการวิจัยที่น่าสนใจในอนาคต

สรุป

วิธีการสกัดด้วยเอนไซม์ (Enzymatic-assisted extraction) โดยใช้เอนไซม์เพกตินเนสความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยปริมาตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้เป็นตัวทำละลายในอัตราส่วนลูกหว่า:ตัวทำละลาย=5:100 โดยมีผลต่อปริมาณ ระยะเวลาในการสกัด 60 นาที ให้ปริมาณแอนโทไซยานินในรูปของ

cyanidin-3-glucoside สูงกว่าการสกัดด้วยวิธีดั้งเดิม ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณแอนโทไซยานินเมื่อใช้การสกัดด้วยเอนไซม์เพกตินเนส ได้แก่ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเอนไซม์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิทั้งแอนโทไซยานินและเอนไซม์เพกตินเนสอาจสลายตัวได้ แต่เมื่อความเข้มข้นของเอนไซม์มากเกินไป ปริมาณแอนโทไซยานินจะลดลงเนื่องจากเอนไซม์จะไปสลายพันธะในแอนโทไซยานินไกลโคไซด์ หรือเมื่อใช้อุณหภูมิสูงเกินไปเอนไซม์จะเสียสภาพทำให้ทำงานได้น้อยลง อย่างไรก็ตาม การสกัดด้วยเอนไซม์ข้อดี คือ ได้ปริมาณแอนโทไซยานินออกมามากและไม่ทำให้แอนโทไซยานินสลายตัว หากใช้อุณหภูมิและความเข้มข้นของเอนไซม์ที่เหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ผู้วิจัย ขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยีชีวภาพ สำหรับสถานที่ทำการวิจัย และ เกษตรกรในตำบลคลองพลู อำเภอเขาฉกรรจ์ จังหวัด จันทบุรี สำหรับการอำนวยความสะดวกในการเก็บ ตัวอย่างลูกหว้าในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Chia, L. S., Kong, J.M., Goh, N.K., Chia, T.F. and Brouillard, R. 2008. Analysis and biological activities of anthocyanins. **Phytochemistry** 64: 923-933.
- Demir, N., Acar, J., Sarioğlu, K. and Mutlu, M. 2001. The use of commercial pectinase in fruit juice industry part 3: immobilized pectinase for mash treatment. **Journal of Food Engineering** 47(4): 275-280.
- Golmohamadi, A., Möller, G., Powers, J. and Nindo, C. 2013. Effect of ultrasound frequency on antioxidant activity, total phenolic and anthocyanin content of red raspberry puree. **Ultrasonic Sonochemistry** 20: 1316-1323.
- Guo., X., Yang, B., Tan, J., Jiang, J. and Li, D. 2016. Associations of dietary intakes of anthocyanins and berry fruit with risk of type-2 diabetes mellitus: a systematic review and meta- analysis of prospective cohort studies. **European Journal of Clinical Nutrition** 70(12): 1360-1367.
- Igwe, E.O., Charlton, K.E., Roodenrys, S., Kent, K., Fanning, K. and Netzel, M.E. 2017. Anthocyanin-rich plum juice reduces ambulatory blood pressure but not acute cognitive function in younger and older adults: a pilot crossover dose- timing study. **Nutrition Research** 47: 28-43.
- Kent, K., Charlton, K., Roodenrys, S., Batterham, M., Potter, J., Traynor, V., Gilbert, H., Morgan, O. and Richards, R. 2017. Consumption of anthocyanin- rich cherry juice for 12- week improves memory and cognition in older adults with mild- to- moderate dementia. **European Journal of Nutrition** 56(1): 333-341.
- Khandare, V., Walia, S., Singh, M. and Kaur, C. 2011. Black carrot (*Daucus carota* ssp. Sativus) juice: processing effects on antioxidant composition and color. **Food and Bioproducts Processing** 89: 482-486.
- Khatri, B.P., Bhattarai, T., Shrestha, S. and Maharjan, J. 2015. Alkaline thermostable pectinase enzyme from *Aspergillus niger* strain MCAS2 isolated from Manaslu Conservation Area, Gorkha, Nepal. **SpringerPlus** 4(488): 1-8.
- Landbo, A. and Meyer, S.A. 2004. Effects of different enzymatic maceration treatments on enhancement of anthocyanins and other phenolics in black currant juice. **Innovative Food Science and Emerging Technology** 5: 503-513.
- Neelwame, B., Veigas, J.M., Narayan, M.S. and Laxman, P. M. 2007. Chemical nature, stability and bioefficiencies of anthocyanins from fruit peel of *Syzygium cumini* Skeels. **Food Chemistry** 105: 619-627.

- Ngadze, R. T., Verkerk, R., Nyanga, L. K., Fogliano, V., Ferracane, R., Troise, A. D. and Linnemann, A. R. 2018. Effect of heat and pectinase maceration on phenolic compounds and physicochemical quality of *Strychnos cocculoides* juice. **PLoS ONE** 13(8): e0202415.
- Oancea, S. and Oprean, L. 2011. Anthocyanins, from biosynthesis in plants to human health benefits- a review. **Acta Universitatis Cibiniensis Series E: Food Technology** 15(1): 3-16.
- Pontillo, O. R. N., Papakosta-Tsigkri, L., Lymperopoulou, T., Mamma, D., Kekos, D. and Detsi, A. 2021. Conventional and enzyme-assisted extraction of rosemary leaves (*Rosmarinus officinalis* L.): toward a greener approach to high added-value extracts. **Applied Science** 11: 3724.
- Sagu, S. T., Nso, E. J., Karmakar, S. and De, S. 2014. Optimization of low temperature extraction of banana juice using commercial pectinase. **Food Chemistry** 151: 182-190.
- Shimada, K., Fujikawa, K., Yahara, K. and Nakamura, T. 1992. Antioxidative properties of xanthans on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 40(6): 945-948.
- Srimoon, R. 2020. **Phenolic Compounds and Antioxidant Activity in Plants**. Odeonstore Publishing, Bangkok. (in Thai).
- Tiwari, B. K., Patras, A., Brunton, N., Cullen, P. J. and O'Donnell, C. P. 2010. Effect of ultrasound processing on anthocyanins and color of red grape juice. **Ultrasonics Sonochemistry** 17: 598-604.
- Verma, H., Namoliya, L. K. and Jadaun, J. S. 2018. Pectinase: a useful tool in fruit processing industries. **Nutrition and Food Science International Journal** 5(5): 1-4.
- Wong, S. P., Leong, L. P. and Koh, J. H. W. 2006. Antioxidant activities of aqueous extracts of selected plants. **Food Chemistry** 99: 775-783.
- Yazdi, A. P. G., Barzegar, M., Sahari, M. A. and Gavlighi, H. A. 2018. Optimization of the enzyme-assisted aqueous extraction of phenolic compounds from pistachio green hull. **Food Science and Nutrition** 7(1): 356-366.
- Zhang, H., Xu, Z. L., Zhao, H. W., Wang, X., Pang, J., Li, Q., Yang, Y. and Ling, W. H. 2020. Anthocyanin supplementation improve anti-oxidative and anti-inflammatory capacity in a dose-response manner in subject with dyslipidemia. **Redox neology** 32(101474): 1-11.
- Zuorro, A., Maffei, G. and Lavecchia, R. 2016. Optimization of enzyme-assisted lipid extraction from *Nannochloropsis* microalgae. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers** 67: 106-114.

การจำแนกรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยวิธีเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น

Classification of Pattern Partial Discharge (PD) in High Voltage Equipment by Multilayer Perceptron Method

อนันต์วัฒน์ คุณากร สาวินี หลุดพา* และ พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

Anantawat Kunakorn, Savinee Ludpa* and Peerawut Yutthagowith

Received: 9 December 2021, Revised: 26 May 2022, Accepted: 8 June 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำแนกทางสถิติและการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้เพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น เพื่อจำแนกรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (PD) ออกเป็น 4 ประเภท คือ โคโรนาดิสชาร์จทางด้านแรงสูงโคโรนาดิสชาร์จทางด้านแรงต่ำดิสชาร์จภายใน และดิสชาร์จตามผิว การวิเคราะห์รูปแบบโดยมีตัวแปรอิสระ 9 ตัวแปรจะพิจารณาจากการกระจายความสัมพันธ์ระหว่าง $\Phi - q - n$ ของข้อมูลการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแต่ละประเภท ซึ่งประกอบด้วยค่าการคำนวณคุณลักษณะด้วยวิธีสถิติ ซึ่งคำนวณจากการกระจายขนาดของดิสชาร์จบางส่วนเฉลี่ยตามมุมเฟสของแรงดัน ($H_n(\phi)$) และการกระจายจำนวนครั้งที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนซ้ำตามมุมเฟสแรงดัน ($H_n(\phi)$) โดยคำนวณจากการกระจายความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของดิสชาร์จบางส่วน (q), มุมเฟสของแรงดันทดสอบ (ϕ) และจำนวนครั้งที่เกิดดิสชาร์จบางส่วนซ้ำ (n) จะได้ค่าความเบี่ยงของการกระจายข้อมูลเทียบกับการกระจายปกติ, ความแหลมคมของการกระจายข้อมูลเทียบกับการกระจายปกติมีทั้งค่าบวกและค่าลบ ซึ่งจะได้ตัวแปรอิสระ 9 ตัวแปรแล้วจึงนำตัวแปรอิสระทั้ง 9 ตัวแปร มาใช้ในการจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับจำแนกรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่มสำหรับข้อมูลในการเรียนรู้และข้อมูลสำหรับการทดสอบ ข้อมูลสำหรับการเรียนรู้และการทดสอบแบบจำลองสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมในบทความนี้ คัดเลือกให้มีความซับซ้อนน้อยที่สุด โดยใช้เพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น ซึ่งผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย 1 ชั้นซ่อนเท่านั้น และผลลัพธ์ที่ได้มีประสิทธิภาพในการจำแนกรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยมีความแม่นยำในการจำแนก 100% ซึ่งสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวมาจำแนกรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและสามารถนำไปพัฒนาจำแนกการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้

คำสำคัญ: เพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น, ดิสชาร์จบางส่วน, การจำแนก, อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง, โคโรนาดิสชาร์จ

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
Department of Electrical Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

*Corresponding author, e-mail: l.savinee@gmail.com

ABSTRACT

This paper proposes a statistical classification based on an application of neural networks by Multilayer Perceptron (MLP) to classify Partial Discharge (PD) patterns into four categories in corona: high voltage side in air, corona at low voltage side in air, internal discharge and surface in air. There are 9 independent variables from fingerprint analysis which mainly are skewness, kurtosis, asymmetry and cross correlation following $\Phi - q - n$ PD patterns. PD patterns were used for classification which consists of statistical attribute calculation values. This is calculated from the $H_{qn}(\phi)$ distribution (average PD size distribution based on the voltage phase angle) and $H_n(\phi)$ distribution (the number of PD repeat distributions based on the voltage phase angle) distribution calculated from the $H_{qn}(\phi)$ distribution. (It was calculated from the relationship distribution between the magnitude of the PD(q), the phase angle of the test voltage (ϕ), and the number of PD repetitions (n)). All 9 variables were then used in the neural network simulation for partial discharge pattern identification. The approach for constructing the network divides the data into two groups for training data and testing data. The forms for training the model and the pattern for testing the model. The architecture of artificial neural networks in this paper is selected to below complexity as possible using multiple layers of perceptron. The results show that only a hidden layer in the model has a good performance to classify PD pattern with the classification accuracy of 100%. The proposed method can be used to analyze and classify partial discharge patterns and it can be developed to test the partial discharge of high voltage equipment.

Key words: multilayer perceptron (MLP), partial discharge (PD), classification, high voltage equipment, corona discharge

INTRODUCTION

The occurrence of a fault (fault) in the power system. One of the main causes is insulation failure in high-voltage transmission systems. Partial Discharge (PD) is the main factor causing insulation failure. Therefore, the IEC 60270 Standard (IEC, 2000) requires that PD be measured or detected before the device is put into service. Insulating properties test engineers need to study and classify PD characteristics in order to determine which type of PD occurs, such as corona discharge, surface discharge or internal discharge, etc. Such information is important to manufacturers of high voltage equipment. In the past, high voltage laboratories and users of high voltage equipment learned and recognized PD patterns by visually observing the oval signals on an oscilloscope screen and interpreting them based on the tester's experience. Nowadays, computers are used to analyze PD by programmable simulation. It can recognize the pattern of PD formation, making it easy for the tester to analyze,

classify and tell the cause of faults occurring in the insulation system. There are more diverse methods and various pattern recognition methods that have been proposed, such as expert systems (Gopal *et al.*, 2004), statistical analysis (Chatpattananan, 2006; Chatpattananan *et al.*, 2006a; Chatpattananan *et al.*, 2006b; Pattanadech and Nimsanong, 2014), fuzzy clustering (Gopal *et al.*, 2004; Tomsovic *et al.*, 1993), neural networks (Cho and Oh, 1997; Gulski and Krivda, 1993; Pattanadech *et al.*, 2015a; Zhang *et al.*, 2005), KMeans (Chatpattananan *et al.*, 2006c), Regression Estimation (Ludpa *et al.*, 2008; Pattanadech *et al.*, 2015b), Expert systems and fuzzy approaches require human expertise. However, there are some problems with the acquisition and maintenance of databases. Neural networks can gain direct experience from the training data and overcome some of the shortcomings of the expert system. Therefore, this paper proposes a statistical classification based on an application of neural networks by Multilayer Perceptron (MLP) to classify

Partial Discharge (PD) patterns that is a one way simulation to analyze and classify PD patterns.

MATERIALS AND METHOD

1. Partial Discharge experiments and pattern analysis in high voltage apparatus

From the experiment to simulate the partial discharge pattern, it can actually occur in high voltage equipment according to the IEC 60270 Standard (IEC, 2000) as the partial discharge test and measurement. There are four types of partial discharge patterns that can occur in high-voltage devices: high voltage side in air, corona at low voltage side in air, surface in air, and internal discharge. The PD simulation was performed in a chamber with a flat plate electrode of 12 cm in diameter. The model had the following defect patterns: simulations and experimental as for the results from Vicetjindavat (2001).

1. Simulation of the corona discharge in the air as the discharge occurs

in the pointed region, it is the region of high electric field stress. By bringing a copper wire of diameter 0.1 cm, length 1.5 cm, it was attached to the high-voltage electrode and the low voltage side with a distance between the electrodes 10 cm as shown in Figure 1. When the voltage is applied, the electric field stresses at the ends of the windings resulting in the corona being generated.

2. Simulation of internal discharge within a solid insulator is done by simulating small air cavities within the $13 \times 13 \times 2.5$ cm. Acrylic sheet will cause a voltage drop across different parts of the insulator. The simulation is done in the oil chamber to prevent flashover across the solid insulation. If the pressure drops across the gas cavity is higher than the pressure that the gas cavity can withstand, it may cause break-down or discharge only in the gas cavity. There are different simulation models as shown in Figure 2.



a) Corona discharge at high voltage side in air b) Corona discharge at low voltage side in air

Figure 1 Corona discharge voltage side in air simulation.

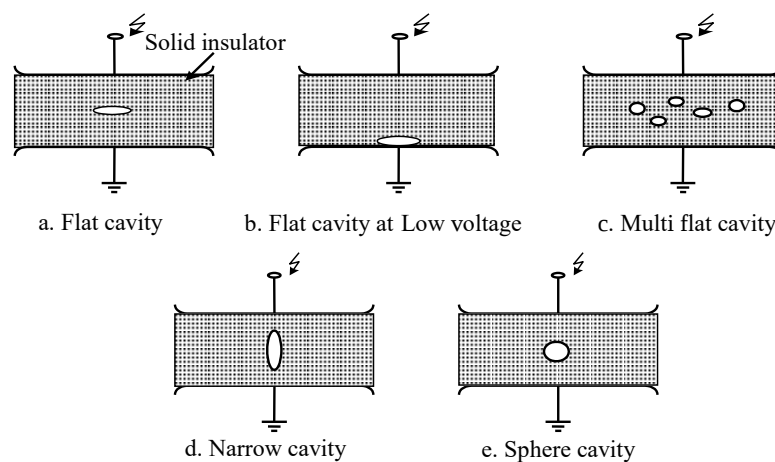


Figure 2 Corona discharge of internal discharge simulation.

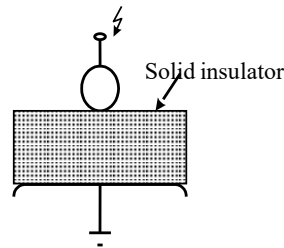


Figure 3 Corona discharge of surface discharge simulation.

3. The simulation of surface discharge is made by using an acrylic sheet between a 5 cm. diameter circular electrode and a 12 cm. diameter flat sheet electrode. The junctions of two types of insulators with different percentage values are air and acrylic sheets as shown in Figure 3.

The experiment simulating a partial discharge pattern can actually occur in high-voltage equipment according to the IEC 60270 Standard (IEC, 2000). There are four categories of partial discharge patterns that can occur in high-voltage devices : featuring four categories in corona: high voltage side in air, corona at low voltage side in air, surface in air, and internal discharge. The PD simulation was performed in a chamber with a flat plate electrode measuring 12 cm. in diameter. The experimental results from (Vicetjindavat, 2001).

The partial discharge model simulations, 7 experiments were conducted (Vicetjindavat, 2001), of which 20 were simulated corona at high voltage side in air ; Corona at HV, (20 trials later. This is an experiment to simulate the corona at low voltage side in air; Corona at L.V.) 19 subsequent trials. These experiments simulated internal discharge patterns and 20 experiments were surface in air simulated

experiments. Based on the data, 79 experiments were randomized to 80 experiments for convenience. Following the matrix calculation, the partial discharge pattern data obtained from each partial discharge (PD) monitor were analyzed. There are 9 independent variables from fingerprint analysis which mainly are skewness, kurtosis, asymmetry and cross correlation following Phi-q-n. PD patterns were used for classification consists of statistical attribute calculation values. This is calculated from the average PD size distribution based on the voltage phase angle ($H_{qn}(\phi)$) and the number of PD repeat distributions based on the voltage phase angle (ϕ). The relationship between the magnitude of the PD (q), the phase angle of the test voltage (ϕ) and the number of PD repetitions (n) is shown in Figure 4-7 and Table 1-8, respectively. The PD detector calculates the statistical properties of Skewness (Sk) and Kurtosis (Ku) of $H_{qn}(\phi)$ and $H_n(\phi)$ which gives a total of 9 variables in the matrix X: Sk^+ of $H_{qn}(\phi)$, Sk^- of $H_{qn}(\phi)$, Ku^+ of $H_{qn}(\phi)$, Ku^- of $H_{qn}(\phi)$, Sk^+ of $H_n(\phi)$, Sk^- of $H_n(\phi)$, Ku^+ of $H_n(\phi)$, Ku^- of $H_n(\phi)$, and the apparent charge (Q) (Vicetjindavat, 2001).

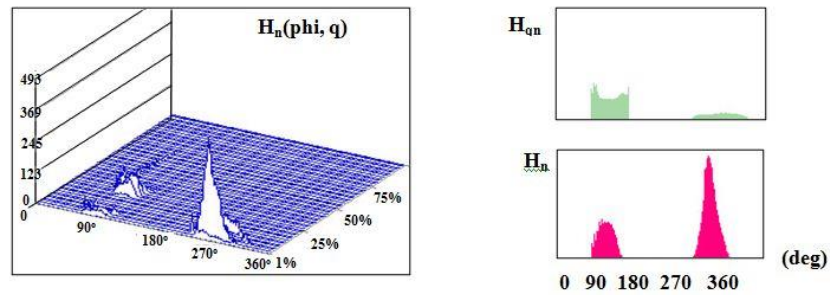


Figure 4 Examples of simulation results of corona at high voltage side in air patterns.

Table 1 Examples statistical value of corona at high voltage side in air patterns.

	Statistical Operations					
	Sk ⁺	Sk ⁻	Ku ⁺	Ku ⁻	Q	mcc
H _{qn}	1.034	1.014	-1.915	-1.964	0.238	0.785
H _n	1.100	1.092	-1.739	-1.748		

Table 2 Example of data collection of corona at high voltage side in air patterns simulation results. (Vicetjindavat, 2001)

No.	PD Patterns	Sk ⁺ of H _{qn} (Ø)	Sk ⁻ of H _{qn} (Ø)	Ku ⁺ of H _{qn} (Ø)	Ku ⁻ of H _{qn} (Ø)	Sk ⁺ of H _n (Ø)	Sk ⁻ of H _n (Ø)	Ku ⁺ of H _n (Ø)	Ku ⁻ of H _n (Ø)	Q
1	Corona at High Voltage side in air	1.188	1.077	-1.507	-1.983	1.220	1.093	-1.393	-1.696	0.359
2		1.312	1.016	-1.174	-1.959	1.334	1.131	-1.053	-1.630	0.424
3		1.482	1.025	-0.616	-1.935	1.339	1.126	-1.073	-1.659	0.425
4		1.270	1.022	-1.276	-1.944	1.152	1.106	-1.592	-1.699	0.815
5		1.166	1.008	-1.568	-1.979	1.191	1.167	-1.482	-1.495	0.384
6		1.277	1.028	-1.246	-1.929	1.144	1.112	-1.605	-1.680	0.778
7		1.016	1.024	-1.958	-1.938	1.030	1.038	-1.923	-1.885	0.227
8		1.100	1.030	-1.741	-1.919	1.179	1.102	-1.528	-1.727	0.382
9		1.025	1.007	-1.936	-1.982	1.063	0.965	-1.837	-2.039	0.321
10		1.028	1.006	-1.929	-1.983	1.062	0.951	-1.839	-0.720	0.336
11		1.034	1.005	-1.913	-1.988	1.091	0.981	-1.763	-1.997	0.331
12		1.031	1.018	-1.922	-1.953	1.077	0.947	-1.800	-2.081	0.175
13		1.034	1.015	-1.914	-1.962	1.089	1.012	-1.769	-1.901	0.226
14		1.025	1.021	-1.936	-1.946	1.072	0.939	-1.813	-2.068	0.231
15		1.034	1.014	-1.915	-1.964	1.100	1.092	-1.739	-1.748	0.238
16		1.020	1.020	-1.950	-1.947	1.053	0.919	-1.862	-2.126	0.239
17		1.026	1.010	-1.935	-1.972	1.085	1.036	-1.779	-1.856	0.242
18		1.010	1.020	-1.974	-1.947	1.022	0.942	-1.942	-2.082	0.236
19		1.061	1.021	-1.841	-1.946	1.138	0.085	-1.638	-2.331	0.258
20		1.025	1.012	-1.936	-1.970	1.086	1.080	-1.776	-1.768	0.248

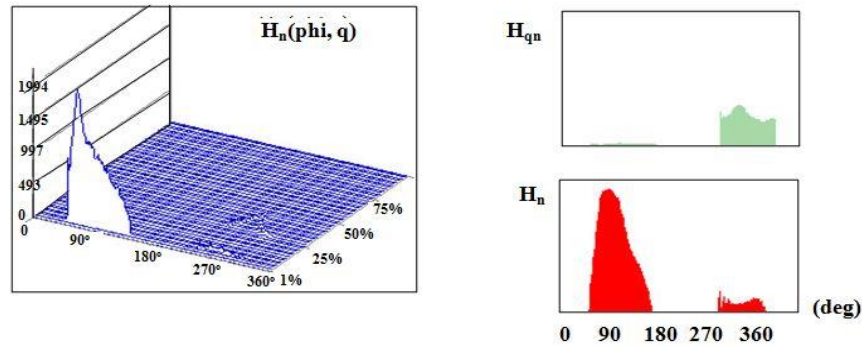


Figure 5 Examples of simulation results of corona at low voltage side in air patterns.

Table 3 Examples statistical value of corona at low voltage side in air patterns.

	Statistical Operations						
	Sk ⁺	Sk ⁻	Ku ⁺	Ku ⁻	Q	CC	mcc
H _{qn}	1.007	1.012	-1.981	-1.969	7.104	0.832	5.909
H _n	1.010	-0.340	-1.974	-2.884			

Table 4 Data collection of corona at low voltage side in air patterns simulation results. (Vicetjindavat, 2001)

No.	PD Patterns	Sk ⁺ of H _{qn} (ϕ)	Sk ⁻ of H _{qn} (ϕ)	Ku ⁺ of H _{qn} (ϕ)	Ku ⁻ of H _{qn} (ϕ)	Sk ⁺ of H _n (ϕ)	Sk ⁻ of H _n (ϕ)	Ku ⁺ of H _n (ϕ)	Ku ⁻ of H _n (ϕ)	Q
21	Corona at low Voltage side in air	1.014	1.085	-1.960	-1.780	1.056	-0.410	-1.850	-2.830	6.975
22		1.015	1.017	-1.960	-1.960	1.021	-0.440	-1.940	-2.810	5.225
23		1.010	1.019	-1.980	-1.950	1.015	-0.320	-1.960	-2.900	7.591
24		1.015	1.017	-1.960	-1.960	1.021	-0.440	-1.940	-2.810	5.225
25		1.009	1.015	-1.980	-1.960	1.066	-0.300	-1.980	-2.910	8.540
26		1.007	1.012	-1.980	-1.970	1.010	-0.340	-1.970	-2.880	7.104
27		1.013	1.020	-1.970	-1.950	1.071	-0.680	-1.810	-2.520	3.717
28		1.007	1.012	-1.980	-1.970	1.010	-0.340	-1.970	-2.880	7.104
29		1.015	1.015	-1.960	-1.960	1.045	-0.600	-1.880	-2.640	4.000
30		1.012	1.017	-1.970	-1.960	1.064	-0.640	-1.830	-2.580	3.954
31		1.005	1.014	-1.970	-1.960	1.030	-0.520	-1.920	-2.730	5.200
32		1.011	1.008	-1.970	-1.980	1.048	-0.620	-1.870	-2.610	3.700
33		1.008	1.015	-1.980	-1.960	1.053	-0.660	-1.860	-2.560	3.751
34		1.008	1.011	-1.980	-1.970	1.050	-0.630	-1.870	-2.600	3.639
35		1.016	1.065	-1.960	-1.830	1.074	-0.670	-1.800	-2.550	4.233
36		1.006	1.031	-1.990	-1.920	1.059	-0.660	-1.840	-2.560	4.110
37		1.010	1.012	-1.970	-1.970	1.025	-0.530	-1.930	-2.720	4.614
38		1.007	1.012	-1.980	-1.970	1.072	-0.680	-1.810	-2.530	3.658
39		1.010	1.010	-1.970	-1.970	1.048	-0.610	-1.870	-2.620	4.065
40		1.014	1.032	-1.960	-1.920	1.040	-0.570	-1.890	-2.670	4.341

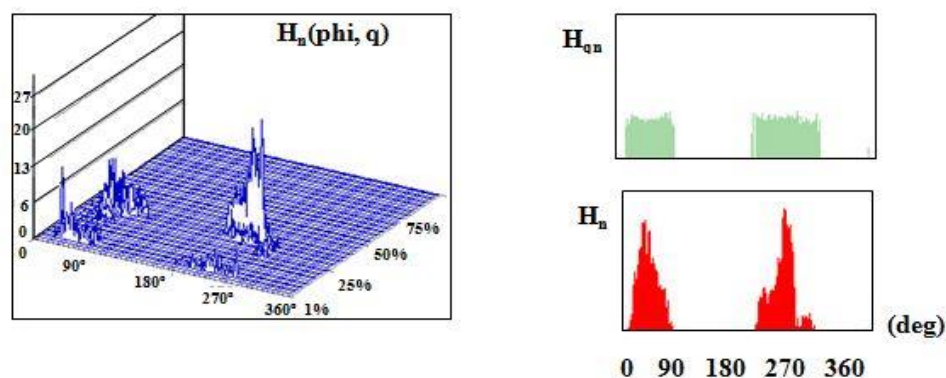


Figure 6 Examples of simulation results of corona internal discharge patterns.

Table 5 Examples statistical value of corona internal discharge patterns.

Statistical Operations							
	Sk^+	Sk^-	Ku^+	Ku^-	Q	CC	mcc
H_{qn}	1.044	1.168	-1.889	-1.438	0.985	0.786	0.774
H_n	1.006	-0.222	-1.984	-2.398			

Table 6 Data collection of corona internal discharge patterns simulation results. (Vicetjindavat, 2001)

No.	PD Patterns	Sk^+ of $H_{qn}(\phi)$	Sk^- of $H_{qn}(\phi)$	Ku^+ of $H_{qn}(\phi)$	Ku^- of $H_{qn}(\phi)$	Sk^+ of $H_n(\phi)$	Sk^- of $H_n(\phi)$	Ku^+ of $H_n(\phi)$	Ku^- of $H_n(\phi)$	Q
41	Internal Discharge	1.124	1.172	-1.700	-1.540	1.226	-0.760	-1.430	-2.340	1.132
42		1.178	1.142	-1.480	-1.620	1.145	-0.730	-1.640	-2.320	1.171
43		1.504	1.479	0.103	-0.020	1.345	-0.280	0.708	-2.370	1.015
44		1.504	1.479	0.103	-0.020	1.345	-0.280	-0.710	-2.370	1.015
45		1.206	1.200	-1.470	-1.490	1.307	-0.220	-0.960	-2.380	1.038
46		1.491	1.202	-0.030	-1.490	1.524	-0.210	0.305	-2.310	1.063
47		1.193	1.178	-1.510	-1.550	1.240	-0.110	-1.360	-2.360	1.036
48		1.192	1.482	-1.510	-0.170	1.226	-0.250	-1.430	-2.370	1.059
49		1.186	1.165	-1.530	-1.590	1.189	-0.430	-1.520	-2.380	1.037
50		1.170	1.154	-1.570	-1.610	1.168	-0.680	-1.560	-2.330	1.149
51		1.147	1.175	-1.630	-1.540	1.180	-0.710	-1.520	-2.320	1.191
52		1.115	1.106	-1.710	-1.730	1.132	-0.760	-1.640	-2.330	1.250
53		1.178	1.142	-1.480	-1.620	1.145	-0.730	-1.640	-2.320	1.172
54		1.073	1.103	-1.830	-1.730	1.077	-0.610	-1.820	-2.340	1.057
55		1.142	1.100	-1.630	-1.750	1.125	-0.50	-1.640	-2.370	1.073
56		1.115	1.153	-1.710	-1.600	1.110	-0.370	-1.730	-2.390	1.107
57		1.141	1.152	-1.630	-1.600	1.113	-0.430	-1.710	-2.390	1.136
58		1.133	1.153	-1.660	-1.580	1.124	-0.630	-1.680	-2.340	1.125
59		1.104	1.106	-1.730	-1.710	1.073	-0.690	-1.810	-2.320	1.304
60		1.178	1.142	-1.480	-1.620	1.145	-0.730	-1.640	-2.320	1.172

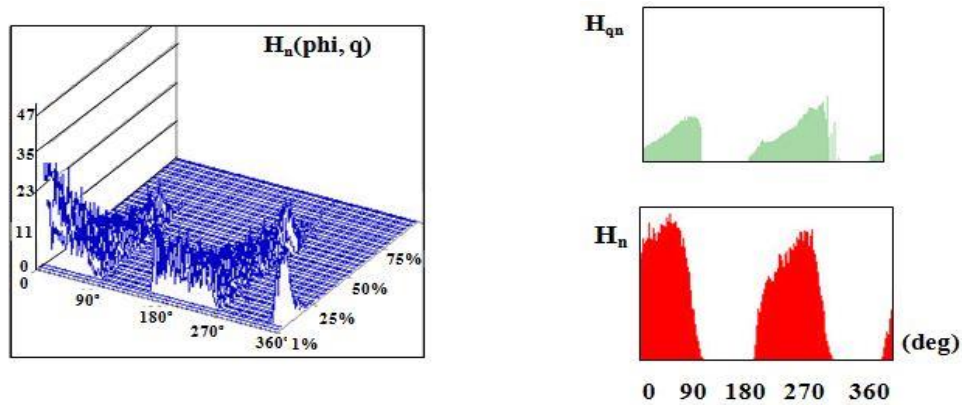


Figure 7 Examples of simulation results of corona surface in air patterns.

Table 7 Examples statistical value of corona surface in air patterns.

Statistical Operations							
	Sk ⁺	Sk ⁻	Ku ⁺	Ku ⁻	Q	CC	mcc
H _{qn}	1.504	1.330	-0.184	-0.844	1.139	0.867	0.988
H _n	1.985	-0.453	1.781	-2.252			

Table 8 Data collection of corona surface in air patterns simulation results. (Vicitjindavat, 2001)

No.	PD Patterns	Sk ⁺ of H _{qn} (θ)	Sk of H _{qn} (θ)	Ku ⁺ of H _{qn} (θ)	Ku ⁻ of H _{qn} (θ)	Sk ⁺ of H _n (θ)	Sk of H _n (θ)	Ku ⁺ of H _n (θ)	Ku ⁻ of H _n (θ)	Q
61	Surface in air	1.442	1.464	-0.450	-0.270	1.986	-0.680	1.967	-2.510	1.462
62		1.461	1.302	-0.230	-1.000	1.939	1.906	1.607	1.430	0.805
63		1.453	1.170	-0.300	-1.490	1.942	1.899	1.667	1.569	0.786
64		1.529	1.230	-0.030	-1.300	1.747	1.841	0.470	1.268	0.861
65		1.465	1.241	-0.270	-1.240	1.925	1.797	1.466	1.178	0.881
66		1.463	1.188	-0.280	-1.430	1.956	1.332	1.613	-0.070	0.901
67		1.446	1.189	-0.390	-1.410	1.995	-0.100	1.813	-2.050	1.093
68		1.529	1.278	-0.050	-1.130	1.714	1.867	2.900	1.211	0.873
69		1.504	1.330	-0.180	-0.840	1.985	-0.450	1.781	-2.250	1.139
70		1.457	1.379	-0.400	-0.670	1.967	-0.350	1.669	-2.210	1.072
71		1.486	1.423	-0.250	-0.490	1.955	-0.120	1.597	-2.070	1.009
72		1.501	1.383	-0.180	-0.640	1.968	-0.410	1.754	-2.250	1.134
73		1.467	1.450	-0.360	-0.360	1.943	-0.570	1.620	-2.340	1.176
74		1.511	1.479	-0.180	-0.220	1.977	-0.690	1.923	-2.390	1.355
75		1.481	1.428	-0.410	-0.500	1.919	-0.610	1.365	-2.390	1.081
76		1.516	1.471	-0.160	-0.250	1.976	-0.690	1.919	-2.390	1.364
77		1.493	1.471	-0.260	-0.280	1.918	-0.460	1.451	-2.300	1.163
78		1.496	1.450	-0.270	-0.390	1.954	-0.590	1.702	-2.350	1.206
79		1.459	1.302	-0.390	-1.000	1.952	-0.630	1.647	-2.360	1.225
80		1.486	1.454	-0.340	-0.410	1.919	-0.540	1.408	-2.350	1.078

The results of analysis of variance (ANOVA) in testing the mean of each variable were different between groups or not. Analysis of Variance (ANOVA) is an analysis to test the mean difference of more than 2 groups (3 or more groups). That is to compare 2 parts, namely, between the group

and within the group, in order to find the variables related to each other. Selecting input variables into the equation. First of all, it is necessary to consider which independent variables are likely to be associated with the dependent variable Y, both positive and negative, and the relationship between the

group variables of each independent variable. In this study, the F test and Wilks' Lambda

statistical tests were used to help exclude correlated variables as shown in Table 9.

Table 9 Results of Analysis of Variance (ANOVA) in the mean test of each variable whether they differed between groups or not.

Variable	Wilks' Lambda	F	df1	df2	Sig.
Sk ⁺ of H _{qn} (ϕ)	0.214	92.920	3	76	.000
Sk ⁻ of H _{qn} (ϕ)	0.255	74.021	3	76	.000
Ku ⁺ of H _{qn} (ϕ)	0.231	84.488	3	76	.000
Ku ⁻ of H _{qn} (ϕ)	0.343	48.527	3	76	.000
Sk ⁺ of H _n (ϕ)	0.047	514.879	3	76	.000
Sk ⁻ of H _n (ϕ)	0.442	32.044	3	76	.000
Ku ⁺ of H _n (ϕ)	0.076	308.584	3	76	.000
Ku ⁻ of H _n (ϕ)	0.696	11.046	3	76	.000
Q	0.148	146.162	3	76	.000
cc	0.962	1.001	3	76	.397

Based on the test's Sig value, it was found to be all 0 except for the variable cc which was 0.397, and it was greater than the specified significance level of 0.01. It can be seen that

- The mean of all variables except cc variable differs between groups.

- The mean of cc variables did not differ between groups which was concluded from at least one pair of tests;

- Test Sig = 0.397, H_0 cannot be rejected. Therefore, cc should not be a variable used to classify groups. The variable mcc is the result of multiplying between variable cc and variable Q, thus eliminating. Therefore, the remaining 9 variables are taken into account.

2. PD Classification method and model simulation

In this paper will use statistical modeling methods. The data used in the simulation consisted of matrix X and matrix Y, where matrix X is the input variable measured by the partial discharge detector, consisting of H_{qn}(ϕ) (average PD size distribution, according to the phase angle of the voltage), H_n(ϕ) (the number of PD repetitions distribution according to the voltage phase angle), Q (appearance charge), for which the PD detector

calculates the statistical property of Skewness (Sk) and Kurtosis (Ku) of H_{qn}(ϕ) and H_n(ϕ) gives a total of 9 variables in the matrix X: Sk⁺ of H_{qn}(ϕ), Sk⁻ of H_{qn}(ϕ), Ku⁺ of H_{qn}(ϕ), Ku⁻ of H_{qn}(ϕ), Sk⁺ of H_n(ϕ), Sk⁻ of H_n(ϕ), Ku⁺ of H_n(ϕ), Ku⁻ of H_n(ϕ), and the apparent charge (Q), whose the matrix has a size of 80×9 . The Y matrix is a dummy variable used to predict each type of partial discharge, and the matrix has a size of 80×1 . Based on the data, 79 trials were randomized to 80 trials for ease of calculation matrix.

1. From the X matrix, the data were divided into 4 groups: rows 1 to 20 were variable data values for Corona at High Voltage side in air (Corona at H.V.), rows 21 to 40 were data values of Corona at Low Voltage side in air (Corona at LV), rows 41 to 60 were internal discharge, rows 61 to 80 were Surface in air and The Y matrix is a hypothetical variable to classify the PD, with the code for division 1 to 20, designated as [1] and given as Corona. at HV Rows 21 to 40 are designated as [2] and given as Corona at LV. Rows 41 to 60 are designated as [3] and given as Internal Discharge. Rows 61 to 80 designated as [4] and given as Surface. Discharge has a structure as in Eq. (1).

$$X = \begin{bmatrix} [Corona \text{ at } H.V.]_{20 \times 9} \\ [Corona \text{ at } L.V.]_{20 \times 9} \\ [Internal \text{ Discharge}]_{20 \times 9} \\ [Surface \text{ Discharge}]_{20 \times 9} \end{bmatrix}_{80 \times 9} \quad Y = \begin{bmatrix} [1]_{20 \times 1} \\ [2]_{20 \times 1} \\ [3]_{20 \times 1} \\ [4]_{20 \times 1} \end{bmatrix}_{80 \times 1} \quad (1)$$

2. Scaled the input matrix X to unify the data and control the variance of the scaled data because in the modeling, the importance of each variable in the X matrix is equal to all variables. is to make the variances of each variable in the X matrix or input matrix equal to 1.

3. Divide the scaled matrix data into two groups: the learning data group (train) to create the model and the test data group (test) to experiment with the model. The dividing method is divided into Venetial Blinds (VB) and the data is rearranged in the XVB matrix and the YVB matrix as shown in Eq. (2).

$$XVB = \begin{bmatrix} [Xtrain] \\ [Xtest] \end{bmatrix}_{80 \times 9} \quad YVB = \begin{bmatrix} [Ytrain] \\ [Ytest] \end{bmatrix}_{80 \times 1} \quad (2)$$

4. The model was simulated by using multilayer perceptron Analysis. It was found that there were 9 variable input

layers, 1 hidden layer and an output layer as shown in the Figure 8 - Figure 9.

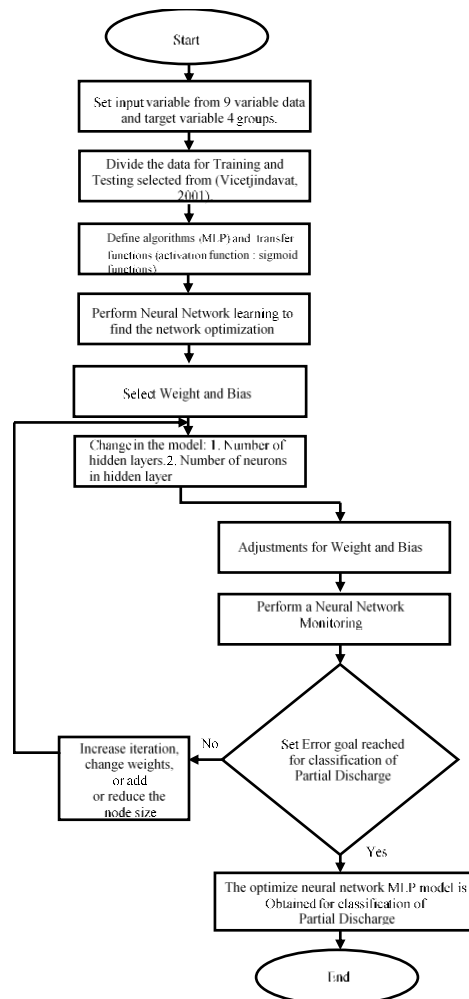


Figure 8 Flow chart of multilayer perceptron model.

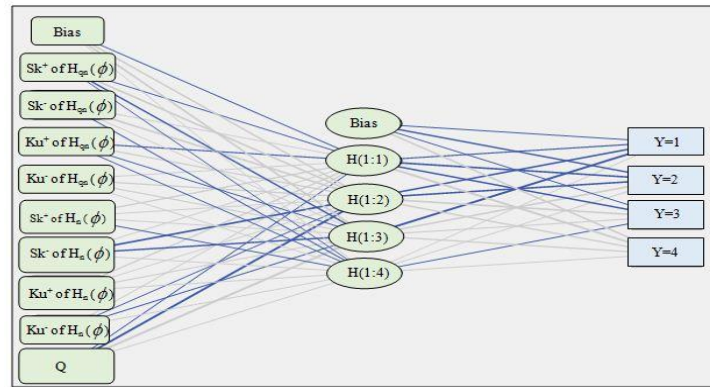


Figure 9 Network of simulation results of multilayer perceptron model.

RESULTS AND DISCUSSION

Simulation results

In this paper, the researchers examined how to classify the type of PD by a multilayer perceptron. The architecture is simple and easy. It is used for the pattern classification system and it can also reduce the time to compute results for faster and more flexible than statistical methods (Chatpattananan, 2006; Chatpattananan *et al.*, 2006a). It can also calculate and get accurate results just like the method used Regression Estimation (Ludpa *et al.*, 2008; Pattanadech *et al.*, 2015a). A Multilayer Perceptron with a hidden layers can design arbitrary classification, and the approximation is related to the number of hidden nodes. The neuron number of its input is determined by the number of statistical features, skewness, kurtosis and. The neuron number of both hidden layers is 1. The neuron number of output layer is determined by the number of

patterns to be identified, comprised 4 groups : corona at high voltage side in air (corona at H.V.), corona at low voltage side in air (corona at LV), internal discharge and surface in air, respectively. To demonstrate the classification ability, 80 sets of field test PD patterns are used to test the proposed PD classification system. The neural network based PD classification system randomly chooses 80 instances from the field test data as the training data set, and the rest of the instances of the field test data are the testing data set. Table 10 - 14 shows the classified results of the proposed system with different input patterns. The recognition rates of the proposed system are quite high with 100%. It is obvious that the neural network based PD classification system has strong generalized capability. It is obvious that the neural network based PD classification system has strong generalized capability to evaluate the fault tolerance ability.

Table 10 Model Summary

Training	Cross Entropy Error	0.271
	Percent Incorrect Classification	0.00%
	Stopping Rule Used	1 consecutive step (s) with no decrease in error ^a
	Train Time	0:00:00.022
Testing	Cross Entropy Error	0.494
	Percent Incorrect Classification	0.00%

Table 11 Parameter Classification

Parameter		Classification							
		Hidden Layer 1				Output Layer			
		H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	H(1:4)	[Y=1]	[Y=2]	[Y=3]	[Y=4]
Input Layer	(Bias)	0.492	0.916	0.980	0.009				
	Sk^+ of $H_{qn}(\phi)$	0.204	1.119	0.716	0.060				
	Sk^- of $H_{qn}(\phi)$	0.333	1.832	0.327	0.428				
	Ku^+ of $H_{qn}(\phi)$	0.935	0.983	0.078	0.108				
	Ku^- of $H_{qn}(\phi)$	0.093	1.010	0.768	0.276				
	Sk^+ of $H_n(\phi)$	1.084	0.171	0.655	0.173				
	Sk^- of $H_n(\phi)$	0.456	-2.357	-1.501	0.159				
	Ku^+ of $H_n(\phi)$	0.803	0.224	0.753	0.709				
	Ku^- of $H_n(\phi)$	0.455	-0.102	0.705	0.024				
	Q	0.667	-1.300	2.904	0.589				
Hidden Layer 1	(Bias)					0.264	-1.109	0.086	1.008
	H(1:1)					0.951	-2.418	-1.361	5.143
	H(1:2)					-1.803	-1.892	3.266	1.149
	H(1:3)					-3.703	1.775	0.867	1.109
	H(1:4)					0.204	580.000	0.631	0.344

Table 12 Classification Results

Sample		Classification				Percent Correct
		1	2	3	4	
Training	1	16	0	0	0	100.0%
	2	0	16	0	0	100.0%
	3	0	0	10	0	100.0%
	4	0	0	0	14	100.0%
	Overall Percent	28.60%	28.60%	17.90%	25.00%	100.0%
Testing	1	4	0	0	0	100.0%
	2	0	4	0	0	100.0%
	3	0	0	10	0	100.0%
	4	0	0	0	6	100.0%
	Overall Percent	16.70%	16.70%	41.70%	25.00%	100.0%

Table 13 Examples Training Value of Classification Results

Training									Target (Y)
Input (X)									
Sk ⁺ of H _{qn} (ϕ)	Sk ⁻ of H _{qn} (ϕ)	Ku ⁺ of H _{qn} (ϕ)	Ku ⁻ of H _{qn} (ϕ)	Sk ⁺ of H _n (ϕ)	Sk ⁻ of H _n (ϕ)	Ku ⁺ of H _n (ϕ)	Ku ⁻ of H _n (ϕ)	Q	
1.188	1.077	-1.507	-1.983	1.220	1.093	-1.393	-1.696	0.359	1
1.312	1.016	-1.174	-1.959	1.334	1.131	-1.053	-1.630	0.424	1
1.482	1.025	-0.616	-1.935	1.339	1.126	-1.073	-1.659	0.425	1
1.270	1.022	-1.276	-1.944	1.152	1.106	-1.592	-1.699	0.815	1
1.014	1.085	-1.960	-1.780	1.056	-0.410	-1.850	-2.830	6.975	2
1.015	1.017	-1.960	-1.960	1.021	-0.440	-1.940	-2.810	5.225	2
1.010	1.019	-1.980	-1.950	1.015	-0.320	-1.960	-2.900	7.591	2
1.015	1.017	-1.960	-1.960	1.021	-0.440	-1.940	-2.810	5.225	2
1.124	1.172	-1.700	-1.540	1.226	-0.760	-1.430	-2.340	1.132	3
1.178	1.142	-1.480	-1.620	1.145	-0.730	-1.640	-2.320	1.171	3
1.504	1.479	0.103	-0.020	1.345	-0.280	0.708	-2.370	1.015	3
1.504	1.479	0.103	-0.020	1.345	-0.280	-0.710	-2.370	1.015	3
1.442	1.464	-0.450	-0.270	1.986	-0.680	1.967	-2.510	1.462	4
1.461	1.302	-0.230	-1.000	1.939	1.906	1.607	1.430	0.805	4
1.453	1.170	-0.300	-1.490	1.942	1.899	1.667	1.569	0.786	4
1.529	1.230	-0.030	-1.300	1.747	1.841	0.470	1.268	0.861	4

Table 14 Examples Testing Value of Classification Results

Testing									Target (Y)	MLP Classificatio n Result	Accuracy (%)
Input (X)											
Sk ⁺ of H _{qn} (ϕ)	Sk ⁻ of H _{qn} (ϕ)	Ku ⁺ of H _{qn} (ϕ)	Ku ⁻ of H _{qn} (ϕ)	Sk ⁺ of H _n (ϕ)	Sk ⁻ of H _n (ϕ)	Ku ⁺ of H _n (ϕ)	Ku ⁻ of H _n (ϕ)	Q			
1.026	1.010	-1.935	-1.972	1.085	1.036	-1.779	-1.856	0.242	1	1	100
1.010	1.020	-1.974	-1.947	1.022	0.942	-1.942	-2.082	0.236	1	1	100
1.061	1.021	-1.841	-1.946	1.138	0.085	-1.638	-2.331	0.258	1	1	100
1.025	1.012	-1.936	-1.970	1.086	1.080	-1.776	-1.768	0.248	1	1	100
1.010	1.012	-1.970	-1.970	1.025	-0.530	-1.930	-2.720	4.614	2	2	100
1.007	1.012	-1.980	-1.970	1.072	-0.680	-1.810	-2.530	3.658	2	2	100
1.010	1.010	-1.970	-1.970	1.048	-0.610	-1.870	-2.620	4.065	2	2	100
1.014	1.032	-1.960	-1.920	1.040	-0.570	-1.890	-2.670	4.341	2	2	100
1.147	1.175	-1.630	-1.540	1.180	-0.710	-1.520	-2.320	1.191	3	3	100
1.115	1.106	-1.710	-1.730	1.132	-0.760	-1.640	-2.330	1.25	3	3	100
1.178	1.142	-1.480	-1.620	1.145	-0.730	-1.640	-2.320	1.172	3	3	100
1.073	1.103	-1.830	-1.730	1.077	-0.610	-1.820	-2.340	1.057	3	3	100
1.481	1.428	-0.410	-0.500	1.919	-0.610	1.365	-2.390	1.081	4	4	100
1.516	1.471	-0.160	-0.250	1.976	-0.690	1.919	-2.390	1.364	4	4	100
1.493	1.471	-0.260	-0.280	1.918	-0.460	1.451	-2.300	1.163	4	4	100
1.496	1.450	-0.270	-0.390	1.954	-0.590	1.702	-2.350	1.206	4	4	100

CONCLUSION

The proposed method to analyze PD patterns and classify the type of discharge is an important tool for the diagnosis of a high voltage insulation system. To improve the performance, are statistically analyzed for the proposed multilayer perceptron classifier. These statistical features are then applied to a neural network that performs the classification. The recognition rates of the proposed system are quite high at 100%. The present experimental results indicate that this approach is able to implement an efficient classification with a very high recognition rate. The proposed method can use to analyze and classify partial discharge patterns and it can be developed to test the partial discharge of high voltage equipment.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to give special acknowledgement to the School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for providing the facility in this research.

REFERENCES

- Chatpattananan, V. 2006. Linear Discriminant Analysis for Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment, pp. 627-630. *In Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, (CEIDP)*. IEEE, Kansas City, MO, USA.
- Chatpattananan, V., Pattanadech, N. and Vicetjindavat, K. 2006a. PCA-LDA for Partial Discharge Classification on High voltage Equipment, pp. 479-481. *In Proceedings of 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials*. IEEE, Bali, Indonesia.
- Chatpattananan, V., Pattanadech, N. and Vicetjindavat, K. 2006b. Quest Tree Model for Partial Discharge Classification on High voltage Equipment, pp.476-478. *In Proceedings of 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials*. IEEE, Bali, Indonesia.
- Chatpattananan, V., Pattanadech, N. and Yutthagowith, P. 2006c. Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment with K-Means, pp. 191-194. *In Proceedings of 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials*. IEEE, Bali, Indonesia.
- Cho, K.B. and Oh, J.Y. 1997. An Overview of Application of Artificial Neural Network to Partial Discharge Pattern Classification, pp.326-330. *In Proceedings of 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. IEEE, Seoul, Korea (South).
- Gopal, S., Karthikeyan, B. and Kavitha, D. 2004. Partial discharge pattern classification using fuzzy expert system, pp. 653-656. *In Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics*. IEEE, Toulouse, France.
- Gulski, E. and Krivda, A. 1993. Neural Networks as a Tool for Recognition of Partial Discharges. *IEEE Transactions on Electrical Insulation* 28(6): 984-1001.
- IEC. 2000. **IEC 60270 International Standard High-voltage test techniques - Partial discharge measurements**. 3rd ed. IEC, Geneva, Switzerland.
- Ludpa, S., Pattanadech, N., Leelajindakrairerk, M. and Yutthagowith, P. 2008. Pattern Classification of Partial Discharge in High Voltage Equipment by Regression Analysis, pp. 921-924. *In 5th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology 2*. IEEE, Krabi, Thailand.
- Pattanadech, N. and Nimsanong, P. 2014. Partial discharge classification using principal component analysis combined with self-organizing map, pp. 1-5. *In TENCON 2014 - 2014 IEEE*

- Region 10 Conference.** IEEE, Bangkok, Thailand.
- Pattanadech, N., Nimsanong, P., Potivejkul, S., Yuthagowith, P. and Polmai, S. 2015a. Partial discharge classification using probabilistic neural network model, pp.1176-1180. *In 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).* IEEE, Pattaya, Thailand.
- Pattanadech, N., Nimsanong, P., Potivejkul, S., Yuthagowith, P. and Polmai, S. 2015b. Generalized regression networks for partial discharge classification, pp. 1165-1169. *In 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).* IEEE, Pattaya, Thailand.
- Tomsovic, K., Tapper, M. and Ingvarsson, T.T. 1993. A Fuzzy Information Approach to Integrating Different Transformer Diagnostic methods. **IEEE Transactions on Power Delivery** 8: 1638-1643.
- Vicetjindavat, K. 2001. Pattern Recognition of Partial Discharge in High Voltage Equipment. Master Thesis of Engineering, Department of Electrical Engineering, Chulalongkorn University.
- Zhang, H., Lee, W.J., Kwan, C., Ren, Z., Chen, H. and Sheeley, J. 2005. Artificial Neural Network Based On-Line Partial Discharge Monitoring System for Motors, pp. 125-132. *In IEEE Systems Technical Conference on Industrial and Commercial Power 2005.* IEEE, Saragota Springs, NY, USA.

การกระจายของโลหะหนัก (Cd, Pb, Cu และ Zn) ในน้ำ และตะกอนบริเวณปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร

Distribution of Heavy Metals (Cd, Pb, Cu and Zn) in Water and Sediment at Tha Chin Estuary, Samut Sakhon Province

ธัญชนก จินดาศรี¹, เชษฐพงษ์ เมฆสัมพันธ์^{1*}, สราวุธ ศรีทองอุทัย², อรอนงค์ เวชสิทธิ์¹

ณิสรดา ถาวรโสตร์¹, ชاکกริต เรืองสอน¹ และ ปัททิตรา เกษมศิริ³

Thanchanok Jindasri¹, Shettapong Meksumpun^{1*}, Sarawut Srithongouthai², Oning Veschasit¹

Nissara Thawornsode¹, Chakhrit Ruengsorn¹ and Pattira Kasamesiri³

Received: 26 May 2020, Revised: 1 July 2021, Accepted: 23 September 2022

บทคัดย่อ

ศึกษาการกระจายของโลหะหนักสะสมในน้ำ ในของแข็งแขวนลอยรวม และในดินตะกอนบริเวณปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร ในช่วงต้นฤดูน้ำหลาก (เดือนเมษายน พ.ศ. 2561) และกลางฤดูน้ำหลาก (เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561) พบปริมาณแคดเมียมในทุกตัวอย่างมีค่าต่ำกว่าระดับที่จะตรวจวัดได้ ในน้ำมีปริมาณตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีมีค่าอยู่ระหว่าง $nd-5.5$ $0.5-16.0$ และ $12.9-158.5$ ppb ตามลำดับ โลหะหนักทั้งสามชนิดในของแข็งแขวนลอยรวมมีปริมาณระหว่าง $nd-4.0$ $nd-19.0$ และ $11.0-341.0$ ppb ตามลำดับ และในดินตะกอนมีปริมาณระหว่าง $10.6-53.5$ $15.6-80.4$ และ $64.6-252.8$ ppm ตามลำดับ โดยส่วนใหญ่โลหะหนักในน้ำมีปริมาณต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ส่วนโลหะหนักในดินตะกอนมีปริมาณสูงกว่าค่ามาตรฐานในบางสถานี โดยเฉพาะบริเวณตอนกลางของแม่น้ำระหว่างฤดูกาลพบว่าปริมาณสังกะสีในน้ำ ทองแดงในน้ำ และตะกั่วในดินตะกอนของแต่ละฤดูมีค่าต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และในดินตะกอนบริเวณพื้นที่แนวร่องน้ำของแต่ละฤดูกาลมีปริมาณทองแดงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทั้งนี้พบว่าสังกะสีในน้ำมีความสัมพันธ์ทางสถิติกับสังกะสีในของแข็งแขวนลอย การศึกษาด้านการสะสมของโลหะหนัก พบว่า ปริมาณโลหะหนักในบริเวณปากแม่น้ำท่าจีนมีค่าเฉลี่ย

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

¹ Department of Marine Sciences, Faculty of Fisheries, Kasetsart University, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand.

² ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

² Department of Environmental Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Wang Mai, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand.

³ ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

³ Department of Agricultural Technology, Faculty of Technology, Mahasarakham University, Khamriang Sub-District, Kantarawichai District, Mahasarakham 44150, Thailand.

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

เท่ากับ 598,548.3 กิโลกรัม เป็นการสะสมของสังกะสี ร้อยละ 66 ทองแดง ร้อยละ 18 และตะกั่ว ร้อยละ 16 โดยมีปริมาณสะสมอยู่ในดินตะกอน (91%) > ในของแข็งแขวนลอยรวม (6%) > ในน้ำ (3%) ตามลำดับ การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการบริหารจัดการโลหะหนักในดินตะกอนอย่างยิ่งยวดปนเปื้อนของโลหะหนักบริเวณปากแม่น้ำท่าจีนจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในดินตะกอนอย่างยิ่งยวด

คำสำคัญ: โลหะหนัก, การปนเปื้อน, ของแข็งแขวนลอยรวม, ดินตะกอน, แม่น้ำท่าจีน

ABSTRACT

This study investigates the distribution of heavy metals within the Tha Chin river mouth, Samut Sakhon Province, focusing on the early loading period (April 2018) and the mid-loading period (July 2018). The content of Cadmium in all samples were undetectable while the contents of Lead, Copper and Zinc in water varied in the range of nd-5.5, 0.5-16.0 and 12.9-158.5 ppb, respectively. In the total suspended solids, they varied in the range of nd-4.0, nd-19.0 and 11.0-341.0 ppb, respectively and range of 10.6-53.5, 15.6-80.4 and 64.6-252.8 ppm, respectively in the sediments. Most heavy metals in the water did not exceed the standard value, but the heavy metals in the sediment were higher than the standard values in some stations, especially in the central part of the river mouth. The content of Copper, Zinc and Lead in water and sediment were seasonally significantly different ($p < 0.05$) and, the content of Copper in the sediments of the central part of the river mouth was seasonally significantly different ($p < 0.05$). Zinc content in water was significantly correlated with that of the total suspended solids. This study found that the heavy metal accumulation showed that heavy metals accumulation showed that the average value of heavy metals in the Tha chin river moth was 598,548.3 kilograms, featuring Zinc 66%, copper 18% and lead 16%, respectively. The total amount of heavy metals accumulated in sediment, suspended solids and water were 91%, 6% and 3%, respectively. These results indicate that the management of sediment contamination in Tha Chin river mouth is urgently needed.

Key words: heavy metal, contamination, total suspended solids, sediment, Tha Chin Estuary

บทนำ

แม่น้ำท่าจีนเป็นแม่น้ำที่สำคัญสายหนึ่ง เกิดจากการแยกตัวจากแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณปากคลองมะขามเฒ่า อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดชัยนาท ไหลผ่านอำเภอเดิมบางนางบวช อำเภอสามชูก อำเภอศรีประจันต์ อำเภอเมือง อำเภอบางปลาหมึก และอำเภอสองพี่น้อง จังหวัดสุพรรณบุรี อำเภอบางเลน อำเภอ

นครชัยศรี จังหวัดนครปฐม และไหลลงสู่อ่าวไทยที่ตำบลบางหญ้าแพรก อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร (Royal Irrigation Department, 1998) บริเวณปากแม่น้ำท่าจีนเป็นพื้นที่ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ เป็นทั้งแหล่งเพาะเลี้ยง แหล่งอนุบาลสัตว์น้ำวัยอ่อน แหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำเศรษฐกิจ และแหล่งทำประมงของคนในท้องถิ่น

ปัจจุบันบริเวณปากแม่น้ำท่าจีนกำลังเข้าสู่สภาวะเสื่อมโทรม จากรายงานของ Ministry of Natural Resources and Environment (2009) พบว่าบริเวณปากแม่น้ำท่าจีน มีค่าออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในภาวะต่ำจนอยู่ในระดับวิกฤต (น้อยกว่า 2 mg/l) สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำ สืบเนื่องจากการขยายตัวของแหล่งชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม และเกษตรกรรมบริเวณริมฝั่งทั้งสองด้านของแม่น้ำท่าจีน ทำให้แม่น้ำท่าจีนกลายเป็นแหล่งรองรับของเสียจากทุก ๆ กิจกรรมดังกล่าว (Buajan and Pumijumnong, 2010) อีกทั้งยังมีการปล่อยน้ำและของเสีย ที่ยังไม่ผ่านการบำบัดลงสู่แม่น้ำ จึงทำให้มีการสะสมตัวของของเสียประเภทต่าง ๆ ทั้งในรูปของสารละลายสะสมในน้ำ ปะปนกับอนุภาคที่แขวนลอย และอนุภาคที่จมตัวลงเป็นตะกอนบริเวณพื้นที่ท้องน้ำซึ่งล้นแล้วแต่เป็นแหล่งสะสมของของเสียได้ทั้งสิ้น

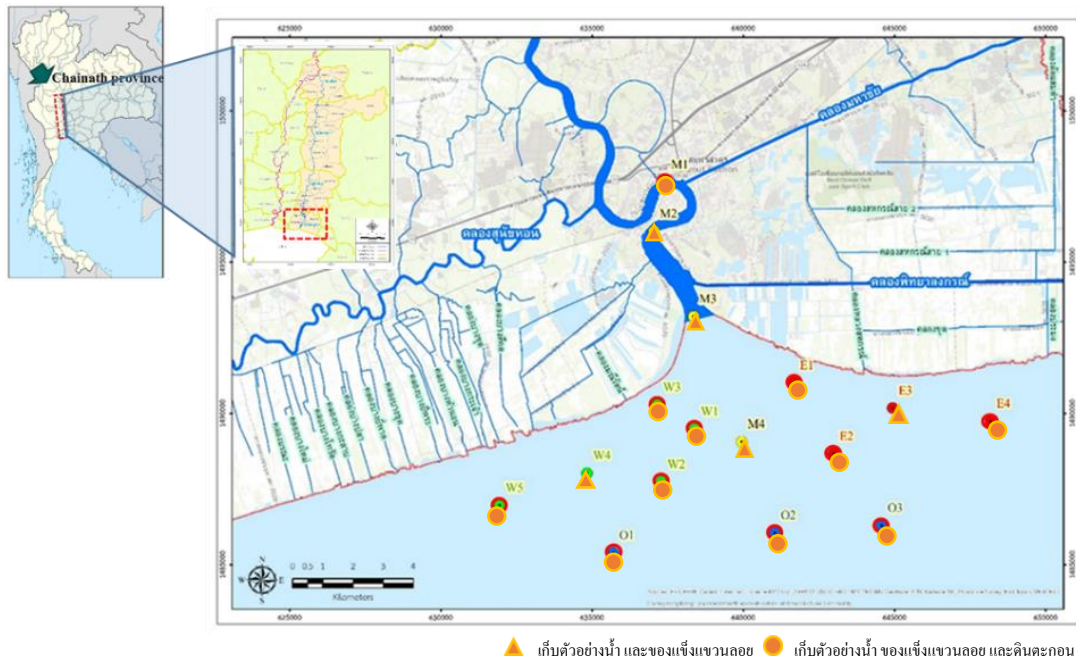
โลหะหนักเป็นของเสียประเภทหนึ่ง ที่มีการสะสมอยู่ในแม่น้ำท่าจีน (Veschasit, 2008) โลหะหนักมีความเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต รวมทั้งมีการสะสมตัวในแหล่งน้ำได้หลายรูปแบบ รวมทั้งยังสามารถรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ในแหล่งน้ำ และถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหาร (Thongra-ar *et al.*, 2008) ซึ่งสามารถสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสัตว์น้ำ และสะสมในดินตะกอนด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ระดับความเป็นพิษของโลหะหนักต่อสิ่งมีชีวิตขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนักแต่ละชนิด ปริมาณที่ได้รับ อายุ และความต้านทานของสิ่งมีชีวิต การวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาปริมาณของโลหะหนักที่สะสมในน้ำ ในของแข็งแขวนลอย และในดินตะกอน และติดตามสถานการณ์

ของสารมลพิษโลหะหนักที่ไหลลงมาจากแผ่นดินและเข้ามาสู่ระบบปากแม่น้ำ เพื่อเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำ ในของแข็งแขวนลอยรวม และในดินตะกอน ตลอดจนศึกษาถึงการสะสมโลหะหนักในพื้นที่ เพื่อเป็นข้อมูลในการเฝ้าระวังควบคุมปริมาณโลหะหนักที่มีการปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมบริเวณปากแม่น้ำท่าจีนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

1. พื้นที่ทำการศึกษา

ศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนัก บริเวณปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร โดยเก็บตัวอย่าง 2 ครั้ง ในช่วงต้นฤดูน้ำหลาก ซึ่งมีปริมาณน้ำท่า 189.50 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (เดือนเมษายน พ.ศ. 2561) และกลางฤดูน้ำหลากซึ่งมีปริมาณน้ำท่า 174.00 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561) (The Agricultural Research Development Agency (Public Organization) arda, 2018) กำหนดช่วงเวลาตามปริมาณน้ำท่าที่ไหลลงสู่บริเวณปากแม่น้ำ ปริมาณน้ำท่าแม่น้ำท่าจีน โดยกำหนดจุดเก็บตัวอย่างทั้งสิ้น 16 สถานี จาก 4 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่กลางลำน้ำ และร่องน้ำ (สถานี M1-M4) พื้นที่ดอนฝั่งตะวันออก (E1-E4) พื้นที่ดอนฝั่งตะวันตก (W1-W5) และพื้นที่ดอนนอกของปากแม่น้ำ (O1-O3) ซึ่งได้รับอิทธิพลจากมวลน้ำจืดค่อนข้างน้อยเนื่องจากอยู่ลึกลงไปในทะเลรวมทั้งเป็นจุดตะกอนตอนกลางของปากแม่น้ำ แบ่งพื้นที่ปากแม่น้ำท่าจีนตามการศึกษา Ritnim (2011) (ภาพที่ 1 และตารางที่ 1)



ภาพที่ 1 พื้นที่ศึกษาและสถานีเก็บตัวอย่างน้ำ ของแ่งแขวนลอยและดินตะกอนในพื้นที่ปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร

ตารางที่ 1 พิกัดจุดเก็บตัวอย่างตัวอย่างน้ำ ของแ่งแขวนลอย และดินตะกอนในพื้นที่ปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร

Station	UTM UNIT*		Station	UTM UNIT*	
	Easting	Northing		Easting	Northing
W1	638400	1489500	M4	639950	1489075
W2	637292	1487747	E1	641681	1491022
W3	637147	1490299	E3	644943	1490185
W4	634832	1488036	E4	648180	1489753
W5	631938	1486977	E2	642989	1488676
M1	637425	1497650	O1	635701	1485395
M2	637048	1496024	O2	641041	1486056
M3	638355	1493212	O3	644580	1486300

UTM UNIT* = UNIVERSAL TRANSVERSE MERCATOR UNIT

2. วิธีเก็บตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างน้ำด้วยกระบอกเก็บน้ำ (Kemmerer water sampler) ที่ระดับกึ่งกลางความลึก บรรจุน้ำใส่ขวด polyethylene ปริมาตร 250 มิลลิลิตร (ที่ผ่านการฆ่าเชื้อไนตริก (HNO_3) 40% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) จากนั้นกรองน้ำตัวอย่างด้วยแผ่นกรอง และเก็บรักษาแผ่นกรอง ใส่ในถุงโพลีเอทิลีนเพื่อใช้

วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในของแ่งแขวนลอยรวม ทำการปรับพีเอชของน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองให้ต่ำกว่า 2 ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น (conc.HNO_3) และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

เก็บตัวอย่างดินตะกอนระดับชั้นดินผิวหน้า (0-1 เซนติเมตร) ด้วยกระบอกเก็บดิน (Sediment corer) แล้วตัดขอบดินที่สัมผัสกับกระบอกเก็บดิน

เพื่อป้องกันการปนเปื้อนและใส่ในถุงโพลีเอธิลีน จากนั้นเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ก่อนนำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์ต่อไป

3. วิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง

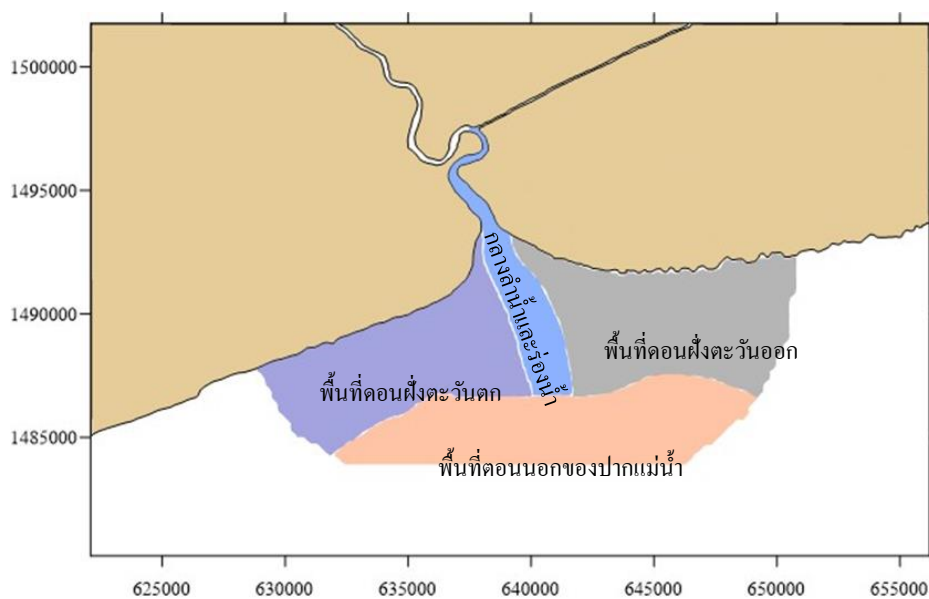
วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่สะสมในน้ำ คัดแปลงจาก Sukasem (1989) โดยเติมน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นกรอง GF/F แล้ว ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ใส่บีกเกอร์เทฟลอน และปรับพีเอช ให้มีค่าเท่ากับ 4 จากนั้นผสม 2% Ammonium Pyrolidine Dithiocarbamate (APDC) 10 มิลลิลิตร และ Methyl Isobutyl ketone (MIBK) 10 มิลลิลิตร กับน้ำตัวอย่างในกรวยแยกชนิดเทฟลอน ขนาด 250 มิลลิลิตร เขย่า 5 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น แล้วเก็บสารชั้นบนของ MIBK มาสกัดโลหะหนักอีกครั้งโดยผสมกรดไนตริก (HNO_3) ความเข้มข้น 4 N 10 มิลลิลิตร กับสารตัวอย่างเขย่า 5 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น จากนั้นเก็บไขชั้นกรด (ชั้นล่าง) แล้วเก็บใส่ขวดโพลีเอธิลีน เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HITACHI Model Z-8200 Series Flame-Atomic Absorption Spectrophotometer ต่อไป

วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในดิน ตะกอน และของแข็งแขวนลอยรวมบนแผ่นกรอง GF/F ด้วยวิธีดัดแปลงจาก Hungspreugs and

Yuangthong (1983) โดยเติมกรดไนตริก (HNO_3) เข้มข้น 5 มิลลิลิตร ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 1 มิลลิลิตร และกรดเปอร์คลอริก (Perchloric acid) 1 มิลลิลิตร เติมนลงในบีกเกอร์เทฟลอนที่มีตัวอย่างดิน ตะกอนซึ่งผ่านการอบแห้งและบดละเอียดแล้ว 0.25 กรัม หรือแผ่นกรอง GF/F ที่มีของแข็งแขวนลอยจากการกรองตัวอย่างน้ำและแห้งแล้ว จากนั้นย่อยตะกอน โดยดำเนินการตามขั้นตอนของเครื่องย่อยด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Digestion รุ่น QLAB Pro) แล้วพักทิ้งไว้ให้เย็น ทำการกรองเอาเฉพาะสารละลายด้วยแผ่นกรอง Whatman No.41 และปรับปริมาตรตัวอย่างให้เท่ากับ 20 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นปลอดประจุ (deionized water) จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง HITACHI Model Z-8200 Series Flame-Atomic Absorption Spectrophotometer

4. การศึกษาการสะสมของโลหะหนักในน้ำ ของแข็งแขวนลอย และดินตะกอน

คำนวณหาปริมาณน้ำทั้งหมด และปริมาณดินตะกอนทั้งหมดในบริเวณปากแม่น้ำท่าจีน โดยใช้ค่าความลึก และขอบเขตพื้นที่ศึกษา เพื่อนำไปใช้ในการประเมินสัดส่วนปริมาณการสะสมตัวของโลหะหนัก โลหะหนักของแข็งแขวนลอยรวม และโลหะหนักในดินตะกอนต่อพื้นที่การศึกษา



ภาพที่ 2 ขอบเขตการแบ่งพื้นที่ที่ศึกษาบริเวณปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร

ตารางที่ 2 ความลึกและความเค็มของสถานีเก็บตัวอย่างในพื้นที่ปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร

Station	Depth (m)		Salinity (psu)			
	เม.ย. 61	ก.ค.61	เม.ย. 61 (S)	เม.ย. 61 (B)	ก.ค. 61 (S)	ก.ค. 61 (B)
W1	2.1	2.8	21.2	23.4	29.0	30.0
W2	2.3	2.9	20.8	25.2	29.0	30.1
W3	2.0	2.8	21.6	21.6	29.9	29.9
W4	3.0	2.9	20.2	20.6	30.0	30.0
W5	3.3	4.5	26.1	26.3	30.0	29.9
M1	14.5	15.0	6.9	6.8	15.7	17.0
M2	2.0	9.0	10.3	-	15.7	22.8
M3	1.2	1.8	15.7	-	14.1	-
M4	2.4	2.8	23.4	23.4	29.0	29.2
E1	2.0	2.0	23.1	23.5	21.0	21.3
E2	1.7	2.8	25.8	-	28.4	29.8
E3	1.0	1.3	21.9	25.8	26.6	-
E4	2.6	3.5	23.4	-	27.5	27.8
O1	4.0	5.0	26.0	27.2	30.1	30.1
O2	2.0	1.5	25.6	26.0	29.7	29.9
O3	3.4	3.8	23.7	27.1	28.5	29.8

Depth (m) = ความลึกของสถานีเก็บตัวอย่าง (เมตร)

Salinity (psu) = ความเค็มของสถานีเก็บตัวอย่าง (psu)

(S) = บริเวณผิวน้ำ (B) = บริเวณพื้นท้องน้ำ

- = ไม่ได้ทำการตรวจวัด

การคิดปริมาณการสะสมตัวของโลหะหนักในน้ำ และของแข็งแขวนลอยต่อพื้นที่การศึกษา

$$\text{ปริมาณโลหะหนักต่อพื้นที่ (kg/Area)} = \frac{A \times B}{10^9}$$

A = ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ในน้ำ และของแข็งแขวนลอย ($\mu\text{g/l}$)

B = มวลน้ำทั้งหมดในบริเวณที่ทำการศึกษา (L)

การคิดปริมาณการสะสมตัวของโลหะหนักในดินตะกอนต่อพื้นที่การศึกษา

$$\text{ปริมาณโลหะหนักต่อพื้นที่ (kg/Area)} = \frac{A \times B}{10^9}$$

A = ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ต่อพื้นที่ Sediments Core ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ระดับ 0-1 เซนติเมตร ($\mu\text{g/cm}^3$)

B = ปริมาณดินตะกอนระดับผิวหน้า ระดับ 0-1 เซนติเมตร ในพื้นที่ทำการการศึกษา (cm^2)

การคิดสัดส่วนของโลหะหนักในบริเวณปากแม่น้ำท่าจีน

$$\text{HM Total} = \{\text{HM water (kg/Area)} + \text{HM TSS (kg/Area)} + \text{HM Sediment 0 - 1 cm (kg/Area)}\}$$

$$\text{HM\%} = \frac{\{\text{HM water} + \text{HM TSS} + \text{HM Sediment}\} \times 100}{\text{HM Total}}$$

5. วิเคราะห์ข้อมูล

นำเสนอข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนาด้วยค่าสูงสุด-ต่ำสุด และค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ทดสอบหาความแตกต่างทางสถิติของชุดข้อมูลด้วยการทดสอบแบบที (T-test) และหาระดับความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักสะสมในน้ำ โลหะหนักของแข็งแขวนลอย และโลหะหนักในดินตะกอน ด้วยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson's correlation coefficient) ด้วยโปรแกรม IBM SPSS statistics 22 และประเมินรูปแบบสะสมของโลหะหนักต่อพื้นที่ในบริเวณปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ปริมาณโลหะหนักในน้ำ ของแข็งแขวนลอยรวม และดินตะกอน

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าปริมาณแคดเมียมทั้งในรูปที่สะสมในน้ำ ของแข็งแขวนลอยรวม และในดินตะกอน มีค่าต่ำกว่าระดับที่สามารถตรวจวัดได้ (Detection limit เครื่อง HITACHI Model Z-8200 Series Flame-Atomic Absorption Spectrophotometer = 1.0 ppb) ส่วนปริมาณตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีทั้งสามแบบมีค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเฉลี่ยแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 โลหะหนัก (ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี) ในน้ำ ของแอ่งแขวนลอยรวม และดินตะกอนบริเวณปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร

Parameter	เดือนเมษายน พ.ศ. 2561 (ตัวแทนต้นฤดูน้ำหลาก)			เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 (ตัวแทนกลางฤดูน้ำหลาก)			Standard Level* HM in water (ppb)	Standard Level** HM in Sediments (ppm)
	MIN	MAX	MEAN±SD	MIN	MAX	MEAN±SD		
ตะกั่ว								
น้ำ (ppb)	ND	5.5	2.2±0.9	ND	2.5	2.0±0.6	8.5	
ของแอ่งแขวนลอยรวม (ppb)	ND	4.0	0.9±1.0	ND	1.7	0.6±0.5		
ดินตะกอน (ppm)	10.6	53.5	32.4±12.1	13	42.3	27.5±8.6		52.0
ทองแดง								
น้ำ (ppb)	0.5	16.0	4.5±3.7	0.5	3.0	1.3±0.6	8.0	
ของแอ่งแขวนลอยรวม (ppb)	ND	19.0	4.0±5.3	ND	5.7	1.4±1.4		
ดินตะกอน (ppm)	24.8	79.7	34.5±15.6	15.6	80.4	32.6±17.9		25.0
สังกะสี								
น้ำ (ppb)	12.9	158.5	56.4±34.3	15.0	56.5	31.5±12.9	50.0	
ของแอ่งแขวนลอยรวม (ppb)	11.0	341.0	112.8±90.6	33.3	162.3	91.0±40.4		
ดินตะกอน (ppm)	70.5	252.8	110.5±50.4	64.6	182.0	104.5±35.6		102.0

ND = non-detected

*Standards Water quality (Pollution Control Department, 2006)

**The standard level of coastal sediment quality (Pollution Control Department, 2015)

ปริมาณโลหะหนักสะสมในน้ำ

ปริมาณตะกั่วสะสมในน้ำในเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 มีค่าอยู่ในช่วง nd-5.5 ppb ส่วนตะกั่วสะสมในน้ำในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 มีค่าอยู่ในช่วง nd-2.5 ppb เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำชายฝั่ง (ตารางที่ 3) พบว่า ปริมาณตะกั่วสะสมในน้ำมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำชายฝั่ง และเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาในอดีตบริเวณปากแม่น้ำท่าจีนพบว่าปริมาณตะกั่วในน้ำในการศึกษาค้างนี้มีค่าสูงกว่าการศึกษาของ Watcharasing (2014) ที่พบปริมาณการปนเปื้อนของตะกั่วในน้ำในปากแม่น้ำท่าจีนเท่ากับ 0.9 ppb และการศึกษาของ Rattanapaiboon (2015) พบปริมาณตะกั่วในน้ำในบริเวณแม่น้ำท่าจีนตอนล่างเท่ากับ 0.5 ppb ตะกั่วที่สะสมในน้ำแต่ละบริเวณมีค่าต่างกันเรียงลำดับได้

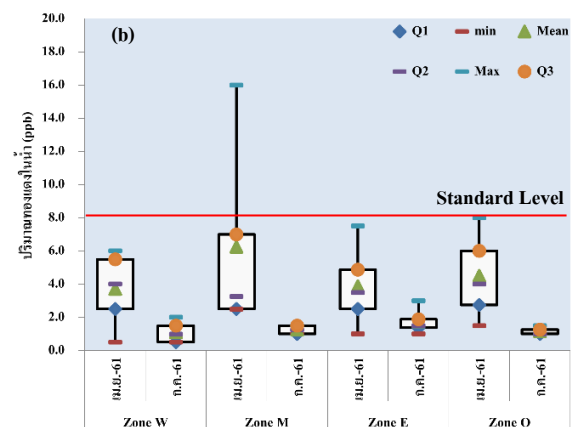
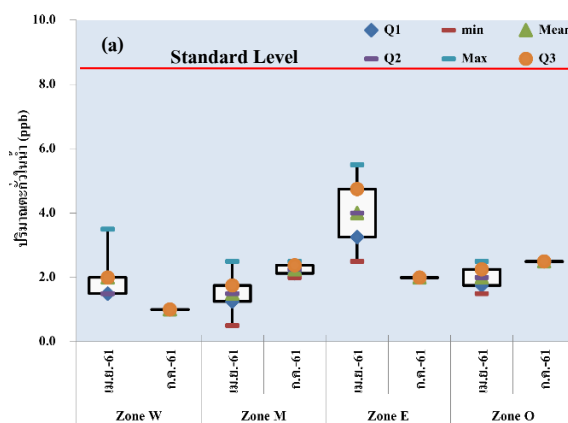
ดังนี้ คือ บริเวณฝั่งตะวันออก > บริเวณตอนนอก > บริเวณฝั่งตะวันตก = บริเวณแนวร่องน้ำ (ภาพที่ 3) ความแตกต่างที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่ามลพิษบริเวณปากแม่น้ำท่าจีนมีการแบ่งพื้นที่อย่างชัดเจนในช่วงเดือนเมษายน มลพิษไม่ได้เกิดการผสมผสานได้ดีเหมือนอย่างที่เกิดขึ้นในเดือนกรกฎาคม โดยปกติการแพร่กระจายของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสามารถบอกต้นกำเนิดของแหล่งที่มาได้ค่อนข้างชัดเจน ซึ่งแหล่งกำเนิดของโลหะหนักโดยทั่วไปมาจากโรงงานอุตสาหกรรมและกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง (Veschasit, 2008) ทำให้บริเวณร่องน้ำมักมีความเข้มข้นของโลหะหนักสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ เนื่องจากใกล้แหล่งกำเนิดมากที่สุด ดังนั้นการที่มลพิษบริเวณฝั่งตะวันออกมีปริมาณตะกั่วที่สูงกว่าทางฝั่งตะวันตกสามารถแสดงให้เห็นถึงกิจกรรมที่ก่อให้เกิดการ

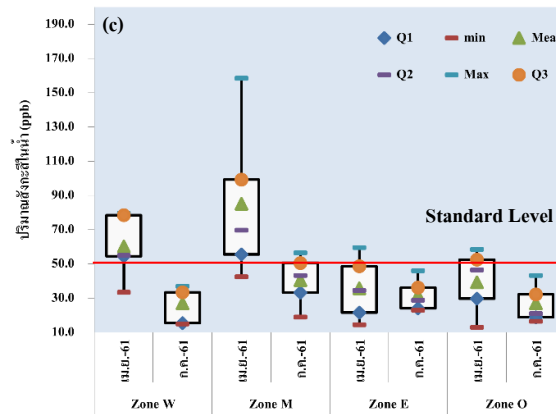
ระบายของตะกั่วที่แตกต่างกัน ซึ่งหากพิจารณาถึงการ
ใช้ประโยชน์ในพื้นที่ทางฝั่งตะวันออกบริเวณตำบล
พันท้ายนรสิงห์นั้นมีมากกว่าทางฝั่งตะวันตก
ค่อนข้างมาก

ปริมาณทองแดงสะสมในน้ำในเดือน
เมษายน พ.ศ. 2561 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-16.0 ppb ส่วน
ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-3.0
ppb จากผลการศึกษาโดยภาพรวมพบว่า ปริมาณ
ทองแดงในน้ำมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำ
ชายฝั่ง (8.0 ppb) ยกเว้นในสถานี M1 ซึ่งตั้งอยู่ใน
ลำน้ำของแม่น้ำท่าจีน พบปริมาณทองแดงมีค่าสูง
(16.0 ppb) ทั้งนี้อาจเพราะบริเวณดังกล่าวเป็นแหล่ง
รับรองมลพิษน้ำเสียจากแหล่งชุมชนและโรงงาน
อุตสาหกรรม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ
Rermdumri *et al.* (2008) พบปริมาณทองแดงในน้ำ
สูงที่สุด ในบริเวณจุดเก็บตัวอย่างที่เป็นแหล่งชุมชน
เมืองและมีแหล่งอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังพบว่า
ค่าเฉลี่ยของปริมาณทองแดงในการศึกษานี้มีค่า
ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการรายงานของ Pollution
Control Department (2014) ซึ่งพบปริมาณทองแดง
ในน้ำบริเวณแม่น้ำท่าจีนตอนล่างมีค่า 10.0-11.0 ppb
ทั้งนี้สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากความแตกต่างของ

น้ำท่าจีนตอนบนที่ทำหน้าที่ในการเจือจางความ
เข้มข้นของโลหะหนักในมวลน้ำได้ ส่วนการสะสม
ในพื้นที่พบการสะสมของทองแดงในบริเวณแนว
ร่องน้ำ > บริเวณฝั่งตะวันออก = บริเวณตอนนอก >
บริเวณฝั่งตะวันตก (ภาพที่ 3)

ปริมาณสังกะสีในน้ำในเดือนเมษายน พ.ศ.
2561 มีค่าอยู่ระหว่าง 12.9-158.5 ppb ส่วนเดือน
กรกฎาคม พ.ศ. 2561 สังกะสีในน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง
15.0-56.5 ppb โดยภาพรวมจากการศึกษาทั้ง 2
ฤดูกาล แสดงให้เห็นว่าปริมาณสังกะสีในน้ำมีค่าต่ำ
กว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำชายฝั่ง (50.0 ppb) ยกเว้นใน
สถานี M1 ซึ่งเป็นสถานีเดียวกันกับสถานีที่มีปริมาณ
ทองแดงในน้ำสูง ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า ปริมาณ
สังกะสีในน้ำมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาปริมาณ
สังกะสีในน้ำบริเวณปากแม่น้ำท่าจีน (Kantikul,
2019) ที่พบปริมาณสังกะสีในบริเวณปากแม่น้ำท่าจีน
มีค่าอยู่ในช่วง 11.0-64.0 ppb และพบค่าสูงในบริเวณ
ตอนในของปากแม่น้ำซึ่งเป็นบริเวณใกล้เคียงกับ
สถานี M1 ส่วนการสะสมในพื้นที่พบการสะสมของ
สังกะสีในบริเวณแนวร่องน้ำ > บริเวณฝั่งตะวันตก >
บริเวณตอนนอก > บริเวณฝั่งตะวันออก (ภาพที่ 3)





ภาพที่ 3 ปริมาณตะกั่ว (a) ทองแดง (b) และสังกะสี (c) ในน้ำ ในเดือนเมษายน และเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 บริเวณปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร

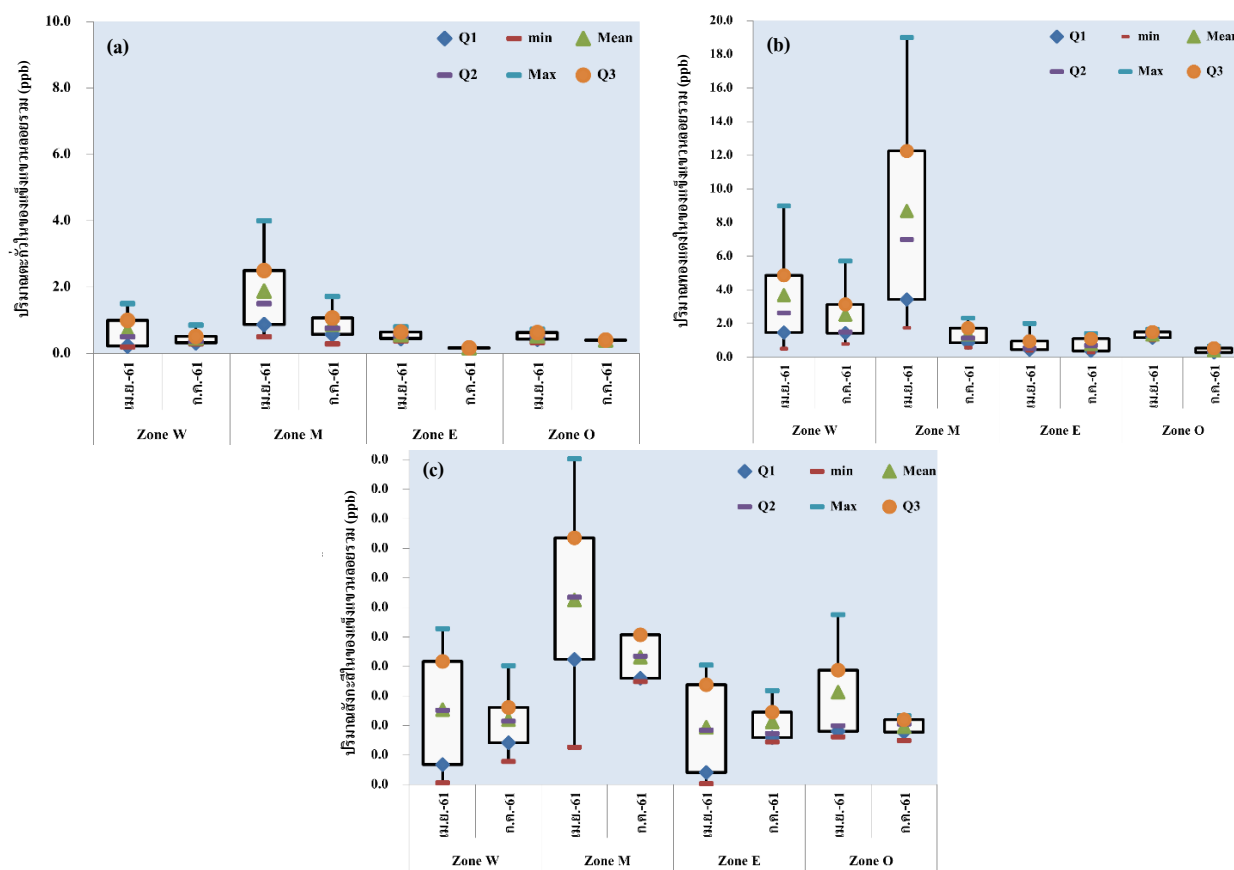
ปริมาณโลหะหนักในของแข็งแขวนลอยรวม

ปริมาณตะกั่วในของแข็งแขวนลอยรวมในเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 มีค่าอยู่ระหว่าง nd-4.0 ppb โดยมีค่าสูงที่สุดในสถานี M1 ส่วนในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 มีค่าอยู่ระหว่าง nd-1.7 ppb มีค่าสูงที่สุดในสถานี M1 เช่นเดียวกับเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 (ตัวแทนต้นฤดูน้ำหลาก) และมีค่าสูงเช่นเดียวกับตะกั่วในน้ำในเดือนเดียวกัน ส่วนการสะสมในพื้นที่พบการสะสมของตะกั่วในบริเวณแนวร่องน้ำ > บริเวณฝั่งตะวันตก > บริเวณฝั่งตะวันออก = บริเวณตอนนอก (ภาพที่ 4)

ปริมาณทองแดงในของแข็งแขวนลอยรวมในเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 มีค่าอยู่ระหว่าง nd-19.0 ppb มีค่าสูงที่สุดในสถานี M1 เช่นเดียวกับปริมาณ

ทองแดงสะสมในน้ำและปริมาณตะกั่วในของแข็งแขวนลอยรวม ส่วนในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 มีค่าอยู่ระหว่าง nd-5.7 ppb สำหรับการสะสมของทองแดงในพื้นที่ต่าง ๆ สามารถเรียงลำดับได้เป็น บริเวณแนวร่องน้ำ > บริเวณฝั่งตะวันตก > บริเวณฝั่งตะวันออก = บริเวณตอนนอก (ภาพที่ 4)

ปริมาณสังกะสีในของแข็งแขวนลอยรวมในเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 มีค่าอยู่ระหว่าง 11.0-341.0 ppb โดยมีค่าสูงที่สุดในสถานี M1 เช่นเดียวกับปริมาณตะกั่วและทองแดงสะสมในของแข็งแขวนลอยรวม ส่วนในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 มีค่าอยู่ระหว่าง 33.3-162.3 ppb โดยมีค่าสูงที่สุดในสถานี M2 พบการสะสมของสังกะสีในบริเวณแนวร่องน้ำ > บริเวณตอนนอก > บริเวณฝั่งตะวันตก > บริเวณฝั่งตะวันออก (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 4 ปริมาณตะกั่ว (a) ทองแดง (b) และสังกะสี (c) ในของแข็งแขวนลอยรวม ในเดือนเมษายน และเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 บริเวณปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร

ปริมาณโลหะหนักในดินตะกอน

ปริมาณตะกั่วในดินตะกอนในเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 มีค่าอยู่ระหว่าง 10.6-53.5 ppm ในบางสถานีมีค่าเกินเกณฑ์คุณภาพตะกอนดินชายฝั่งทะเล และพบค่าสูงที่สุดในสถานี M1 ส่วนในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 13.0-42.3 ppm ซึ่งในบางสถานี มีค่าเกินเกณฑ์คุณภาพตะกอนดินชายฝั่งทะเล (ตารางที่ 3) และพบค่าสูงที่สุดในสถานี M1 เช่นเดียวกับปริมาณตะกั่วสะสมในน้ำ และในของแข็งแขวนลอยรวม (ตารางที่ 3) เมื่อพิจารณาจากการศึกษาในอดีตพบว่า มีค่าสูงกว่าการศึกษาของ Watcharasing (2014) ที่พบปริมาณตะกั่วในบริเวณปากแม่น้ำท่าจีนมีค่าอยู่ในช่วง 14.4-24.7 ppm นอกจากนี้สามารถสรุปได้ว่าการสะสมของตะกั่วใน

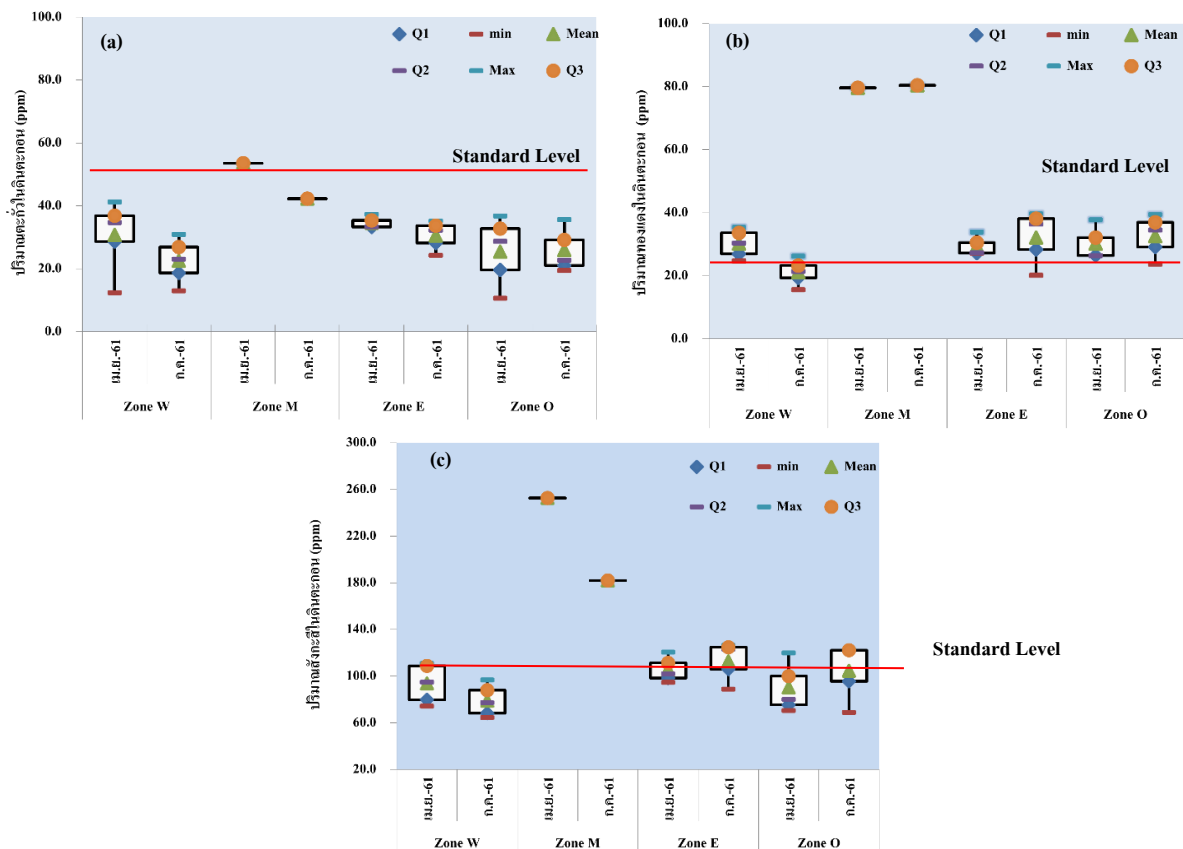
บริเวณแนวร่องน้ำ > บริเวณฝั่งตะวันออก > บริเวณฝั่งตะวันตก > บริเวณตอนนอก (ภาพที่ 5)

ทองแดงในดินตะกอนเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 มีค่าอยู่ระหว่าง 24.8-79.7 ppm ซึ่งมีค่าเกินเกณฑ์คุณภาพตะกอนดินชายฝั่งทะเล ยกเว้นในสถานี W1 ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 15.6-80.4 ppm โดยส่วนใหญ่มีค่าเกินเกณฑ์คุณภาพตะกอนดินชายฝั่งทะเล (ตารางที่ 3) การศึกษาในครั้งนี้พบทองแดงในดินตะกอนมีค่าสูงกว่าการศึกษาของ Chaiyaraa *et al.* (2013) ในบริเวณอ่าวไทยตอนในซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.46-0.45 ppm และมีค่าใกล้เคียงการศึกษาของ Veschasit (2008) มีค่าอยู่ในช่วง 63.69-83.04 ppm ซึ่งทำการศึกษาในบริเวณปากแม่น้ำท่าจีนเช่นเดียวกัน นอกจากนี้พบการสะสมของทองแดงในบริเวณแนวร่องน้ำ > บริเวณตอน

นอก > บริเวณฝั่งตะวันออก > บริเวณฝั่งตะวันตก
(ภาพที่ 5)

ปริมาณสังกะสีในดินตะกอนเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 มีค่าอยู่ระหว่าง 70.5-252.8 ppm ซึ่งพบว่ามีค่าเกินค่าเกณฑ์คุณภาพตะกอนดินชายฝั่งทะเล (ตารางที่ 3) ส่วนในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 64.6-182.0 ppm ซึ่งมีค่าเกินค่าเกณฑ์คุณภาพตะกอนดินชายฝั่งทะเล (ตารางที่ 3) ในบางสถานี โดยพบค่าสูงที่สุดในสถานี M1 เช่นเดียวกับปริมาณสังกะสีในน้ำ

และของแข็งแขวนลอยรวม รวมทั้งพบว่า การศึกษาในครั้งนี้เฉพาะบริเวณฝั่งตะวันตกมีค่าอยู่ระหว่าง 64.6-110.8 ppm ซึ่งมีค่าสูงกว่าการศึกษาของ Buajan and Pumijumnong (2010) ซึ่งพบปริมาณสังกะสีในดินตะกอนบริเวณฝั่งตะวันตกของปากแม่น้ำท่าจีนมีค่าอยู่ในช่วง 11.91-25.74 ppm นอกจากนี้พบการสะสมของสังกะสีในบริเวณแนวร่องน้ำ > บริเวณฝั่งตะวันออก > บริเวณตอนนอก > บริเวณฝั่งตะวันตก (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 ปริมาณตะกั่ว (a) ทองแดง (b) และสังกะสี (c) ในดินตะกอน ในเดือนเมษายน และเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 บริเวณปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร

โดยภาพรวมพบว่าปริมาณโลหะหนัก (แคดเมียม ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี) สะสมในน้ำในของแข็งแขวนลอยรวม และในดินตะกอน ในเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 (ต้นฤดูน้ำหลาก) และเดือน

กรกฎาคม พ.ศ. 2561 (กลางฤดูน้ำหลาก) ปริมาณโลหะหนักสะสมในน้ำในหลายพื้นที่มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐาน (ยกเว้น สังกะสี และทองแดงในสถานี M1)

ส่วนปริมาณโลหะหนักในของแข็งแขวนลอยรวม ในช่วงเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 มีค่าสูงกว่าในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 สอดคล้องกับปริมาณของแข็งแขวนลอยรวมในเดือนเมษายน (62 mg/l) ที่มีปริมาณมากกว่าในเดือนกรกฎาคม (32 mg/l) ปริมาณของแข็งแขวนลอยจึงเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งของการสะสมโลหะหนัก เพราะโลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ในแหล่งน้ำได้ (Salomon and Forstner, 1984)

จากการศึกษาปริมาณตะกั่วในดินตะกอนทั้ง 2 ฤดูกาล พบค่าไม่เกินค่ามาตรฐานคุณภาพดินตะกอนชายฝั่ง (52.0 ppm) แต่ปริมาณทองแดง และสังกะสีมีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานคุณภาพดินตะกอนชายฝั่ง (25.0 และ 102.0 ppm ตามลำดับ) โดยเฉพาะในสถานี M1 ซึ่งเป็นสถานีตอนในสุดของปากแม่น้ำ และเป็นพื้นที่แนวร่องน้ำ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวได้รับอิทธิพลหลักของมวลน้ำที่ไหลผ่านแหล่งชุมชน และแหล่งอุตสาหกรรมริมสองฝั่งแม่น้ำโดยตรง อีกทั้งพบการใช้ประโยชน์ของพื้นที่ริม 2 ฝั่งแม่น้ำเป็นแหล่งที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรม (ภาพที่ 1) โดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรมพลาสติก และอุตสาหกรรมผลิตโลหะที่เพิ่มขึ้นในปี 2561 (Samut Sakhon Province Industry Office, 2020) ซึ่งมีส่วนผสมของทองแดง และสังกะสีในกระบวนการผลิต และสะสมในบริเวณปากแม่น้ำท่าจีน

โดยภาพรวมจากการศึกษาทั้ง 2 ฤดูกาล พบว่าปริมาณโลหะหนักในเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 ตัวแทนต้นฤดูน้ำหลากมีค่าสูงกว่าเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 ตัวแทนกลางฤดูน้ำหลาก เนื่องจากในช่วงที่ทำการศึกษในเดือนเมษายน มีปริมาณน้ำท่ามากกว่าเดือนกรกฎาคม ปริมาณน้ำท่าเป็นตัวพาโลหะหนักจากแหล่งชุมชน และแหล่งอุตสาหกรรมลงสู่แม่น้ำท่าจีนและมีการไหลไปสะสมในบริเวณปากแม่น้ำ สอดคล้องกับการศึกษาของ Jindasree *et al.* (2017)

ที่รายงานความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำช่วงฤดูน้ำหลากสูงกว่าฤดูแล้งในบริเวณปากแม่น้ำท่าจีนเช่นกัน เมื่อพิจารณาความแตกต่างตามฤดูกาลพบว่าปริมาณทองแดงในน้ำ สังกะสีในน้ำ และตะกั่วในดินมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และเมื่อพิจารณาความแตกต่างตามพื้นที่ พบว่า ในบริเวณแนวร่องน้ำมีความแตกต่างของทองแดงในดินตะกอนตามฤดูกาล

นอกจากนี้ยังพบว่า ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีในดินตะกอนมีความสัมพันธ์ทางบวกระหว่างกันสูง ($p < 0.01$) แสดงให้เห็นว่าโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด มีการกระจายสะสมอยู่ร่วมกัน และมีโอกาสเกิดจากแหล่งกำเนิดแหล่งเดียวกัน เช่นเดียวกับการศึกษาของ Kantikul (2019) พบว่าตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีในดินตะกอน ในบริเวณอ่าวไทยตอนในมีความสัมพันธ์ทางบวกระหว่างกันสูง และพบว่าปริมาณสังกะสีและตะกั่วสะสมในน้ำมีความสัมพันธ์ทางบวกกับปริมาณสังกะสีและตะกั่วในของแข็งแขวนลอย ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าหากพบการปนเปื้อนของสังกะสีและตะกั่วในน้ำ ก็มีโอกาพบในตะกอนสูงเช่นเดียวกัน โลหะหนักเหล่านี้มีโอกาสสะสมในสัตว์น้ำเมื่อของแข็งแขวนลอยส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ และสารอินทรีย์ซึ่งเป็นแหล่งอาหารสำคัญของสิ่งมีชีวิตในทะเล และอาจถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารจนเป็นอันตรายต่อมนุษย์ เมื่อบริเวณปากแม่น้ำท่าจีนเป็นแหล่งอาศัยของสัตว์เศรษฐกิจ อาทิเช่น การเพาะเลี้ยงหอยแมลงภู่นก หอยพิมพ์ และหอยลาย (Poovachiranon, 2011) ทั้งนี้ หอยสองฝามีโอกาสสะสมโลหะหนักได้มากเนื่องจากลักษณะการกินอาหาร โดยการกรองสารแขวนลอยต่าง ๆ จากน้ำทะเล (Filter feeding) (Ma and Niyomthai, 2010)

การสะสมของโลหะหนักสะสมในน้ำ ของแข็งแขวนลอย และดินตะกอน

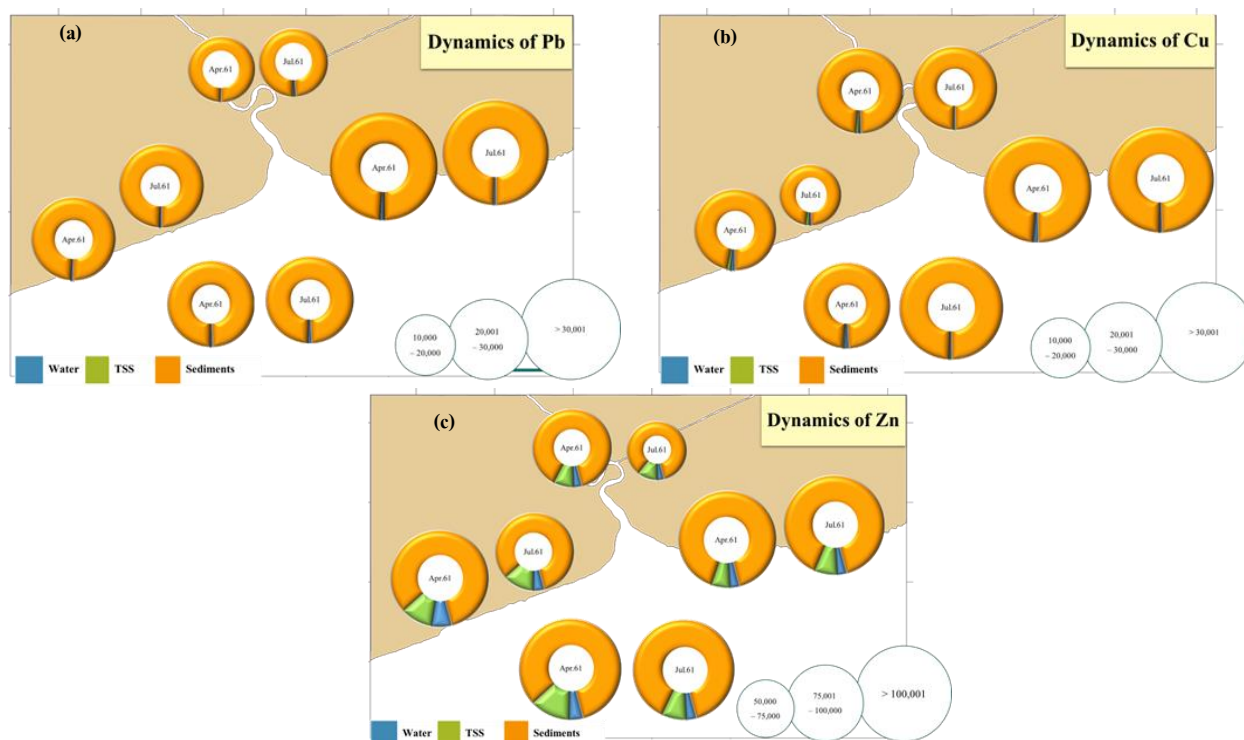
มวลน้ำเฉลี่ยในบริเวณพื้นที่ศึกษาปากแม่น้ำท่าจีนที่สามารถคำนวณได้ มีปริมาณเท่ากับ $437,399,184 \pm 45,482,568.7$ ตัน ส่วนปริมาณดินตะกอนที่ระดับผิวหน้าของบริเวณพื้นที่ศึกษารวมทั้งสิ้น มีค่าเท่ากับ $126,166,984 \pm 13,215,608.3$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาณโลหะหนักในบริเวณปากแม่น้ำเฉลี่ยรวมทั้งสิ้นเท่ากับ $598,548.3 \pm 151,276$ กิโลกรัม

เมื่อพิจารณาปริมาณการสะสมตะกั่วในน้ำของแข็งแขวนลอย และดินตะกอนในพื้นที่ศึกษาบริเวณปากแม่น้ำท่าจีนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ $96,020.8 \pm 9,913.4$ กิโลกรัม ในเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 (ตัวแทนต้นฤดูน้ำหลาก) มีปริมาณการสะสมตะกั่วรวมเท่ากับ $103,030.6$ กิโลกรัม ส่วนในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 (ตัวแทนปลายฤดูน้ำหลาก) มีปริมาณการสะสมตะกั่วรวมเท่ากับ $89,011.0$ กิโลกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละพื้นที่ และไม่พบการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของตะกั่วในแต่ละพารามิเตอร์ตามฤดูกาล (ภาพที่ 6a) โดยตะกั่วสะสมเฉลี่ยอยู่ในดินตะกอน (98.8 %) ในของแข็งแขวนลอย (0.2 %) และในน้ำ (0.9 %) รวมทั้งพบการสะสมของตะกั่วสูงที่สุดในบริเวณฝั่งตะวันออกของปากแม่น้ำท่าจีน

การสะสมทองแดงในน้ำ ของแข็งแขวนลอย และดินตะกอนในพื้นที่ศึกษาบริเวณปากแม่น้ำท่าจีนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ $108,052.1 \pm 2,753.7$ กิโลกรัม ในเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 (ตัวแทนต้นฤดูน้ำหลาก) มีปริมาณการสะสมทองแดงรวมเท่ากับ $109,999.3$

กิโลกรัม ส่วนในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 (ตัวแทนปลายฤดูน้ำหลาก) มีปริมาณการสะสมทองแดงรวมเท่ากับ $106,104.9$ กิโลกรัมต่อพื้นที่ปากแม่น้ำท่าจีนซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละพื้นที่ (ยกเว้นในพื้นที่ฝั่งตะวันตก และพื้นที่ตอนนอก) และไม่พบการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนตามฤดูกาลอย่างชัดเจน (ภาพที่ 6b) โดยส่วนใหญ่พบปริมาณทองแดงสะสมอยู่ในดินตะกอน ร้อยละ 98 ในน้ำและของแข็งแขวนลอยมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 1 ซึ่งพบสัดส่วนการสะสมของทองแดงมีลักษณะเช่นเดียวกันกับปริมาณตะกั่วในพื้นที่บริเวณปากแม่น้ำท่าจีน นอกจากนี้พบการสะสมของทองแดงที่สูงในบริเวณพื้นที่ฝั่งตะวันออกและพื้นที่ตอนนอกของปากแม่น้ำ

การสะสมสังกะสีในน้ำ ของแข็งแขวนลอย และดินตะกอนในพื้นที่ศึกษาบริเวณปากแม่น้ำท่าจีนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ $394,475.5 \pm 12,015.7$ กิโลกรัม ในเดือนเมษายน พ.ศ. 2561 (ตัวแทนต้นฤดูน้ำหลาก) มีปริมาณการสะสมสังกะสีรวมเท่ากับ $402,971.9$ กิโลกรัม ส่วนในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 (ตัวแทนปลายฤดูน้ำหลาก) มีปริมาณการสะสมสังกะสีรวมเท่ากับ $385,979.1$ กิโลกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 2 เดือน แต่เมื่อพิจารณาตามพื้นที่พบว่าในบริเวณแนวร่องน้ำและพื้นที่ฝั่งตะวันตกในเดือนเมษายนสูงกว่าเดือนกรกฎาคม (ภาพที่ 6c) โดยส่วนใหญ่สังกะสีสะสมอยู่ในดินตะกอน ร้อยละ 86 รองลงมาคือ ในของแข็งแขวนลอย ร้อยละ 9 และในน้ำ ร้อยละ 4 และพบการสะสมของสังกะสีที่สูงในบริเวณพื้นที่ฝั่งตะวันออก และพื้นที่ตอนนอกของปากแม่น้ำ เช่นเดียวกับการสะสมตัวของทองแดง



ภาพที่ 6 สัดส่วนการสะสมของโลหะหนัก (ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี) ในน้ำ ของแ่งแขวนลอยรวม และดินตะกอน เดือนเมษายน และเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 (Apr.61 และ Jul.61) ในบริเวณปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร

การสะสมของโลหะหนักในน้ำ ของแ่งแขวนลอยรวม และดินตะกอน ตลอดระยะเวลาการศึกษาพบ ปริมาณของสังกะสี ร้อยละ 66 ทองแดง ร้อยละ 18 และตะกั่ว ร้อยละ 16 โดยมีโลหะหนักสะสมอยู่ในดินตะกอน (91%) > ในของแ่งแขวนลอยรวม (6%) > ในน้ำ (3%) นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าของแ่งแขวนลอยรวมมีการสะสมของสังกะสีมากกว่าตะกั่วและทองแดงถึง 45 และ 9 เท่า ตามลำดับ รวมทั้งพบการสะสมของโลหะหนักในดินตะกอนสูงในพื้นที่ฝั่งตะวันออกเนื่องจากบริเวณนี้เป็นจุดตกตะกอนของปากแม่น้ำ และได้รับอิทธิพลจากคลองประมง และคลองหลวงสหกรณ์ ซึ่งรับมวลน้ำจากคลองพิทยาลงกรณ์ และคลองมหาชัยที่เป็นคลองผันน้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยาไหลผ่านแหล่งชุมชน และแหล่งอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ลงสู่แม่น้ำท่าจีนจึงพัดพาโลหะหนักต่าง ๆ ลงสู่แม่น้ำ ส่วนพื้นที่ตอนนอกของบริเวณปากแม่น้ำ

ท่าจีนมีการพบการสะสมของสังกะสีและทองแดงเนื่องจากเป็นบริเวณที่มวลน้ำจืดจากแม่น้ำไหลมาบรรจบกับน้ำทะเลส่งผลให้ความเร็วของน้ำลดลงทำให้โลหะหนักที่ปนเปื้อนมากับมวลน้ำและของแ่งแขวนลอยมีการจมตัวลงสู่พื้นท้องน้ำและสะสมตัวในบริเวณดังกล่าวด้วย ดังนั้นพื้นที่ทั้ง 2 บริเวณนี้ควรมีการเฝ้าระวัง ควบคุมปริมาณสารโลหะหนักต่าง ๆ เป็นพิเศษ

สรุป

การศึกษาในครั้งนี้พบปริมาณแคดเมียมในน้ำ ของแ่งแขวนลอยรวม และในดินตะกอน มีค่าต่ำกว่าระดับที่สามารถตรวจวัดได้ (Detection limit = 1.0 ppb) ปริมาณโลหะหนัก (ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี) ในน้ำส่วนใหญ่มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐาน (ยกเว้น สังกะสี และทองแดงในบางสถานี) ปริมาณ

โลหะหนัก (ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี) ในดินตะกอนมีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานในบางสถานี โดยเฉพาะสถานีที่ตั้งอยู่ในลำน้ำ รวมทั้งพบการปนเปื้อนของโลหะหนักในของแข็งแขวนลอยรวมซึ่งของแข็งแขวนลอยรวมเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถสะสมโลหะหนักได้ นอกจากนี้พบปริมาณโลหะหนักในเดือนเมษายนสูงกว่าเดือนกรกฎาคม เนื่องจากเดือนเมษายนมีปริมาณน้ำท่ามากกว่าซึ่งเป็นตัวนำพาสารโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำ และพบความสัมพันธ์ของสังกะสีในน้ำกับสังกะสีในของแข็งแขวนลอย ตลอดจนความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสี ทองแดง และตะกั่วในดินตะกอน สะท้อนให้เห็นว่าโลหะหนักในบริเวณปากแม่น้ำท่าจีนมีแหล่งที่มาจากแหล่งเดียวกัน ส่วนการศึกษาในเรื่องการสะสมของโลหะหนักสามารถสรุปได้ว่า มีสัดส่วนของสังกะสี (66 %) ทองแดง (18 %) และตะกั่ว (16 %) โดยพบโลหะหนักอยู่ในดินตะกอน > ของแข็งแขวนลอยรวม > น้ำ รวมทั้งพบว่า สังกะสีสามารถสะสมอยู่ในของแข็งแขวนลอยรวมได้มากกว่าตะกั่วและทองแดง นอกจากนี้พบการสะสมของโลหะหนักในดินตะกอนมีค่าสูงในพื้นที่ฝั่งตะวันออก และพื้นที่ตอนนอกของบริเวณปากแม่น้ำท่าจีน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณนักวิจัย และผู้ช่วยนักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการวิจัยทางทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่าง การวิเคราะห์ตัวอย่าง ตลอดจนให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นอย่างดี ขอขอบพระคุณ ศูนย์วิทยการขั้นสูงด้านทรัพยากรธรรมชาติเขตร้อน สถาบันวิทยการขั้นสูงแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับอนุเคราะห์

งบประมาณจากทุนอุดหนุนการวิจัย และสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)

เอกสารอ้างอิง

- Buajan, S. and Pumijumnong, N. 2010. Distribution of heavy metals in mangrove sediment at the Tha Chin Estuary, Samut Sakhon province. **Thailand Journal of Environmental Research** 32(2): 61-77. (in Thai)
- Chaiyaraa, R., Ngoendeeb, M. and Kruatrachu, M. 2013. Accumulation of Cd, Cu, Pb, and Zn in water, sediments, and mangrove crabs (*Sesarma mederi*) in the upper Gulf of Thailand. **ScienceAsia** 39: 376-383. (in Thai)
- Hungspreugs, M. and Yuangthong, C. 1983. A history of metal pollution in the Upper Gulf of Thailand. **Marine Pollution Bulletin** 14(12): 465-469.
- Jindasre, T., Meksumpun S., Thawornsode N., Veschasit, O. and Chanuan, P. 2017. Heavy Metals Contamination in Water in the Tha Chin Estuary, Samut Sakhon Province, pp. 591-599. *In Proceedings of 55th Kasetsart University. Annual Conference: Plants, Animals, Veterinary Medicine, Fisheries, Agricultural Extension and Home Economics.* Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Kantikul, N. 2019. Seasonal Variation of Heavy Metals in the Inner Gulf of Thailand. Master Thesis of Science (Marine Science), Kasetsart University. (in Thai)
- Ma, T. and Niyomthai, W. 2010. Contamination of heavy metals in economical important bivalve

- at Don Hoi Lod, Samut Songkhram province, pp. 191-198. **In Proceedings of 48th Kasetsart University Annual Conference: Natural Resources and Environment.** Kasetsart University. (in Thai)
- Ministry of Natural Resources and Environment. 2009. **Marine Water Quality. Pages 34. In: Annual report of the Office of Water Quality Management.** Published documents, Water Quality & Management Pollution Control Department, Bangkok. (in Thai)
- Pollution Control Department. 2006. **National Environment Board Announcement No 27 (2006) Title: Marine Water Quality Standard.** Published documents, Government vol 124, Part 11. (dated December 26, 2016). (in Thai)
- Pollution Control Department. 2014. **Results of measurement of heavy metal content. Pages 41. In: Monitoring report of the Tha Chin river quality, canals, branches and overlapping rivers.** Environment and Pollution Control Office 5, Published documents, Pollution Control Department, Nakhon Pathom. (in Thai)
- Pollution Control Department. 2015. **Pollution Control Department Title: Determine The Quality Criteria for Coastal Sediment.** Published documents, Government, (dated October 9, 2015). (in Thai)
- Poovachiranon, S. 2011. **Biodiversity of the tha chin river mouth ecosystem: recognized basic information and indigenous knowledge supporting a proposal to establish a unique marine and coastal protected area, Technical Paper no. 1.** Published documents, Marine and Coastal Resources Research Center, Samut Sakhon. (in Thai)
- Rattanapaiboon, W. 2015. Heavy metal absorption efficiency of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk) culturing in the Tha Chin River system at middle and lower. Master Thesis of Science (Environmental Science), Kasetsart University. (in Thai)
- Rermduemri, S., Kareas, S. and Wongsontam, K. 2008. Heavy metals contamination in seawater and sediment in the upper gulf of Thailand, pp. 221-228. **In Proceedings of 47th Kasetsart University Annual Conference: Natural Resources and Environment.** Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Ritnim, N. 2011. Assessment of Production Potential of Benthic Fauna Resources in Tha Chin Estuary, Samut Sakhon province, Thailand. Master Thesis of Science (Fisheries Science), Kasetsart University. (in Thai)
- Royal Irrigation Department. 1998. **Report Study and Environmental Impact Assessment for Tha Chin River Floodgate Project (Lower Part) Suphan Buri Province Nakhon Pathom Province Samut Sakhon Province: Environmental Impact Assessment Report (Master Version).** Royal Irrigation Department, Bangkok, TEAM Consulting Engineering and Management Public Company Limited. (in Thai)

- Salomon, W. and Forstner, U. 1984. **Metals in the Hydrocycle**. Springer Science & Business Media, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Samut Sakhon Province Industry Office. 2020. **Industrial statistics in samutsakorn province**. Available Source: <http://smsakhon.old.nso.go.th>, September 17, 2021. (in Thai)
- Sukasem, W. 1989. **Improvement of solvent extraction method for trace metals in seawater**. Chulalongkorn University, Bangkok. (in Thai)
- The Agricultural Research Development Agency (Public Organization) arda. 2018. **Final Report Development of Socio-Ecological Fishery Management Policy for Good Governance in Sustainable Fishery of the Inner of Thailand**. Published documents, Bangkok. (in Thai)
- Thongra-ar, W., Musika, C., Wongsudawan, W. and Munhapol, A. 2008. Heavy Metals Contamination in Sediments along the Eastern Coast of the Gulf of Thailand. **Environment Asia** 1: 37-45.
- Veschait, O. 2008. Study on water quality and heavy metals in water, sediment and some aquatic plants in the Tha Chin river. Master Thesis of Science (Marine Science), Kasetsart University. (in Thai)
- Watcharasing, J. 2014. Potential of Tha chin river water and bottom sediment from Nakhon Chai Si to it's estuary on heavy metals absorption. Master Thesis of Science (Environmental Science), Kasetsart University. (in Thai)

ผลกระทบของขนาดอนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ด ต่อกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน

Effect of The Particle Size of Polypropylene with Flakes Shape on Rotational Molding

ณรงค์ชัย โอเจริญ¹ นที ศรีสวัสดิ์² และ เอกตินัย จันทร์ศรี^{3*}

Narongchai O-Charoen¹, Natee Srisawat² and Ektinai Jansri^{3*}

Received: 8 September 2021, Revised: 30 August 2022, Accepted: 12 September 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน โดยใช้พอลิโพรพิลีนที่ได้มาจากแก้วพลาสติกใสที่เป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทใช้แล้วทิ้ง โดยการดำเนินการจะเริ่มจากการนำแก้วพลาสติกเหลือใช้มาทำการบดและคัดแยกขนาดให้ได้เป็นขนาดเล็ก (rPP-S) ขนาดกลาง (rPP-M) และขนาดใหญ่ (rPP-L) แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐาน จากนั้นนำไปขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบด้วยเครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนชนิดแนวแกนเดียวที่ความเร็วในการหมุน 7 รอบต่อนาที ใช้อุณหภูมิการขึ้นรูปที่ 210 °C สังเกตและบันทึกผลปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูปแล้วนำตัวอย่างที่ขึ้นรูปได้ไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ เชิงความร้อน และเชิงกลของชิ้นงาน โดยผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าอนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็กส่งผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนทั้งขณะที่อยู่ในสถานะของแข็งซึ่งเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่และการส่งผ่านความร้อนของอนุภาคและสถานะของเหลวซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดฟองอากาศในชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบศักยภาพในการขึ้นรูปพบว่า rPP-S มีศักยภาพใน

¹ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

¹ Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand.

² ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

² Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand.

³ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุพอลิเมอร์ คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

³ Department of Polymer Materials Technology, Faculty of Agricultural Product Innovation and Technology, Srinakharinwirot university, Ongkharak, Nakhon Nayok 26120, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): Ektinai@g.swu.ac.th

การขึ้นรูปสูงและมีความแข็งแรงต่อแรงอัดสูงกว่า rPP-M และ rPP-L ประมาณ 21.77 และ 30.49 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

คำสำคัญ: ขนาดอนุภาค, พอลิโพรพิลีน, ลักษณะเป็นเกล็ด, กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน, แก้วพลาสติกเหลือใช้

ABSTRACT

This research aims to study the effect of polypropylene particle size with flake shape on the rotational molding process. The polypropylene used in the experiment was obtained from waste plastic glass with transparent single-use packaging. The procedure of research started with the waste plastic glass crushing and sieving into small (rPP-S), medium (rPP-M), and large (rPP-L) sizes, then the characteristics of particles were analyzed. The specimens were molded with the axial powder flow apparatus at a rotation speed of 7 rpm, using a molding temperature of 210 °C. The phenomena that occurred during the molding were observed and recorded. After that, the tests of the physical, thermal, and mechanical properties were carried out. The results showed that small particle size directly affected the rotational molding both in the solid state which is involved in particle motion and the heat transfer of the particles and in a liquid state which involved the bubbles in the specimens. Comparing the potential of processibility, it was found that the case of rPP-S had higher potential and compressive strength than rPP-M and rPP-L about 21.77% and 30.49% respectively.

Key words: particle size, polypropylene, flake shape, rotational molding, waste plastics glasses

บทนำ

แก้วพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนเป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทใช้แล้วทิ้งชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีลักษณะใสและมีราคาถูกทำให้ปริมาณขยะประเภทนี้มีมากขึ้น ซึ่งการจัดการขยะประเภทนี้สามารถทำได้ยากเนื่องจากแก้วพลาสติกมีผนังบาง ทำให้ยากต่อการลดขนาดหรือแปรรูปหรือหากลดขนาดของแก้วพลาสติกได้แต่ก็ยังไม่สามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้ทันที เนื่องจากลักษณะของอนุภาคหลังจากการลดขนาดเป็นลักษณะเกล็ดบางซึ่งไม่เหมาะกับการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป จำเป็นต้องนำเข้าสู่กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกเพื่อควบคุมคุณภาพของอนุภาคก่อน ทำให้

ขยะประเภทแก้วพลาสติกไม่ได้รับความนิยมในการนำมารีไซเคิลเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะผนังหนา เช่น ขวดหรือกล่องพลาสติก อย่างไรก็ตามมีกระบวนการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกแบบหนึ่งที่สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากอนุภาคที่มีลักษณะดังกล่าวได้โดยไม่ต้องนำไปผลิตเป็นเม็ดพลาสติกก่อนนั่นคือ กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน (Rotational Molding) ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปนี้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะกลวงขนาดใหญ่ เช่น ถังขยะขนาดใหญ่ ถังเก็บน้ำ ถังบำบัดน้ำเสีย เรือแคนู เรือคายัคและถังน้ำแข็ง เป็นต้น (Tcharkhtchi and Verdu, 2004) เนื่องจากกระบวนการนี้มีขั้นตอนการขึ้นรูปไม่ซับซ้อน เครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปมีราคา

ไม่สูงสามารถผลิตได้เองภายในประเทศและมีค่าบำรุงรักษาถูกทำให้ได้รับความสนใจมากขึ้นในกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดเล็ก แม้ว่ากระบวนการนี้มีข้อดีอยู่หลายประการแต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่บ้างบางประการเช่น ต้องใช้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะขนาดและรูปร่างของอนุภาคที่เหมาะสมถึงจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพ โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เหมาะสมอยู่ที่ช่วงระหว่าง 300-350 ไมครอน และมีลักษณะรูปทรงค่อนข้างกลมซึ่งเหล่านี้จะส่งผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนที่ การหลอมเหลว และการก่อตัวของผนังชิ้นงาน (Crawford and Throne, 2001) นอกจากนี้ ยังมีอีกหนึ่งตัวแปรที่สำคัญคือ อัตราการหลอมรวมอนุภาค (Sintering Rate) ซึ่งตัวแปรนี้จะช่วยทำนายระยะเวลาในการขึ้นรูปและคุณภาพของชิ้นงานเบื้องต้นได้ (Bellehumeur *et al.*, 1996; Pop-Iliev *et al.*, 2003) สำหรับการใช้พอลิโพรพิลีนในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนมีรายงานว่า อนุภาคของพอลิโพรพิลีนที่ได้มาจากกระบวนการลดขนาดหรือการบดที่แตกต่างกันจะมีขนาดและลักษณะรูปทรงของอนุภาคที่แตกต่างกันซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการหลอมรวมอนุภาคและความสมบูรณ์ของชิ้นงาน (Greco and Maffezzoli, 2004) และเมื่อพิจารณาอัตราการหลอมไหลของพอลิโพรพิลีนจะพบว่า ชนิดที่มีอัตราการหลอมไหลสูงจะทำให้อนุภาคมีอัตราการหลอมรวมที่อุณหภูมิต่ำกว่าชนิดที่มีอัตราการหลอมไหลต่ำ (Sharma *et al.*, 2009) สำหรับสมบัติทางกลจะพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิโพรพิลีนที่มีอนุภาคเล็กจะมีค่าความแข็งแรงในส่วนของมอดูลัสเริ่มต้น (Initial Modulus) สูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ และยังสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ด้วย (Jansri and Narongchai, 2018) เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการหล่อเย็นพบว่า การใช้อัตราหล่อเย็นต่ำจะทำให้เกิดผลึกที่สูงขึ้นซึ่งจะมีผลต่อการขยายตัวหรือแพร่กระจายของรอยแตกของ

ชิ้นงาน แต่จะไม่ส่งผลต่อการเกิดรอยแตกเริ่มต้น (Pop-Iliev *et al.*, 2003; Pick and Harkin-Jones, 2003; Therese Pick *et al.*, 2006) นอกจากนี้ ยังพบอีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิโพรพิลีนในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนจะมีค่าความต้านทานแรงกระแทกต่ำเนื่องจากลักษณะของผลึกจะเป็นวงกลมกลายเป็นสเฟียรูไลต์ (Sharma *et al.*, 2009) ซึ่งจากงานรายงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่าการนำพอลิโพรพิลีนมาใช้ในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนจะต้องพิจารณาหลายตัวแปรเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงานที่สมบูรณ์หรือเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยที่ตัวแปรที่ควรพิจารณาและให้ความสำคัญเป็นอันดับแรกคือลักษณะรูปร่างและขนาดของอนุภาค อย่างไรก็ตาม การศึกษาการขึ้นรูปด้วยอนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนยังไม่ได้ความสนใจและมีการศึกษาไม่กว้างขวางในปัจจุบัน

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน โดยพอลิโพรพิลีนที่ใช้ได้มาจากขยะแก้วใสที่เป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทใช้แล้วทิ้ง และทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ขึ้นรูป ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูป การปรากฏของฟองอากาศ ความหยาบของผิว สมบัติทางความร้อน และความแข็งแรงต่อแรงอัดของชิ้นงาน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัสดุ

พอลิโพรพิลีนที่ใช้ในการศึกษานี้ได้มาจากขยะแก้วพลาสติกใสที่มีสัญลักษณ์รีไซเคิล หมายเลข 5 และมีน้ำหนักเฉลี่ย 18 ออন্ซ์ โดยขยะแก้วพลาสติกเหล่านี้จะถูกนำไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำและนำเข้าสู่กระบวนการลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบ

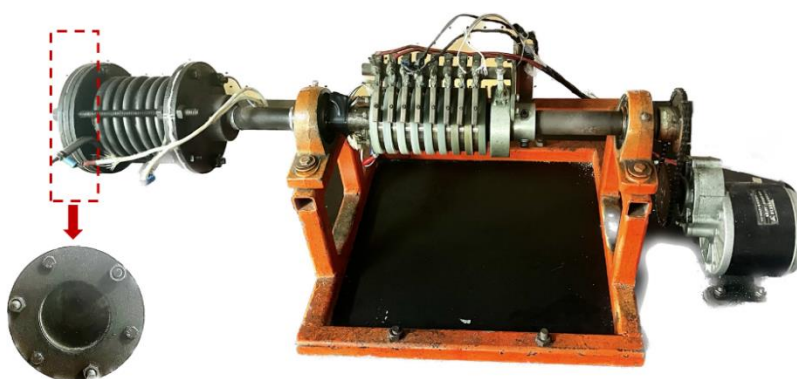
โม่ที่มีลักษณะเฉพาะ ซึ่งคุณภาพของอนุภาคจะถูกควบคุมด้วยปริมาณแก้วพลาสติกที่ใส่ลงในเครื่องบด และระยะเวลาในการบดที่ 300 กรัมต่อ 10 นาที จากนั้นนำไปทำการคัดแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อน ตามมาตรฐาน ASTM E11 เบอร์ 6 12 และ 30 จะได้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ (rPP-L) ขนาดกลาง (rPP-M) และขนาดเล็ก (rPP-S) ตามลำดับ

2. การขึ้นรูปด้วยตัวอย่างทดสอบ

การทดลองนี้จะใช้เครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนชนิดแนวแกนเดียว ซึ่งเครื่องขึ้นรูปนี้ถูกสร้างขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อสังเกตปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างขึ้นรูป จะมีระบบการให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าโดยสามารถตั้งค่าอุณหภูมิได้สูงถึง 400 °C ปรับความเร็วในการหมุนได้ตั้งแต่ 7-200 รอบต่อนาที สามารถวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในแม่พิมพ์

ได้ และมีการติดตั้งกระจกทนความร้อนบนแม่พิมพ์ เพื่อสังเกตพฤติกรรมของการหลอมละลายและการเคลื่อนที่ของอนุภาคตั้งแต่ในสถานะของแข็งจนหลอมละลายดังแสดงในภาพที่ 1 ผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องนี้ทำให้สามารถนำไปกำหนดเงื่อนไขหรือสถานะในการขึ้นรูปจริงได้

โดยในการขึ้นรูปแต่ละครั้งจะใช้พลาสติกน้ำหนัก 32 กรัม ใช้ความเร็วในการหมุนแม่พิมพ์ที่ 7 รอบต่อนาที และอุณหภูมิในการขึ้นรูปจะถูกตั้งไว้ที่ 210 °C เมื่ออุณหภูมิอากาศภายในแม่พิมพ์สูงถึง 210 °C ระบบควบคุมจะสั่งให้ฮีตเตอร์หยุดให้ความร้อน แล้วเริ่มขั้นตอนการหล่อเย็นโดยแม่พิมพ์จะถูกหล่อเย็นด้วยพัดลมที่มีอัตราความเร็วลมคงที่ การหล่อเย็นจะถูกดำเนินการจนกระทั่งอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิลงรูปของพอลิเมอร์ จากนั้นชิ้นงานจะถูกถอดออกจากแม่พิมพ์



ภาพที่ 1 เครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนชนิดแนวแกนเดียว (Axial Powder-Flow Apparatus)

3. การวิเคราะห์ลักษณะและสมบัติของชิ้นงาน

ลักษณะ รูปร่าง และขนาดของอนุภาค (Particles Properties) หลังการลดขนาดถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล (Digital-Microscope) รุ่น 1000X ยี่ห้อ Hiview และวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ImageJ

สมบัติการไหลของอนุภาคขณะเป็นของแข็ง (Dry Flow) และการทดสอบความหนาแน่นโดยรวม (Bulk Density) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1895 และการทดสอบ Hausner Ratio ถูกใช้เพื่อระบุลักษณะการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างของอนุภาค

การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานประกอบด้วยการวิเคราะห์ค่าความหยาบของ

ผิวชิ้นงาน (Arithmetic Mean of Surface Roughness) ใช้เทคนิคการเปรียบเทียบความแตกต่างของสี โดยชิ้นงานที่มีผิวเรียบจะมีการตกกระทบของแสงที่สม่ำเสมอกว่าชิ้นงานมีผิวไม่เรียบหรือมีพื้นผิวที่มีความลึกต่างกัน และการตรวจสอบการปรากฏของฟองอากาศในชิ้นงาน (Bubbles) โดยทั้งสองการทดสอบจะถูกดำเนินการด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลแล้ววิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ImageJ และชิ้นงานทดสอบจะถูกกำหนดให้มีขนาด 2×2 เซนติเมตร และตัดจากชิ้นงานที่ตำแหน่งเดียวกันทุกครั้ง

การทดสอบสมบัติทางความร้อนประกอบไปด้วยการวัดอัตราการหลอมไหล (Melt Flow Index) ตามมาตรฐาน ASTM D1238 ด้วยเครื่องทดสอบ CEAST รุ่น 6425 ที่อุณหภูมิ 230 °C น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม การวัดอัตราการหลอมรวมอนุภาค (Sintering Rate) ด้วยเครื่อง Sinter รุ่น RT1 ช่วงอุณหภูมิทดสอบตั้งแต่ 30 - 250 °C และการวิเคราะห์จุดหลอมเหลวด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) รุ่น DSC 200 F3 จากบริษัท NETZSCH มีอัตราการให้ความร้อน 10 °C ต่อนาที จากอุณหภูมิ 30 °C

จนถึง 200 °C โดยการรักษาอุณหภูมิที่ 200 °C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดประวัติทางความร้อน แล้วลดอุณหภูมิ 10 °C ต่อนาที จากอุณหภูมิ 200 °C ลงมาจนถึง 30 °C แล้วทำการวิเคราะห์ผลที่ได้

การทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงต่อแรงอัด (Compressive Strength) อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D3787 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ยี่ห้อ Hounsfield Model TG18 ใช้ความเร็วในการอัด 50 มิลลิเมตร ต่อนาที และโหลด 500 นิวตัน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

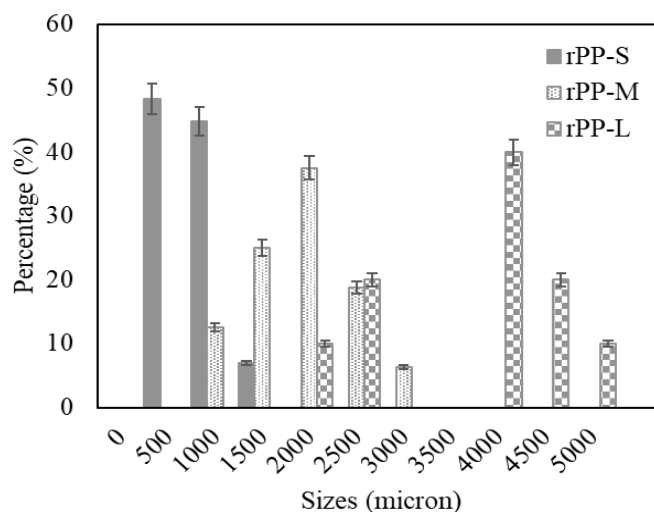
1. ลักษณะและสมบัติของอนุภาคหลังการลดขนาด

การวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคของขยะแก้วพลาสติกโพลีเอทิลีนพอลิโพรพิลีนหลังการบดและแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อน แสดงในตารางที่ 1 โดยผลที่ได้พบว่าอนุภาคมีความหนาเฉลี่ย 0.20 มิลลิเมตร และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 3,484 1,644 และ 574 ไมครอน สำหรับ rPP-L rPP-M และ rPP-S ตามลำดับ และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแสดงในภาพที่ 2

ตารางที่ 1 ลักษณะของอนุภาค

Materials	Mean Particle Size (μm)	Avg. Thickness (mm.)	Bulk Density* (g/cm ³)	Dry Flow (sec)*	Hausner Ratio	MFI (g/10 min) (230°C/2.16kg)
rPP-L	3,484 (±101.64)		0.17	22.00 (±3.72)	1.22	3.36 (±0.21)
rPP-M	1,644 (±135.47)	0.20 (±1.41)	0.18	19.00 (±1.38)	1.21	3.38 (±0.19)
rPP-S	579 (±107.16)		0.25	14.67 (±1.91)	1.23	3.38 (±0.21)

*ไม่สามารถทดสอบได้ตามมาตรฐาน จำเป็นต้องให้แรงในการทดสอบ



ภาพที่ 2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค

ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นถึงการจำแนกลักษณะรูปร่างของอนุภาคของขยะแก้วพลาสติกโพลีโพรพิลีนหลังการลดขนาด ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Roundness และ Circularity และในภาพที่ 3 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์การกระจายตัวของรูปร่างอนุภาค ซึ่งพบว่าลักษณะรูปร่างอนุภาคที่เตรียมจากขยะแก้วพลาสติกโพลีโพรพิลีนจะแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาค โดยอนุภาคขนาดเล็กจะมีสัดส่วนของอนุภาคที่มีรูปร่างเรียวยาวและรูปร่างค่อนข้างกลมใกล้เคียง

กันประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอนุภาคขนาดกลางจะมีอนุภาครูปร่างเหลี่ยมมีมุมประมาณ 78 เปอร์เซ็นต์ และอนุภาคขนาดใหญ่จะมีอนุภาครูปร่างเหลี่ยมมีมุมประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะรูปร่างของอนุภาคแก้วพลาสติกโพลีโพรพิลีนหลังการลดขนาดแสดงในภาพที่ 4 จะเห็นได้ชัดว่ายิ่งขนาดอนุภาคเล็กรูปร่างของอนุภาคจะมีลักษณะเรียวยาวเนื่องจากอนุภาคมีการขีดตัวออกเนื่องจากแรงเฉือนของใบมีดเครื่องบด

ตารางที่ 2 ลักษณะของอนุภาคจากความสัมพันธ์ระหว่าง Roundness และ Circularity

		Roundness								
		0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0
Circularity	0.1-0.2									
	0.2-0.3									
	0.3-0.4									
	0.4-0.5									
	0.5-0.6									
	0.6-0.7									

ตารางที่ 2 (ต่อ)

Circularity	Roundness									
	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0	
0.7-0.8										
0.8-0.9										
0.9-1.0										

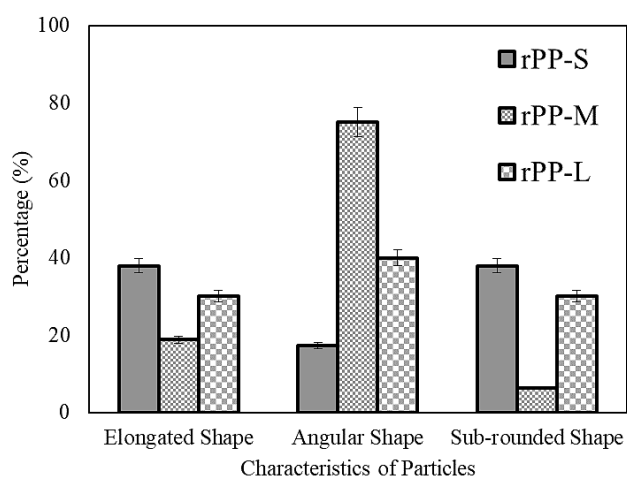
*ในงานวิจัยนี้รูปร่างของอนุภาคจะถูกกำหนดจากความสัมพันธ์ระหว่าง Roundness และ Circularity ดังนี้

Roundness 0.1-0.3 และ Circularity 0.1-0.5 = รูปร่างเรียวยาว (Elongated Shape)

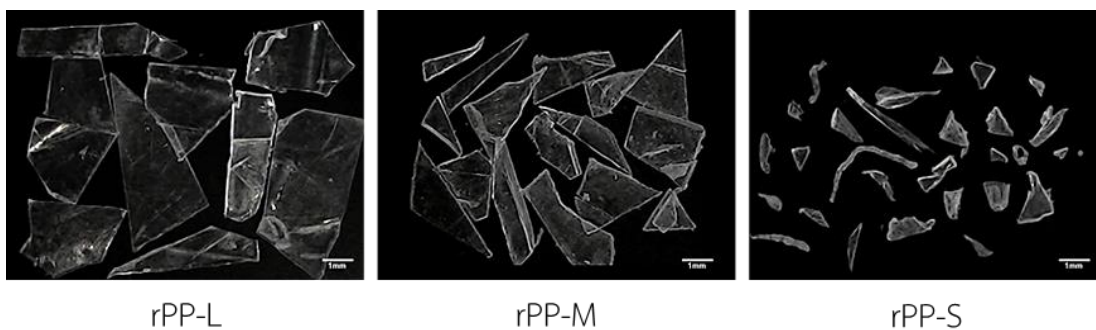
Roundness 0.3-1.0 และ Circularity 0.4-0.6 = รูปร่างเหลี่ยมมีมุม (Angular Shape)

Roundness 0.3-1.0 และ Circularity 0.6-0.8 = รูปร่างค่อนข้างกลม (Sub-Rounded Shape)

Roundness 0.3-1.0 และ Circularity 0.8-0.9 = รูปร่างกลม (Rounded Shape)



ภาพที่ 3 การกระจายตัวของรูปร่างอนุภาค



ภาพที่ 4 อนุภาคของขยะแก้วพลาสติกโพลีโพรพิลีนหลังการลดขนาด

ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และอัตราการไหลแบบแห้ง (Dry Flow) แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนเล็ก rPP-S มีค่าความหนาแน่นรวมสูงและไหลเร็วที่สุดที่ 0.25 (ลูกบาศก์เซนติเมตร) ต่อ 14.67 วินาที ตามด้วย rPP-M ที่ 0.17 (ลูกบาศก์เซนติเมตร) ต่อ 19.00 วินาที และ rPP-L ที่ 0.18 (ลูกบาศก์เซนติเมตร) ต่อ 22.00 วินาที โดยผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้า (Cumberland and Crawford, 1987) ซึ่งได้อธิบายไว้ว่าค่าความหนาแน่นรวมและอัตราการไหลแบบแห้งจะแปรผกผันกัน โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่มีความหนาแน่นรวมน้อยจะมีอัตราการไหลช้ากว่าวัสดุที่มีความหนาแน่นรวมมาก เนื่องจากวัสดุที่มีความหนาแน่นรวมน้อยเกิดจากอนุภาคแต่ละอนุภาคมีขนาด รูปร่าง หรือการกระจายของของขนาดไม่เหมาะสมทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่และการแผ่ตัวของวัสดุ (Shenoy, 2013)

การทดสอบอัตราส่วน Hausner ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงลักษณะการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาค พบว่าทุกกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อนำผลการทดสอบเปรียบเทียบกับตารางแสดงลักษณะการไหลของอนุภาค พบว่าในทุกกรณีของอนุภาค พอลิโพลีนแสดงลักษณะการไหลอยู่ในช่วง 1.19-1.25 หมายถึง การไหลของอนุภาคอยู่ในระดับพอใช้ (Fair) (Geldart *et al.*, 2006)

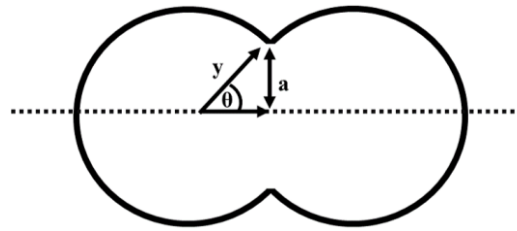
2. สมบัติเชิงความร้อน

2.1 อัตราการหลอมไหลและอัตราการหลอมรวมอนุภาค

ผลการทดสอบอัตราการไหลของขี้ผึ้งพลาสติกไอโซนิกพอลิโพรพิลีนทั้ง 3 ขนาดพบว่า rPP-M และ rPP-S มีค่าเท่ากันที่ 3.88 กรัมต่อ 10 นาที ในขณะที่ rPP-L มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยที่ 3.37 กรัมต่อ

10 นาที ซึ่งอาจเป็นผลมาจากมีฟองอากาศเกิดขึ้นในชิ้นงานทดสอบสำหรับวัสดุที่มีขนาดอนุภาคใหญ่

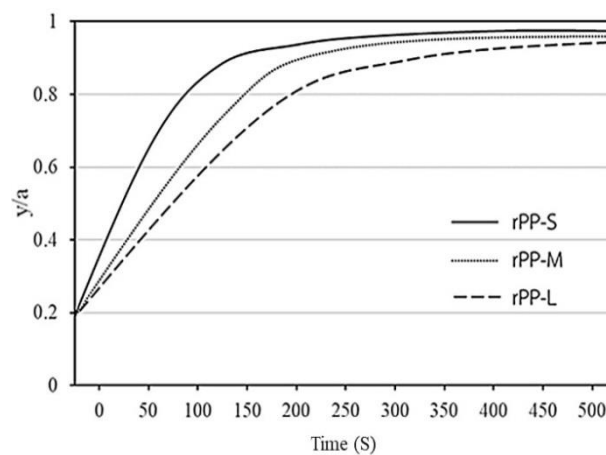
ผลการทดสอบอัตราการหลอมรวมมีความสำคัญในการประเมินระยะเวลาการให้ความร้อนในการขึ้นรูปและการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์อัตราการหลอมรวมอนุภาคได้จากอัตราส่วนระหว่าง “y/a” ถ้าค่าอัตราส่วนเข้าใกล้ 1 นั่นคืออนุภาคทั้งสองรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันสมบูรณ์ โดยที่ “y” คือความยาวของจุดเชื่อมต่อระหว่างสองอนุภาคและ “a” คือรัศมีเฉลี่ยของอนุภาค (Guillén-Castellanos *et al.*, 2003) (ดังแสดงในภาพที่ 5) ผลการวิเคราะห์อัตราการหลอมรวมอนุภาค จากภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคขี้ผึ้งพลาสติกไอโซนิกพอลิโพรพิลีนหลังการบด ทั้ง 3 ขนาด เริ่มเปลี่ยนสถานะจากของแข็ง (Solid Phase) เป็นสถานะคล้ายยาง (Rubbery Phase) ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 135-140 °C แล้วเปลี่ยนจากสถานะคล้ายยางเป็นของไหลหลอมเหลว (Melted Phase) ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 190-210 °C และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอัตราส่วน y/a ในภาพที่ 7 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบที่เวลาเดียวกันในกรณีของ rPP-S มีอัตรา y/a สูงที่สุดตามด้วย rPP-M และ rPP-L ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะสามารถหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้รวดเร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ (Perot *et al.*, 2008)



ภาพที่ 5 การหลอมรวมของอนุภาค

	rPP-S	rPP-M	rPP-L
Start			
	~ 35 °C	~ 35 °C	~ 35 °C
Originally Melted			
	~ 140 °C	~ 140 °C	~ 140 °C
Completely Melted			
	~ 192 °C	~ 204 °C	~ 211 °C

ภาพที่ 6 สถานะการหลอมรวมของอนุภาคที่อุณหภูมิต่างกัน

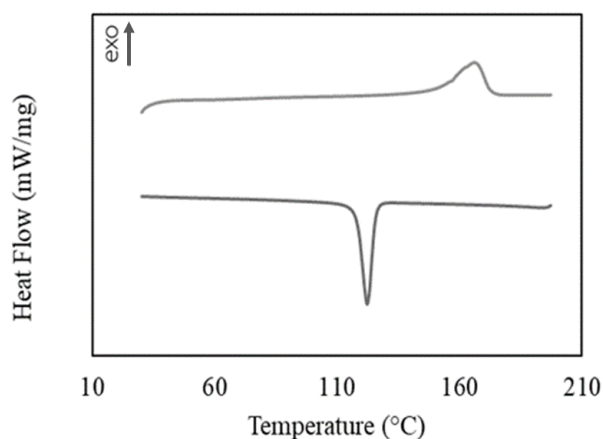


ภาพที่ 7 อัตราการหลอมรวมอนุภาค

2.2 การวิเคราะห์จุดหลอมเหลวด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

การวิเคราะห์นี้เป็นการทดสอบเพื่อระบุชนิดและหาค่าอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้พอลิโพรพิลีนหลังการลดขนาดในการทดสอบผลการทดสอบในภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่นำมาทดสอบเป็นวัสดุเชิงเดี่ยว ไม่มีการผสมพอลิเมอร์ชนิดอื่นเนื่องจากกราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมเหลวและ

อุณหภูมิเกิดผลึกเพียงจุดเดียว โดยแสดงจุดอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Point Temperature, T_m) ที่ 168.2°C และจุดอุณหภูมิเกิดผลึก (Crystallization Temperature, T_c) ที่ 122.4°C และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะของกราฟจาก อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเกิดผลึก และค่าพลังงานการดูดกลืนความร้อนของวัสดุสามารถระบุได้ว่าเป็นพอลิเมอร์ชนิดพอลิโพรพิลีน (Jansri and Narongchai, 2018)

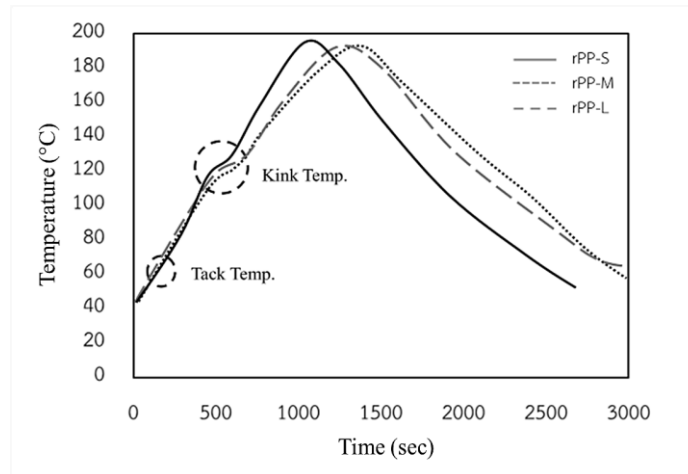


ภาพที่ 8 DSC เทอร์โมแกรมพอลิโพรพิลีน

3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแม่พิมพ์

จากกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศภายในแม่พิมพ์ในภาพที่ 9 พบว่าอนุภาคจะได้รับความร้อนและเริ่มเคลือบที่ผนังแม่พิมพ์ หรือเรียกว่าจุด Tack Point ที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันทุกกรณี ที่ประมาณ 50°C จากนั้นอัตราการความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและจะช้าลงที่จุด Kink Point หรือจุดที่อนุภาคทั้งหมดหยุดการเคลื่อนที่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ $117\text{--}120^{\circ}\text{C}$ หลังจากนั้นอัตราการความร้อนจะ

เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ตั้งไว้ จากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะกราฟจะเห็นได้ว่าอนุภาคขนาดเล็กมีอัตราการความร้อนเพิ่มขึ้นเร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าทำให้สามารถหลอมรวมกันได้รวดเร็วซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบอัตราการหลอมรวมอนุภาคในการทดลองก่อนหน้านี้ จากผลดังกล่าวส่งผลให้ใช้เวลาในการขึ้นรูปสั้นกว่าอนุภาคขนาดใหญ่



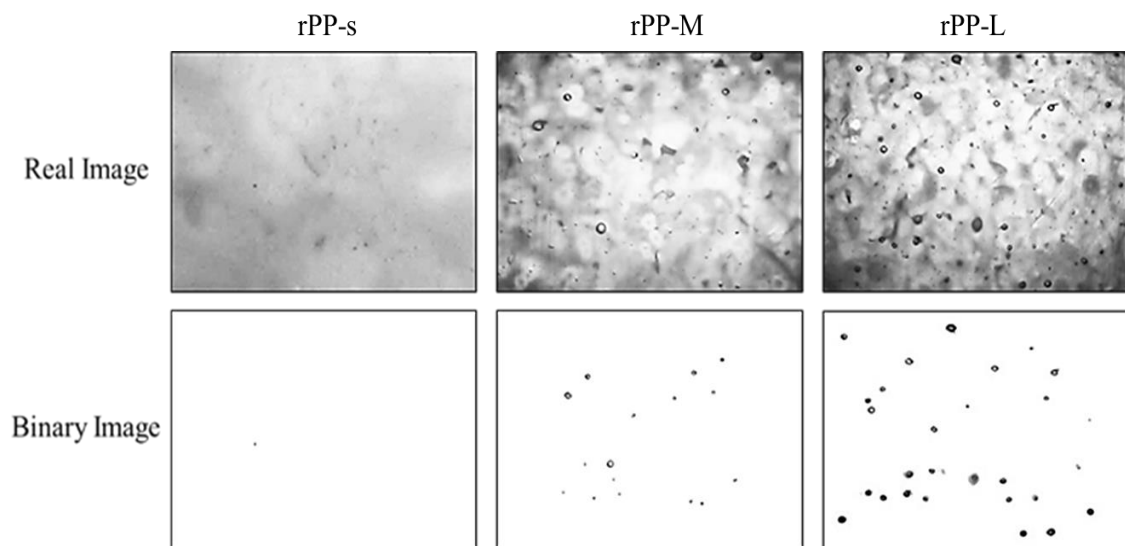
ภาพที่ 9 รูปแบบอุณหภูมิอากาศภายในแม่พิมพ์

4. สมบัติทางกายภาพ

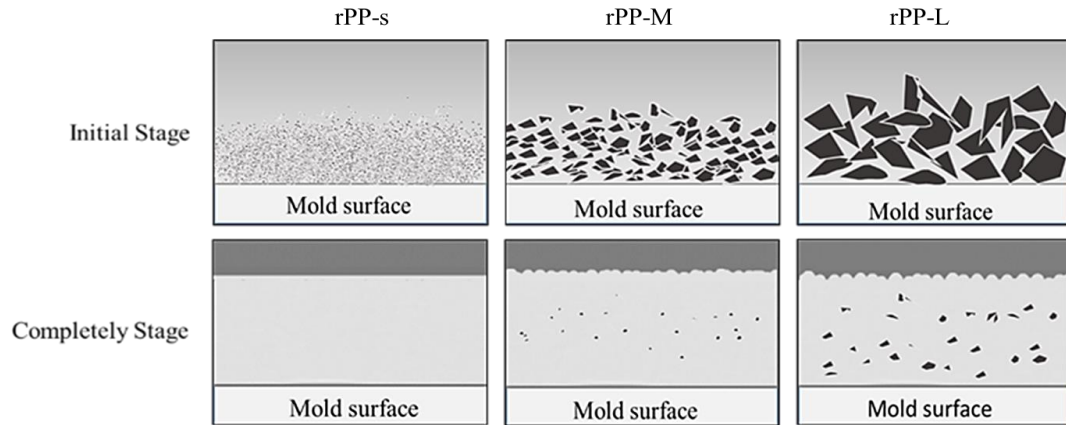
4.1 การปรากฏของฟองอากาศในชิ้นงาน

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปริมาณของฟองอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดอนุภาคดังแสดงในภาพที่ 10 ฟองอากาศที่เกิดในชิ้นงาน

เกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าความหนาแน่นรวมซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า อนุภาคที่มีค่าความหนาแน่นรวมต่ำจะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากกว่าอนุภาคที่มีค่าความหนาแน่นรวมสูงทำให้ตัวอย่างชิ้นงานมีโอกาสที่จะเกิดฟองอากาศได้มากกว่าและฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มขนาดใหญ่กว่า (Spence and Crawford, 1996)



ภาพที่ 10 ฟองอากาศในชิ้นงาน



ภาพที่ 11 ลักษณะการก่อตัวเป็นผนังด้านในและด้านนอกของชิ้นงาน

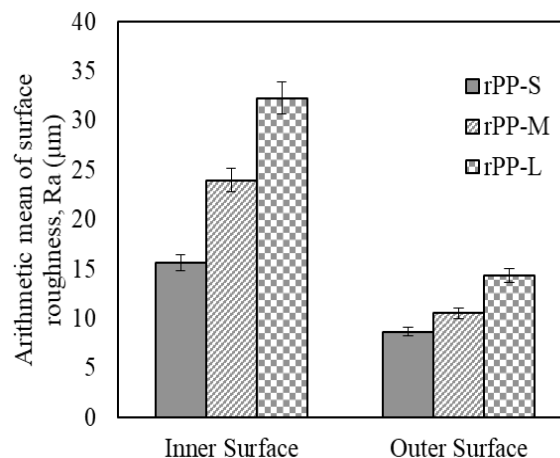
4.2 ความหยาบของผิวชิ้นงาน

ผลการทดสอบ โดยใช้เทคนิคการเปรียบเทียบความแตกต่างของสีโดยโปรแกรม ImageJ ดังแสดงในตารางที่ 3 และกราฟเปรียบเทียบในภาพที่ 12 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่า ขนาดอนุภาคที่

เล็กลงแสดงค่าเฉลี่ยความขรุขระผิวน้อยลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผิวชิ้นงานทั้งด้านในและด้านนอกเรียบขึ้น เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กหลอมเหลวได้ง่ายกว่า อนุภาคขนาดใหญ่ทำให้เมื่อได้รับความร้อนจึงเกาะที่ผนังแม่พิมพ์และรวมตัวกันสมบูรณ์ได้ง่ายกว่า (Rao and Throne, 1972)

ตารางที่ 3 ความหยาบของผิวชิ้นงาน

Materials	Rotational Speed (rpm.)	Arithmetic Mean of Surface Roughness, Ra (μm)	
		Inner Surface	Outer Surface
rPP-S	7	15.71 (± 2.18)	9.19 (± 1.08)
rPP-M		24.22 (± 2.62)	11.10 (± 1.74)
rPP-L		32.98 (± 3.31)	14.03 (± 1.37)



ภาพที่ 12 กราฟเปรียบเทียบความหยาบของผิวชิ้นงานด้านในและนอก

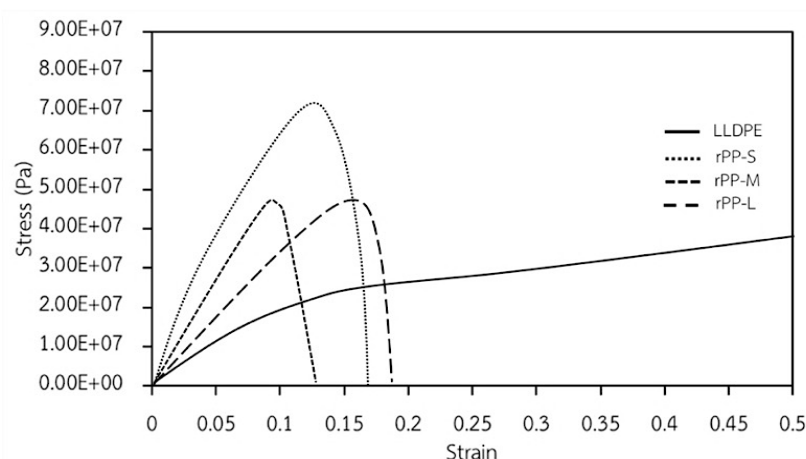
5. ความแข็งแรงต่อแรงอัด

การทดสอบสมบัติเชิงกลในงานวิจัยนี้จะใช้การทดสอบแบบกดอัด เนื่องจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปมีลักษณะรูปทรงเป็นกระบอกกลวง และการทดสอบนี้ส่วนใหญ่จะรายงานผลด้วยค่าโมดูลัสเริ่มต้น (Initial Modulus) (Rosato *et al.*, 2001) จากตารางที่ 4 พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีค่าโมดูลัสเริ่มต้นสูงกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอนุภาคขนาดกลางและขนาดใหญ่มีค่า 21.77 และ 30.49 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เป็นผลจากขนาดอนุภาคเล็กขณะเป็นของแข็งมีการเคลื่อนที่ดีกว่าทำให้ประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนสูงกว่า ซึ่งส่งผลให้อนุภาคแต่ละอนุภาคหลอมรวมกันได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ทั้งนี้อนุภาคขนาดเล็กจะมีอัตราการหลอมรวมอนุภาครวดเร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ อีกทั้งอนุภาคขนาดเล็กก็ยังมีช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อยกว่าทำให้ชิ้นงานมีความสมบูรณ์ มีผิวเรียบและมีการกระจายความหนาสม่ำเสมอ และเมื่อพิจารณาที่ลักษณะการเสียรูปของชิ้นงานจากกราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดในภาพที่ 13 พบว่า พอลิโพรพิลีนทั้ง 3 ขนาดมีการเสียรูปในลักษณะแบบเปราะในขณะที่ LLDPE มีการเสียรูปในลักษณะแบบเหนียวอย่างไรก็ตามลักษณะการเสียรูปของชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับขนาดของฟองอากาศที่ปรากฏในชิ้นงานโดยชิ้นงานที่มีฟองอากาศขนาดใหญ่จะแสดงความเปราะมากกว่าชิ้นงานที่มีฟองอากาศขนาดเล็ก

ตารางที่ 4 ค่าโมดูลัสเริ่มต้น

Materials	Rotational Speed (rpm/min)	Initial Modulus (MPa)
LLDPE	7	9.13 ±2.62
rPP-S		41.39 ±2.28
rPP-M		32.38 ±2.21
rPP-L		28.77 ± 1.15



ภาพที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain

สรุป

การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน โดยพอลิโพรพิลีนที่ใช้ได้มาจากขยะแก้วใสที่เป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทใช้แล้วทิ้ง ใช้สภาวะเงื่อนไขในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 210 °C และความเร็วในการหมุน 7 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนชนิดแนวแกนเดียว สามารถสรุปได้ดังนี้

- ลักษณะอนุภาคที่เตรียมจากขยะแก้วพลาสติกไอโซนิกพอลิโพรพิลีนจะแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาค โดยอนุภาคขนาดเล็กจะมีสัดส่วนของอนุภาคที่มีรูปร่างเรียวยาวและรูปร่างค่อนข้างกลมใกล้เคียงกันประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอนุภาคขนาดกลางจะมีอนุภาครูปปร่างเหลี่ยมมีมุมประมาณ 78 เปอร์เซ็นต์ และอนุภาคขนาดใหญ่จะมีอนุภาครูปปร่างเหลี่ยมมีมุมประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์

- ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูปพบว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะสามารถเคลือบผนังแม่พิมพ์ได้รวดเร็วและใช้เวลาในการขึ้นรูปสั้นกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

- การเกิดฟองอากาศในชิ้นงานพบว่าปริมาณของฟองอากาศจะใหญ่ขึ้นตามขนาดของอนุภาค

- ความหนาของผิวชิ้นงานพบว่าอนุภาคขนาดเล็กแสดงค่าความหนาของผิวดำกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ทั้งด้านในและด้านนอก

- สมบัติทางความร้อนของชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากขยะแก้วพลาสติกไอโซนิกพอลิโพรพิลีนทุกกรณีมีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกันที่ 168.2 °C และมีอุณหภูมิเกิดผลึกที่ 122.4 °C

- ความแข็งแรงต่อแรงอัดของชิ้นงานพบว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีค่ามอดูลัสเริ่มต้นสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ 21.77 และ 30.49 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยผลที่ได้สอดคล้องกับการปรากฏของฟองอากาศในชิ้นงาน

อนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็กมีศักยภาพในการขึ้นรูปสูงกว่าอนุภาคพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดใหญ่

กิตติกรรมประกาศ

กรอบงานวิจัยแผนงานสำคัญ (Flagship) ประจำปีงบประมาณ 2563 ชุมชนนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน สัญญาเลขที่ CBLRMUTT63B08 และแผนงานวิจัยทำหายไทย : ทะเลไทยไร้ขยะ ระยะที่ 2 สัญญาเลขที่ วช.อว.(อ)(กส)/89/2563/ผ02

เอกสารอ้างอิง

- Bellehumeur, C.T., Bisaria, M.K. and Vlachopoulos, J. 1996. An experimental study and model assessment of polymer sintering. **Polymer Engineering & Science** 36(17): 2198-2207.
- Crawford, R.J. and Throne, J.L. 2001. **Rotational molding technology**. William Andrew, New York.
- Cumberland, D.J. and Crawford, R.J. 1987. **The packing of particles**. Elsevier, New York.
- Geldart, D., Abdullah, E.C., Hassanpour, A., Nwoke, L.C. and Wouters, I.J.C.P. 2006. Characterization of powder flowability using measurement of angle of repose. **China Particuology** 4(3-4): 104-107.
- Greco, A. and Maffezzoli, A. 2004. Powder-shape analysis and sintering behavior of high-density polyethylene powders for rotational molding. **Journal of applied polymer science** 92(1): 449-460.
- Guillén-Castellanos, S.A., Lin, W., Bellehumeur, C.T. and Weber, M. 2003. Effect of processing history on the intering of ethylene copolymers.

- International Polymer Processing** 18(1): 87-90.
- Jansri, E. and Narongchai, O. 2018. Polypropylene/Polyethylene two-layered by one-step rotational molding. **Journal of Polymer Engineering** 38(7): 685-694.
- Perot, E., Lamnawar, K. and Maazouz, A. 2008. Optimization and modelling of rotational molding process. **International Journal of Material Forming** 1(1): 783-786.
- Pick, L.T. and Harkin-Jones, E. 2003. An investigation into the relationship between the impact performance of rotationally molded polyethylene products and their dynamic mechanical properties. **Polymer Engineering & Science** 43(4): 905-918.
- Pop-Iliev, R., Liu, F.Y., Liu, G.B. and Park, C.B. 2003. Rotational foam molding of polypropylene with control of melt strength. **Advances in Polymer Technology** 22(4): 280-296.
- Rao, M.A. and Throne, J.L. 1972. Principles of rotational molding. **Polymer Engineering & Science** 12(4): 237-264.
- Rosato, D.V., Schott, N.R. and Rosato, M.G. 2001. **Plastics Institute of America Plastics Engineering, Manufacturing & Data Handbook**. Springer Science & Business Media, New York.
- Sharma, T., Mahanwar, P. and Bambole, V. 2009. Study of modified polypropylene for rotational moulding applications. **International Journal of Plastics Technology** 13(1): 83-94.
- Shenoy, A.V. 2013. **Rheology of filled polymer systems**. Springer Science & Business Media, Berlin.
- Spence, A.G. and Crawford, R.J. 1996. Removal of pinholes and bubbles from rotationally moulded products. **Journal of Engineering Manufacture** 210(6): 521-533.
- Tcharkhtchi, A. and Verdu, J. 2004. Structure Processability Relationships During Rotational Moulding of Plastics. **Advanced Engineering Materials** 6(12): 983-992.
- Therese Pick, L., Harkin-Jones, E., Jovita Oliveira, M. and Clara Cramez, M. 2006. The effect of cooling rate on the impact performance and dynamic mechanical properties of rotationally molded metallocene catalyzed linear low density polyethylene. **Journal of Applied Polymer Science** 101(3): 1963-1971.

การใช้ส่วนกลั่นกรดไขมันที่ผ่านการเอทานอลิซิสบางส่วน โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นส่วนผสมดีเซล/ดีโซฮอล

Use of Partially Non-Catalyzed Ethanolyzed Palm Fatty Acid Distillate as Diesel/Diesohol Extenders

ศุภวุฒิ เปี่ยมเจริญสุข¹ ศุภกิจ เอียดตรง² ปริญา หม่อมพิบูลย์^{1,3} ฐานันดรศักดิ์ เทพญา¹
และ ชีระยุทธ หลีวีจิตร^{1*}

Suppawoot Piamcharoensuk¹, Supakit Eiadtrong², Parinya Mompiboon^{1,3}, Thanansak Theppaya¹
and Theerayut Leevijit^{1*}

Received: 24 April 2022, Revised: 3 August 2022, Accepted: 26 August 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมส่วนกลั่นกรดไขมันเอสเตอร์ไฟต์บางส่วน (PEPFAD) โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้เป็นส่วนผสมดีเซล/ดีโซฮอล โดย PEPFAD ถูกเตรียมโดยการทำปฏิกิริยาสกัดไขมันที่กรดไขมันอิสระสูง (≥ 90 wt.%) กับเอทานอลชนิดไม่มีน้ำ (AHe) ในถังปฏิกรณ์แบบกะ ที่สัดส่วนโดยโมล 1:1 อุณหภูมิ 289°C และความดัน 72 บาร์ เป็นเวลา 60 นาที ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของ PEPFAD ที่ได้มีองค์ประกอบหลักเป็นเอทิลเอสเตอร์ 71.6 wt.% และกรดไขมันอิสระ 26.8 wt.% และองค์ประกอบอื่น ๆ อีก 1.6 wt.% ผลการศึกษาเสถียรภาพเฟสระยะยาวของเชื้อเพลิงผสมโดยเก็บเชื้อเพลิงไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 90 วัน พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถผสมกับดีเซลหมุนเร็วเกรดการค้า (CHSD) เป็นเชื้อเพลิงเหลวผสม 2 ส่วน CHSD-PEPFAD ได้สูงสุด 40 wt.% และสามารถผสมเป็นเชื้อเพลิงเหลวผสม 3 ส่วน CHSD-PEPFAD-AHe หรือดีโซฮอล ได้สูงสุด 80 wt.% อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมจากผลการทดสอบคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่อุณหภูมิค่าที่สำคัญ พบว่ามีเชื้อเพลิงผสมที่น่าสนใจสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล 2 สูตร คือ PEPFAD30 และ PEPFAD50AHe10

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

¹ Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช 80161

² Department of Mechanical and Robotic Engineering, School of Engineering and Technology, Walailak University, Tha Sala, Nakhon Si Thammarat 80161, Thailand.

³ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช อำเภอเมืองนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280

³ Division of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, Mueang Nakhon Si Thammarat, Nakhon Si Thammarat 80280, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): leetheerayut@yahoo.com

(ตัวเลขที่ตามหลัง PEPFAD และ AhE คือสัดส่วนการผสมกับดีเซลในหน่วย wt.%) สำหรับการทดสอบใช้งานเบื้องต้นในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT100DI PLUS เปรียบเทียบกับดีเซลบนแท่นทดสอบ โดยเปลี่ยนแปลงภาระในช่วง 1.28-6.40 kW ที่ความเร็วรอบสูงคงที่ 2,200 rpm พบว่า เชื้อเพลิงผสมที่น่าสนใจทั้ง 2 สูตรนี้สามารถใช้งานในเครื่องยนต์ได้ดีเช่นเดียวกับดีเซล โดยมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคใกล้เคียงหรือสูงกว่าดีเซลเล็กน้อย

คำสำคัญ: ส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม, กรดไขมันโมเลกุลยาว, เอทานอลไร้สี, เชื้อเพลิงทดแทนดีเซล, ดีโซฮอล

ABSTRACT

This work studied the preparation of partially esterified palm fatty acid distillate (PEPFAD) by non-catalyzed to use as diesel/diesohol extenders. In this article, PEPFAD was prepared by reacting of palm fatty acid distillate containing high free fatty acids (≥ 90 wt.%) with anhydrous ethanol (AhE) in a batch reactor at molar ratio of 1:1, temperature of 289°C , and pressure of 72 bar for 60 min. The obtained final product of PEPFAD mainly contained ethyl esters of 71.6 wt.% and free fatty acids of 26.8 wt.% with other remaining constituents of 1.6 wt.%. The important studied results of long-term phase behavior of blended fuels kept at room temperature for 90 days found that the product was able to be blended with commercial high speed diesel (CHSD) as binary liquid CHSD-PEPFAD blends up to the maximum portion of 40 wt.% and as disohol of ternary liquid CHSD-PEPFAD-AhE blends up to the maximum portion of 80 wt.%. However, as further considering based on the tested results of important fluidity and cold flow properties, it was found that two formulae of the blends were interested for using as the alternative diesel including PEPFAD30 and PEPFAD50AhE10, the number following PEPFAD and AhE is the blending portion of wt.% with diesel. For preliminary utilization test compared with diesel on a test bench, a single-cylinder diesel engine model KUBOTA RT100 DI PLUS was used for testing under varying loads in the range of 1.28 to 6.40 kW at the constant high engine speed of 2200 rpm. It was found that both blends of interest were able to well operate the test engine as same as diesel with similar or slightly higher brake specific fuel consumption and brake thermal efficiency.

Key words: palm fatty acid distillate; palm tall oil monoacids; ethanolysis; diesel substitute, diesohol

บทนำ

จากสถานการณ์การใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามรายงานของ International Energy Agency (IEA) ที่คาดการณ์ว่า โลกจะมีความต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นสูงถึง 50% ภายในปี ค.ศ. 2030 ซึ่ง

พลังงานเกือบทั้งหมดเป็นพลังงานฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติ เสมือนเป็นพลังงานสิ้นเปลืองที่มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องสวนทางกับความต้องการที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ราคาปรับตัวเพิ่มขึ้น โดยดีเซลเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์จากการกลั่นน้ำมันดิบ

ที่มีความสำคัญ เนื่องจากการใช้งานกับรถบรรทุกขนาดใหญ่ รถไฟ เรือ และอุปกรณ์เครื่องยนต์อื่นที่ต้องการกำลังสูง สำหรับประเทศไทยพบว่ามีการใช้เชื้อเพลิงดีเซลสูงถึง 47% จากการใช้น้ำมันทั้งหมดในปี พ.ศ.2564 (Department of Energy Business Ministry of Energy, 2021) จึงมีการศึกษาวิจัยจากทั่วโลกเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ทดแทน เช่น การผลิตไบโอดีเซล การใช้น้ำมันพืชโดยผ่านกระบวนการคัดแปลงโมเลกุลเล็กน้อย และนำมาผสมกับดีเซลเป็นเชื้อเพลิงผสมสองส่วน (Binary blends) หรือการผสมสามส่วน (Ternary blends) ระหว่าง ดีเซล-น้ำมันพืช/ไบโอดีเซล-แอลกอฮอล์ เรียกว่า “ดีโซฮอล์” (Yilmaz and Vigil, 2014; Leevijit *et al.*, 2017) ซึ่งสามารถใช้งานได้จริงในเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ นอกจากนี้ ยังพบว่าการใช้ดีโซฮอล์สามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมลพิษอื่น ๆ สู่ชั้นบรรยากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ (He *et al.*, 2003; Atabani *et al.*, 2012) อย่างไรก็ตาม การผลิตดีโซฮอล์ที่ผสมสองส่วนระหว่างดีเซลกับแอลกอฮอล์ยังมีข้อด้อยที่สำคัญ คือ 1) คุณลักษณะความเป็นขั้วของแอลกอฮอล์และความไม่เป็นขั้วของดีเซล เมื่อผสมกันจะทำให้เกิดการแยกชั้น 2) ค่าซีเทนต่ำกว่าดีเซลมาก 3) ความหนืดน้อยกว่าดีเซล 4) คุณสมบัติด้านอื่น ๆ ต่ำกว่าดีเซล เช่น ความหนาแน่น ค่าความร้อน จุดวาบไฟ เป็นต้น จากข้อด้อยข้างต้นที่เป็นข้อจำกัดจึงมีการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์เพื่อปรับปรุงการใช้งานให้เทียบเท่าดีเซล (Lapuerta *et al.*, 2010; Eiadtrong *et al.*, 2019) โดยสหรัฐอเมริกามีการวิจัยพัฒนาสารอิมัลซิไฟเออร์ควบคู่กับการกำหนดแผนนโยบายที่จะนำไปใช้ในเชิงการค้า เช่น บริษัท Pure energy corporation (PEC) ใช้สารอิมัลซิไฟเออร์ 2-5 vol.% กับเอทานอล 10-15 vol.% และบริษัท AAE Technologies ใช้สารอิมัลซิไฟเออร์ 1 vol.% และ 1.25

vol.% กับเอทานอล 7.7 vol.% และ 10 vol.% (Eiadtrong *et al.*, 2019) ในขณะที่ประเทศไทยเคยมีการศึกษาการใช้ดีโซฮอล์เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซลที่เป็นความร่วมมือระหว่างบริษัท ปตท. บริษัทรถยนต์ฟอร์ด และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTECT) โดยผสมสารอิมัลซิไฟเออร์ที่นำเข้า 1 vol.% และเอทานอล 10 vol.% (Srithammarong, 2003) อย่างไรก็ตาม การนำสารอิมัลซิไฟเออร์จากต่างประเทศมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น การผลิตสารอิมัลซิไฟเออร์จากวัตถุดิบการเกษตรภายในประเทศจึงเป็นทางเลือกที่สำคัญสำหรับการพัฒนาและวิจัยเชื้อเพลิงดีโซฮอล์

ประเทศไทยมีการวิจัยและพัฒนาสารอิมัลซิไฟเออร์สำหรับผลิตดีโซฮอล์จากวัตถุดิบทางการเกษตร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานควบคู่กับการใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งหากสามารถใช้จริงในเชิงพาณิชย์จะส่งผลให้ราคาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรปรับตัวเพิ่มขึ้นตามกลไกตลาดอย่างยั่งยืนในอนาคต โดยในปี พ.ศ. 2559 มีการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้กรดไขมันปาล์มโมเลกุลยาวที่ได้จากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม (PFAD) ที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ราคาถูกจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มบริโภคมาใช้เป็นส่วนผสมทดแทนดีเซลได้สูงสุด 10 wt.% และเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์สำหรับผลิตดีโซฮอล์จากเอทานอลไม่มีน้ำ/มีน้ำ และบิวทานอลชนิดไม่มีน้ำได้สูงสุด 40-50 wt.% สามารถคงลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวระยะยาวและมีคุณสมบัติเชื้อเพลิงเทียบเท่าดีเซล (Eiadtrong, 2016; Eiadtrong *et al.*, 2019)

ดังนั้น เพื่อเพิ่มศักยภาพกรดไขมันปาล์มโมเลกุลยาวจากส่วนกลั่นกรดไขมันปาล์ม งานวิจัยนี้จึงใช้กระบวนการเอทานอลิซิสบางส่วนที่สภาวะการทำปฏิกิริยาอุณหภูมิสูงและความดันสูงโดยไม่ใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น ส่วนกลั่นกรดไขมันพาล์มเอสเทอร์ไฟฟ้างส่วน (Partially Esterified Palm Fatty Acid Distillate: PEPFAD) ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นเอทิลเอสเทอร์และกรดไขมันอิสระ เพื่อใช้เป็น ส่วนผสมทดแทนดีเซลและสารอิมัลซิไฟเออร์สำหรับผลิตดีโซฮอล์ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

ส่วนกลั่นกรดไขมันพาล์ม (PFAD) ซื้อมาจากบริษัท สุขสมบูรณ์น้ำมัน พืชจำกัด ตำบลห้างสูง อำเภอหนองใหญ่ จังหวัดชลบุรี มีองค์ประกอบเป็น กรดไขมันอิสระ ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ 93.8, 1.9, 2.2 และ 2.1 wt.% ตามลำดับ ดีเซลหมุนเร็วเกรดการค้า (CHSD) (ผสมเมทิลเอสเทอร์ 6-7

vol.%) ซื้อมาจากปั๊มน้ำมันบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา และเอทานอลชนิดไม่มีน้ำเกรดการค้าความบริสุทธิ์ 99.9% (AhE) ซื้อมาจากบริษัท แกรททิฟูดอินฟินิท จำกัด (มหาชน)

ในงานวิจัยนี้มีวิธีการดำเนินงาน 4 ขั้นตอนหลัก คือ 1) การเตรียมส่วนกลั่นกรดไขมันพาล์มเอสเทอร์ไฟฟ้างส่วนด้วยกระบวนการเอทานอลิซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2) การศึกษาพฤติกรรมเฟสที่อุณหภูมิห้องระยะยาวของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE 3) การศึกษาคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่สำคัญของเชื้อเพลิงผสม และ 4) การทดสอบใช้งานเชื้อเพลิงผสมที่น่าสนใจในเครื่องยนต์เบื้องต้นเปรียบเทียบกับดีเซลบนแท่นทดสอบ ดังสรุปขั้นตอนการศึกษา ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปขั้นตอนการศึกษาของงานวิจัย

ขั้นตอนการศึกษา		การศึกษาของแต่ละขั้นตอน		
1. การเตรียม PEPFAD ด้วย กระบวนการเอทานอลิซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	1.1 ล้าง PFAD	1.2 เตรียมผสมวัตถุดิบ PFAD และ AhE ที่ อัตราส่วน โดยโมล 1:1	1.3 ทำปฏิกิริยาที่ อุณหภูมิ 275 °C ความดัน 70 บาร์ เป็นเวลา 60 นาที	1.4 อุ่นได้ แอลกอฮอล์ อุณหภูมิ ~120 °C เป็นเวลา 30 นาที
2. พฤติกรรมเฟสระยะยาวของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE	2.1 เตรียมเชื้อเพลิงผสมน้ำหนักรวม 10.0 กรัม ที่สัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบ ในช่วง 0-100 wt.% (ที่ทุก ๆ ช่วง การผสม 10 wt.%)	2.2 วางนึ่งที่อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิรายวันอยู่ในช่วง 22-34 °C) เป็นเวลา 90 วัน เพื่อสังเกตพฤติกรรมเฟสระยะยาว		
3. คุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่สำคัญของเชื้อเพลิงผสม	3.1 คุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่สำคัญ ได้แก่ 1) จุดจุด 2) จุดไหลเท และ 3) ความหนืดจลนศาสตร์	3.2 เลือกเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลผ่านมาตรฐาน HSD และ AED	3.3 ศึกษาคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญเพิ่มเติม ได้แก่ 1) ความหนาแน่น 2) ค่าความร้อน และ 3) ค่าซีเทน	

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ขั้นตอนการศึกษา		การศึกษาของแต่ละขั้นตอน	
4. การทดสอบใช้งานเชื้อเพลิงผสมที่นำเสนอในเครื่องยนต์เบื้องต้นเปรียบเทียบกับดีเซลบนแท่นทดสอบ	4.1 ทดสอบในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT100 DI PLUS ขนาด 10 แรงม้า	4.2 เงื่อนไขการทดสอบ 1) เปลี่ยนแปลงภาระในช่วง 1.28-6.40 kW และ 2) ความเร็วรอบสูงถึง 2,200 rpm	4.3 ผลการทดสอบ 1) อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค 2) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค และ 3) อุณหภูมิไอเสีย

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมส่วนกลั่นกรดไฮพาล์มเอสเทอร์ไฟด์บางส่วนด้วยกระบวนการเอทานอลิซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เริ่มด้วยการล้างทำความสะอาดส่วนกลั่นกรดไฮพาล์มอย่างง่ายและการอุ่นไอน้ำ (Eiadtrong *et al.*, 2021) จากนั้นเตรียมส่วนผสมสำหรับทำปฏิกิริยาโดยชั่งส่วนกลั่นกรดไฮพาล์ม 1724.5 กรัม และเอทานอลชนิดไม่มีน้ำ 275.5 กรัม (น้ำหนักรวม 2,000 กรัม ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1) นำไปกวนอุ่นผสมอย่างง่ายในบีกเกอร์ขนาด 3 ลิตร บนแท่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $\approx 50 \pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 15 นาที (ใช้ใบกวนชนิด 6-blade disk turbine เส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบการกวน $\approx 250\text{-}300\text{ rpm}$)

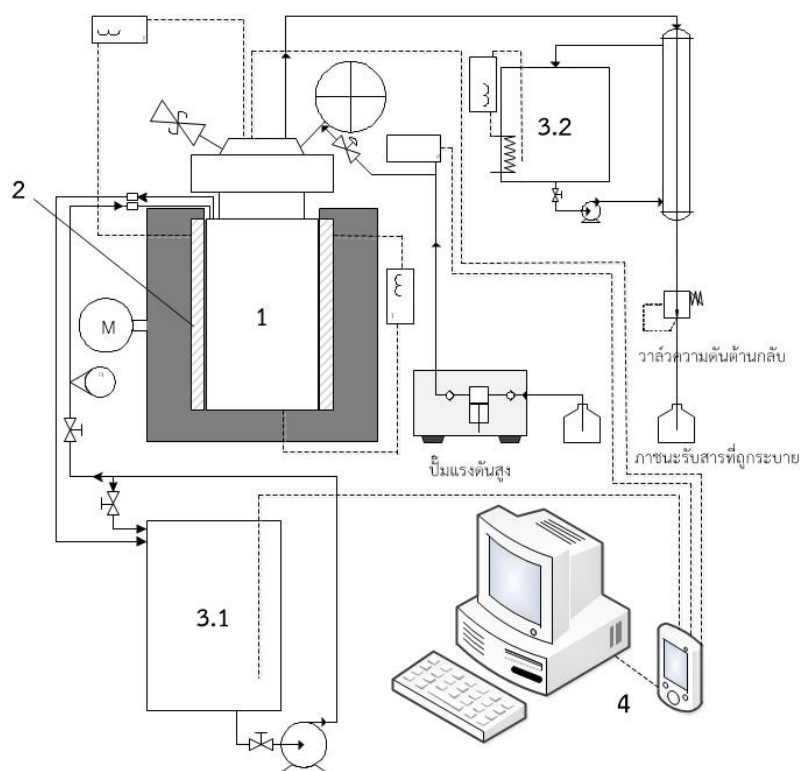
จากนั้นนำส่วนผสม (2,000 กรัม) ไปบรรจุและทำปฏิกิริยาในชุดทดลองเครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 2 ลิตร ดังโคดแแกรมภาพที่ 1 ประกอบด้วย ถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร ฮีตเตอร์หล่อทรงกระบอก 3 kW ระบบหล่อเย็น และ หน่วยบันทึกข้อมูล ตามขั้นตอนการทดลองโดยย่อต่อไปนี้ เมื่อบรรจุส่วนผสมและปิดฝาถังปฏิกรณ์เรียบร้อยแล้ว เปิดฮีตเตอร์ให้ความร้อนแก่ถังปฏิกรณ์ (วัดอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ด้วยเทอร์โมคัปเปิล type k และควบคุมอุณหภูมิ ให้ความร้อนด้วยเครื่องควบคุมแบบดิจิทัล ยี่ห้อ

DIGICON รุ่น MD-400A) โดยระหว่างการให้ความร้อนมีการใช้ปั๊มแรงดันสูง HPLC pump รุ่น Series-I และวาล์วควบคุมความดันด้านกลับ ยี่ห้อ GO Regulator รุ่น BP-60 Series ช่วยควบคุมรักษาความดันในถังปฏิกรณ์ไว้ที่ ≈ 70 บาร์ เริ่มจับเวลาการทำปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิในถังปฏิกรณ์เพิ่มถึงอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่ต้องการ ($\approx 275^{\circ}\text{C}$) ไปจนครบระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่กำหนด (60 นาที) จากนั้นจึงปิดระบบให้ความร้อนและเปิดระบบหล่อเย็น เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ลดลงเหลือ $\approx 65^{\circ}\text{C}$ ทำการปิดระบบหล่อเย็น เปิดฝาถังปฏิกรณ์นำผลิตภัณฑ์ออกจากถังปฏิกรณ์ใส่บีกเกอร์แล้วนำไปอุ่นไอน้ำแอลกอฮอล์และน้ำบนแท่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $\approx 120^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที จะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนกลั่นกรดไฮพาล์มเอสเทอร์ไฟด์บางส่วนที่ต้องการ (PEPFAD)

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาพฤติกรรมเฟสที่อุณหภูมิห้องระยะยาวของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE เมื่อเตรียมตัวอย่างในขวดแก้วขนาดเล็กที่มีฝาปิดโดยการเขย่าให้ส่วนผสมเข้ากันดีด้วยมืออย่างง่าย (Eiadtrong, 2016) ในการศึกษาเชื้อเพลิงผสมที่สัดส่วนการผสมต่าง ๆ ของแต่ละองค์ประกอบในช่วง 0-100 wt.% (ที่ทุก ๆ ช่วง การผสม 10 wt.%) ถูกเตรียมโดยใช้เครื่องชั่งดิจิทัลยี่ห้อ METTLER รุ่น

AL204 (ความละเอียด 0.0001 กรัม) แต่ละตัวอย่างถูกเตรียมให้มีน้ำหนักรวม 10.0 กรัม และควบคุมความคลาดเคลื่อนของแต่ละองค์ประกอบไว้ในช่วง ± 0.05 wt.% สำหรับการเตรียมเชื้อเพลิงผสม 2 ส่วน (CHSD-PEPFAD, CHSD-AhE, PEPFAD-AhE) ขวดแก้วถูกบรรจุและชั่งน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบตามสัดส่วน ปิดฝา แล้วนำไปอุ่นบนแท่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $50 \pm 5^{\circ}\text{C}$ จากนั้นจึงเขย่าผสมด้วยมือเป็นเวลา 1 นาที (ส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันดีเป็นของเหลวเฟสเดียว) สำหรับการเตรียมเชื้อเพลิงผสม 3 ส่วน (CHSD-PEPFAD-AhE) ขั้นแรกขวดแก้วถูกบรรจุด้วย

PEPFAD และ AhE ตามสัดส่วน ปิดฝาและนำไปอุ่นที่อุณหภูมิ $50 \pm 5^{\circ}\text{C}$ แล้วเขย่าผสมด้วยมือเป็นเวลา 1 นาที (ส่วนผสมเข้ากันดีเป็นของเหลวเฟสเดียว) จากนั้นจึงบรรจุ CHSD เพิ่มตามสัดส่วนปิดฝา และนำไปอุ่นที่อุณหภูมิ $50 \pm 5^{\circ}\text{C}$ แล้วเขย่าด้วยมือเป็นเวลา 1 นาที (ส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันดีเป็นของเหลวเฟสเดียว) จากนั้นจึงนำขวดตัวอย่างเชื้อเพลิงผสมทั้งหมดไปวางนิ่งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (บันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายวันอยู่ในช่วง $22-34^{\circ}\text{C}$) เป็นระยะเวลา 90 วัน เพื่อสังเกตพฤติกรรมเฟสระยะยาวของเชื้อเพลิงผสมต่อไป



ภาพที่ 1 ไลอะแกรมเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ประกอบด้วย 1) ถังปฏิกรณ์ขนาด 2 ลิตร 2) ฮีตเตอร์หล่อทรงกระบอก 3 kW 3) ระบบหล่อเย็น (3.1) ระบบหล่อเย็นถึงปฏิกรณ์ (3.2) ระบบหล่อเย็นผลิตภัณฑ์ และ 4) หน่วยบันทึกข้อมูล

ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่สำคัญของเชื้อเพลิงผสมที่สนใจ จากผล การศึกษาพฤติกรรมเฟสของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE จะทราบขอบเขตโดยรวม

ของสัดส่วนการผสม อย่างไรก็ตาม สำหรับเชื้อเพลิงผสมที่มีความน่าสนใจในการเริ่มนำไปประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล (มีเอทานอลชนิดไม่มีน้ำผสมอยู่ ≤ 10 wt.%) จะทำการศึกษาคุณสมบัติการเป็น

ของเหลวและการไหลที่สำคัญของเชื้อเพลิงผสม ได้แก่ จุดชุน จุดไหลเท และความหนืดจลศาสตร์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการเลือกเชื้อเพลิงผสมที่มีความน่าสนใจในการประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล ตามมาตรฐานดีเซลหมุนเร็ว (High Speed Diesel: HSD) และดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (Agricultural Engine Diesel: AED) ของประเทศไทย ต่อไป ซึ่งทดสอบคุณสมบัติตามวิธีทดสอบมาตรฐานของสมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน (American Society for Testing and Materials: ASTM) โดยเชื้อเพลิงผสมที่ถูกเลือกจะมีการทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญเพิ่มเติม ได้แก่ ความหนาแน่น ค่าความร้อน และค่าซีเทน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาสมรรถนะและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ สำหรับจุดชุน จุดไหลเท ความหนืดจลศาสตร์ และความหนาแน่น ได้ส่งทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D2500 ASTM D97 ASTM D445 และ ASTM D1298 ตามลำดับ ที่สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ค่าความร้อน ได้ส่งทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D240 ที่สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และ ค่าซีเทน ได้ส่งทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D613 ที่บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบใช้งานเชื้อเพลิงผสมที่น่าสนใจในเครื่องยนต์เบื้องต้นเปรียบเทียบกับดีเซลบนแท่นทดสอบ ได้ทำการทดสอบในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว ชนิดฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT100 DI PLUS (รายละเอียดของเครื่องยนต์ทดสอบแสดงใน ตารางที่ 2) บนแท่นทดสอบไดนาโมมิเตอร์ ยี่ห้อ PLINT & PARTNER ขนาด 12 แรงม้า ดังไดอะแกรมชุดการทดลองในภาพที่ 2 โดยวิธีเปลี่ยนแปลงภาระในช่วง 1.28-6.40 kW $\pm$ 0.5% ที่ความเร็วรอบสูงคงที่ $2,200 \pm 10$ rpm วัดแรงกระทำต่อแขนชุดไดนาโมมิเตอร์ (ความยาว 1.05 ft) โดยใช้เครื่องชั่งแบบสปริงยี่ห้อ SALTER (ความละเอียด 0.05 lbf) เพื่อนำไปคำนวณหาเบรคทอร์ก (Brake Torque: BT) และกำลังเบรค (Brake Power: BP) ของเครื่องยนต์ วัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงโดยใช้กระบอกตวง (ความละเอียด 0.5 ml) และนาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ ALBA (ความละเอียด 0.01 s) วัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์โดยใช้ดิิจิทัลเอ็นโค้ดเดอร์รุ่น PR-01 N-S (ความละเอียด 0.1 rpm) วัดอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและแก๊สไอเสียโดยใช้ดาต้าล็อกเกอร์รุ่น AI210 และสายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K (ความละเอียด 0.01°C) โดยทำการทดสอบเครื่องยนต์จำนวน 3 ชั่วโมง (ในที่นี้รายงานเป็นค่าเฉลี่ย)

ตารางที่ 2 รายละเอียดเครื่องยนต์ทดสอบยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT100 DI PLUS

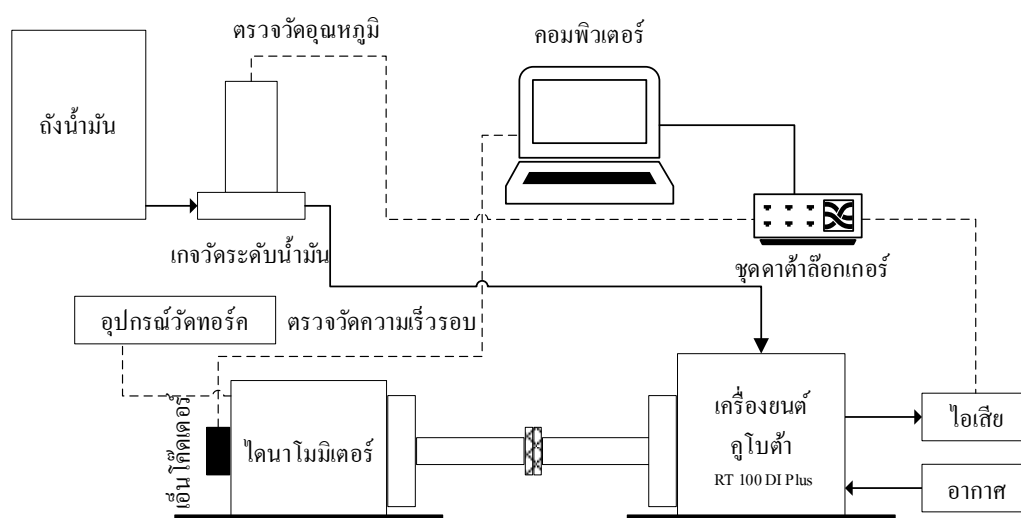
ข้อมูลทางเทคนิค	
แบบเครื่องยนต์	ดีเซล 4 จังหวะ 1 สูบนอน
อัตราส่วนการอัด	18 : 1
ปริมาตรกระบอกสูบ	547 cc.
กำลังสูงสุด	7.4 kW/2400 rpm
กำลังต่อเนื่อง	6.6 kW/2400 rpm
แบบห้องเผาไหม้	ฉีดเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้โดยตรง

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

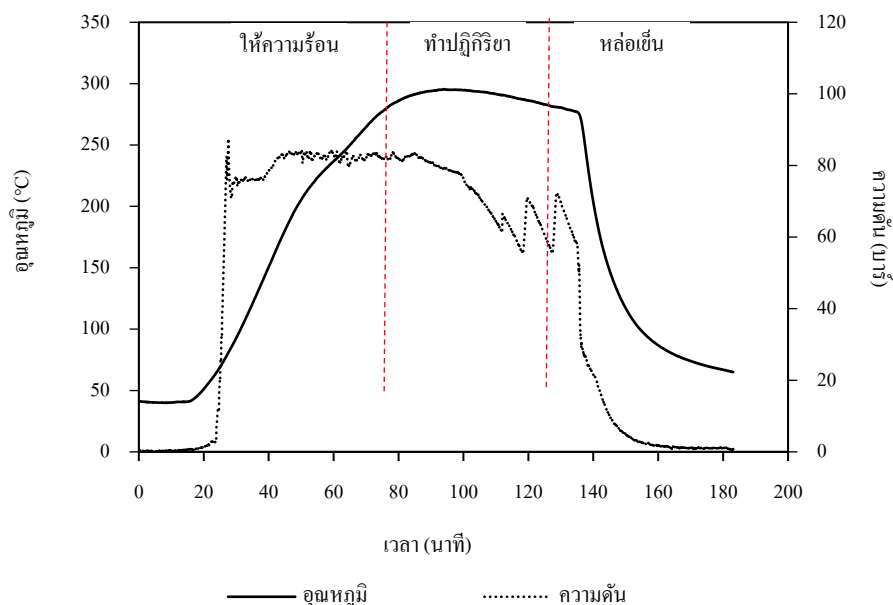
1. การเตรียมส่วนกลั่นกรดไขมันเอสเตอร์ไฟด์บางส่วนโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

การเตรียมส่วนกลั่นกรดไขมันเอสเตอร์ไฟด์บางส่วนโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากข้อมูลอุณหภูมิและความดันภายในถังปฏิกรณ์ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ชุดทดลองสามารถทำได้จริง ดังแสดงในภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่าหลังจากปรับความดันภายในถังปฏิกรณ์ได้ ≈ 70 บาร์ (นาทิตั้ง 0-25) ควบคุมการอุ่นให้ความร้อน ชุดทดลองใช้ระยะเวลาในการอุ่นให้ความร้อน ≈ 60 นาที (นาทิตั้ง 15-75) ภายในถังปฏิกรณ์จึงมีอุณหภูมิถึงจุดที่กำหนด 275°C โดยระหว่างการทำ

ปฏิกิริยา 60 นาที (นาทิตั้ง 75-135) ชุดทดลองสามารถควบคุมสถานะการทำงานปฏิกิริยาจริง ช่วงนาทิตั้ง 100-135 เป็นช่วงที่ฮีตเตอร์ตัดการทำงาน อุณหภูมิและความดันลดลงจึงรักษาความดันด้วยปั๊มแรงดันสูงโดยช่วงทำปฏิกิริยา 60 นาที มีอุณหภูมิเฉลี่ย $289 \pm 6^{\circ}\text{C}$ และความดันเฉลี่ย 72 ± 9 บาร์ เมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาจะหล่อเย็นด้วยน้ำผ่านชุดปั๊มให้อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ลดลงเหลือ $\approx 65^{\circ}\text{C}$ ที่ความดัน ≈ 0 บาร์ ใช้เวลา ≈ 40 นาที (นาทิตั้ง 135-175) จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์ออกจากถังปฏิกรณ์ไปอุ่นไอล์แอลกอฮอล์และน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยา โดยไม่จำเป็นต้องนำผลิตภัณฑ์ไปล้างน้ำทำความสะอาดและอุ่นไอล์น้ำเพิ่มเติมเหมือนการผลิตแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 2 ไดอะแกรมแทนทดสอบสมรรถนะ (Eiadtrong et al., 2018)



ภาพที่ 3 อุณหภูมิและความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์

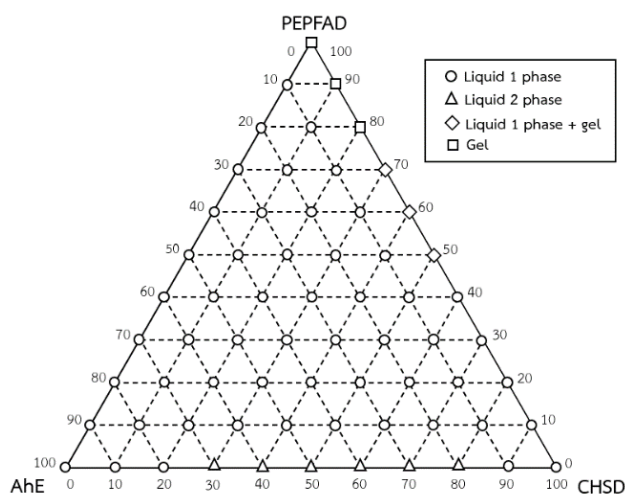
เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยวิธี Thin-Layer Chromatography/Flame Ionization Detector (TLC/FID) พบว่ามี เอทิลเอสเทอร์ กรดไขมันอิสระ ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และ โมโนกลีเซอไรด์อยู่ 71.6, 26.8, 1.0, 0.3 และ 0.3 wt.% ตามลำดับ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการผลิตส่วนกลั่นกรดไขมันเอสเทอร์รีไฟด์บางส่วนสามารถเตรียมผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ได้ในระดับสูง (≥ 70 wt.%) นอกจากนี้ก็เป็นที่น่าทึ่งที่ทราบกันดีโดยทั่วไปแล้วว่า เอทิลเอสเทอร์มีคุณสมบัติการเป็นของเหลวที่ดีกว่ากรดไขมันอิสระ (Prasit and Somnuk, 2017) และเมื่อสังเกตผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จะเห็นว่า มีลักษณะทางกายภาพเป็นไขอ่อนที่อุณหภูมิห้อง โดยมีความแตกต่างอย่างชัดเจนกับส่วนกลั่นกรดไขมันที่ เป็นไขค่อนข้างแข็งที่อุณหภูมิห้องด้วยเหตุนี้ ระดับความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จึงมีผลโดยตรงต่อระดับการปรับปรุงคุณสมบัติการเป็นของเหลวของผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมดีเซล/ดีโซฮอล์ต่อไป

2. การศึกษาพฤติกรรมเฟสที่อุณหภูมิห้องระยะยาวของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE

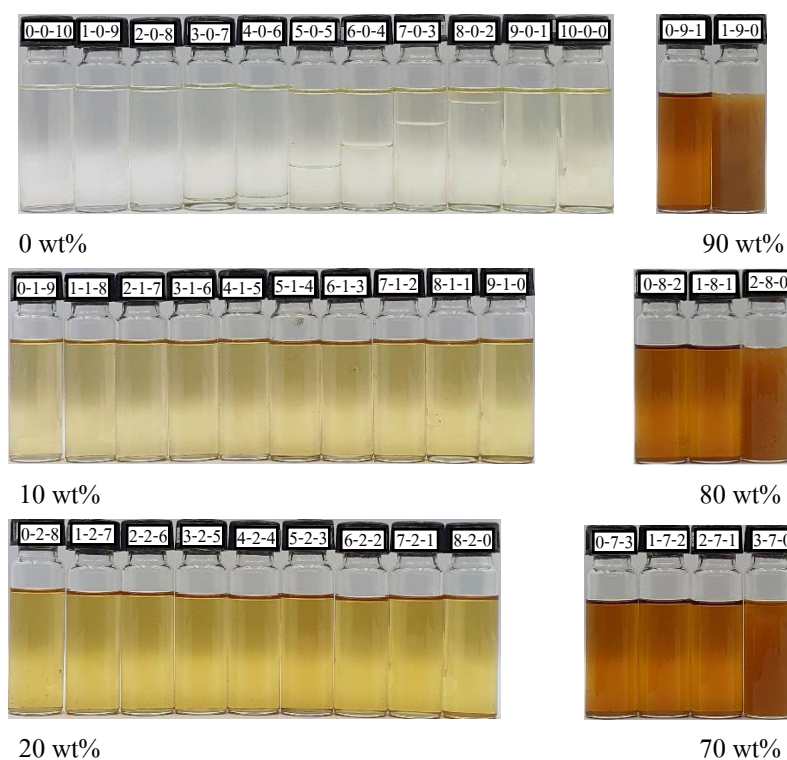
การศึกษาพฤติกรรมเฟสระยะยาวของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE เพื่อประเมินความสามารถขึ้นต้นในการเป็นส่วนผสมทดแทนดีเซล/ดีโซฮอล์ ซึ่งแสดงเฟสไดอะแกรมและพฤติกรรมเฟส ดังภาพที่ 4 และ ภาพที่ 5 ตามลำดับ โดยในการเพิ่มสัดส่วนการผสม PEPFAD ในช่วง 10-40 wt.% เชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD และเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE สามารถคงสถานะเป็นของเหลวเฟสเดียวได้ทุกสัดส่วน และในสัดส่วนการผสม PEPFAD ในช่วง 50-90 wt.% พบว่า เชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD มีการแยกชั้นเกิดขึ้น ในขณะที่เชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE สามารถคงสถานะเป็นของเหลวเฟสเดียวได้ทุกสัดส่วน ดังนั้นเอทานอลชนิดไม่มีน้ำจึงมีคุณสมบัติที่สำคัญในการคงสถานะเป็นของเหลวเฟสเดียวสำหรับเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE ที่มี PEPFAD ในระดับสูง (>40 wt.%)

จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าการทำปฏิกิริยาเอทานอลิซิสบางส่วนสามารถเพิ่มสัดส่วนการผสม PEPFAD กับดีเซลหมุนเร็วเกรดการค้า เป็นเชื้อเพลิงเหลวผสม 2 ส่วน CHSD-PEPFAD ได้ ≤ 40 wt.% (CHSD-PEPFAD ได้ ≤ 10 wt.% (Eiadtrong, 2016; Eiadtrong *et al.*, 2019) และผสมเป็นเชื้อเพลิงเหลวผสม 3 ส่วน CHSD-PEPFAD-AhE หรือดีโซฮอล์ได้

≤ 80 wt.% (CHSD-PEPFAD-AhE ได้ ≤ 50 wt.% (Eiadtrong, 2016)) ด้วยผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบเอทิลเอสเทอร์ในระดับสูง (≥ 70 wt.%) ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวและยังคงเหลือกรดไขมันอิสระ (≥ 20 wt.%) มีหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์จึงส่งผลให้ความสามารถในการผสมเป็นของเหลวสูงขึ้น



ภาพที่ 4 เฟสไดอะแกรมของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE





ภาพที่ 5 พฤติกรรมเฟสที่อุณหภูมิห้องของเชื้อเพลิงผสม CHSD-PEPFAD-AhE ที่สัดส่วนการผสม PEPFAD ต่าง ๆ
หมายเหตุ: หมายเลขบนฝาขวดแสดงถึงสัดส่วนการผสม เช่น เชื้อเพลิงผสม 0-0-10 หมายถึงมีสัดส่วนการผสมที่ CHSD 0 wt%, PEPFAD 0 wt% และ AhE 10 wt%

3. การศึกษาคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่สำคัญของเชื้อเพลิงผสม

จากผลการศึกษาพฤติกรรมเฟสที่อุณหภูมิห้องระยะยาวมีตัวอย่างที่น่าสนใจ คือ PEPFAD(10-40) และ PEPFAD(10-90)AhE10 (ตัวเลขที่ตามหลัง PEPFAD และ AhE คือสัดส่วนการผสมกับดีเซลในหน่วย wt.%) เนื่องจากมีลักษณะเป็นของเหลวเฟสเดียวและผสมเอทานอลชนิดไม่มีน้ำในระดับต่ำ (10 wt.%) จึงเหมาะสมต่อการศึกษาการทดสอบคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่สำคัญ ประกอบด้วย

จุดขุ่นและจุดไหลเท เป็นคุณสมบัติการเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ จากผลการทดสอบพบว่า จุดขุ่นและจุดไหลเทของ PEPFAD(10-40) สามารถผสม PEPFAD ≤ 30 wt.% ดังภาพที่ 6 โดยจุดขุ่นและจุดไหลเทมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสม (+2°C ถึง +11°C และ 0°C ถึง +16°C ตามลำดับเทียบกับดีเซล) สำหรับ PEPFAD(10-90)AhE10 สามารถผสม PEPFAD ≤ 70 wt.% ดังภาพที่ 7 จุดขุ่นและจุดไหลเทมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสม (0°C ถึง +7°C และ +1°C ถึง +8°C

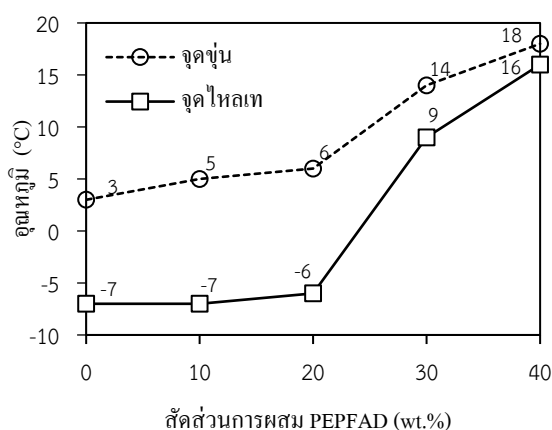
ตามลำดับเทียบกับดีเซล) เนื่องจาก PEPFAD มีค่าจุดขุ่นและจุดไหลเทสูงส่งผลให้เชื้อเพลิงผสมมีจุดขุ่นและจุดไหลเทเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสม โดยสรุป PEPFAD(10-30) และ PEPFAD(10-70)AhE10 ผ่านทั้งมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร

ความหนืดจลนศาสตร์ คือคุณสมบัติที่มีผลต่อการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง ผลการทดสอบพบว่า ความหนืดจลนศาสตร์ของ PEPFAD(10-40) เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสม (+12.2% ถึง +53.7% ตามลำดับเทียบกับดีเซล) ดังภาพที่ 8 สำหรับ PEPFAD(10-90)AhE10 ที่สัดส่วนการผสม PEPFAD เท่ากับ 10 wt.% มีค่าความหนืดจลนศาสตร์ใกล้เคียงกับดีเซล (-3.2%) และเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสม (+15.0% ถึง +106.5% ตามลำดับเทียบกับดีเซล) ดังภาพที่ 9 จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่า เอทานอลที่มีความหนืดต่ำ (1.08 mm²/s) (He *et al.*, 2003) สามารถช่วยปรับปรุงความหนืดจลนศาสตร์ของเชื้อเพลิงผสมที่เพิ่มขึ้นจากการผสม PEPFAD ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสรุป PEPFAD (10-30) และ PEPFAD (10-70)AhE10 มีความหนืดจลนศาสตร์ผ่าน

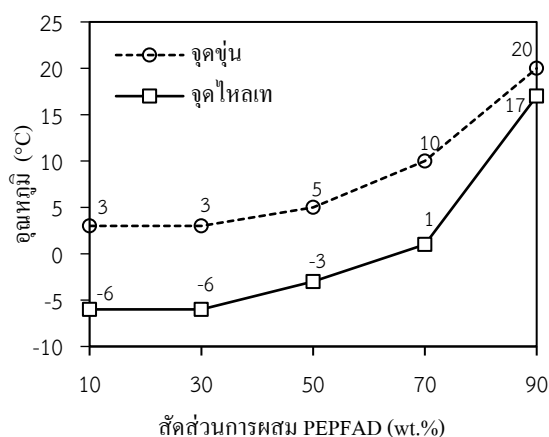
ทั้งมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร

จากผลการทดสอบคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่อุณหภูมิต่ำ จึงเลือก PEPFAD30 และ PEPFAD50AhE10 เป็นตัวอย่างเพื่อ

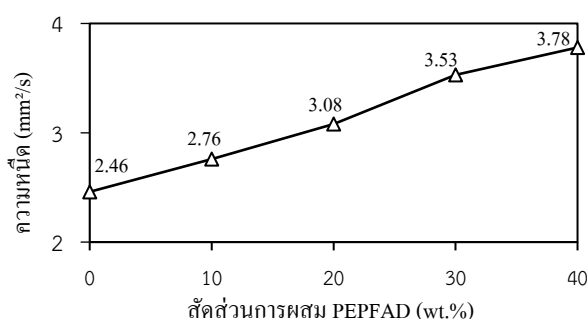
ทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญเพิ่มเติม ประกอบด้วย ความหนาแน่น ค่าความร้อน และค่าซีเทน เนื่องจากเป็นตัวอย่างที่มีแนวโน้มสามารถทดสอบกับเครื่องยนต์การเกษตรได้



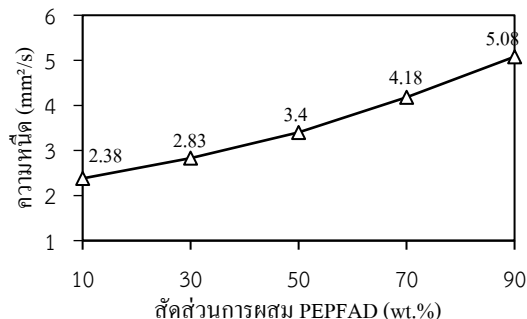
ภาพที่ 6 จุดขุ่นและจุดไหลเทของ PEPFAD(10-40)



ภาพที่ 7 จุดขุ่นและจุดไหลเทของ PEPFAD(10-90)AhE10



ภาพที่ 8 ความหนืดจลนศาสตร์ของ PEPFAD(10-40)



ภาพที่ 9 ความหนืดจลนศาสตร์ของ PEPFAD(10-90)AhE10

ความหนาแน่น เป็นคุณสมบัติที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับมวลและพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ผลการทดสอบพบว่า ความหนาแน่นของ PEPFAD30 และ PEPFAD50AhE10 มีค่าเท่ากับ 838 g/l และ 845 g/l มีค่าสูงกว่าดีเซล +2.0% และ +2.9% ตามลำดับ โดยเชื้อเพลิงผสมทั้ง 2 สูตร มีค่าผ่านทั้งมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร แสดงให้เห็นว่าเอทานอลที่มีความหนาแน่นต่ำ (771 g/l)

(He et al., 2003) สามารถช่วยปรับปรุงค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ค่าความร้อน บ่งบอกปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในการสันดาป ผลการทดสอบพบว่า PEPFAD30 และ PEPFAD50AhE10 มีค่าเท่ากับ 43.3 MJ/kg และ 40.0 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าดีเซล -3.6% และ -10.9% ตามลำดับ เนื่องจากค่าความร้อนของเอทานอลและส่วนกลั่นเกรดไฮโดรเมทิลเอสเทอร์ไฟด์บางส่วนมีค่าเท่ากับ 22.8 MJ/Kg และ 39.5 MJ/Kg

ต่ำกว่าดีเซล -49.2% และ -12.1% ตามลำดับ (Eiadtrong *et al.*, 2018) ส่งผลให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงผสมมีค่าต่ำลง อย่างไรก็ตาม ค่าความร้อนของส่วนกลั่นกรด

ไฮปาล์มเอสเทอร์ไฟด์บางส่วนมีค่าสูงกว่าเอทานอลถึง +73.2% ส่งผลให้การผสมส่วนกลั่นกรดไฮปาล์มเอสเทอร์ไฟด์

ตารางที่ 4 คุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญของเชื้อเพลิงทดสอบ

คุณสมบัติเชื้อเพลิง	มาตรฐานประเทศไทย		เชื้อเพลิงทดสอบ		
	HSD	AED	CHSD	PEPFAD30	PEPFAD50AhE10
จุดขุ่น/จุดไหลเท (°C)	n.a./≤10	n.a./n.a.	3/-7	14/9	5/-3
ความหนืดจลนศาสตร์ที่ 40°C (mm ² /s)	1.8-4.1	1.9-8.0	2.46	3.53	3.40
ความหนาแน่นที่ 15.6°C (g/l)	810-870	860-900	832	838	845
ค่าซีเทน	≥50	≥47	65.3	-	54.0
ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)	n.a.	n.a.	44.9	43.3	40.0

หมายเหตุ: n.a. = non applied; HSD = High Speed Diesel; AED = Agricultural Engine Diesel; CHSD = Commercial High Speed Diesel; PEPFAD30 = 70 wt.% CHSD-30 wt.%PEPFAD; PEPFAD50AhE10 = 40 wt.%CHSD-50 wt.%PEPFAD-10 wt.%AhE

ค่าซีเทน บ่งบอกถึงคุณภาพในการจุดระเบิดของเชื้อเพลิง จากการศึกษาพบว่าเอทานอลมีค่าซีเทนที่ต่ำกว่าดีเซล (Eiadtrong *et al.*, 2018) จึงได้เลือก PEPFAD50AhE10 เป็นตัวอย่างในการส่งทดสอบค่าซีเทน ผลการทดสอบพบว่า PEPFAD50AhE10 มีค่าซีเทน 54.0 ต่ำกว่าดีเซล -17.3% แต่สามารถผ่านทั้งมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตรที่กำหนดไว้ ≥50 และ ≥47 ตามลำดับ ส่งผลให้ PEPFAD30 มีค่าซีเทนผ่านทั้งมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตรได้เช่นเดียวกัน และมีค่าซีเทนที่สูงกว่า 54.0 เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนการผสมกับ PEPFAD50AhE10 ดังตารางที่ 4

จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญสามารถสรุปได้ว่า PEPFAD(10-30) และ PEPFAD(10-50)AhE10 มีค่าจุดขุ่น จุดไหลเท ความหนืดจลนศาสตร์

ค่าความหนาแน่น ค่าความร้อน และค่าซีเทน ผ่านทั้งมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร

4. การทดสอบใช้งานเชื้อเพลิงผสมที่น่าสนใจในเครื่องยนต์เบื้องต้นเปรียบเทียบกับดีเซลบนแท่นทดสอบ

จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชื้อเพลิงที่สำคัญ จึงใช้เชื้อเพลิงผสม 2 สูตร คือ PEPFAD30 และ PEPFAD50AhE10 เป็นตัวอย่างทดสอบใช้งานเบื้องต้น พบว่า

อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรค คือความต้องการเชื้อเพลิงสำหรับเดินเครื่องยนต์ให้ได้กำลังเบรคตามต้องการในเวลาที่กำหนด พบว่า PEPFAD30 มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคที่ใกล้เคียงดีเซล (+0.1% ถึง +3.5%) แต่สำหรับ

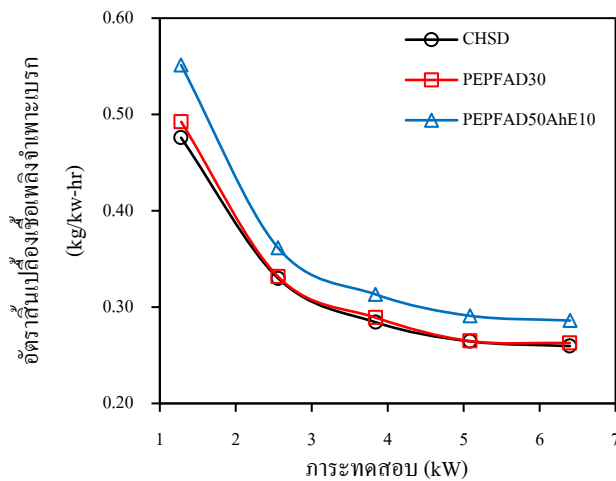
PEPFAD50AhE10 มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคที่สูงกว่าดีเซลในทุกเงื่อนไขการทดสอบ (+9.7% ถึง +15.9%) ดังภาพที่ 10 เนื่องจากค่าความร้อนของ PEPFAD50AhE10 ต่ำกว่าดีเซลส่งผลให้มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่สูงกว่า

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรค คือตัวแปรพื้นฐานที่ไม่มีหน่วย นิยมใช้เป็นค่าอ้างอิงเปรียบเทียบเชิงทฤษฎี พบว่า PEPFAD30 มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคสูงกว่าดีเซลทุกภาระการทดสอบมีค่าเฉลี่ย +2.4% และ PEPFAD50AhE10 พบว่าที่ภาระต่ำสุด (1.28 kW) มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคต่ำกว่าดีเซล -3.1% แต่เมื่อเพิ่มภาระพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคมีค่าเพิ่มขึ้นและสูงกว่าดีเซลมีค่าเฉลี่ย +0.8% ดังภาพที่ 11

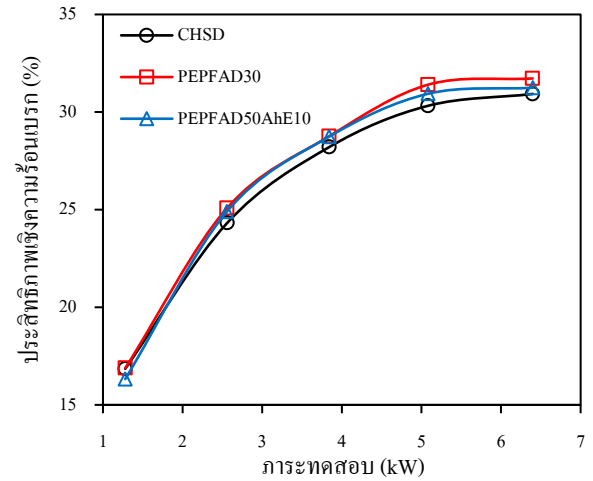
อุณหภูมิไอเสีย พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระของเครื่องยนต์ โดยเป็นผลมาจากส่วนผสม เชื้อเพลิง-อากาศ ที่หนาขึ้น อุณหภูมิไอเสียของ PEPFAD30 มีค่าต่ำกว่าดีเซลโดยเฉลี่ย -1.4% ซึ่งเป็นปกติของเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำกว่า จะมีอุณหภูมิไอเสียต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม สำหรับ PEPFAD50AhE10 พบว่ามีค่าอุณหภูมิไอเสียสูงกว่าดีเซลเล็กน้อย โดยเฉลี่ย +4.2% ดังภาพที่ 12 ทั้งที่เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนต่ำกว่า ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากการสันดาปล่าช้า โดยจะสังเกตได้ง่ายที่การทดสอบเครื่องยนต์รอบสูงสอดคล้องกับงานวิจัย Rakopoulos (2014); Eiadtrong (2021)

จากผลการทดสอบใช้งานเบื้องต้นบนแท่นทดสอบ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การใช้ PEPFAD30 และ PEPFAD50AhE10 ไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะเครื่องยนต์ และมีผลประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ที่ดีขึ้น โดยเฉพาะในภาระเครื่องยนต์ที่สูงขึ้น และตลอดช่วงการทดสอบทุกเงื่อนไขไม่พบปัญหาเกิดขึ้นในช่วงการทดสอบ เช่น การฉีดเชื้อเพลิง การสตาร์ทขณะเครื่องเย็น อาการน็อก และการติดขัดของแวนลูกสูบ

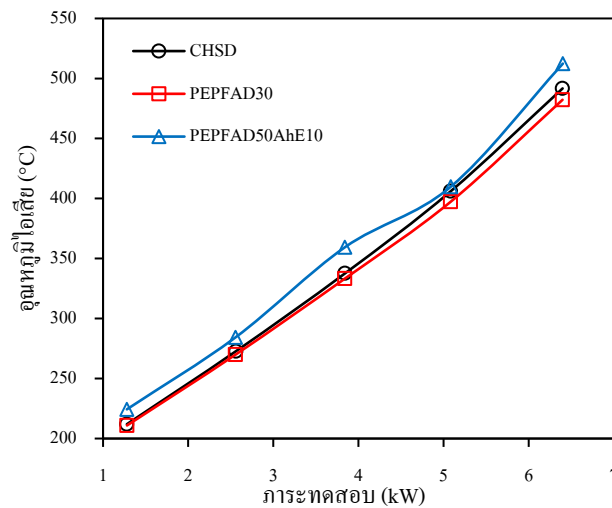
สำหรับราคาต้นทุนของเชื้อเพลิงทดสอบคำนวณบนพื้นฐานของราคาเฉลี่ยย้อนหลัง 10 ปี (พ.ศ. 2555-2564) ประกอบด้วย ดีเซลหมุนเร็วเกรดการค้า (26.85 บาท/ลิตร) (Energy Policy and Planning Office Ministry of Energy, 2021) เอทานอลชนิดไม่มีน้ำเกรดการค้า (24.14 บาท/ลิตร) (Thai Ethanol Producers Trade Association, 2021) และส่วนกลั่นกรดไขปาแลม (PFAD) (21.16 บาท/ลิตร) (Bank of Thailand, 2021) โดยการผลิตส่วนกลั่นกรดไขปาแลมเอทานอลไฮสปีดบางส่วน (PEPFAD) รวมค่าวัตถุดิบและไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 24.51 บาท/ลิตร ดังนั้น ผลการคำนวณราคาเชื้อเพลิงผสม PEPFAD30 และ เชื้อเพลิงดีโซฮอล์ PEPFAD50AhE10 จึงมีราคา 25.66 และ 24.53 บาท/ลิตร ซึ่งต่ำกว่าดีเซล 1.19 และ 2.32 บาท/ลิตร คิดเป็น 4.4% และ 8.6% ตามลำดับ เปรียบเทียบกับดีเซลหมุนเร็วเกรดการค้า



ภาพที่ 10 อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก



ภาพที่ 11 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรก



ภาพที่ 12 อุณหภูมิไอเสีย

หมายเหตุ: CHSD = Commercial High Speed Diesel

PEPFAD30 = 70 wt.%CHSD-30 wt.%PEPFAD

PEPFAD50AhE10 = 40 wt.%CHSD-50 wt.%PEPFAD-10 wt.%AhE

สรุป

การเตรียมส่วนกลั่นกรดไขมันเอสเทอร์ ไฟล์บางส่วนด้วยปฏิกิริยาเอทานอลโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งใช้ส่วนกลั่นกรดไขมันทำปฏิกิริยากับเอทานอลชนิดไม่มีน้ำ ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 อุณหภูมิเฉลี่ย $289 \pm 6^\circ\text{C}$ ความดันเฉลี่ย

72 ± 9 บาร์ เป็นเวลา 60 นาที และทำความสะอาดด้วยกระบวนการอุ่นไอล์แอลกอฮอล์และน้ำ โดยไม่ใช้กระบวนการล้างน้ำทำความสะอาดและอุ่นไอล์น้ำเพิ่มเติมเหมือนการผลิตแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีองค์ประกอบหลักเป็นเอทิลเอสเทอร์ 71.6 wt.% กรด

ไขมันอิสระ 26.8 wt.% และองค์ประกอบอื่น ๆ อีก 1.6 wt.% สามารถผสมเป็นเชื้อเพลิงเหลวกับดีเซลหมุนเร็วเกรดการค้า CHSD-PEPFAD และดีโซฮอล์ CHSD-PEPFAD-AhE สูงถึง 40 และ 80 wt.% ตามลำดับ จากการทดสอบคุณสมบัติการเป็นของเหลวและการไหลที่สำคัญ ประกอบด้วย จุดขุ่น จุดไหลเท และความหนืดจลนศาสตร์ พบว่า PEPFAD(10-30) และ PEPFAD(10-50)AhE10 มีคุณสมบัติผ่านมาตรฐานดีเซลหมุนเร็วและดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตรของประเทศไทย และการทดสอบใช้งานเบื้องต้นเชิงเปรียบเทียบเบื้องต้นบนแท่นทดสอบ ในเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว ยี่ห้อคูโบต้า รุ่น RT100DI PLUS ขนาด 10 แรงม้า ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงภาระในช่วง 1.28-6.40 kW ที่ความเร็วรอบสูงคงที่ 2,200 rpm พบว่า PEPFAD30 และ PEPFAD50AhE10 สามารถใช้งานได้ดีเทียบเท่าดีเซล มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรคและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรคใกล้เคียงหรือสูงกว่าดีเซลเล็กน้อย โดยไม่พบปัญหาเกิดขึ้นในช่วงการทดสอบ เช่น การฉีดเชื้อเพลิง การสตาร์ทขณะเครื่องเย็น อาการน็อก และการติดขัดของแวนลูกสูบ โดยสรุป งานวิจัยนี้ค้นพบโอกาสที่ดีของการเพิ่มศักยภาพการนำกรดไขมันปาล์มโมเลกุลยาวจากส่วนกลั่นกรดไขมันมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนดีเซล/ดีโซฮอล์ ด้วยการทำปฏิกิริยาเอทาโนไลซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตาม ยังต้องมีการศึกษาทดสอบใช้งานจริงในเครื่องยนต์ที่เงื่อนไขต่าง ๆ เพิ่มเติม เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อเครื่องยนต์ระยะยาว เช่น การอุดตันของหัวฉีด การเสื่อมสภาพของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ และการอุดตันหรือนิกขาดของกรองน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้กรอบวิจัยการพัฒนาพลังงานทดแทน และการประยุกต์ใช้งานจริงเพื่อนำไปสู่ชุมชนสีเขียว และเงินรายได้มหาวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และทุนบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เอกสารอ้างอิง

- Atabani, A. E. , Silitonga, A. S. , Badruddin, I. A. , Mahlia, T.M.I., Masjuki, H.H. and Mekhilef, S. 2012. A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 16: 2070-2093.
- Bank of Thailand. 2021. **Crude Palm Oil**. Major industrial products in the south of Thailand. Available Source: https://app.bot.or.th/BTWS_STAT/statistics/BOTWEBSTAT.aspx?reportID=590&language=ENG, April 10, 2022. (in thai)
- Department of Energy Business Ministry of Energy. 2021. **News on fuel use situation in 2021**. Ministry of Energy. Available Source: https://www.doeb.go.th/news_activity/2498.pdf, March 20, 2022. (in thai)
- Eiadtrong, S. 2016. Production of Diesel Extender from Mixed Crude Palm Oil by Continuous Hydrolysis Process. Master Thesis of Engineering, Prince of Songkla University. (in Thai)
- Eiadtrong, S., Maliwan1, K., Theppaya, T., Kattiyawan, T. , Tepsorn, K. , Piamcharoensuk, S. and Leevijit, T. 2018. Preliminary utilizing the blends of diesel- PFAD- anhydrous/hydrous

- alcohols in an agricultural diesel engine, pp. 76-83. In **The 9th TSME-IcoME**. Phuket, Thailand. (in Thai)
- Eiadtrong, S., Maliwan, K., Prateepchaikul, G., Kattiyawan, T., Thephsorn, P. and Leevijit, T. 2019. Preparation, important fuel properties, and comparative use of un-preheated palm fatty acid distillate- diesel blends in a single cylinder diesel engine. **Renewable Energy** 134: 1089-1098.
- Eiadtrong, S. 2021. An Investigation to Utilize Diesel/Diesohols containing Palm Tall Oil Monoacids as Simply Novel Diesel Substitutes. Doctor of Philosophy Thesis of Engineering, Prince of Songkla University. (in Thai)
- Eiadtrong, S., Maliwan, K., Thepaya, T., Kattiyawan, T., Prateepchaikul, G. and Leevijit, T. 2021. An investigation to utilize ternary diesel-palm fatty acid distillate-10 wt.% n-butanol blends as simply novel diesel substitute. **Fuel** 289: 119965.
- Energy Policy and Planning Office Ministry of Energy. 2021. **Oil Price**. Petroleum. Ministry of Energy. Available Source: <http://www.eppo.go.th/index.php/th/petroleum/price/oil-price.html>, April 3, 2022. (in Thai)
- He, B.Q., Shuai, S.J., Wang, J.X. and He, H. 2003. The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine. **Atmospheric Environment** 37: 4965-4971.
- Lapuerta, M., Garcia-Contreras, R., Campos-Fernandez, J. and Pilar Dorado, M. 2010. Stability, lubricity, viscosity, and cold-flow properties of alcohol/diesel blends. **Energy & Fuels** 24: 4497-4502.
- Leevijit, T., Prateepchaikul, G., Maliwan, K., Mompiboon, P. and Eiadtrong, S. 2017. Comparative properties and utilization of un- preheated degummed/esterified mixed crude palm oil-diesel blends in an agricultural engine. **Renewable Energy** 101: 82-89.
- Prasit, T. and Somnuk, K. 2017. Circulation Biodiesel Production Process from Palm Fatty Acid Distillate Using Helical Static Mixer. **RMUTL Engineering Journal** 1(1): 99-108. (in Thai)
- Rakopoulos, D. C. , Rakopoulos, C. D. , Giakoumis, E.G., Papagiannakis, R.G. and Kyritsis, D.C. 2014. Influence of properties of various common bio- fuels on the combustion and emission characteristics of high- speed DI (direct injection) diesel engine: vegetable oil, bio- diesel, ethanol, n- butanol, diethyl ether. **Energy** 73: 354-366.
- Srihammarong, P. 2003. Collaborative research and development of diesohol fuel for diesel vehicles in Thailand, pp. 120-121. In **MTEC annual meeting**. Bangkok, Thailand. (in Thai)
- Thai Ethanol Producers Trade Association. 2021. **Ethanol reference price**. Data statistics. Thai Ethanol Producers Trade Association. Available Source: <https://www.thai-ethanol.com/th /statistical-data/price.html>, April 15, 2022. (in Thai)

Yilmaz, N. and Vigil, F. 2014. Potential use of a blend of diesel, biodiesel, alcohols and vegetable oil in compression ignition engines. **Fuel** 124: 168-172.

การยืดอายุการเก็บรักษามะนาวและกล้วยน้ำว้าโดยเคลือบผิว ด้วยอิมัลชันไขคาร์นูบา

Extending the Shelf Life of Lime and Banana by Coating Carnauba Wax Emulsion

รุ่งทิพย์ จูทะมมงคล* ฟาติมา เวะลง และ ศรีอุบล ทองประดิษฐ์

Rungtip Jutamongkon*, Phartima Valung and Sriubol Thongpradit

Received: 2 October 2021, Revised: 6 July 2022, Accepted: 15 August 2022

บทคัดย่อ

มะนาวและกล้วยน้ำว้าเคลือบด้วยอิมัลชันไขคาร์นูบาที่ความเข้มข้นต่างกัน 4 ระดับคือ 4, 6, 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ แล้วตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ ปริมาณอิมัลชันไขที่ใช้เคลือบแตกต่างกันตามชนิดของผลไม้ โดยมะนาวและกล้วยน้ำว้าใช้ปริมาณไขในการเคลือบผิวเฉลี่ย 0.07-0.60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การเคลือบผิวรักษาสีเขียวและลดการสูญเสียน้ำหนักได้ คะแนนสีเปลือกผลมะนาวที่ผู้บริโภครยังให้การยอมรับในช่วงสีเหลืองออกเขียว ส่วนสีน้ำตาลขึ้นบ่งถึงการหมดสภาพการบริโภคเป็นชุดควบคุมพบในวันที่ 13 คะแนนสีเปลือกผลกล้วยที่ผู้บริโภครยังให้การยอมรับในช่วงสีเหลืองถึงสีเขียว ส่วนสีน้ำตาลขึ้นบ่งถึงการหมดสภาพการบริโภคเป็นชุดควบคุมในวันที่ 6 ที่ระดับความเข้มข้นไข 4, 6, 8 และ 10% ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมะนาวและกล้วยน้ำว้าไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) จึงสามารถสรุปได้ว่าการเคลือบผิวด้วยอิมัลชันไขคาร์นูบาสามารถลดการสูญเสียน้ำหนักของมะนาวและกล้วยน้ำว้า ชะลอการเปลี่ยนแปลงของของสี ความแน่นเนื้อของกล้วยน้ำว้าและปริมาณน้ำคั้นของมะนาวได้

คำสำคัญ: มะนาว, กล้วยน้ำว้า, ไขคาร์นูบา, อิมัลชัน

สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอทุ่งใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช 80240

Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Thungyai, Thungyai, Nakhon Sri Thammarat 80240, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): rungtip.j@rmutsv.ac.th Tel: 08 1270 4145

ABSTRACT

Limes and bananas were coated with wax emulsion, namely carnauba wax (CW). Emulsion was produced and diluted to four levels of concentration. After waxing, samples were both physically and chemically examined. The quantity of wax emulsion used for waxing was varied depending on the fruits. Limes and bananas were used for coated emulsion of 0.07-0.60 % by weight. All the emulsions used were effective in retaining chlorophyll color and reducing weight loss. The consumer accepted for the peel color of lime was greenish yellow, while the brown color was exhaustion of consumption for control after 13 days. The consumer accepted for the peel color of banana was yellow to green, while the brown color was exhaustion of consumption for control after 6 days. Dipping limes and bananas with 4, 6, 8 and 10% concentration had weight loss non-significantly ($p>0.05$). The research concluded that waxing reduced weight loss, the changes in color, firmness of banana and juice content of lime.

Key words: lime, banana, carnauba wax, emulsion

บทนำ

ประเทศไทยมีผักและผลไม้สดมากมายหลายชนิดในปริมาณมากพอที่จะส่งขายอาเซียนได้ทั้งประเทศมีเนื้อที่ปลูกมะนาว 108,213 ไร่ ภาคใต้มีพื้นที่ปลูกมะนาวได้ 3,429 ตัน หรือ 549 กิโลกรัมต่อไร่ (Office of Agricultural Economics, 2020) แต่มีการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว ดังนั้นการปฏิบัติการหลังเก็บเกี่ยวที่ถูกต้องเป็นสิ่งจำเป็นที่ช่วยลดการสูญเสีย จะลดการเปลี่ยนแปลงและรักษาคุณภาพของผักและผลไม้สดให้มีสีสวยเป็นที่ดึงดูดใจของผู้บริโภคเมื่อถึงจุดหมายปลายทาง การให้ความเย็นในระหว่างการขนส่งเพียงอย่างเดียวอาจมีข้อเสียคือทำให้เกิดอาการสะท้อนหนาวการสุกผิดปกติและคุณภาพลดลง ส่งผลให้การเคลือบไขเป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่ใช้ร่วมกับการลดอุณหภูมิเนื่องจากช่วยป้องกันการคายน้ำและทำให้ลักษณะปรากฏดึงดูดใจผู้บริโภค

มะนาวและเลมอนเคลือบด้วยอิมัลชันโพลีแซคคาไรด์ผสมน้ำมันถั่วเหลืองจะยืดอายุการ

เก็บรักษา (John *et al.*, 1994) มะนาวเคลือบด้วยอิมัลชันผสมน้ำมันมะพร้าวเก็บที่อุณหภูมิ 25 - 30 องศาเซลเซียส นาน 18 วันลดการสูญเสียน้ำหนักปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด กรดแอสคอบิกและน้ำคั้น (Abhay *et al.*, 2011) ผลของการเคลือบกล้วยไข่ด้วย stafresh 20 เปอร์เซนต์ ลดการตกกระ (Ketsa and Promyou, 2003) โคโคซาน 1.5 เปอร์เซนต์เคลือบผิวมังคุดเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียสจะชะลอการสูญเสียน้ำหนัก ความแน่นเนื้อสีเปลือก อัตราการหายใจรวมทั้งการเน่าเสียได้ดีกว่าไม่เคลือบผิว (Nantapat *et al.*, 2000) โคโคซาน 1 เปอร์เซนต์ผสมน้ำมันสกัดจาก เลมอน 3 เปอร์เซนต์เคลือบผิวสตรอเบอรี่จะยืดอายุการเก็บรักษาได้จากการทำลายเชื้อราและลดอัตราการหายใจ (Perdones *et al.*, 2012) การเคลือบผิวมะเขือม่วงด้วยอิมัลชันไฮคาร์บูนาเข้มข้น 8.97 เปอร์เซนต์จะลดการสูญเสียน้ำหนักได้ที่อุณหภูมิห้อง (Singh *et al.*, 2016) สารเคลือบผิวผสมระหว่างเพคติน 1 เปอร์เซนต์, ยูจินอล 0.1 เปอร์เซนต์และซิทรัล 0.15 เปอร์เซนต์จะยืดอายุ

การเก็บรักษาแอสเบอรรีได้นาน 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ไม่เคลือบผิวที่เก็บได้เพียง 7 วัน ที่ 0.5 องศาเซลเซียส (Guerreiro *et al.*, 2016) โคโคซาน 1 เปอร์เซนต์เคลือบผิวพริกหวานจะยืดอายุการเก็บรักษาได้ดีกว่าไม่เคลือบผิว (Ali *et al.*, 2015) สารเคลือบผิวผสมระหว่างไฮคาร์บูนา แคลแลคและน้ำมันตะไคร้เคลือบผิวแอปเปิ้ลจะลดการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนทั้งหมด ราและยีสต์เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ไม่เคลือบผิว (Jo *et al.*, 2014) วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงลักษณะคุณภาพของมะนาวและกล้วยน้ำว้าเคลือบอิมัลชันไฮคาร์บูนาที่มีส่วนผสมของไฮพาราฟินที่ผลิตขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา

วิธีดำเนินการวิจัย

1. เตรียมอิมัลชันไฮคาร์บูนา ชั่งน้ำหนักไฮคาร์บูนาซื้อจากบริษัทสงฮวด (ประเทศไทย) จำกัด จำนวน 121 กรัม ใส่บีกเกอร์หลอมในน้ำต้มเดือดบนเตาไฟฟ้า เติมกรดโอเลอิก 37 กรัม ที่อุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งปั่น 600 รอบต่อนาที จนเป็นสีน้ำตาลใส จึงเติมไตรเอททาโนลามีน 22 กรัม พร้อมกับน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียส 56 กรัม แล้วเพิ่มความเร็วเป็น 1400 รอบต่อนาที จนเป็นเจลขุ่นสีน้ำตาล เติมไฮพาราฟินซื้อจากบริษัท สงฮวด จำกัด จำนวน 48 กรัม ที่หลอมแล้วที่อุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียส เติมน้ำร้อนที่อุณหภูมิดังกล่าว ปรับให้ได้ความเข้มข้นไฮ 20 เปอร์เซนต์ แล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง (Warth, 1956) เพื่อใช้เป็นอิมัลชันไฮคาร์บูนาเริ่มต้นในงานวิจัยเพื่อนำมาเจือจางในการทดลอง

2. วิธีการเคลือบไขมะนาวและกล้วยน้ำว้าด้วยอิมัลชันไฮที่ผลิตขึ้น นำมะนาวพันธุ์แป้นสีเขียวขนาดใกล้เคียงกันมีเส้นรอบผลเฉลี่ย 13.5 เซนติเมตร และกล้วยน้ำว้าแก่จัดสีเขียวขนาดใกล้เคียงกัน

มีความยาวของผลเฉลี่ย 14 เซนติเมตร มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดเพื่อเอาขี้ฝุ่นออกแล้วล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์ 60 พีพีเอ็ม อัตราส่วนหนึ่งต่อสองโดยน้ำสองส่วนต่อผลไม้หนึ่งส่วนหนึ่งครั้ง จากนั้นผึ่งให้แห้งแล้วนำไปเคลือบผิวด้วยการจุ่มที่ความเข้มข้นไฮต่างกันคือ 4, 6, 8 และ 10 เปอร์เซนต์ ใช้เวลาจุ่ม 15 วินาที ทำให้แห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสนาน 10 นาที ก่อนนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 29 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 80-85 เปอร์เซนต์

วิธีหาปริมาณอิมัลชันไฮที่เคลือบดังนี้คือ อิมัลชันไฮที่เจือจางและทราบน้ำหนักหน่วยเป็นกรัม แล้วนำมะนาวและกล้วยน้ำว้าที่ทราบน้ำหนักมาจุ่ม แล้วนำมาวางบนตะแกรงจับเวลาที่ผึ่งให้แห้งภายใต้พัดลม

ชั่งน้ำหนักอิมัลชันไฮหลังเคลือบ คำนวณปริมาณอิมัลชันไฮที่ใช้เป็นเปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของมะนาวและกล้วยน้ำว้า การศึกษาการตรวจสอบคุณภาพทางเคมีและกายภาพ ดังนี้ คือการสูญเสีย น้ำหนัก โดยเตรียมมะนาวสองซ้า ๆ ละ 4 ลูก ส่วนกล้วยน้ำว้าสองซ้า ๆ ละ 1 ลูก ชั่งน้ำหนักมะนาวทุก 4, 6, 8, 11 และ 13 วัน ส่วนกล้วยน้ำว้าซ้าทุก 2, 5 และ 6 วัน วัดค่าสีเปลือกมะนาวและกล้วยด้วยเครื่องวัดสี (Hunter รุ่น Mini scan EZ model 4500L USA) ปริมาณน้ำคั้นมะนาวทำสองซ้า ๆ ละ 2 ผลโดยคั้นน้ำด้วยมือกับที่คั้นน้ำพลาสติก ความแน่นเนื้อกล้วยน้ำว้าทำสองซ้า ๆ ละ 2 ผล ด้วยเครื่อง Effegi รุ่น FT327 ประเทศอิตาลี เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร

วางแผนการทดลองแบบ CRD (complete randomized design) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติโดยทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT (Duncan Multiple Range Test)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ปริมาณอิมัลชันไข่ที่ใช้เคลือบผิวต่างกันเมื่อจุ่มที่ระดับความเข้มข้นไข่แตกต่างกัน มีผลให้ร้อยละของปริมาณอิมัลชันไข่ที่เคลือบผิวตัวอย่างผลไม้เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 1)

การเก็บรักษามะนาวไม่เคลือบผิวและเคลือบที่อุณหภูมิ 29 ± 1 องศาเซลเซียส นาน 13 วัน พบว่า สูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตลอดอายุการเก็บรักษามะนาวไม่เคลือบไข่ สูญเสียน้ำหนัก 26.37 เปอร์เซ็นต์ มะนาวเคลือบไข่ 4, 6, 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ สูญเสียน้ำหนัก 15.49, 15.35, 11.27 และ 10.13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้น ความหนาของไข่น้อย ป้องกันการคายน้ำได้น้อย ความเข้มข้นไข่มากทำให้สูญเสียน้ำหนักมีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับการทดลองเคลือบมะเขือม่วงด้วยไข่คาร์บูนาช่วยลดการสูญเสียน้ำหนัก

(Singh *et al.*, 2016) เมื่อทดสอบสถิติพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างมะนาวไม่เคลือบผิวกับเคลือบผิว ($p < 0.05$) แต่ไม่มีความแตกต่างนัยสำคัญทางสถิติระหว่างความเข้มข้นไข่ ($p > 0.05$) ดังนั้น การเคลือบผิวมีผลต่อการลดการสูญเสียน้ำหนัก มะนาวเคลือบผิวที่ความเข้มข้นไข่ 10 เปอร์เซ็นต์ สูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดคือ 10.13 เปอร์เซ็นต์ ในวันที่ 13 ดังตารางที่ 2 ผลของระยะเวลาเก็บรักษาเมื่อทดสอบทางสถิติพบว่า ที่ความเข้มข้นไข่ 6 เปอร์เซ็นต์ การสูญเสียน้ำหนักไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตั้งแต่วันที่ 4 ถึง 13 วัน ส่วนที่ความเข้มข้นไข่ 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ การสูญเสียน้ำหนักไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ตั้งแต่วันที่ 6 ถึง 13 วัน

ตารางที่ 1 ปริมาณอิมัลชันไข่ที่ใช้เคลือบผิวผลไม้ด้วยการจุ่ม

ความเข้มข้นอิมัลชันไข่	4 %	6 %	8 %	10%
มะนาว	0.07%	0.09%	0.19%	0.36%
กล้วยน้ำว้า	0.23%	0.28%	0.42%	0.60%

ตารางที่ 2 การสูญเสียน้ำหนักของมะนาวเคลือบด้วยอิมัลชันไข่คาร์บูนาความเข้มข้นต่างกันเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 29 ± 1 องศาเซลเซียส

การเคลือบผิว	การสูญเสียน้ำหนักของมะนาว (เปอร์เซ็นต์)				
	4 วัน	6 วัน	8 วัน	11 วัน	13 วัน
ควบคุม	11.95 ± 3.37^{bA}	16.46 ± 3.19^{bAB}	19.84 ± 3.59^{bAB}	22.51 ± 2.07^{bAB}	26.37 ± 2.91^{bB}
ไข่ 4 %	6.05 ± 1.00^{aA}	8.53 ± 1.37^{aAB}	10.93 ± 1.67^{aABC}	13.73 ± 2.17^{aBC}	15.48 ± 2.52^{aC}
ไข่ 6 %	4.20 ± 1.05^{aA}	6.74 ± 0.28^{aA}	9.41 ± 1.79^{aA}	13.09 ± 4.44^{aA}	15.34 ± 5.87^{aA}
ไข่ 8 %	5.31 ± 0.75^{aA}	6.88 ± 0.20^{aAB}	6.17 ± 3.25^{aAB}	9.66 ± 0.24^{aAB}	11.26 ± 0.78^{aB}
ไข่ 10 %	5.13 ± 0.33^{aA}	6.63 ± 0.77^{aAB}	7.87 ± 1.18^{aAB}	9.27 ± 1.61^{aAB}	10.13 ± 1.95^{aB}

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

: ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแนวนอนแสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

ปริมาณน้ำคั้นของมะนาวไม่เคลือบผิวและเคลือบผิวความเข้มข้น 6 เปอร์เซ็นต์แตกต่างกันเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 29 ± 1 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณน้ำคั้นของมะนาวเพิ่มขึ้นแล้วลดลง มะนาวไม่เคลือบผิวปริมาณน้ำคั้นเพิ่มจาก 22.00 มิลลิลิตร เป็น 26.50 มิลลิลิตร ในวันที่ 7 และลดลงเป็น 24 มิลลิลิตร ในวันที่ 14 พบว่า เปลือกมะนาวไม่เคลือบผิวในระยะเริ่มต้นจะนุ่มจากการทำงานของเอนไซม์ที่ย่อยผนังเซลล์จึงคั้นน้ำได้มากและเมื่อสูญเสียน้ำเปลือกจะแข็งมากทำให้คั้นน้ำได้น้อยลง ขณะที่มะนาวเคลือบผิวความเข้มข้น 6 เปอร์เซ็นต์ การทำงานของเอนไซม์ย่อยผนังเซลล์น้อย (Kader, 1986) ทำให้เปลือกไม่นิ่มคั้นน้ำได้น้อยกว่าผลเคลือบผิวความเข้มข้น 6, 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ในวันที่ 14 สอดคล้องกับการทดลองของ Cohen *et al.* (1990) พบว่า การเคลือบไขมันและห่อด้วยฟิล์ม HDPE อีกชั้นหนึ่งจะมี

ปริมาณน้ำคั้นเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 37 เปอร์เซ็นต์ และคงที่ในเวลาต่อมา ขณะที่ผลเลมอนที่ไม่ได้ห่อฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่าผลที่ห่อฟิล์มคือเพิ่มจาก 30 เป็น 47.5 แล้วลดลงเป็น 34 เปอร์เซ็นต์ ใกล้เคียงกับห่อฟิล์มในเวลาต่อมา เมื่อทดสอบทางสถิติพบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างมะนาวไม่เคลือบผิวและเคลือบผิวที่ความเข้มข้น 6 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$) แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติระหว่างมะนาวไม่เคลือบผิวและเคลือบผิว 4, 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ในวันที่ 14 ($p > 0.05$) ดังนั้น ปริมาณน้ำคั้นของมะนาวเคลือบผิวที่ความเข้มข้น 6 เปอร์เซ็นต์มากที่สุด ดังตารางที่ 3 ผลของอายุการเก็บรักษาเมื่อทดสอบทางสถิติแนวนอนพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของน้ำคั้นมะนาวไม่เคลือบผิว มะนาวเคลือบผิวที่ความเข้มข้น 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์ตั้งแต่ 4 วันถึง 14 วัน

ตารางที่ 3 ปริมาณน้ำคั้นของมะนาวเคลือบด้วยอิมัลชันไขมันคาร์บูบความเข้มข้นต่างกันและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 29 ± 1 องศาเซลเซียส

การเคลือบผิว	ปริมาณน้ำคั้นของมะนาว (มิลลิลิตร)				
	0 วัน	4 วัน	7 วัน	11 วัน	14 วัน
ควบคุม	22.00 $\pm$ 0.00 ^{aA}	25.00 $\pm$ 2.82 ^{aA}	26.50 $\pm$ 2.12 ^{aA}	23.50 $\pm$ 2.21 ^{bA}	24.00 $\pm$ 1.41 ^{bcA}
ไขมัน 4 %	22.00 $\pm$ 0.00 ^{aA}	26.00 $\pm$ 1.41 ^{aAB}	29.50 $\pm$ 3.53 ^{aB}	28.50 $\pm$ 0.70 ^{aAB}	27.00 $\pm$ 1.41 ^{cAB}
ไขมัน 6 %	22.00 $\pm$ 0.00 ^{aA}	27.00 $\pm$ 2.82 ^{aA}	29.50 $\pm$ 4.94 ^{aA}	29.00 $\pm$ 1.41 ^{aA}	20.50 $\pm$ 0.70 ^{aA}
ไขมัน 8 %	22.00 $\pm$ 0.00 ^{aA}	28.50 $\pm$ 3.53 ^{aB}	30.00 $\pm$ 0.00 ^{aB}	26.00 $\pm$ 0.70 ^{abAB}	26.00 $\pm$ 0.00 ^{cAB}
ไขมัน 10 %	22.00 $\pm$ 0.00 ^{aA}	36.50 $\pm$ 0.70 ^{bc}	31.00 $\pm$ 1.41 ^{aB}	28.00 $\pm$ 0.00 ^{aB}	22.00 $\pm$ 1.41 ^{abA}

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

: ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

การใช้สารเคลือบผิวความเข้มข้น 6, 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ จะลดค่าสีได้ดีกว่าที่ความเข้มข้นต่ำหรือไม่เคลือบผิว เนื่องจากการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนน้อยลงทำให้เกิดออกซิเดชันของคลอโรฟิลล์น้อยลง (Wills *et al.*, 1981) และทำให้

เอทิลีนที่ช่วยเสริมให้มีการย่อยสลายของคลอโรฟิลล์ระหว่างการสุกน้อยลง (Watada, 1986) การเคลือบไขมันที่ความเข้มข้นสูงขึ้นจะมีคลอโรฟิลล์มากกว่าความเข้มข้นต่ำ (Motlagh and Quantick, 1988) ส่วนค่าสีของมะนาวที่เคลือบผิวความเข้มข้น

ไข 10 เปอร์เซ็นต์ นาน 13 วัน รักษาได้ดีที่สุดคือ L* 45.40 a* 7.46 และ b* 34.80 เทียบกับไม่เคลือบผิวมีค่าสี L* 37.085 a* -7.925 และ b* 25.14 คะแนนสี

เปลือกผลมะนาวที่ผู้บริโภคยังให้การยอมรับคือ 2 ถึง 5 คะแนน ส่วนสีน้ำตาลคือ 1 คะแนนหมดสภาพการบริโภคเป็นชุดควบคุมในวันที่ 13 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สีผิวเปลือกมะนาวไม่เคลือบและเคลือบด้วยไขคาร์นูบาความเข้มข้นต่างกันและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส นาน 0 วัน และ 13 วัน

การเคลือบผิว	ค่าสีของผิวเปลือกผลมะนาว			คะแนนสีผิวเปลือกผล
	L*	a*	b*	
วันที่ 0	37.085	-7.925	25.14	5
ควบคุม วันที่ 13	54.75 ± 0.08 ^b	-2.67 ± 0.53 ^c	36.91 ± 0.96 ^c	1
ไข 4% วันที่ 13	53.79 ± 0.49 ^a	-5.72 ± 0.37 ^b	32.71 ± 1.27 ^b	2
ไข 6% วันที่ 13	45.57 ± 1.22 ^a	-7.21 ± 1.08 ^{ab}	25.71 ± 2.79 ^a	3
ไข 8% วันที่ 13	45.57 ± 0.48 ^a	-7.13 ± 0.29 ^{ab}	33.15 ± 0.63 ^b	4
ไข 10% วันที่ 13	45.40 ± 0.39 ^a	-7.46 ± 0.16 ^a	34.80 ± 0.32 ^b	4

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

: คะแนนการเปลี่ยนแปลงสีผิวเปลือกผล (ประเมิน 5 ระดับคือ 5 = สีเขียว 4 = สีเขียวออกเหลือง 3 = สีเหลืองออกเขียว 2 = สีเหลือง 1 = สีน้ำตาล (เน่า)

การเคลือบและไม่เคลือบผิวกล้วยน้ำว้าด้วยอิมัลชันไขคาร์นูบาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส พบว่าสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตลอดอายุการเก็บรักษา กล้วยน้ำว้าไม่เคลือบผิวสูญเสียน้ำหนัก 16.46 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเก็บรักษานาน 6 วัน การเคลือบผิวที่ความเข้มข้นไข 4, 6, 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ สูญเสียน้ำหนัก 16.10, 15.50, 15.10 และ 13.23 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ พบว่าความหนาของไขเพิ่มขึ้น

ป้องกันการคายน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อทดสอบสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกล้วยน้ำว้าไม่เคลือบผิวกับเคลือบผิวในวันที่ 6 ($p > 0.05$) กล้วยน้ำว้าเคลือบที่ความเข้มข้นไข 10 เปอร์เซ็นต์เมื่อเก็บรักษานาน 6 วันสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดคือ 13.23 เปอร์เซ็นต์เทียบกับไม่เคลือบผิวมีการสูญเสียน้ำหนักคือ 16.46 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การสูญเสียน้ำหนักของกล้วยน้ำว้าเคลือบอิมัลชันไขมันคาร์บูนาความเข้มข้นต่างกันเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

ความเข้มข้นไขมัน (เปอร์เซ็นต์)	การสูญเสียน้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์)		
	2 วัน	5 วัน	6 วัน
ควบคุม	3.40 ± 0.46 ^{aA}	11.02 ± 0.91 ^{aB}	16.46 ± 0.11 ^{aC}
4 %	3.60 ± 0.02 ^{abA}	11.70 ± 0.22 ^{aB}	16.10 ± 0.00 ^{aC}
6 %	4.27 ± 0.04 ^{bcA}	12.05 ± 0.24 ^{aB}	15.50 ± 0.48 ^{aC}
8 %	4.48 ± 0.02 ^{ca}	12.12 ± 0.70 ^{aB}	15.10 ± 0.91 ^{aB}
10 %	4.06 ± 0.46 ^{abcA}	10.82 ± 0.99 ^{aB}	13.23 ± 0.95 ^{aB}

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

: ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

ความแน่นเนื้อของกล้วยน้ำว้าที่มีเปลือกทั้งไม่เคลือบและเคลือบผิวมีการลดลงตลอดอายุการเก็บรักษา โดยกล้วยน้ำว้าที่เคลือบผิวมีความแน่นเนื้อมากกว่ากล้วยน้ำว้าที่ไม่เคลือบ เช่นเดียวกับความแน่นเนื้อของเนื้อกล้วยน้ำว้าทั้งไม่เคลือบและเคลือบผิวมีการลดลงตลอดอายุการเก็บรักษาสอดคล้องกับการทดลองของการเคลือบมะเขือม่วงด้วยไขมันคาร์บูนาและการเคลือบมะเขือเทศด้วยไขมันคาร์บูนาและน้ำมันแร่จะชะลอการลดลงของความแน่นเนื้อ (Singh *et al.*, 2016; Dávila-Aviña de Jesus *et al.*, 2011) เมื่อทดสอบสถิติพบว่ากล้วยน้ำว้าที่มีเปลือกไม่มีความ

แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกล้วยไม่เคลือบกับเคลือบผิวที่ความเข้มข้นไขมัน 4, 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์ในวันที่ 6 เมื่อทดสอบทางสถิติพบว่าเนื้อกล้วยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างไม่เคลือบกับเคลือบผิวที่ความเข้มข้นไขมัน 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์ในวันที่ 6 ($p > 0.05$) โดยกล้วยน้ำว้าเคลือบผิวมีเปลือกมีความแน่นเนื้อ 4.60 กิโลกรัม มากกว่าไม่เคลือบผิวมีค่า 1.25 กิโลกรัม เช่นเดียวกับความแน่นเนื้อของเนื้อกล้วยน้ำว้าเคลือบผิวมีค่า 2.55 กิโลกรัม เทียบกับไม่เคลือบผิวมีค่า 1.00 กิโลกรัม ในวันที่ 6 ดังตารางที่ 6 และ 7

ตารางที่ 6 ความแน่นเนื้อของกล้วยน้ำว้าที่มีเปลือกเคลือบผิวด้วยอิมัลชันไขมันคาร์บูนาความเข้มข้นไขมันต่างกันเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

การเคลือบผิว	ความแน่นเนื้อของกล้วยน้ำว้าที่มีเปลือก (กิโลกรัม)		
	2 วัน	5 วัน	6 วัน
ควบคุม	8.47 ± 0.77 ^{aB}	3.90 ± 0.56 ^{abA}	1.25 ± 0.49 ^{abA}
ไขมัน 4 %	8.60 ± 0.56 ^{aB}	1.75 ± 0.49 ^{aA}	0.80 ± 0.28 ^{aA}
ไขมัน 6 %	9.10 ± 0.00 ^{aB}	2.50 ± 0.28 ^{aA}	1.70 ± 0.14 ^{bA}
ไขมัน 8 %	8.75 ± 0.07 ^{aB}	1.30 ± 0.14 ^{aA}	1.55 ± 0.07 ^{bA}
ไขมัน 10 %	12.45 ± 0.07 ^{bB}	6.25 ± 2.47 ^{bAB}	4.60 ± 0.14 ^{cA}

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

: ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

ตารางที่ 7 ความแน่นเนื้อของเนื้อกล้วยน้ำว้าเคลือบอิมัลชันไขคาร์บูบความเข้มข้นไขต่างกันเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

การเคลือบผิว	ความแน่นเนื้อของเนื้อกล้วยน้ำว้า (กิโลกรัม)		
	2 วัน	5 วัน	6 วัน
ควบคุม	5.00 ± 0.00 ^{ab}	1.30 ± 0.28 ^{aA}	1.00 ± 0.00 ^{bA}
ไข 4 %	8.50 ± 0.56 ^{bb}	1.65 ± 0.49 ^{aA}	0.20 ± 0.00 ^{aA}
ไข 6 %	9.00 ± 0.00 ^{bb}	1.80 ± 0.56 ^{aA}	0.60 ± 0.00 ^{abA}
ไข 8 %	8.70 ± 0.00 ^{bc}	1.55 ± 0.07 ^{ab}	1.00 ± 0.00 ^{bA}
ไข 10 %	12.25 ± 0.07 ^{cb}	2.00 ± 0.00 ^{aA}	2.55 ± 0.49 ^{cA}

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

: ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

สีผิวของเปลือกกล้วยน้ำว้าที่ไม่เคลือบและเคลือบผิวมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า L* ลดลง ส่วนค่า a* (เขียวถึงสีแดง) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดอายุการเก็บรักษา ส่วนค่าสีผิวเปลือกกล้วยน้ำว้าที่ความเข้มข้นไข 10 เปอร์เซ็นต์สีที่สุกเมื่อเก็บไว้ 6 วันคือมีค่า L* 41.99 a* -3.23 และ b* 24.00 เทียบกับ

ไม่เคลือบผิวมีค่า L* 55.03 a* -8.445 b* 33.365 คะแนนสีเปลือกกล้วยที่ผู้บริโภคยังให้การยอมรับคือ 2 ถึง 5 คะแนน ส่วนสีน้ำตาลคือ 1 คะแนน หากสภาพการบริโภคเป็นชุดควบคุมในวันที่ 6 ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สีผิวเปลือกกล้วยน้ำว้าที่เคลือบด้วยอิมัลชันไขคาร์บูบความเข้มข้นต่างกันเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 29±1 องศาเซลเซียส

	สีของเปลือกกล้วยน้ำว้า			คะแนนสีผิวเปลือกผล
	L*	a*	b*	
วันที่ 0	55.025	-8.445	33.365	5
ควบคุม วันที่ 6	32.58 ± 1.99 ^a	4.66 ± 0.00 ^b	9.93 ± 0.00 ^a	1
ไข 4 % วันที่ 6	41.46 ± 0.04 ^b	7.15 ± 0.07 ^c	21.19 ± 1.32 ^b	2
ไข 6 % วันที่ 6	35.17 ± 0.31 ^a	4.54 ± 0.91 ^b	10.67 ± 1.08 ^a	2
ไข 8 % วันที่ 6	41.96 ± 3.34 ^b	7.94 ± 1.18 ^c	21.87 ± 4.89 ^b	2
ไข 10 % วันที่ 6	41.99 ± 0.04 ^b	-3.23 ± 0.02 ^a	24.00 ± 0.98 ^b	3

หมายเหตุ : ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงว่ามีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05

: คะแนนการเปลี่ยนแปลงสีผิวเปลือกผล (ประเมิน 5 ระดับคือ 5 = สีเขียว 4 = สีเขียวออกเหลือง 3 = สีเหลืองออกเขียว 2 = สีเหลือง 1 = สีน้ำตาล (เน่า)

สรุป

การเคลือบผิวด้วยอิมัลชันไขคาร์บูนาจะยืดอายุการเก็บรักษามะนาวและกล้วยน้ำว้าได้โดยชะลอการเปลี่ยนสี การสูญเสียน้ำหนัก ความแน่นเนื้อของกล้วยน้ำว้าและปริมาณน้ำคั้นของมะนาว ซึ่งมะนาวจะเก็บรักษาได้นานขึ้นเป็น 13 วัน ขณะที่กล้วยน้ำว้าจะเก็บรักษาได้นานขึ้นเป็น 6 วันที่อุณหภูมิ 29 ± 1 องศาเซลเซียส มะนาวเคลือบผิวที่ความเข้มข้นไข 10 เปอร์เซ็นต์สูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดคือ 10.13 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณน้ำคั้นของมะนาวเคลือบผิวที่ความเข้มข้นไข 6 เปอร์เซ็นต์ มากที่สุด ค่าสีของมะนาวที่เคลือบผิวความเข้มข้นไข 10 เปอร์เซ็นต์นาน 13 วันรักษาสีได้ดีที่สุด กล้วยน้ำว้าเคลือบที่ความเข้มข้นไข 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเก็บรักษานาน 6 วันสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดคือ 13.23 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับไม่เคลือบผิวมีการสูญเสียน้ำหนักคือ 16.46 เปอร์เซ็นต์ กล้วยน้ำว้าเคลือบผิวมีเปลือกมีความแน่นเนื้อ 4.60 กิโลกรัม มากกว่าไม่เคลือบผิวมีค่า 1.25 กิโลกรัม เช่นเดียวกับความแน่นเนื้อของเนื้อกล้วยน้ำว้าเคลือบผิวมีค่า 2.55 กิโลกรัม เทียบกับไม่เคลือบผิวมีค่า 1.00 กิโลกรัม ในวันที่ 6 สีผิวของเปลือกกล้วยน้ำว้าที่ไม่เคลือบและเคลือบผิวมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า L^* ลดลง ส่วนค่า a^* (เขียวถึงสีแดง) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดอายุการเก็บรักษา

เอกสารอ้างอิง

- Abhay, B., Sailendra, K.P. and Neha, P. 2011. Effect of skin coating on prolonging shelf life of kagzi lime fruits (*Citrus aurantifolia*, Swingle). **Journal of Food Science and Technology** 48(1): 1-7.
- Ali, A., Nurasyikin, M.N. and Maysoun, A.M. 2015. Antimicrobial activity of chitosan enriched with lemongrass oil against anthracnose of bell pepper. **Food Packaging and Shelf life** 3: 56-61.
- Cohen, E., Lurie, S., Shapiro, B., Ben-yehoshua, S., Shalom, Y. and Rosenberger, I. 1990. Prolonged storage of lemons using individual seal-packaging. **Journal of the American Society for Horticultural Science** 115(1): 251-255.
- Dávila-Aviña de Jesus, J.E., Villa-Rodríguez, J., Cruz-Valenzuela, R., J.E., Cruz-Valenzuela, J., Rodríguez-Armenta, M., Espino-Díaz, M., Ayala-Zavala, J.F., Olivas-Orozco, G.I., Heredia, B. and González-Aguilar, G. 2011. Effect of Edible Coatings, Storage Time and Maturity Stage on Overall Quality of Tomato Fruits. **American Journal of Agricultural and Biological Sciences** 6(1): 162-171.
- Guerreiro, A.C., Gago, C.M.L., Miguel, M.G.C., Faleiro, M.L. and Antunes, M.D.C. 2016. The influence of edible coatings enriched with citral and eugenol on the raspberry storage ability, nutritional and sensory quality. **Food Packaging and Shelf life** 9: 20-28.
- Jo, W.S., Song, H.Y., Song, N.B., Lee, J.H., Min, S.C. and Song, K.B. 2014. Quality and microbial safety of Fuji apples coated with carnauba-shellac wax containing lemongrass oil. **LWT-Food Science and Technology** 55: 490-497.
- John, M.K., Baldwin, E.A. and Carriedo, M.N. 1994. **Edible Coatings and Films to**

- Improve Food Quality.** Technomic Publishing Company, Lancaster, Pa.
- Kader, A.A. 1986. Biochemical and physiological basis for effects of controlled and modified atmospheres on fruits and vegetables. **Food Technology** 40(1): 99-104.
- Ketsa, S. and Promyou, S. 2003. Effect of coating on senescent spotting and quality of ripening Kluai Khai (Musa AA group), pp.105-119. **In Proceedings of the third national horticultural congress: 22-25 April 2003.** Agriculture Faculty, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Motlagh, F.H. and Quantick, P.C. 1988. Effect of permeable coatings on the storage life of fruits. I. Pro-long treatment of limes (*Citrus aurantifolia* cv,Persian). **International Journal of Food Science and Technology** 23(1): 99-105.
- Nantapat, C., Duangporn S. and Wittayapanyanon, A. 2000. Mangosteen Coating with Chitosan. Special problem of Chemical engineering, Engineering faculty, King Mongkut's University of Technology Thonburi. (in Thai)
- Office of Agricultural Economics. 2020. **Lime.** Available Source: <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/lime60.pdf>, June 10, 2021. (in Thai)
- Perdones, A., Sanchez-Gonzalez, S. Chiralt, A., Vargas, M. Singh, S., Khemariya, P., Rai, A., Rai, A.C., Koley, T.K. and Singh, B. 2012. Effect of Chitosan-lemon essential oil coatings on storage-keeping quality of strawberry. **Postharvest Biology and Technology** 70: 31-41.
- Singh, S., Khemariya, P., Rai, A., Rai, A.C., Koley, T.K. and Singh, B. 2016. Carnauba wax-based edible coating enhances shelf-life and retain quality of eggplant (*Solanum melongena*) fruits. **LWT-Food Science and Technology** 74: 420-426.
- Warth, A.H. 1956. **The chemistry and technology wax.** 2nd ed. Reinhold Publishing Corp, New York.
- Watada, A.E. 1986. Effect of ethylene on the quality of fruits and vegetables. **Food Technology** 40(1): 82-85.
- Wills, R.B.H., Lee, T.H., Graham, D., McGlassom, W.B. and Hall, E.G. 1981. **Postharvest: An introduction to the Physiology and Handling of Fruit and Vegetables.** New South Wales University Press, New South Wales.

**แชทบอทบนแนวคิดจัดการแบบลีน:
กรณีศึกษางานสอบสวนของสถานีตำรวจภูธรเบตง
Chatbot Adoption based on Lean Management:
A Case Study of Interrogation Tasks in Betong Police Station**

เกียรติพันธ์ศักดิ์ บิลอับดุลลาห์^{1*} และ นันทิพย์ ตระกูลเมฆี²

Keitpansak Bilabdulla^{1*} and Numtip Trakulmaykee²

Received: 28 December 2021, Revised: 4 March 2022, Accepted: 3 October 2022

บทคัดย่อ

สภาพปัญหาของสถานีตำรวจภูธรเบตงในปัจจุบันพบว่าประชาชนที่มาติดต่อร้องเรียนและสอบถามปัญหาข้อกฎหมายผ่านเพจเฟซบุ๊กของสถานีตำรวจมีความล่าช้าในการตอบคำถามเนื่องจากอัตรากำลังคนที่ไม่เพียงพอของเจ้าหน้าที่พนักงานทำให้ไม่สามารถให้คำปรึกษาได้ตลอด 24 ชั่วโมงในทุกวัน อีกทั้งเจ้าหน้าที่พนักงานทุกคนไม่มีความรู้ข้อกฎหมายในทุกเรื่องทำให้เสียเวลาในการสอบถามผู้รู้และค้นหาข้อมูลส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการให้บริการแต่ละกรณีค่อนข้างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แชทบอทเพื่อสนับสนุนงานสอบสวนกรณีศึกษาสถานีตำรวจภูธรเบตงนี้ โดยมีวัตถุประสงค์การวิจัย 2 ข้อ ได้แก่ (1) ออกแบบและพัฒนาระบบแชทบอทช่วยสนับสนุนการให้บริการข้อกฎหมายแก่ประชาชน และ (2) เพื่อประเมินประสิทธิภาพกระบวนการโดยใช้แนวทางจัดการแบบลีนและประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานแชทบอทที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น ซึ่งเป็นระบบแชทบอทแพลตฟอร์ม Facebook Messenger ที่มีการจัดการแบบลีนมาช่วยในการออกแบบและพัฒนาระบบการให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยกระบวนการใหม่สามารถลดระยะเวลาของขั้นตอนที่สูญเสียไปได้ถึง 1,507.98 นาที คิดเป็นร้อยละ 99.80 มีประสิทธิภาพคิดเป็นร้อยละ 100 เพิ่มขึ้นร้อยละ 99.21 และจากการศึกษากลุ่มผู้ใช้งานภาพรวมมีความพึงพอใจในระดับมากโดยคะแนนเฉลี่ยอยู่ที่ 4.09 และได้รับความพึงพอใจในเรื่องระบบสามารถโต้ตอบได้รวดเร็วมีคะแนนค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 4.19 ซึ่งจากผลการวิจัยชี้ให้เห็นถึงการยอมรับในการประยุกต์ใช้แชทบอทสนับสนุนงานสอบสวนของสถานีตำรวจภูธรเบตงได้เป็นอย่างดี เนื่องจากสามารถลดระยะเวลาการบริการข้อมูลแก่ประชาชนได้อย่างชัดเจน

คำสำคัญ: แชทบอท, โคะล๊อกโฟลว์, สถานีตำรวจ, ลีน, สารสนเทศ

¹ สาขาการจัดการเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตำบลคลองสี่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

¹ Management of Information Technology, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Kho Hong, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand.

² สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตำบลคลองสี่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

² Information and Communication Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Kho Hong, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): keitpansak_amud14@hotmail.com

ABSTRACT

The Interrogation Department of Betong Police Station had service problems on Facebook Messenger. People had to wait a long time because of the insufficient manpower for 24 service hours and in the police lack of expert staff in every case consulting. Therefore, this research adopted the chatbot in Interrogation Tasks of Betong Police Station. The research objective was to: (1) design and develop the chatbot for supporting citizen laws service of Investigation Department in the police station, and (2) evaluate the efficiency based on Lean concept and assess user satisfaction with the chatbot. This chatbot was developed based on Lean concepts and plugged in with Facebook Messenger. The results showed that the new process or post Lean can reduce wasted time around 1,507.98 minutes (99.80%), and the percentage of efficiency was 100, increasing around 99.21 percent. In addition, the results indicated that the level of user satisfaction was high (4.09), and the system can interact quickly (4.19). These results indicated that users are satisfied with the chatbot adoption in Interrogation Department of Betong Police Station because the chatbot can reduce their waiting service time.

Key words: chatbot, dialogflow, police station, lean, information

บทนำ

ปัจจุบันการพัฒนาและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในภาครัฐมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมาร์ตโฟนได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น เนื่องจากความสามารถในการส่งข้อความและช่วยสนับสนุนการสื่อสารออนไลน์ไม่ว่าอยู่ที่ไหนและเมื่อใด ทำให้มีการนำเทคโนโลยีสารสนเทศมาช่วยสนับสนุนการทำงานหรือให้บริการเพื่อช่วยลดปัญหาและส่งเสริมให้การทำงานมีประสิทธิภาพมากขึ้นหรือให้บริการกับลูกค้าได้ดีขึ้นเช่นเดียวกับสถานีตำรวจเบตง จากผลสำรวจของสถานีตำรวจในปี พ.ศ. 2562 พบว่ามีผู้ที่เข้ามาร้องเรียนสอบถามปัญหาข้อกฎหมายจำนวน 942 เรื่อง คิดเป็น 78 เรื่องต่อเดือน หรือร้อยละ 8.3 ต่อเดือน จากข้อมูลที่ผ่านมาสถานีตำรวจเบตงมีการใช้ Facebook เป็นช่องทางของการร้องเรียนและสอบถามปัญหาด้านกฎหมายประชาชน ซึ่งจากการใช้งานผ่าน Facebook พบปัญหาหลายอย่าง เช่น

ความล่าช้าในการตอบคำถามเนื่องจากอัตรากำลังคนที่ไม่เพียงพอของเจ้าหน้าที่พนักงานทำให้ไม่สามารถให้คำปรึกษาได้ตลอด 24 ชั่วโมงในทุกวัน อีกทั้งเจ้าหน้าที่พนักงานทุกคนไม่มีความรู้ข้อกฎหมายประชาชนในทุกเรื่องทำให้เสียเวลาในการสอบถามผู้รู้และค้นหาข้อมูลส่งผลทำให้เกิดความล่าช้าในการให้บริการ ซึ่งในแต่ละกรณีในการให้บริการจะใช้เวลาค่อนข้างมาก สำหรับงานสอบสวนระดับสถานีตำรวจมีหลักปฏิบัติเพื่อให้พนักงานสอบสวนดำเนินการเมื่อมีประชาชนมาแจ้งความและมีคำสั่งภายในสถานีตำรวจ โดยมอบหมายหน้าที่ในการปฏิบัติงานของข้าราชการตำรวจในสถานีให้ทำหน้าที่ตรวจสอบการแจ้งเบาะแส การร้องเรียน และสอบถามปัญหาด้านกฎหมาย การจราจร ผ่านสื่อโซเชียลเน็ตเวิร์คและระบบเฟสบุ๊ค

จากปัญหาการนำเฟสบุ๊คมาใช้ในการให้บริการประชาชนของสถานีตำรวจเบตงที่ผ่านมาทำให้เกิดแนวคิดในการนำแชทบอท (Chatbot) มา

ช่วยสนับสนุนเพิ่มเติมในเฟชบุ๊ก เนื่องจากแชทบอทก็เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีความสามารถในการสนทนาได้ตอบกับผู้ใช้ได้อย่างอัตโนมัติโดยใช้ภาษาธรรมชาติ (Natural Language) ในการสื่อสารทั้งรูปแบบข้อความ (Text) หรือเสียงพูด (Speech) เป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการเรียนรู้ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานแชทบอทหลากหลายในด้านต่าง ๆ เช่น การใช้สื่อสารหรือให้ข้อมูลเพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้ในด้านพาณิชย์ธุรกิจ (Promla and Krootjohn, 2020) การใช้แชทบอทเพื่อให้บริการกับลูกค้าในธุรกิจค้าปลีก (Solis-Quispe *et al.*, 2021) โดยระบบแชทบอทแบบ Rule-based Approach หรือ Rule-based Bot เป็นแชทบอทที่มีการนำมาประยุกต์ใช้ในปัจจุบันค่อนข้างมาก เนื่องจากสามารถพัฒนาได้ไม่ยากนักด้วยลักษณะการทำงานแบบมีเงื่อนไขตามรูปแบบที่กำหนดหรือการกำหนดกฎตามวัตถุประสงค์หรือบทบาทของแชทบอท (Kruapanich, 2019) โดยไดอะล็อกโฟลว์ (Dialogflow) ของค่ายกูเกิล (Google) เป็นแพลตฟอร์มหนึ่งที่เป็นที่นิยมในการพัฒนาแชทบอทในปัจจุบันเนื่องจากมีเทคนิคด้าน Machine Learning และการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing: NLP) มาช่วยในทำความเข้าใจถึงความต้องการ และสิ่งที่ต้องการในประโยคสนทนาของผู้ใช้งานและตอบคำถามตามความต้องการของผู้ใช้งานตามกฎหรือรูปแบบที่ผู้พัฒนาได้ออกแบบเอาไว้ จึงจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของประโยค (Tangkraingkij, 2020)

ซึ่งก็มีหน่วยงานจำนวนไม่น้อยที่ได้มีการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ มาใช้ภายใต้แนวคิดลีน (Lean concept) เพื่อปรับปรุงกระบวนการทำงานและลดการสูญเสีย (Waste) ให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าหรือผู้รับบริการได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น เพิ่มผลผลิตการทำงานของกระบวนการรับและ

คืนสินค้าทั่วไป (Rasrimil and Wongcharoensangsiri, 2018) การจัดการความสูญเปล่าเพื่อลดระยะเวลาของกระบวนการจัดซื้อสินค้า (Pattarapantakul and Kanchanasuwan, 2020) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำแนวคิดลีนมาช่วยในการปรับปรุงกระบวนการทำงานให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุด โดยมุ่งเน้นลดความล่าช้าในกระบวนการทำงาน ซึ่งขั้นตอนการทำงานของลีนในส่วนของการดำเนินการมี 5 ขั้นตอน (Ruangthanu, 2021) ได้แก่ (1) เขียนขั้นตอนปัจจุบัน (2) ระบุสิ่งที่ต้องการลด (3) ระบุประเภทของแต่ละขั้นตอน (4) คำนวณประสิทธิภาพของกระบวนการทำงานทั้งหมด (5) สายธารแห่งคุณค่าในอนาคตเป็นการนำเสนอกระบวนการแบบใหม่

โดยการศึกษาครั้งนี้ มีจุดมุ่งหมายในการออกแบบพัฒนาระบบแชทบอทแบบผสม (Hybrid Chatbot) สำหรับตอบกลับการสนทนาแบบอัตโนมัติด้วยกฎ (Based on Rules) เพื่อลดความล่าช้าและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการในการให้บริการด้วยแนวคิดการจัดการแบบลีน

วิธีดำเนินการวิจัย

ประชากรงานวิจัยนี้เป็นประชาชนที่อยู่ในช่วงอายุ 18-50 ปี ที่เข้ามาแจ้งความร้องทุกข์ที่สถานีตำรวจภูธร เบตง ในช่วงวันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 ถึงวันที่ 14 สิงหาคม พ.ศ. 2564 โดยสุ่มตัวอย่างด้วยเทคนิคตามสะดวก (Convenience sampling) จำนวน 100 คน จากประชาชนที่เดินทางมาแจ้งความร้องทุกข์ที่สถานีตำรวจเบตง ในประเภท 3 คดี ได้แก่ คดีครอบครอง คดีเงินกู้ และคดีบุกรุกค้าย และทรัพย์สินหาย โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย ดังนี้

1. การรวบรวมข้อมูลและวิธีการพัฒนาระบบแชทบอท

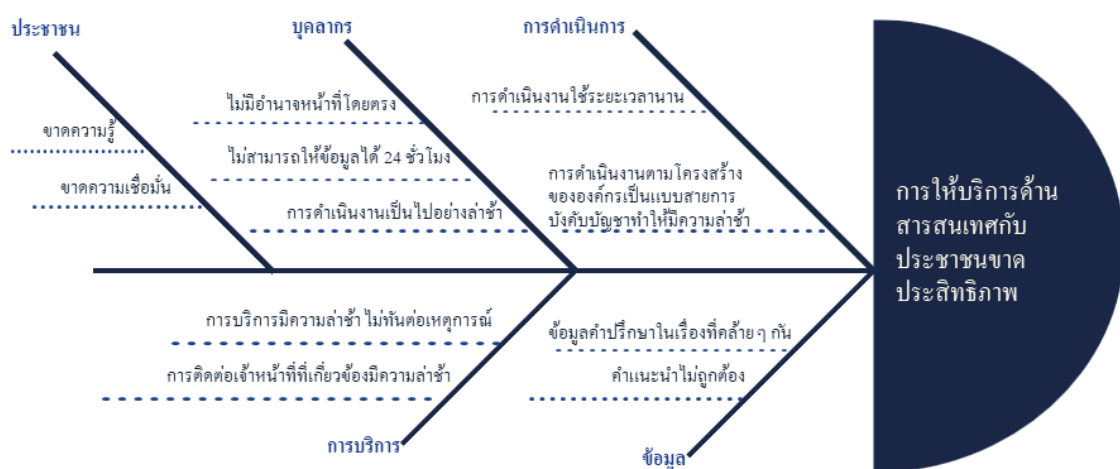
การได้รับมาซึ่งแหล่งข้อมูลและวิธีการรวบรวมข้อมูลในการทำงานของแชทบอทจะต้องทำการรวบรวมหรือการคาดการณ์กลุ่มคำถามและกลุ่มคำตอบที่จะเกิดขึ้นไว้ล่วงหน้าเก็บไว้ในไดอะล็อกโฟลว์ข้อมูลกลุ่มคำถามจะได้รับจากข้อมูลที่ประชาชนเข้ามาแจ้งความผ่าน Facebook Messenger สถานีตำรวจภูธรเบตงและกลุ่มคำตอบจะได้รับจากคำสั่งของหน่วยงานหรือคำแนะนำจากผู้บังคับบัญชาระดับสารวัตรขึ้นไปที่มีความรู้และประสบการณ์มีความเชี่ยวชาญในสายงานที่เกี่ยวข้องกับงานสอบสวนที่ผ่านมาโดยตรง ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ขอคำแนะนำข้อมูลคำถามและคำตอบจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่านประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญตำแหน่งรองผู้กำกับการ (สอบสวน) และตำแหน่ง

สารวัตร (สอบสวน) จำนวน 1 คนและเจ้าหน้าที่ดูแลระบบของสถานีตำรวจ จำนวน 2 คน

2. ศึกษาขั้นตอนการบริการตอบคำถามประชาชนผ่าน Facebook Messenger แชทบอท

ขั้นตอนการบริการตอบคำถามประชาชนในปัจจุบัน ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของกระบวนการทำงานที่เกิดความสูญเปล่าและขาดประสิทธิภาพ โดยผู้วิจัยใช้ขั้นตอนการเดิน 5 ขั้นตอน ได้แก่

(1) เขียนขั้นตอนปัจจุบันเพื่อหาสาเหตุปัญหา โดยสาเหตุหลักเกิดจากขั้นตอนการทำงานที่ต้องมีการประสานเจ้าหน้าที่ระหว่างแผนกงานต่างกันและกรณีที่ผู้มีอำนาจหน้าที่ในเรื่องนั้น ๆ ไม่ว่างหรือไม่อยู่ต้องรอทำให้ใช้เวลามากเกินความจำเป็นซึ่งแยกปัญหาด้านต่าง ๆ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ปัญหาการให้บริการด้านสารสนเทศกับประชาชน

(2) ระบุสิ่งที่ต้องการลดคือ ต้องการลดเวลาและกำลังคน

(3) ระบุประเภทของแต่ละขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ไม่มีคุณค่าแต่มีความจำเป็น (Non Value) เช่น ขั้นตอนเจ้าหน้าที่ดูแลระบบตอบกลับภายใน 1-2 วันทำการและไม่ตอบข้อความนอกวันและเวลา

ราชการ, ขั้นตอนเจ้าหน้าที่ดูแลระบบติดต่อเจ้าหน้าที่งานสอบสวน และขั้นตอนที่มีคุณค่า (Value) เช่น ขั้นตอนผู้สอบถามข้อมูลแจ้งเข้ามาผ่าน Facebook Messenger, ขั้นตอนเจ้าหน้าที่ดูแลระบบตรวจสอบคำถาม

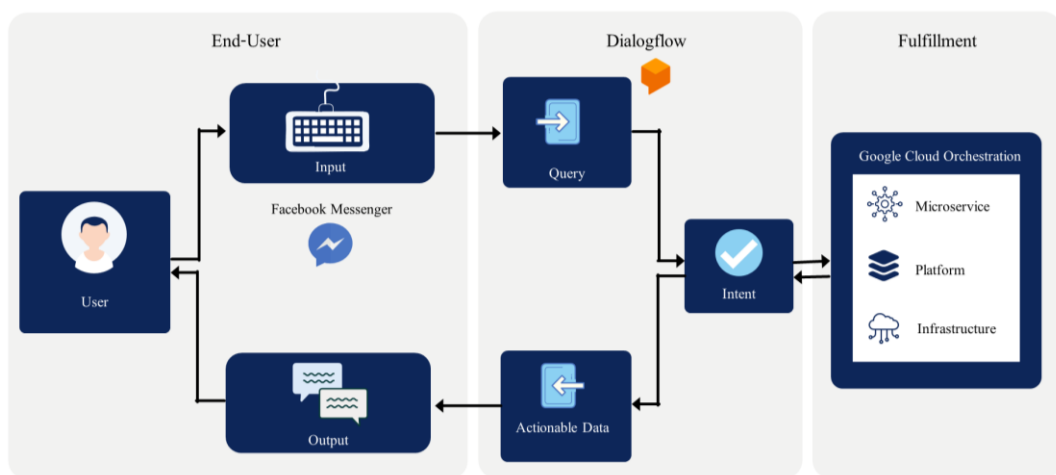
(4) คำนวณประสิทธิภาพของกระบวนการทำงานทั้งหมดดังสมการ ประสิทธิภาพโดยรวม = (ผลรวมของเวลา Value time / เวลาทั้งหมด) $\times$ 100

(5) นำเสนอกระบวนการแบบใหม่ที่มีการนำระบบแชทบอทเข้ามาใช้แล้วคำนวณประสิทธิภาพใหม่โดยการออกแบบระบบแชทบอทนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานแต่ยังคงเป็นไปตามหลักการและคำสั่งของหน่วยงาน

3. ออกแบบและพัฒนาระบบ

การพัฒนาระบบแชทบอทบนแพลตฟอร์ม Facebook Messenger สามารถอธิบายหลักการทำงานของระบบดังภาพที่ 2 การทำงานของระบบเมื่อ

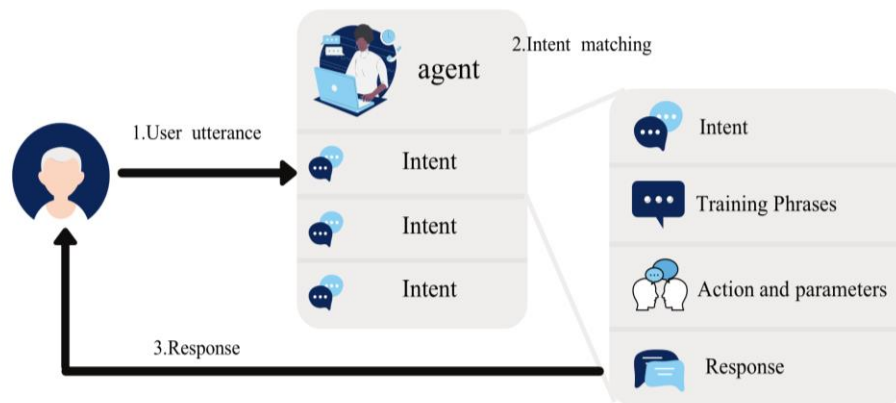
ผู้ใช้งานระบบ Facebook Messenger ก็ย้ข้อมูลหรือป้อนคำสั่งสนทนาข้อมูลเหล่านั้นจะถูกส่งไปยังส่วนของไดอะล็อกโพล์ให้แปลงข้อความสนทนาของผู้ใช้งานด้วยวิธีการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing) ค้นหาข้อมูลคำถามที่มีอยู่ใน Intents ของไดอะล็อกโพล์ตามที่รวบรวมหรือคาดการณ์กลุ่มคำถามและกลุ่มคำตอบต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นไว้ล่วงหน้าหลังจากที่ไดอะล็อกโพล์สามารถเข้าใจคำถามตามคำขอจากผู้ใช้งานแล้วไดอะล็อกโพล์จะสร้างการตอบสนองกลับไปยังผู้ผ่านแอปพลิเคชัน Facebook Messenger เพื่อให้ผู้ใช้เกิดความเข้าใจในเรื่องนั้น ๆ



ภาพที่ 2 ภาพรวมของระบบแชทบอทและพัฒนา

การกรอกข้อมูลเพื่อใช้ในการโต้ตอบการสนทนาโดยเมื่อผู้ใช้งานได้สนทนากับระบบแชทบอทไดอะล็อกโพล์จะตรวจสอบแพลตฟอร์มผู้ใช้ที่เชื่อมต่อกับเอเจนต์ (Agent) และหลังจากนั้นเมื่อพบเอเจนต์ (Agent) ที่ต้องการใช้งานแล้วไดอะล็อกโพล์จะดำเนินการเปรียบเทียบประโยคหรือข้อความที่ผู้ใช้งานส่งเข้ามาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อยู่ใน Training Phrases ของแต่ละ Intents

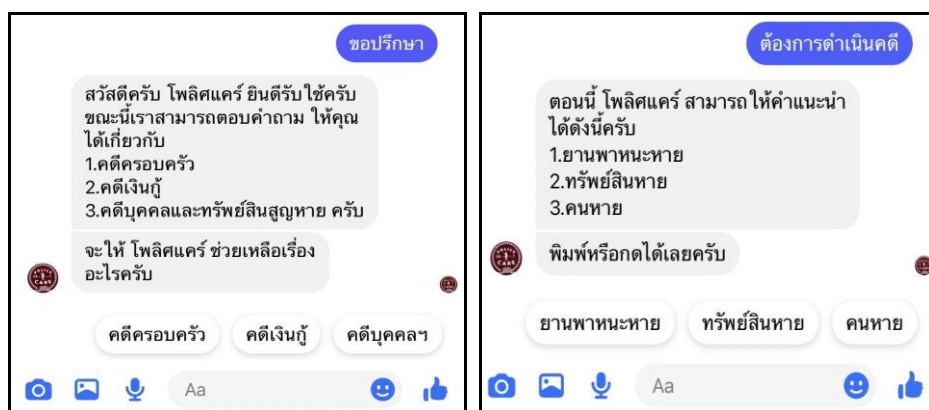
ซึ่งอาจจะมีหลาย Intents โดยให้น้ำหนักคำที่มีความใกล้เคียงหรือมีความคล้ายกันมากที่สุดกับข้อมูลใน Training Phrases ของแต่ละ Intents เมื่อไดอะล็อกโพล์ประมวลผลพบ Intents ที่มีข้อมูลคล้ายมากที่สุดแล้วจะดำเนินการเลือกใช้ข้อมูลที่กำหนดไว้ในส่วนของ Responses ของ Intents นั้นตอบกลับไปยังผู้ใช้งาน ดังภาพที่ 3



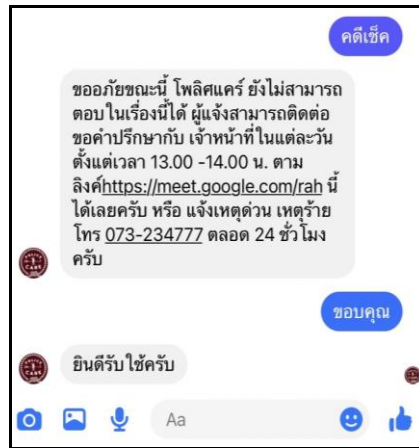
ภาพที่ 3 การกรอกข้อมูลเพื่อใช้ในการโต้ตอบการสนทนา

ซึ่งผู้วิจัยออกแบบโครงสร้างการสนทนาของระบบแชทบอทโดยออกแบบให้ตอบได้กับผู้ใช้ตลอดเวลาและรองรับภาษาไทยเท่านั้น ไม่รองรับภาษาอังกฤษ ลักษณะการตอบได้ส่วนใหญ่เป็นข้อความ มีปุ่มตัวเลือกแทนการพิมพ์ โดยมีองค์ประกอบหลักทั้งหมด 4 Intents ได้แก่ (1) Welcome คือ Intents สำหรับเริ่มต้นใช้งาน บอทจะแสดงข้อความแนะนำตัวเอง (2) Main Question คือ Intents บอกวิธีใช้บอทและแสดงให้เห็นว่าบอทสามารถให้ข้อมูลใดบ้าง ซึ่งขอบเขตการตอบได้กับผู้ใช้มีการใช้ภาษาที่หลากหลาย ครอบคลุมคำศัพท์แสดงและคำพื้นเมืองต่าง ๆ เช่น “ป่าว” “เป็น” “ใช่มัย” “ແຮງ” เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้คำดังกล่าวบนแชทแอปพลิเคชันบ่อย ๆ มีการตอบได้กับผู้ใช้ในหลาย ๆ ลักษณะทั้งข้อความ รูปภาพและ

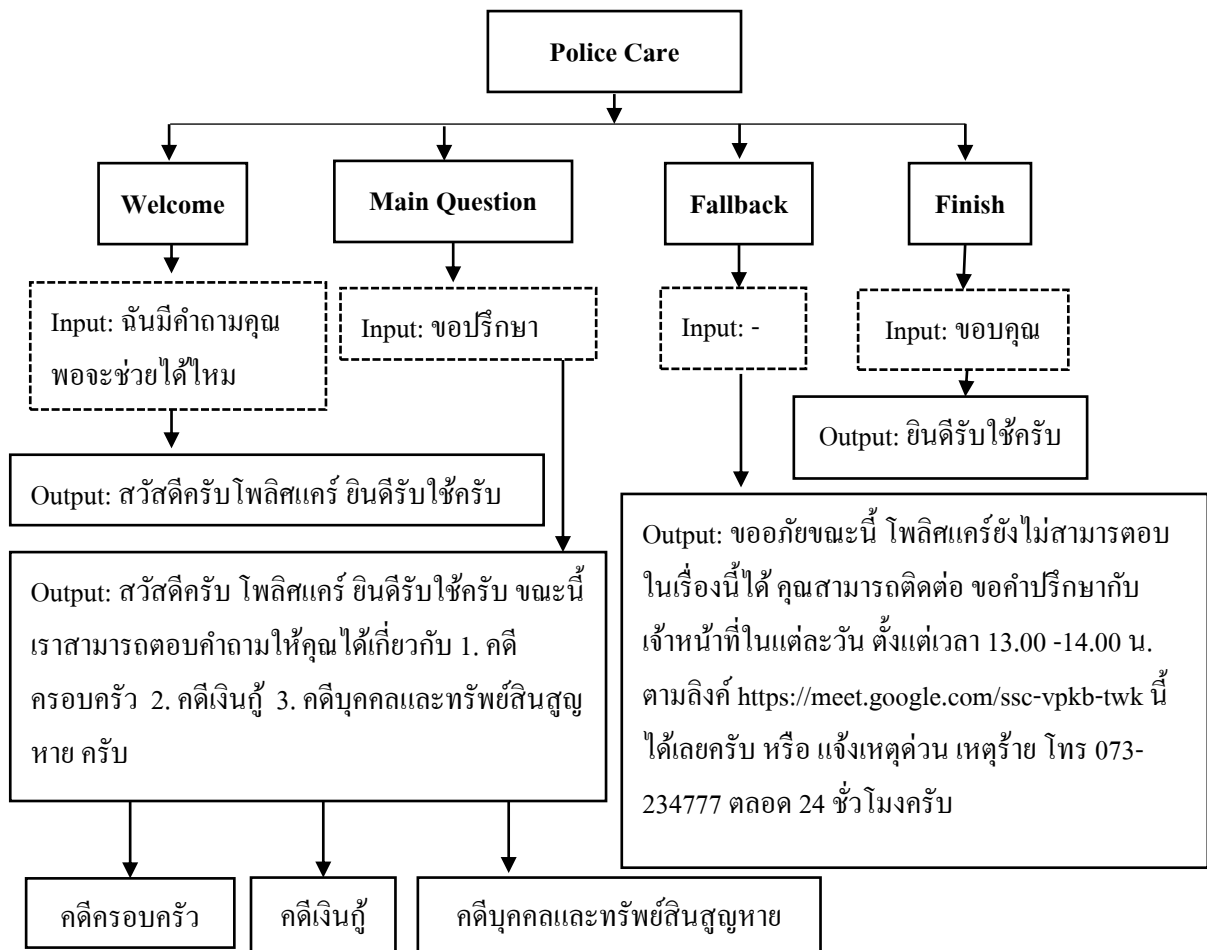
ใช้ปุ่มตัวเลือกเพื่อกำหนดหัวข้อเรื่องการสนทนาและลดความผิดพลาด ดังภาพที่ 4 (3) Fallback คือ Intents สำหรับส่งข้อความหากผู้ใช้ส่งข้อความที่ไม่มีในระบบ ในกรณีที่ผู้ใช้ไม่ตอบตามรูปแบบที่กำหนดไว้ เช่น ส่งรูปภาพ สติกเกอร์ (Sticker) หรืออีโมจิ (Emoji) บอทจะนำ Fallback มาแสดงตอบกลับไปหาผู้ใช้อย่างไม่เข้าใจในสิ่งที่พิมพ์มาและเสนอทางเลือกให้ผู้ใช้ไปคุยกับเจ้าหน้าที่ต่อไปดังแสดงภาพที่ 5 และ (4) Finish คือ Intents จบการสนทนากับบอทเมื่อผู้ใช้แสดงคำขอบคุณหรือส่งข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับคตินั้นๆ โดยฝากช่องทางการติดต่อกลับ บอทจะแสดงข้อความคำขอบคุณและความห่วงใยกับผู้ใช้ โดยสามารถสรุปภาพรวมโครงสร้างการสนทนาของระบบแชทบอทได้ดังภาพที่ 6-9



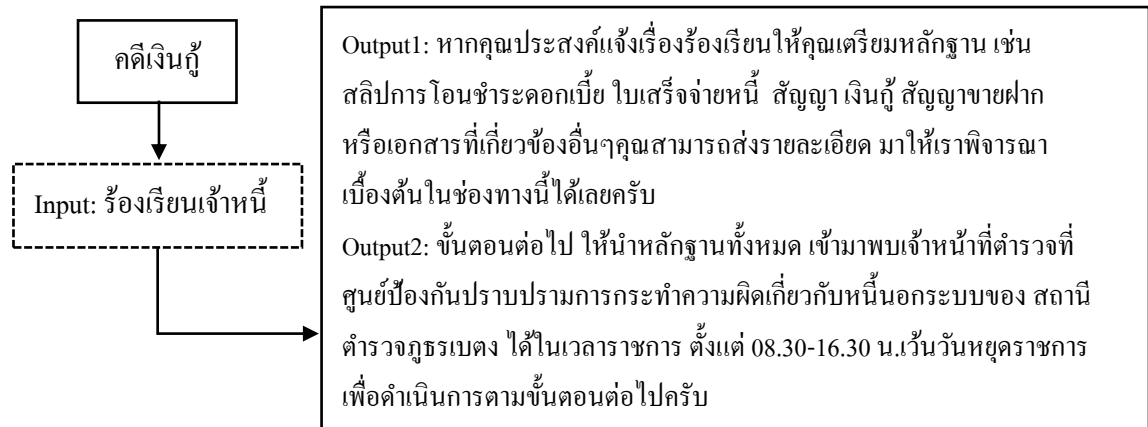
ภาพที่ 4 Main Question



ภาพที่ 5 Fallback



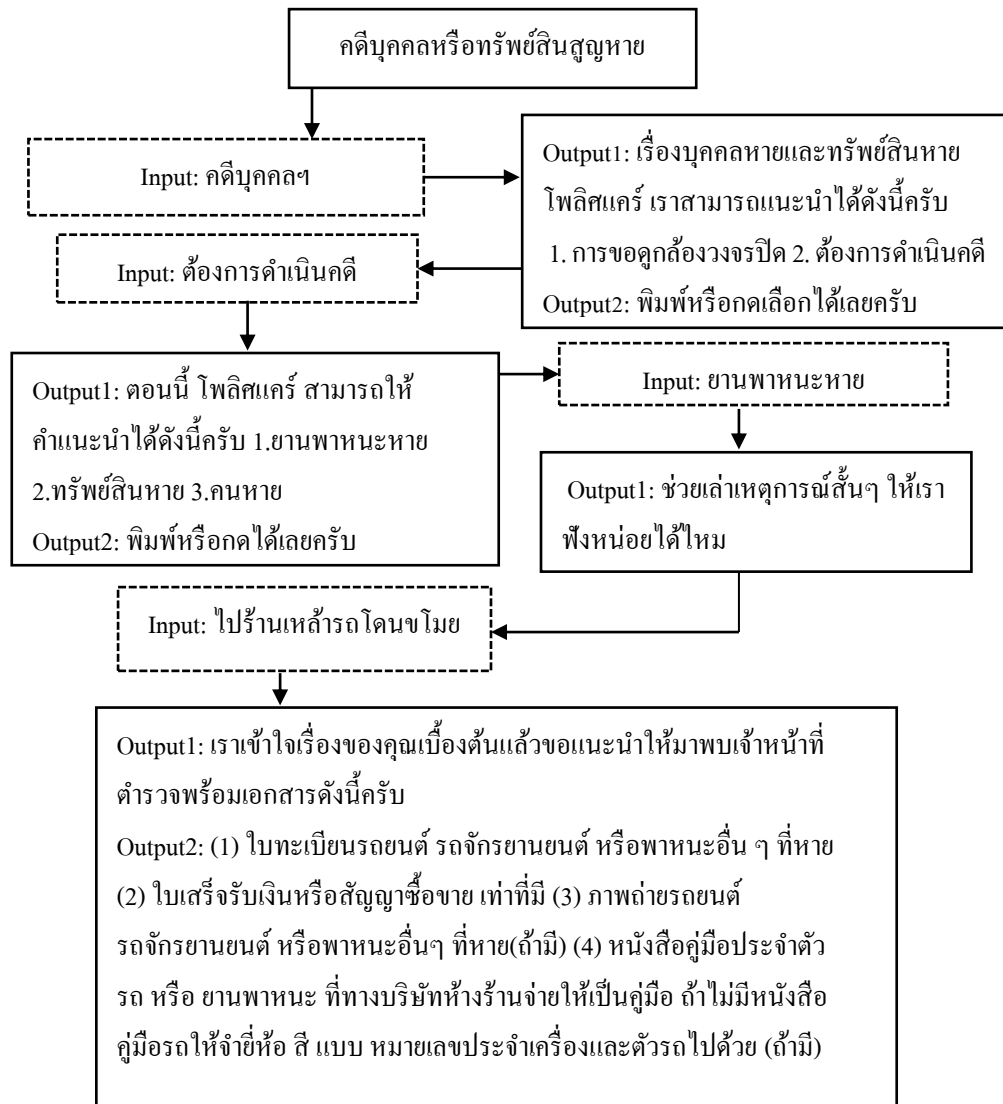
ภาพที่ 6 ตัวอย่างโครงสร้างการสนทนาของระบบแชทบอท



ภาพที่ 7 ตัวอย่างโครงสร้างการสนทนาคดีเงินกู้



ภาพที่ 8 ตัวอย่างโครงสร้างการสนทนาคดีครอบครัว



ภาพที่ 9 ตัวอย่างโครงสร้างการสนทนาคดีบุคคลหรือทรัพย์สินสูญหาย

4. การประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการและ ความพึงพอใจของผู้ใช้

งานวิจัยฉบับนี้ ประเมินประสิทธิภาพ
กระบวนการโดยใช้แนวทางจัดการแบบลินสำหรับ
บริการตอบคำถามประชาชนผ่าน Facebook
Messenger หลังปรับปรุงกระบวนการใหม่นั้นผู้วิจัย
ใช้การเปรียบเทียบในส่วนของระยะเวลาที่ใช้ในการ
ดำเนินงานก่อน (Pre Lean) และหลังนำเชทบอทมา
ประยุกต์ใช้งาน (Post Lean)

การประเมินและออกแบบแบบสอบถามที่
ใช้ในการศึกษาวิจัย ได้พัฒนาข้อคำถามมาจากโมเดล

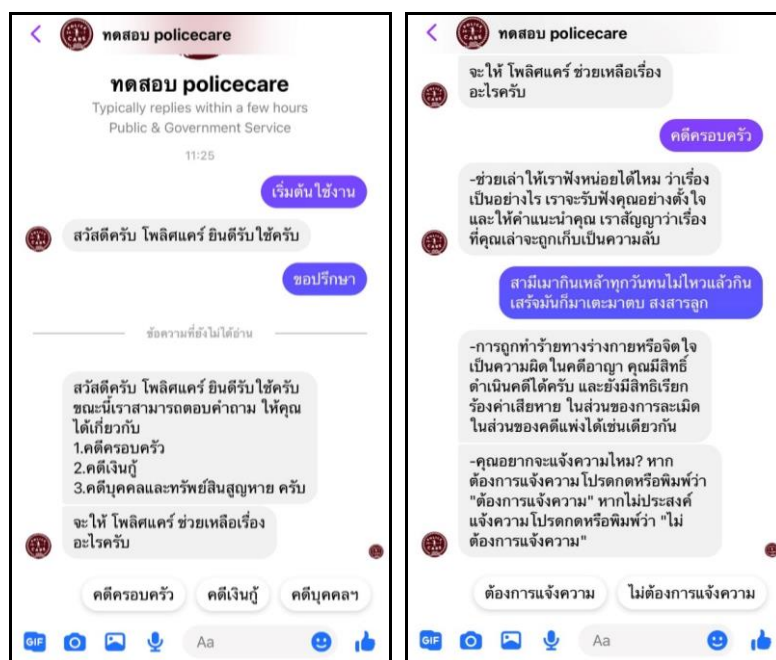
ความสำเร็จของระบบสารสนเทศ (DeLone and
McLean, 2003) โดยผู้วิจัยเลือกทำการประเมินโดยใช้
แบบสอบถามแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating
Scale) 5 ระดับคือ (5) มากที่สุด (4) มาก (3) ปาน
กลาง (2) น้อย และ (1) น้อยที่สุด ใน 6 ด้านได้แก่ (1)
ด้านความเหมาะสมในการบริการ (2) ด้านความ
สะดวกสบายต่อการใช้งาน (3) ด้านความรวดเร็ว
ในการใช้งาน (4) ด้านความปลอดภัย (5) ด้าน
ช่องทางการเข้าใช้งาน (6) ด้านภาพรวมของระบบ
และใช้เกณฑ์ค่าเฉลี่ยของคะแนนจากแบบประเมิน
ความพึงพอใจ ดังนี้ คือ คะแนนเฉลี่ย 4.51 - 5.00

หมายถึง ผู้ใช้งานระบบมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด คะแนนเฉลี่ย 3.51 - 4.50 หมายถึง ผู้ใช้งานระบบมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก คะแนนเฉลี่ย 2.51 - 3.50 หมายถึง ผู้ใช้งานระบบมีความพึงพอใจอยู่ในระดับปานกลาง คะแนนเฉลี่ย 1.51 - 2.50 หมายถึง ผู้ใช้งานระบบมีความพึงพอใจอยู่ในระดับน้อย คะแนนเฉลี่ย 1.00 - 1.50 หมายถึง ผู้ใช้งานระบบมีความพึงพอใจอยู่ในระดับน้อยที่สุด

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการพัฒนาระบบแชทบอท

จากการพัฒนาระบบ Facebook Messenger แชทบอทได้ทำการตั้งชื่อของระบบว่า โพลิศแคร์ (Police Care) ซึ่งระบบสามารถโต้ตอบข้อซักถาม ผู้ใช้งานได้เป็นอย่างดี มีตัวอย่างหน้าจอการใช้งาน ดังภาพที่ 10

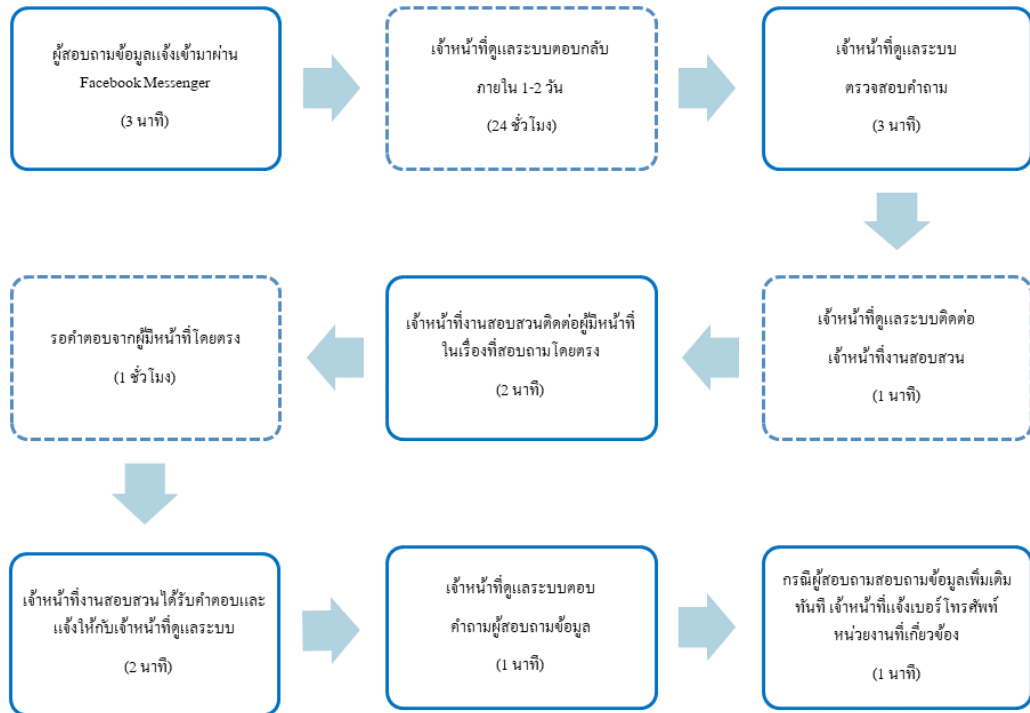


ภาพที่ 10 ตัวอย่างการสนทนาระบบแชทบอท

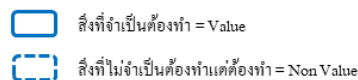
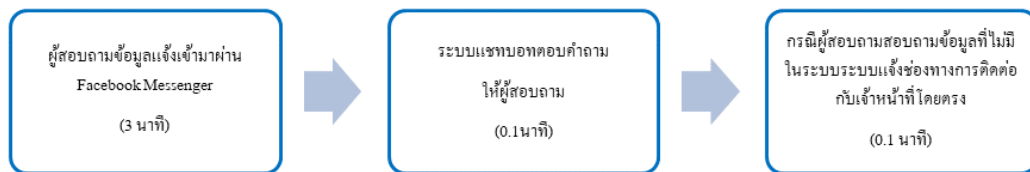
2. ผลการปรับปรุงขั้นตอนการบริการตอบคำถามประชาชน

จากการพิจารณาพบว่าขั้นตอนเดิมทำให้สูญเสียเวลาเกินความจำเป็นและมีความล่าช้าในการบริการ ผู้วิจัยจึงพัฒนาระบบ Facebook Messenger แชทบอทและใช้แนวทางจัดการแบบลีนมาปรับปรุงกระบวนการเดิม (Pre Lean) โดยตัด “ขั้นตอนที่ไม่จำเป็นแต่ต้องทำ” ในขั้นตอนที่ 2, 4 และ 6 ออก และ

รวมกระบวนการทำงานที่ 3, 5 และ 7 ดังภาพที่ 11 และซึ่งหลังจากปรับปรุงกระบวนการ (Post Lean) ทำให้ลดขั้นตอนการบริการได้จากเดิม 9 ขั้นตอน เป็น 3 ขั้นตอนดังภาพที่ 12 ทำให้การให้บริการมีประสิทธิภาพและมีความรวดเร็วในการให้บริการมากขึ้นมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 11 ขั้นตอนการ Pre Lean



ภาพที่ 12 ขั้นตอนการ Post Lean

ขั้นตอนการบริการประชาชนจากเดิม มีทั้งหมด 9 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่มีคุณค่า 6 ขั้นตอน ดังนั้นประสิทธิภาพโดยรวม = (ผลรวมของเวลา Value time / เวลาทั้งหมด) $\times 100 = 0.79\%$ ใช้เวลาการบริการ 1,511 นาที ดังตารางที่ 1 และหลังจากปรับปรุงกระบวนการด้วยการให้บริการผ่านระบบแชทบอทสามารถลดขั้นตอนกระบวนการใหม่ หรือ Post Lean เหลือเพียง 3 ขั้นตอนทำให้ใช้เวลาเพียง 3.02 นาทีเท่านั้น โดยสามารถลดเวลาการบริการได้ 1,507.98 นาที คิดเป็นร้อยละ 99.80 ทั้งนี้พบว่า

ความคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ผ่านมาโดยการปรับปรุงกระบวนการทำงานตามแนวคิดลีนทำให้ลดสัดส่วนของขั้นตอนที่สูญเปล่าลง (Yodwan, 2020) และเพิ่มประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น (Tanmaneekeool, 2019) แล้วยังสอดคล้องกับงานวิจัยของระบบแชทบอทที่สามารถตอบสนองต่อคำถามได้อย่างรวดเร็ว (Santirattanaphakdi, 2018) มีความสะดวกสามารถใช้งานได้ 24 ชั่วโมงและเป็นທີ່จดจำให้แก่ผู้ใช้บริการ (Chankaeo and Chaikaeo, 2018)

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบ Pre lean และ Post lean

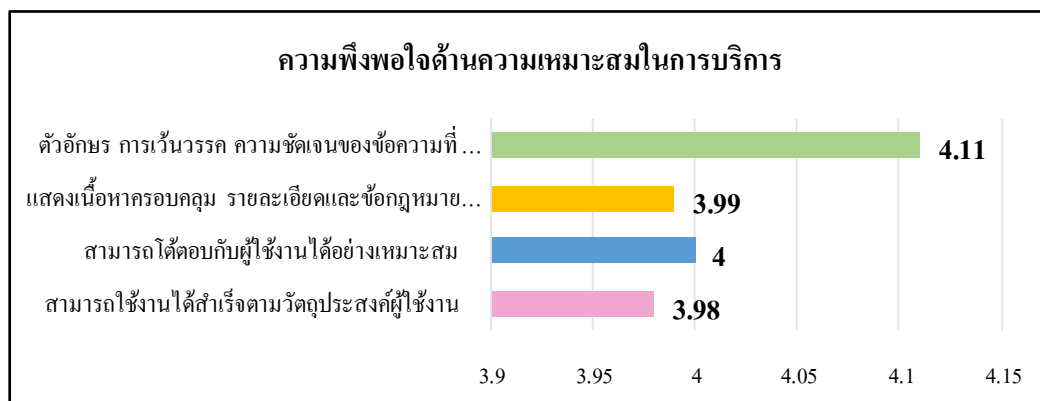
	Process	Value	Time	Efficiency (%)
Pre Lean	9	6	1,511	0.79
Post Lean	3	3	3.02	100
ส่วนต่าง	6	3	1,507.98	-99.21

3. ผลประเมินความพึงพอใจการใช้

การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน กลุ่มเป้าหมายของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จำนวน 100 คน จากการเก็บผลสำรวจ สามารถจำแนกออกเป็น สามกลุ่มย่อย (1) ผู้ใช้งานคติครอบครัวจำนวน 33 คน (2) ผู้ใช้งานคติบุคคลหรือทรัพย์สินสูญหาย จำนวน 42 คน (3) ผู้ใช้งานคติเงินกู้ จำนวน 25 คน โดยผลการประเมินความพึงพอใจเป็นที่น่าสนใจตามเกณฑ์การพิจารณาที่ได้กำหนดไว้โดยกลุ่มตัวอย่างทั้งสาม คติมีคะแนนเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 4.09 อยู่ในระดับความพึงใจในระดับมากและจากการให้ผู้ใช้งานทำแบบ

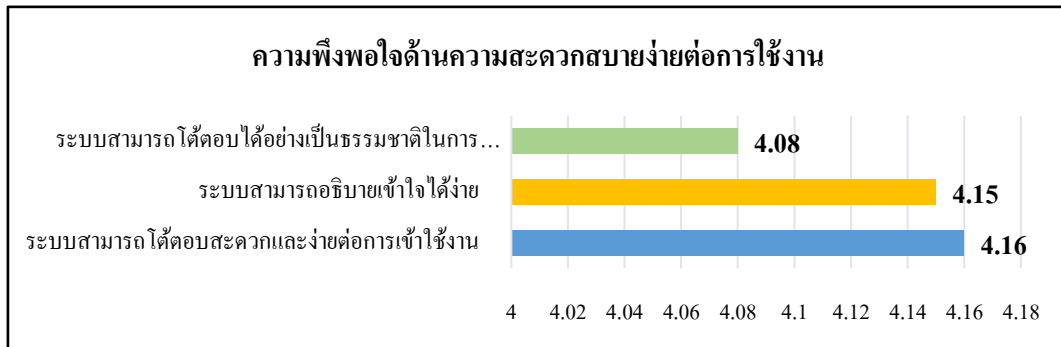
ประเมินความพึงพอใจพบว่า ผู้ใช้พึงพอใจในด้านที่ระบบสามารถตอบสนองกับผู้ใช้งานด้านความรวดเร็วในการใช้งานมากที่สุด (4.19) รองลงมา คือ ด้านความสะดวกสบายต่อการใช้งาน (4.16) ในขณะที่ด้านที่มีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจต่ำที่สุด คือ ด้านสามารถใช้งานได้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ ผู้ใช้งาน (3.98) ดังภาพที่ 13-17 อย่างไรก็ตาม คะแนนเฉลี่ยที่ได้รับในระดับที่ต่ำที่สุดนั้นตามหลักเกณฑ์การพิจารณาที่กำหนดไว้พบว่ายังอยู่ในระดับความพึงพอใจมาก

3.1 ด้านความเหมาะสมในการบริการ



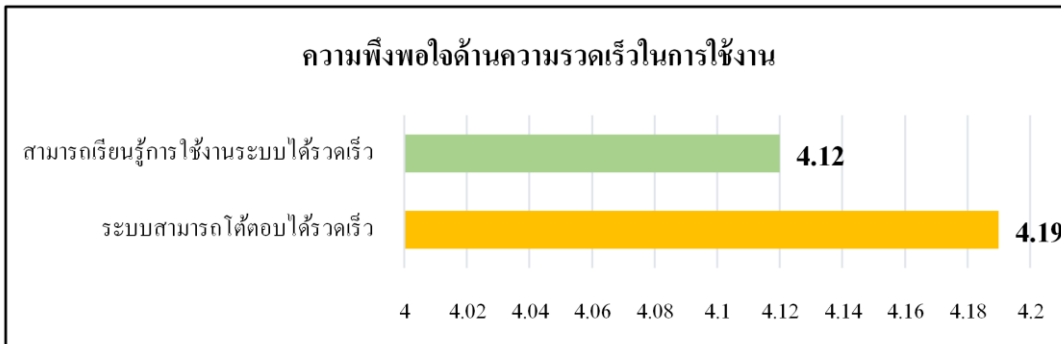
ภาพที่ 13 ผลความพึงพอใจด้านความเหมาะสมในการบริการ

3.2 ด้านความสะดวกสบายง่ายต่อการใช้งาน



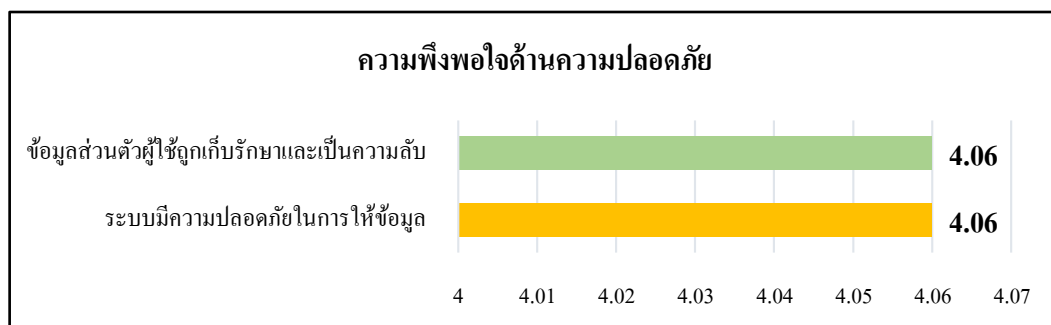
ภาพที่ 14 ผลความพึงพอใจด้านความสะดวกสบายง่ายต่อการใช้งาน

3.3 ด้านความรวดเร็วในการใช้งาน



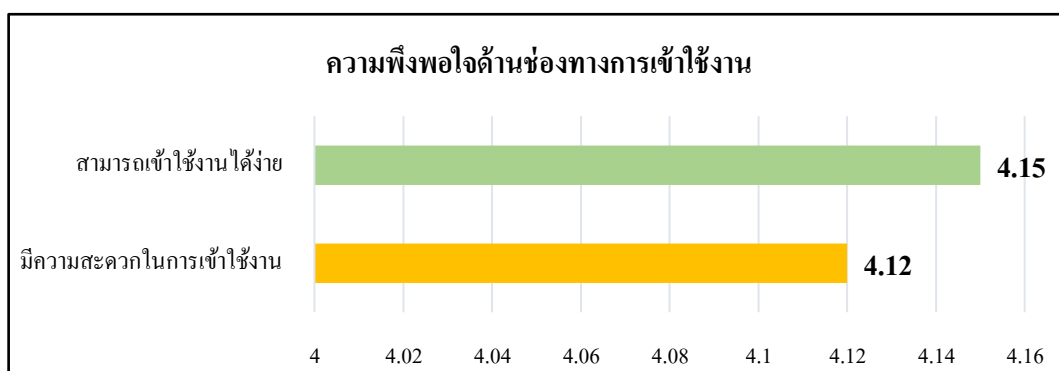
ภาพที่ 15 ผลความพึงพอใจด้านความรวดเร็วในการใช้งาน

3.4 ด้านความปลอดภัย



ภาพที่ 16 ผลความพึงพอใจด้านความปลอดภัย

3.5 ด้านช่องทางการเข้าใช้งาน



ภาพที่ 17 ผลความพึงพอใจด้านช่องทางการเข้าใช้งาน

สรุป

การพัฒนาระบบแชทบอทในครั้งนี้ระบบสามารถใช้งานได้ตามเป้าหมายที่วางไว้และมีความพึงพอใจจากผู้ใช้งานโดยผลคะแนนเฉลี่ยรวมอยู่ในระดับมาก ทุกประเด็นที่วัดประเมิน และเมื่อใช้แนวคิดของลินในการปรับปรุงกระบวนการสามารถทำให้ลดกระบวนการเดิมจาก 9 กระบวนการ เหลือเพียง 3 กระบวนการ ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ถึง 99.21% และลดระยะเวลาในการให้บริการได้ถึง 1,507.98 นาทีหรือ 25.13 ชั่วโมง ดังนั้น แชทบอทที่พัฒนาขึ้นนี้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพที่ดีในการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับให้บริการแก่ประชาชนของสถานีตำรวจเบตง

ข้อเสนอแนะ

1. ในอนาคตเพื่อให้แชทบอทสามารถตอบคำถามผู้ใช้ได้มากขึ้นจึงควรเพิ่มจำนวนคัตและข้อกฎหมายอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องรวมถึงเพิ่มขอบเขตของคำถามให้ครอบคลุมมากขึ้น

2. การเพิ่มความถูกต้องของการตอบคำถาม แชทบอทสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนข้อมูลการฝึกฝนโดยเก็บรวบรวมข้อมูลคำถามข้อกฎหมายรายละเอียดพฤติกรรมและคำถามที่พบเจอบ่อย ๆ

จากผู้ใช้งานจริงเพื่อให้แชทบอทสามารถเรียนรู้คำประโยคจากสภาพแวดล้อมจริงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้ของแชทบอทได้เป็นอย่างดี และแชทบอทสามารถตอบคำถามโดยมีความถูกต้องที่เพิ่มมากขึ้น

3. จากการศึกษาพบว่าหากนำ Facebook Messenger แชทบอทมาใช้งานช่วยให้การบริการข้อมูลกับประชาชนอย่างมีประสิทธิภาพสามารถให้ปริมาณข้อมูลและระยะเวลาในการบริการที่มากขึ้นตลอด 24 ชั่วโมง

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณผู้บริหารและบุคลากรของสถานีตำรวจภูธรเบตงที่ให้ข้อมูล ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์และสถานที่ในการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Chankaeo, W. and Chaikaeo, S. 2018. An Application of Chat Fuel for Public Relation, A Case Study of the Library Resources and Educational Media Center, University of Phayao. **PULINET Journal** 5(2): 137-147. (in Thai)
- DeLone, W.H. and McLean, E.R. 2003. The DeLone and McLean model of information systems success: A ten-year update. **Journal of Management Information Systems** 19(4): 9-30.
- Kruapanich, P. 2019. **Develop a Rule-based chatbot approach VS AI based approach**. Readmoreth. Available Source: <https://bit.ly/2ZFliYY>, October 25, 2021.
- Pattarapantakul, T. and Kanchanasuwan, S. 202. Improving the Purchasing Process Using Lean Concept: The Case of Offshore Aviation Services Company. **WMS Journal of Management** 9(3): 90-101. (in Thai)
- Promla, P. and Krootjohn, S. 2020. The Effect of using chatbot in blended learning for vocational certificate students in the colleges under the institute of vocational education northeastern region. **Journal of Industrial Education** 19(2): 100-110. (in Thai)
- Rasrimil, T. and Wongcharoensangsiri, B. 2018. Efficiency Improvement of Goods Receipt and Return System a Case Study of Convenient Store. **Kasetsart Applied Business Journal** 12(16): 14-26. (in Thai)
- Ruangthanu, S. 2021. G Suite for education and LINE Notification API Enhancement of Electronic Document System with G Suite for Education and Line Notification. Master Thesis of Science, Prince of Songkhla University. (in Thai)
- Santirattanaphakdi, C. 2018. Online Marketing and Customer Service by chatbot Case Study: Chatfuel in Customer Interactive on Messenger. **Sripatum Review of Science and Technology** 10(1): 71-87. (in Thai)
- Solis-Quispe, J.M., Quico-Cauti, K.M. and Ugarte, W. 2021. Chatbot to simplify customer interaction in e-commerce channels of retail companies, pp. 561-570. *In International Conference on Information Technology & Systems*. Springer, Cham.
- Tangkraingkij, P. 2020. Application of Artificial Intelligence Chatbot for Learning. **Royal Thai Air Force Medical Gazette** 66(2): 64-73. (in Thai)
- Tanmaneekeool, B. 2019. Improving treatment plan response processes for medical tourism patients a case study of Vejthani hospital. Master Thesis of Business Administration, Thammasat University. (in Thai)
- Yodwan, M. 2020. Applying lean principles for production waste reduction a case study of the plastic manufacturing process. Master Thesis of Engineering, Thammasat University. (in Thai)

ผลของแป้งข้าวกล้องไร่นครและผงจิ้งหรีดต่อคุณภาพของ เอ็กซ์ทรูเดตขนมขบเคี้ยว

Effects of Nakhon Upland Brown Rice Flour and Cricket Powder on Quality of Extruded Snacks

สุภาสิต ชุกกลิ่น*

Supasit Chooklin*

Received: 9 September 2021, Revised: 5 February 2023, Accepted: 30 March 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาเอ็กซ์ทรูเดตจากแป้งข้าวกล้องไร่นคร (ข้าวเม็ดยาวและข้าวสังข์หยด) และผงจิ้งหรีดด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ โดยศึกษาปริมาณของผงจิ้งหรีด (0-20% w/w) และปริมาณของแป้งข้าวกล้องไร่นคร (0-30% w/w) ด้วยสภาวะคงที่ คือ อุณหภูมิบารเล 1-6 (40-130°C) อุณหภูมิตาย (145°C) ความเร็วรอบสกรู (450 rpm) และความชื้นสารป้อน (12% w/w) พบว่า แป้งข้าวกล้องเม็ดยาวมีสีม่วงเข้ม ขนาดอนุภาค 250 μm ค่าสี L^* , a^* และ b^* เป็น 48.26, 4.91 และ 0.87 ตามลำดับ ค่าการต้านออกซิเดชัน (6.94 mg vitamin C/g Dry weight (DW)) และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (0.74 mg Gallic acid equivalent (GAE)/g DW) มากกว่าแป้งข้าวกล้องสังข์หยด (0.53 ± 0.04 mg vitamin C/g DW และ 0.03 ± 0.01 mg GAE/g DW) ส่วนผงจิ้งหรีดมีองค์ประกอบทางเคมีโดยเฉพาะปริมาณโปรตีน (60.40% โดยน้ำหนักเปียก) และไขมัน (16.92% โดยน้ำหนักเปียก) สูง การเพิ่มปริมาณผงจิ้งหรีดและปริมาณของแป้งข้าวกล้องไร่นครส่งผลต่อเอ็กซ์ทรูเดตโดยทำให้มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ค่าการพองตัวลดลง และมีค่า L^* และ b^* ลดลง แต่ a^* เพิ่มขึ้น ที่สัดส่วนของผงจิ้งหรีด 5% w/w ได้เอ็กซ์ทรูเดต (การพองตัวสูงและความแข็งต่ำ) เหมาะสมที่สุด การเพิ่มปริมาณแป้งข้าวกล้องไร่นคร (ข้าวเม็ดยาวและข้าวสังข์หยด) ระหว่าง 0-40% w/w ส่งผลให้เอ็กซ์ทรูเดตมีค่าการพองตัว ค่าสี (L^* , a^* และ b^*) ลดลง แต่ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความแข็งเพิ่มขึ้น โดยที่แป้งข้าวกล้องไร่นคร 30% (ข้าวเม็ดยาว 5%, ข้าวสังข์หยด 15%) และผงจิ้งหรีด 5% พบว่าเอ็กซ์ทรูเดตมีค่าคะแนนความชอบรวมสูงสุด (7.67) และคุณค่าทางโภชนาการของเอ็กซ์ทรูเดตที่ขนาดบรรจุ 30 g มีค่าพลังงานเท่ากับ 110 kcal, น้ำตาลเท่ากับ < 1 g, ไขมันเท่ากับ 1.5 g, และโซเดียมเท่ากับ 100 mg ตามลำดับ

คำสำคัญ: ข้าวกล้องไร่นคร, ขนมขบเคี้ยว, ผงจิ้งหรีด, เอ็กซ์ทรูเดต

สาขาวิชาเทคโนโลยีและนวัตกรรมอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอทุ่งใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช 80240
Program in Food Technology and Innovation, Faculty of Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Thungyai, Nakhon Si Thammarat 80240, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): supasit.c@rmutsv.ac.th

ABSTRACT

In this study, extrudate made from Nakhon upland brown rice flour (Med Fay rice and Sung Yod rice) and cricket powder was developed using twin screw extruder. Effects of cricket powder content (0-20% w/w) and upland brown rice flour content (0-30% w/w) were determined. Barrel temperature 1-6 (40-130°C), die temperature (145°C), screw speed (450 rpm) and feed moisture (12% w/w) of extruder conditions were controlled at a constant value throughout the study. It was found that Med Fay rice flour had dark purple color, particle size of 250 μm , and color (L^* , a^* and b^*) was 48.26, 4.91 and 0.87, respectively. Antioxidant activity value was 6.94 mg vitamin C/g DW and total phenolic content was 0.74 mg GAE/g DW of Med Fay brown rice which had more than Sung Yod brown rice (0.53 ± 0.04 mg vitamin C/g DW and 0.03 ± 0.01 mg GAE/g DW). Proximate analysis of cricket powder showed a high protein and fat at 60.40% and 16.92% by wet weight, respectively. Increasing cricket powder content and upland brown rice flour content significantly affected the properties of extrudate. Results showed that hardness increased but expansion decreased with increasing cricket powder content and upland brown rice flour content. Moreover, L^* and b^* values decreased but a^* value increased. The high expansion and low hardness were considered as optimum property of extrudate which was found at 5% cricket powder. Increasing the Nakhon upland brown rice flour content (Med Fay rice and Sang Yod rice) up to 0-40% w/w led to a decrease in expansion ratio and color values (L^* , a^* and b^*). However, bulk density and hardness value were increased. It was found that the extrudate had the highest overall liking score (7.67) at 30% (w/w) Nakhon brown rice flour content (Med Fay rice at 5%, Sang Yod rice at 15%) and 5%w/w cricket powder. Based on the nutritional value analysis, the extrudate having the package size of 30 g showed 110 kcal energy value, < 1 g sugar value, .5 g fat value, and 100 mg sodium value, respectively.

Key words: upland brown rice in Nakhon, extruded snack, cricket powder, extrudate

บทนำ

ขนมขบเคี้ยวในท้องตลาดส่วนใหญ่มีคาร์โบไฮเดรตและไขมันเป็นองค์ประกอบหลักมีปริมาณโปรตีนต่ำ ซึ่งไม่เป็นที่นิยมสำหรับผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพ ดังนั้น ผู้ผลิตสินค้าจึงมีการปรับตัวโดยผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคที่รักสุขภาพเพิ่มขึ้น เช่น ขนมขบเคี้ยวที่ไม่ผ่านการทอด ขนมขบเคี้ยว โซเดียมต่ำและขนมขบเคี้ยวประเภทโปรตีนสูง (Food Intelligence Center, 2016) ในขณะที่ผู้บริโภคมีความนิยมใน

ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวประเภทโปรตีนสูง แต่ในประเทศไทยผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวโปรตีนสูงมีค่อนข้างน้อย ยังคงนำเข้าจากต่างประเทศและราคาค่อนข้างสูง (Suriya and Worrasuanrak, 2016) ตัวอย่างขนมขบเคี้ยวโปรตีนสูงที่มีในท้องตลาด เช่น ขนมขบเคี้ยวชนิดแท่งโปรตีนสูง ขนมขบเคี้ยวแปรรูปจากเนื้อหมู และขนมขบเคี้ยวจากเนื้อปลา (Sriwilai *et al.*, 2018) ปัจจุบันอาหารหรือขนมที่มีส่วนประกอบของแมลง เริ่มได้รับความนิยมเนื่องจากมีคุณค่าทางสารอาหารจำนวนมากมีโปรตีน

สูงไม่แพ้โปรตีนจากเนื้อสัตว์หลัก รวมทั้งมีแร่ธาตุ แคลเซียม ไฟเบอร์ วิตามินสูง และไขมันต่ำ (Trade Policy and Strategy Office, 2022) แมลงถือเป็น แหล่งอาหารที่มีรสชาติเป็นเอกลักษณ์ มีโปรตีน วิตามิน และกรดอะมิโนหลายชนิดในปริมาณสูง อีกทั้งยังมีไขมันต่ำจึงเป็นที่นิยมสำหรับการบริโภค ในกลุ่มผู้บริโภคใน หลายประเทศการศึกษา ค้นคว้าวิจัยแหล่งโปรตีนทางเลือก พบว่า แมลงเป็น แหล่งที่สำคัญและมีศักยภาพที่จะเป็นโปรตีนทดแทน เนื้อสัตว์ได้เพราะใช้ระยะเวลาในการเลี้ยงสั้น ประมาณ 1-2 เดือน (Jampchanya *et al.*, 2007; Hanboonsong *et al.*, 2013) จึงหริดีถือเป็นแมลง เศรษฐกิจของไทยที่มีศักยภาพสูง กำลังการผลิตใน ระยะ 2-3 ปีมีการขยายอย่างมาก โดยมีมูลค่าเกือบ 1,000 ล้านบาท/ปี และยังเป็นอาหารที่กำลังได้รับความสนใจจากผู้บริโภคทั้งในประเทศและ ต่างประเทศ โดยสายพันธุ์ที่นิยมเลี้ยง คือ จิ้งหริด ทองแดงลาย (สะคัง) และจิ้งหริดทองคำ พบว่า มีปริมาณ โปรตีน 63.52% และ 56.76% (w/w) ปริมาณไขมัน 16.41% และ 20.30% (w/w) ตามลำดับ โดยสามารถนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์และ ส่วนผสมได้หลากหลาย ช่วยเพิ่มมูลค่าสินค้าจำพวก ขนมอบเคี้ยว (Promkhan *et al.*, 2020) ซึ่งขนมอบ เคี้ยวต่าง ๆ จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion) จะใช้อุณหภูมิที่สูงแต่ระยะเวลาสั้นจึงสามารถ คงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารเอาไว้ได้ อีกทั้ง สามารถทำให้เกิดการพองกรอบ โดยไม่ต้องอาศัย การทอดด้วยน้ำมันจึงเหมาะที่จะนำมาพัฒนาเป็น อาหารเพื่อสุขภาพ (Liang *et al.*, 2013) การผลิต เอ็กซ์ทรูเดตในอุตสาหกรรมอาหารขบเคี้ยว ส่วนมาก จะใช้แป้งข้าวสาลีเป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ นำเข้าจากต่างประเทศ ในประเทศไทยข้าวกล้องเป็น วัตถุดิบที่น่าสนใจ

ภาคใต้มีพื้นที่ที่خابไปด้วยชายฝั่งอ่าวไทย ทางตะวันออกและชายฝั่งอันดามันทางตะวันตก และ พื้นที่ที่เป็นเทือกเขาและที่ราบลุ่ม อาชีพส่วนใหญ่ของ ชาวได้คือ ทำประมง ทำสวนยาง ปาล์มและผลไม้ และ ทำนา โดยการทำนาจะอาศัยพื้นที่ที่ราบริมทะเล บริเวณ ลุ่มน้ำและที่ว่างระหว่างเทือกเขาโดยแหล่งปลูกข้าวที่ สำคัญคือจังหวัดนครศรีธรรมราช จังหวัดสงขลาและ จังหวัดพัทลุง โดยจังหวัดนครศรีธรรมราชเป็นแหล่ง ของทรัพยากรทางการเกษตร (ยาง ปาล์มและข้าว) ที่ สำคัญของภาคใต้ ข้าวที่ปลูกมีทั้งข้าวนาและข้าวไร่ โดยข้าวนาปลูกมากในบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำปากพนัง อ.ปากพนัง นิยมปลูกข้าวสายพันธุ์ คือ เล็บนกปัตตานี ไชยครั้นและสังข์หยดพัทลุง เป็นต้น ส่วนข้าวไร่มีการ ปลูกมากใน อ.ทุ่งสง ซึ่งข้าวไร่เกษตรกรจะปลูกแซม ระหว่างคันยางพาราก่อนที่จะเคิบโคจนสามารถกรีดยได้ ข้าวสายพันธุ์ที่นิยมปลูกคือ ข้าวเม็ดฝ้าย ข้าวเหนียวดำ และข้าวสังข์หยดซึ่งเป็นข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการ ทางอาหาร (วิตามิน แร่ธาตุและสารต้านออกซิเดชัน) เหมาะที่นำมาทำผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพ เช่น เครื่องดื่ม ขนมอบ ขนมอบเคี้ยวและผลิตภัณฑ์พาสต้า เป็นต้น สำหรับการผลิตเอ็กซ์ทรูเดตเนื่องจากเป็น วัตถุดิบที่หาง่ายในประเทศ ให้การพองตัวที่ดีมีรสจืด และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้ผลิตผลทางการเกษตร (Chaiyakul *et al.*, 2009) ข้าวไร่เป็นข้าวพื้นเมืองที่ เกษตรกรนิยมปลูกเป็นพืชแซมในระหว่างแถว ยางพาราและปาล์มน้ำมันในภาคใต้เนื่องจาก เจริญเติบโตได้ในสภาพดินที่ไม่มีน้ำขัง สามารถ ปรับตัวได้ดีต่อสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย เนื่องจาก พื้นที่การทำนาในสภาพนาสวนในภาคใต้ลดน้อยลงทำ ให้การปลูกข้าวไร่ มีความสำคัญต่อความมั่นคง ทางด้านอาหารมากขึ้น ข้าวไร่พันธุ์เม็ดฝ้ายมีพื้นที่ปลูก ส่วนใหญ่ในอำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็น ข้าวที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีม่วงดำ ผลผลิตสูง คุณภาพเมล็ด ทางกายภาพและการสีดีมาก ข้าวหุงสุกนุ่ม ก่อนข้าง

เหนียว ในปัจจุบันมีกลุ่มเกษตรกรผลิตข้าวไร่จำหน่ายเป็นผลิตภัณฑ์ ในรูปของข้าวกล้อง โดยกลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านหนองคล้าสามัคคี ตำบลเขาโร อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช (Posiri *et al.*, 2020)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ใช้แป้งข้าวกล้องไร่นคร และผงจิ้งหรีดเป็นส่วนผสมในการผลิตเอ็กซ์ทรูเดตด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ รวมทั้งวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องไร่นครและผงจิ้งหรีด นอกจากนี้ยังได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพเอ็กซ์ทรูเดตสำหรับผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องไร่นครเสริมผงจิ้งหรีด

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ

นำข้าวเปลือกไร่นคร (ข้าวเม็ดยาวและข้าวสังข์หยด) ต.เขาโร อ.ทุ่งสง จ.นครศรีธรรมราช ไปกระเทาะเปลือกด้วยเครื่องกระเทาะข้าวเปลือก (รุ่น NW 1000 TURBO) นำข้าวกล้องที่ได้ไปบดด้วยเครื่องบดและคัดขนาดด้วยตะแกรงคัดขนาด (Mesh no.60) แล้วจึงเก็บในถุงชนิดอะลูมิเนียมฟอยด์แบบปิดสนิท อุณหภูมิ 4°C (Chooklin, 2013) นำไปวิเคราะห์คุณภาพทางด้านกายภาพและทางด้านเคมี

นำจิ้งหรีด (สายพันธุ์ทองแดงลายหรือสะตังระยะตัวเต็มวัย) จากฟาร์มนายทั้ง อ.เชียรใหญ่ จ.นครศรีธรรมราช มาแช่ในน้ำเย็น ตักออกด้วยกระชอนใส่ลงในน้ำสะอาด ล้างด้วยน้ำ 3 ครั้ง นำไป

ลวกในน้ำต้มเดือด (10 min) อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (80°C, 8 hr) บดด้วยเครื่องปั่น (WF-10B) เก็บในถุงอะลูมิเนียมฟอยด์ปิดสนิทที่อุณหภูมิ 4°C ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณภาพ

2. วิเคราะห์คุณภาพของข้าวไร่นครและผงจิ้งหรีด

วิเคราะห์คุณภาพทางด้านกายภาพ ได้แก่ ค่าสี (L^* , a^* และ b^*) โดยใช้เครื่อง Hunter Lab ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) และวิเคราะห์คุณภาพทางด้านเคมี ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี (Proximate analysis) ประกอบด้วย ความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน เส้นใย และคาร์โบไฮเดรต ตามวิธีของ AOAC (2000) ความสามารถในการต้านออกซิเดชันโดยวิธี DPPH (2,2 diphenyl-1-picrylhydrazyl scavenging activity) ตามวิธีทดสอบของ Brand-Williams *et al.* (1995)

3. ศึกษาอัตราส่วนของผงจิ้งหรีดและข้าวไร่นครต่อคุณภาพของเอ็กซ์ทรูเดต

นำแป้งข้าวไร่นครและผงจิ้งหรีด (ข้อ 1) บดผสมกับแป้งข้าวเจ้า เกล็ดข้าวโพด น้ำมันพืช น้ำตาล และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในเครื่องผสม จากนั้นนำส่วนผสมดังกล่าวแสดงในตารางที่ 1 - 2 ไปแปรรูป โดยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder, CTE-D22L32) ใช้ด้าย (วงกลม 1 รู ขนาด 4 mm) ป้อนส่วนผสมด้วยอัตรา 10 rpm ความชื้นของวัตถุดิบผสม 12 (%w/w) ความเร็วรอบสกรู 450 rpm อุณหภูมิบาร์เรล 40, 100, 120, 130, 130, 130 และคาย 145°C ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สูตรของเอ็กซ์ทราคตจากผงจิ้งหรีด

ส่วนผสม (ร้อยละ)	สูตรควบคุม	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
ผงจิ้งหรีด	0	5	10	20
แป้งข้าวเจ้า	40	35	30	20
แป้งข้าวกล้องเม็ดย้าย	5	5	5	5
เกล็ดข้าวโพด	46	46	46	46
น้ำมันพืช	3	3	3	3
น้ำตาลทราย	5	5	5	5
แคลเซียมคาร์บอเนต	1	1	1	1

ที่มา: คัดแปลงจาก Arsanahsark *et al.* (2021)

ตารางที่ 2 สูตรของเอ็กซ์ทราคตจากข้าวไร่นครและผงจิ้งหรีด

ส่วนผสม (ร้อยละ)	สูตรควบคุม	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5
แป้งข้าวกล้องสังข์หยด	0	3.75	7.5	15	30	20
แป้งข้าวกล้องเม็ดย้าย	0	1.25	2.5	5	10	20
ผงจิ้งหรีด	5	5	5	5	5	5
แป้งข้าวเจ้า	40	35	30	20	0	0
เกล็ดข้าวโพด	46	46	46	46	46	46
น้ำมันพืช	3	3	3	3	3	3
น้ำตาลทราย	5	5	5	5	5	5
แคลเซียมคาร์บอเนต	1	1	1	1	1	1

ที่มา: คัดแปลงจาก Arsanahsark *et al.* (2021)

4. ศึกษาคุณภาพทางด้านกายภาพ ทางด้านเคมีและทางด้านประสาทสัมผัสของขนมขบเคี้ยวจากเอ็กซ์ทราคตเสริมผงจิ้งหรีด

นำเอ็กซ์ทราคตที่ได้ (ข้อ 3) วิเคราะห์คุณภาพทางด้านกายภาพ ทางด้านเคมีและทางด้านประสาทสัมผัส ดังนี้

1. คุณภาพทางด้านกายภาพ ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) โดยเครื่อง Texture analyzer (TA.XTplus) สี (L^* , a^* และ b^*) โดยเครื่อง Spectrophotometer

น้ำอิสระ (a_w) ความหนาแน่น (Bulk density) คัดแปลงมาจากวิธีการของ Chanlat *et al.* (2011) อัตราการขยายตัว (Expansion ratio) วัดโดยใช้เวอร์เนียจจากตัวอย่างเอ็กซ์ทราคตจำนวน 10 ตัวอย่าง

2. คุณภาพทางด้านเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture content) ตามวิธีของ AOAC (2000) ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic) ตามวิธีของ Singleton *et al.* (1999) กิจกรรมการต้านออกซิเดชัน (Antioxidant activity) ตามวิธีของ

Brand-Williams *et al.* (1995) ข้อมูลโภชนาการ (Nutrition information) ตามวิธีของ AOAC (2000)

3. คุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสโดยวิธีการให้คะแนนความชอบ แบบวิธี 9 - point hedonic scale โดยใช้ผู้ทดสอบไม่ได้ผ่านการฝึกฝน 50 คน

5. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Completely randomized design (CRD) สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพทางเนื้อสัมผัสวางแผนการทดลองแบบ Randomized completely block design (RCBD) สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพประสาทสัมผัส ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. คุณภาพของข้าวไร่นครและผงจิ้งหรีด

1.1 คุณภาพทางด้านกายภาพและทางด้านเคมีข้าวไร่นคร

การวิเคราะห์คุณภาพทางด้านกายภาพและทางด้านเคมีของแป้งข้าวกล้องเม็ดยาว (ตารางที่ 3) พบว่า แป้งข้าวกล้องเม็ดยาวมีสีม่วงเข้ม ขนาดอนุภาค 250 μm มีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เท่ากับ 48.26, 4.91 และ 0.87 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยข้าวมีสีจากการศึกษาของ Somto (2004) ที่รายงานว่า คุณลักษณะทางกายภาพ ทางเคมีและความคงตัวของข้าวที่มีรงควัตถุมีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เท่ากับ 61.8, 3.16 และ 0.65 ตามลำดับ ส่วนผลการวิเคราะห์

คุณภาพทางด้านเคมีของแป้งข้าวกล้องเม็ดยาวแสดงดังตารางที่ 3 พบว่า องค์ประกอบทางเคมี (Proximate analysis) แป้งข้าวกล้องเม็ดยาว ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้าและคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 7.25%, 2.55%, 0.77%, 1.73% และ 77.95% (w/w) ตามลำดับ สำหรับการต้านออกซิเดชันและปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของแป้งข้าวกล้องเม็ดยาวเท่ากับ 6.94 mg vitamin C/g DW และ 0.74 mg GAE/g DW ตามลำดับ ในการศึกษาของ Somto (2004) ที่ศึกษาคุณลักษณะทางเคมีของข้าวเจ้าไร่ สันป่าตอง พบว่า ค่าโปรตีน ไขมัน เถ้าและคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 6.68%, 2.86%, 1.16% และ 89.30% (w/w) ตามลำดับ และในงานวิจัยของ Posiri *et al.* (2020) ได้ศึกษาข้าวเจ้าพันธุ์เม็ดยาว พบว่า ข้าวกล้องเม็ดยาวมีสีม่วงดำ ปริมาณโปรตีน 9.44% และปริมาณสารประกอบฟีนอลิก 294.43 mg/kg

การวิเคราะห์คุณภาพทางด้านกายภาพและทางด้านเคมีของแป้งข้าวกล้องสังข์หยดแสดงดังตารางที่ 3 พบว่า แป้งข้าวกล้องสังข์หยดมีสีของข้าวแดงอ่อน ขนาดอนุภาค 250 μm มีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เท่ากับ 79.81, 3.69 และ 14.17 ตามลำดับ ส่วนผลการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านเคมีของแป้งข้าวกล้องสังข์หยดแสดงดังตารางที่ 3 พบว่า องค์ประกอบทางด้านเคมีแป้งข้าวกล้องสังข์หยด ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า และคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 8.81%, 1.87%, 4.45%, 1.08% และ 73.72% (w/w) ตามลำดับ เช่นเดียวกับในการศึกษาของ Chooklin (2013) ที่วิเคราะห์คุณสมบัติข้าวกล้องสังข์หยด พบว่า ค่าโปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้าเท่ากับ 10.36%, 2.67%, 4.51%, 1.42% (w/w) ตามลำดับ สำหรับการต้านออกซิเดชันและปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของแป้งข้าวกล้องสังข์หยดเท่ากับ 0.53 mg vitamin C/g DW และ 0.03 mg GAE/g DW ตามลำดับ ดังนั้น

ข้าวกล้องเมล็ดฝ้ายจึงถูกเลือกนำไปศึกษาต่อเนื่องจาก ฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่ากล้องสังข์หยด
มีค่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระและปริมาณ

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางด้านกายภาพและทางด้านเคมีของแป้งข้าวกล้องไร่นคร

คุณสมบัติ	แป้งข้าวกล้อง	
	เมล็ดฝ้าย	สังข์หยด
		
ทางด้านกายภาพ		
- ค่าสี		
L*	48.26±0.01	79.81±0.19
a*	4.91±0.02	3.69±0.09
b*	0.87±0.01	14.17±0.07
- ขนาดอนุภาค (μm)	250	250
ทางด้านเคมี		
- ความชื้น (%w/w)	10.52±0.15	10.70±0.45
- โปรตีน (%w/w)	7.25±0.09	8.81±0.06
- ไขมัน (%w/w)	2.55±0.08	1.87±0.34
- เส้นใย (%w/w)	0.77±0.90	4.45±0.13
- เถ้า (%w/w)	1.73±0.02	1.08±0.06
- คาร์โบไฮเดรต (%w/w)	77.95±0.05	73.72±0.03
- น้ำอิสระ (a _w)	0.52±0.01	0.44±0.01
- การต้านอนุมูลอิสระด้วย DPPH (mg vitamin C/g DW)	6.94±0.11	0.53±0.04
- ฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g DW)	0.74±0.009	0.03±0.01

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ค่า SD (3 ซ้ำ)

1.2 คุณภาพทางด้านกายภาพและทางด้านเคมีของผงจิ้งหรีด

ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านกายภาพของผงจิ้งหรีด (ตารางที่ 4) พบว่า ผงจิ้งหรีดอบแห้งมีสีน้ำตาลเข้ม ขนาดอนุภาค 1 mm มีค่าสี (L*, a* และ b*) เท่ากับ 32.13, 6.40 และ 14.85 ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Bassett (2018) ศึกษาเปรียบเทียบ

คุณสมบัติเชิงหน้าที่ คุณค่าทางโภชนาการและด้านประสาทสัมผัสของผงจิ้งหรีดอบแห้ง (แบบพ่นฝอยและตู้อบ) พบว่า ค่าสี (L*, a* และ b*) เท่ากับ 34.68 10.58 และ 19.72 ตามลำดับ ส่วนผลการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านเคมีของผงจิ้งหรีด (ตารางที่ 4) พบว่า ผงจิ้งหรีดมีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงโดยมีค่า 60.40% และ 16.92% (w/w) ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ

Bassett (2018) ที่รายงานว่าจิ้งหรีดมีปริมาณโปรตีนและไขมัน 65.875 และ 17.70% (w/w) ตามลำดับ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Udomsil *et al.* (2019)

ดังตารางที่ 4 ดังนั้น ผงจิ้งหรีดเป็นแหล่งของสารอาหารสำคัญโดยเฉพาะโปรตีนและไขมันจึงเหมาะจะนำไปใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพ

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางด้านกายภาพและทางด้านเคมีของผงจิ้งหรีดอบแห้ง

คุณสมบัติ	สายพันธุ์		
	ทองแดงลาย ^a	ทองแดงลาย ^b	ทองคำ ^b
ทางกายภาพ			
- ค่าสี			
L*	32.13±0.42	na	na
a*	6.40±0.14	na	na
b*	14.85±0.30	na	na
- ขนาดอนุภาค (mm)	1.00	na	na
ทางเคมี			
- ความชื้น (%w/w)	12.64±0.01	6.30±0.04	3.00±0.03
- โปรตีน (%w/w)	60.40±0.25	71.70±0.50	60.70±0.40
- ไขมัน (%w/w)	16.92±4.07	10.40±0.10	23.40±0.10
- เส้นใย (%w/w)	12.93±0.57	4.60±0.20	10.0±0.30
- เถ้า (%w/w)	3.81±0.05	5.40±0.30	2.80±0.06
- คาร์โบไฮเดรต (%w/w)	6.23±0.69	1.60±0.10	0.10±0.01
- น้ำอิสระ (a _w)	0.48±0.01	na	na

หมายเหตุ: ^a งานวิจัยนี้ ^b Udomsil *et al.* (2019) na: ไม่ได้วิเคราะห์

2. ผลของอัตราส่วนของผงจิ้งหรีดต่อคุณภาพของเอ็กซ์ทราคต

การศึกษาปริมาณผงจิ้งหรีดต่อคุณภาพของเอ็กซ์ทราคต แสดงดังตารางที่ 5 พบว่า การเพิ่มปริมาณผงจิ้งหรีด 0-20 (%w/w) ส่งผลให้ลักษณะปรากฏของเอ็กซ์ทราคตที่ได้มีสีเข้มขึ้นตามปริมาณของผงจิ้งหรีดสามารถอธิบายได้ว่าเกิดมาจากลักษณะของผงจิ้งหรีดมีสีน้ำตาลเข้ม แต่ค่า L* ลดลงจาก 70.84 เป็น 54.18 ส่วนค่า a* เพิ่มขึ้นจาก 6.89 เป็น 9.04 และค่า b* ลดลงจาก 37.64 เป็น 25.72 ตามปริมาณผงจิ้งหรีดที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับ Alam *et al.* (2019) ซึ่งศึกษาผลของ

กระบวนการเอ็กซ์ทราคชัน ต่อคุณสมบัติทางด้านกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราคตเสริมแมลง พบว่า ค่า L* ลดลงจาก 59.10 เป็น 29.7 ค่า a* เพิ่มขึ้นจาก 1.90 เป็น 4.60 และค่า b* ลดลงจาก 26.20 เป็น 4.30 ตามปริมาณแมลงที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าการฟองตัวมีค่าลดลงจาก 5.13 เป็น 2.61 การฟองตัวของผลิตภัณฑ์อาหารในระบบเอ็กซ์ทราคชันเกิดจากความแตกต่างของความดันตรงบริเวณหน้าแปลนและความดันบรรยากาศภายนอก โดยการฟองตัวเกิดขึ้นเนื่องจากองค์ประกอบที่เป็นแก๊สเกิดเจลาตินในเซชัน แป้งสุกและหลอมเหลวที่บริเวณหลังหน้าแปลน เมื่อความดันในเครื่องเพิ่มสูงขึ้น และแก๊ส

ที่หลอมเหลวถูกผลักดันผ่านหน้าแปลนมาสู่ความดันบรรยากาศที่ต่ำกว่าทำให้น้ำในอาหารเกิดการระเหยตัวอย่างรวดเร็ว ในขณะที่เดียวกันก็ดันเนื้อเยื่ออาหารให้โป่งพองออกเกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ผลลัพธ์จึงมีการพองตัวขึ้น ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.15 เป็น 3.41 kN เมื่อปริมาณผงจึงหรีดเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 20% (w/w) สอดคล้องกับ Azzollini *et al.* (2018) ที่ศึกษาผลของสูตรและสภาวะของกระบวนการต่อโครงสร้างขนาดจุลภาค ลักษณะเนื้อสัมผัสและการย่อยขนมขบเคี้ยวเสริมแมลงซึ่ง พบว่า ค่าความแข็งขนมขบเคี้ยวจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.12 เป็น 0.49 kN เมื่อปริมาณแมลงเพิ่มขึ้น จาก 0% เป็น 20% (w/w) เนื่องจากความเป็นรูพรุนในตัวอย่างลดลงต่ำกว่า 50% จากปริมาณโปรตีนที่เพิ่มขึ้น 2% เมื่อปริมาณโปรตีน

เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการพองตัวลดลง และมีความหนาแน่นสูง เนื่องมาจากแป้งเกิดการรวมตัวกับโปรตีนหากให้ความร้อนทำให้โมเลกุลโปรตีนเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับสายอะไมโลส ส่งผลให้แป้งมีอัตราการดูดซับน้ำลดลง การเกิดเจลลาตินในช่องสตาร์ชต่ำ จึงทำให้เม็ดแป้งมีอัตราการพองตัวลดลง นอกจากนี้ ปริมาณไขมันในผงโปรตีนจะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะและคุณสมบัติของแป้งโดยไขมัน จะลดการจับตัวกับ น้ำของแป้งทำให้ความสามารถในการพองตัวของเม็ดแป้งลดลงเช่นกัน (Sriwilai *et al.*, 2018) ดังนั้น ปริมาณผงจึงหรีดที่ 5% (w/w) ได้นำไปศึกษาต่อเพราะมีค่าการพองตัวสูงสุด และค่าความแข็งที่ไม่แตกต่างกับตัวอย่างควบคุม

ตารางที่ 5 ผลของปริมาณผงจึงหรีดต่อคุณสมบัติทางด้านกายภาพเอ็กซ์ทรูเดต

ผงจึงหรีด (%)	ความแข็ง (kN)	อัตราการ พองตัว	สี		
			L*	a*	b*
0	0.15 ^c ± 0.04	5.13 ^a ± 0.13	70.84 ^a ± 0.11	6.89 ^d ± 0.06	37.64 ^a ± 0.53
5	0.16 ^c ± 0.02	4.14 ^b ± 0.02	68.56 ^b ± 0.16	7.67 ^c ± 0.04	29.91 ^b ± 0.05
10	0.88 ^b ± 0.01	3.70 ^c ± 0.02	62.60 ^c ± 0.14	8.42 ^b ± 0.08	29.02 ^c ± 0.08
15	1.06 ^b ± 0.01	2.73 ^d ± 0.05	59.96 ^d ± 0.13	8.42 ^b ± 0.08	28.21 ^d ± 0.04
20	3.41 ^a ± 0.27	2.61 ^d ± 0.06	54.18 ^c ± 0.32	9.04 ^a ± 0.01	25.72 ^c ± 0.15

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่กำกับค่าเฉลี่ยที่เหมือนกันในแนวตั้งเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

3. ผลของปริมาณแป้งข้าวกล้องไร่นครต่อคุณภาพของเอ็กซ์ทรูเดต

การศึกษ ปริมาณแป้งข้าวกล้องไร่นคร (0-40% w/w) ปริมาณผงจึงหรีด 5% w/w ต่อคุณภาพของเอ็กซ์ทรูเดต แสดงดังภาพที่ 1 และตารางที่ 6 พบว่า ลักษณะโครงสร้างภายในที่เป็นรูพรุนของเอ็กซ์ทรูเดตแต่ละสูตรจะแตกต่างกัน ส่วนลักษณะจากภายนอกด้าน สี ของเอ็กซ์ ทรูเดต มีการ

เปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองทองเป็นน้ำตาลเข้มมากขึ้นตามปริมาณของแป้งข้าวกล้องไร่นครทั้ง 2 สายพันธุ์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางด้านกายภาพและทางด้านเคมีของเอ็กซ์ทรูเดตแป้งข้าวกล้องไร่นครทั้ง 2 สายพันธุ์ พบว่า ค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 6.59-7.82% (w/w) ค่าการพองตัวมีค่าลดลง เนื่องมาจากแป้งข้าวกล้องมีปริมาณใยอาหารและไขมันค่อนข้างสูงซึ่งใยอาหารจะขัดขวางการพองตัวเม็ดแป้งทำให้

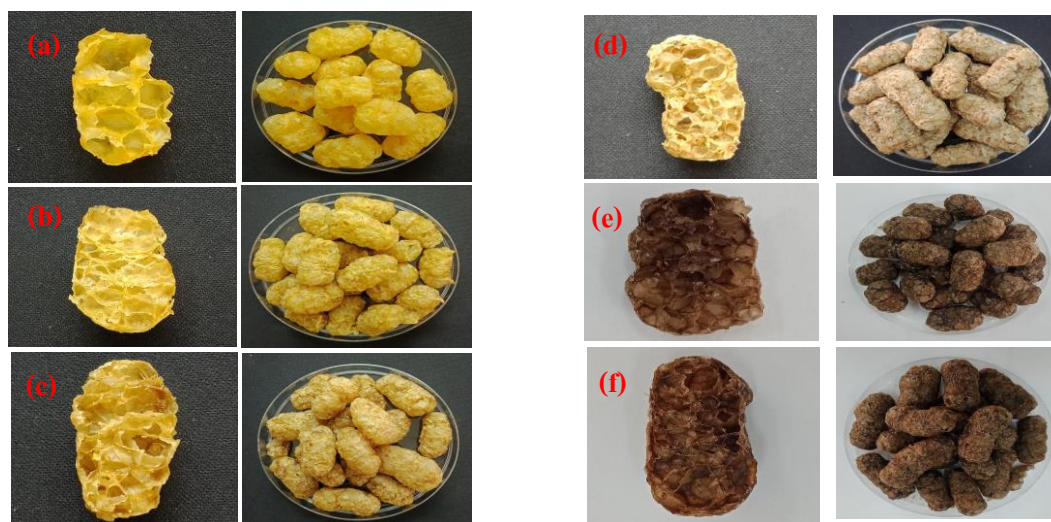
ผลิตภัณฑ์พองตัวได้น้อยและไม่สม่ำเสมอ และองค์ประกอบของไขมันอาจจะลดการพองตัวของเม็ดแป้งโดยไปขัดขวางการดูดซึมน้ำของแป้ง (Lekjing *et al.*, 2019) ส่วนความหนาแน่นรวมมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นรวมเป็นดัชนีที่บ่งชี้ถึงการพองตัวของผลิตภัณฑ์ โดยที่เอ็กซ์ทรูเดที่พองตัวได้มากจะมีค่าความหนาแน่นรวมต่ำ ในขณะที่เอ็กซ์ทรูเดที่พองตัวน้อยจะมีความหนาแน่นรวมสูง ลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นสมบัติที่สำคัญสมบัติหนึ่งของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่มีผลต่อการตัดสินใจและการเลือกซื้อของผู้บริโภคโดยลักษณะเนื้อสัมผัสนี้เกิดขึ้นจากการที่แป้งได้รับความร้อนและความดัน

ภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ทำให้อุณหภูมิภายในอาหารเกิดการระเหยตัวออกไปและเกิดการพองตัวขึ้นเมื่อผลิตภัณฑ์ออกจากเครื่องแล้ว การพองตัวนี้สัมพันธ์กับความแข็ง และความกรอบของผลิตภัณฑ์โดยการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยการวัดแรงตัดสูงสุดที่ทำให้ผลิตภัณฑ์แตกหักเลียนแบบการเคี้ยวด้วยฟันแปรผลในเทอมของความแข็ง พบว่า ค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้น แต่ค่าสี (L^* , a^* และ b^*) มีค่าลดลงเนื่องมาจากสารสีจำพวกแอนโทไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุตามธรรมชาติที่มีอยู่แล้วในแป้งข้าวกล้อง (Lekjing *et al.*, 2019) (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 6 คุณสมบัติทางด้านกายภาพและทางด้านเคมีเอ็กซ์ทรูเดแป้งข้าวกล้องไร้เนย

สูตร	คุณสมบัติทางด้านกายภาพ					คุณสมบัติทางด้านเคมี	
	อัตราส่วนพองตัว	สี			ความแข็ง (kN)×10 ⁻³	ความหนาแน่นรวม (g/mL)×10 ⁻²	ความชื้น (%)
		L*	a*	b*			
ควบคุม	3.91 ^a ±0.15	57.91 ^a ±1.42	7.77 ^a ±0.30	35.81 ^a ±0.42	5.51 ^c ±1.90	3.85 ^c ±0.0009	7.49 ^a ±0.17
1	3.67 ^b ±0.04	53.19 ^b ±1.40	4.30 ^c ±0.12	21.65 ^b ±0.55	7.17 ^b ±2.22	4.56 ^b ±0.0016	7.82 ^a ±0.07
2	3.45 ^c ±0.18	46.90 ^c ±0.02	5.37 ^b ±0.02	21.65 ^{cb} ±0.55	7.25 ^b ±2.32	5.38 ^a ±0.0041	6.74 ^b ±0.21
3	3.40 ^c ±0.11	43.80 ^d ±0.67	5.30 ^b ±0.11	17.79 ^c ±0.34	7.61 ^b ±1.69	5.59 ^a ±0.0028	7.09 ^b ±0.02
4	3.22 ^d ±0.20	37.85 ^c ±1.27	5.31 ^b ±0.08	17.44 ^c ±0.04	8.29 ^a ±1.78	5.70 ^a ±0.0014	6.59 ^c ±0.03
5	3.00 ^e ±0.17	35.30 ^c ±0.30	5.93 ^b ±0.04	12.15 ^d ±0.27	8.42 ^a ±4.50	5.83 ^a ±0.0038	6.73 ^c ±0.15

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่กำกับค่าเฉลี่ยที่เหมือนกันในแนวตั้งเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)



ภาพที่ 1 ลักษณะปรากฏเอ็กซ์ทรูเดตแป้งข้าวกล้องไร่นคร: (a) สูตรควบคุม (b) สูตรที่ 1 (c) สูตรที่ 2 (d) สูตรที่ 3 (e) สูตรที่ 4 (f) สูตรที่ 5

จากผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัสและความชอบ โดยรวมของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่มีการทดแทนด้วยแป้งข้าวกล้องไร่นครเสริมผงจิ้งหรีดในปริมาณแตกต่างกันได้แสดงผลในตารางที่ 7 พบว่า ผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตจากข้าวไร่นครมีคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สีและความชอบรวมลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม เนื่องจากผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตจากข้าวไร่นคร

มีลักษณะการพองตัวไม่ดีไม่สม่ำเสมอ และสีจะเข้มมากขึ้น ในขณะที่ความชอบด้านกลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตสูตรที่ 3 (แป้งข้าวกล้องไร่นคร 30% (เมล็ดในฝ้าย 5%, สังข์หยด 15%)) ได้รับคะแนนเนื้อสัมผัสและความชอบรวมไม่แตกต่างกับตัวอย่างควบคุม เอ็กซ์ทรูเดตมีคะแนนความชอบรวมสูงสุด (7.67) เปรียบเทียบกับตัวอย่างทดลองอื่น ๆ

ตารางที่ 7 คุณสมบัติทางประสาทสัมผัสของเอ็กซ์ทรูเดตข้าวไร่นคร

สูตร	คุณสมบัติทางประสาทสัมผัส				
	สี	กลิ่น	รส	เนื้อสัมผัส	ความชอบรวม
ควบคุม	7.53 ^a	7.40 ^a	7.50 ^{ab}	7.93 ^a	7.70 ^a
1	7.20 ^{ab}	7.37 ^a	7.53 ^{ab}	7.70 ^a	7.23 ^b
2	7.20 ^{ab}	7.43 ^a	7.20 ^b	7.60 ^a	7.23 ^b
3	7.30 ^{ab}	7.43 ^a	7.73 ^a	7.80 ^a	7.67 ^a
4	6.93 ^b	7.30 ^a	7.43 ^{ab}	7.93 ^a	7.30 ^{ab}
5	6.90 ^b	7.30 ^a	7.40 ^{ab}	7.67 ^a	7.23 ^b

เมื่อนำผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราคต์ที่เหมาะสม (สูตรที่ 3) ปริมาณบรรจุ 30 กรัม ไปวิเคราะห์ผลากโภชนาการ (บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด) พบว่า มีค่าพลังงาน 110 kcal น้ำตาล

< 1 g ไขมัน 1.5 g และ โซเดียม 100 mg (ภาพที่ 2) ตามลำดับ

ฉลากโภชนาการไทย (ย่อ)

ข้อมูลโภชนาการ	
หนึ่งหน่วยบริโภค : 1 ถ้วย (30 กรัม)	
จำนวนหน่วยบริโภคต่อถ้วย : 1	
คุณค่าทางโภชนาการต่อหนึ่งหน่วยบริโภค	
พลังงานทั้งหมด 110 กิโลแคลอรี	
ร้อยละของปริมาณที่แนะนำต่อวัน *	
ไขมันทั้งหมด 1.5 ก.	2%
คอเลสเตอรอล น้อยกว่า 5 มก.	1%
โปรตีน 3 ก.	
คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด 22 ก.	7%
น้ำตาล น้อยกว่า 1 ก.	
โซเดียม 100 มก.	5%

* ร้อยละของปริมาณสารอาหารที่แนะนำให้บริโภคต่อวันสำหรับคนไทยอายุตั้งแต่ 6 ปีขึ้นไป (Thai RDI) โดยคิดจากความต้องการพลังงานวันละ 2,000 กิโลแคลอรี

คุณค่าทางโภชนาการต่อ 1 ถ้วย

พลังงาน	น้ำตาล	ไขมัน	โซเดียม
110	น้อยกว่า 1	1.5	100
กิโลแคลอรี	กรัม	กรัม	มิลลิกรัม
*6%	*1%	*2%	*5%

* คิดเป็นร้อยละของปริมาณสูงสุดที่บริโภคได้ต่อวัน

ภาพที่ 2 คุณค่าทางโภชนาการของเอ็กซ์ทราคต์ข้าวไร้นครเสริมผงจิ้งหรีด

สรุป

คุณสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าวกล้องไร้นครทั้งสองสายพันธุ์ (เมล็ดฝ้ายและสังข์หยด) เป็นข้าวที่มีสี ขนาดอนุภาค 250 μm ค่า L^* เท่ากับ 48.26-79.81 ค่า a^* เท่ากับ 3.69-4.91 และค่า b^* เท่ากับ 0.87-14.17 ส่วนคุณสมบัติทางเคมีของแป้งข้าวกล้องไร้นครทั้งสองสายพันธุ์มีค่าโปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้าและคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 7.25-8.81%, 1.87-2.55%, 0.77-4.45%, 1.08-1.73% และ 73.72-77.95% (w/w) ตามลำดับ ค่าการต้านออกซิเดชันและปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดของแป้งข้าวกล้องเมล็ดฝ้าย (6.94 mg vitamin C/g DW และ 0.74 mg GAE/g DW) มีค่าสูงกว่าแป้งข้าวกล้องสังข์หยด (0.53 mg vitamin C/g DW และ 0.03 mg GAE/g DW) สำหรับผงจิ้งหรีดมีสีน้ำตาลเข้ม ขนาดของอนุภาค 1 mm ค่าสี L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 32.13 6.40 และ 14.85 ตามลำดับ และมี

ปริมาณโปรตีน (60.40%w/w) และไขมัน (16.92%w/w) ที่สูง การเพิ่มปริมาณผงจิ้งหรีดและปริมาณข้าวกล้องไร้นครเมืองนครจะส่งผลต่อเอ็กซ์ทราคต์ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการพองตัวลดลง และค่าสีมีค่า L^* และ b^* ลดลง แต่ค่า a^* เพิ่มขึ้น ผลของสัดส่วนของผงจิ้งหรีดและข้าวกล้องเมล็ดฝ้าย 5% (w/w) จะได้เอ็กซ์ทราคต์ (ค่าการพองตัวสูงและค่าความแข็งต่ำ) เหมาะสมที่สุด โดยการเพิ่มปริมาณแป้งข้าวกล้องไร้นครจะส่งผลให้เอ็กซ์ทราคต์มีค่าการพองตัว ค่าสี (L^* , a^* และ b^*) ลดลง แต่ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความแข็งเพิ่มขึ้น โดยที่แป้งข้าวกล้องไร้นครเมืองนคร 30% (w/w) และผงจิ้งหรีด 5% (w/w) ได้เอ็กซ์ทราคต์มีค่าคะแนนความชอบรวมสูงสุด (7.67) และคุณค่าทางโภชนาการของเอ็กซ์ทราคต์ (ขนาดบรรจุ 30 g) มีค่าพลังงาน น้ำตาล

ไขมันและโซเดียมเท่ากับ 110 kcal, < 1 g, 1.5 g และ 100 mg ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

- Alam, M.R., Scampicchio, M., Angeli, S. and Ferrentino, G. 2019. Effect of hot melt extrusion on physical and functional properties of insect based extruded products. **Journal of Food Engineering** 259: 44-51.
- AOAC. 2000. **Official Methods of AOAC International**. 17th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Inc, USA.
- Arsanahsark, P., Kongthong, S. and Chooklin, S. 2021. Utilization of Anchovy Head Residues Supplemented with Protein and Calcium in Food Products. **RMUTSV Research Journal** 13(1): 201-215. (in Thai)
- Azzollini, D., Derossi, A., Fogliano, V., Lakemond, C.M.M. and Severini, C. 2018. Effects of formulation and process conditions on microstructure, texture and digestibility of extruded insect-riched snacks. **Innovative Food Science and Emerging Technologies** 45: 344-353.
- Bassett, F.S. 2018. Comparison of functional, nutritional, and sensory properties of spray-dried and oven-dried cricket (*Acheta domesticus*) powder. Master Thesis of science, Brigham Young University.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M.E. and Berset, C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. **LWT-Food Science and Technology** 28(1): 25-30.
- Chaiyakul, S., Jangchud, K., Jangchud, A. and Wuttijumnong, P. 2009. Effect of extrusion on physical and chemical properties of high protein glutinous rice-base snack. **LWT-Food Science and Technology** 42(3): 781-787.
- Chanlat, N., Songsermpong, S., Charunuch, C. and Naivikul, O. 2011. Twin - screw extrusion of pre-germinated brown rice: physicochemical properties and γ -aminobutyric acid content (GABA) of extruded snacks. **International Journal of Food Engineering** 7(4): 1-15.
- Chooklin, S. 2013. Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from brown rice and their antioxidant activities. **Kasetsart Journal (Natural Science)** 47: 864-873.
- Food Intelligence Center. 2016. **Snack Industry**. Available Source: http://www.fic.nfi.or.th/foodindustry_ceo_view.php?smid=1327, August 28, 2021. (in Thai)
- Hanboonsong, Y., Jamjanya, T. and Durst, P. 2013. **Six-legged livestock: edible insect farming, collection and marketing in Thailand**. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Thailand.
- Jampchanya, T., Thaworanukulkit, C. and Utthamawetin, P. 2007. **Production of edible insects for economy and nutrition of community: crickets**. Available Source: https://www.agkb.lib.ku.ac.th/kku/search_detail/result/160790, February 23, 2023. (in Thai)
- Lekjing, S., Noonim, P., Boottajean, S. and Chantawong, P. 2019. Effect of substitution of wheat flour with Sangyod brown rice flour

- on physicochemical and sensory qualities in snack product. **Khon Kaen Agriculture Journal** 47: 679-684. (in Thai)
- Liang, Y., Hosahalli, S. and Ramaswamy, J.B. 2013. Protein rich extruded products prepared from soy protein isolate-corn flour blends. **LWT-Food Science and Technology** 50: 279-289.
- Posiri, D., Jumruskarn, R., Plaiduang, S., Suwanno, S., Boonyanupong, U., Klinmanee, C., Thongdej, O., Sengsim, P., Kaewnango, E., Rattana, P., Wongpiyachon, S., Cheapun, K., Sukviwat, W. and Wasusun, A. 2020. Med Fai 62, a Non-glutinous Rice Variety. **Thai Rice Research Journal** 11(1): 44-57. (in Thai)
- Promkhan, S., Saithi, S. and Wongbasg, C. 2020. Effect of drying conditions and shelf life of crispy cricket product. **Khon Kaen Agriculture Journal** 48(1): 1-12. (in Thai)
- Singleton, V.L., Orthofer, R. and Lamuela-Raventos, R.M. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. **Methods Enzymol** 299: 152-179.
- Somto, S. 2004. Physical and chemical characteristics and stability of Thai pigmented rice. Master Thesis of Food Technology, Silpakom University. (in Thai)
- Sriwilai, S., Chalermchaiwat, P., Siri Wong, N. and Chantaro, P. 2018. The influence of barrel temperature and feed moisture on chemical, physical and sensory quality of high protein extrudates from khao dawk mali 105 brown rice flour. **King Mongkut's Agricultural Journal** 36(3): 158-167. (in Thai)
- Suriya, K. and Worrasuwanrak, C. 2016. **Brown Rice and Whey Protein on Physical and Chemical Properties of Product**. Available Source: https://www.agro.cmu.ac.th/agro60/school/fst/601499/research_exercise_journal/file_upload/551310012.pdf, August 28, 2021. (in Thai)
- Trade Policy and Strategy Office. 2022. **Insect protein alternatives and value-added of agricultural products**. Available Source: <http://www.tpso.moc.go.th/th/node/11829>, July 18, 2022. (in Thai)
- Udomsil, N., Imsoonthornruksa, S., Goslawit, C. and Ketudat-Cairns, M. 2019. Nutritional values and functional properties of house cricket (*Acheta domesticus*) and field cricket (*Gryllus bimaculatus*). **Food Science and Technology Research** 25(4): 597-605.

การทดสอบภาวะสารูปดีสำหรับการแจกแจงແປປາ 4 พารามิเตอร์

The Goodness-of-Fit Test for Four - Parameter Kappa Distribution

เบญจวรรณ รัตนวงศ์ คณิงนิจ ประคำมินทร์ และ นิภาดา พากัดดี*

Benjawan Rattanawong, Khanuengnij Prakhamin and Nipada Papukdee *

Received: 12 July 2021, Revised: 5 July 2022, Accepted: 16 August 2022

บทคัดย่อ

ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าประมาณกำลังการทดสอบของสถิติการทดสอบภาวะสารูปดีสำหรับการแจกแจงແປປາ 4 พารามิเตอร์ โดยสถิติทดสอบที่ใช้ในการศึกษามีทั้งหมด 6 ตัว ได้แก่ สถิติทดสอบคอลโมโกรอฟ-สมิรโนฟ (Kolmogorov-Smirnov, KS) สถิติทดสอบแอนเดอร์สัน-ดาร์ลิ่ง (Anderson-Darling, AD) สถิติทดสอบแอนเดอร์สัน-ดาร์ลิ่งปรับปรุง (Modified Anderson-Darling, B^2) สถิติทดสอบครามเมอร์-วอน-มิสส์ (Cramer-von Mises, CVM) สถิติทดสอบซาง-แอนเดอร์สัน-ดาร์ลิ่ง (Zhang Anderson-Darling, ZAD) และสถิติทดสอบซาง-ครามเมอร์-วอน-มิสส์ (Zhang Cramer von-Mises, $ZCVM$) สำหรับการแจกแจงແປປາ 4 พารามิเตอร์ (Four-parameter kappa distribution : K4D) สำหรับการหาค่าประมาณกำลังการทดสอบ การแจกแจงของข้อมูลที่ศึกษา มี 2 ลักษณะการแจกแจง คือ การแจกแจงสมมาตรและการแจกแจงไม่สมมาตร ได้ใช้หลักการของมอนติคาร์โล (Monte-Carlo Method) ในการจำลองสถานการณ์ข้อมูล โดยทำซ้ำ 10,000 รอบ ผลศึกษาพบว่า เมื่อข้อมูลมีการแจกแจงแบบสมมาตรและไม่สมมาตร สถิติทดสอบที่ให้กำลังการทดสอบสูงที่สุดคือ สถิติทดสอบ ZAD

คำสำคัญ: การแจกแจงແປປາ 4 พารามิเตอร์, การทดสอบภาวะสารูปดี, กำลังการทดสอบ

สาขาวิชาสถิติประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
Applied Statistics Department, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Muang, Khon Kaen 40000, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): nipada.pa@rmu.ac.th Tel: 08 8552 1606

ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the comparison of the power of test statistic by a goodness of fit test for Four Parameter Kappa Distribution. The test with 6 types of goodness-of-fit-test include Kolmogorov-Smirnov (KS), Anderson-Darling (AD), Modified Anderson-Darling (B^2), Cramer-von Mises (CVM), Zhang Anderson-Darling (ZAD) and Zhang Cramer von-Mises ($ZCVM$). For estimating function, the power of test statistics with two distributions was symmetry distribution and asymmetric distribution. However, the researchers were applying Monte-Carlo method for simulation with 10,000 replicated. The results show that, the most powerful test statistics are ZAD , $ZCVM$ and AD for symmetric distribution, and the ZAD is the most powerful test for asymmetric distribution.

Key words: four - parameter kappa distribution : K4D, goodness-of-fit-test, power of test

บทนำ

ทฤษฎีค่าสุดขีด เป็นสถิติที่มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์เหตุการณ์สุดขีด จากหนังสือของ Coles (2001) ได้กล่าวว่า ทฤษฎีค่าสุดขีดอธิบายพฤติกรรมของการแจกแจงที่ระดับสูงสุดหรือต่ำสุด อันที่จริงแล้วทฤษฎีค่าสุดขีดได้ถูกประยุกต์ใช้ในสาขาต่าง ๆ สำหรับการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายเหตุการณ์รุนแรงซึ่งอาจมีผลกระทบที่ไม่พึงประสงค์สูง การแจกแจงค่าสุดขีดน้อยทั่วไป (Generalized Extreme Value) เป็นแบบจำลองหนึ่งในทฤษฎีค่าสุดขีดซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ 3 ชนิด คือ พารามิเตอร์ระบุตำแหน่ง พารามิเตอร์ระบุขนาด และพารามิเตอร์ระบุรูปร่าง ในการเลือกใช้แบบจำลองที่ดีและเหมาะสมนั้นก็จะนำไปสู่ความแม่นยำในการพยากรณ์ค่าต่าง ๆ ที่สนใจศึกษา หากจำนวนพารามิเตอร์ของแบบจำลองนั้นยิ่งเพิ่มมากขึ้นก็อาจทำให้แบบจำลองนั้นมีความแม่นยำขึ้นได้ การแจกแจงแบบ 4 พารามิเตอร์ (Four - parameter kappa distribution; K4D) จะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ระบุตำแหน่ง พารามิเตอร์ระบุขนาด และพารามิเตอร์ระบุรูปร่างตัวที่ 1 และตัวที่ 2 และเป็น

การแจกแจงที่มีความสัมพันธ์กับการแจกแจงค่าสุดขีดน้อยทั่วไป เมื่อพารามิเตอร์ระบุรูปร่างตัวที่ 2 มีค่าเข้าใกล้ 0 จะลดรูปเป็นการแจกแจงค่าสุดขีดน้อยทั่วไป นอกเหนือจากนั้นการพิจารณาแบบจำลองที่ดีที่สุดหรือเหมาะสมที่สุดสำหรับข้อมูลที่มีค่าสุดขีดอีกประการหนึ่ง คือ การทดสอบภาวะสารูปดี (Goodness-of-fit Test) ของแบบจำลอง โดยสามารถพิจารณาจากกราฟ และพิจารณาจากสถิติทดสอบภาวะสารูปดีร่วมกัน การทดสอบภาวะสารูปดีเป็นวิธีที่ใช้ในการทดสอบระหว่างแบบจำลองทางสถิติและค่าที่สังเกตได้ ซึ่งการทดสอบภาวะสารูปดีได้ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อตรวจสอบแบบจำลองที่ถูกพัฒนาหรือสร้างขึ้นมา

Liao and Shimokawa (1999) ได้พัฒนาตัวสถิติขึ้นมาใหม่เรียกว่า Liao-Shimokawa (L_n) พร้อมทั้งเปรียบเทียบกำลังการทดสอบของสถิติทดสอบคอลโมโกรอฟ-สมิรโนฟ (Kolmogorov-Smirnov, KS) สถิติทดสอบแอนเดอร์สัน-ดาร์ลิ่ง (Anderson-Darling, AD) และสถิติทดสอบครามเมอร์-วอน-มิสส์ (Cramer-vonMises, CVM) สำหรับการแจกแจงแบบไวบูล พบว่า สถิติทดสอบ L_n มีค่าประมาณ

กำลังการทดสอบสูงที่สุด ต่อจากนั้น Zempléni (2004) ได้เสนอการทดสอบที่ปรับปรุงมาจากสถิติทดสอบ AD เรียกว่า สถิติทดสอบแอนเดอร์สัน-ดาร์ลิงปรับปรุง (Modified Anderson-Darling, B^2) เพื่อทดสอบภาวะसारูปดีสำหรับค่าสุดขีดวงนัยทั่วไป เมื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการประมาณค่าภาวะสูงสุด พบว่า สถิติทดสอบ B^2 ให้ค่าประมาณกำลังการทดสอบสูงกว่าสถิติทดสอบ AD เนื่องจากมีความไวต่อการตรวจจับข้อมูลที่มีการแจกแจงที่เบ้เข้ามาสูงกว่าสถิติทดสอบ AD และในปีเดียวกัน Laio (2004) ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของสถิติทดสอบ AD และสถิติทดสอบ CVM สำหรับการแจกแจงค่าสุดขีด พบว่า สถิติทดสอบ AD มีประสิทธิภาพดีกว่าสถิติทดสอบ CVM นอกจากนี้ Zhang (2002); Zhang and Wu (2005) ได้พัฒนาสถิติทดสอบ B^2 สถิติทดสอบ CVM และสถิติทดสอบ KS ขึ้นมาใหม่ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในนามของสถิติทดสอบซาง-แอนเดอร์สัน-ดาร์ลิง (Zhang Anderson-Darling, ZAD) สถิติทดสอบซาง-ครามเมอร์-วอน-มิสส์ (Zhang Cramer von-Mises, $ZCVM$) และสถิติทดสอบซาง-คอลโมโกรอฟ-สมิร์นอฟ (Zhang Kolmogorov Smirnov KS) ซึ่งเป็นอีกทางเลือกของการทดสอบภาวะसारูปดี พบว่า สถิติทดสอบ ZAD และสถิติทดสอบ $ZCVM$ เป็นสถิติทดสอบที่มีค่าประมาณกำลังการทดสอบมากกว่าสถิติทดสอบ AD สถิติทดสอบ CVM และสถิติทดสอบ ZKS สำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงปกติทั้งนี้สถิติทดสอบ ZAD และสถิติทดสอบ $ZCVM$ มีประสิทธิภาพเมื่อข้อมูลมีการแจกแจงปกติ Shabri and Jemain (2008) ได้ศึกษาการทดสอบภาวะसारูปดีแบบเดิมหลายชนิด ได้แก่ สถิติทดสอบ AD สถิติทดสอบ CVM สถิติทดสอบ KS และสถิติทดสอบ Shapiro-Wilk test (w) พบว่า สถิติทดสอบ AD มีค่าประมาณกำลังการทดสอบสูงที่สุด สำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงค่าสุดขีด

นัยทั่วไป และการแจกแจงกัมเบล Abidin *et al.* (2012) ได้ศึกษาค่าประมาณกำลังการทดสอบของสถิติทดสอบ AD สถิติทดสอบ B^2 สถิติทดสอบ CVM สถิติทดสอบ ZAD สถิติทดสอบ $ZCVM$ และสถิติทดสอบ L_n สำหรับการแจกแจงแบบกัมเบล พบว่า สถิติทดสอบ AD มีกำลังการทดสอบสูงที่สุด ดังนั้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่มีการวิจัยเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าประมาณกำลังการทดสอบของสถิติทดสอบภาวะसारูปดีสำหรับการแจกแจงแบบกัมเบล พบว่า 4 พารามิเตอร์ ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการเปรียบเทียบกำลังการทดสอบของสถิติทดสอบที่ใช้ในการทดสอบภาวะसारูปดีสำหรับการแจกแจงแบบกัมเบล 4 พารามิเตอร์ ซึ่งเป็นการแจกแจงใหม่ที่ Hosking (1994) ได้พัฒนาขึ้น การแจกแจงนี้สามารถใช้กับข้อมูลทางด้านอุทกวิทยาได้ดีกว่าการแจกแจงอื่น ๆ โดยสถิติทดสอบที่จะใช้ในการทดสอบภาวะसारูปดีมีทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ สถิติทดสอบ KS สถิติทดสอบ AD สถิติทดสอบ B^2 สถิติทดสอบ CVM สถิติทดสอบ ZAD และสถิติทดสอบ $ZCVM$ ซึ่งผู้วิจัย พบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่เสนอการทดสอบภาวะसारูปดีสำหรับการแจกแจงแบบกัมเบล 4 พารามิเตอร์ ด้วยสถิติทดสอบทั้ง 6 ตัวดังกล่าว ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาประเด็นดังกล่าว เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการเลือกแบบจำลองการแจกแจงที่เหมาะสมกับข้อมูลในทางอุทกวิทยาต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ตัวสถิติทดสอบ

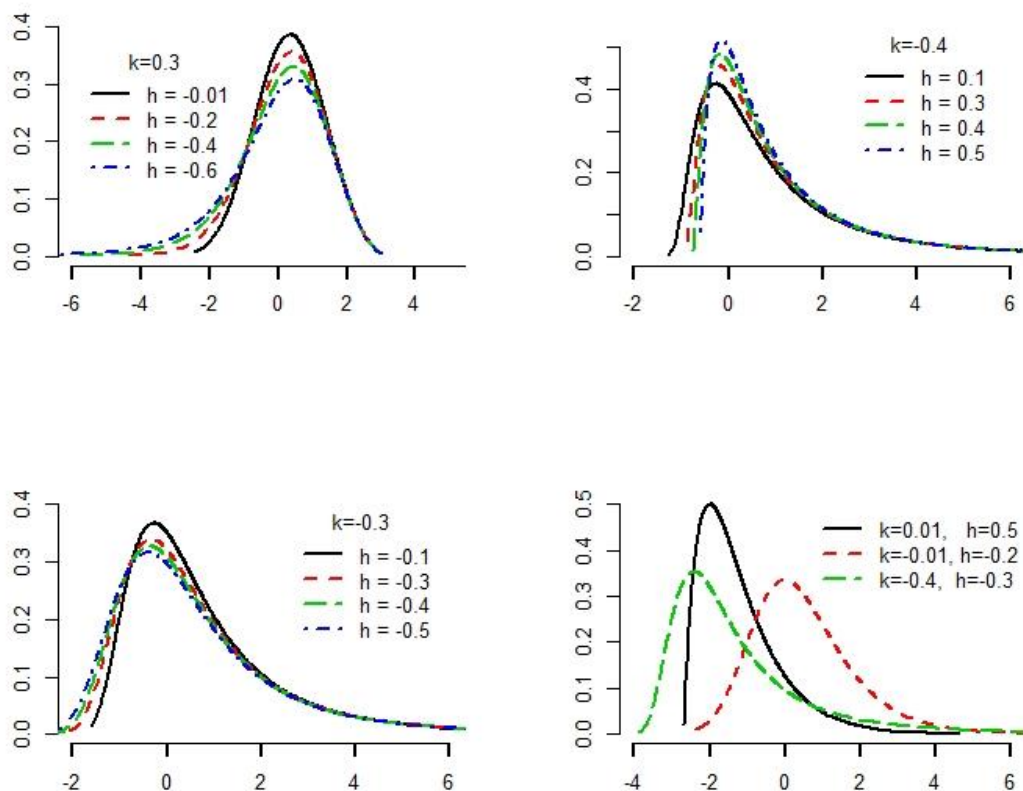
1) ทฤษฎีการแจกแจงแบบกัมเบล 4 พารามิเตอร์
ทฤษฎีการแจกแจงแบบกัมเบล 4 พารามิเตอร์ ($K4D$) ถูกพัฒนาขึ้น โดย Hosking (1994) โดยมีฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative distribution function; CDF) ดังสมการ (1)

$$F(x) = \left\{ 1 - h \left[1 - \frac{k}{\delta} (x - \omega) \right]^{1/k} \right\}^{1/h}, \quad k \neq 0; h \neq 0 \quad (1)$$

เมื่อ ω แทน พารามิเตอร์ระบุตำแหน่ง (location parameter)

δ แทน พารามิเตอร์ระบุขนาด (scale parameter)

k, h แทน พารามิเตอร์ระบุรูปร่าง (shape parameter)



ภาพที่ 1 ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบลา 4 พารามิเตอร์ เมื่อพารามิเตอร์รูปร่างเปลี่ยนแปลง

2) สถิติการทดสอบภาวะสารูปดีที่ใช้ในการวิจัย

2.1) คอลโมโกรอฟ-สมิรโนฟ (Kolmogorov-Smirnov, KS)

(KS)

สถิติคอลโมโกรอฟ-สมิรโนฟ คือ ค่าที่มากที่สุดของค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างความน่าจะเป็นสะสมที่ได้จากการสังเกต และความน่าจะเป็นสะสมที่ได้ในเชิงทฤษฎีที่กำหนดข้อตกลงเบื้องต้นคือกลุ่มตัวอย่างที่ได้มาโดยการสุ่มและเป็นอิสระกันที่ไม่ทราบฟังก์ชันของการแจกแจง $G(x)$

ถ้ากำหนดให้ $F(x)$ แทนฟังก์ชันของการแจกแจงชนิดหนึ่งแล้วจะสามารถเขียนสมมติฐานของการทดสอบได้ดังนี้

$$H_0: G(X) = F(X) \quad \text{สำหรับค่าของ } X$$

$$\text{คู่กับ} \quad H_1: G(X) \neq F(X) \quad \text{สำหรับค่าของ } X$$

อย่างน้อยที่สุด 1 ค่าการคำนวณสถิติทดสอบคือการแจกแจงความถี่สะสมของตัวอย่างให้แทนด้วย $s(x)$ แล้วเปรียบเทียบกับแจกแจงของ

ประชากรที่เป็นสมมติฐานของการทดสอบแทนด้วย $F(x)$ สำหรับแต่ละค่าของ x แล้วหาความแตกต่างสัมบูรณ์ของการแจกแจงทั้ง 2 นี้ คือ $|S(x) - F(x)|$ ค่าสถิติทดสอบ K คือ ค่าที่มากที่สุดของแตกต่างนี้ ถ้าค่า F เข้าใกล้ 0 แสดงว่าการแจกแจงของตัวอย่าง

ใกล้เคียงกันกับการแจกแจงที่กำหนด ทำให้สรุปได้ว่ายอมรับ H_0 ถ้าค่าสถิติทดสอบ K มีค่ามากพอจะสรุปว่าการแจกแจงของตัวอย่างแตกต่างจากการแจกแจงที่กำหนดในสมมติฐาน อย่างน้อยที่สุด 1 จุด ทำให้สรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 ดังสมการ (2)

$$K = \max |S(X) - F(Z_x)| \quad (2)$$

2.2) แอนเดอร์สัน-ดาร์ลิ่ง (Anderson-Darling, AD)

สถิติแอนเดอร์สัน-ดาร์ลิ่ง เป็นสถิติที่ใช้ทดสอบภาวะสภาวะปกติของการแจกแจง เกิดขึ้นในปี

ค.ศ. 1954 แอนเดอร์สัน-ดาร์ลิ่ง ได้เสนอสถิติทดสอบที่ใช้ทดสอบภาวะสภาวะปกติ เมื่อข้อมูลอยู่ในสเกลเรียงอันดับ (Ordinal Scale) และลักษณะการแจกแจงของข้อมูลเป็นแบบต่อเนื่อง ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (3)

$$AD = -\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \left(i - \frac{1}{2}\right) \log\{F_0(X_{(i)})\} + \left(n - i + \frac{1}{2}\right) \log\{1 - F_0(X_{(i)})\} - n \quad (3)$$

2.3) แอนเดอร์สัน-ดาร์ลิ่งปรับปรุง (Modified Anderson-Darling, B^2), (Zempléni, 2004) สามารถคำนวณค่าสถิติทดสอบ ได้จากสมการ (4)

$$B^2 = -\sum_{i=1}^n \frac{2i-1}{n} \{\ln[1 - F(x_{n+1-i})]\} + \frac{n}{2} - \sum_{i=1}^n \frac{F(x_i)}{n} \quad (4)$$

โดยที่ n คือ ขนาดตัวอย่าง

$F(x_i)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของข้อมูลตามลักษณะการแจกแจงที่ศึกษา

2.4) คราเมอร์-วอน-มิสส์ (Cramer-von Mises, CVM)

สามารถคำนวณหาค่าสถิติทดสอบได้จากสูตร (5)

$$CVM = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left[F(x_i) - \frac{2i-1}{2n}\right]^2 \quad (5)$$

โดยที่ n คือ ขนาดตัวอย่าง

$F(x_i)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของข้อมูลตามลักษณะการแจกแจงที่ศึกษา

2.5) ขาง-แอนเดอร์สัน-ดาร์ลิ่ง (Zhang Anderson-Darling, ZAD), (Zhang, 2002)

ได้กำหนด Z_x เป็นตัวสถิติอัตราส่วนล็อกภาวะน่าจะเป็น (log likelihood ratio statistic) ดังสมการ (6)

$$2nI_x^0 = 2n \left[\frac{F_n(x) \log \left\{ \frac{F_n(x)}{F_0(x)} \right\} + (1 - F_n(x)) \log \left\{ \frac{1 - F_n(x)}{1 - F_0(x)} \right\}}{2} \right] \quad (6)$$

และฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักเป็น $w(x) = \frac{1}{E_n(x)\{1 - F_n(t)\}}$ จะได้สถิติทดสอบแอนเดอร์สัน-ดาร์ลิ่งที่ปรับปรุง

(Zhang Anderson-Darling, ZAD) ดังสมการ (7)

$$ZAD = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\log \{F_x(X_{(i)})\}}{n - i + \frac{1}{2}} + \frac{\log \{F_x(X_{(i)})\}}{i - \frac{1}{2}} \right] \quad (7)$$

2.6) ขาง-คราเมอร์-วอน-มิสส์ (Zhang Cramer von-Mises, ZCVM), (Zhang, 2002)

ได้กำหนด Z_x เป็นตัวสถิติอัตราส่วนล็อกภาวะน่าจะเป็น (log likelihood ratio statistic) ในสมการ (3) และฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักเป็น $w(x) = \frac{1}{F_0(x)\{1 - F_0(t)\}}$ จะได้สถิติทดสอบคราเมอร์-วอนมิส ที่ปรับปรุง (Zhang

Cramer von-Mises, ZCVM) ดังสมการ (8)

$$ZCVM = \sum_{i=1}^n \left[\log \left\{ \frac{\frac{1}{F_0(X_{(i)})} - 1}{\left(n - \frac{1}{2}\right) / \left(i - \frac{3}{4}\right) - 1} \right\} \right]^2 \quad (8)$$

2. ขอบเขตของการวิจัย

1) สร้างค่าวิกฤตของตัวสถิติทดสอบชนิดต่างๆ เพื่อการทดสอบการแจกแจงแคปป์ 4 พารามิเตอร์ โดยการจำลองข้อมูลที่มีการแจกแจงแคปป์ 4 พารามิเตอร์ ที่มีค่าพารามิเตอร์ระบุตำแหน่ง มีค่าเป็น 0 พารามิเตอร์ระบุขนาดมีค่าเป็น 1 และพารามิเตอร์ระบุรูปร่าง มีค่าเป็น -0.4 ถึง 0.4 และ -1.2 ถึง 1.2 ($\mu = 0$, $\sigma = 1$, $-0.4 < k < 0.4$ และ $-1.2 < h < 1.2$)

2) ศึกษาความสามารถในการควบคุมความน่าจะเป็นของความคลาดเคลื่อนประเภทที่ 1 โดยการจำลองข้อมูลที่มีการแจกแจงแคปป์ 4 พารามิเตอร์

3) ศึกษาค่าประมาณกำลังการทดสอบ โดยการจำลองข้อมูลที่มีการแจกแจงต่าง ๆ ซึ่งแบ่ง

ออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่มที่ 1 การแจกแจงสมมาตร ประกอบด้วย 1) การแจกแจงปกติ (Normal distribution, $X \sim N(0,20)$) 2) การแจกแจงโคชี (Cauchy distribution, $X \sim \text{Cauchy}(0,1)$) และ 3) การแจกแจงลอจิสติก (Logistic distribution, $X \sim \text{Logis}(9, 3)$) กลุ่มที่ 2 การแจกแจงไม่สมมาตร ประกอบด้วย 1) การแจกแจงไคกำลังสอง (Chi-square distribution, $X \sim \chi^2(10)$) และ 2) การแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง (Exponential distribution, $X \sim \text{Exp}(1)$)

4) ในการสร้างข้อมูลแต่ละการแจกแจง จะทำภายใต้ขนาดตัวอย่าง 15 30 50 และ 100 และกำหนดระดับนัยสำคัญ 0.10 0.05 และ 0.01

3. วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษามีขั้นตอนในการดำเนินงานดังนี้

1) สร้างค่าวิกฤตของตัวสถิติทดสอบ KS , AD , B^2 , CVM , ZAD และ $ZCVM$ สำหรับการแจกแจงแบบ 4 พารามิเตอร์

1.1 สร้างข้อมูลที่มีลักษณะการแจกแจงแบบ 4 พารามิเตอร์ ที่มีพารามิเตอร์และขนาดตัวอย่างตามที่กำหนดไว้ในขอบเขตการศึกษา

1.2 คำนวณค่าสถิติของสถิติทดสอบ KS , AD , B^2 , CVM , ZAD และ $ZCVM$

1.3 ทำซ้ำข้อ 1.1) ถึง ข้อ 1.2) จำนวน 10,000 รอบ แล้วนำค่าสถิติมาเรียงลำดับจากน้อยไปมากและหาค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 90 95 และ 99 ซึ่งเป็นค่าวิกฤตที่ระดับนัยสำคัญ 0.10 0.05 และ 0.01 ในแต่ละตัวสถิติ

2) การคำนวณค่าประมาณความน่าจะเป็นของความคลาดเคลื่อนประเภทที่ 1

2.1 สร้างตัวอย่างสุ่มที่มีการแจกแจงแบบ 4 พารามิเตอร์ ที่มีพารามิเตอร์และขนาดตัวอย่างตามที่กำหนดไว้ในขอบเขตการศึกษา

2.2 คำนวณค่าสถิติของตัวสถิติทดสอบ KS , AD , B^2 , CVM , ZAD และ $ZCVM$

2.3 เปรียบเทียบค่าสถิติของสถิติทดสอบในข้อ 2.2 กับค่าสถิติที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ที่ขนาดตัวอย่างเดียวกัน แล้วพิจารณาผลการทดสอบสมมติฐานหลัก

2.4 ทำซ้ำข้อ 2.1) ถึงข้อ 2.3) เป็นจำนวน 10,000 รอบ

2.5 คำนวณค่าประมาณความน่าจะเป็นของความคลาดเคลื่อนประเภทที่ 1 (τ) ได้โดยการนับจำนวนครั้งในการปฏิเสธสมมติฐานหลักหารด้วยจำนวนรอบที่ทำซ้ำ นั่นคือ 10,000 รอบ

โดยทั่วไปการทดสอบภาวะสารูปดีจะพบผลการทดสอบที่ได้อาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ ความผิดพลาดแบบที่ 1 ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานหลัก เมื่อสมมติฐาน

หลักเป็นจริง ซึ่งความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดลักษณะนี้แบบนี้คือ ระดับนัยสำคัญ (α) และความผิดพลาดแบบที่ 2 ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดจากการยอมรับสมมติฐานหลัก เมื่อสมมติฐานหลักเป็นเท็จ ซึ่งความน่าจะเป็นที่จะไม่เกิดความผิดพลาดในลักษณะแบบนี้คือ $(1-\beta)$ คือ กำลังของการทดสอบ

2.6 นำค่าประมาณความน่าจะเป็นของความคลาดเคลื่อนประเภทที่ 1 จากข้อ 2.6) เทียบกับเกณฑ์การพิจารณาความสามารถในการควบคุมค่าความน่าจะเป็นของความคลาดเคลื่อนประเภทที่ 1 (Bradley, 1978) นั่นคือ

ค่า τ อยู่ในช่วง $[0.05, 0.15]$ กรณีกำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.1

ค่า τ อยู่ในช่วง $[0.025, 0.075]$ กรณีกำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

ค่า τ อยู่ในช่วง $[0.0005, 0.015]$ กรณีกำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.01

3) การคำนวณค่าประมาณกำลังการทดสอบ

3.1 สร้างตัวอย่างสุ่มที่ไม่ใช่การแจกแจงแบบ 4 พารามิเตอร์ ในที่นี้จะสร้างตัวอย่างสุ่มที่มีการแจกแจง 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 การแจกแจงสมมาตร ประกอบด้วย การแจกแจงปกติ การแจกแจงโคชี การแจกแจงลอจิสติก กลุ่มที่ 2 การแจกแจงไม่สมมาตร ประกอบด้วย การแจกแจงไคกำลังสอง และการแจกแจงแบบเลขชี้กำลังที่มีพารามิเตอร์และขนาดตัวอย่างตามที่กำหนดไว้ในขอบเขตการศึกษา

3.2 คำนวณค่าสถิติสถิติทดสอบ KS , AD , B^2 , CVM , ZAD และ $ZCVM$

3.3 เปรียบเทียบค่าสถิติทดสอบในข้อ 3.2) กับค่าวิกฤตที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ที่ขนาดตัวอย่างเดียวกันแล้วพิจารณาผลการทดสอบสมมติฐานหลัก

3.4 ทำซ้ำข้อ 3.1) ถึงข้อ 3.3) เป็นจำนวน 10,000 รอบ

3.5 คำนวณหาค่าประมาณกำลังการทดสอบ โดยการนับจำนวนครั้งในการปฏิเสธสมมติฐานหลัก หาดด้วยจำนวนรอบที่ทำซ้ำ นั่นคือ 10,000 รอบ

3.6 นำค่าประมาณกำลังการทดสอบที่ได้จากข้อ 3.5 ของแต่ละตัวสถิติทดสอบมาเปรียบเทียบกัน โดยสถิติทดสอบที่มีค่ากำลังการทดสอบมากที่สุดจะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

ZAD เมื่อระดับนัยสำคัญเท่ากันและขนาดตัวอย่างแตกต่างกัน ค่าวิกฤตของสถิติทดสอบจะแตกต่างกัน นั่นคือ เมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้นค่าวิกฤตของสถิติทดสอบจะลดลง ส่วนสถิติทดสอบ B^2 และสถิติทดสอบ ZCVM เมื่อระดับนัยสำคัญเท่ากันและขนาดตัวอย่างแตกต่างกัน ค่าวิกฤตของสถิติทดสอบจะแตกต่างกัน นั่นคือ ขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้นค่าวิกฤตของสถิติทดสอบจะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ค่าวิกฤตของการทดสอบภาวะสารูปดี

จากการศึกษา พบว่า สถิติทดสอบ KS สถิติทดสอบ AD สถิติทดสอบ CVM และสถิติทดสอบ

ตารางที่ 1 ค่าวิกฤตสำหรับสถิติทดสอบ KS สถิติทดสอบ AD สถิติทดสอบ B^2 สถิติทดสอบ CVM สถิติทดสอบ ZAD และสถิติทดสอบ ZCVM เพื่อใช้ทดสอบการแจกแจงแบบป้า 4 พารามิเตอร์ จำแนกตามระดับนัยสำคัญและขนาดตัวอย่าง

ระดับนัยสำคัญ (α)	ขนาด ตัวอย่าง (n)	สถิติ GOF					
		KS	AD	B^2	CVM	ZAD	ZCVM
0.10	15	0.3052	1.9587	17.9957	0.3494	3.7926	17.7244
	30	0.2181	1.9509	34.1859	0.3484	3.5768	19.8378
	50	0.1731	1.9378	54.1131	0.3481	3.4831	21.1777
	100	0.1206	1.9278	107.5746	0.3459	3.3925	22.9989
0.05	15	0.3382	2.5328	19.1186	0.4634	3.9344	22.0642
	30	0.2422	2.4948	35.6465	0.4621	3.6535	24.2208
	50	0.1923	2.5029	55.8594	0.4624	3.5311	25.7847
	100	0.1337	2.4608	109.8714	0.4562	3.417	27.6992
0.01	15	0.4073	3.8947	21.3659	0.7258	4.3047	33.9511
	30	0.2902	3.8778	38.4631	0.7277	3.8473	36.367
	50	0.2300	3.8937	59.3131	0.7370	3.6495	37.549
	100	0.1586	3.7462	114.3337	0.7123	3.4768	40.1447

2. ค่าประมาณความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1

จากการจำลองข้อมูลเพื่อคำนวณหา ค่าประมาณความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 โดยใช้ค่าวิกฤตที่ได้จากตารางที่ 1 พบว่า เมื่อ จำแนกตามระดับนัยสำคัญ สามารถแสดงค่าประมาณ ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดแบบที่ 1 ของการ ทดสอบโดยสถิติทดสอบแต่ละตัว และเปรียบเทียบกับ เกณฑ์ของ Bradley ได้ดังนี้ ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.10$ เมื่อใช้เกณฑ์ของ Bradley พบว่า เมื่อ $n = 15$ และ $n = 30$ สถิติทดสอบทุกตัวสามารถ ควบคุมความคลาดเคลื่อนแบบที่ 1 ได้ เมื่อ $n = 50$ สถิติทดสอบทุกตัวสามารถควบคุมความคลาดเคลื่อน

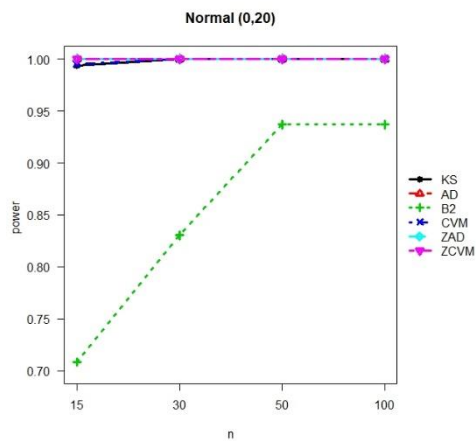
แบบที่ 1 ได้ (ยกเว้นสถิติทดสอบ KS และสถิติ ทดสอบ B^2) และเมื่อ $n = 100$ มีเพียงสถิติทดสอบ KS เท่านั้นที่สามารถควบคุมความคลาดเคลื่อนแบบที่ 1 ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ เมื่อใช้เกณฑ์ของ Bradley พบว่า สถิติทดสอบทุกตัวไม่สามารถควบคุม ความคลาดเคลื่อนแบบที่ 1 ได้ (ยกเว้น สถิติทดสอบ B^2 เมื่อ $n = 15$ สถิติทดสอบ ZAD สถิติทดสอบ ZCVM เมื่อ $n = 50$ และสถิติทดสอบ AD สถิติ ทดสอบ CVM เมื่อ $n = 100$) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.01$ เมื่อใช้เกณฑ์ของ Bradley พบว่า สถิติทดสอบ ทุกตัวไม่สามารถควบคุมความคลาดเคลื่อนแบบที่ 1 ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าประมาณความน่าจะเป็นที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนแบบที่ 1 ของการทดสอบการแจกแจงแบบป 4 พารามิเตอร์ จำแนกตามระดับนัยสำคัญและขนาดตัวอย่าง

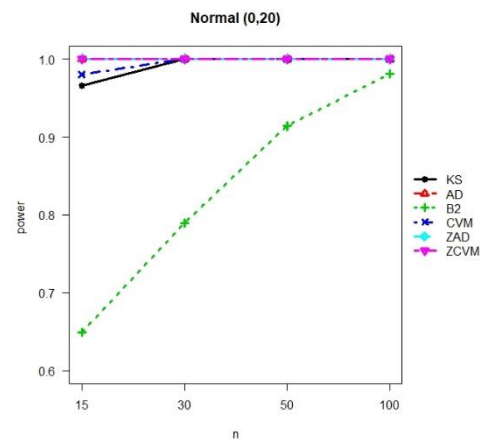
ระดับนัยสำคัญ (α)	ขนาดตัวอย่าง (n)	สถิติ GOF					
		KS	AD	B^2	CVM	ZAD	ZCVM
0.10	15	0.0625*	0.1250*	0.1250*	0.1250*	0.0625*	0.1250*
	30	0.0625*	0.0625*	0.0625*	0.0625*	0.0625*	0.0625*
	50	0.1875	0.1250*	0.1875	0.1250*	0.0625*	0.0625*
	100	0.1250*	0.1875	0.2500	0.1875	0.1875	0.1875
0.05	15	0.0000	0.0000	0.0625*	0.0000	0.0000	0.0000
	30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	50	0.1250	0.1250	0.1875	0.1250	0.0625*	0.0625*
	100	0.0000	0.0625*	0.1875	0.0625*	0.1875	0.1875
0.01	15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	30	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	50	0.0625	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	100	0.0000	0.0000	0.0625	0.0000	0.0625	0.0000

หมายเหตุ * คือ สถิติทดสอบที่สามารถควบคุมความคลาดเคลื่อนแบบที่ 1 ได้

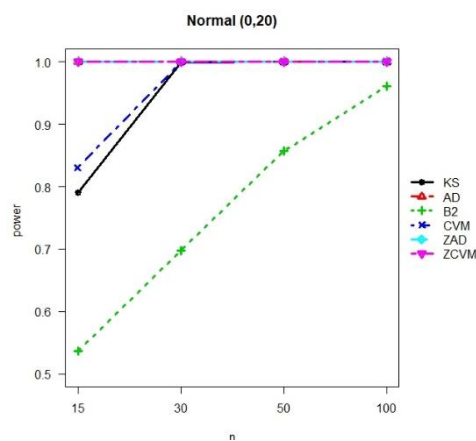
3. ค่าประมาณกำลังการทดสอบ



(ก.) ระดับนัยสำคัญ 0.10

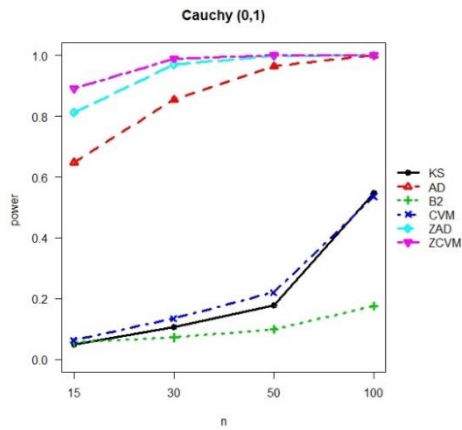


(ข.) ระดับนัยสำคัญ 0.05

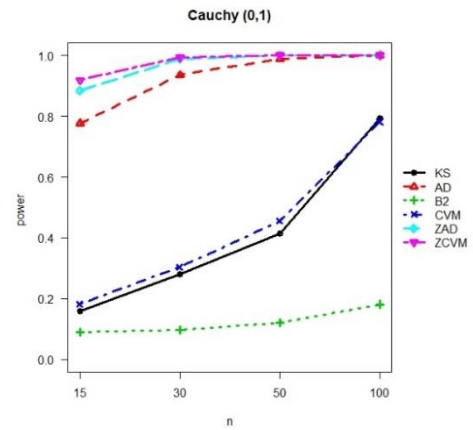


(ค.) ระดับนัยสำคัญ 0.10

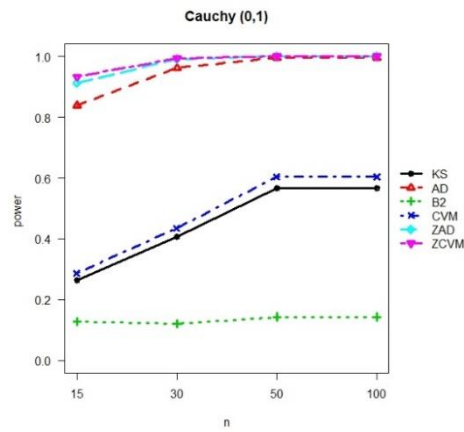
ภาพที่ 2 การเปรียบเทียบค่าประมาณกำลังการทดสอบของสถิติทดสอบแต่ละตัว ที่ระดับนัยสำคัญ α เมื่อกำหนดให้สมมติฐานรอง H_1 เป็นการแจกแจงปกติ



(ก.) ระดับนัยสำคัญ 0.10

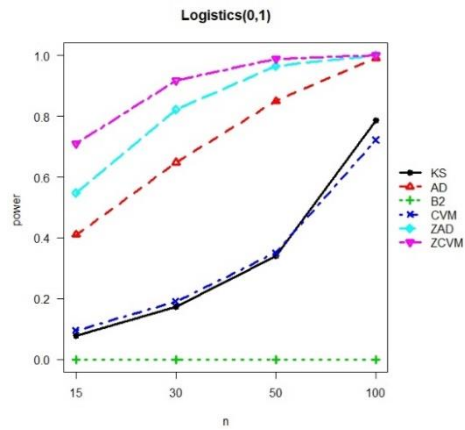


(ข.) ระดับนัยสำคัญ 0.05

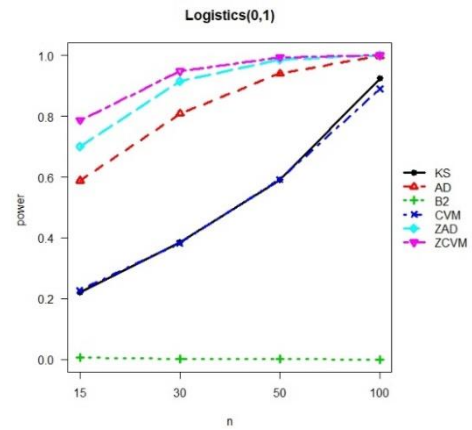


(ค.) ระดับนัยสำคัญ 0.01

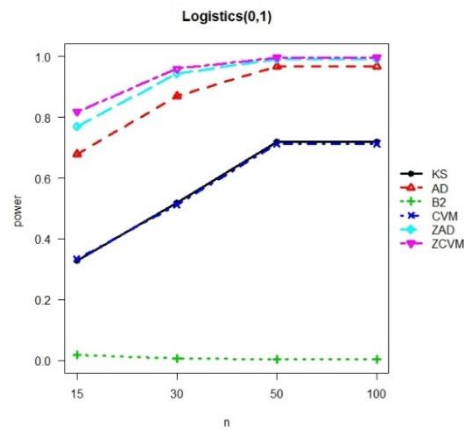
ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบค่าประมาณกำลังการทดสอบของสถิติทดสอบแต่ละตัว ที่ระดับนัยสำคัญ α เมื่อกำหนดให้ สมมติฐานรอง H_1 เป็นการแจกแจงโคชี



(ก.) ระดับนัยสำคัญ 0.10

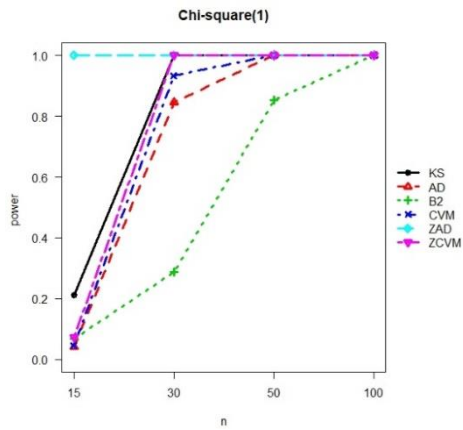


(ข.) ระดับนัยสำคัญ 0.05

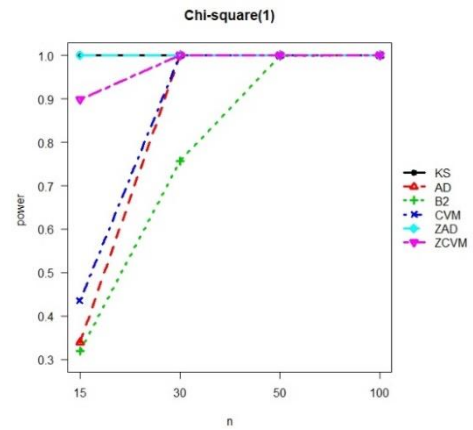


(ค.) ระดับนัยสำคัญ 0.01

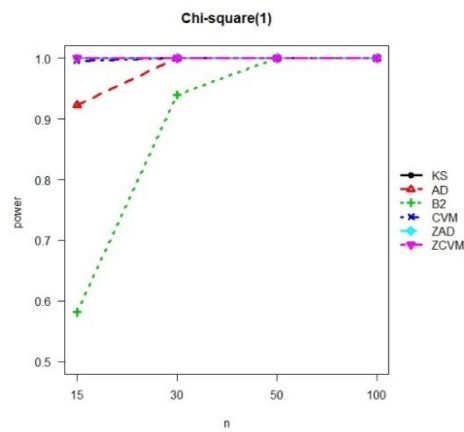
ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบค่าประมาณกำลังการทดสอบของสถิติทดสอบแต่ละตัว ที่ระดับนัยสำคัญ α เมื่อกำหนดให้สมมติฐานรอง H_1 เป็นการแจกแจงลอจิสติก



(ก.) ระดับนัยสำคัญ 0.10

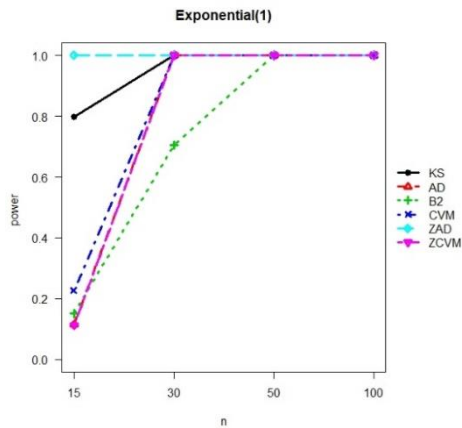


(ข.) ระดับนัยสำคัญ 0.05

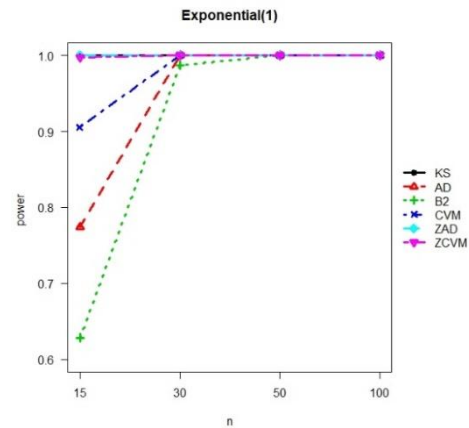


(ค.) ระดับนัยสำคัญ 0.01

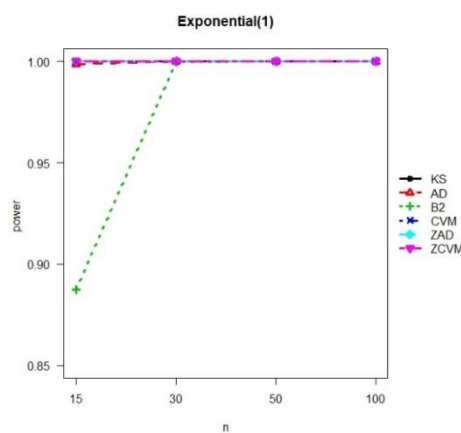
ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบค่าประมาณกำลังการทดสอบของสถิติทดสอบแต่ละตัว ที่ระดับนัยสำคัญ α เมื่อกำหนดให้ สมมติฐานรอง H_1 เป็นการแจกแจงไคกำลังสอง



(ก.) ระดับนัยสำคัญ 0.10



(ข.) ระดับนัยสำคัญ 0.05



(ค.) ระดับนัยสำคัญ 0.01

ภาพที่ 6 การเปรียบเทียบค่าประมาณกำลังการทดสอบของสถิติทดสอบแต่ละตัว ที่ระดับนัยสำคัญ α เมื่อกำหนดให้ สมมติฐานรอง H_1 เป็นการแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง

จากภาพที่ 2-6 เปรียบเทียบค่าประมาณกำลังการทดสอบที่ใช้การทดสอบภาวะสารูปดีสำหรับการแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง 4 พารามิเตอร์ ทั้งหมด 6 ตัว ได้แก่ สถิติทดสอบ KS สถิติทดสอบ AD สถิติทดสอบ B^2 สถิติทดสอบ CVM สถิติทดสอบ ZAD และสถิติทดสอบ ZCVM สำหรับการแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง 4 พารามิเตอร์ เมื่อพิจารณาในภาพรวม พบว่า สถิติทดสอบ ZAD มีค่าประมาณกำลังการทดสอบสูงที่สุดในทุกการแจกแจง รองลงมาคือ สถิติทดสอบ ZCVM สถิติทดสอบ AD สถิติทดสอบ KS และสถิติทดสอบ CVM ซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shabri and Jemain (2008) ได้ศึกษาการทดสอบภาวะสารูปดีแบบเดิมหลายชนิด ได้แก่ สถิติทดสอบ AD

สถิติทดสอบ CVM สถิติทดสอบ KS และสถิติทดสอบ W พบว่า สถิติทดสอบ AD มีค่าประมาณกำลังการทดสอบสูงที่สุด สำหรับข้อมูลมีการแจกแจงค่าสุดขีดน้อยทั่วไป และการแจกแจงกัมเบล และงานของ Abidin และคณะ ได้ศึกษาค่าประมาณกำลังการทดสอบของสถิติทดสอบ AD สถิติทดสอบ B^2 สถิติทดสอบ CVM สถิติทดสอบ ZAD สถิติทดสอบ ZCVM และสถิติทดสอบ L_n สำหรับการแจกแจงแบบกัมเบล พบว่า สถิติทดสอบ AD มีกำลังการทดสอบสูงที่สุด (Abidin *et al.*, 2012) เนื่องจากการแจกแจงค่าสุดขีดน้อยทั่วไปเป็นการแจกแจงเป็นข้อมูลที่มีการแจกแจงหางหนา (Heavy-tailed Distribution) กว่า การแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง 4 พารามิเตอร์ เนื่องจากมี

พารามิเตอร์ระบุตำแหน่ง ขนาด และรูปร่าง ซึ่งมี 3 พารามิเตอร์ ซึ่งเกิดจากการลดรูปร่างของพารามิเตอร์ ระบุรูปร่างตัวที่ 2 ของการแจกแจงแคปป์ 4 พารามิเตอร์ ส่วนการแจกแจงกัมเบลจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ ระบุขนาดและรูปร่าง ถึงแม้ว่าการแจกแจงทั้งสองเป็น วงศ์ของการแจกแจงแคปป์ 4 พารามิเตอร์ผลการวิจัย อาจจะไม่สอดคล้องเพราะการตรวจจับการแจกแจงหาง หนาไม่มาก ควรที่จะเลือกใช้สถิติทดสอบ ZAD เพื่อ เป็นทางเลือกใช้สถิติทดสอบภาวะสารูปดีสำหรับการ แจกแจงแคปป์ 4 พารามิเตอร์ต่อไป และหากพิจารณา ตามลักษณะการแจกแจง พบว่า เมื่อข้อมูลมีการแจก แจกแจงสมมาตร สถิติทดสอบที่ให้ค่าประมาณกำลังการ ทดสอบสูงที่สุดและใกล้เคียงกันคือ สถิติทดสอบ ZAD สถิติทดสอบ ZCVM และสถิติทดสอบ AD ส่วนสถิติทดสอบที่ให้กำลังการทดสอบรองลงมาคือ สถิติทดสอบ CVM และสถิติทดสอบ KS ส่วนสถิติ ทดสอบที่ให้กำลังการทดสอบต่ำที่สุด คือ สถิติ ทดสอบ B^2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang (2002); Zhang and Wu (2005) ได้ทำการทดสอบกับ ข้อมูลที่มีการแจกแจงปกติ พบว่า สถิติทดสอบ ZAD และสถิติทดสอบ ZCVM เป็นสถิติทดสอบที่มีกำลัง การทดสอบสูงที่สุด และเมื่อข้อมูลมีการแจกแจงไม่ สมมาตร พบว่า ทุกตัวสถิติทดสอบให้กำลังการทดสอบ สูงใกล้เคียงกัน โดยในกลุ่มนี้สถิติทดสอบ ZAD ให้ กำลังการทดสอบสูงที่สุด ส่วนสถิติที่ให้กำลังการ ทดสอบต่ำที่สุด คือสถิติทดสอบ B^2

สรุป

จากผลการศึกษาการเปรียบเทียบกำลังการ ทดสอบที่ใช้การทดสอบภาวะสารูปดีสำหรับการแจก แจกแจงแคปป์ 4 พารามิเตอร์ ทั้งหมด 6 ตัว ได้แก่ สถิติ ทดสอบ KS สถิติทดสอบ AD สถิติทดสอบ B^2 สถิติ ทดสอบ ZCVM สถิติทดสอบ ZAD และสถิติ ทดสอบ ZCVM สำหรับการแจกแจงแคปป์ 4

พารามิเตอร์ ในการศึกษาค่าประมาณความน่าจะเป็น ความคลาดเคลื่อนแบบที่ 1 พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.10$ เมื่อใช้เกณฑ์ของ Bradley พบว่า เมื่อ $n = 15$ และ $n = 30$ ทุกตัวสถิติทดสอบสามารถควบคุม ความคลาดเคลื่อนแบบที่ 1 ได้ เมื่อ $n = 50$ ทุกตัว สถิติทดสอบสามารถควบคุมความคลาดเคลื่อนแบบ ที่ 1 ได้ (ยกเว้นสถิติทดสอบ KS และสถิติทดสอบ B^2) และเมื่อ $n = 100$ มีเพียงสถิติทดสอบ KS เท่านั้น ที่สามารถควบคุมความคลาดเคลื่อนแบบที่ 1 ได้ เมื่อ ข้อมูลมีการแจกแจงแบบสมมาตรและไม่สมมาตร พบว่า สถิติทดสอบ ZAD มีค่าประมาณกำลังการ ทดสอบสูงที่สุดในทุกการแจกแจง รองลงมาคือ สถิติ ทดสอบ ZCVM สถิติทดสอบ AD สถิติทดสอบ KS และสถิติทดสอบ CVM เพื่อเป็นแนวทางในการ เลือกใช้สถิติทดสอบภาวะสารูปดีสำหรับการแจก แจกแจงที่มีลักษณะหางหนา มาก ๆ ควรเลือกใช้ สถิติ ทดสอบ AD ถ้าหากการแจกแจงที่มีหางหนาไม่มาก ควรเลือกใช้สถิติทดสอบ ZAD เพื่อใช้ในการ ตรวจสอบแบบจำลองที่ใช้ว่ามีความเหมาะสม หรือ ไม่ ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นในการพิจารณา แบบจำลอง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณา จากอาจารย์สาขาวิชาสถิติประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขต ขอนแก่น ที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำที่เป็น ประโยชน์ในครั้งนี้ ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขต ขอนแก่น ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย งบประมาณ รายได้ปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 ในครั้งนี้ คุณค่าและ ประโยชน์จากการทำวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบบูชา พระคุณบิดา มารดา บูรพาจารย์และผู้มีพระคุณ

ทุกท่านที่มีได้เอ่ยนาม และหากมีข้อบกพร่องด้วยประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้ด้วยความขอบคุณยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

- Abidin, N.Z., Adam, M. and Midi, H. 2012. The Goodness-of-fit Test for Gumbel Distribution : A Comparative Study. **MATEMATIKA** 28(1): 35-48.
- Bradley, J.V. 1978. Robustness. **British Journal of Mathematical and Statistical Psychology** 31(2): 144-152.
- Coles, S. 2001. **An Introduction to Statistical Modeling of Extremes Values**. Springer, London.
- Hosking, J.R. 1994. The four-parameter kappa distribution. **IBM Journal of Research and Development** 38(3): 251-258.
- Laio, F. 2004. Cramer-von Mises and Anderson-Darling goodness of fit tests for extreme value distributions with unknown parameters. **Water Resources Research** 40(1): 1-10.
- Liao, M. and Shimokawa, T. 1999. A new goodness-of-fit test for type-1 extreme value and 2-parameter Weibull distributions with estimated parameters. **Journal of Statistical Computation and Simulation** 64(1): 23-48.
- Shabri, A. and Jemain, A.A. 2008. The Anderson-Darling test statistic of the generalized extreme value. **Malaysian Journal of Industrial and Applied Mathematics** 24(1): 85-97.
- Zempléni, A. 2004. Goodness-of-fit Test in Extreme Value Applications. **Collaborative Research Center** 386: 1-13.
- Zhang, J. 2002. Powerful goodness-of-fit tests based on the likelihood ratio. **Journal of the Royal Statistical Society** 64(2): 281-294.
- Zhang, J. and Wu, Y. 2005. Likelihood-ratio tests for normality. **Computational Statistics and Data Analysis** 49(3): 709-721.

การปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ร่วมกับสารชีวภาพ ผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน แปลงใหญ่ของเครือข่ายชุมชน กรณีศึกษาอำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี

New Organic PathumThani1 Rice Planting with Biofertilizer Mixed with Nano Microbe for Large Plots of Community Networks: A Case Study in Nong Suea District, Pathum Thani Province

สุกาญจน์ รัตนเลิศสุสรณ์¹ นิสารัตน์ ตามสมักร¹ และ อัชฌาณัท รัตนเลิศสุสรณ์^{2*}

Sukhan Rattanaloeadnusorn¹, Nisarath Tamsamak¹ and Atchanut Rattanalertnusorn^{2*}

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยกรณีศึกษากรอบความคิดใหม่การใช้สารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน แปลงใหญ่แบบมีส่วนร่วมของเครือข่ายชุมชน ศูนย์เรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร อำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomized design: CRD) ชุดควบคุม: ปุ๋ยเคมี-ยูเรีย (T0) ชุดทดลอง: สารชีวภาพเคลือบผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beuvaria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์ (T1) และปุ๋ยอินทรีย์ (T2) ปรากฏว่าการปลูกข้าวปทุมธานี 1 ด้วยสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beuvaria* และ *Metharhizium* สารสกัดอินทรีย์ (T1) ดีที่สุด คือ เพิ่มผลผลิตข้าวเปลือก 1,137.50±47.87 กิโลกรัมต่อไร่ ลดต้นทุน 2,250±57.74 บาทต่อไร่ เพิ่มค่าตอบแทนรายได้ 12,125±853.91 บาทต่อไร่ รวมทั้งช่วยในการปรับค่า pH ดิน 6.00±0.58 เพิ่มความความหลากหลายจุลินทรีย์ในดิน 14.33±5.26 สกูล และลดปรอทปนเปื้อนบนข้าวกล้อง 9.28±0.081 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมา การปลูกข้าวด้วยปุ๋ยอินทรีย์ (T2) เพิ่มผลผลิตข้าวเปลือก 800±43.97 กิโลกรัมต่อไร่ ลดต้นทุน 2,300±81.65 บาทต่อไร่ เพิ่มค่าตอบแทนรายได้ 6,550±57.74 บาทต่อไร่ รวมทั้งการปรับค่า pH ดิน 5.13±0.63 เพิ่มความความหลากหลายจุลินทรีย์ในดิน 4.33±0.70 สกูลลดปรอทปนเปื้อน

¹ สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

¹ Biology Program, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Khlong Luang, Pathum Thani 12110, Thailand.

² สาขาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

² Applied statistics Program, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Khlong Luang, Pathum Thani 12110, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): atchanut_r@rmutt.ac.th, somrat2543@yahoo.com

บนข้าวกล้อง 20.16 ± 0.23 มิลลิกรัมต่อลิตร และการปลูกด้วยปุ๋ยเคมี-ยูเรีย ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก จุลินทรีย์ปฏิปักษ์รา บนสารอินทรีย์ระดับนาโนเมตร ที่มีประจุไอออนบวก (แคตไอออน) จะสามารถจับกับประจุ ไอออนลบ (แอนไอออน) และสามารถหลั่งเอนไซม์และเร่งย่อยสลายอินทรีย์ ให้สารประกอบธาตุอาหารหลักธาตุอาหารรองและธาตุอาหารเสริม น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว สอร์โบน กรดอะมิโนคีเลต โปรตีน วิตามิน กลีโกล์ ที่เซลล์รากดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้อย่างรวดเร็ว ลดการสูญเสียสู่สิ่งแวดล้อม และปรับค่า pH ดิน ดังนั้น ปัจจุบันนี้เกษตรกรศูนย์เรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร อำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี ร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จึงขยายพื้นที่ปลูกข้าวปทุมธานี 1 แบบใหม่ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beuvaria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์แบบมีส่วน อันนำไปสู่ผลสำเร็จ สร้างความเข้มแข็งและอัตลักษณ์แบบยั่งยืน

คำสำคัญ: สารชีวภาพ, จุลินทรีย์นาโน, ข้าวปทุมธานี 1, เครือข่าย

ABSTRACT

This research demonstrated a new concept of using biofertilizer mixed with nano microbe inoculants in large plots, collaborated with a Large Plots of Community network of learning centers of increasing production efficiency of agricultural products in Nong Suea District, Pathum Thani Province. The experiment was designed by using Complete Randomized Design (CRD). The control group was urea chemical fertilizers (T0), while the experiment group: biofertilizer mixed nano-microbial concentrate *Trichoderma Beuvaria* and *Metharhizium* and 0.3 % organic extracts (T1) and organic fertilizers (T2). T1 showed the greatest treatment compared to other treatments. T1 helped increase paddy yield to $1,137.50 \pm 47.87$ kg/rai, reduce total costs to $2,250 \pm 57.74$ bath/rai, increase income $12,125 \pm 853.91$ bath/rai. In addition, T1 affected the soil to $\text{pH } 6.00 \pm 0.58$, increased soil microbial diversity to 14.33 ± 5.26 genus and reduce mercury in rice 9.28 ± 0.081 mg/. T2 could increase paddy yield at 800 ± 43.97 kg/rai, reduce total costs to $2,300 \pm 81.65$ bath/rai, increasing income $6,550 \pm 57.74$ bath/rai. It also adjusted soil $\text{pH } 5.13 \pm 0.63$, increasing soil microbial diversity 4.33 ± 0.70 genus, reducing mercury in rice 20.16 ± 0.23 mg/l, and could be grown by using chemical urea fertilizers, respectively at 0.05 significant. These could be because microbial fungi on organic matter with positive ions (cations), which could bind to negative ions (anions). The antagonist microbial secreted enzymes and accelerated organic degradation into macronutrients, micronutrients and nutritional supplements, sugar, hormones, amino acids, chelates, proteins, vitamins, minerals that the root cells could absorb nutrients and organic extracts into cells quickly, reduce the loss to the environment and adjust the soil pH. Therefore, the learning centers for increasing production efficiency of agricultural products in Nong Suea district, Pathum Thani Province with participation of the network Rajamangala University of Technology Thanyaburi were expanded for Pathum Thani 1 rice planting area, together with the biofertilizers mixed

with nano-microbe inoculants *Trichoderma Beuvaria* and *Metharhizium* and 0.3 % organic extracts leading to success and strengthening in a sustainable identity.

Key words: bio-fertilizer, nano-microbial, Pathum Thani Rice, community network

บทนำ

จากการสำรวจสภาพพื้นที่ของเกษตรกรชุมชน ตำบลบึงกาสาม อำเภอนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ ระหว่างปี พ.ศ. 2557-2564 พบว่าเกษตรกรส่วนใหญ่นิยมปลูกข้าวสายพันธุ์ต่าง ๆ ได้แก่ ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ข้าวหอมมะลิ สายพันธุ์ กข. 47 กข. 31 กข. 53 และ กข. 59 ข้าวไรซ์เบอร์รี่ และอื่น ๆ โดยการหว่านปุ๋ยเคมีและการฉีดพ่นสารเคมีควบคุมโรคพืชและศัตรูแมลงพืช ในการควบคุมการถูกทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคพืช เช่น โรคใบไหม้เกิดจาก *Pyricularia grisea* Sacc. โรคเมล็ดด่างเกิดจาก *Curvularia lunata* (Wak) Boed. *Cercospora oryzae* I. Miyake *Helminthosporium oryzae* Bred de Haan. *Fusarium semitectum* Berk&Rev. *Trichocinis padwickii* Ganguly *Sarocladium oryzae* โรคกาบใบเน่าเกิดจาก *Sarocladium oryzae* โรคกาบใบแห้ง โรคขอบใบแห้ง เป็นต้น (Sawatsuk *et al.*, 2017; Rattanaeodanusorn, 2015) ผลปรากฏว่าเกษตรกรได้ผลผลิตข้าวเปลือกเฉลี่ย 500-850 กิโลกรัมต่อไร่ ต้นทุนการผลิตเฉลี่ย 4,970 บาทต่อไร่ ความชื้นข้าวเปลือกเฉลี่ย 25 เปอร์เซ็นต์ (Rattanaeodanusorn, 2017a) เมื่อคัดแยกความหลากหลายทางชีวภาพเชื้อราดิน บริเวณพื้นที่ปลูกข้าวด้วยปุ๋ยเคมี ตามวิธีทางตรงและทางอ้อม (Direct or Indirect method) ของเกษตรกรชุมชน ตำบลบึงกาสาม อำเภอนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ พบความหลากหลายเชื้อราดินจำนวน 3 สกุล ได้แก่ สกุล *Actinomyces*, *Aspergillus* และ *Penicillium* ที่มีจำนวนโคโลนีน้อยกว่า 10^3 cfu/gm สภาพดินแข็ง ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เฉลี่ย 3-4 (Rattanaeodanusorn, 2017a)

ต่อมา นักวิจัยศึกษาวิจัยต่อยอด ร่วมกับสถานประกอบการ ผลิตนวัตกรรมหัวเชื้อจุลินทรีย์ประยุกต์รา แบคทีเรีย ด้วยเทคโนโลยี Chito-technology Bio-technology Nanotechnology Chelation- technology และ Encapsulation technology ที่ได้มาตรฐานชีวภัณฑ์ IFOAM ภายใต้เครื่องหมายการค้า THAN ในเชิงพาณิชย์ ดังภาพที่ 1 สำหรับนำหัวเชื้อจุลินทรีย์บนสารอินทรีย์ที่มีขนาดระดับนาโนเมตร และเพิ่มประจุไอออนบวก (แคตไอออน) ที่สามารถจับกับประจุไอออนลบ (แอนไอออน) ได้แบบหลวม ๆ และจุลินทรีย์ประยุกต์ธรรมชาติ สามารถหลั่งเอนไซม์ฟอสฟาเทส (phosphatase) อะไมเลส (amylase) และไดอะมิเนส (deaminase) อื่น ๆ ช่วยเร่งย่อยสลายอินทรีย์ให้กลายเป็นสารประกอบธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริม (Xie *et al.*, 1996; Vladimir and Wolfgang, 2008; Wang *et al.*, 2011; Ahemad and Malik, 2012; Behera *et al.*, 2017) กรดอะมิโนทีเลด โปรตีน น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว กรดฮิวมิก สอร์บอน ACC (1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid) วิตามินและเกลือแร่ (Glick *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2016; Rattanaeodanusorn, 2017b) เพิ่มการดูดซึมเข้าสู่เซลล์ เพิ่มการเจริญเติบโตพืช เพิ่มผลผลิต เพิ่มค่าตอบแทนรายได้ เพิ่มค่าโภชนาการอาหาร เช่น ปริมาณวิตามินบี 1-3 หรือไนอะซิน เกลือแร่ ซีลีเนียม ทองแดง เหล็ก แคลเซียม โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส และอื่น ๆ ในปริมาณสูงกว่าการปลูกพืชด้วยปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ที่ช่วยลดคลอโรสเทอรอล ช่วยบำรุงระบบประสาท ช่วยทำให้ระบบย่อยอาหารดียิ่งขึ้น ช่วยต่อต้านความชรา จึงทำให้อ่อนวัยมากกว่าเดิม เพิ่มสารอนุมูล

อิสระ (Anti-oxidant) เพิ่มภูมิคุ้มกันในการต้านทานต่อการเกิดโรคต่าง ๆ แก่ร่างกายเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมจุลินทรีย์ก่อโรค

เมื่อการตรวจติดตามหลังปลูกข้าว ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน เป็นเวลานาน 1 ปี พบว่าดินมีความร่วนซุย เพิ่มจำนวนจุลินทรีย์รา 5 สกุล ได้แก่ สกุล *Actinomyces*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma* และ *Mucor* ที่มีจำนวนโคโลนี 10^5 cfu/gm ความหลากหลายทางชีวภาพแบคทีเรีย จำนวน 2 สกุล ได้แก่ สกุล *Bacillus* และ *Lactobacillus* และยีสต์ จำนวน 1 สกุล ได้แก่ สกุล *Sacharomyces* เพิ่มการเจริญเติบโต เพิ่มผลผลิต เพิ่มรายได้ ลดต้นทุน (Nagulb *et al.*, 2012; Parka *et al.*, 2013; Salama *et al.*, 2015; Rattanaloeadnusorn, 2017a; Li *et al.*, 2018) ประกอบกับข้าวปทุมธานี 1 จัดเป็นสายพันธุ์ข้าวเจ้าที่เกษตรกรหนองเสือนิยมปลูกในพื้นที่ เนื่องจากไม่ไวต่อแสง ข้าวมีกลิ่นหอมนุ่มเหนียว ทนทานต่อเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล เพลี้ยกระโดดหลังขาว ทนต่อโรคใบไหม้ โรคขอบใบแห้ง สามารถทำการปลูกได้ตลอดทั้งปี

จากผลสำเร็จที่ดีข้างต้น ดังนั้น เกษตรกรศูนย์เรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร (ศพก.) อำเภอนางรองเสื่อ จังหวัดปทุมธานี จึงขยายพื้นที่การปลูกข้าวอินทรีย์ข้าวปทุมธานี 1 ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beuvaria* และ *Metharhizium* และสารสกัดอินทรีย์ตามแนวปฏิบัติที่ดี เพื่อเพิ่มผลผลิต (Output) เช่น ผลผลิต ต้นทุน รายได้ การปรับค่า pH ดิน ความหลากหลายจุลินทรีย์ดิน การวิเคราะห์โปรตอนเป็อนบนข้าวกล้อง การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Rstudio ค่า F-Test (one-way ANOVA) การทดสอบค่าเฉลี่ยรายคู่ของชุดทดลอง ด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD) อันจะแสดงถึงผลสัมฤทธิ์ (Outcome) จากกรณีศึกษากรอบการปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ แบบมีส่วนร่วมร่วมกับเครือข่ายมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ส่งผลสำเร็จ สร้างความเข้มแข็งและอัตลักษณ์ ให้แก่เกษตรกร อำเภอนางรองเสื่อ จังหวัดปทุมธานีแบบยั่งยืน



ภาพที่ 1 ก) THAN หัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน ข) THAN สารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน ค) THAN สารสกัดอินทรีย์ ที่ได้มาตรฐาน IFOAM

วิธีดำเนินการวิจัย

จากการศึกษาของ Liu *et al.* (2005); Wang *et al.* (2011); Olagunju *et al.* (2014); Rattanaloeadnusorn (2017a) เกี่ยวกับการปลูกพืชร่วมกับกลไกการทำงานของจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ธรรมชาติ ผลปรากฏว่าจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ ช่วยเร่งการเจริญเติบโต เพิ่มผลผลิต ลดต้นทุน การปรับค่า pH ดิน อื่น ๆ ได้ดีกว่าการปลูกพืชโดยไม่ใช้กลไกจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ เนื่องจากจุลินทรีย์รา แบคทีเรีย บนสารอินทรีย์นาโน ที่มีประจุไอออนบวก (แคตไอออน) มีความสามารถจับกับประจุไอออนลบ (แอนไอออน) ได้ และจุลินทรีย์ปฏิปักษ์สามารถหลั่งเอนไซม์ phosphatase, amylase และ deaminase ช่วยเร่งย่อยสลายอินทรีย์ ให้กลายเป็นสารประกอบสารอาหารหลัก สารอาหารรองและสารอาหารเสริม (Xie *et al.*, 1996; Vladimir and Wolfgang, 2008; Ahemad and Khan, 2012; Behera *et al.*, 2017) กรดอะมิโนคีเลต โปรตีน น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว กรดฮิวมิก ฮอร์โมน ACC วิตามิน และเกลือแร่เพิ่มขึ้น (Glick *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2016; Rattanaloeadnusorn, 2017a) ดังนั้น ศวก. อำเภอนองเสือ จังหวัดปทุมธานีและเครือข่ายมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและหน่วยงานต่าง ๆ ได้แก่ องค์การบริหารส่วนตำบลบึงกาสาม เกษตรอำเภอกมวิชาวกรเกษตร กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ และอื่น ๆ ยอมรับและนำกรอบความคิดใหม่การปลูกข้าวอินทรีย์ ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beuvaria* และ *Metharhizium* และสารสกัดอินทรีย์ สำหรับการขยายพื้นที่แปลงใหญ่ เพื่อสร้างความเข้มแข็งอัตลักษณ์เกษตรกรอำเภอนองเสือ จังหวัดปทุมธานี ภายใต้ 3 กิจกรรมหลัก ดังภาพที่ 2-3

กิจกรรมที่ 1: การวางแผนการดำเนินการตามกรอบความคิดใหม่สารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน และสารสกัดอินทรีย์

การวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomized Design: CRD) เพื่อศึกษาการปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์ โดยที่ชุดควบคุม คือ ปุ๋ยเคมี-ยูเรีย (T0) และชุดทดลอง 2 ชุด คือ 1) สารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beuvaria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์ (T1) และ 2) ปุ๋ยอินทรีย์ (T2) โดยการหว่านปุ๋ย 50 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่ออายุต้นข้าว 20 วันและอายุ 75 วัน จำนวน 3 ซ้ำ เพื่อศึกษาผลสำเร็จ (Output) ได้แก่ ผลผลิต ต้นทุน การปรับค่า pH ดิน จำนวนสกุลความหลากหลายจุลินทรีย์ดิน การลดปรอทปนเปื้อนบนข้าวกล้อง รายได้ และการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Rstudio เพื่อทดสอบ F-Test (One-way ANOVA) และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ของชุดทดลอง ด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD) ในกรณีที่ผลการทดสอบ F-test มีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

กิจกรรมที่ 2 เทคนิคการปลูกข้าวปทุมธานี 1 แบบใหม่ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน และสารสกัดอินทรีย์แบบมีส่วนร่วมของเครือข่ายศูนย์เรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร

การปลูกข้าวปทุมธานี 1 ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beuvaria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์ แปลงใหญ่แบบมีส่วนร่วมของเครือข่ายศูนย์เรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร อำเภอนองเสือ จังหวัดปทุมธานี

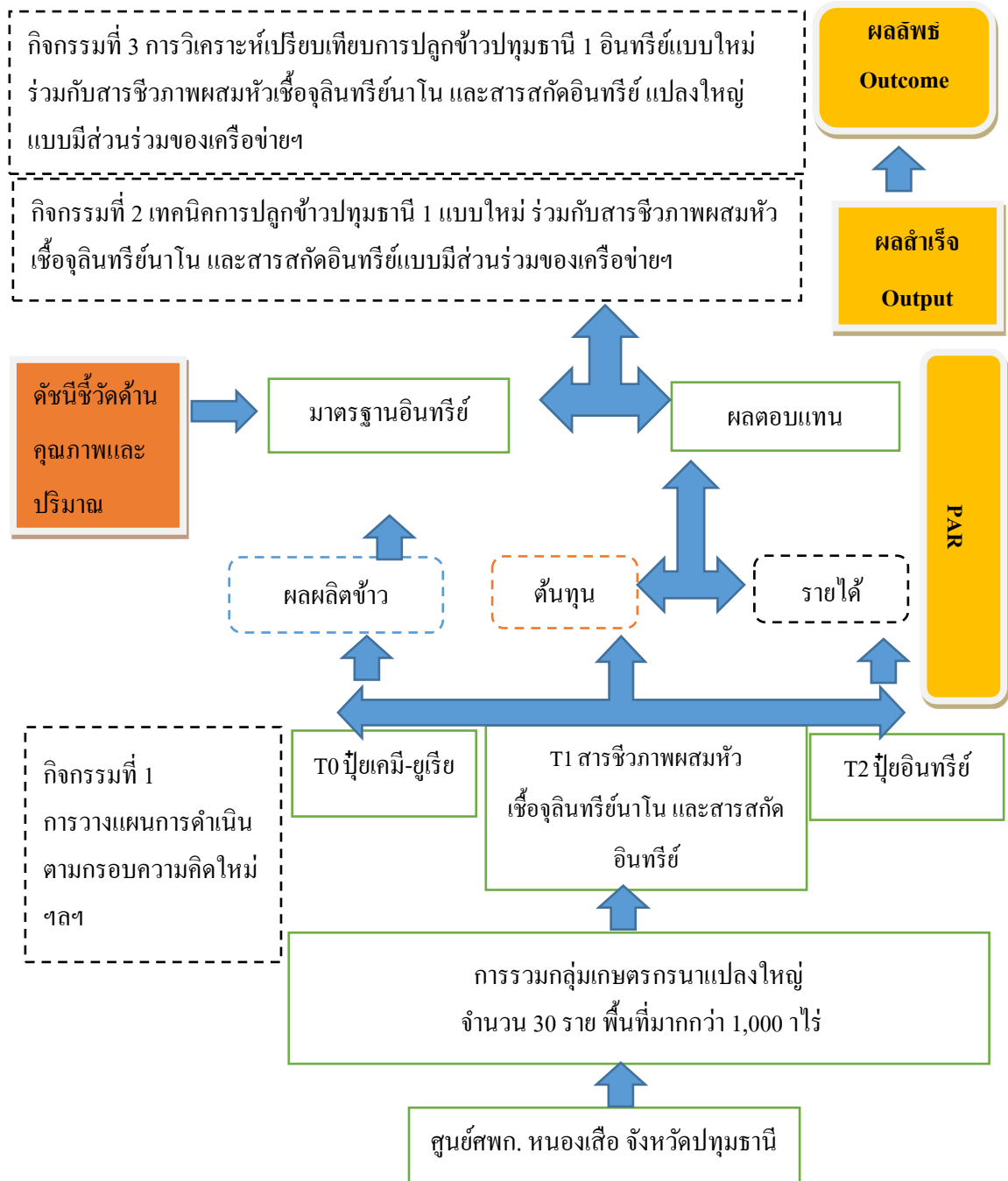
2.1 การรวมกลุ่มเกษตรกรศูนย์เรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร อำเภอนองเสือ จังหวัดปทุมธานี จำนวน 30 รายบนพื้นที่ 1,000 ไร่

2.2 การเตรียมนาและการปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัว

เชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beauvaria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์คั้งนี้

2.2.1 การเก็บตัวอย่างดิน การวิเคราะห์ธาตุอาหารไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) ก่อนการทดลอง การไถกลบตอซัง

ข้าวหลังเก็บเกี่ยวนาข้าว ในช่วงเดือนธันวาคมถึงเมษายนของทุก ๆ ปี การปล่อยน้ำร่วมกับ 0.3 เปอร์เซ็นต์ หัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน เพื่อเร่งย่อยการสลายตอซังนาน 1 เดือน



ภาพที่ 2 กรอบความคิดใหม่การปลูกข้าวอินทรีย์ ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน และสารสกัดอินทรีย์แปลงใหญ่แบบการมีส่วนร่วมของเครือข่ายฯ

2.2.2 การตีเทือกและปล่อยน้ำออกจากแปลงนา หลังจากนั้นหว่านสารปรุณดินจำนวน 25 กิโลกรัมต่อไร่ เพื่อปรับสภาพดินกรด พร้อมการฉีดพ่นสารชีวภาพควบคุมหญ้าและวัชพืช 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรผสมกับน้ำ 100 ลิตร สารจับใบ 40 ลูกบาศก์เซนติเมตรในช่วงเวลาเช้าหรือช่วงปากใบเปิด และการวัดค่า pH และปรับดินให้มีค่า pH 6.5

2.2.3 การหว่าน 8-10 กิโลกรัมต่อไร่ เมล็ดพันธุ์ข้าวปทุมธานี 1 ด้วยเครื่องฉีดพ่นพันธุ์พืช เพื่อให้มีการกระจายต้นกล้าข้าวอย่างสม่ำเสมอ ถ้าหากต้นกล้าไม่สม่ำเสมอ ก็ทำการหว่านซ่อมแซมให้เต็มพื้นที่แปลงนา

2.2.4 การหว่านปุ๋ย ชุคควบคุม (T0) ชุคทดลอง (T1) และ (T2) และการเก็บเกี่ยวผลผลิต การหว่านปุ๋ยเคมี-ยูเรีย และชุคทดลอง T1 และ T2 น้ำหนัก

50 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่ออายุต้นข้าว 21 วัน และอายุต้นข้าว 75 วัน เพื่อเร่งและกระตุ้นการแตกกอของต้นข้าว เร่งการเจริญเติบโตใบข้าวมีสีเขียวเข้ม ตั้งตรง เพิ่มการออกรวง เพิ่มน้ำหนักรวงข้าว เมล็ดข้าวสมบูรณ์และไม่ลีบ เป็นต้น

2.2.5 การตากข้าวเปลือก การเก็บรักษาเพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกให้น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ลดการเกิดเชื้อราก่อโรคปนเปื้อนบนข้าวเปลือก และยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนานกว่าปกติ

2.2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับผลสำเร็จ (Output) ได้แก่ ผลผลิต ต้นทุน รายได้ การปรับ pH ดินกรด จำนวนสกุลความหลากหลายจุลินทรีย์ การลดปรอทปนเปื้อนบนข้าวเปลือก ด้วยโปรแกรม Rstudio ตามที่วางแผนในกิจกรรมที่ 1



ภาพที่ 3 ก) การหว่านปุ๋ยหลังการปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์ สารสกัดอินทรีย์ และลักษณะต้นข้าว ที่อายุ 21 วัน ข) การเปรียบเทียบกอข้าวชุดทดลองกับชุดควบคุม อายุ 65 วัน ค) ลักษณะรวงข้าวและขนาดรวงข้าว อายุ 110 วัน

กิจกรรมที่ 3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบการปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน และสารสกัดอินทรีย์ แปลงใหญ่แบบมีส่วนร่วมของเครือข่ายฯ

หลังการรวมกลุ่มสมาชิกเกษตรกรศูนย์เรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร อำเภอนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ จำนวน 30 ราย

พื้นที่ 1,000 ไร่ ดำเนินการขยายพื้นที่การปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beuvaria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์ (T1) เปรียบเทียบการปลูกด้วยปุ๋ยอินทรีย์ (T2) และปุ๋ยเคมี (T0) การวิเคราะห์ผลสำเร็จผลผลิต รายได้ ลดต้นทุน การปรับค่า pH ดินกรด จำนวนสกุลความ

หลากหลายจุลินทรีย์ การลดปรอทปนเปื้อนบนข้าวเปลือก และเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม/การลดผลผลิตและค่าตอบแทนรายได้กับชุดควบคุม (T0) ด้วยโปรแกรม Rstudio

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลสำเร็จและการวิเคราะห์เปรียบเทียบการปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโนและสารสกัดอินทรีย์ แปลงใหญ่แบบมีส่วนร่วมของเครือข่ายฯ

เมื่อกลุ่มสมาชิกเกษตรกรศูนย์เรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร อำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี และเครือข่ายมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและหน่วยงานต่าง ๆ ได้แก่ องค์การบริหารส่วนตำบลบึงกาสาม เกษตรอำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี กรมวิชาการเกษตร กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ และอื่น ๆ ดำเนินการปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ ด้วยสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโนและสารสกัดอินทรีย์ แปลงใหญ่แบบมีส่วนร่วม เกษตรกร 30 ราย บนพื้นที่ 1,000 ไร่ โดยการหว่านปุ๋ยสารชีวภาพ 50 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อต้นข้าวอายุ 21 วันและ 75 วัน ผลปรากฏว่า การปลูกข้าวอินทรีย์ ด้วยสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beauveria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์ (T1) ดีที่สุด คือ เพิ่มผลผลิตข้าวเปลือก $1,137.50 \pm 47.87$ กิโลกรัมต่อไร่ ลดต้นทุน $2,250 \pm 57.74$ บาทต่อไร่ เพิ่มค่าตอบแทนรายได้ $12,125 \pm 853.91$ บาทต่อไร่ ปรับค่า pH ดิน 6.00 ± 0.58 เพิ่มความหลากหลายจุลินทรีย์ดิน 14.33 ± 5.26 สกุล และลดปรอทปนเปื้อนบนข้าวกล้อง 9.28 ± 0.081 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมา ได้แก่ การปลูกข้าวด้วยปุ๋ยอินทรีย์ (T2) สามารถเพิ่มผลผลิตข้าวเปลือก 800 ± 43.97 กิโลกรัมต่อไร่ ลดต้นทุน $2,300 \pm 81.65$

บาทต่อไร่ เพิ่มค่าตอบแทนรายได้ $6,550 \pm 57.74$ บาทต่อไร่ ปรับค่า pH ดิน 5.13 ± 0.63 จำนวนความหลากหลายจุลินทรีย์ดิน 4.33 ± 0.70 สกุล ลดปรอทปนเปื้อนบนข้าวกล้อง 20.16 ± 0.23 มิลลิกรัมต่อลิตร และการปลูกด้วยปุ๋ยเคมี-ยูเรีย (T0) ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 และเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม/การลดเทียบกับชุดควบคุม ปรากฏว่าชุดทดลอง (T1) สามารถเพิ่มผลผลิต 89.58 เปอร์เซ็นต์ ค่าตอบแทนรายได้ 85.11 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ชุดทดลอง (T2) เพิ่มผลผลิต 33.33 เปอร์เซ็นต์ แต่ค่าตอบแทนรายได้เท่าชุดควบคุม (T0)

จากการทดสอบความแปรปรวนแต่ละชุดทดลองด้วย Bartlett test ก่อนการทดสอบ One-way ANOVA พบว่าความแปรปรวนแต่ละชุดทดลอง ในด้านผลผลิต ต้นทุน และค่า pH ดิน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 ในกรณีที่ผลการทดสอบ F-test มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ (multiple comparison) ด้วยวิธี LSD ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1-7

จากผลการศึกษา จะเห็นว่าการปลูกข้าวปทุมธานี 1 ด้วยสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beauveria* และ *Metharhizium* ผสม 0.3 เปอร์เซ็นต์ สารสกัดอินทรีย์ (T1) ให้ผลผลิต และปรับ pH ดินดีกว่าการปลูกข้าวหอมปทุมธานี 1 ร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยเคมี เหตุผลเนื่องจากสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beauveria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์ (T1) ที่มีประจุไอออนบวก (แคตไอออน) สามารถจับกับประจุไอออนลบ (แอนไอออน) รอบ ๆ รากได้ดี (Liu *et al.*, 2005; Figueiredo, 2008; Choi and Huber, 2009; Glick *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2011) จึงส่งผลให้จุลินทรีย์ปฏิปักษ์หลังเอนไซม์ phosphatase, amylase, deaminase และเร่งย่อยสลายอินทรีย์ ให้กลายเป็นสารประกอบสารอาหารหลัก สารอาหารรอง

และสารอาหารเสริม น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว สอร์โม่ วิตามิน เกลือแร่ กรดอะมิโน โปรตีนคีเลต และอื่น ๆ และจุลินทรีย์ปฏิปักษ์จะค่อย ๆ ปลดปล่อยออกสู่ภายนอกเซลล์ สำหรับรากดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้อย่างรวดเร็ว ลดการสูญเสียสารอาหารและสารสกัดอินทรีย์สู่สิ่งแวดล้อม ช่วยปรับค่า pH ดินและยับยั้งการปนเปื้อนของปรอท (Ahemad and Malik, 2012; Ahemad and Khan, 2012; Park *et al.*, 2013; Lavakush *et al.*, 2014; Rattanaloeadnusorn, 2015; Rattanaloeadnusorn, 2017a; Rattanaloeadnusorn, 2017b, Behera *et al.*, 2017) ดังตารางที่ 1-7

ดังนั้น ในปัจจุบันนี้ เครือข่ายกลุ่มเกษตรกร ศูนย์เรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร อำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี และเกษตรกรใกล้เคียง จึงได้มีการขยายพื้นที่การปลูกข้าวปทุมธานี 1 ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beuvaria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซนต์ สารสกัดอินทรีย์อย่างต่อเนื่อง ทดแทนการปลูกข้าวด้วยปุ๋ยอินทรีย์ (T2) และการปลูกข้าวด้วยปุ๋ยเคมี-ยูเรีย (T0) เพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิต เพิ่มค่าตอบแทนรายได้ ปรับ pH ดิน และยกระดับคุณภาพข้าวปทุมธานี 1 ที่ได้มาตรฐานอินทรีย์ไทย และสร้างอัตลักษณ์ในเชิงพื้นที่

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์หาค่า F-test และ LSD ในการปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน และ 0.3 เปอร์เซนต์สารสกัดอินทรีย์ แปลงใหญ่ แบบมีส่วนร่วมของศูนย์เรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร อำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี กับเครือข่ายมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและหน่วยงานต่าง ๆ

ดัชนีชี้วัด	ชุดทดลอง			F-Test	LSD ¹	%การเพิ่ม/ลดเทียบกับชุดควบคุม ²	
	ปุ๋ยเคมี-ยูเรีย (T0) ชุดควบคุม	สารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน (T1)	ปุ๋ยอินทรีย์ (T2)			(T1/T0)	(T2/T0)
ผลผลิต(กกต่อไร่)	600 ±21.60	1,137.50±47.87	800±43.97	188.88*	63.26	89.58	33.33
ต้นทุน(บาทต่อไร่)	4,850±173.21	2,250±57.74	2,300±81.65	663.20*	184.70	-53.60	-52.57
รายได้(บาทต่อไร่)	6,550±57.74	12,125±853.91	6,550±57.74	169.00*	792.20	85.11	0.00
ค่า pH ดิน	3.50±0.58	6.00±0.58	5.13±0.63	18.18*	0.95.00	71.43	46.57
จำนวนสกุลงูลินทรีย์ดิน	2.6±0.58	14.33±5.26	4.33±0.70	2.002×10 ^{+32*}	1.32×10 ¹⁵	451.15	66.54
ปรอทบนข้าวกล้อง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	20.26±0.47	9.28±0.08	20.16±0.23	2.927×10 ^{+30*}	1.19×10 ¹⁴	-54.19	-0.49
มาตรฐานข้าว	GAP	อินทรีย์ไทย	GAP			-	-

หมายเหตุ: * แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 F-test (One-way ANOVA)

¹ Least significant difference (LSD) ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายกลุ่ม ในกรณีที่ F-test ให้ผลการทดสอบมีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 กลุ่มที่แตกต่างกัน

² เปอร์เซนต์การเพิ่ม/การลดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยการปลูกด้วยปุ๋ยเคมี = (ชุดทดลอง-ชุดควบคุม/ชุดควบคุม) × 100

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบค่าเฉลี่ยผลผลิตทรายคู่ด้วยวิธี LSD

ชุดทดลอง	ค่าเฉลี่ย	เปรียบเทียบรายคู่	ผลต่างค่าเฉลี่ย	LSD (0.05) = 63.26
T0	600	T0 vs T1	537.50*	แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05
T1	1,137.5	T0 vs T2	200.00*	แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05
T2	800	T1 vs T2	337.50*	แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05

หมายเหตุ: * แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 เพราะว่าค่าผลต่างแต่ละคู่มากกว่าค่า LSD= 63.26

จากตารางที่ 2 พบว่า การเปรียบเทียบรายคู่ T0 แตกต่างจาก T1, T0 แตกต่างจาก T2 และ T1 แตกต่างจาก T2

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยต้นทุนรายคู่ด้วยวิธี LSD

ชุดทดลอง	ค่าเฉลี่ย	เปรียบเทียบรายคู่	ผลต่างค่าเฉลี่ย	LSD (0.05) = 184.70
T0	4,850	T0 vs T1	2,600*	แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05
T1	2,250	T0 vs T2	2,550*	แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05
T2	2,300	T1 vs T2	50	ไม่แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05

หมายเหตุ: * แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 เพราะว่าค่าผลต่างแต่ละคู่มากกว่าค่า LSD= 184.70

จากตารางที่ 3 พบว่าการเปรียบเทียบรายคู่ T0 แตกต่างจาก T1 และ T0 แตกต่างจาก T2 ส่วน T1 ไม่แตกต่างจาก T2

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบรายได้เฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี LSD

ชุดทดลอง	ค่าเฉลี่ย	เปรียบเทียบรายคู่	ผลต่างค่าเฉลี่ย	LSD (0.05) = 792.20
T0	6,550	T0 vs T1	5,575*	แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05
T1	12,125	T0 vs T2	0	ไม่แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05
T2	6,550	T1 vs T2	5,575*	แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05

หมายเหตุ: * แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 เพราะว่าค่าผลต่างแต่ละคู่มากกว่าค่า LSD= 792.20

จากตารางที่ 4 พบว่าการเปรียบเทียบรายคู่ T0 แตกต่างจาก T1 และ T1 แตกต่างจาก T2 ส่วน T0 ไม่แตกต่างจาก T2

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบค่า pH ดิน เฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี LSD

ชุดทดลอง	ค่าเฉลี่ย	เปรียบเทียบรายคู่	ผลต่างค่าเฉลี่ย	LSD (0.05) = 0.95
T0	3.50	T0 vs T1	2.50*	แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05
T1	6.00	T0 vs T2	1.63*	แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05
T2	5.13	T1 vs T2	0.87	ไม่แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05

หมายเหตุ: * แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 เพราะว่าค่าผลต่างแต่ละคู่มากกว่าค่า LSD= 0.95

จากตารางที่ 5 พบว่าการเปรียบเทียบรายคู่ T0 แตกต่างจาก T1 และ T0 แตกต่างจาก T2 ส่วน T1 ไม่แตกต่างจาก T2

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบ ความหลากหลายทางชีวภาพจุลินทรีย์เฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี LSD

ชุดทดลอง	ค่าเฉลี่ย	เปรียบเทียบรายคู่	ผลต่างค่าเฉลี่ย	LSD (0.05) = 1.32×10^{-15}
T0	3.00	T0 vs T1	11.00*	แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05
T1	14.00	T0 vs T2	2.00*	แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05
T2	5.00	T1 vs T2	9.00*	แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05

หมายเหตุ: * แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 เพราะว่าค่าผลต่างแต่ละคู่มากกว่าค่า $LSD = 1.32 \times 10^{-15}$

จากตารางที่ 6 พบว่าการเปรียบเทียบรายคู่ T0 แตกต่างจาก T1, T0 แตกต่างจาก T2 และ T1 แตกต่างจาก T2

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบ ค่าเฉลี่ยของโลหะหนักบนข้าวกล้องรายคู่ด้วยวิธี LSD

ชุดทดลอง	ค่าเฉลี่ย	เปรียบเทียบรายคู่	ผลต่างค่าเฉลี่ย	LSD (0.05) = 1.19×10^{-14}
T0	20.40	T0 vs T1	11.07*	แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05
T1	9.33	T0 vs T2	0.00	ไม่แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05
T2	20.40	T1 vs T2	11.07*	แตกต่างกันที่นัยสำคัญ 0.05

หมายเหตุ: * แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 เพราะว่าค่าผลต่างแต่ละคู่มากกว่าค่า $LSD = 1.19 \times 10^{-14}$

จากตารางที่ 7 พบว่าการเปรียบเทียบรายคู่ T0 แตกต่างจาก T1 และ T1 แตกต่างจาก T2 ส่วน T0 ไม่แตกต่างจาก T2

2. การมีส่วนร่วมของเครือข่ายฯของการปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโนและสารสกัดอินทรีย์ แปลงใหญ่ อำเภอนongเสือ จังหวัดปทุมธานี

เมื่อกลุ่มเกษตรกรศูนย์เรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร อำเภอนongเสือ จังหวัดปทุมธานี และเครือข่ายฯ ตามบทบาทและหน้าที่ ร่วมดำเนินการการปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beuvaria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซ็นต์ สารสกัดอินทรีย์ (T1) พร้อมการตรวจวัดผลสำเร็จ (output) การเพิ่มผลผลิต ต้นทุน ค่าตอบแทนรายได้ และ pH ดิน อันก่อให้เกิดอัตลักษณ์ ความเข้มแข็งแก่ชุมชนแบบยั่งยืน ดังรายละเอียดดังนี้

1. สมาชิกเกษตรกรจำนวน 30 รายบนพื้นที่ปลูก 1,000 ไร่ของศูนย์เรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร อำเภอนongเสือ จังหวัดปทุมธานี และเครือข่ายมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และหน่วยงานต่าง ๆ ดำเนินการขยายพื้นที่ปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ ด้วยสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beuvaria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์

2. เครือข่ายมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและหน่วยงานต่าง ๆ ร่วมมืออบรมเชิงปฏิบัติการตามบทบาทและหน้าที่และความเชี่ยวชาญ ให้แก่สมาชิกเกษตรกรแบบมีส่วนร่วม ดังนี้

2.1 กรมวิชาการเกษตรให้ความรู้เกี่ยวกับเกณฑ์และแนวปฏิบัติการขอใบรับรองข้าวอินทรีย์

2.2 เกษตรอำเภอนongเสือ ปราชญ์ชาวบ้าน กำนันและผู้ใหญ่บ้าน ตำบลบึงกาสาม อำเภอนongเสือ จังหวัดปทุมธานี นายกองค์การบริหารส่วนตำบลบึง

กาสาม อำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี และนักวิจัย ประชุมหารือ วางแผนงานโครงการ กิจกรรมการ อบรมถ่ายทอดเทคโนโลยีนวัตกรรมการปลูกข้าว ปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ ร่วมกับสารชีวภาพผสม หัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beauveria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์ ทดแทนการปลูกข้าวด้วยปุ๋ยอินทรีย์หรือปุ๋ยเคมี

2.3 นักวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถ่ายทอดเทคโนโลยีการปลูกข้าว ปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ ร่วมกับสารชีวภาพผสม หัวจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beauveria* และ *Metharhizium*

และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์ (T1) การตรวจ ติดตามและวิเคราะห์ดัชนีชี้วัด เกี่ยวกับการเพิ่มผลผลิต การลดต้นทุน เพิ่มรายได้ การปรับค่า pH ดิน ความ หลากหลายจุลินทรีย์ การเปรียบเทียบกับ การปลูกข้าว อินทรีย์กับการปลูกข้าวด้วยปุ๋ยเคมี-ยูเรีย และการ เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ผลผลิตและค่าตอบแทนรายได้

2.4 กรมการข้าว กระทรวงเกษตรและ สหกรณ์ สุ่มตัวอย่างข้าวเปลือก การเตรียมเมล็ดพันธุ์ ข้าว ของกลุ่มเกษตรกร สำหรับการออกไปรับรอง ข้าวเปลือก มาตรฐานข้าวอินทรีย์ไทย ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ใบรับรองมาตรฐานข้าวกล้องปทุมธานี 1 มาตรฐานอินทรีย์ไทย ตามต้นแบบการปลูกข้าวด้วยสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์ ของเกษตรกรศูนย์เรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร อำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี

2.5 กรมพัฒนาที่ดินเขต 2 จังหวัดปทุมธานี ร่วมกับนักวิจัย แนะนำการผลิตดินผสมปุ๋ยสารชีวภาพ การเตรียมดินและการตรวจวิเคราะห์ดินก่อน-หลังการ ปรับปรุงดิน

2.6 เครือข่ายศูนย์เรียนรู้การเพิ่ม ประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร อำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี ร่วมมือกับเครือข่ายมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถ่ายทอดเทคโนโลยีการ ปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ ร่วมกับ สารชีวภาพผสมหัวจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beauveria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัด อินทรีย์ การผลิตปุ๋ยชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์ การ ผลิตดินและการผลิตสารสกัดอินทรีย์นาโน บน

สารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดนาโนเมตร ที่ ประกอบด้วยธาตุอาหารหลักรองและเสริม สอร์โอมิน โพรตีนคีเลต กรดอะมิโนคีเลต วิตามิน เกลือแร่ สารชีวภาพควบคุมโรคพืชและศัตรูแมลงพืช *Trichoderma*, *Beauveria* และ *Metharhizium* การจำหน่าย ข้าวอินทรีย์ ที่ได้มาตรฐานจีเอพี (Good Agricultural Practices: GAP) และมาตรฐานอินทรีย์ไทย (Organic Thailand) แบบออนไลน์และออฟไลน์ พร้อมการทำ บัญชีครัวเรือนเกี่ยวกับผลผลิต ต้นทุน รายได้ รายจ่าย และการประชาสัมพันธ์กรอบแนวคิดใหม่นี้ ในงาน ประชุมวิชาการ การแสดงนิทรรศการวัน field day ของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ในช่วงเดือน พฤษภาคมทุก ๆ ปี เพื่อเป็นเวทีแลกเปลี่ยนเรียนรู้

นวัตกรรมและเทคโนโลยีให้แก่เกษตรกรพื้นที่ใกล้เคียงอื่น ๆ

2.7 เครือข่ายศูนย์เรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร อำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี จัดทำสื่อต้นแบบการปลูกข้าว ปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ ร่วมกับสารชีวภาพผสม หัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beuvaria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์ และการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งจากการทำนา แบบขยะเหลือศูนย์ (zero waste) ในรูปแบบชุดความรู้ วิทย์

หนังสือพิมพ์ โทรทัศน์ช่อง 3 ไทยพีบีเอส (PBS) ช่อง 25 ช่อง 26 ช่อง 28 และช่อง 45 เป็นต้น เพื่อเผยแพร่ประชาสัมพันธ์สู่สาธารณะชนอย่างกว้างขวาง พร้อมกันนี้ องค์การบริหารส่วนตำบลบึงกาสาม เกษตรอำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี วางแผนงานโครงการและกิจกรรม ในระดับตำบล ระดับอำเภอ และระดับภาคกลางตอนบน สำหรับการขยายพื้นที่การปลูกข้าวอินทรีย์และใช้เป็นแหล่งเรียนรู้เทคโนโลยีนวัตกรรมนี้ ให้แก่เกษตรกรพื้นที่ใกล้เคียงได้อย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันนี้ ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ต้นแบบการปลูกข้าวปทุมธานี 1 ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน แบบมีส่วนร่วม

สรุป

โครงการวิจัยกรณีศึกษาภายใต้กรอบความคิดใหม่การปลูกข้าวปทุมธานี 1 ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beuvaria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์ (T1) แปลงใหญ่แบบมีส่วนร่วมของเครือข่ายศูนย์เรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร อำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี พบว่าให้ค่าดัชนีชี้วัดผลผลิตต่อไร่ ต้นทุนต่อไร่ ความหลากหลายจุลินทรีย์และการปรับ pH ดินดีที่สุด รองลงมา การปลูกข้าวด้วยปุ๋ยอินทรีย์ (T2) และการปลูกข้าวด้วยปุ๋ยเคมี (T0) ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น ในปัจจุบันเกษตรกรศูนย์เรียนรู้การเพิ่ม

ประสิทธิภาพการผลิตสินค้าเกษตร อำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี เครือข่ายมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และหน่วยงานต่าง ๆ ได้แก่ กรมวิชาการ เกษตร เกษตรอำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานีและอื่น ๆ ยอมรับและดำเนินการเพื่อขยายกรอบความคิดการเพิ่มพื้นที่ปลูกข้าวปทุมธานี 1 อินทรีย์แบบใหม่ร่วมกับสารชีวภาพผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์นาโน *Trichoderma Beuvaria* และ *Metharhizium* และ 0.3 เปอร์เซ็นต์สารสกัดอินทรีย์อย่างต่อเนื่อง อันแสดงถึงผลสำเร็จด้านปริมาณและยกระดับคุณภาพผลผลิตข้าวปทุมธานี 1 มาตรฐานอินทรีย์ไทย สร้างความเข้มแข็ง และอัตลักษณ์ในเชิงพื้นที่

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดีข้าพเจ้าขอขอบคุณ
แหล่งทุนหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนา
ระดับพื้นที่ (บพท.) ประจำปี 2564 สกอ. เลขที่สัญญา
RDG5940004-2L09 กองทุน มทร.ธัญบุรี เลขที่สัญญา
IAC62D0601 ประจำปี 2562 และโครงการอนุรักษ์
พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (อพ.สธ.)
ประจำปี 2560 ที่สนับสนุนวิจัย พร้อมกันนี้ขอขอบคุณ
ท่านศาสตราจารย์ ดร.สนิท อักษรแก้ว รองศาสตราจารย์
ดร.เลขา มาโนช ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ศพก.
อำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี กรมพัฒนาที่ดินเขต
2 และอื่น ๆ ที่เอื้ออำนวยการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Ahemad, M. and Khan, M. S. 2012. Effect of fungicides on plant growth promoting activities of phosphate solubilizing *Pseudomonas putida* isolated from mustard (*Brassica campestris*) rhizosphere. **Chemosphere** 86(9): 945-950.
- Ahemad, M. and Malik, A. 2012. Bio-accumulation of heavy metals by zinc resistant bacteria isolated from agricultural soils irrigated with wastewater. **Bacteriology Journal** 2(1): 12-21.
- Behera, B. C., Yadav, H., Singh, S. K., Mishra, R. R., Set hi, B. K., Dutta, S. K. and Thatoi, H. N. 2017. Phosphate solubilization and acid phosphatase activity of *Serratia* sp. isolated from mangrove soil of Mahanadi River delta, Odisha, India. **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology** 15(1): 169-178.
- Choi, S. T. and Huber, D. J. 2009. Differential sorption of 1-methylcyclopropene to fruit and vegetable tissues, storage and cell wall polyseccharides, oils, and lignins. **Postharvest Biology and Technology** 52(1): 62-70.
- Figueiredo, M.V.B., Burity, H.A., Martinez, C.R. and Chanway, C.P. 2008. Alleviation of drought stress in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by co-inoculation with *Paenibacillus polymyxa* and *Rhizobium tropici*. **Applied Soil Ecology** 40(1): 182-188.
- Glick, B. R., Cheng, Z., Czarny, J. and Duan, J. 2007. Promotion of plant growth by ACC deaminase-producing soil bacteria. **European Journal Plant Pathology** 119: 329-339.
- Lavakush, Yadav, J., Verma, J. P., Jaiswal, D. K. and Kumar, A. 2014. Evaluation of PGPR and different concentration of phosphorus level on plant growth, yield and nutrient content of rice (*Oryza sativa*). **Ecological Engineering** 62: 123-128.
- Li, k., Fan, H., Yin, P., Yang, L., Xue, Q., Li, X., Sun, L. and Liu, Y. 2018. Structure- activity relationship of eight high content flavonoids analyzed with a preliminary assign- score method and their contribution to antioxidant ability of flavonoids- rich extract from *Scutellaria baicalensis* shoots. **Arabian Journal of Chemistry** 11(2): 159-170.
- Liu, Q., Loganathan, P. and Hedle, M. J. 2005. Influence of ectomycorrhizal hyphae on phosphate fractions and dissolution of phosphate rock in rhizosphere soils of *Pinus radiata*. **Journal of Plant Nutrition** 28(9): 1525-1540.

- Nagulb, A.E., Salama, M.M., EI-Baz, F.K., Salama, Z.A., Hanaa, H.A., Ali, H.F. and Gaafar, A.A. 2012. Enhancement of Phenolics, flavonoids and glucosinolates of Broccoli (*Brassica oleracea*, var. *Italica*) as antioxidants in response to organic and bio-organic fertilizers. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences** 11(2): 135-142.
- Olagunju, A., Siccardi, M., Amara, A., Jevtovic, D., Kusic, J., Owen, A. and Dragovic, G. 2014. CYP2B6 516G>T (rs3745274) and Smoking Status Are Associated with Efavirenz Plasma Concentration in a Serbian Cohort of HIV Patients. **Therapeutic Drug Monitoring** 36(6): 734-738.
- Park, J.W., Balarajua, K., Kim, J.W., Lee, S.W. and Park, K. 2013. Systemic resistance and growth promotion of chili pepper induced by an antibiotic producing *Bacillus vallismortis* strain BS07. **Biological Control** 65(2): 246-257.
- Park, Y., Moniruzzaman, M., Seunghan, L., Lee, H., Hong, J., Won, S., Lee, J.M., Yun, H., Kim, K.W., Ko, D. and Bai, S.C. 2016. Comparison of the effects of dietary single and multi-probiotics on growth, non-specific immune responses and disease resistance in starry flounder, *Platichthys stellatus*. **Fish & Shellfish Immunology** 59: 351-357.
- Rattanaloeadnusorn, S. 2015. Inoculants Fungal *Trichoderma* and *Bacillus* for Improving Acidic Soils and Community Development Based on Philosophy of Sufficiency Economy, p. 24. **In proceeding 2015 International Conference on Science and Technology TICST 2015, November 4 - November 6, 2015.** Faculty of Science and Technology, Rajamagala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand.
- Rattanaloeadnusorn, S. 2017a. Inoculants Fungal *Trichoderma*, *Mucor* and *Bacillus* for Community Development based on sufficiency economy philosophy. **International Journal of GEOMATE** 13(40): 16-23.
- Rattanaloeadnusorn, S. 2017b. Pathum Thani rice1 cultivation with nano microorganism or PGPR encapsulation increase productivity, increase profits, reduce costs and conserve environment, pp. 398-410. **In 8th Academic Conference of RSPG Club "Thai Resources: Abundant Potential" November 29 - December 1, 2017.** Chulalongkorn University, Saraburi Province Thailand. (in Thai)
- Salama, Z.A., EI-Baz, F.K., Gaafar, A.A. and Zaki, M.F. 2015. Antioxidant activities of phenolics, flavonoids and vitamin C in two cultivars of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) in response to organic and bio-organic fertilizers. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences** 14: 91-99.
- Sawatsuk, T., Bubpha, K., Dhitikiattipong, R., Korinsak, S. and Unartngam, J. 2017. Assessment of Genetic Diversity of the Rice Dirty Panicle Fungus *Curvularia lunata* in Thailand. **Agricultural Science Journal** 48(1): 48-59. (in Thai)
- Vladimir, V.Z. and Wolfgang, H.S. 2008. Bacterial cellulose hydrolysis in anaerobic environmental subsystems *Clostridium thermocellum* and

- Thermophilic Plant-fiber Degradation. *Ann. N.Y. Academy of Science* 1125: 298-307.
- Wang, H.Y, Fan, B.Q, Hu, Q.X. and Yin, Z.Y. 2011. Effect of inoculation with *Penicillium expansum* on the microbial community and maturity of compost. *Bioresour. Technology* 120: 11189-11193.
- Xie, H., Pasternak, J.J. and Glick, B.R. 1996. Isolation and characterization of mutants of the plant growth-promoting rhizobacterium *Pseudomonas putida* GR12-2 that overproduce indole acetic acid. *Current Microbiology* 32: 67-71.

การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินของพื้นที่เลี้ยงกุ้ง ด้วยเทคนิคภาพถ่ายทางอากาศในพื้นที่อำเภอระโนด จังหวัดสงขลา

Change of Land Use Pattern from Shrimp Farming by Using Aerial Photogrammetry in Ranot District Songkhla Province

ณัฐพล แก้วทอง¹ ต่อลาภ การปลื้มจิตร¹ ชยณัฐ บัวทองเกื้อ^{2*} และ กนกอร เทพจันทร์¹

Natapon Kaewthong¹, Torlap Kanplumjit¹, Chayanat Buathongkhue^{2*} and Kanok-on Thepchan¹

Received: 12 May 2021, Revised: 23 February 2022, Accepted: 22 July 2022

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินของพื้นที่เลี้ยงกุ้งในพื้นที่อำเภอระโนด จังหวัดสงขลา ในปี พ.ศ. 2545, 2552 และ 2558 โดยใช้เทคนิคภาพถ่ายทางอากาศร่วมกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ผลการวิเคราะห์ค่าความน่าเชื่อถือของการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2545, 2552 และ 2558 ได้เท่ากับ 95.83 ± 4.24 , 92.71 ± 5.40 และ 92.71 ± 5.40 อยู่ในเกณฑ์ดียอมรับได้ จากการวิเคราะห์ข้อมูลในปี พ.ศ. 2545 การใช้ที่ดินเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้งเท่ากับ 29,572 ไร่ แบ่งเป็นพื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้ง ร้อยละ 99.71 และพื้นที่บ่อกุ้งร้าง ร้อยละ 0.29 ในปี พ.ศ. 2552 และ 2558 มีการใช้ที่ดินเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้งเพิ่มขึ้นเป็น 31,761 ไร่ และ 35,712 ไร่ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในช่วงปี พ.ศ. 2545-2552 พื้นที่เลี้ยงกุ้งมีการเปลี่ยนแปลงมาจาก พื้นที่นาร้าง มากที่สุด จำนวน 1,274 ไร่ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง 575 ไร่ และนาข้าว 164 ไร่ ตามลำดับ สำหรับในช่วงปี พ.ศ. 2552-2558 พบว่าพื้นที่เลี้ยงกุ้งมีการเปลี่ยนแปลงมาจากพื้นที่นาร้างมากที่สุด มีจำนวน 2,106 ไร่ นาข้าว 1,090 ไร่ และ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง 559 ไร่ ตามลำดับ จากผลดังกล่าวทำให้ทราบว่าในช่วง ปี พ.ศ. 2545-2558 การเปลี่ยนแปลงมาจากพื้นที่นาร้างมากที่สุด และเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่นาข้าวไปเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้งเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้น ยังทราบอีกว่าพื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้งมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในทางกลับกันพื้นที่บ่อกุ้งร้างกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่พื้นที่บ่อกุ้งร้างเปลี่ยนไปเป็นพื้นที่บ่อกุ้งคิดเป็นร้อยละ 45 ของ

¹ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ตำบลบ่อทราย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Boyang, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

² หลักสูตรวิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ตำบลท้องเนียน อำเภอนวม จังหวัดนครศรีธรรมราช 80210

² Department of Civil Engineering, College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Thong Nian, Khanom, Nakhon Si Thammarat 80210, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): chayanat.b@rmutsv.ac.th Tel: 08 2493 6499

พื้นที่บ่อกุ้งร้าง ทำให้ทราบว่าพื้นที่บ่อกุ้งร้างไม่สามารถเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินไปเป็นประเภทอื่นได้นอกจากกลับมาเป็นบ่อเลี้ยงกุ้งดั้งเดิม

คำสำคัญ: ภาพถ่ายทางอากาศ, การใช้ประโยชน์ที่ดิน, บ่อเลี้ยงกุ้ง, บ่อกุ้งร้าง

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the transformation of land use to shrimp farming area in Ranot District, Songkhla Province. The researchers examined the transformation pattern by using precise aerial photogrammetry techniques in conjunction with Geographic Information Systems (GIS). The results showed that the reliability index for the total land area used for shrimp farming in 2002, 2009 and 2015 were 95.83 ± 4.24 , 92.71 ± 5.40 and 92.71 ± 5.40 (the range acceptance rate was good.), respectively. In 2002, the total land area used for shrimp farming was 29,572 rai. It can be classified into 99.71% for active shrimp farming and 0.29% for abandoned shrimp ponds. From 2009 to 2015, land use for shrimp farming increased steadily. In 2009, the total shrimp farming land area was 31,761 rai and this rose to 35,712 rai by 2015. However, the analyzed results showed that in 2002 to 2009, most of the shrimp farming area at 1,274 rai changed from abandoned rice fields, followed by community areas and buildings at 575 rai and active rice fields at 164 rai. Correspondingly in 2015, most shrimp farming areas also were changed from abandoned rice fields, followed by active rice fields at 1,090 rai and community areas and buildings at 559 rai. The results also showed that in 2002 to 2015, the land use pattern in Ranot District, Songkhla Province was changed increasingly from rice fields to shrimp farming areas, especially with the transformation of abandoned rice fields. The total land area used for shrimp farming was increased and the abandoned shrimp ponds was decreased around 45% in 2002-2009 and 2009-2015. In addition, abandoned shrimp ponds were not suitable for change into other land use types unless for shrimp farming.

Key words: aerial photogrammetry, land use, shrimp pond, abandoned shrimp pond

บทนำ

พื้นที่ชายฝั่งทะเลในภาคใต้ เหมาะแก่การทำประมงชายฝั่ง ชาวบ้านที่อาศัยอยู่ริมชายทะเลส่วนใหญ่ประกอบอาชีพทำการประมงชายฝั่งโดยใช้เครื่องมือจับสัตว์น้ำพื้นบ้าน เมื่อมีการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่มาใช้ในการทำการประมงทำให้จับสัตว์น้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้การทำประมงพื้นบ้านจับสัตว์น้ำ

ได้น้อยลง ชาวประมงบางส่วนได้หันไปประกอบอาชีพอย่างอื่น เช่น การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Juthatiprat *et al.*, 2015) ในปี พ.ศ. 2521 ประเทศไทยได้หันเป็นแหล่งผลิตกุ้งกุลาดำที่สำคัญของโลกได้ประสบกับปัญหาความล้มเหลวในการเลี้ยงกุ้งกุลาดำแต่ก็ได้นำเทคโนโลยีการเลี้ยงกุ้งไปเผยแพร่ในประเทศต่าง ๆ จนในปี พ.ศ. 2530 พื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยได้นำ

เทคโนโลยีการเลี้ยงกุ้งมาใช้และเกิดการขยายพื้นที่การเลี้ยงกุ้งกุลาดำอย่างรวดเร็ว เมื่อประมาณปี พ.ศ. 2532 พื้นที่อำเภอระโนด จังหวัดสงขลา เริ่มมีการนำเทคโนโลยีการเลี้ยงกุ้งมาใช้ในพื้นที่ชายฝั่งทะเลอ่าวไทย และได้มีการขยายพื้นที่เลี้ยงกุ้งไปอย่างกว้างขวางและรวดเร็ว เนื่องจากในขณะนั้นการเลี้ยงกุ้งจะมีผลตอบแทนสูง ทำให้มีเกษตรกรบางส่วนได้เปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากพื้นที่นาไร่ร้าง และพื้นที่ทำนามาเป็นบ่อเลี้ยงกุ้ง เมื่อปี พ.ศ. 2537 ได้มีการสำรวจพื้นที่การเพาะเลี้ยงโดยประมาณในภาคใต้ มีทั้งหมดประมาณ 165,558 ไร่ โดยพื้นที่ทำนาทุ่งในเขตอำเภอระโนดประมาณ 20,175 ไร่ ในปี พ.ศ. 2548 พื้นที่นาทุ่งได้ขยายตัวไปอย่างรวดเร็วในบริเวณรอบ ๆ ทะเลสาบสงขลา มีการเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2537 ถึง 4 เท่าตัว มีการขยายพื้นที่ในเขตน้ำเค็ม บริเวณริมทะเลสาบสงขลาตอนล่าง อำเภอหาดใหญ่ บางลำภู ควนเนียง สิงหนคร และอำเภอเมืองสงขลาบางส่วน ได้มีการขยายตัวไปยังแหล่งน้ำจืด ซึ่งเป็นบริเวณที่ผลิตข้าวที่สำคัญของจังหวัดสงขลา ได้แก่ บริเวณทุ่งระโนดบางส่วน บริเวณอำเภอกระแสดินธุ์ อำเภอสติงพระ มีแรงจูงใจสำคัญที่สุดที่ทำให้เกษตรกรหันมาลงทุนเลี้ยงกุ้งกันมากเนื่องจากมีรายได้ดี และการเห็นตัวอย่างเพื่อนบ้านที่อยู่ในละแวกใกล้เคียงที่ทำแล้วได้ผลดี มีรายได้จากการทำนาทุ่ง 122,575 บาท ต่อครัวเรือนต่อปี ขณะที่ทำนาข้าวมีรายได้เพียง 35,761 บาทต่อครัวเรือนต่อปี โดยขนาดการถือครองที่ดินทำนาทุ่ง โดยเฉลี่ย 6.89 ไร่ต่อครัวเรือน จากการขยายตัวของการเลี้ยงกุ้งที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดผลกระทบด้านต่าง ๆ ได้ดังนี้

1) ผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ โครงสร้างของดินเปลี่ยนไปเนื่องจากการปรับเปลี่ยนพื้นที่เพื่อใช้เป็นบ่อเลี้ยงกุ้ง น้ำเสียจากการระบายน้ำทิ้งระหว่างเลี้ยงกุ้ง และดินเลนและของเสียอื่น ๆ จากกัน

บ่อที่หมักหมม จนเกิดการเสียหายแก่สภาพแวดล้อมบริเวณดังกล่าว

2) ผลกระทบทางด้านกายภาพของดิน ได้แก่ ความเป็นกรดเป็นด่าง ทำให้ดินเค็ม ออกซิเจนในดินลดลง ดินป่าชายเลนจะเกิดกระบวนการเน่าสลาย เกิดก๊าซไนโตรเจนซัลไฟด์ ดินถูกกัดเซาะพังทลายได้ง่าย

3) ผลกระทบทางด้านชีวภาพ การเปลี่ยนแปลงชนิดของสิ่งมีชีวิตในพื้นที่ชายฝั่ง เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพของดิน น้ำ และสมดุลความเค็มบริเวณชายฝั่ง ขาดความหลากหลายของสิ่งมีชีวิต ปริมาณสารอาหารบางชนิดเพิ่มขึ้น อาจเป็นบ่อเกิดหรือแหล่งขยายตัว อย่างดีของเชื้อโรคในสภาวะธรรมชาติ

4) ผลกระทบทางด้านสังคม เกิดความขัดแย้งระหว่างกลุ่มเกษตรกรทำนาที่มีความต้องการน้ำจืด ขณะเดียวกันกลุ่มเกษตรกรที่เลี้ยงกุ้งต้องการนำน้ำเค็มมาใช้เลี้ยงกุ้ง และเกษตรกรบางรายอยากจะทำนาทำสวน แต่คนอื่นทำนาทุ่งล้อมรอบที่นาหมด ส่งผลให้ความเค็มลงสู่ดินเริ่มขยาย หลังจากนั้นก็ทำนาทำสวนไม่ได้เลย จึงต้องตัดสินใจเลี้ยงกุ้งไปด้วย (Somprasong, 2005)

เมื่อกุ้งเริ่มมีราคาที่สูงขึ้น ผู้เลี้ยงกุ้งต้องการเพิ่มผลผลิตโดยการเพิ่มความหนาแน่นในการเลี้ยง ทำให้การลงทุนในการเลี้ยงกุ้งสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนั้นแล้วยังต้องเสี่ยงต่อการเกิดโรคของกุ้ง และราคากุ้งเริ่มตกต่ำตามอัตราแลกเปลี่ยนตลาด ส่งผลให้ผู้เลี้ยงกุ้งหลายรายเกิดภาวะขาดทุน ประกอบกับสภาพภูมิอากาศและสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ลุ่มทะเลสาบสงขลาเป็นที่ราบลุ่มและเป็นพื้นที่ทำนามาก่อน เกิดน้ำท่วมซ้ำซากทำให้ผู้ประกอบการเลี้ยงกุ้งหลายรายมีภาวะขาดทุนและบ้างรายถึงขั้นต้องหยุดกิจการ และปล่อยให้บ่อกุ้งทิ้งร้างไม่มีการใช้ประโยชน์จากที่ดินเป็นจำนวนมากในพื้นที่อำเภอระโนด จังหวัดสงขลา

สำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ผ่านมามีการศึกษาดังนี้ การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินรอบอ่าวปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ด้วยเทคนิคภาพถ่ายทางอากาศร่วมกับแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ในช่วงปี พ.ศ. 2517, 2534 และ พ.ศ. 2546 พบว่ามีการขยายตัวอย่างรุนแรงของพื้นที่เลี้ยงกุ้งเข้าสู่พื้นที่ป่าชายเลน ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศของอ่าวปากพนัง ซึ่งได้รับประกาศให้เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำ ตั้งแต่ปี 2543 นอกจากนั้นแล้วสามารถนำข้อมูลมาใช้ในการบริหารจัดการและอนุรักษ์พื้นที่ของอ่าวปากพนังให้ได้ตามข้อกำหนดของการรักษาพื้นที่ชุ่มน้ำ (Prabnarong and Thongkao, 2006) การเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ของเมืองสงขลาหัวเขาแดง จังหวัดสงขลา ได้นำเทคนิคภาพถ่ายทางอากาศร่วมกับการใช้แผนที่ประโยชน์ที่ดินด้วยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2510, 2532 และ พ.ศ. 2550 พบว่า ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2532 หลังจากก่อสร้างสะพานติณสูลานนท์และท่าเรือน้ำลึกจังหวัดสงขลา เกิดการขยายชุมชนอย่างรวดเร็วตลอดแนวทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 408 พื้นที่เมืองเริ่มขยายตัวรุกเข้าพื้นที่เกษตรกรรมและโบราณสถาน มีกิจกรรมการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ขัดแย้งกับทิศทางการอนุรักษ์ พื้นที่ป่าไม้ถูกทำลายลงอย่างรวดเร็ว ผลจากการศึกษานี้จะได้ใช้เป็นข้อมูลสำหรับการวางแผนผังเมืองเพื่ออนุรักษ์โบราณสถาน (Boonnarong, 2009) การจัดการนาเกลือเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนของชุมชนคลองโคน อำเภอมือ จังหวัดสมุทรสงคราม ด้วยเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์และศึกษาสภาพสังคมเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมของชุมชน โดยการสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียพบว่าชุมชนมีความสนใจในการจัดการนาเกลือในรูปแบบของการปลูกป่าชายเลนเพื่อการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ขายคาร์บอนเครดิต และขายถ่าน แต่ชุมชนยัง

ขาดปัจจัยทางด้านเงินลงทุนในระยะยาว การจัดการอย่างเป็นระบบ และยังไม่มีความเข้าใจเกี่ยวกับการ์บอนเครดิต การปลูกป่าชายเลนเพื่อการอนุรักษ์ขายคาร์บอนเครดิต และขายถ่าน สามารถทำให้เกิดความสมดุลทั้งทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมเพื่อพัฒนานาเกลืออย่างยั่งยืน (Kasipob, 2013) การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินโดยใช้วิธีการแปลงกริดเป็นดิจิทัล เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินด้วยวิธีการแปลงตารางแบบดิจิทัลซึ่งเป็นเทคนิคง่าย ๆ ในการปรับโครงสร้างข้อมูลการใช้ที่ดินซึ่งประกอบด้วย "ไฟล์รูปร่าง" หลายเหลี่ยมที่มีต่อเนื่องกัน (x, y) จุดขอบเขตของแปลงสำหรับหมวดหมู่การใช้ที่ดินทางภูมิศาสตร์เป็นข้อมูลดิจิทัลกริดและแสดงวิธีนี้โดยใช้ข้อมูลจากประเทศไทย ข้อมูลใหม่ประกอบด้วยตารางสี่เหลี่ยมของพิกัดทางภูมิศาสตร์ที่มีรหัสการใช้ที่ดินและตัวระบุพล็อตเป็นเขตข้อมูลในตารางฐานข้อมูลที่ทำดัชนีโดยพิกัดเส้นตาราง การมีฐานข้อมูลดังกล่าวเพื่อใช้ในการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน (Thinnukool *et al.*, 2014) การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินโดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียมและข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศแบบดิจิทัลกรณีศึกษากลุ่มน้ำคลองกุย จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ (ประเทศไทย) และคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงการพังทลายของดิน พร้อมจำแนกคุณสมบัติของดินความลาดชันและข้อมูลปริมาณน้ำฝนเพื่อระบุพื้นที่เสี่ยงที่จะเกิดการกัดเซาะของดิน พบว่ามีความเสี่ยงสูงมาก (Chaikaew, 2015) จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อการลดลงของพื้นที่ป่าไม้ในลุ่มน้ำตรัง ด้วยการประยุกต์ใช้ GIS โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของเมืองกับเปอร์เซ็นต์พื้นที่ป่าไม้ในลุ่มน้ำตรัง พบว่าการลดลงของป่าไม้มีความสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์พื้นที่พัฒนา และความหนาแน่นของประชากร แสดงการขยายตัวของเมืองและประชากรเพิ่มขึ้นทำให้มีการทำลายป่าเพิ่มมากขึ้น

(Srisunoot *et al.*, 2018) และจากศึกษาการประยุกต์ภูมิสารสนเทศในการคาดการณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินป่าไม้ บริเวณอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่และการคาดการณ์สภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินในอนาคต โดยจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินในปี พ.ศ. 2552 พ.ศ. 2557 และ พ.ศ. 2562 จากภาพถ่ายดาวเทียม LANDSAT-5 และ LANDSAT-8 ด้วยเทคนิคการแปลตีความหมายด้วยสายตา (Visual Interpretation) พบว่าในอนาคตพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง และพื้นที่เบ็ดเตล็ดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่พื้นที่ป่าไม้และพื้นที่เกษตรกรรมมีแนวโน้มลดลงอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ป่าไม้และพื้นที่เกษตรกรรมเป็นพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างในบริเวณหลายหมู่บ้านการลดการบุกรุกของพื้นที่ป่าต้องมีการดำเนินการจัดการพื้นที่เชิงรุกและมาตรการในการเฝ้าระวังเพื่อให้มีการใช้ประโยชน์ที่ดินป่าไม้อย่างเหมาะสม (Vasira, 2019)

จากเหตุการณ์ดังกล่าวแสดงถึงประเด็นการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้งและการนำพื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้งกลับมาใช้ประโยชน์ในที่ดิน จึงได้ทำการศึกษา โดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศและแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน ในปี พ.ศ. 2545, 2552 และ 2558 รวมกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์(GIS) เพื่อให้เห็นทิศทางการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ของพื้นที่เลี้ยงกุ้งและการปรับเปลี่ยนการใช้ประโยชน์ที่ดินของพื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้ง

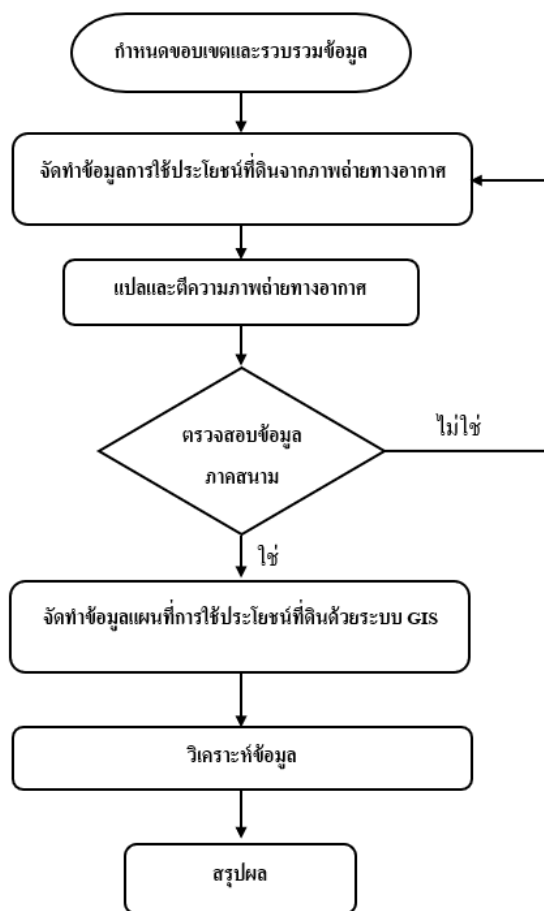
วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้มีขั้นตอนในการดำเนินการดังแสดงในภาพที่ 1 และมีรายละเอียดดังนี้

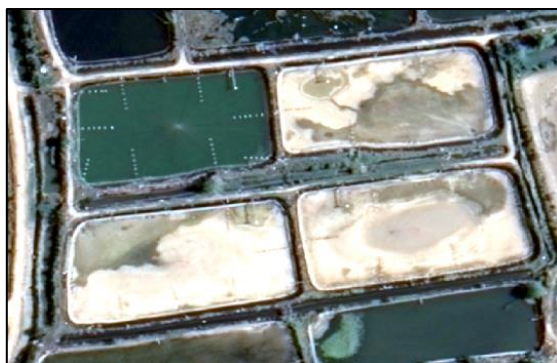
1) กำหนดขอบเขตและรวบรวมข้อมูล โดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศจากกรมแผนที่ทหาร และแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินจากสำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 12 ในปี พ.ศ. 2545, 2552 และ พ.ศ. 2558 ด้วยโปรแกรม Arc GIS 10.3.1 โปรแกรม Google Earth Pro โปรแกรม Microsoft Office

2) จัดทำข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินจากภาพถ่ายทางอากาศ โดยการแปลและตีความจากภาพถ่ายทางอากาศด้วยสายตา ของภาพถ่ายทางอากาศในช่วงเวลาดังกล่าวโดยอาศัยปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณารายละเอียดในภาพถ่ายทางอากาศที่ปรากฏบนภาพ ได้แก่ รูปร่าง ขนาด สี วัตถุที่มีสีต่าง ๆ รูปแบบเงาตำแหน่งในภูมิประเทศ ความหยาบละเอียด การใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทพื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้งและบ่อเลี้ยงกุ้งร้าง โดยจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน พื้นที่เกษตรกรรมตามระบบสากล

3) การแปลและตีความด้วยสายตาเพื่อจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทบ่อเลี้ยงกุ้งและบ่อเลี้ยงกุ้งร้าง โดยบ่อเลี้ยงกุ้งมีลักษณะรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม พื้นที่คันบ่อมีวัชพืชบ้างแต่ภายในบ่อจะไม่มีวัชพืชปกคลุมเลยและจะมีเครื่องเดิมอากาศกั้นดินน้ำกระจายรอบ ๆ บ่อ กรณีที่บ่อเลี้ยงกุ้งอยู่ในช่วงของการจับกุ้งลักษณะของบ่อจะแห้งหรือมีน้ำขังบางจุดเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 2 (ก) สำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งร้าง มีลักษณะรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมบิดเบี้ยว พื้นที่บริเวณคันบ่อและภายในบ่อจะมีวัชพืชปกคลุมมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ร้าง โดยส่วนใหญ่บ่อเลี้ยงกุ้งร้างจะไม่มีเครื่องเดิมอากาศกั้นดินน้ำและมีน้ำขัง ดังแสดงในภาพที่ 2 (ข)



ภาพที่ 1 วิธีการดำเนินการวิจัย



(ก) สภาพบ่อเลี้ยงกุ้งจากภาพถ่ายทางอากาศ



(ข) สภาพบ่อเลี้ยงกุ้งจากภาพถ่ายทางอากาศ

ภาพที่ 2 สภาพบ่อเลี้ยงกุ้งจากภาพถ่ายทางอากาศ

4) ตรวจสอบความถูกต้องข้อมูลภาคสนาม โดยกำหนดจุดตรวจสอบจากสมการ Binomial Probability Theory ดังสมการที่ (1)

$$N = \frac{4pq}{E^2} \quad (1)$$

เมื่อ N คือ จำนวนจุดตัวอย่างจำนวนน้อยที่สุดที่ควรใช้สุ่มเป็นตัวอย่าง

p คือ โอกาสความน่าจะเป็นที่จุดภาพนั้นน่าจะถูกต้อง

q คือ ค่าแตกต่างระหว่าง 100 - p หรือ q = 100 - p

E คือ ค่า เปอร์เซนต์ความผิดพลาดที่ยอมรับ

ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดให้โอกาสความน่าจะเป็นที่จุดภาพนั้นน่าจะถูกต้อง (p) เท่ากับร้อยละ 85 และให้ร้อยละความผิดพลาดที่ยอมรับ (E) = ร้อยละ 10 (Hattapradit, 2018) แทนค่าในสมการที่ (1) จะได้จำนวนจุดภาพที่จะต้องตรวจสอบความ

ถูกต้องอย่างน้อยจำนวน 51 จุด แต่ในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้จำนวน 96 จุดเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาจากนั้นหาความน่าเชื่อถือด้วยสมการ Two - Tailed ดังสมการที่ (2)

$$p = p \sim \pm [1.96 \sqrt{((p \sim)(q \sim)/n + 50/n)}] \quad (2)$$

เมื่อ p คือ ช่วงความน่าเชื่อถือ

p~ คือ เปอร์เซนต์ของจำนวนที่ถูกต้อง

q~ คือ ค่าความต่างระหว่าง 100 - p~

n คือ จำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมด

5) ปรับแก้ข้อมูลหลังจากลงพื้นที่ตรวจสอบการใช้ประโยชน์ที่ดินจากการวิเคราะห์เทียบกับข้อมูลภาคสนาม ดังในภาพที่ 3



(ก) ลักษณะของบ่อกึ่งร้าง



(ข) ลักษณะของบ่อเลี้ยงกุ้ง

ภาพที่ 3 ลักษณะของบ่อกึ่งร้างจากการลงพื้นที่สำรวจภาคสนามอำเภอระโนด จังหวัดสงขลา

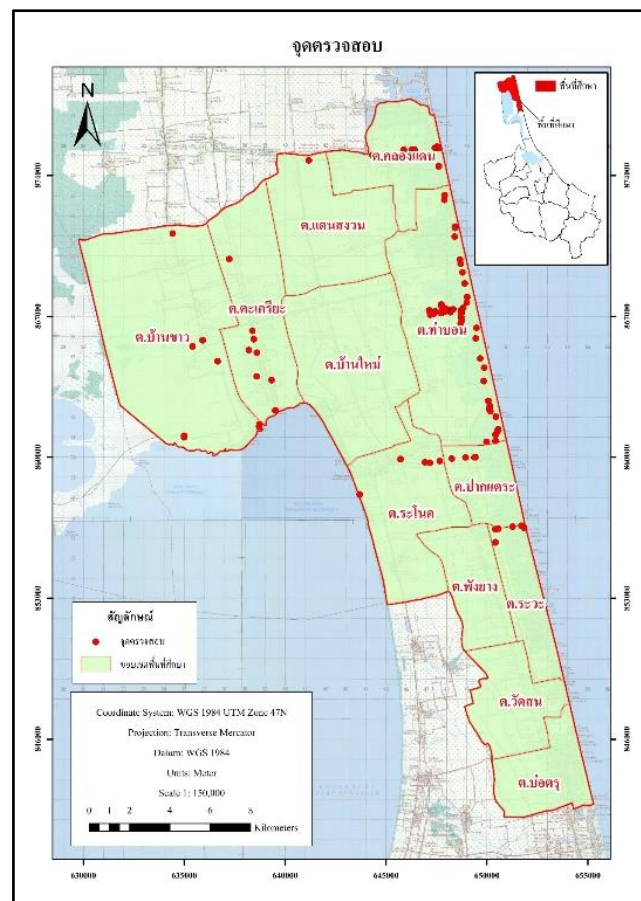
6) จัดทำข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินในรูปแบบข้อมูลเชิงเลข โดยใช้โปรแกรม Arc GIS จำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน และวิเคราะห์หาขนาดพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินแต่ละประเภท

7) วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยใช้เทคนิคการซ้อนทับ (Overlay) ระหว่างข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินของปี พ.ศ. 2545 ปี พ.ศ. 2552 และปี พ.ศ. 2558 โดยใช้โปรแกรม Arc GIS วิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดิน และคำนวณหาพื้นที่พร้อมกับวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินเนื่องจากการเลี้ยงกุ้ง

8) สรุปผลการวิเคราะห์และเสนอแนะผลการศึกษา

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

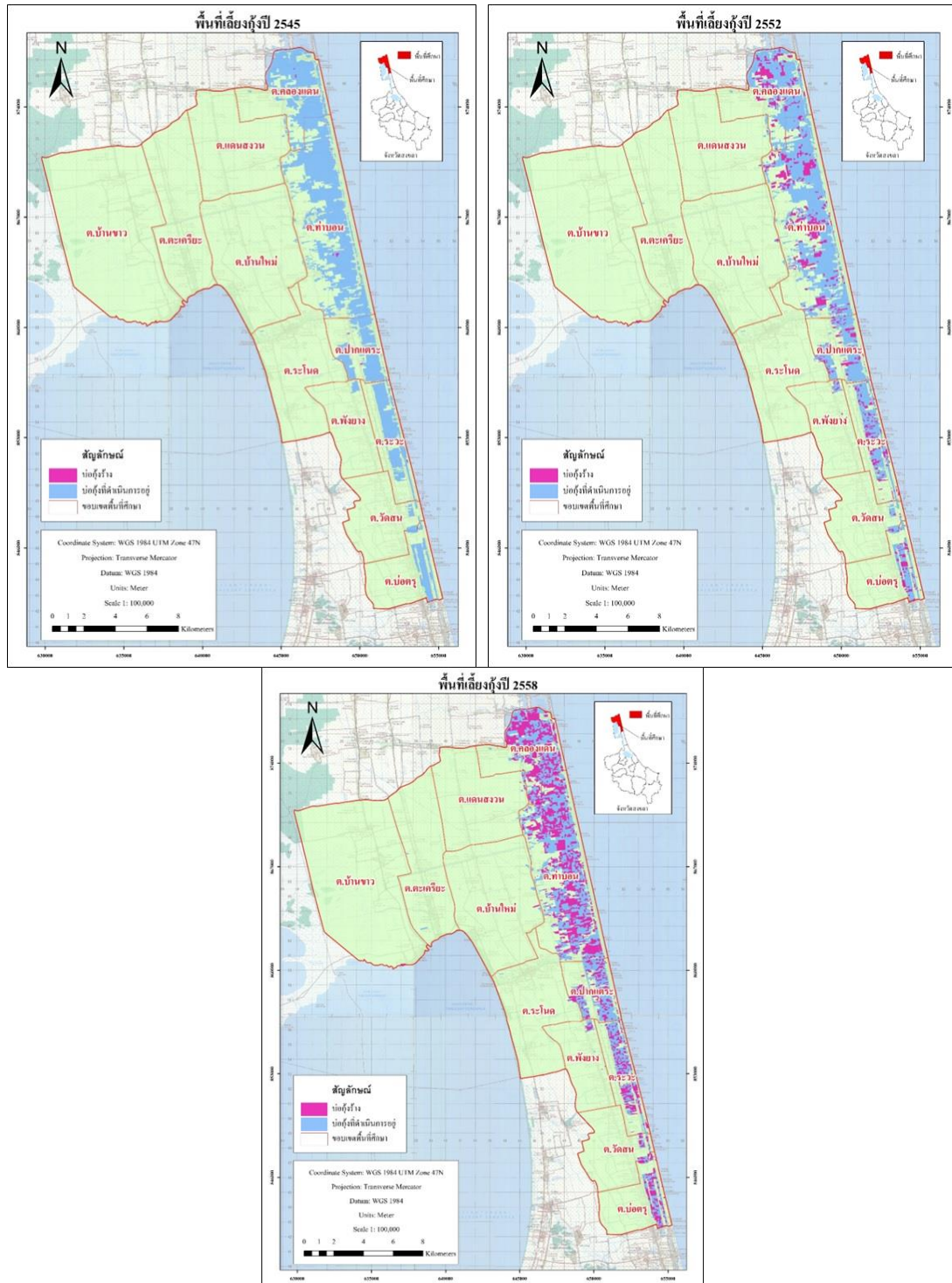
1) ผลการตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ศึกษากับจุดตรวจสอบข้อมูลภาคสนาม ดังแสดงภาพที่ 4 ได้ค่าความน่าเชื่อถือของการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2545, 2552 และ 2558 ได้เท่ากับ 95.83 ± 4.24 , 92.71 ± 5.40 และ 92.71 ± 5.40 ซึ่งความน่าเชื่อถือทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์ดีและยอมรับได้ เมื่อเปรียบเทียบค่าความน่าเชื่อถือของการจำแนกร้อยละ 93.98 ของพื้นที่ทั้งหมด จากการศึกษากำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินเชิงลึกด้วยการตีความภาพถ่ายทางอากาศ บริเวณลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา (Hattapradit, 2018)



ภาพที่ 4 แสดงจุดตรวจสอบภาคสนามอำเภอระโนด จังหวัดสงขลา จำนวน 96 จุด

2) ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทพื้นที่เสี่ยงภัย จากภาพถ่ายทางอากาศ ร่วมกับข้อมูลการตีความด้วยสายตาจัดทำเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขให้มีความสอดคล้องกับระบบการ

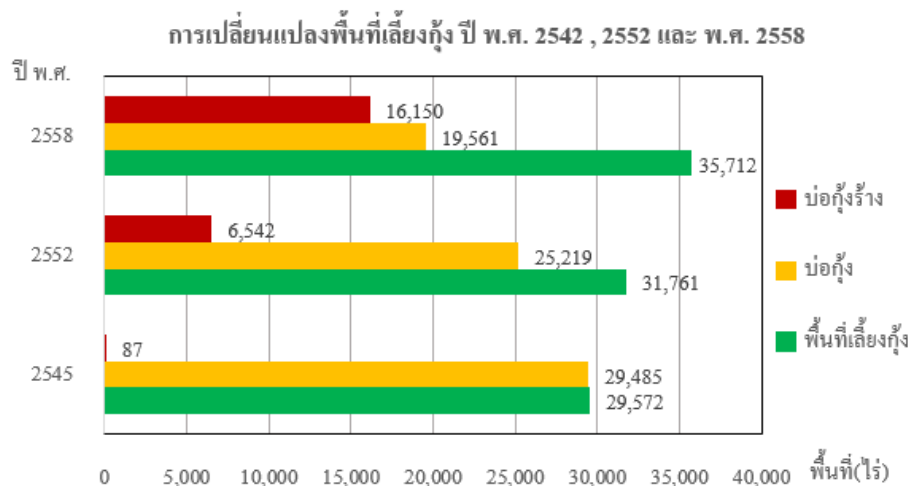
จำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินเชิงลึก สามารถนำมาจัดทำเป็นแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินจากการเสี่ยงภัยในแต่ละปีได้ดังปรากฏในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินจากการเสี่ยงภัย อำเภอรโนด จังหวัดสงขลา ปี พ.ศ. 2545, 2552 และ 2558

จากข้อมูลแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้ง ในปี พ.ศ. 2545 มีพื้นที่ประมาณ 29,572 ไร่ แบ่งเป็นพื้นที่บ่อเลี้ยงประมาณ 29,485 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 99.71 และพื้นที่บ่อเลี้ยงร้างประมาณ 87 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 0.29 ในปี พ.ศ. 2552 มีการเปลี่ยนแปลงที่ดินเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้งประมาณ 31,761 ไร่ แบ่งเป็นพื้นที่บ่อเลี้ยงประมาณ 25,219 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 79.40 และพื้นที่บ่อเลี้ยงร้างประมาณ 6,542 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 20.60 และในปี พ.ศ. 2558 มีการเปลี่ยนแปลงที่ดินเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้งประมาณ 35,712 ไร่ แบ่งเป็นพื้นที่บ่อเลี้ยงประมาณ 19,561 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 54.77 และพื้นที่บ่อเลี้ยงร้างประมาณ 16,150 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 45.23 รายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 6

และเมื่อเปรียบเทียบการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้ง บริเวณอ่าวปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับ อำเภอรณด จังหวัดสงขลา ในช่วงปี พ.ศ. 2538-2546 พบว่ามีพื้นที่ เลี้ยงกุ้งเพิ่มขึ้น 3,887.5 ไร่ (Prabnarong and Thongkao, 2006) ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน จากข้อมูลการศึกษาในช่วงเวลาดังกล่าว พบว่า การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนไม่มากนัก และพื้นที่บ่อเลี้ยงมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน ในทางกลับกันพื้นที่บ่อเลี้ยงร้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นทุกช่วงปี



ภาพที่ 6 กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงพื้นที่เลี้ยงกุ้งอำเภอรณด จังหวัดสงขลา
ปี พ.ศ. 2545, 2552 และ พ.ศ. 2558

3) ผลการวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้ง ในช่วง ปี พ.ศ. 2545 - 2552 และช่วงปี พ.ศ. 2552 - 2558 พบว่าในช่วงปี พ.ศ. 2545 - 2552 มีการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้งประมาณ 2,189 ไร่ แบ่งเป็นพื้นที่นาร้าง 1,284 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 58.7 พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง 579 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 26.5 นาข้าว 166 ไร่

คิดเป็นร้อยละ 7.6 รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1 จากข้อมูลในช่วงเวลาดังกล่าว ทำให้ทราบว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้งส่วนใหญ่มาจากพื้นที่นาร้าง รองลงมาเป็นพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง และพื้นที่นาข้าวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในช่วงเวลาปี พ.ศ. 2552 - 2558 มีการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้งประมาณ 3,951

ไร่ แบ่งเป็นพื้นที่นาไร่ 2,106 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 53.30 พื้นที่นาข้าว 1,090 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 27.58 พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง 559 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 14.15 รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1 จากข้อมูลในช่วงเวลาดังกล่าว ทราบว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้งส่วนใหญ่มาจากพื้นที่นาไร่ รองลงมาเป็นพื้นที่นาข้าว และพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาดังกล่าวนี้เริ่ม

มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากพื้นที่นาข้าวเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้งเพิ่มขึ้นจากเดิม 5.56 เท่า และเมื่อพิจารณาในภาพรวมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545-2558 พบว่าการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้ง ส่วนใหญ่มาจากพื้นที่นาไร่ รองลงมาเป็นพื้นที่นาข้าว และพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง ตามลำดับ

ตารางที่ 1 การใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนแปลงเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้งอำเภอระโนด จังหวัดสงขลาในช่วงปี พ.ศ. 2542-2552 และช่วงปี พ.ศ. 2552-2558

ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน	การเปลี่ยนแปลงเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้ง (ไร่)	
	2545-2552	2552-2558
นาข้าว	166	1,090
นาไร่	1,284	2,106
ป่าไม้	29	98
พืชไร่และพืชสวน	105	47
พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง	579	559
หาดทราย	26	-
พื้นที่ลุ่ม	-	47
รวม	2,189	3,947

4) ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินพื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้งร้าง โดยแยกพิจารณาเป็นช่วงเวลาปี พ.ศ. 2545 เทียบกับปี พ.ศ. 2552 และปี พ.ศ. 2552 เทียบกับปี พ.ศ. 2558 รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ในช่วงที่ 1 มีพื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้งร้างประมาณ 87 ไร่ มีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นพื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้งประมาณ 39 ไร่ และยังคงเป็นพื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้งร้าง 48 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 44.83 และ 55.17 ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าช่วงเวลาดังกล่าวพื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้งร้างยังคงมีการกลับมาพัฒนาเป็นพื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้งเกือบเท่ากับการปล่อยให้บ่อเลี้ยงกุ้งร้าง ในช่วงที่ 2 มีพื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้งร้างประมาณ 6,542 ไร่ มีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นพื้นที่บ่อ

เลี้ยงกุ้งประมาณ 2,924 ไร่ และยังคงเป็นพื้นที่บ่อเลี้ยงกุ้งร้าง 3,618 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 44.70 และ 55.30 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาดังกล่าวบ่อเลี้ยงกุ้งร้างยังคงมีการกลับมาพัฒนาเป็นบ่อเลี้ยงกุ้งเกือบเท่ากับการปล่อยให้บ่อเลี้ยงกุ้งร้างเช่นกัน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการพัฒนาการใช้ประโยชน์ที่ดินในระยะยาว เนื่องจากดินเสื่อมสภาพ จากการศึกษาแนวทางการฟื้นฟูการประกอบอาชีพหลังวิกฤตดินกึ่งของชาวบ้านอำเภอระโนด จังหวัดสงขลา พบว่ามี 6 แนวทาง ดังนี้

- 1) การปรับเปลี่ยนวิธีการเลี้ยงกุ้ง
- 2) ปรับเปลี่ยนพื้นที่บ่อเลี้ยงเป็นบ่อเลี้ยงปลา
- 3) ปรับเปลี่ยนพื้นที่เลี้ยงกุ้งมาปลูกผักสวนครัว

- 4) ปรับเปลี่ยนพื้นที่เป็นไร่นาสวนผสม
5) ปรับพื้นที่บ่อเลี้ยงเป็นสวนปาล์มน้ำมัน และ

- 6) ปรับเปลี่ยนอาชีพจากการเลี้ยงกุ้งไปเป็น
อาชีพอื่น ๆ (Juthatiprat *et al.*, 2015)

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่บ่อเลี้ยงร้างอำเภอระโนด จังหวัดสงขลา

การใช้ประโยชน์ ที่ดิน	การเปลี่ยนแปลงพื้นที่บ่อเลี้ยงร้าง		การเปลี่ยนแปลงพื้นที่บ่อเลี้ยงร้าง	
	2542-2552		2552-2558	
	พื้นที่(ไร่)	ร้อยละ	พื้นที่(ไร่)	ร้อยละ
บ่อเลี้ยงกุ้ง	39	44.83	2,924	44.70
บ่อเลี้ยงร้าง(คงเดิม)	48	55.17	3,618	55.30
รวม	87	100	6,542	100

สรุป

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้ง ในช่วงปี พ.ศ. 2545-2558 ของอำเภอระโนด จังหวัดสงขลา ด้วยเทคนิคภาพถ่ายทางอากาศ จากการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินปี พ.ศ. 2545, 2552 และ 2558 ได้เท่ากับ 95.83 ± 4.24 , 92.71 ± 5.40 และ 92.71 ± 5.40 ความน่าเชื่อถือทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์ดียอมรับได้ จากแผนที่ดังกล่าวนำมาวิเคราะห์หาพื้นที่เลี้ยงกุ้งจากแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินในปี พ.ศ. 2545, 2552 และ 2558 พบว่ามีพื้นที่เลี้ยงกุ้ง 29,572 ไร่, 31,761 ไร่ และ 35,712 ไร่ มีพื้นที่บ่อเลี้ยง 29,845 ไร่, 25,219 ไร่ และ 19,561 ไร่ และมีพื้นที่บ่อเลี้ยงร้าง 87 ไร่, 6,542 ไร่ และ 16,150 ไร่ ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลพื้นที่เลี้ยงกุ้ง ช่วงที่ 1 ปี พ.ศ. 2545-2552 พบว่ามีพื้นที่เลี้ยงกุ้งเพิ่มขึ้น 2,189 ไร่ หรือมีอัตราเพิ่มขึ้น 312.7 ไร่ต่อปี ซึ่งเกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่นาข้าว พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง และพื้นที่นาข้าว คิดเป็นร้อยละ 58.7, 26.5 และ 7.6 ตามลำดับ มีพื้นที่บ่อเลี้ยงลดลง 4,266 ไร่ หรือมีอัตราลดลง 609.4 ไร่ต่อปี มีพื้นที่บ่อเลี้ยงร้างเพิ่มขึ้น 6,455 ไร่ หรือมีอัตราเพิ่ม 922.1 ไร่ต่อปี และจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินพื้นที่บ่อเลี้ยงร้าง ช่วงที่ 1 พบว่า

พื้นที่บ่อเลี้ยงร้างยังคงมีการกลับมาพัฒนาเป็นบ่อเลี้ยงกุ้งเกือบเท่ากับการปล่อยให้บ่อเลี้ยงร้าง เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลพื้นที่เลี้ยงกุ้งในช่วงที่ 2 ปี พ.ศ. 2552-2558 พบว่าพื้นที่เลี้ยงกุ้งเพิ่มขึ้น 3,951 ไร่ หรือมีอัตราเพิ่มขึ้น 658.5 ไร่ต่อปี ซึ่งเกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่นาข้าว พื้นที่นาข้าว และพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง คิดเป็นร้อยละ 53.30, 27.58, 14.15 ตามลำดับ มีพื้นที่บ่อเลี้ยงลดลง 5,658 ไร่ หรือมีอัตราลดลง 943 ไร่ต่อปี มีพื้นที่บ่อเลี้ยงร้างเพิ่มขึ้น 9,608 ไร่ หรือมีอัตราเพิ่มขึ้น 1601.3 ไร่ต่อปี และจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินพื้นที่บ่อเลี้ยงร้าง จะมีลักษณะที่เหมือนกับในช่วงที่ 1

การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เปลี่ยนเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนรูปแบบการเปลี่ยนแปลงพื้นที่เลี้ยงกุ้ง พบว่าส่วนใหญ่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่นาข้าว แต่ช่วงที่ 2 ก็เริ่มมีพื้นที่นาข้าวเปลี่ยนมาเป็นพื้นที่เลี้ยงกุ้ง ส่วนพื้นที่บ่อเลี้ยงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากระยะหลังผลตอบการเลี้ยงกุ้งลดต่ำลง ประกอบกับมีการระบาดของโรคในกุ้งเพิ่มขึ้น ทำให้ผู้เลี้ยงกุ้งขาดทุนและเลิกเลี้ยงกุ้งในส่งผลให้พื้นที่บ่อเลี้ยงร้างกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น พื้นที่บ่อเลี้ยงร้างยังคงมีการพัฒนาเป็นบ่อเลี้ยงเกือบเท่ากับการปล่อยให้ทั้งเป็นบ่อเลี้ยงร้าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบ่อเลี้ยงร้าง

ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็นประเภทอื่นได้ นอกจากกลับมาทำการเลี้ยงกุ้งดั้งเดิม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือ และโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ในงานวิจัย และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Boonnarong, S. 2009. Spatial Changes of Songkhla Hua Khao Daeng, Songkhla Province. **The Journal of KMUTNB** 19(3): 343-351. (in Thai)
- Chaikaew, P. 2015. Land use change using satellite image and digital terrain model data, Case Study in Khlong Kui watershed, Prachuap Khiri Khan province (Thailand). **Songklanankarin Journal of Science and Technology** 37(6): 691-700.
- Hattapradit, H. 2018. In-depth land use classification by aerial photograph interpretation, Songkhla Lake Basin. Bachelor degree of Engineering (Survey Engineering), Rajamangala University of Technology Srivijaya. (in Thai)
- Juthatiprat, J., Duangchan, P., Tibsrinimit, N. and Sungkharat, U. 2015. The Guidelines of Restoration Vocational After the Prawn Farming Crisis of the in Habitants at Ranote District, Songkhla Province. **Journal of the Humanities and Social Sciences Thaksin University** 10(1): 119-141. (in Thai)
- Kasipob, R. 2013. Abandoned Shrimp Farm Management for Sustainable Development of Klong Kone

- Community Muang District, Samut Songkram Province. Master Thesis of Science (Environmental Management), National Institute of Development Administration. (in Thai)
- Prabnarong, P. and Thongkao, S. 2006. Land Use Changes in Pak Panang Bay using Arial Photographs and Geographic Information System. **Walailak Journal of Science and Technology** 3(1): 93-104.
- Somprasong, P. 2005. **Marine Shrimp Cultivation in Songkhla Lake**. Available Source: <http://www.sklonline.com/shrimp-sea.html>, July 2, 2019.
- Srisunoot, T., Srisunoot, C. and Srigate, J. 2018. Effect of land-use change on deforestation in Trang watershed, pp. AS-198-202. **In The 6th Academic Science and Technology Conference 2018**. King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok. (in Thai)
- Thinnukool, O., Chuangchang, P. and Khongkraphan, K. 2014. Analyzing land use change using grid-digitized method. **Songklanankarin Journal of Science and Technology** 36(2): 235-240.
- Vasira, K. 2019. Application of Geo-Informatics in Prediction of Forest Land Use at Doi Inthanon National Park, Chiang Mai Province. Master Thesis of Science (Forest Resource and Environmental Administration), Kasetsart University. (in Thai)

การศึกษาสถานะที่เหมาะสมการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ระดับชุมชนและต้นแบบเครื่องผลิตน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้พลังงานชีวมวล

Study of Optimal Biodiesel Production from Waste Frying Oils for Community, and Prototype of Biodiesel Reactor Using Biomass Energy

อาริษา โสภารจารย์¹ จักรพงษ์ จิตต์จำนงค์² นภารัตน์ เกษตรสมบูรณ์² และ สุหดี นิเซ็ง^{1*}

Arrisa Sopajarn¹, Jakkrapong Jitjamnong², Naparat Kasetsoomboon² and Suhdee Niseng^{1*}

Received: 22 March 2021, Revised: 30 September 2022, Accepted: 17 October 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลจากของเสียในชุมชนเขารูปช้าง อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา โดยใช้น้ำมันพืชใช้แล้วมีค่าความเป็นกรดไม่เกิน 2 mgKOH/g จากการรวบรวมจากร้านค้าต่าง ๆ โดยการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน (3:1-15:1) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (1-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (30-120 นาที) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (50-70 องศาเซลเซียส) และความเร็วรอบในการกวน (300 รอบต่อนาที) เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ในการทดลองจะใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) และออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central Composite Design (CCD) เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในระดับห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาพบว่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลได้ คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับโมลน้ำมันพืชใช้แล้ว เท่ากับ 7.73:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 3.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ เท่ากับ 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เท่ากับ 60.54 นาที น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติเทียบเคียงน้ำมันไบโอดีเซลชุมชน จากนั้นใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการเป็นข้อมูลสำหรับการศึกษา ระบบผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วระดับชุมชนโดยใช้ความร้อนจากชีวมวลในการทำปฏิกิริยา

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร สาขาอุตสาหกรรม วิทยาลัยรัตนภูมิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ตำบลท่าชะมวง อำเภอรัตภูมิ จังหวัดสงขลา 90180

¹ Agricultural Machinery Engineering, Department of Industrial, Rattaphum College, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Tachamuang, Rattaphum, Songkhla 90180, Thailand.

² สาขาวิชาเทคโนโลยีปิโตรเลียม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ตำบลบ่อหยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

² Petroleum Technology, Faculty of Industrial Education and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Boyang, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): suhdee.n@rmutsv.ac.th

จากการทดสอบพบว่าได้เมทิลเอสเทอร์ที่มีความบริสุทธิ์ 96.83 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้เหมาะกับการใช้งานในเครื่องยนต์ทางการเกษตร หรือเครื่องยนต์ดีเซลสำหรับเรือประมงทางยาว

คำสำคัญ: น้ำมันพืชใช้แล้ว, เอสเทอร์, ทรานส์เอสเทอร์รีฟิเคชัน, วิธีพื้นผิวตอบสนอง

ABSTRACT

This research aimed to examine biodiesel synthesis from waste of Khaoroochang Municipality, Songkhla Province. Waste cooking oil with acid value less than 2 mgKOH/g collected from markets was used. The four parameters: molar ratio of alcohol to oils (3:1-15:1), amount of catalyzed (1-5 %wt.), reaction time (min), reaction temperature (50-70 °C), and impeller speed (300 rpm) were investigated. The response surface methodology with central composite design (CCD) was adopted to optimize the condition of base-catalyzed transesterification in lap-scale. The result indicated that under condition of 7.73:1 of molar ratio of alcohol to oils, 3.97 %wt. of KOH, 60.54 min of reaction time, and 55 °C of reaction time, biodiesel purity was obtained comparably for commercial biodiesel standard. Then the data in lap-scale were used for studying biodiesel production system for community from waste frying oils by using biomass energy for heating the reaction. After testing the system with the same optimized condition in lab-scale, methyl ester purity was achieved 96.83 wt. %. This biodiesel was suitable for using in agricultural engine and diesel engine for long-tailed fishing boat.

Key words: waste cooking oil, ester, transesterification, response surface methodology

บทนำ

ตำบลเขารูปช้างตั้งอยู่ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดสงขลา มีร้านค้าจำนวนมาก และขยะอินทรีย์ที่เกิดผู้ประกอบการร้านอาหารที่ไม่ได้รับการจัดการอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะร้านอาหารประเภททอดมีน้ำมันที่เหลือจากการทอด ซึ่งจากการสัมภาษณ์แม่ค้าจะมีพ่อค้าคนกลางมารับซื้อน้ำมันที่เหลือจากการทอด เพื่อให้เป็นเชื้อเพลิง แต่มีบางส่วนนำไปผสมในอาหารสำหรับเลี้ยงไก่ เมื่อบริโภคไก่ก่อให้เกิดโรคตามมาภายหลัง ซึ่งปัจจุบันน้ำมันใช้แล้วยังไม่มีระบบการจัดการที่ดี บางส่วนก็ทิ้งลงคูระบายน้ำ เกิดปัญหาที่อุดตันต้องใช้งบประมาณในการลอกคู ดังนั้นการสร้างความตระหนักในการ

จัดการน้ำมันที่ใช้แล้ว โดยนำมาสร้างมูลค่าเพิ่มจะส่งเสริมให้ชาวบ้านเห็นคุณค่าในการจัดการน้ำมันพืชใช้แล้วให้เกิดประโยชน์และลดมลพิษในชุมชนได้

รูปแบบหนึ่งของการใช้ประโยชน์และสร้างมูลค่าให้กับน้ำมันพืชใช้แล้ว คือการนำมาสังเคราะห์เป็นพลังงานเชื้อเพลิงเป็นน้ำมันไบโอดีเซล มีการศึกษากระบวนการสังเคราะห์การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว เช่น จากการศึกษาเปรียบเทียบและปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำมันน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ของชุมชนบางนาค อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส เนื่องจากชาวบ้านยังขาดความรู้กระบวนการผลิตที่เหมาะสมจึงทำให้ได้น้ำมันไบโอดีเซลที่ไม่มีคุณภาพ โดยศึกษาปริมาณ

การได้น้ำมันของน้ำมันไบโอดีเซล คุณลักษณะการเป็นของเหลวที่สำคัญ รวมถึงต้นทุนในการผลิต (Kattiyawan, 2016) มีการพัฒนาเครื่องผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งได้พัฒนาระบบการกวนผสมโดยใช้ใบกวนแบบ 45° two-blade paddle และ 6-blade disc turbine ในกระบวนการผลิต ได้ศึกษาผลของความเร็วรอบในการกวน พบว่าสามารถผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ 97.31 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความเร็วรอบในการกวนที่ 300 รอบต่อนาที (Niseng, 2018) นอกจากนี้ นักวิจัยได้ศึกษาการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ภายใต้คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งได้ศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการศึกษาสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการผลิตด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน พบว่าได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 89.4 เปอร์เซ็นต์ (Santadkha and Santikunaporn, 2018)

จากผลทบทวนวรรณกรรมข้างต้น สามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซล โดยพบว่าการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลให้มีคุณภาพได้นั้น จะประกอบด้วย 4 ปัจจัย อันดับแรก น้ำมันพืชจะต้องมีกรดไขมันอิสระต่ำ เนื่องจากกรดไขมันอิสระสูงจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาสaponifiเคชัน ในขั้นตอนของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Suzihaque *et al.*, 2022) ทั้งนี้ กรดไขมันอิสระไม่ควรเกิน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Somnuk *et al.*, 2013; Inthachai and Roschat, 2019) อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัย ในทางทฤษฎีจะใช้อัตราส่วน 3 : 1 แต่เพื่อขับปฏิกิริยาไปข้างหน้าให้มากที่สุดควรใช้ในอัตราส่วนที่มากเกินไป ทฤษฎี (Lestari *et al.*, 2009; Suppalakpanya *et al.*, 2010; Roschat *et al.*, 2020) ปัจจัยความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาก็มีความสำคัญในการเร่งปฏิกิริยา

การใช้ตัวเร่งจะต้องเพียงพอในระหว่างการทำปฏิกิริยา จะช่วยเร่งความเร็วในการทำปฏิกิริยา ทั้งนี้ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะช่วยเร่งปฏิกิริยาได้เร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (Niseng, 2013) ความรุนแรงในการผสมจะช่วยให้วัตถุดิบผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ล้วนมีเฟสที่แตกต่างกัน จะต้องใช้อุปกรณ์กระตุ้นให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกันมากจึงจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้สมบูรณ์และรวดเร็ว (Mangwandi *et al.*, 2010; Somnuk *et al.*, 2014) ปัจจัยที่สี่ คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ไม่ควรเกินจุดเดือดของชนิดแอลกอฮอล์ที่ใช้ เนื่องจากจะเกิดการสูญเสียแอลกอฮอล์ระหว่างการทำปฏิกิริยา (Somnuk *et al.*, 2014; Rahadiani *et al.*, 2018; Suzihaque *et al.*, 2022) หากใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเดือดของแอลกอฮอล์ จะต้องออกแบบระบบให้สามารถกลั่นแอลกอฮอล์กลับมาคืน

จากการลงชุมชนเขาแก้ว ตำบลเขาสูงป้าง อำเภอมือง จังหวัดสงขลา ทางชุมชนเขาแก้วมีความต้องการนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาสังเคราะห์เป็นน้ำมันไบโอดีเซล แต่ยังไม่มีความรู้กระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล เพื่อตอบสนองความต้องการของชุมชน จึงได้ศึกษาการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลในระดับห้องปฏิบัติการ โดยจะศึกษาผลของอัตราส่วน โดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในระดับห้องปฏิบัติการมาศึกษาระบบผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่เหมาะสมกับการใช้งานในระดับชุมชนต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบ

น้ำมันพืชใช้แล้วที่ได้จากรวบรวมจากร้านค้าในเขตชุมชนเขาแก้ว ตำบลเขารูปช้าง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา ซึ่งมีค่าความเป็นกรดไม่เกิน 2 mg KOH/g ใช้เมทานอล เกรดเชิงการค้าความบริสุทธิ์ 98 เปอร์เซ็นต์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เกรดเชิงการค้าความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์ ซื้อมาจากห้างหุ้นส่วนจำกัด บอส ออปติคอล อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

2. การออกแบบการทดลองและการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลระดับห้องปฏิบัติการ

การผลิตไบโอดีเซลในระดับห้องปฏิบัติการจะใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) และออกแบบการทดลองแบบ Central composite design (CCD) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล ทำการศึกษาผลของตัวแปรชนิดต่าง ๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1-5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก) อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมัน (3:1-15:1) อุณหภูมิ (50-70 องศาเซลเซียส) และระยะเวลา (30-150 นาที) มีเงื่อนไขการทดลอง

ทั้งหมด 30 เงื่อนไข ตามตารางที่ 1 ในการทดสอบแต่ละเงื่อนไขใช้ความเร็วรอบในการกวนคงที่ 300 รอบต่อนาที

การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว จะทดลองตามแผนที่ได้ออกแบบไว้จำนวน 30 เงื่อนไข โดยการทดลองแต่ละเงื่อนไข เริ่มต้นด้วยการชั่งน้ำมันพืชใช้แล้วจำนวน 100 กรัม เติมน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร ใส่แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer bar) ขนาด 4 เซนติเมตร ลงในบีกเกอร์ แล้วให้ความร้อนตามอุณหภูมิและกวนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดด้วยเครื่องกวนสาร (Stirrer) ยี่ห้อ IKA รุ่น CMAG HS 7 เพื่อเตรียมทำปฏิกิริยา ระหว่างนี้เตรียมละลายเมทานอล (Methanol to oil molar ratio) และ KOH ตามปริมาณของแต่ละเงื่อนไข เมื่อน้ำมันพืชมีอุณหภูมิตามที่กำหนด ค่อย ๆ เติมน้ำกลั่นที่เตรียมไว้ลงในบีกเกอร์ แล้วปล่อยให้ทำปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนดไว้ เมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จแล้ว ปล่อยให้ น้ำมันไบโอดีเซลและกลีเซอรอลแยกชั้น แล้วถ่ายกลีเซอรอลออก นำน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้ไปล้างด้วยน้ำอุ่น เพื่อกำจัดกลีเซอรอลและเมทานอล เติมโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เพื่อกำจัดน้ำ และเก็บน้ำมันไบโอดีเซลใส่ขวดแก้วเพื่อนำวิเคราะห์องค์ประกอบต่อไป ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

3. การวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล

ตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ตามสถานะที่กำหนด นำมาหาคุณสมบัติตามเกณฑ์มาตรฐานไบโอดีเซลดังนี้ วิเคราะห์ด้วย Gas Chromatogram (GC) ค่าความหนาแน่น ค่าความหนืด ค่ากำมะถัน ค่ากรด ค่าแอสฟัลต์ ค่าสิ่งปนเปื้อนทั้งหมด

ค่าความเป็นกรด ค่าไอโอดีน ทดสอบค่า FTIR ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thin Layer Chromatography (TLC) โดยตัวอย่างทั้งหมดส่งไปวิเคราะห์ ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (วิทยาเขตหาดใหญ่)

ตารางที่ 1 ตัวแปรและระดับค่าตัวแปรของการออกแบบแบบ CCD

Factor	Unit	Coded factor levels				
		-2	-1	0	1	2
Catalyst loading	wt. %	1	2	3	4	5
Methanol-oil molar ratio	-	3:1	6:1	9:1	12:1	15:1
Reaction time	min	30	60	90	120	150
Reaction temperature	°C	50	55	60	65	70

4. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติโดยใช้ multiple regression analysis (Falowo *et al.*, 2021) เมื่อได้ค่าประมาณและ

ค่าทดสอบสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยของร้อยละเมทิลเอสเทอร์มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) เพื่อสร้างรูปแบบสมการ โดยรูปแบบของสมการแสดงดังสมการที่ (1)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1)$$

เมื่อ Y คือ ค่าของผลตอบสนอง

k คือ จำนวนตัวแปรอิสระ

X_i, X_j คือ ตัวแปรอิสระที่เป็นรหัสตัวเลข

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ คือ ค่าคงที่สัมประสิทธิ์ของพจน์ ตัวแปรกำลังหนึ่ง ตัวแปรกำลังสอง และตัวแปรร่วม ตามลำดับ

ε คือ ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ

5. ระบบผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันกรดไขมันอิสระต่ำโดยใช้ความร้อนจากเตาชีวมวล

หลังจากได้ทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อหาเงื่อนไขการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลสำหรับ

เทศบาลเมืองเขารูปช้าง จังหวัดสงขลา ซึ่งได้เงื่อนไขการทดลองเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบผลิตจากน้ำมันกรดไขมันอิสระต่ำโดยใช้ความร้อนจากเตาชีวมวล โดยระบบที่ออกแบบจะใช้ตัวเร่ง

ปฏิกิริยา คือ โฟแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากเมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จจะได้กลีเซอรอลเหลว ไม่ทำให้ระบบอุดตัน เหมือนกับการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับแอลกอฮอล์จะใช้เมทานอล เกรดเชิงการค้า เนื่องจากหาซื้อง่าย และมีราคาถูกกว่าเอทานอล และใช้พลังงานความร้อนจากเตาชีวมวลเป็นหลัก เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

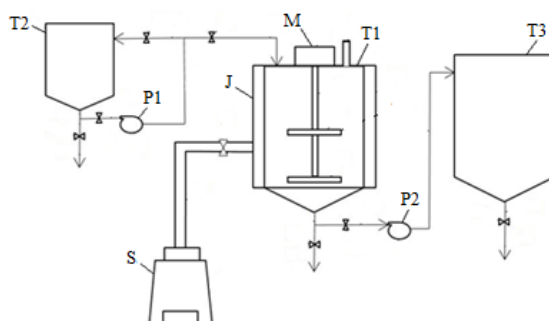
ระบบผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันกรดไขมันอิสระต่ำโดยใช้ความร้อนจากเตาชีวมวลจะประกอบด้วย 1. ถังปฏิกรณ์สำหรับทำปฏิกิริยา (T1) ขนาด 20 ลิตร จะประกอบด้วย มอเตอร์ (M) ยี่ห้อ YYG-70B สำหรับขับเคลื่อนที่ติดตั้งใบกวนแบบใบพาย (paddle) สำหรับกวนผสมสารเคมีในระหว่างการทำปฏิกิริยา โดยถังปฏิกรณ์จะมีเสื้อหุ้ม (J) สำหรับให้ความร้อนซึ่งความร้อนจะได้มาจากเตาชีวมวล (S) ขนาดสูง × กว้าง เท่ากับ 27×15 เซนติเมตร เพื่อลดการใช้พลังงานความร้อนในการทำปฏิกิริยา ทั้งนี้เพื่อให้ความร้อนภายในถังมีความเสถียร ได้ติดตั้งระบบให้ความร้อนเสริมด้วยขดลวดให้ความร้อนขนาด 500 วัตต์ ซึ่งระบบนี้สามารถใช้ความร้อนจากขดลวดให้ความร้อนอย่างเดียว ในช่วงที่ไม่มีเชื้อเพลิงสำหรับเผาด้วยเตาชีวมวล 2. ถังแอลกอฮอล์ (T2) ขนาด 6 ลิตร ใช้สำหรับผสมแอลกอฮอล์กับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีปั๊ม (P1) ยี่ห้อ AMIGO รุ่น AG-35 สำหรับไหลวนแอลกอฮอล์ให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนป้อนเข้าสู่ถังปฏิกิริยา

3. ถังกักเก็บน้ำมันไบโอดีเซล (T3) ขนาด 20 ลิตร สำหรับกักเก็บน้ำมันไบโอดีเซลหลังผ่านการทำปฏิกิริยา โดยมีปั๊ม (P2) ยี่ห้อ AMIGO รุ่น AG-35 ดูดน้ำมันไบโอดีเซลจากถังปฏิกิริยาเข้าสู่ถังกักเก็บน้ำมันไบโอดีเซล ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3

จากภาพที่ 3 การทำงานของระบบเริ่มต้นนำน้ำมันดิบใส่ลงในถังปฏิกิริยา (T1) ทางช่องเติมน้ำมันตามปริมาณที่ต้องการ เปิดเตาชีวมวล (S) เพื่อให้ความร้อนแก่ระบบ จากนั้นเปิดมอเตอร์ (M) ขับเพลลาเพื่อกวนน้ำมันดิบเป็นการเตรียมความพร้อมระบบเพื่อทำปฏิกิริยา ในขณะเดียวกันตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) และแอลกอฮอล์ (เมทานอล) ที่เตรียมไว้ในถังแอลกอฮอล์ (T2) ถูกไหลวนจนแอลกอฮอล์กับตัวเร่งปฏิกิริยาผสมเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อน้ำมันในถังปฏิกิริยาได้รับความร้อนจนได้อุณหภูมิตามที่ต้องการแล้ว สารผสม (แอลกอฮอล์กับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) ในถังแอลกอฮอล์จะถูกดูดด้วยปั๊ม (P1) จะถูกป้อนเข้าสู่ปฏิกิริยา จากนั้นปล่อยให้ให้น้ำมันดิบและสารเคมีทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันภายในถังปฏิกิริยาตามระยะเวลาที่กำหนด หลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นสารผสมภายในถังปฏิกิริยาจะถูกดูดด้วยปั๊ม (P2) เข้าสู่ถังเก็บน้ำมันไบโอดีเซล (T3) ปล่อยให้ให้น้ำมันไบโอดีเซลและกลีเซอรอลในถังเก็บน้ำมันไบโอดีเซลแยกชั้น เปิดวาล์วเพื่อถ่ายกลีเซอรอลออก แล้วนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้ไปเข้าสู่กระบวนการทำความสะอาดกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่อไป



ภาพที่ 2 ระบบผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ความร้อนจากเตาชีวมวล



ภาพที่ 3 ฟังก์ชันการทำงานของระบบผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ความร้อนจากเตาชีวมวล

(T1 คือ ถังปฏิกิริยา T2 คือ ถังแอลกอฮอล์ T3 คือ ถังกักเก็บน้ำมันไบโอดีเซล P1 คือ ปั๊มสำหรับป้อนสารเคมี P2 คือ ปั๊มสำหรับดูดน้ำมันไบโอดีเซลเข้าถังเก็บ M คือ มอเตอร์กวนผสม S คือ เตาชีวมวล J คือ เสื้อหุ้มถังปฏิกิริยา)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การสร้างพื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลตัวแปรที่มีต่อปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชใช้แล้ว

1.1 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้วและปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้วและปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยกำหนดค่าให้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 3:1 6:1 9:1 12:1 และ 15:1 และกำหนดปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 2 3 4 และ 5

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้ความเร็วรอบในการกวนคงที่ 300 รอบต่อนาที จากภาพที่ 4 พบว่า ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้วเพิ่มขึ้น โดยร้อยละน้ำมันไบโอดีเซลมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ ร้อยละ 99.89 เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 7.74:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เท่ากับ 3.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ เนื่องจากการใช้เมทานอลปริมาณที่สูงขึ้นทำให้ปฏิกิริยาถูกผลักไปข้างหน้ามากขึ้น มีผลทำให้ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มสูงขึ้นด้วย แต่ปริมาณเมทานอลที่สูงเกินไปนั้นส่งผลต่อการแยกเฟสของน้ำมันไบโอดีเซล

และน้ำ และน้ำที่เกิดขึ้นจะเป็นการผลึกปฏิกิริยาให้ผันกลับมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ลดลง (Singhasiri, 2014; Ma and Hanna, 1999)

1.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้วและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

ผลของความสัมพัทธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้วและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา แสดงดังภาพที่ 5 โดยกำหนดอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้วในช่วง 3:1 - 15:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในช่วง 50 - 70 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วรอบในการกวนคงที่ 300 รอบต่อนาที จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในช่วงปัจจัยที่ศึกษา คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้วเท่ากับ 7.73:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส เนื่องจากการใช้ปริมาณเมทานอลที่มากเกินไปจะไปขัดขวางการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา รวมถึงการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ทำให้เมทิลเอสเทอร์สามารถรวมกับกลีเซอรอล ซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปเป็นไตรกลีเซอไรด์ ส่งผลทำให้เมทิลเอสเทอร์มีปริมาณที่น้อยลง (Jairuan, et al., 2017; Liganiso et al., 2022)

1.3 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับโมลน้ำมันพืชใช้แล้วและเวลาในการทำปฏิกิริยา

ผลของความสัมพัทธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันพืชใช้แล้วและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 6 พบว่าปริมาณผลผลิตได้ร้อยละของน้ำมันไบโอดีเซลมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันเท่ากับ 7.73:1 และมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์

เอสเทอร์ริฟิเคชันเท่ากับ 60 นาที และยังพบอีกว่าหลังเวลาดังกล่าว ปริมาณน้ำมันไบโอดีเซลมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากในช่วงระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเริ่มต้นเมื่อปริมาณเมทานอลมากเกินไปจะทำให้เกิดน้ำที่เป็นตัวทำลาย ซึ่งจะทำความเข้มข้นของสารตั้งต้นในระบบมีค่าลดลง จึงส่งผลให้โมเลกุลของสารตั้งต้นเกิดการชนกันน้อยลง ดังนั้นโอกาสในการที่สารตั้งต้นจะเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์จึงมีค่าน้อยลงตามไปด้วย (Phoosakul, 2011)

1.4 อิทธิพลของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

ผลของความสัมพัทธ์ระหว่างปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา แสดงดังภาพที่ 7 โดยกำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วง 1 - 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในช่วง 50 - 70 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในช่วงปัจจัยที่ศึกษา คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 3.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากเกินไปทำให้สารตั้งต้นมีความหนืดมากขึ้นส่งผลให้ขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้ว (Quah et al., 2020)

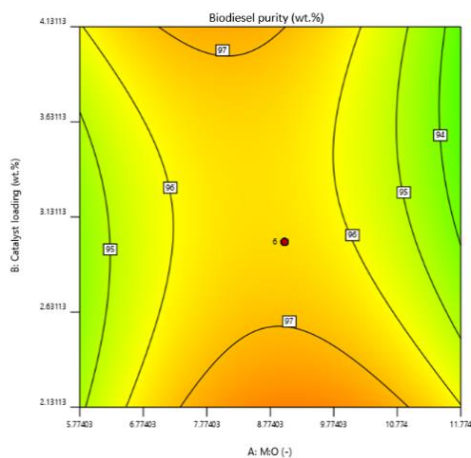
1.5 อิทธิพลของอิทธิพลของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาในการทำปฏิกิริยา

ผลของความสัมพัทธ์ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 8 โดยกำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วง 1 - 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 30 - 150 นาที จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในช่วงปัจจัยที่ศึกษา คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 3.97 เปอร์เซ็นต์โดย

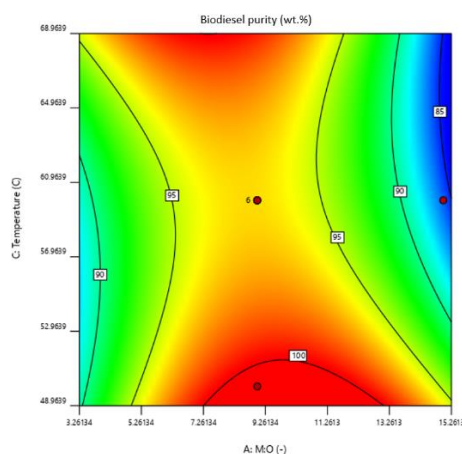
น้ำหนัก และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 นาที เนื่องจากปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มากเกินไปส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ (Linganiso *et al.*, 2022; Mueanmas *et al.*, 2018)

1.6 อิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยา

ผลของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและเวลาในการทำปฏิกิริยา แสดง

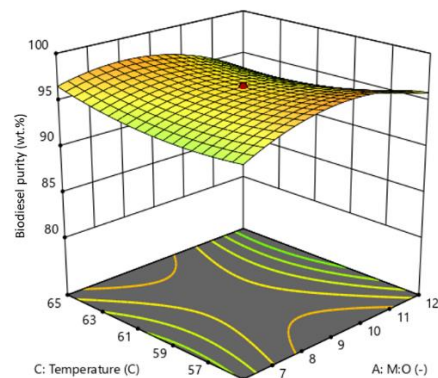
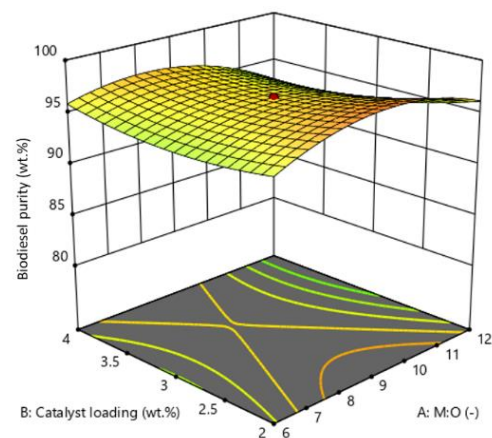


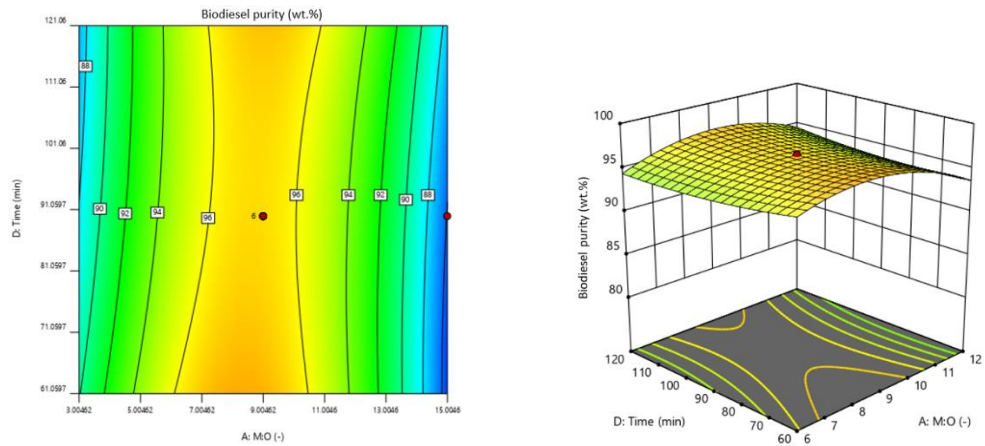
ภาพที่ 4 แสดงกราฟแบบโครงร่างพื้นผิวของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้วและปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



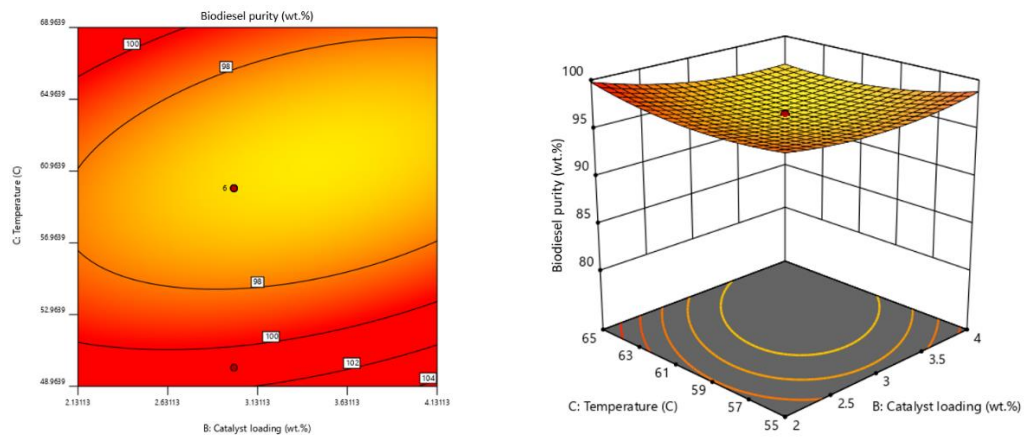
ภาพที่ 5 แสดงกราฟแบบโครงร่างพื้นผิวของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับโมลน้ำมันพืชใช้แล้วและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

ดังภาพที่ 9 โดยกำหนดช่วงของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 50 - 70 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 30 - 150 นาที จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในช่วงปัจจัยที่ศึกษา คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60.5 นาที เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เมทานอลเกิดการระเหยส่งผลให้เกิดน้ำมันไบโอดีเซลได้น้อยลง (Quah *et al.*, 2020)

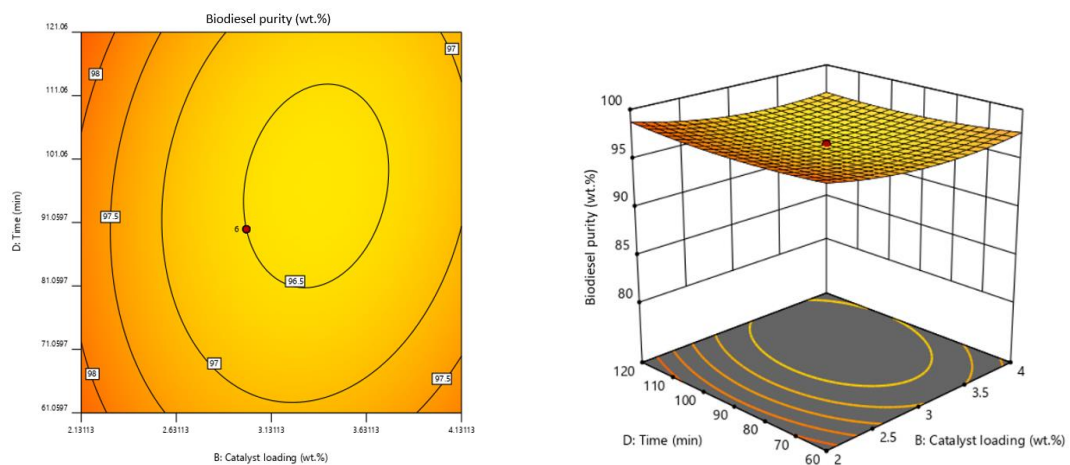




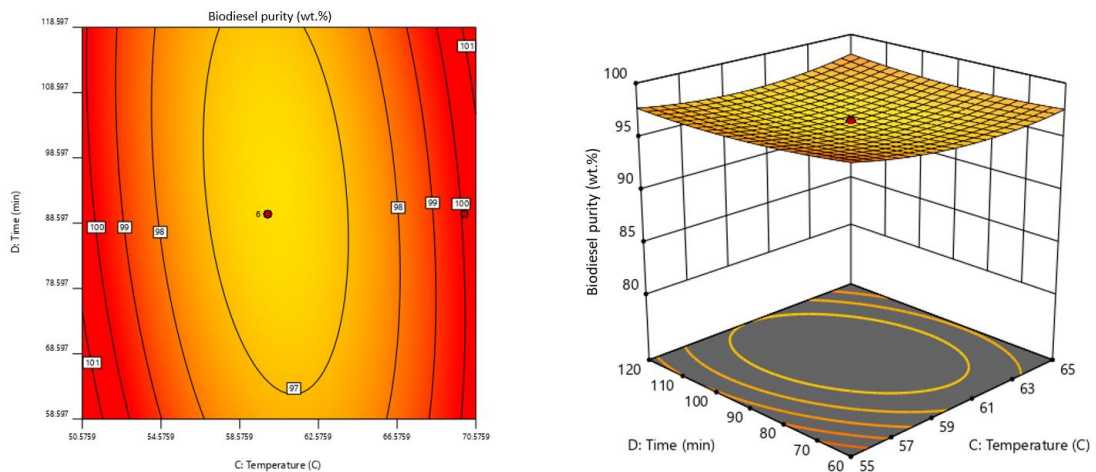
ภาพที่ 6 แสดงกราฟแบบโครงร่างพื้นผิวของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับโมลน้ำมันพืชใช้แล้วและเวลาในการทำปฏิกิริยา



ภาพที่ 7 แสดงกราฟแบบโครงร่างพื้นผิวของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา



ภาพที่ 8 แสดงกราฟแบบโครงร่างพื้นผิวของปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาในการทำปฏิกิริยา



ภาพที่ 9 แสดงกราฟแบบโครงร่างพื้นผิวของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและเวลาในการทำปฏิกิริยา

2. การวิเคราะห์ค่าทางสถิติของวิธีพื้นผิวตอบสนอง

จากการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการมีค่า R^2 เท่ากับ 90.64 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับแก้ R^2 -adj มีค่าเป็น 81.91 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 2) หมายความว่า ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้ว ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และเวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (นาทีก) สามารถอธิบายความแปรผันของการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซล แสดงว่าแบบจำลองแบบ CCD สามารถนำไปสร้างสมการทำนายเพื่อหาค่าผลตอบได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) ในตารางที่ 2 พบว่า ค่าสถิติ

$p < 0.0001$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด ($p < 0.05$) จากผลการทดลองทำให้ทราบว่า ปัจจัยที่นัยสำคัญต่อการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซล จะมีค่านัยสำคัญทางสถิติที่น้อยกว่า 0.05 ซึ่งปัจจัยดังกล่าวที่ได้กล่าวไปนั้น ส่วนส่งผลกระทบต่อคุณภาพหรือปริมาณของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ (Singhasiri, 2014)

จากตารางที่ 2 สามารถสร้างสมการทำนายร้อยละน้ำมันไบโอดีเซลจากปัจจัยของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้ว ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และเวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (นาทีก) ที่ได้จาก การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2)

$$\text{Biodiesel yield} = 180.84 + 9.2008A + 6.1533B - 3.9648C - 0.2829D - 0.3008AB - 0.0723AC + 0.0067AD - 0.1575BC - 0.0074BD + 0.0023CD - 0.2635A^2 + 0.9983B^2 + 0.0403C^2 + 0.0005D^2 \quad (2)$$

- เมื่อ
- A คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้ว
 - B คือ ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
 - C คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
 - D คือ เวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (นาทีก)

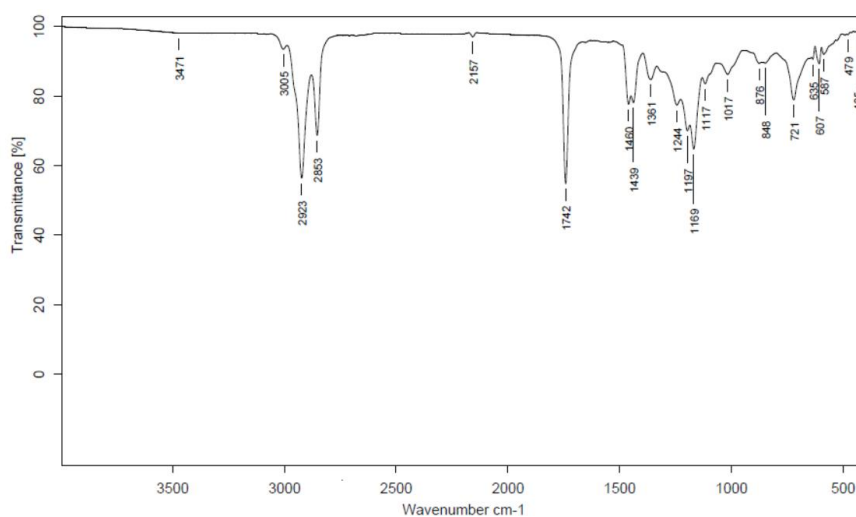
3. การพิสูจน์เอกลักษณ์และคุณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซล

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสารประกอบและคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากห้องปฏิบัติการ ด้วยอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับโมลน้ำมันพืชใช้แล้ว เท่ากับ 7.73:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 3.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ เท่ากับ 55 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วรอบในการกวนคงที่ 300 รอบต่อนาที และเวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เท่ากับ 60.54 นาที

การวิเคราะห์น้ำมันน้ำมันไบโอดีเซลด้วยเทคนิค FTIR เป็นวิธีการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสารประกอบ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 10 จากการศึกษาพบว่าน้ำมันน้ำมันไบโอดีเซลจะแสดงพีค FTIR ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน 3005 cm^{-1} 2923 cm^{-1} และ 2853 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ C-H stretching ของ CH=CH, C-H asymmetric stretching ของ CH_2 , and C-H symmetric stretching ของ CH_2 ตามลำดับ ในขณะที่ความยาวคลื่น 1742 cm^{-1} แสดงพีคของหมู่เอสเทอร์ (C=O) ซึ่งสอดคล้องกับหมู่เอสเทอร์ที่พบในน้ำมันไบโอดีเซล นอกจากนี้ ที่ความยาวคลื่น 1460 cm^{-1} และ 1361 cm^{-1} แสดงพีคของ $-\text{CH}_2$ scissor และ $-\text{CH}_3$ anti-symmetric vibrations และที่ความยาว

คลื่น 1017 cm^{-1} และ 1169 cm^{-1} แสดงพีคของ C-O anti-symmetric stretching vibration และ C-O symmetric stretching vibration (Thunyaratchatanon *et al.*, 2018)

จากการวิเคราะห์ผลคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซล ตามตารางที่ 3 พบว่ามีคุณภาพเทียบเคียงกับค่ามาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลของน้ำมันไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์ทางการเกษตร (น้ำมันไบโอดีเซลชุมชน) ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2549 (The Department of Energy Business, 2006) องค์ประกอบหลายตัวมีคุณสมบัติเทียบเท่าน้ำมันไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงถึง 95.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใกล้เคียงมาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ซึ่งต้องมีค่าเมทิลเอสเทอร์ไม่น้อยกว่า 96.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และผลการวิเคราะห์ค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเท่ากับ 23 ชั่วโมง 21 นาที ตามมาตรฐาน EN 14112 กำหนดให้ มีค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เท่ากับ 16 ชั่วโมง โดยผลการวิเคราะห์ปริมาณค่าเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ในครั้งนี้พบว่ามีค่าที่สูงกว่ามาตรฐาน จะเห็นได้ว่ามีศักยภาพที่จะสามารถพัฒนาให้ผ่านมาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต



ภาพที่ 10 พิก FTIR ของน้ำมันน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยและค่าสถิติของร้อยละน้ำมันไบโอดีเซล

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	322.68	14	23.05	10.38	<0.0001
A-M:O	7.00	1	7.00	3.15	0.0962
B-Catalyst	11.15	1	11.15	5.02	0.0406
C-Temperature	1.03	1	1.03	0.4615	0.5073
D-Time	0.5400	1	0.5400	0.2431	0.6291
AB	13.03	1	13.03	5.87	0.0286
AC	18.84	1	18.84	8.84	0.0107
AD	5.86	1	5.86	2.64	0.1253
BC	9.92	1	9.92	4.47	0.0517
BD	0.7921	1	0.7921	0.3566	0.5593
CD	1.90	1	1.90	0.8574	0.3691
A ²	154.28	1	154.28	69.46	<0.0001
B ²	27.34	1	27.34	12.31	0.0032
C ²	27.89	1	27.89	12.55	0.0029
D ²	7.09	1	7.09	3.19	0.0943
Residual	33.32	15	2.22		
Lack of Fit	33.32	10	3.33		
Pure Error	0.0000	5	0.0000		
Cor Total	356.00	29			

$R^2 = 0.9064$ และ $R^2\text{-adj} = 0.8191$

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำมันไบโอดีเซล งานวิจัยนี้	มาตรฐาน น้ำมันไบโอดีเซล ชุมชน	มาตรฐาน น้ำมันไบโอดีเซล เชิงพาณิชย์
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C	kg/m ³	877.1 ± 0.0	800-900	800-900
ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C	cSt	4.217 ± 0.006	1.9-8.0	3.5-5.0
กากถ่าน	% wt.	0.1646 ± 0.0085	-	<0.3
ค่าความเป็นกรด	mg KOH/g	0.0642 ± 0.0034	<0.08	<0.05
เถ้าซัลเฟต	% wt.	0.1938 ± 0.0060	<0.02	<0.02
สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด	% wt.	< 0.00050	-	<0.0024
ค่าไอโอดีน	g Iodine/100g	65.3 ± 0.4	-	<120
โมนอกลิเซอไรด์	% wt.	0.46 ± 0.00	-	<0.80
ไดกลิเซอไรด์	% wt.	0.11 ± 0.01	-	<0.20
ไตรกลิเซอไรด์	% wt.	0.12 ± 0.00	-	<0.20
กลีเซอรินอิสระ	% wt.	0.15 ± 0.00	<0.02	<0.02
กลีเซอรินทั้งหมด	% wt.	0.29 ± 0.00	<1.5	<0.25
เมทิลเอสเทอร์	% wt.	95.76 ± 0.01	-	>96.5
กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์	% wt.	0.46 ± 0.00	-	<12
เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อุณหภูมิ 110 °C	Hours	23 ชั่วโมง 21 นาที	-	>6

4. ผลการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากระบบผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ความร้อนจากเตาชีวมวล

การทดสอบระบบผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ความร้อนจากเตาชีวมวลโดยใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ที่สภาวะอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับน้ำมันพืชใช้แล้ว 7.73:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วรอบในการกวนคงที่ 300 รอบต่อนาที แต่เนื่องจากถังปฏิกรณ์มีการ

ให้ความภายในถังด้วยขดลวดให้ความร้อนและมีเสื้อหุ้มรอบถังซึ่งได้รับความร้อนจากเตาชีวมวลทำให้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เสถียรมากกว่า และการออกแบบใบกวนเป็น 2 ชั้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ทำให้ความบริสุทธิ์ของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มากถึง 96.83 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชใช้แล้วเหมาะกับการใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล (Yaqoob *et al.*, 2021) ทั้งนี้ ศักยภาพการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลสำหรับชุมชนเขารูปช้าง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา สามารถพัฒนาให้มีมาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ เพื่อขยายฐานการใช้

งานให้หลากหลายยิ่งขึ้น ซึ่งจะต้องใช้อุปกรณ์ในกระบวนการผลิตที่ได้มาตรฐานที่สูงขึ้น

สรุป

การสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลสำหรับงานวิจัยนี้ เป็นกระบวนการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซล จากน้ำมันพืชใช้แล้วที่รวบรวมเขตชุมชนเขาแก้ว ตำบลเขารูปช้าง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา ซึ่งมีความเป็นกรดไม่เกิน 2 mgKOH/g เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดและนำข้อมูลไปออกแบบและสร้างระบบผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่เหมาะสมสำหรับการผลิตระดับชุมชน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การผลิตไบโอดีเซลในระดับห้องปฏิบัติการ สามารถผลิตน้ำมันไบโอดีเซลได้มาตรฐานไบโอดีเซลชุมชน โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ล้วนมีผลต่อการกระบวนการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลทั้งสิ้น โดยมีสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับโมลน้ำมันพืชใช้แล้ว เท่ากับ 7.73:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 3.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ เท่ากับ 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เท่ากับ 60.54 นาที สามารถผลิตไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ ได้มากถึง 95.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

2) ระบบผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ความร้อนจากเตาชีวมวล ที่ใช้ข้อมูลเบื้องต้นจากผลการวิเคราะห์ในระดับห้องปฏิบัติการ ในการออกแบบ คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลกับโมลน้ำมันพืชใช้แล้ว เท่ากับ 7.73:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 3.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ เท่ากับ 55 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

เท่ากับ 60 นาที สามารถผลิตไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์ ได้มากถึง 96.83 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผ่านเกณฑ์มาตรฐานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์

3) คุณสมบัติน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้ เหมาะกับเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ เช่น เครื่องยนต์ทางการเกษตร เครื่องยนต์ดีเซลสำหรับเรือประมงหางยาว เป็นต้น เนื่องจากยังมีคุณสมบัติบางตัวยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ประจำปีงบประมาณ 2563 ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร วิทยาลัยรัษฎามิ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี และคณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการสังเคราะห์และทดสอบน้ำมันไบโอดีเซล

เอกสารอ้างอิง

- Falowo, O. A. , Apanisile, O. E. , Aladelusi, A. O. , Adeleke, A.E., Oke, M.A., Enamhanya, A., Latinwo, L. M. and Betiku, E. 2021. Influence of nature of catalyst on biodiesel synthesis via irradiation-aided transesterification of waste cooking oil-honne seed oil blend: Modeling and optimization by Taguchi design method. **Energy Conversion and Management: X** 12: 100119.
- Inthachai, S. and Roschat, W. 2019. The Performance Testing of Biodiesel Oil Produced from Waste

- Cooking Oil by Using a prototype Solar Reactor for Agricultural Diesel Engines. **Journal of Materials Science and Applied Energy** 8(2): 398-407.
- Jairuan, W., Pairintra, R. and Sudaprasert, K. 2017. Biodiesel production by transesterification from chicken fat. **RMUTSB Academic Journal** 5(1): 41-49. (in Thai)
- Kattiyawan, T. 2016. Comparison and Improvement of Biodiesel Production Process from Used Vegetable Oil (A Case Study of Bangnak Community). **Princess of Naradhiwas University Journal** 8(1): 70-78. (in Thai)
- Lestari, S., Maki-Arvela, P., Beltramini, J., Max Lu, G.Q. and Murzin, D.Y. 2009. Transforming Triglycerides and Fatty Acids into Biofuels. **ChemSusChem** 2(12): 1109-1119.
- Linganiso, E.C., Tlhaola, B., Magagula, L.P., Dziike, S., Lingano, L.Z., Motaung, T.E., Motolo, N. and Tetana, Z.N. 2022. Biodiesel Production from Waste Oils: A south African Outlook. **Sustainability** 14: 1-21.
- Ma, F. and Hanna, M.A. 1999. Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology** 70: 1-15.
- Mangwandi, C., Adams, M.J., Hounslow, M.J. and Salman, A.D. 2010. Effect of impeller speed on mechanical and dissolution properties of high-shear granular. **Chemical Engineering Journal** 164: 305-315.
- Mueanmas, C., Nikhom, R., Sopajarn, J. and Petchkaew, A. 2018. A Study of Influence Factors Affecting to Esterification Reaction of Waste Coffee Grounds Oil using Response Surface Methodology. **Thaksin University Journal** 21(3) (Special issue): 140-148. (in Thai)
- Niseng, S. 2013. Two-stage biodiesel production system from high free fatty acid crude palm oil using circulation through static mixer. Master Thesis of Engineering (Mechanical Engineering), Prince of Songkla University. (in Thai)
- Niseng, S. 2018. Development of biodiesel production reactor from used vegetable oil using 45° two-blade paddle coupled with 6-blade disc turbine. **Kasetsart Engineering Journal** 31(105): 29-38. (in Thai)
- Phoosakul, P. 2011. Study of Using CaO as Catalyst for Biodiesel Production with Refluxing Alcohol. Master Thesis of Engineering (Chemical Engineering), Prince of Songkla University. (in Thai)
- Quah, R.V., Tan, Y.H., Mubarak, N.M., Kansedo, J., Khalid, M., Abdullah, E.A. and Abdullah, M.O. 2020. Magnetic biochar derived from waste palm kernel shell for biodiesel production via sulfonation. **Waste Management** 118: 626-636.
- Rahadiani, E.S., Yelizam, Y. and Martha, M. 2018. Biodiesel Production from Waste Cooking Oil. **Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry** 3(3): 70-82.
- Roschat, W., Butthichack, P., Daengdet, N., Phewphong, S., Kaewpuang, T., Moonsin, P., Yoosuk, B. and Promarak, V. 2020. Kinetic study of biodiesel production at room temperature based on eggshell-derived CaO as

- basic heterogeneous catalyst. **Engineering and Applied Science Research** 47(4): 361-373.
- Santadkha, T. and Santikunaporn, M. 2018. Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using KOH with Microwave Heating. **Science and Technology Journal** 26(6): 1041-1048. (in Thai)
- Singhasiri, T. 2014. Optimization of biodiesel production from chicken fat using response surface methodology. **Journal of Energy Research** 11(2): 54-65. (in Thai)
- Somnuk, K., Niseng, S. and Prateepchaikul, G. 2014. Optimization of high free fatty acid reduction in mixed crude palm oils using circulation process through static mixer reactor and pilot- scale of two-step process. **Energy Conversion and Management** 80: 374-381.
- Somnuk, K., Smithmaitre, P. and Prateepchaikul, G. 2013. Optimization of continuous acid-catalyzed esterification for free fatty acids reduction in mixed crude palm oil using static mixer coupled with high- intensity ultrasonic irradiation. **Energy Conversion and Management** 68: 193-199.
- Suppalakpanya, K., Rattanawilai, S.B. and Thongurai, C. 2010. Production of ethyl ester from crude palm oil by two- step reaction with a microwave system. **Fuel** 89: 2140-2144.
- Suzihaque, M.U.H., Syazwina, N., Alwi, H., Ibrahim, U.K., Abdullah, S. and Haron, N. 2022. A sustainability study of the processing of kitchen waste as a potential source of biofuel: Biodiesel production from waste cooking oil (WCO). **Materials Today: Proceedings** 63(Supplement 1): 484-489.
- The Department of Energy Business. 2006. **Biodiesel Characteristics and Quality for Agricultural Engines (Community Biodiesel B.E. 2549)**. Available source: http://elaw.doeb.go.th/document_doeb/TH/77_0001.pdf, November 12, 2022. (in Thai)
- Thunyaratchatanon, C. , Luengnaruemitcha, A. , Jitjamnong, J., Chollacoop, N., Chen, S.Y. and Yoshimura, Y. 2018. Influence of Alkaline and Alkaline Earth Metal Promoters on the Catalytic Performance of Pd-M/SiO₂ (M = Na, Ca, or Ba) Catalysts in the Partial Hydrogenation of Soybean Oil- Derived Biodiesel for Oxidative Stability Improvement. **Energy & Fuels** 32(9): 9744-9755.
- Yaqoob, H., Teoh, Y.H., Sher, F., Farooq, M.U., Jamil, M.A., Kausar, Z., Sabah, N.U., Shah, M.F., Rehman, H.Z.U. and Rehman, A.U. 2021. Potential of Waste Cooking Oil Biodiesel as Renewable Fuel in Combustion Engines: A Review. **Energies** 14(9): 1-20.

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการผสมของไหลโดยใช้แกนใบพัด แบบแกนตั้งและแกนใบพัดแบบเอียง

Computational Fluid Dynamics of Fluid Mixing by using the Vertical Impeller Axis and Inclined Impeller Axis

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล *

Werayoot Lahamornchaiyakul *

Received: 15 February 2021, Revised: 3 October 2022, Accepted: 17 October 2022

บทคัดย่อ

การศึกษาได้ทำการวิจัยการผสมสารละลาย (Slurry) ที่ผสมกับน้ำ และคำนวณประสิทธิภาพการผสมในถังผสมที่ใช้ใบพัดแบบเอียงและแบบแกนตั้งที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยระบบฟิคัดรูปร่างแอร์ฟอยล์ การศึกษาได้ทำนายการผสมที่ทำให้เกิดการปั่นป่วนในพื้นที่ของการผสมที่เหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมเคมี ระเบียบวิธีการวิจัยเริ่มต้นจากการออกแบบ วิเคราะห์ และคำนวณเพื่อหาเวลาและประสิทธิภาพในการผสมที่ใช้ใบพัดแบบเอียงและใบพัดแบบแกนตั้งในกระบวนการทำสารละลาย (Slurry) โดยใช้ระเบียบวิธีการทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อคำนวณผลแบบผิวอิสระ ตัวแปรที่สำคัญคือ ใบพัดแบบเอียง และแบบแกนตั้ง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตรที่รอบการหมุน 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 rpm. ผลงานวิจัยพบว่าใบพัดแบบเอียงสามารถลดเวลาการผสมได้ดีเมื่อเทียบกับใบพัดแบบแกนตั้งในสนามการไหลแบบปั่นป่วน ผลการวิเคราะห์ได้ทำการพิจารณาการหมุนของใบพัดแบบเอียงและใบพัดแบบแกนตั้งในช่วงเวลาผสมและศึกษาถึงผลการลดเวลาการผสมอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อยืนยันผลการทดลองจึงได้ทำการแสดงผลลัพธ์โปรไฟล์ความเร็วที่ถูกคำนวณเป็นผลลัพธ์เชิงตัวเลขและเสนอถึงการพัฒนาวิธีการจำลองเชิงตัวเลขแบบใหม่ของแบบจำลองทั้งสองวิธี จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพที่สูงขึ้น เพื่อการพัฒนาระบบการทำงานของกังหันกวนผสมให้ดีขึ้น

คำสำคัญ: ใบพัดแบบเอียง, การวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล, การจำลองผลเชิงตัวเลข

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก ตำบลบ้านกร่าง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

Department of Mechanical of Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok, Bankrang, Mueang, Phitsanulok 65000, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): werayootmutl@gmail.com

ABSTRACT

This study aims to research the characteristics of mixing between slurry with water and efficiency calculate in a tank agitated by an impeller that inclined itself and vertical axis impeller obtained from forming with air foil coordinates. This research predicted of agitation within the optimum mixing area for the chemical industry. Research methods featured design, analysis, and calculation for mixing time by the computational fluid dynamics technique for free surface calculation. The important variables in this research were impellers that inclined itself and vertical axis impeller with an impeller diameter of 400 mm. The rotations of impeller in this research are 50, 100, 150, 200, 250 and 300 rpm. The results of the research showed that the inclined impeller could reduce mixing time compared to that obtained by the vertically axis impeller in turbulence flow region. The effect of eccentric position of inclined impeller on mixing time was also studied and a significant reduction of mixing time was observed. To confirm the experimental results in this research, the results of velocity profiles were calculated numerically and two novel numerical simulation methods were proposed. According to this research, it can be used for the improvement of higher performance, and it would be needed for development of better agitation turbine system.

Key words: impeller hat inclined itself, computational fluid dynamics, numerical simulation

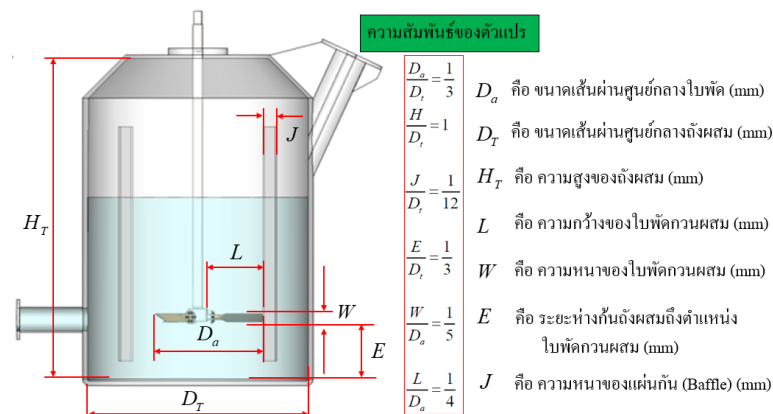
บทนำ

ในปัจจุบันเครื่องกวนผสมได้มีบทบาทสำคัญในภาคอุตสาหกรรมทางด้านเคมีและอาหาร เครื่องกวนผสมได้เข้ามาช่วยในกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการกวนผสมผลิตภัณฑ์ในแบบต่าง ๆ และในหลายปีที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยและวิศวกรจำนวนมากได้ทำการประดิษฐ์ คิดค้นและพัฒนาเครื่องจักรกวนผสมขึ้นมาใช้อย่างมากมาย มีทั้งที่เป็นเครื่องจักรขนาดเล็ก ที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมชุมชน SME ไปจนถึงเครื่องจักรขนาดใหญ่ที่ใช้กับขนาดกำลังการผลิตที่สูงในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ตัวอย่างงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีความพยายามทำการออกแบบใบพัดกวนผสมให้มีประสิทธิภาพที่สูงในงานกวนผสมที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถใช้งานกับกลุ่มอุตสาหกรรมโดยทั่วไปได้อย่างเหมาะสม โดยเฉพาะกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดเล็ก SME ที่กำลัง

เป็นจุดเริ่มต้นใหม่ให้กับนักธุรกิจแนวใหม่ของประเทศ ซึ่งเครื่องกวนผสมได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในภาคอุตสาหกรรมครัวเรือนของประเทศมากขึ้นทุกปี เพราะประเทศไทยเป็นศูนย์กลางในด้านอาหารที่สำคัญต่อตลาดทั้งในเอเชียและและถูกนำไปส่งออกไปในหลากหลาย ๆ ประเทศในแถบยุโรป เป็นต้น (Lahamornchaiyakul, 2020) อีกทั้งรัฐบาลยังกำหนดนโยบายหลักของแผนงานสำหรับการพัฒนาประเทศ โดยให้เน้นงานด้านอุตสาหกรรมเกษตร เทคโนโลยี อุตสาหกรรม และด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี มาพัฒนาด้านนวัตกรรมไปพร้อมกับการพัฒนาด้านแบบในธุรกิจอาหารของกลุ่มงานทางอุตสาหกรรมเกษตร และงานทางวิศวกรรม (Lahamornchaiyakul, 2021) เพื่อผู้การแข่งขันและการดำเนินการใช้ภายในประเทศ และการ ส่งออก (Lahamornchaiyakul *et al.*, 2018) นอกจากกลุ่มด้านธุรกิจอาหาร เครื่องจักรกวนผสมยัง

ถูกนำไปใช้กับงาน SME ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมสารเคมีและเครื่องสำอางมากขึ้น เพื่อลดแรงงานคนและค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตลง (Piya and Puzu, 2019) ขั้นตอนการออกแบบใบพัดกวนผสมและถังกวนผสมให้สามารถทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพสูงจะอาศัยพื้นฐานการกำหนดขนาดมิติของถัง (Piya and Puzu, 2019; Cabe *et al.*, 1993) การออกแบบถังกวนและใบพัดกวนผสมสำหรับการกวนผสมสารเคมีประเภทอนุภาคของแข็งและเหลว นั้น มีขั้นตอนและปัจจัยที่จำเป็นหลายด้านที่ต้องใช้สำหรับการกำหนดการออกแบบ โดยงานวิจัยของ Kevin *et al.* (2019) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการผสมของอนุภาคของแข็งที่ต้องการให้มีการกระจายตัวภายในถังผสม หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบการกระจายอนุภาคของแข็ง ขั้นตอนการศึกษาจะอาศัยการนับจำนวนอนุภาคของแข็ง พร้อมทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการติดตั้งแผ่นกั้น (Baffle) ผลจากการศึกษาพบว่า ขนาดของแผ่นกั้น T/12 โดยมีจำนวนแผ่นกั้น 4 แผ่น ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด จากผลการทดลองของ Um and Thomas (2008) ได้ทำการศึกษาและแสดงผลลัพธ์ของการทดลองให้เห็นว่าค่าความเร็วในแนวแกนจะมีค่าที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญต่อรูปทรงเรขาคณิต งานวิจัยของ Shengchao *et al.* (2015) ได้ทำการออกแบบและศึกษารูปแบบของความสูงใบพัดกวนผสมต่อการเปลี่ยนแปลงขอบเขตการไหลสำหรับสารที่เป็นของเหลวผสม นอกจากการออกแบบถังผสมและใบพัดกวนผสมแล้ว สิ่งที่ต้องคำนึงถึงและจำเป็นต่อการศึกษาคือ ตำแหน่งการติดตั้งใบพัดกวนผสม เนื่องจากลักษณะของการติดตั้งจะส่งผลต่อรูปแบบของโปรไฟล์การไหลภายในถังผสมทั้งที่เป็นของเหลวและของแข็ง และทั้งที่เป็น

การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน Koji *et al.* (2012) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการติดตั้งรูปแบบใบพัดกวนผสมแบบเอียง และทำการศึกษาเพื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณีการติดตั้งใบพัดในแนวแกนตั้ง ผลลัพธ์จากการศึกษาและเปรียบเทียบพบว่า ใบพัดเอียงสามารถลดเวลาการผสมได้ดีเมื่อเทียบกับใบพัดแบบแกนตั้งในสนามการไหลแบบลามินาร์และปั่นป่วน และ Bakker *et al.* (1996) ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นกับรูปทรงใบพัดกวนผสมแบบ 4 ใบพัด โดยใช้เทคนิค Laser Doppler Velocimetry (LDV) และ PIV เทียบกับแบบจำลองการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) พบว่า บริเวณ รอบ ๆ ใบพัดจะมีลักษณะของการไหลเป็นแบบแนวรัศมีสำหรับการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งจะมีค่ามากกว่ารูปแบบการไหลแบบแนวแกน ในปัจจุบันการออกแบบใบพัดกวนผสมมีอยู่หลายแบบที่นำมาใช้งานที่แตกต่างกัน แต่ละแบบจะมีลักษณะของหน้าตัดใบพัดที่ไม่เหมือนกัน บางชนิดเป็นแบบรูปทรงสี่เหลี่ยม บางชนิดเป็นแบบใบโค้งดังแสดงในภาพที่ 1 ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการประยุกต์เพื่อออกแบบใบพัดกวนผสมแบบใหม่ และศึกษาสำหรับทำการวิเคราะห์ผลของสนามการไหลของใบพัดกวนผสมที่ขึ้นรูปหน้าตัดโปรไฟล์ใบพัดเป็นแบบรูปทรงแอร์ฟอยล์ (Airfoil) รุ่น NACA 0006 ที่นิยมนำมาใช้ในการสร้างเครื่องจักรทางอากาศยานต่าง ๆ (Dadone, 1978) และทำการเปรียบเทียบสนามการไหลและอัตราการผสมเทียบกับช่วงเวลาของทิศทางการติดตั้งใบพัดกวนผสมแบบเอียง 25 องศาและแบบแกนตั้ง ดังนั้นการออกแบบสัดส่วนต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1



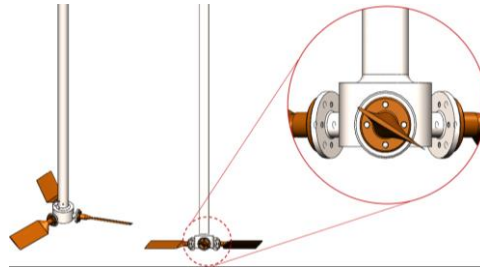
ภาพที่ 1 แสดงการหาสัดส่วนต่าง ๆ ทางทฤษฎีสำหรับถังผสมของไหล

วิธีดำเนินการวิจัย

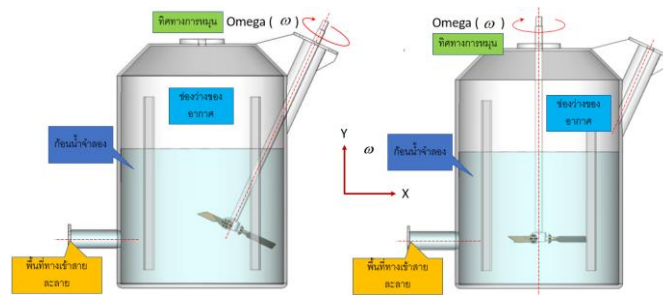
1. ขั้นตอนการออกแบบ แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์

ในงานวิจัยได้ทำการออกแบบรูปทรงใบพัด โดยทำการขึ้นรูปโปรไฟล์โดยการอาศัยรูปแบบของ พิกัดรูปทรงแอร์ฟอยล์รุ่น NACA 0006 โดยคำว่า NACA นั้นจะหมายถึง “องค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ” ส่วนตัวเลขหลักแรกใช้อธิบายส่วนโค้งสูงสุดที่คิดเป็นร้อยละของคอร์ด โครงสร้างแอร์ฟอยล์ ส่วนตัวเลขตัวที่สองใช้ในการอธิบายระยะห่างของแคมเบอร์ (Camber) สูงสุดจากขอบหน้าของแอร์ฟอยล์ที่ทำการออกแบบ และตัวเลขสองหลักสุดท้ายใช้ในการอธิบายความหนาสูงสุดของแอร์ฟอยล์เป็นเปอร์เซ็นต์ของคอร์ด (John, 2001) จากงานวิจัย ผู้วิจัยได้ใช้แอร์ฟอยล์รุ่น NACA 0006 เนื่องจากรูปทรงมีส่วนโค้งที่เหมาะสมต่อการลดแรงต้านทานของไหล และพบได้จากงานวิจัยของ (Lahamornchaiyakul, 2022) ที่เขาเลือกใช้ NACA63-212 ที่สามารถกวนผสมน้ำส้มกับน้ำได้ดี ความสามารถในการขึ้นรูปของโปรแกรม SOLIDWORK 2020 ทำให้ขึ้นรูปใบพัด

กวนผสมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตร จะได้ผลลัพธ์ของการออกแบบดังภาพที่ 2 ในการออกแบบถังผสมโดยทั่วไปสามารถออกแบบตามหลักการและความสัมพันธ์ดังภาพที่ 1 แต่ในงานวิจัยนี้ผู้ออกแบบเลือกกำหนดขนาดถังผสมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 700 มิลลิเมตร สูง 1,000 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นขนาดถังผสมของเหลวที่มีใช้ในอุตสาหกรรมชุมชน และสามารถทำการติดตั้งใบพัดกวนได้ทั้งที่เป็นแบบแกนตั้งและแบบแกนเอียง ในส่วนของแกนเอียงถูกออกแบบให้ทำมุมกับแนวแกน 25 องศา และภายในถังผสมได้ทำการติดตั้งชุดแผ่นกั้นที่มีขนาดความหนา 8 มิลลิเมตร สูง 60 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชุด โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ (Kevin *et al.*, 2019) ที่กล่าวว่าสามารถทำการกวนผสมได้ดีที่สุด จนได้แบบจำลองการวิเคราะห์ที่ผ่านการออกแบบดังภาพที่ 3 และการออกแบบมุมติดตั้งใบพัด 25 องศา ที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากหลักการในงานวิจัยของ (Rahimi and Parvareh, 2007) ได้อ้างว่าเวลาที่ทำการกวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันได้เกิดจากการวางและติดตั้งชุดใบพัด (Impeller) ที่มีมุม 15 และ 60 องศา



ภาพที่ 2 การออกแบบรูปทรงใบพัดกวนผสมแบบใหม่โดยทำการขึ้นรูปโปรไฟล์แอร์ฟอยล์ NACA 00006



ก) ต้นแบบใบพัดแบบเอียง 25 องศา

ข) ต้นแบบใบพัดแบบแกนตั้ง

ภาพที่ 3 ต้นแบบที่ถูกออกแบบและใช้สำหรับการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหล

ในงานวิจัยได้กำหนดรูปแบบการวิเคราะห์ออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีแรกคือกำหนดให้ระบบพิกัดในการวิเคราะห์อยู่ในทิศทางแกน Y ซึ่งเป็นแนวแกนตั้งที่มีทิศทางเดียวกันกับแกนเพลลาของใบกวนผสมแบบตั้ง และส่วนที่สองคือการกำหนดให้ใบพัดกวนเอียง 25 องศา ตามแนวโครงสร้างหลักของถังผสม ซึ่งรูปแบบการวิเคราะห์กำหนดเป็นแบบ Internal flow ที่มีการหมุนในผิวอิสระ (free surface) ที่รอบการหมุน 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาทีตามลำดับ ในส่วนการกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์แบบ Free surface ในการวิเคราะห์นี้ ผู้วิจัยจะทำการรูปแบบการวิเคราะห์เป็นแบบช่วงเวลา (Time-dependent) โดยใช้เวลา 10 วินาที พร้อมกำหนดก่อนน้ำจำลองที่จะใช้กำหนดคุณสมบัติของน้ำเริ่มต้น และในส่วนของทางเข้าจะกำหนดให้สารละลาย (Slurry) ไหลเข้ามาผสมกับน้ำและทำการกวนผสม ส่วนพื้นที่ด้านบนที่อยู่เหนือผิวของก้นน้ำจำลอง ผู้วิจัยจะทำการสมมุติให้เป็นช่องว่างของอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 3

2. โมเดลในการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม SOLIDWORK Flow Simulation 2020 มาใช้ เนื่องจากผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS อยู่แล้ว จึงสามารถนำไฟล์ที่ออกแบบเข้าไปใช้ใน SOLIDWORK Flow Simulation ได้เลยโดยไม่ต้องทำการปรับแบบจำลองใด ๆ ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดโดเมนการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการนำชิ้นงาน 3 มิติที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS เข้ามาสู่โหมดฟังก์ชันของ SOLIDWORK Flow Simulation หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์ผล นำเข้ามานำไปทำการสร้างเมชเอลิเมนต์ โดยมีขั้นตอนที่สำคัญดังนี้คือ

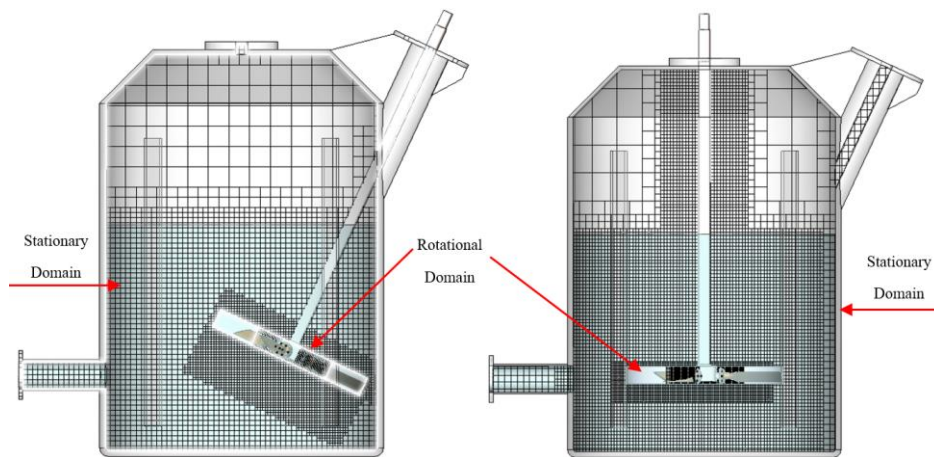
2.1 กำหนด Local mesh เพื่อทำการกำหนดขอบเขตในการสร้างเมช

2.2 ทำการปรับค่าตัวแปรในส่วน Refining cell โดยกำหนดคุณสมบัติของ Level of Refining

Fluid Cell เท่ากับ 4 พร้อมปรับค่าตัวแปรในส่วนของ Level of Refining Cells at Fluid/Solid Boundary ให้อยู่ในระดับ 4

2.3 กำหนดคุณสมบัติของ Equidistant Refinement และกำหนดตัวแปร Number of shells

เท่ากับ 1 พร้อมทำการตั้งค่า Maximum Equidistant Level ให้อยู่ระดับ 3 ตลอดจนทำการกำหนดค่า Offset Distant เท่ากับ 0.1 เมตร จะได้ผลลัพธ์ของแบบจำลองทั้ง 2 ดังภาพที่ 4



ก) เมชเอลิเมนต์ของแบบจำลองใบพัดแบบเอียง 25 องศา ข) เมชเอลิเมนต์ของแบบจำลองใบพัดแบบตั้ง

ภาพที่ 4 เมชเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล

ขั้นตอนการกำหนดให้ค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณของก๊อนน้ำจำลองมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 999.79 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าความหนืดเท่ากับ 0.00179 ปาสคาล-วินาที (SolidWorks, 2020) และกำหนดปริมาตรการไหลของสายละลาย (Slurry) ที่ทางเข้ามีค่าเท่ากับ 0.00365 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยสายละลาย (Slurry) มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1647.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าความหนืดเป็นแบบ Herschel - Bulkley Model (Skadsem and Saasen, 2019) โดยสมมติให้สายละลาย (Slurry) ไหลเข้าไปผสมกับก๊อนน้ำจำลองจึงทำการการผสมเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous mixing) และทำการกำหนดรอบการหมุนของใบกวนผสมที่รอบการหมุนคงที่ระหว่าง 50 ถึง 300 รอบต่อนาที

โดยทั่วไปการวิเคราะห์การไหลในถังกวนผสมจะมีอยู่ 2 วิธี คือ การวิเคราะห์แบบ Multiple Reference Frame (MRF) และแบบ Sliding Mesh

approach (SM) (Piya and Puzu, 2019) โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกรูปแบบการหมุนที่นำมาใช้เป็นแบบ Local Region Sliding ซึ่งจะอาศัยหลักการของ (MRF) กล่าวคือ หลักการของ (MRF) จะทำการกำหนดองค์ประกอบของแบบจำลองการวิเคราะห์ทั้งหมด 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นชิ้นส่วนที่ทำการหมุน (Rotation Domain) และส่วนที่สองคือ ส่วนที่วัตถุอยู่กับที่ (Stationary Domain) โดยรูปแบบการวิเคราะห์เป็นการไหลเป็นแบบอิสระ Free Surface ซึ่งรูปแบบการจำลองการไหลเป็นแบบระบบ 3 มิติแบบช่วงเวลา (Time-dependent) ซึ่งกำหนดเวลาเท่ากับ 10 วินาที และกำหนด Step time เท่ากับ 0.02 วินาที โดยแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในงานวิจัยเป็นแบบ k-epsilon ในการวิเคราะห์ปัญหาในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้คอมพิวเตอร์รุ่น MSI และมีคุณสมบัติของเครื่องคอมพิวเตอร์ดังนี้ Intel(R) Core(TM)i7 RAM 12 GB

3. แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon model

กฎพื้นฐานสำหรับกระบวนการกวนผสมของไหลประกอบไปด้วยหลักการดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) ตัวแปรของดัชนี (j) แสดงถึงคำมิติของเวกเตอร์ และในระบบการวิเคราะห์พิจารณาเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) ดังนั้นระบบสมการที่ใช้จึงพิจารณาอยู่ในรูปของ

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม คือ สมการที่ใช้ในการคำนวณหาแรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) เมื่อทำการพิจารณารูปแบบสมการทั้ง 3 เทอมทางด้านขวามือพบว่า ระบบสมการจะแสดงถึงระบบแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมในทุกแนวแกน ซึ่งจะประกอบไปด้วย แรงเนื่องจากความดัน (P) แรงเนื่องจากความหนืด (τ_{ij}) และแรงเนื่องจากน้ำหนัก (Body force (f_i)) เนื่องจากระบบการวิเคราะห์ในงานวิจัยเป็นการกวนผสมซึ่งมี

สมการอนุรักษ์มวล คือ ระบบสมการที่ใช้อธิบายอัตราการไหลเข้าและออกปริมาตรควบคุม

ค่าเฉลี่ยเรโนลด์ (Reynold-Averaging) สำหรับปัญหาของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible) และสามารถเขียนพฤติกรรมของสมการได้ดังสมการที่ (2)

รูปแบบการหมุนในการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงพิจารณาการไหลในรูปแบบโครงร่างการอ้างอิงการหมุน (Rotating Frame of Reference) ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ระบบแรงทั้งในส่วนองแรง Coriolis และแรง Centrifugal ถูกรวมอยู่ในแบบจำลองด้วย ดังนั้นแรงของระบบสมการในเทอมของ Body force จะมีรูปแบบพฤติกรรมเป็นดังสมการที่ (4)

$$f_i = -(2\vec{\Omega} \times \vec{U} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r})) \quad (4)$$

สำหรับของไหลที่อยู่ในรูปนิวโตเนียน (Newtonian) เทอมของสมการ (τ_{ij}) คือค่า Stress tensor สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (5)

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3} \mu_b \delta_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

โดยที่ (μ_b) คือ Bulk Viscosity มีค่าเท่ากับ $\frac{2}{3} \mu$ และค่า (μ) คือค่าความหนืดไดนามิก (Dynamic Viscosity) ส่วนค่าตัวแปร (δ_{ij}) คือ Kronecker Delta

เมื่อทำการพิจารณาสมการที่ (4) ด้วย
ค่าเฉลี่ยเรโนลด์ในการไหลแบบอัดตัวไม่ได้พบว่า
เทอมของสมการ Body Force จะมีค่าน้อยมาก

ดังนั้นสามารถพิจารณาและตัดเทอมนี้ทิ้งได้และจัด
รูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (6)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{U}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{U}_i \bar{U}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\tau}_{ij} + \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j) \quad (6)$$

เทอมของสมการ $\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$ เป็นเทอมที่แสดง
การไหลแบบปั่นป่วนแบบการไหลเฉลี่ย และเรียก
เทอมนี้ว่า Reynold Stress Tensor สำหรับของไหล
แบบนิวโตเนียนแบบจำลอง k-epsilon model

k-epsilon model เป็นเทอมของ Reynolds
Stress จะถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ Mean

Stress Rate โดย Eddy Viscosity จะกำหนดให้มี
ความสัมพันธ์กับค่าของตัวแปรของ Turbulent
Kinetic Energy, (k) และค่าตัวแปรของ Dissipation
Rate (ε) โดยใช้ความสัมพันธ์ Boussinesq
approximation คือ (Lahamornchaiyakul, 2011)

$$t_{ij} = -\frac{2}{3} \delta_{ij}(\rho k) + u_i \left[\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (7)$$

โดยที่ $u_t = \rho C_u k^2 / \varepsilon$ คือ Turbulent Eddy Viscosity สมการของ Turbulent Kinetic Energy (TKE) (k) จะ
แสดงอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_e}{\sigma_k} + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (8)$$

สมการของ Dissipation Rate ของ Turbulent Kinetic Energy (Shengchao *et al.*, 2015) คือ

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_e}{\sigma_k} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (9)$$

ซึ่ง G แทน Generation Rate of Turbulent Kinetic Energy ขณะที่ $\rho \varepsilon$ เป็น Dissipation Rate โดย G จะเป็น

$$G = u_e \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (10)$$

ค่าตัวแปรขอบเขตต่าง ๆ ของ Turbulent ที่ใกล้ผนังสามารถหาค่าได้จาก Wall Function โดยมีค่าคงที่ ที่
เกี่ยวข้องกับค่าสมการต่าง ๆ ที่ผ่านมามีดังนี้คือ

$\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, และ $C_u = 0.09$ เป็นค่าคงที่โดยที่ $u_e = u_t + u$
(Lahamornchaiyakul, 2011; Choi *et al.*, 2004)

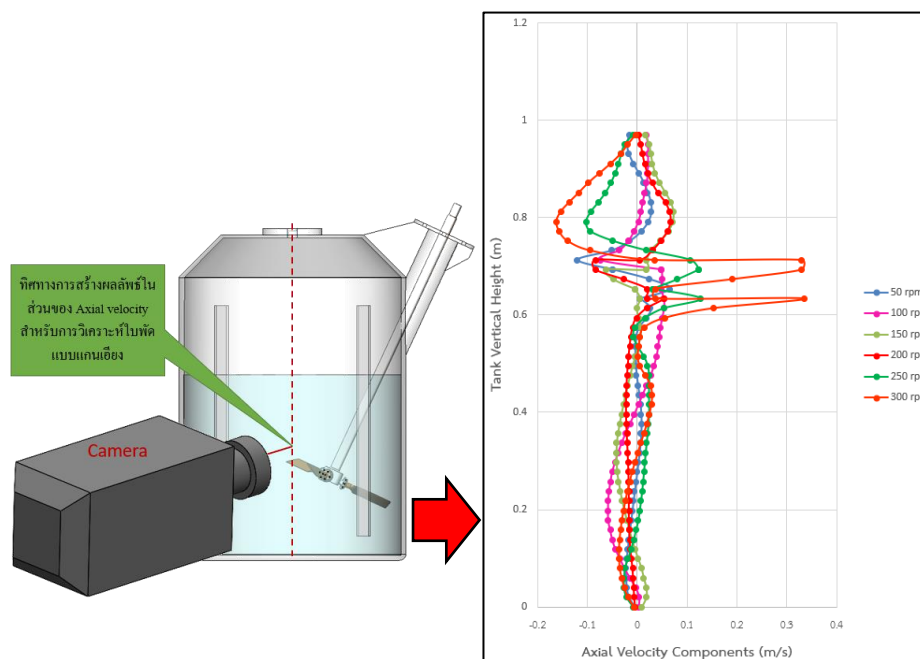
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากการจำลองผลทางพลศาสตร์ของไหล สำหรับการผสมของสารละลาย (Slurry) และน้ำในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะประกอบไปด้วยขั้นตอนการศึกษาและวิจัย 2 แบบคือ ส่วนแรกจะทำการศึกษาค่าความเร็วรอบในแนวแกนและแนวรัศมีรอบใบพัดแบบเอียง 25 องศา และใบพัดแบบตั้งจากภาพที่ 3 ที่ความเร็วรอบการหมุน 50 ถึง 300 รอบต่อนาทีตามลำดับ และส่วนที่สองจะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการทดสอบใบพัดกวนผสมแบบเอียงและแบบแกนตั้ง เพื่อทำการแสดงสนามการไหลของของไหลผสมระหว่างสารละลาย (Slurry) และน้ำโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation 2020 โดยทำการยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัย เพื่อแสดงความเร็วสนามการไหล ความเร็วในระนาบในทิศทางแกน YZ (ทิศทางแกน YZ ในส่วนของ SOLIDWORKS Flow Simulation คือระนาบการแสดงผลในทิศทางด้านข้างหรือ Right plane) การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบใบกวนผสม ความเร็วในแนวรัศมีและแนวแกน และการจำลองอนุภาครวมตลอดจนระยะเวลาใน

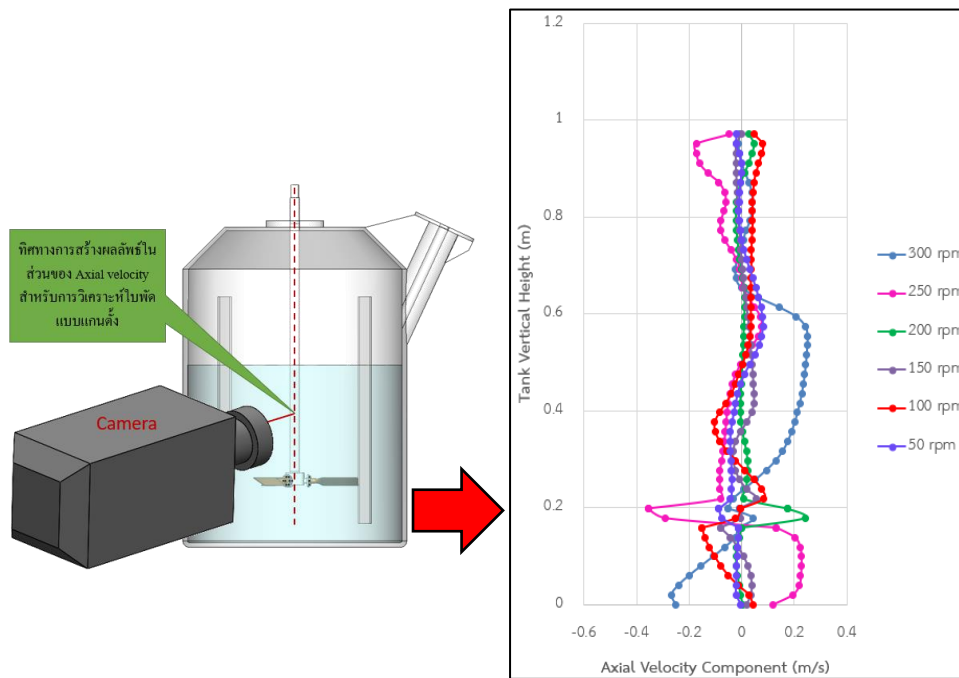
การผสม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. ผลลัพธ์ความเร็วในแนวแกนและแนวรัศมีรอบใบพัดกวนผสม

จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยหลักการทางพลศาสตร์ของไหลที่ได้จากงานวิจัยพบว่า ที่รอบการหมุนของใบพัดกวนผสมทั้งสองแบบจำลองที่ทำการวิเคราะห์ จะสามารถสร้างค่าความเร็วในแนวรัศมี (Radial flow velocity) ของใบพัดกวนผสมแบบแกนเอียงและแกนตั้งที่มีค่าสูงกว่าค่าความเร็วในแนวแกน (Axial flow velocity) และเมื่อนำผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ของแบบจำลองทั้งสอง คือแบบใบพัดแบบเอียงและแบบแกนตั้งมาทำการเปรียบเทียบกัน พบว่าที่ใบพัดกวนผสมแบบเอียงจะสามารถสร้างแรงในแนวแกนได้สูงกว่าใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้ง และที่ใบพัดกวนผสมแบบแกนเอียงสามารถสร้างแรงในแนวแกนของถังผสมได้สูงสุดที่รอบการหมุน 300 รอบต่อนาที ซึ่งสามารถแสดงผลลัพธ์เชิงตัวเลขได้ดังภาพที่ 5 และภาพที่ 6



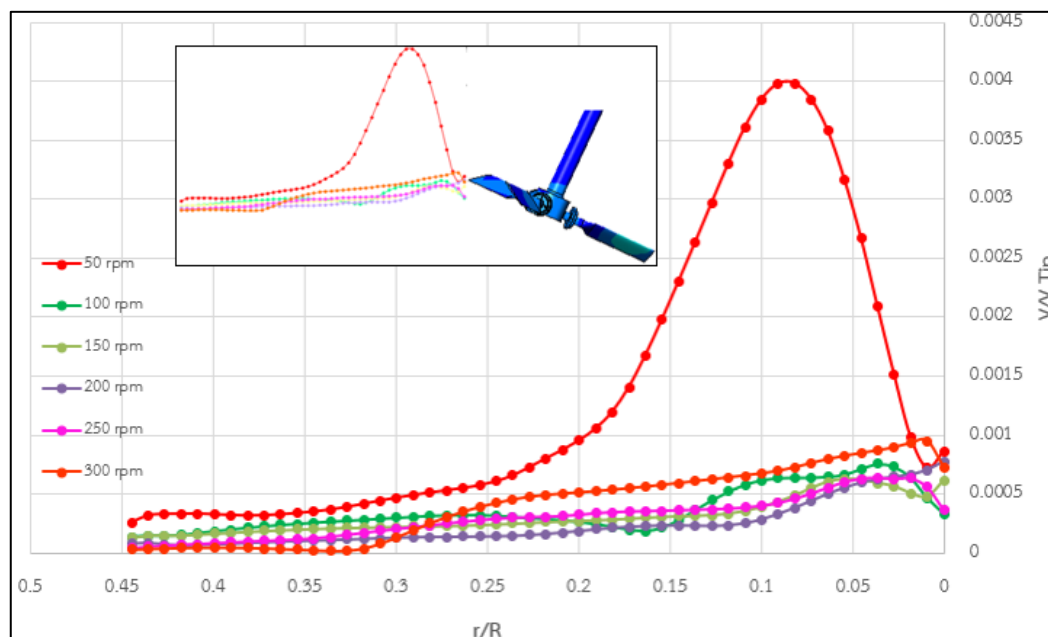
ภาพที่ 5 ค่าความเร็วในแนวแกนของใบพัดกวนผสมแบบแกนเอียง 25 องศาที่รอบการหมุนต่าง ๆ



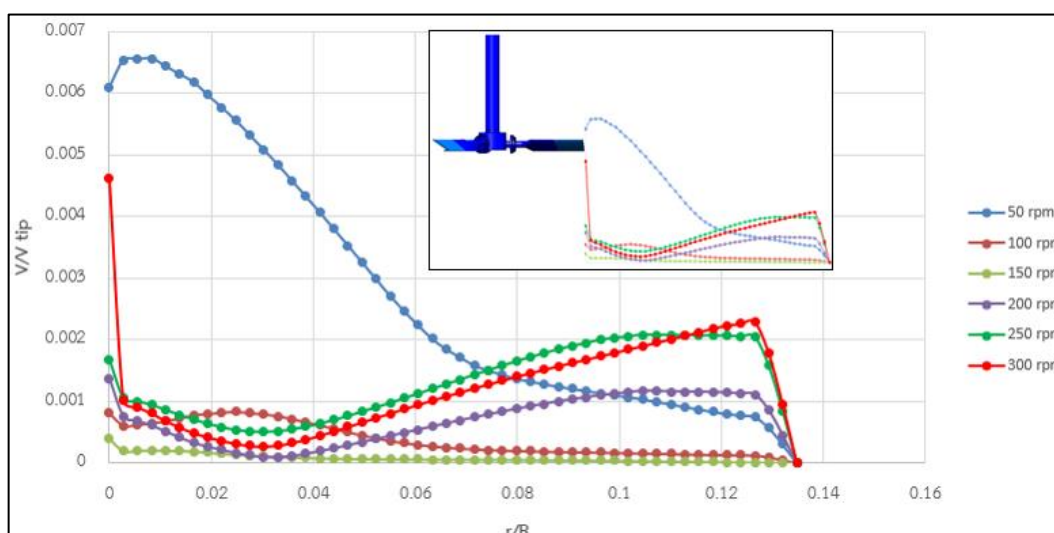
ภาพที่ 6 ค่าความเร็วในแนวแกนของใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้งที่รอบการหมุนต่าง ๆ

ผลลัพธ์เชิงตัวเลขจากการวิเคราะห์ที่ได้ดำเนินการแสดงในภาพที่ 5 และ 6 ซึ่งเป็นการแสดงผลของรูปแบบการวิเคราะห์ที่ได้จากแรงในแนวแกนที่เกิดขึ้นรอบบริเวณใบพัดกวนผสมในทิศทางตามระนาบของแกนการหมุนของใบพัดกวนผสมทั้งสองแบบจำลอง ซึ่งผลลัพธ์เชิงตัวเลขที่เกิดขึ้นในแบบจำลองการวิเคราะห์ สามารถอธิบายได้ว่าแบบจำลองที่สามารถสร้างแรงในแนวแกนที่สูง จะสามารถส่งถ่ายแรงกระทำที่เกิดจากกำลังทางกลของใบพัดกวนผสมในช่วงที่เกิดการหมุนด้วยค่าความเร็วมอเตอร์คงที่ไปยังสนามการไหลของของไหลได้ดี จึงได้ส่งผลทำให้เกิดแรงของการกระจายตัวของเวกเตอร์ความเร็วของของไหลในสนามการไหลระหว่างการผสมของไหลทั้งสองชนิดที่ไหลมาผสมกันภายในถังผสมได้ดีกว่าแบบจำลองที่สร้างแรงในแนวแกนที่ได้น้อยกว่า ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Lahamomchaiyakul (2020) ที่ได้ทำการศึกษาการกวนผสมน้ำและน้ำผลไม้ของชุดใบพัดแบบทำมุมองศา หลังจากนั้นเมื่อทำการพิจารณาระบบของแรงในแนวรัศมีที่เกิดขึ้นในระบบ

การวิเคราะห์ของใบพัดกวนผสมทั้งสองแบบจำลอง ในระหว่างที่ใบพัดกวนผสมเกิดการหมุนในแต่ละความเร็วรอบการหมุน พบว่า ที่ใบพัดกวนผสมแบบแกนเอียงนั้น จะสามารถสร้างรูปแบบของแรงในแนวรัศมีที่ปลายใบพัดที่มีรอบการหมุนไม่คงที่ในช่วงเริ่มต้นของการเกิดการหมุนบนใบพัดกวนผสม และจะเริ่มสูงขึ้นในช่วงการผสมของไหลที่รอบการหมุน 50 รอบต่อวินาทีในช่วงขณะหนึ่ง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากช่วงเวลาของการวิเคราะห์ได้ที่เวลา 2-3 วินาที โดยมีค่าโปรไฟล์ความเร็วที่แสดงจากกราฟในภาพที่ 7 ที่สูงกว่ารอบการหมุนอื่นเมื่อทำการเปรียบเทียบกัน และเมื่อเวลาการวิเคราะห์ผลผ่านไปทีรอบการหมุนคงที่ แรงในแนวรัศมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมุนจะมีค่าค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ ส่วนใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้งนั้น พบว่าจะมีค่าที่สูงตั้งแต่เริ่มต้นการหมุนในขณะที่เริ่มการผสมและเมื่อเวลาผ่านไปจะมีค่าความเร็วในแนวรัศมีลดลงตามลำดับที่รอบการหมุนต่าง ๆ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 7 ค่าความเร็วในแนวรัศมีของใบพัดกวนผสมแบบแกนเอียงที่รอบการหมุนต่าง ๆ

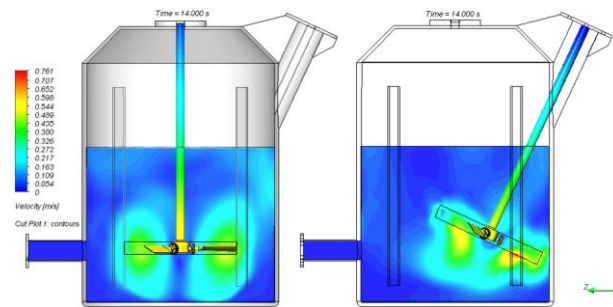


ภาพที่ 8 ค่าความเร็วในแนวรัศมีของใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้งที่รอบการหมุนต่าง ๆ

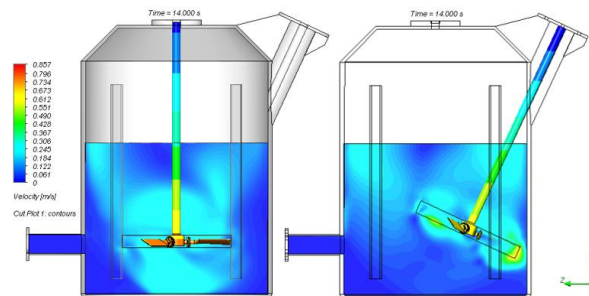
2. ผลลัพธ์ Plot Contour ของความเร็วในถังผสมในระนาบ YZ (ด้านข้าง)

จากการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลสามารถแสดงสนามการไหลของอัตราการผสมระหว่างสารละลาย (Slurry) และน้ำภายในถังผสมที่ใช้ความเร็วรอบของมอเตอร์คงที่ ที่ส่งผ่านกำลังงานทางกลจากมอเตอร์มาที่เพลาคูที่เชื่อมต่อกับชุดใบพัด

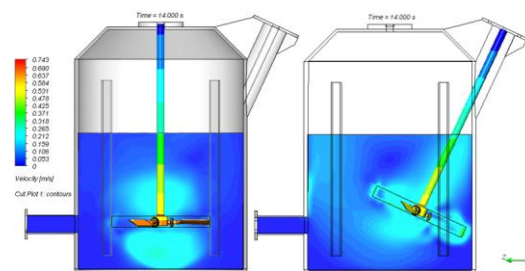
กวนผสมทั้งสองแบบจำลอง โดยใช้รอบการหมุน 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อวินาที ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการกำหนดการวิเคราะห์เป็นแบบช่วงเวลา Time dependent โดยกำหนดเวลาในการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลเท่ากับ 14 วินาที เพื่อจำลองผลลัพธ์ในการผสมระหว่างของไหลสองชนิด ผลการวิเคราะห์จะแสดงได้ดังภาพที่ 9 ถึงภาพที่



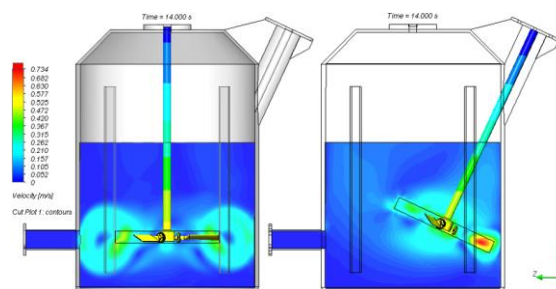
ภาพที่ 9 ความเร็วในการผสมที่รอบการหมุน 50 รอบต่อนาที ที่เวลา 14 วินาที



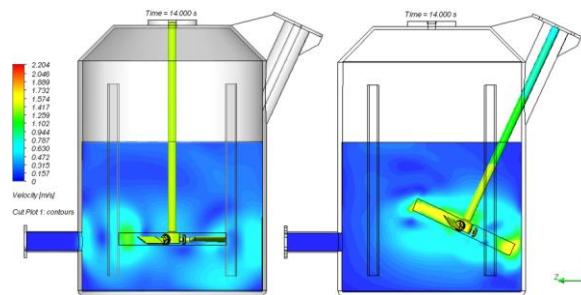
ภาพที่ 10 ความเร็วในการผสมที่รอบการหมุน 100 รอบต่อนาที ที่เวลา 14 วินาที



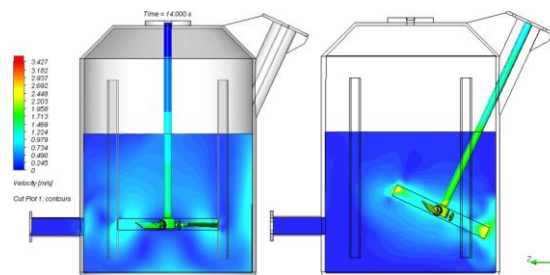
ภาพที่ 11 ความเร็วในการผสมที่รอบการหมุน 150 รอบต่อนาที ที่เวลา 14 วินาที



ภาพที่ 12 ความเร็วในการผสมที่รอบการหมุน 200 รอบต่อนาที ที่เวลา 14 วินาที



ภาพที่ 13 ความเร็วในการผสมที่รอบการหมุน 250 รอบต่อนาที ที่เวลา 14 วินาที



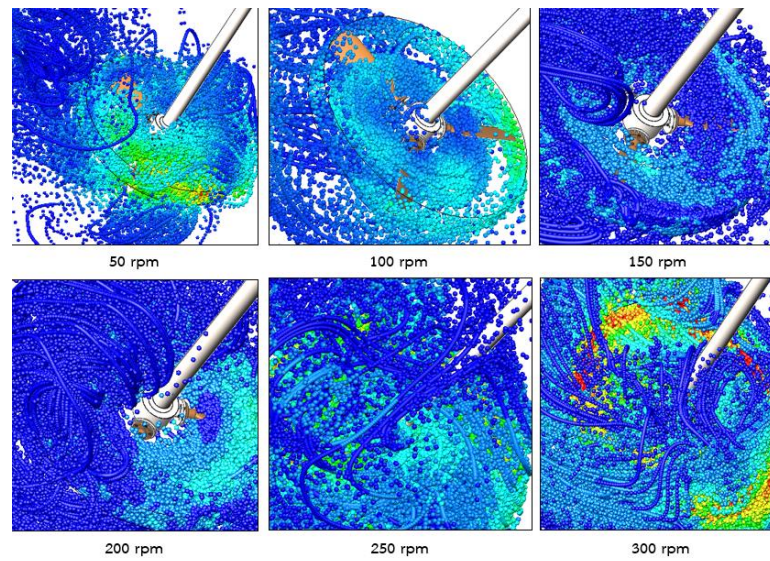
ภาพที่ 14 ความเร็วในการผสมที่รอบการหมุน 300 รอบต่อนาที ที่เวลา 14 วินาที

จากภาพที่ 9-14 เป็นการจำลองสนามความเร็วของการไหลของของไหลผสมระหว่างสารละลาย (Slurry) และน้ำที่แสดงอยู่ในรูปของ Plot contour ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ช่วงเริ่มต้นทำการผสมของใบพัดแบบเอียงจะสามารถสร้างอัตราของความเร็วที่กระจายตัวไปทั่วถึงผสมได้ดีที่ความเร็วรอบการหมุนเริ่มต้นที่ 50-150 รอบต่อนาที และเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วง 11-14 วินาทีค่าการกระจายตัวของความเร็วในสนามการไหลภายในถังผสมจะมีค่าคงที่เนื่องจากของไหล 2 ชนิดเริ่มมีการผสมตัวเป็นเนื้อเดียวกันและเมื่อทำการพิจารณาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นอาจจะดีกว่าใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้ง เนื่องจากใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้งต้องใช้ระยะเวลาในการผสมที่มากกว่าในช่วงเริ่มทำการผสมเดียวกัน และเมื่อทำการปรับค่าความเร็วรอบให้สูงขึ้นตั้งแต่ 200 ถึง 300 รอบต่อนาที พบว่าในช่วงเวลาเริ่มต้นของค่าความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นของใบพัดกวนผสมแบบแกน

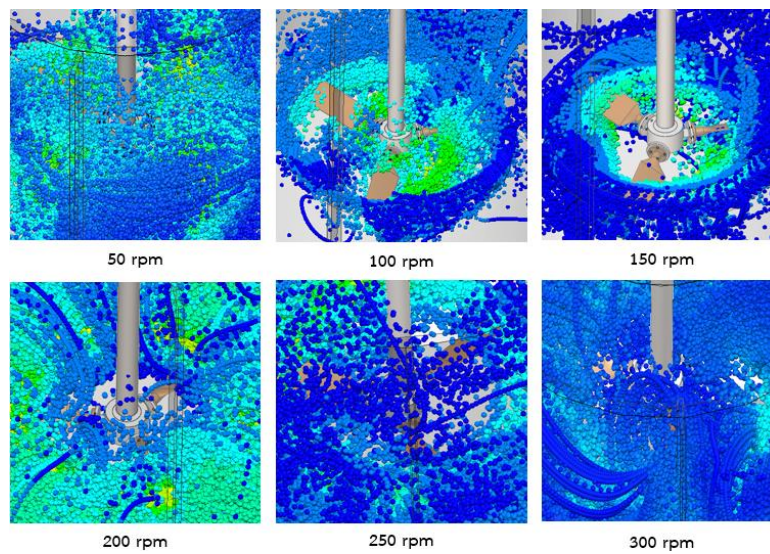
ตั้ง สามารถสร้างความเร็วในการกระจายตัวของสารผสมได้ดีขึ้น ซึ่งจะเห็นภาพได้ชัดที่รอบการหมุน 300 รอบต่อนาทีดังแสดงในภาพที่ 14

3. การประมาณค่าการผสมด้วยแบบจำลองอนุภาคและแบบจำลองอิสระ

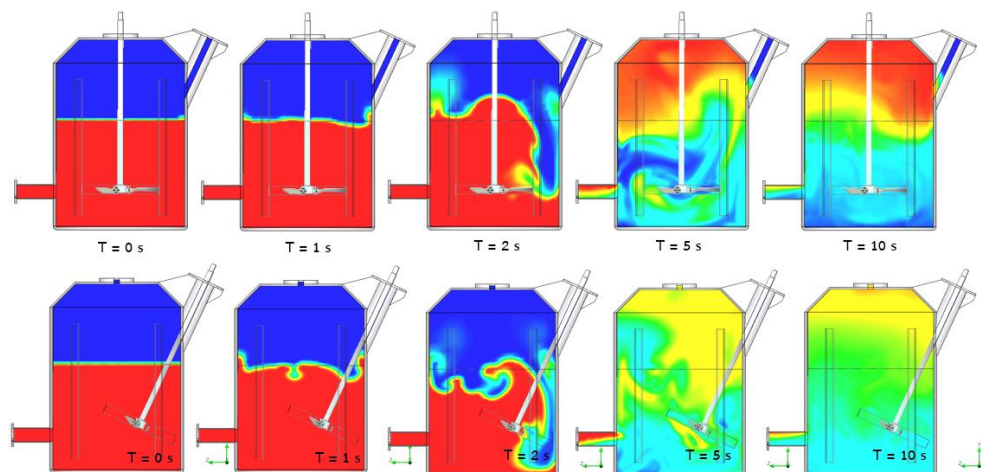
จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยหลักการทางพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยนี้ ได้อาศัยรูปแบบการประเมินประสิทธิภาพการกวนผสมที่มีการกระจายตัวโดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการจำลองสองวิธีที่ไม่ซ้ำกันตามผลการจำลองการไหลของของไหลผสมระหว่างสารละลาย (Slurry) และน้ำที่ได้จากการวิเคราะห์ในช่วงต้น วิธีแรกคือการจำลองการกระจายตัวของอนุภาคของไหลผสม ดังภาพที่ 15 และภาพที่ 16 และอีกวิธีหนึ่งคือการผสมของของไหลแบบผิวอิสระ (Free-Surface) ของของไหลสองชนิด ผสมกัน ดังภาพที่ 17-22



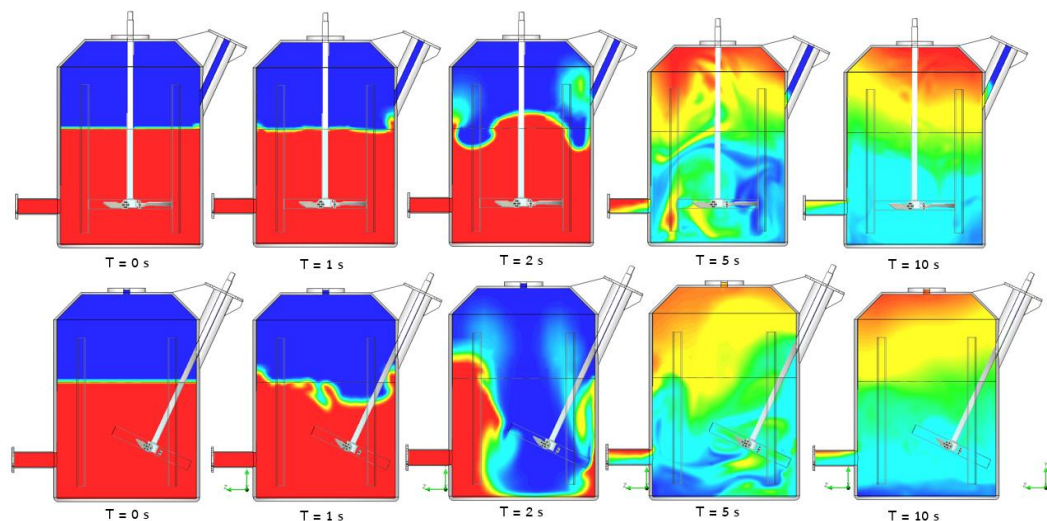
ภาพที่ 15 แสดงการกระจายตัวของอนุภาครอบใบพัดกวนผสมแบบแกนเฉียงที่รอบการหมุนต่าง ๆ



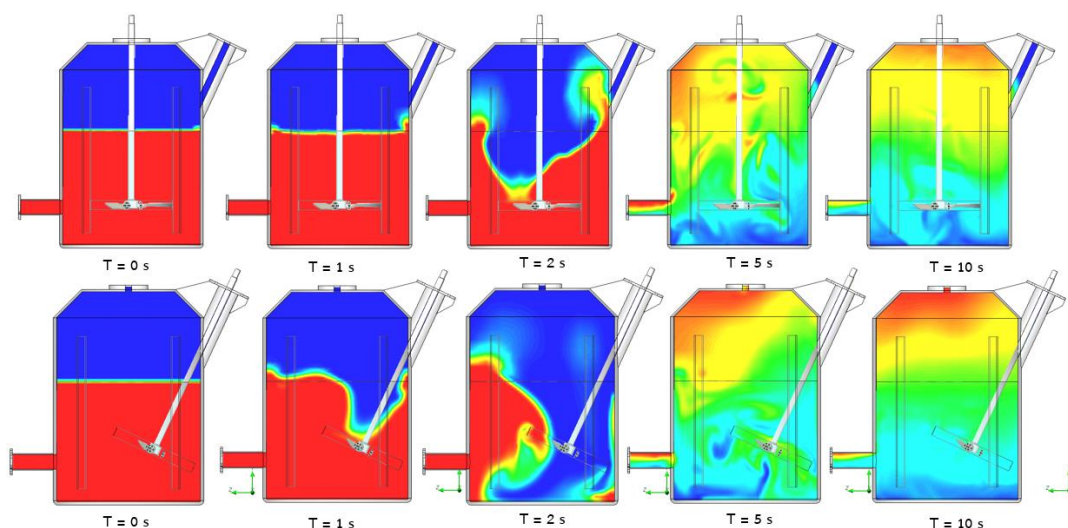
ภาพที่ 16 แสดงการกระจายตัวของอนุภาครอบใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้งที่รอบการหมุนต่าง ๆ



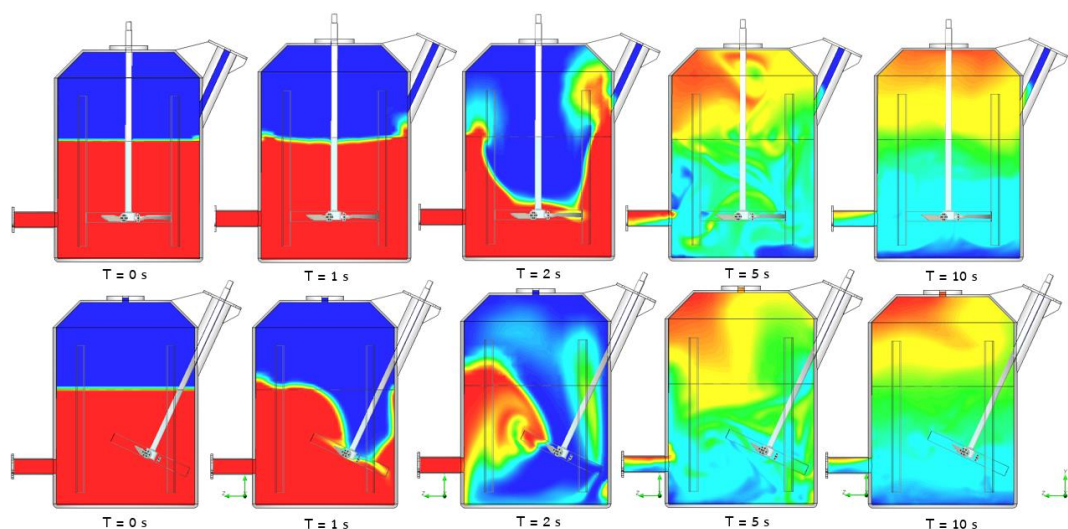
ภาพที่ 17 การผสมของของไหลแบบฟิอัสระสำหรับการผสมของไหลสองชนิดที่รอบการหมุน 50 รอบต่อนาที



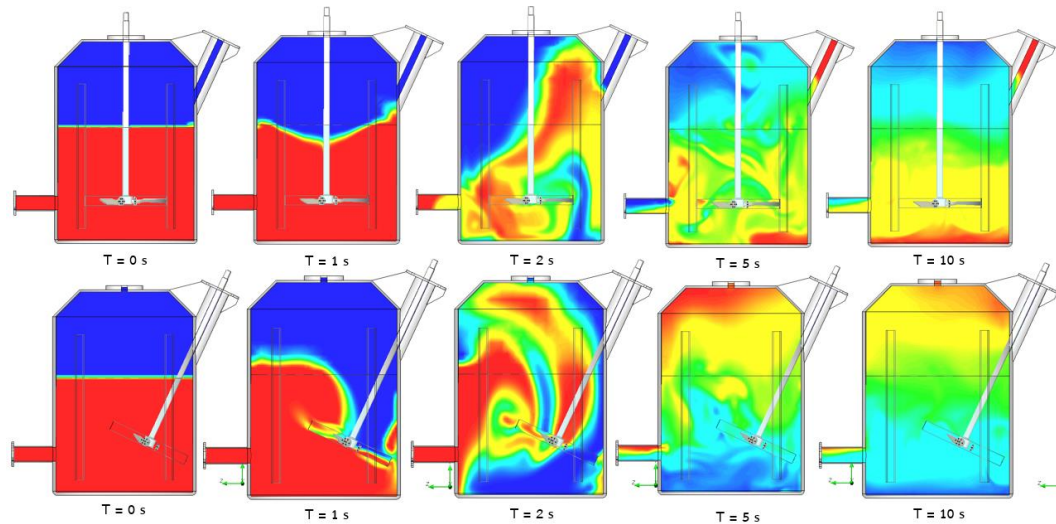
ภาพที่ 18 การผสมของของไหลแบบผิวอิสระสำหรับการผสมของไหลสองชนิดที่รอบการหมุน 100 รอบต่อนาที



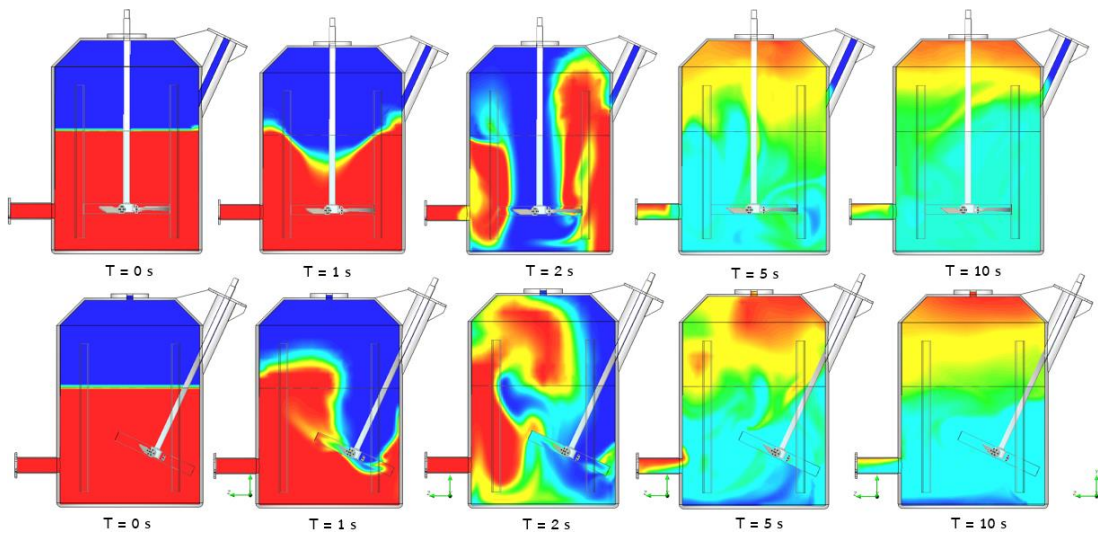
ภาพที่ 19 การผสมของของไหลแบบผิวอิสระสำหรับการผสมของไหลสองชนิดที่รอบการหมุน 150 รอบต่อนาที



ภาพที่ 20 การผสมของของไหลแบบผิวอิสระสำหรับการผสมของไหลสองชนิดที่รอบการหมุน 200 รอบต่อนาที



ภาพที่ 21 การผสมของของไหลแบบผิวอิสระสำหรับการผสมของไหลสองชนิดที่รอบการหมุน 250 รอบต่อนาที



ภาพที่ 22 การผสมของของไหลแบบผิวอิสระสำหรับการผสมของไหลสองชนิดที่รอบการหมุน 300 รอบต่อนาที

ผลลัพธ์ของการจำลองเชิงตัวเลขของใบพัด กวนผสมแบบเอียงและแบบแกนตั้ง จากภาพที่ 15 และภาพที่ 16 โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการแสดงในภาพ สามารถอธิบายได้ว่า ค่าสีจะแสดงระยะของตำแหน่ง เริ่มต้นของอนุภาคในทิศทางตามแนวแกนการหมุน ของแต่ละแบบการวิเคราะห์ โดยที่สีแดงจะแสดงถึง ตำแหน่งด้านบนและสีน้ำเงินจะแสดงถึงตำแหน่ง ด้านล่าง ซึ่งผลลัพธ์หลังจากการวิเคราะห์การหมุน และแสดงจำนวนของอนุภาคที่น้อยลง ส่งผลให้เกิด การกระจายตัวของอนุภาคที่มีความสามารถสูงขึ้น ดังนั้นจึงได้รับการยืนยันว่าสภาพใบพัดกวนผสม

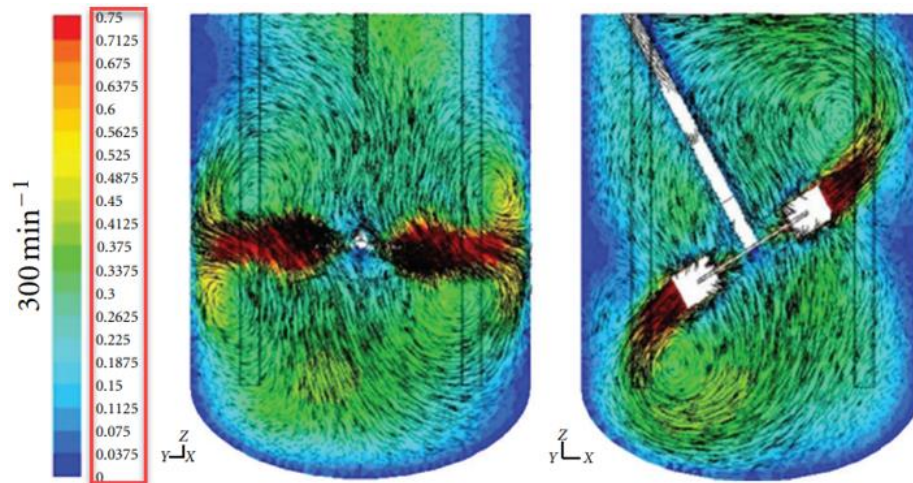
แบบเอียง สามารถสร้างแรงกระจายได้ตัวสูงกว่า ใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้ง ซึ่งเป็นไปตาม ผลงานวิจัยของ Koji *et al.* (2012) ที่ได้ทำการศึกษา เอาไว้กับชุดใบพัดกวนผสมแบบ 4 ใบพัด นอกจากนี้ งานวิจัยยังได้ทำการศึกษารูปแบบการวิเคราะห์ของ ของไหลผสมสองชนิดที่ผสมกัน เพื่อทำการศึกษา ระยะเวลาของการผสมระหว่างสารละลาย (Slurry) และน้ำ จากภาพที่ 17 ถึงภาพที่ 22 สามารถแสดง ผลลัพธ์ของการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลในการ จำลองกระบวนการผสมของไหลสามชนิดคือ อากาศ สารละลายและน้ำด้วยใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้ง

และแกนเอียง ซึ่งค่าเริ่มต้นการคำนวณจะกำหนดของไหลเป็นอากาศ ส่วนของไหลผสมทั้งสองคือสารละลายและน้ำจะกำหนดให้มีค่าความหนาแน่นและค่าความหนืดที่แตกต่างกัน กระบวนการจำลองจะกำหนดให้ภายในถังผสมมีน้ำเป็นสัดส่วนหลัก รองจากอากาศและจะทำการปล่อยสารละลายเข้ามาทางท่อส่งน้ำที่เชื่อมต่อกับถังผสมด้วยอัตรา 0.00365 ผลงานวิจัยของ Piya and Puzu (2019) ได้ทำการจำลองผลแบบ Free-Surface แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มตำแหน่งหรือมีการเปลี่ยนตำแหน่งใบพัดในทิศทางแนวแกนตั้งในทิศทางแกน Z จะส่งผลทำให้เกิดการกระจายความเร็วจากใบพัดกวนผสม ทำให้มีอัตราเร็วที่ลดลง แต่ผลการจำลองเชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนเอียง ทำให้สามารถสร้างความเร็วในสนามการไหลได้สูงขึ้น ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ของการผสมทั้งสองแบบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ พบว่า ที่ใบพัดกวนผสมแบบเอียงจะสามารถสร้างอัตราส่วนของการผสมได้ดีและใช้เวลาที่น้อยกว่าการใช้ใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้งแบบบมีนัยสำคัญ

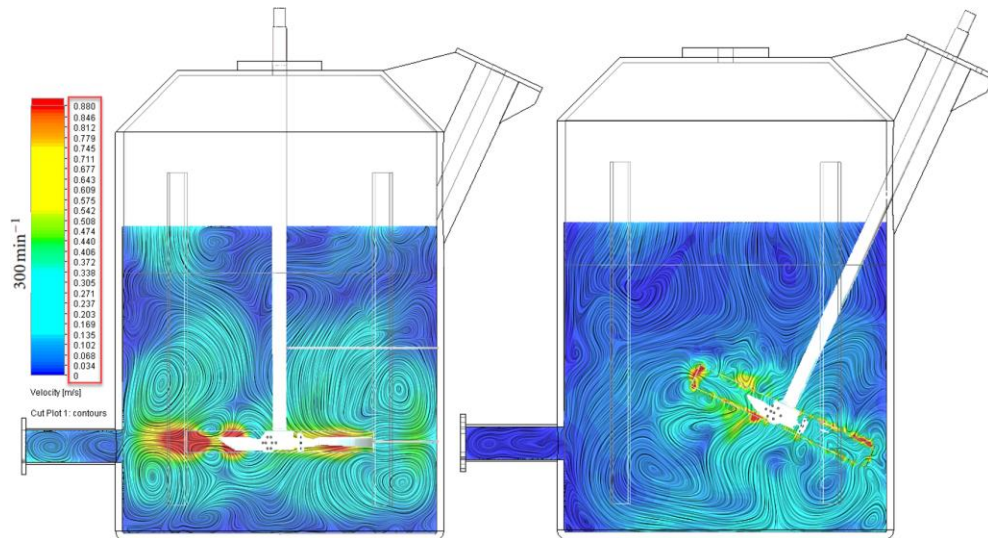
4. การเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงตัวเลขจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้เลือกงานวิจัยของ Koji *et al.* (2012) โดยเขาได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการกวนผสมของเหลวที่มีความหนืดอยู่ในช่วง 1.05-1.30

พาสคัล.วินาที (Pa.s) โดยทำการติดตั้งชุดแบบใบตรงที่ 0 องศาและแบบใบพัดแบบเอียงที่ 15 และ 30 องศา ตามลำดับ ซึ่งเขาเลือกทำการศึกษาที่รอบการหมุน 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 รอบต่อนาที โดยกวนผสมภายในถังกวนผสมที่ทำการติดตั้งชุดแผ่นกั้น (baffle) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.24 เมตร (240 มิลลิเมตร) สูง 0.3 เมตร (300 มิลลิเมตร) และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดกวนผสมเท่ากับ 0.119 เมตร (119 มิลลิเมตร) ขั้นตอนการเปรียบเทียบผลลัพธ์ ผู้วิจัยได้นำแบบจำลองที่ออกแบบขึ้นใหม่ในงานวิจัยนี้ โดยทำการตั้งค่าของไหลแบบนิวโทเนียน ซึ่งเป็นของผสมระหว่างน้ำและเชื่อมข้าวโพด ที่ความหนืดของของเหลวที่ 1 พาสคัล.วินาที เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Koji *et al.* (2012) และเลือกใช้รอบการหมุนที่ 300 รอบต่อนาที ที่มุมมองการวางใบพัดกวนผสมที่ 25 องศา ผลการเปรียบเทียบความเร็วภายในถังกวนผสมพบว่า แบบจำลองใบพัดกวนผสมที่ออกแบบขึ้นใหม่ในงานวิจัยนี้ โดยใช้รูปทรงของแอร์ฟอยล์รุ่น NACA 0006 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 400 มิลลิเมตร และติดตั้งในถังกวนผสมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 700 มิลลิเมตร สูง 1,000 มิลลิเมตร สามารถสร้างความเร็วเฉลี่ยรอบใบพัดและภายในถังกวนผสมของเหลวที่มีความหนืดในช่วง 1 พาสคัล.วินาที และได้ผลลัพธ์ความเร็วสนามการไหลที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Koji *et al.* (2012) ดังแสดงในภาพที่ 23



ก. แบบจำลองการวิเคราะห์ของ Koji *et al.* (2012) ที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Fluent ที่รอบการหมุน 300 rpm ที่มุม 30 องศา ในการติดตั้งชุดใบพัดกวนผสม



ข. แบบจำลองการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation ที่ 300 rpm ที่มุม 25 องศา ในการติดตั้งชุดใบพัดกวนผสม

ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของแบบจำลองทั้งสองแบบ

จากภาพที่ 23 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองใบพัดกวนผสมที่ขึ้นรูปใบพัดด้วยรูปทรงของแอร์ฟอยล์รุ่น NACA 0006 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 400 มิลลิเมตร สามารถนำไปทำการปรับใช้ในงานกวนผสมของเหลวแบบต่าง ๆ ได้เช่นเดียวกับรูปทรงใบพัดในแบบอื่น ๆ ถ้าสามารถเลือกใช้งานให้เหมาะสมกับงานที่ทำการกวนผสมของเหลว แต่ละประเภท ก็จะเป็นผลดีต่อประสิทธิภาพเชิงกลและประสิทธิภาพการกวนผสมได้ อีกทั้งยังช่วยในเรื่อง

ของการประหยัดพลังงานที่จะสูญเสียไปกับการกวนผสมต่าง ๆ ที่ไม่จำเป็น

สรุป

ในการศึกษาผู้วิจัยได้เลือกออกแบบใบพัดกวนผสมแบบใหม่โดยใช้โปรไฟล์ที่มีหน้าตัดรูปทรงแอร์ฟอยล์รุ่น NACA 0006 มาใช้เป็นกรณีศึกษาในการกวนผสมในงานวิจัยนี้ และผลการทดสอบเชิง

ตัวเลขในการผสมสารละลาย (Slurry) และน้ำที่มีค่าความหนาแน่นและความหนืดที่แตกต่างกันด้วยใบกวนผสมรูปทรงแอร์ฟอยล์แบบเอียงที่ทำมุมเอียง 25 องศา พบว่าสามารถสร้างการกระจายตัวของความเข้มข้นในการผสมสารละลาย (Slurry) กับน้ำให้เข้ากันได้ดีที่สุดใช้เวลา 10 นาที ซึ่งใช้เวลาผสมได้เร็วกว่าใบพัดกวนผสมแบบแกนตั้ง 4 วินาที ซึ่งสามารถแสดงได้จากภาพที่ 14 และใบพัดกวนผสมแบบเอียงยังสามารถสร้างแรงกระจายตัวของความเร็วในการผสมกันของสารละลาย (Slurry) และน้ำที่เหมาะสมเพราะความเร็วในสนามการไหลจะมีค่าที่สูงบริเวณรอบใบกวนผสมและพื้นที่การหมุนวนด้านล่างใบพัดกวนผสม และค่าความเร็วในแนวแกนจะมีค่าความเร็วทั้งค่าบวกและค่าลบ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของของไหลผสมไปทั่วทั้งบริเวณถังผสม การเลือกใช้ใบพัดแบบเอียงที่ทำการติดตั้งในงานวิจัย สามารถช่วยในการแก้ปัญหาในการตกตะกอนบริเวณก้นถังกวนผสมได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งสามารถแสดงผลอยู่ในรูปแบบของอัตราการผสมและเวลาผสม ดังนั้นการเลือกใช้กังวาลใบกวนผสมที่สามารถสร้างอัตราการกวนผสมของไหลให้เข้ากันได้ดีและใช้เวลาที่ไม่มาก จะส่งผลดีและสามารถประหยัดในเรื่องของพลังงานที่จะนำไปทำการเลือกใช้ขนาดมอเตอร์ ตลอดจนสามารถประเมินความต้องการและวางแผนการลดค่าของการสิ้นเปลืองพลังงานได้ การจำลองผลเชิงตัวเลขด้วยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยนี้เป็นเพียงตัวอย่างหนึ่งที่ใช้แสดงรูปแบบแนวคิดด้านการออกแบบใหม่ ๆ ที่นำรูปทรงแอร์ฟอยล์ที่ใช้กับเครื่องจักรทางอากาศยานมาประยุกต์ใช้กับงานด้านการกวนผสมของเหลว เพื่อสร้างแนวทางการใช้งานแบบใหม่และเพิ่มมิติในการออกแบบให้เกิดประโยชน์กับกลุ่มอุตสาหกรรมชุมชนขนาดเล็ก SME เพิ่มมากขึ้นได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่สนับสนุนทุนวิจัยและอุปกรณ์ในด้านต่าง ๆ งานวิจัยนี้แล้วเสร็จตามกำหนด

เอกสารอ้างอิง

- Bakker, A., Myers, J., Ward, R.W. and Lee, C.K. 1996. The laminar and turbulent flow pattern of a pitched blade turbine. **Chemical Engineering Research and Design** 74: 485-491.
- Cabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P. 1993. **Unit operations of chemical engineering**. McGraw-Hill, New York.
- Choi, B.S., Wan, B., Philyaw, S., Dhanasekharan, K. and Ring, T.A. 2004. Residence time distributions in a stirred tank: comparison of CFD predictions with experiment. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 43(20): 6548-6556.
- Dadone, L.U. 1978. **Design and Analytical Study of a Rotor Airfoil**. NASA., Washington DC.
- John, D.A. 2001. Incompressible Flows Over, pp. 277-349. In Michael, L. ed. **Airfoils Fundamentals of Aerodynamics**. McGraw-Hill Companies Inc, New York.
- Kevin, J.M., Mark, F.R. and Julian, B.F. 2019. **Optimize Mixing by Using the Proper Baffles**. STUDYLIB. Available Source: <https://studylib.net/doc/8866622/optimize-mixing-by-using-the-proper-baffles>, February 25, 2021.
- Koji, T., Yoshiharu, S., Yasuyuki, T., Hitoshi, S. and Masayuki, N. 2012. Laminar Mixing in Stirred Tank Agitated by an Impeller Inclined.

- International Journal of Chemical Engineering** 2015(5): 1-10.
- Lahamornchaiyakul, W. 2011. Mechanical Design System of Vertical Axis Micro Water Turbine Generator using Computational Fluid Dynamics (CFD), pp. 85-91. *In The 25th Conference Mechanical of Engineering Networks*. Department of Engineering Kasetsart University, Thailand. (in Thai)
- Lahamornchaiyakul, W. 2020. Design and CFD Simulation of Agitating Blade in Tank for Mixing Fluids. **Ladkrabang Engineering Journal** 37(1): 13-20. (in Thai)
- Lahamornchaiyakul, W. 2021. Designing and Flow Field Analysis of Agitation Turbine using Numerical Simulation. **UBU Engineering Journal** 14(1): 105-114. (in Thai)
- Lahamornchaiyakul, W. 2022. CFD Simulation of Airfoil Shape Blade for Mixing in Tank for Mixing Fluid. **Journal of Engineering, RMUTT** 20(1): 1-12. (in Thai)
- Lahamornchaiyakul, W., Booniam, P. and Kaemthapim, N. 2018. Simulation of Fluid Mixing in Food Industry using Computational Fluid Dynamics, pp. 10-15. *In The 4th National Food Engineering Conference*. Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT). (in Thai)
- Piya, I. and Puzu, N.O. 2019. Numerical CFD Simulation Flow of Radial Impellers in Reactor Tanks for Durian Peel Synthesis. **Princess of Naradhiwas University Journal** 11(3): 128-139. (in Thai)
- Rahimi, M. and Parvareh, A. 2007. CFD study on mixing by coupled jet-impeller mixers in a large crude oil storage tank. **Computers and Chemical Engineering** 31: 737-744.
- Shengchao, Q., Rijie, W., Xiaoxia, Y. and Yuefei, Y. 2015. CFD Prediction of Mean Flow Field and Impeller Capacity for Pitched Blade Turbine. **Transactions of Tianjin University** 21(3): 250-258.
- Skadsem, H.J. and Saasen, A. 2019. Concentric cylinder viscometer flows of Herschel-Bulkley fluids. **Applied Rheology** 29(1): 173-181.
- SolidWorks. 2020. **SolidWorks Flow Simulation Online Tutorials**. Available Source: https://www.academia.edu/41718721/Solid_works_flow_simulation_2020_tutorial, May 22, 2020.
- Um, B.H. and Thomas, R.H. 2008. A CFD model for predicting the flow patterns of viscous fluids in a bioreactor under various operating conditions. **Korean Journal of Chemical Engineering** 25(5): 1094-1102.

การศึกษาเชิงทดสอบลักษณะของฝาควบแน่นถังกลั่นเอทานอลพลังงานรังสี แสงอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอนที่มีต่อสมรรถนะการกลั่น

An Experimental Study on Characteristics of Condensation Lid for Thermosyphon-type Solar Energy Ethanol Distillation Tank on Distillation Performance

หฤษฎ์ คล่องดี^{1*} และ จารุวัฒน์ เจริญจิต²

Harid Klongdee^{1*} and Jaruwat Jareanjit²

Received: 22 February 2021, Revised: 26 August 2022, Accepted: 25 October 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเชิงทดสอบลักษณะของฝาควบแน่นต่อสมรรถนะการกลั่นเอทานอลโดยใช้พลังงานรังสีอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อนและมีตู้อบแห้งแบบเรือนกระจกทำงานแบบ Passive ที่ปิดคลุมด้วยแผ่นกระจกเอียงทำมุม 17 องศา ขนาด $1.25 \times 1.8 \times 1 \text{ m}^3$ ร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ ขนาด $0.75 \times 1.35 \text{ m}^3$ เป็นแหล่งรับความร้อนเพื่อต้มสารละลายเอทานอลความเข้มข้นต่ำระเหยไปเป็นไอผ่านไปควบแน่นเพื่อให้ความเข้มข้นสูงขึ้นใช้สารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้นตั้งต้น 10 %v/v ปริมาตร 10 ลิตร การทดลองมีทั้งหมด 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 ถังกลั่นแบบฝากรวยคว่ำโดยให้สารละลายเอทานอลผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยตรงและควบแน่นผ่านท่อทองแดงนอกตู้อบ กรณีที่ 2 ถังกลั่นมีฝาแบบกรวยหงายและมีน้ำควบแน่นหมุนวนบนฝาดังตลอดเวลา กรณีที่ 3 ถังกลั่นแบบฝาดังกลั่นกรวยหงายมีน้ำควบแน่นหมุนวนบนฝาดังตามช่วงเวลา 30 นาที/ครั้ง ดำเนินการทดลองในวันที่ทำการทดลอง 18.30 เมกะจูล/ตารางเมตร/วัน ผลการทดลอง พบว่า กรณีที่ 1 สมรรถนะการกลั่นสามารถผลิตเอทานอลได้ 1.51 ลิตร/วัน ความเข้มข้น 30 %v/v กรณีที่ 2 สมรรถนะการกลั่นสามารถผลิตเอทานอลได้ 3.02 ลิตรต่อวัน ความเข้มข้น 39 %v/v และกรณีที่ 3 สมรรถนะการกลั่นสามารถผลิตเอทานอลได้ 3.37 ลิตรต่อวัน ความเข้มข้น 41 %v/v จากการทดสอบพบว่า การทดลองกรณีที่ 3 ถังกลั่นแบบฝาดังกลั่นกรวยหงายมีน้ำควบแน่นหมุนวนบนฝาดังตามช่วงเวลา 30 นาทีต่อครั้ง ส่งผลให้น้ำควบแน่นไม่มีการหมุนวนแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารละลายเอทานอลในถังกลั่นตลอดช่วงเวลา การทดลองทำให้อุณหภูมิควบแน่นมีอุณหภูมิค่าสมรรถนะการควบแน่นมีอัตราสูงสุด รองลงมาคือกรณีที่ 2 และ 1 ตามลำดับ

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน วิทยาลัยราชพฤกษ์ มหาวิทยาลัยนครพนม อำเภอธาตุพนม จังหวัดนครพนม 48110

¹ Department of Energy Engineering, Faculty of That Phanom College, Nakhonphanom University, Thatphanom, Nakhonphanom 48110, Thailand.

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Mueang, Songkhla 90000, Thailand.

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

คำสำคัญ: ฝาควบแน่น, ตู้กลั่นเอทานอล, ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

ABSTRACT

This research study examined the condensation cap characteristics of the ethanol distillation performance using solar radiation as a heat source and a passive greenhouse drying cabinet enclosed by a 17-degree tilting glass sheet. Size $1.25 \times 1.8 \times 1 \text{ m}^3$ joined with a flat plate solar collector size $0.75 \times 1.35 \text{ m}^3$ as a heat source to boil the volatile low-concentration ethanol solution through condensation to get a higher concentration. Ethanol solution at the initial concentration of 10% v/v and a volume of 10 liters was used. There were 3 cases in all experiments: Case 1, an inverted funnel cap distillation tank, where the ethanol solution was directly passed through a flat plate solar collector and condensed through a copper pipe outside the incubator. Case 2, a distillation tank with a conical lid facing up and condensed water is constantly circulating on the lid of the tank. Case 3, a distillation tank with a conical lid of a conical distillation tank has condensed water circulating on the lid of the tank at intervals. At 30 minutes/time, the average solar radiation on the day of the experiment was $18.30 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$. The results showed that in Case 1, the distillation capacity could produce 1.51 liters of ethanol/day at a concentration of 30% v/v. For Case 2, the distillation capacity can produce 3.02 liters of ethanol/day at a concentration of 39% v/v and in Case 3, distillation capacity can produce ethanol 3.37 liters/day at a concentration of 41% v/v from the test found. From the experiment in Case 3, it was found that the lid of the conical distillation tank had condensed water swirling on the lid of the tank at intervals of 30 min/time, resulting in the condensed water having no rotation to exchange heat with the ethanol solution in the distillation tank all the time. The experiments were conducted to achieve the highest water density at low temperatures with the highest sedimentation efficiency. The order of performance, from highest to lowest, is as follows: Case 3, followed by Case 2, and then Case 1.

Key words: condensation, lid flat plate solar collector, ethanol distillation chamber

บทนำ

ปัจจุบันมีการนำเอทานอลมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านเชื้อเพลิงสะอาด (Rabelo *et al.*, 2011; Sarkar *et al.*, 2012) ในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยกระบวนการทั่วไปในการผลิตเอทานอลเริ่มจากการหมักผลผลิตทางการเกษตร โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้น 8-10%v/v Vorayos *et al.* (2003) และนำเข้าสู่กระบวนการกลั่นลำดับส่วน เพื่อเพิ่มความเข้มข้น อย่างไรก็ตาม

เอทานอลที่สามารถนำมาผสมกับน้ำมันชนิดอื่น เพื่อผลิตแก๊สโซฮอล์ได้ จะต้องมีความเข้มข้นไม่ต่ำกว่า 99.5%v/v ซึ่งกระบวนการกลั่นลำดับส่วนจะกลั่นได้ ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 95%v/v การผลิตเอทานอลจากชีวมวลเป็นเทคโนโลยีหนึ่งซึ่งมีผู้ศึกษาวิเคราะห์และทดลองกันมาก ได้มีการทดลองนำแอลกอฮอล์ที่ได้จากผลิตทางการเกษตรหรือเอทานอลมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเนื่องจากเมื่อนำมาผสมกับน้ำมันเบนซินในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้ว สามารถใช้เป็น

เชื้อเพลิงในการขับเคลื่อนเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ เช่นเดียวกับการใช้น้ำมันเบนซินล้วน โดยทั่วไปเอทานอลที่ได้จากการหมักวัตถุดิบทางการเกษตร จะมีเปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นอยู่ประมาณ 7 - 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต่ำเกินไปไม่เหมาะกับการนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งถ้าจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเอทานอลที่ใช้ต้องมีความเข้มข้นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร ดังนั้นจึงต้องผ่านกรรมวิธีที่จะทำให้เอทานอลที่ได้บริสุทธิ์ขึ้น กรรมวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ การกลั่น โดยที่การกลั่นเป็นกรรมวิธีการแยกสารละลายโดยอาศัยความแตกต่างของจุดเดือด เมื่อสารละลายได้รับความร้อน สารที่มีจุดเดือดต่ำจะระเหยออกมาในปริมาณที่มากกว่าสารที่มีจุดเดือดสูงมีผลทำให้ความเข้มข้นของสารที่มีจุดเดือดต่ำมีค่าสูงขึ้นเพื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นให้มากขึ้น พบว่าการผลิตเอทานอลร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ต่ำมาก โดยทั่วไปการกลั่นสามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะการเติมสารละลายตั้งต้นเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือการกลั่นแบบเติมสารครั้งเดียว (Batch Distillation) และการกลั่นแบบเติมสารอย่างต่อเนื่อง (Continuous Distillation) ไม่ว่ากระบวนการกลั่นในกรณีใดจะต้องอาศัยแหล่งพลังงานที่จะให้ความร้อนแก่สารละลายเพื่อให้เกิดการระเหย ซึ่งในกรณีของการกลั่นโดย

ทั่ว ๆ ไป แหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่สารละลายเป็นความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงก็จะเป็นการสูญเสียเชื้อเพลิงในการผลิตเชื้อเพลิงไม่ก่อให้เกิดความคุ้มค่าของการลงทุน (Jorapur and Rajvanshi, 1991; Therdyothin *et al.*, 2006) การใช้พลังงานในกระบวนการผลิต ตลอดจนเงินลงทุนในการผลิต ดังแสดงผลในตารางที่ 1 พบว่าการผลิตเอทานอลร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ต่ำมาก กล่าวคือพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตส่วนใหญ่ใช้ไปในระบบการกลั่นเอทานอลเพื่อให้ได้เอทานอลความเข้มข้นสูงขึ้นจากประมาณร้อยละ 10 - 99.5 โดยปริมาตร จะอยู่ระหว่าง 7,630-10,210 กิโลจูลต่อเอทานอล 1 ลิตร (Jareanjit *et al.*, 2004) ในขณะที่พลังงานที่ใช้ในการกลั่นเอทานอลจากร้อยละ 10-95 โดยปริมาตร จะอยู่ระหว่าง 5,021-9,460 กิโลจูล/ลิตร เอทานอล โดยพบว่าการกลั่นเอทานอลจากร้อยละ 10 เป็น 95 โดยปริมาตร จะใช้พลังงานในการให้ความร้อนระบบกลั่นร้อยละ 70-80 ของกระบวนการทั้งหมด (Jareanjit *et al.*, 2008; Jareanjit *et al.*, 2014; Siangsukone *et al.*, 2008; Jorapur and Rajvanshi, 1991; Hong *et al.*, 1982; Robertson *et al.*, 1983; Toe and Ruthven, 1986)

ตารางที่ 1 ปริมาณการใช้พลังงานในระบบกลั่น และระบบผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ (Sarkar *et al.*, 2012)

กระบวนการ	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ	
	เอทานอล (%w/w)	พลังงาน (kJ/liter)
การกลั่น	10 - 99.5	7630.82
การกลั่น	10 - 95	5021.15
การกลั่นอะซิโโทรป	95 - 99.5	2609.67
การกลั่น	6.4 - 80	4591.71
การแยกโดยใช้แผ่นเยื่อ (PV)	80 - 99.5	1123.15

โดยกระบวนการกลั่นเอทานอลในภาคอุตสาหกรรมใช้กระบวนการกลั่นลำดับส่วนร่วมกับเทคโนโลยีเมมเบรนเพอแวกพอร์ชันและโมเลกุลาร์ซีฟซึ่งมีต้นทุนสูง Minmin *et al.* (2022) ได้มีการศึกษาวิจัยมากมายที่พยายามพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ เพื่อนำมาทดแทนหรือใช้ร่วมกับเทคโนโลยีเหล่านี้ ซึ่งโดยทั่วไปการกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์แบบไม่ต่อเนื่องในการกลั่นขั้นตอนที่ 1 จากความเข้มข้น 10%v/v ผลผลิตที่กลั่นได้จะมีความเข้มข้นไม่เกิน 53%v/v จาก vapour-liquid equilibrium diagram (Perry and Grenn, 1984) โดยพลังงานที่ใช้ในกระบวนการกลั่นมากที่สุด คือ พลังงานความร้อนและกระบวนการที่สำคัญอีกกระบวนการหนึ่งคือการควบแน่นโดยมีการใช้น้ำในกระบวนการควบแน่นจำนวนมากและมีการใช้พลังงานมากตามไปด้วย งานวิจัยทางทางการกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์มีการศึกษาจำนวนมากแต่ยังให้ความสำคัญในเรื่องฝ้าควบแน่นน้อยจึงไม่ปรากฏมีงานวิจัยทางด้านนี้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาการกลั่นเอทานอลด้วยวิธีต่าง ๆ คือ Meukam *et al.* (2004) ทำการกลั่นแอลกอฮอล์จากความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 10 ด้วยตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบขนาดพื้นที่รับรังสี 1.44 ตารางเมตร พบว่า อัตราการกลั่นที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.5 ลิตรต่อตารางเมตร ที่ความเข้มข้นร้อยละ 48 Tiwari *et al.* (2003) ได้ศึกษาการกลั่นเอทานอลด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบขนาด 1.4 ตารางเมตร ด้วยวิธีการกลั่นแบบเบี่ยงภายใต้ความดันต่ำและพบว่า ปริมาณการกลั่นที่ได้จากระบบนี้มีค่าเท่ากับ 2.1 ลิตรต่อวันที่ความเข้มข้นร้อยละ 56 จากความเข้มข้นเริ่มต้นร้อยละ 10 จะเห็นได้ว่า งานวิจัยดังกล่าวทำการศึกษาเพื่อหาปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่กลั่นได้เท่านั้น โดยมิได้กล่าวถึงสมรรถนะการกลั่นระยะยาวและต้นทุนในการกลั่น

ดังนั้น จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้จะลดการใช้พลังงานและน้ำในกระบวนการควบแน่นเพื่อเป็นการลดต้นทุนการใช้น้ำโดยการออกแบบและสร้างฝ้าควบแน่นถึงกลั่นเอทานอล 3 รูปแบบและทำการทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะการกลั่นเอทานอลจากฝ้าควบแน่นถึงกลั่นเอทานอลทั้ง 3 รูปแบบ โดยมีแหล่งความร้อนที่ให้แก่สารละลายเอทานอล-น้ำ 10%v/v จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบร่วมกับตู้อบแห้งรังสีอาทิตย์แบบ Passive ทำงานในระบบปิด โดยอาศัยหลักการของแรงลอยตัวโดยอิสระหรือเทอร์โมไซฟอนของอากาศสำหรับหมุนเวียนของอากาศร้อนภายในระบบ ในระบบกลั่นนี้จะใช้พลังงานรังสีอาทิตย์เป็นพลังงานหลัก ทั้งนี้ ถึงดื่มกลั่นจะมีลักษณะเช่นเดียวกับเตาต้มกลั่นสุราพื้นบ้าน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ชุดทดลอง

1.1 หลักการทำงานของระบบกลั่นเอทานอลพลังงานรังสีอาทิตย์

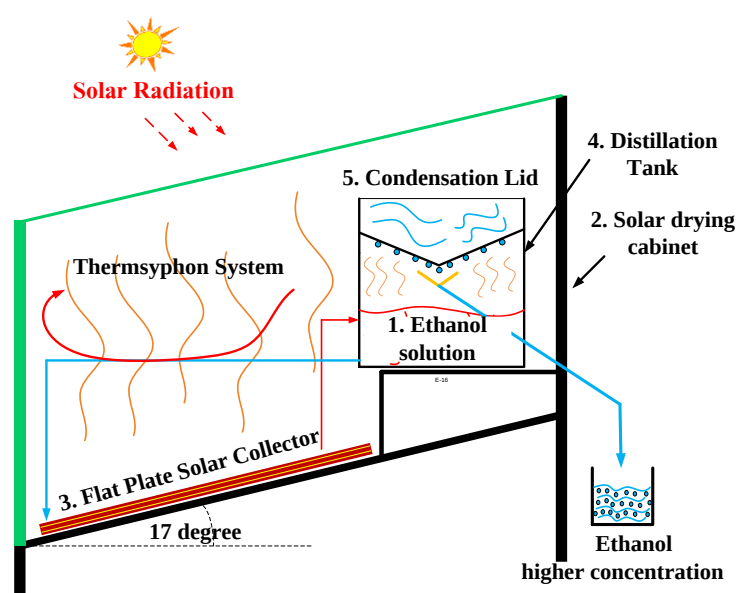
การทดสอบลักษณะของฝ้าควบแน่นถึงกลั่นเอทานอลพลังงานรังสีแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอนโดยมีวัสดุอุปกรณ์ในระบบ ดังต่อไปนี้

- 1) สารละลายที่ใช้ คือ สารละลายเอทานอลความเข้มข้น 10 %v/v
- 2) ตู้อบพลังงานรังสีอาทิตย์รูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน เอียงทำมุม 17° มีขนาด 2.25 m³ (1.25 m×1.8 m×1 m) และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ขนาด 1 m² จำนวน 1 แผง เอียงทำมุม 17°
- 3) ถึงกลั่นเอทานอล มีขนาดความจุ 50 ลิตร
- 4) ฝ้าถึงกลั่นขนาดความจุ 20 ลิตร

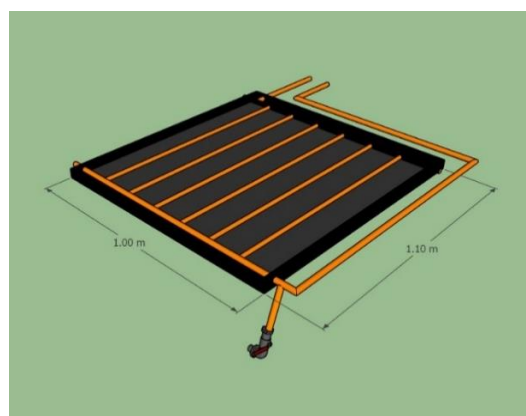
หลักการทำงานของมีระบบกลั่นเอทานอลพลังงานรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน จะเป็นการกลั่นแบบเดิมสาร ครั้งเดียว (Batch Distillation)

ที่ทำงานภายใต้ความดันบรรยากาศ โดยอาศัยแสงรับแสงอาทิตย์ชนิดแผ่ราบ มาเป็นตัวดูดซับความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์ แล้วส่งผ่านความร้อนจากแผงรับรังสีอาทิตย์ไปยังสารทำงานในรูปของการนำ และการพาความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิของสารทำงานสูงขึ้น โดยใช้สารละลายเอทานอลความเข้มข้น 10 %v/v เป็นสารทำงานและเป็นตัวรับความร้อนโดยตรงจากแผงรับรังสีอาทิตย์ (Flat Plate Solar Collector) และไหลเวียนแบบเทอร์โมไซฟอน

ในส่วนของเอทานอลที่รับความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่ราบ จะระเหยกลายเป็นไอและควบแน่นที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งระบายความร้อนด้วยน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 1 และรูปร่างส่วนประกอบตู้อบพลังงานรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอนและตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่ราบ ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 ระบบกลั่นเอทานอลพลังงานรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน



ภาพที่ 2 ตู้อบพลังงานรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอนและตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่ราบ

1.2 อุปกรณ์ควบคุมแน่นในการกระบวนการกลั่นเอทานอล

ระบบกลั่นเอทานอลพลังงานรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมโซลาร์มีฝาควบคุมแน่นที่ออกแบบมาจากระบบกลั่นสุราพื้นบ้านที่มีฝาควบคุมแน่นซึ่งมีลักษณะเหมือนกระทะและจะมีน้ำหล่อเย็นด้านบนฝาควบคุมแน่น แต่มีข้อเสีย คือ ด้านล่างจะเป็นลักษณะ

ครึ่งวงกลมจุดควบคุมแน่นจึงมีกระจายไม่ตกลงในที่รองรับทั้งหมด และอุณหภูมิน้ำควบคุมแน่นสูงทำให้สมรรถนะการควบคุมแน่นแอลกอฮอล์จึงมีปริมาณต่ำ ดังนั้น คณะวิจัยจึงออกแบบฝาควบคุมแน่นให้ด้านล่างมีลักษณะมุมแหลมเอียง 30° ซึ่งเป็นมุมที่ของเหลวมีการไหลเทได้เร็วที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ฝาควบคุมแน่นถังกลั่นเอทานอลพลังงานรังสีแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมโซลาร์

2. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ

กรณีระบบอยู่ในสถานะคงตัว อัตราความร้อนที่ได้ จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยประยุกต์ใช้

สมการของ Hottel-Willier - Bliss (ASHRAE, Standard 93-2003, 2003; Duffie and Beckman, 1991)

$$\eta_{th} = \frac{q_c}{I_T A_c}$$

$$q_c = A_c F_R [I_T (\tau\alpha)_e U_L(T_{fi}-T_a)] \quad (1)$$

โดยที่ A_c คือ พื้นที่ของตัวเก็บรังสี (m^2)

F_R คือ แฟกเตอร์การนำความร้อนมาใช้ของตัวเก็บรังสี

I_T คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2)

q_c คือ อัตราความร้อนจากตัวเก็บรังสี (W)

T_a คือ อุณหภูมิอากาศรอบ ๆ ($^\circ C$)

T_{fi} คือ อุณหภูมิของสารละลายไหลเข้า ($^\circ C$)

U_L คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

$(\tau\alpha)_e$ คือ ผลคูณประสิทธิภาพของค่าส่งผ่านและค่าดูดกลืนรังสี

กรณีที่สารทำงานไม่มีการเปลี่ยนสถานะ อัตราความร้อนสามารถคำนวณ ได้ดังนี้

$$q_c = mC_{pw}(T_{fo}-T_{fi}) \quad (2)$$

โดยที่ C_{pw} คือ ความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน (kJ/kg °C)

m คือ อัตราการไหลเชิงมวลของทำงานในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (kg/s)

T_{fo} คือ อุณหภูมิของสารละลายไหลออก (°C)

3. คำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องกลั่น

การคำนวณหาประสิทธิภาพเครื่องกลั่น

$$\frac{\text{ปริมาณเอทานอลที่กลั่นได้ (ลิตร)}}{\text{ปริมาณสารละลายเอทานอลเริ่มต้น (ลิตร)}} \times 100 \quad (3)$$

4. วิธีการทดลอง

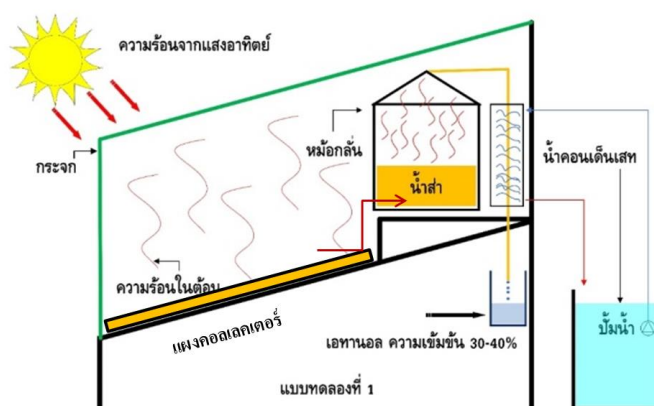
งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองเป็น 3 กรณี เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของฝาครอบแน่นต่อสมรรถนะการกลั่นเอทานอลพลังงานรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอนช่วงเวลา (9.00-16.00 น.) โดยมีเงื่อนไขการทดสอบ ดังนี้

กรณีที่ 1 แบบถังกลั่นมีฝาครอบแน่นแบบกรวยคว่ำใช้ความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์และตู้อบ ดังแสดงในภาพที่ 4

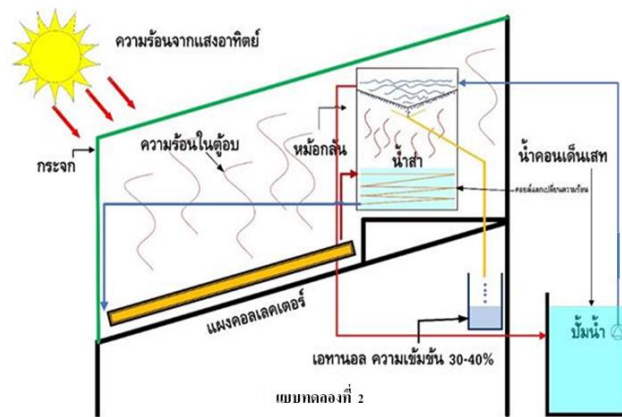
กรณีที่ 2 แบบกรวยหงายมีน้ำเย็นควบแน่น

ไหลผ่านบนฝาใช้ความร้อนจากตู้อบและคอยล์ร้อนตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ดังแสดงในภาพที่ 5

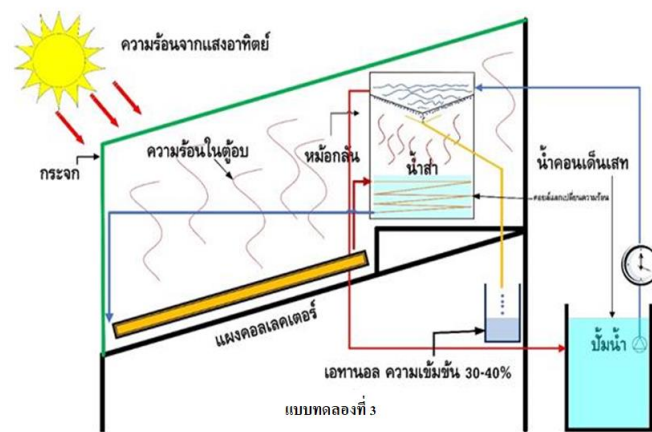
กรณีที่ 3 แบบถังกลั่นเอทานอลแบบใช้ความร้อนจากตู้อบและให้สารละลายเอทานอลผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยตรง และตั้งเวลาน้ำเข้าสู่ฝาครอบแน่น 30 นาที/ครั้ง โดยการสังเกตจากอุณหภูมิในควบแน่นที่เริ่มมีอุณหภูมิสูงกว่า 35 องศาเซลเซียสซึ่งเวลาประมาณ 30 นาที ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 4 แสดงรายละเอียดลักษณะระบบกลั่นเอทานอล กรณีที่ 1



ภาพที่ 5 แสดงรายละเอียดลักษณะระบบกลั่นเอทานอล กรณีที่ 2



ภาพที่ 6 แสดงรายละเอียดลักษณะระบบกลั่นเอทานอล กรณีที่ 3

ดำเนินการทดสอบในช่วงระหว่างเวลา (9.00-16.00 น.) เป็นเวลา 7 ชั่วโมงต่อวัน มีวิธีการทดลอง ดังนี้

1. ติดตั้งระบบกลั่นเอทานอลพลังงานรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน หันไปทางทิศใต้ ทำการวัดค่ารังสีอาทิตย์

2. ทำการผสมสารละลายเอทานอลตั้งต้น 95 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรกับน้ำบริสุทธิ์เพื่อให้ได้ความเข้มข้นตั้งต้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามต้องการ โดยทำการทดลองที่ 5 ลิตรต่อครั้งการทดลอง และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งต่อระบบที่ออกแบบการทดลอง

3. เปิดเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิอุณหภูมิแวดล้อม (T_a) อุณหภูมิน้ำระบายความร้อน (T_{con}) อุณหภูมิสารละลาย (T_{lank}) และอุณหภูมิในตู้อบ (T_{cham})

4. บันทึกข้อมูลค่ารังสีและอุณหภูมิการทดลอง ทุก ๆ 1 นาที และวัดปริมาณการกลั่นเอทานอลและค่าความเข้มข้นทุก ๆ 1 ชั่วโมง เพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบสมรรถนะการกลั่นของแต่ละกรณี

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องบันทึกข้อมูลทางอุณหภูมิ (Data Logger) รุ่น TM 1947SD การบันทึกข้อมูลทางอุณหภูมิจากการทดลองจะใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิชนิด 4 จุด ความถูกต้อง ± 0.01 องศาเซลเซียส ใช้ใน

การวัดและบันทึกอุณหภูมิตำแหน่งต่าง ๆ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K เป็นตัวส่งสัญญาณ

2. การสอบเทียบสายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สายเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้วัดอุณหภูมิต่างเป็นชนิด K สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0 - 1250 องศาเซลเซียส ค่าความคลาดเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลช่วงอุณหภูมิที่ใช้สอบเทียบตั้งแต่ 25 - 100 องศาเซลเซียส

3. เครื่องวัดค่ารังสีอาทิตย์ใช้วัดปริมาณความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนตัวเก็บรังสีเครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Solar Power Meter รุ่น SPM-1116SD ความละเอียด 8.79×10^{-6} V/Wm⁻²

4. เครื่องวัดแอลกอฮอล์ แอลกอฮอล์มิเตอร์ (Alcohol Meter) ใช้วัดค่าแอลกอฮอล์ 0-100% โดยจะแสดงรูปภาพตุ๊กต่านเอทานอลพลังงานรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน ดังภาพที่ 7



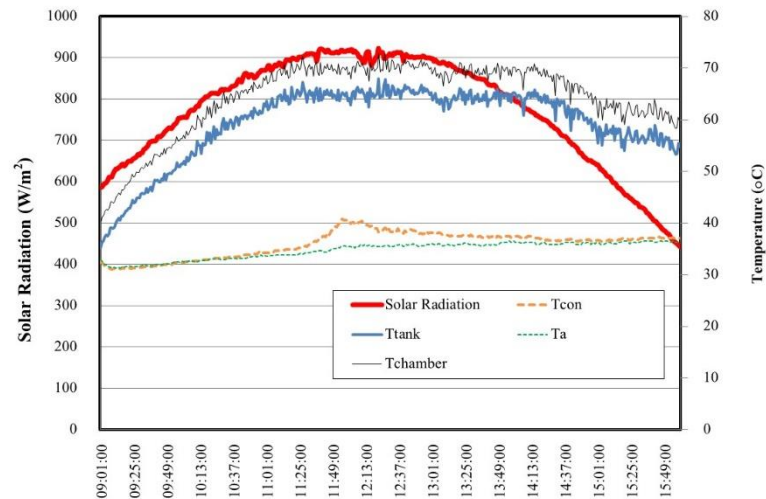
ภาพที่ 7 ตุ๊กต่านเอทานอลพลังงานรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

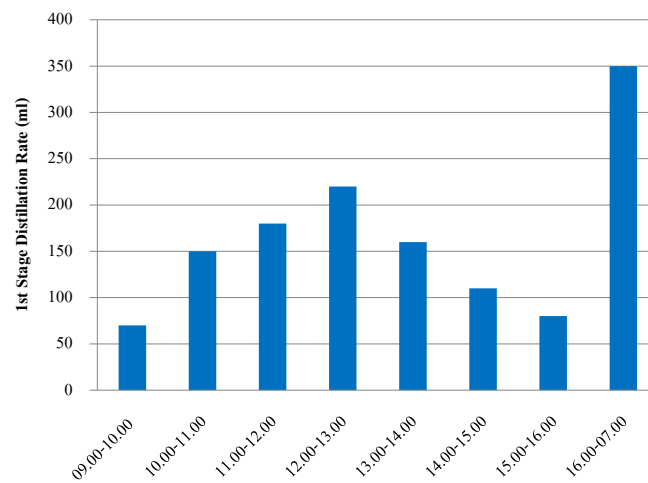
1. ผลการกลั่นเอทานอลแบบถังกลั่นมีฝาครอบแน่นแบบกรวยคว่ำมีน้ำเย็นควบแน่นนอกตู้อบใช้ความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบและตู้อบ

การทดลองกรณีที่ 1 เป็นการทดลองกลั่นเอทานอลแบบถังกลั่นมีฝาครอบแน่นกรวยคว่ำใช้ความร้อนจากตู้อบแหล่งเดียว มีผลการทดลองดังภาพที่ 8, 9 และ 10 ที่ความเข้มข้นเอทานอลเริ่มต้น 10%v/v ปริมาณ 10 ลิตรพบว่าอุณหภูมิของสารละลายเอทานอลในถังกลั่นมีค่าสูงสุด 86 องศาเซลเซียส

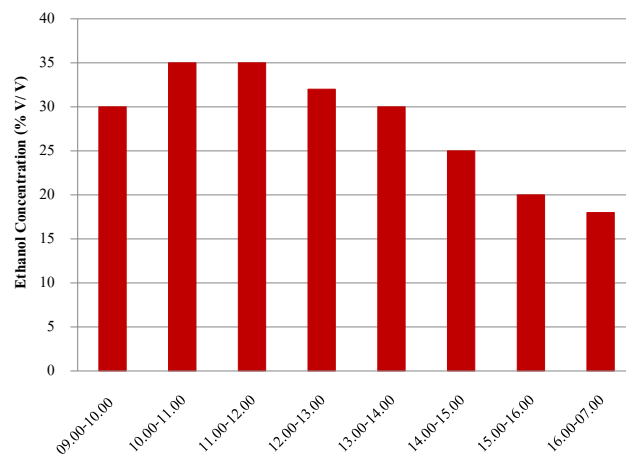
ในช่วงเวลา 12.00-13.00 น. สมรรถนะการกลั่นรวมทั้งวัน 1,320 มิลลิลิตร ที่อัตราความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 28 โดยปริมาตร คิดเป็นร้อยละ 13.2 ของปริมาณสารละลายเอทานอล-น้ำเริ่มต้น โดยรวมการกลั่นในช่วงเวลากลางวันซึ่งยังมีความร้อนสะสมในระบบ และพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์มีค่า 19.47 เมกะจูลต่อวัน และสารละลายเอทานอลเหลืออยู่ในกระบวนการกลั่น ที่เป็นสารละลายเอทานอลความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 7.5 โดยปริมาตร



ภาพที่ 8 ค่ำรังสีอาทิตย์เทียบกับค่าอุณหภูมิต่าง ๆ



ภาพที่ 9 ปริมาณเอทานอลที่กลั่นแต่ละช่วงเวลา

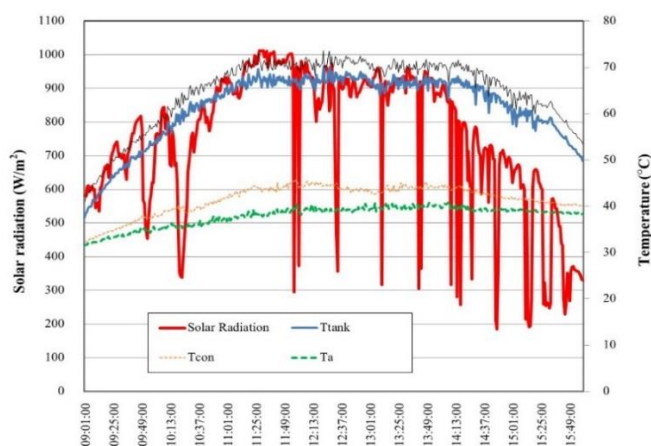


ภาพที่ 10 ปริมาณความเข้มข้นเอทานอลแต่ละช่วงเวลา

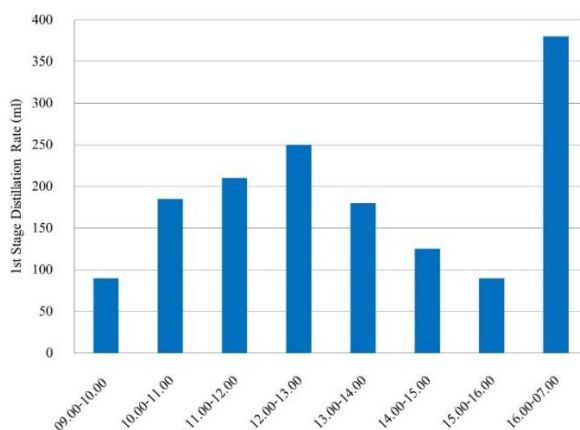
2. ผลการกลั่นเอทานอลแบบถังกลั่นมีฝาควบแน่นแบบกรวยหงายมีน้ำเย็นควบแน่นไหลผ่านบนฝาใช้ความร้อนจากตู้อบร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ

การทดลองกรณี ที่ 2 เป็นการทดลองกลั่นเอทานอลแบบถังกลั่นมีฝาควบแน่นแบบกรวยหงายมีน้ำเย็นควบแน่นไหลผ่านบนฝาดังกลั่นตลอดช่วงเวลาการทดลอง ผลการทดลองดังภาพที่ 11, 12 และ 13 พบว่าอุณหภูมิของสารละลายเอทานอลในถังกลั่นมีค่าสูงสุด 82 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 12.00-13.00 น. สมรรถนะกลั่นรวมตลอดช่วงการทดลอง 3,020 มิลลิลิตร ที่อัตราความเข้มข้นร้อยละ 37 โดยปริมาตร คิดเป็นร้อยละ 30.2 ของปริมาณสารละลายเอทานอล-น้ำเริ่มต้น สมรรถนะการกลั่น

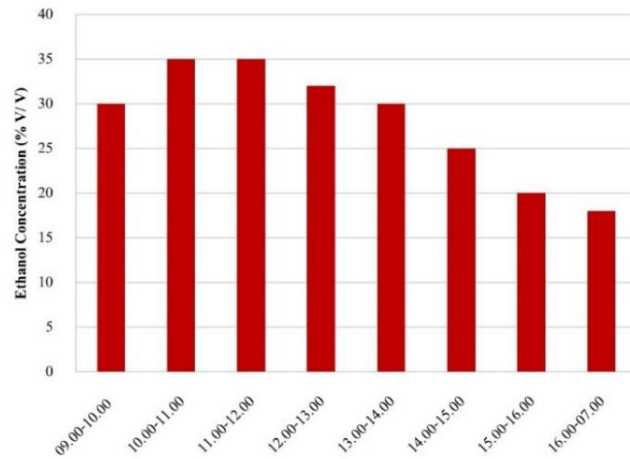
เพิ่มขึ้นจากกรณี ที่ 1 ร้อยละ 56.30 พลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์มีค่า 18.30 เมกะจูลต่อวัน เปรียบเทียบการทดลองกรณี ที่ 1 พบว่าการทดลองกรณี ที่ 2 สามารถกลั่นเอทานอลได้ปริมาณสูงกว่า เนื่องจากในกรณี ที่ 1 การที่จะพาเอทานอลออกมาควบแน่นข้างนอกตู้จะต้องมีอุณหภูมิและแรงดันสูงในถังกลั่น โดยที่ในกรณี ที่ 2 ฝาควบแน่นถังกลั่นเอทานอลจะออกแบบมาเป็นแบบกรวยหงายและด้านบนฝามีน้ำหล่อเย็นหมุนเวียนตลอดเวลาทำให้ไอร้อนของเอทานอลไปสัมผัสกับฝาดังกลั่นจะเกิดการควบแน่นทันที ดังนั้นปริมาณเอทานอลที่กลั่นได้จึงสูงกว่ากรณี ที่ 1 และมีสารละลายเอทานอลเหลืออยู่ในกระบวนการกลั่นที่เป็นสารละลายเอทานอลความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 6.5 โดยปริมาตร



ภาพที่ 11 ค่ารังสีอาทิตย์เทียบกับค่าอุณหภูมิต่าง ๆ



ภาพที่ 12 ปริมาณเอทานอลที่กลั่นแต่ละช่วงเวลา

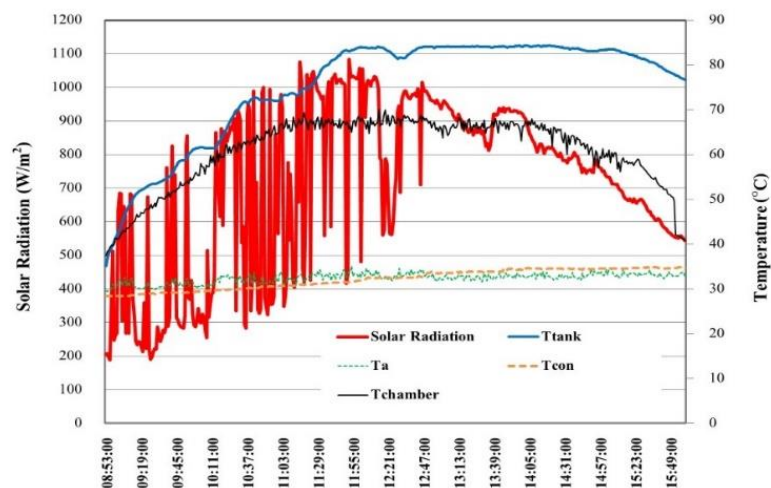


ภาพที่ 13 ปริมาณความเข้มข้นเอทานอลแต่ละช่วงเวลา

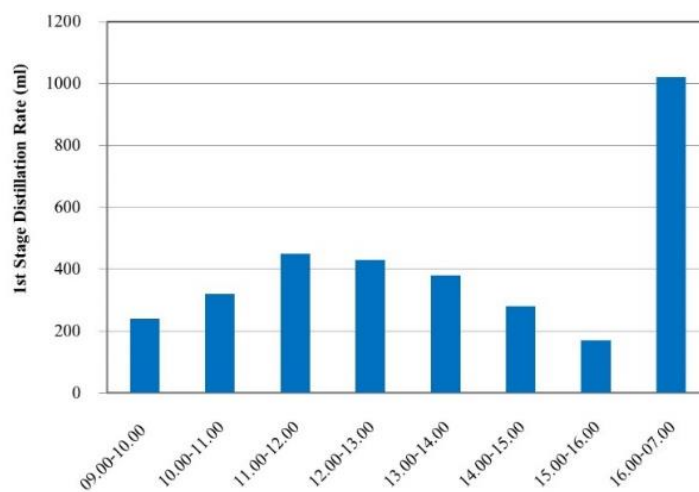
3. ผลการกลั่นเอทานอลแบบถังกลั่นมีฝาควบแน่นแบบกรวยหงายมีน้ำเย็นควบแน่นไหลผ่านบนฝาใช้ความร้อนจากตู้อบและคอยล์ร้อนตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบและตั้งเวลาน้ำเข้าสู่ฝาควบแน่น 30 นาที/ครั้ง

การทดลองกรณีที่ 3 เป็นการทดลองกลั่นเอทานอลแบบถังกลั่นมีฝาควบแน่นแบบกรวยหงายมีน้ำเย็นควบแน่นไหลผ่านด้านบนบนฝาควบแน่น และตั้งเวลาน้ำเข้าสู่ฝาควบแน่น 30 นาทีต่อครั้ง โดยเว้นระยะห่างช่วงเวลากการปล่อยน้ำเข้าด้านบนฝาควบแน่น 10 นาที พลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์มีค่า 18.35 เมกะจูลต่อวัน มีผลการทดลองดังภาพที่ 14, 15 และ 16 พบว่าอุณหภูมิของสารละลายเอทานอลในถังกลั่นมีค่าสูงสุด 84 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 12.00-13.00 น. สมรรถนะกลั่นรวมตลอดช่วงการทดลอง 3,290 มิลลิลิตร ที่อัตราความเข้มข้น

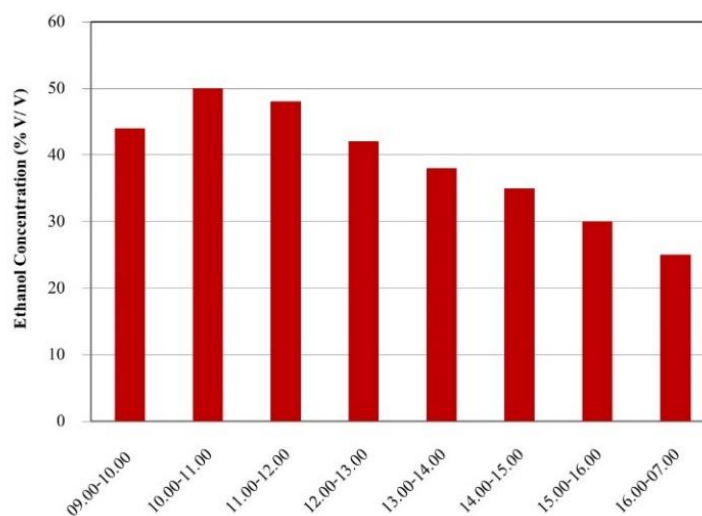
ร้อยละ 39 โดยปริมาตรคิดเป็นร้อยละ 32.9 ของปริมาณสารละลายเอทานอล-น้ำเริ่มต้น สมรรถนะการกลั่นเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ 1 ร้อยละ 59.87 และสมรรถนะการกลั่นเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ 2 ร้อยละ 8.20 เปรียบเทียบการทดลองกรณีที่ 2 พบว่าการทดลองกรณีที่ 3 สามารถกลั่นเอทานอลได้ปริมาณสูงกว่าเนื่องจากในกรณี 3 มีตั้งเวลาน้ำเข้าสู่ฝาควบแน่น 30 นาทีต่อครั้ง ทำให้น้ำอุณหภูมิในถังกลั่นร้อนเร็วกว่ากรณีที่ 2 ที่มีระบบน้ำควบแน่นคล้ายคลึงกันกับกรณีที่ 3 แต่น้ำควบแน่นจะหมุนวนแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารละลายเอทานอลในถังกลั่นตลอดช่วงเวลาการทดลองทำให้อุณหภูมิในน้ำควบแน่นมีอุณหภูมิสูงสมรรถนะการควบแน่นจึงต่ำกว่ากรณีที่ 3 และมีสารละลายเอทานอลเหลืออยู่ในกระบวนการกลั่นที่เป็นสารละลายเอทานอลความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 6 โดยปริมาตร



ภาพที่ 14 ค่ารังสีอาทิตย์เทียบกับค่าอุณหภูมิต่าง ๆ



ภาพที่ 15 ปริมาณเอทานอลที่กลั่นแต่ละช่วงเวลา



ภาพที่ 16 ปริมาณความเข้มข้นเอทานอลแต่ละช่วงเวลา

4. ผลสมรรถนะการกลั่นเอทานอล

จากตารางผลการหาประสิทธิภาพการกลั่นเอทานอลทั้ง 3 กรณี พบว่าการทดลองกรณีที่ 1 มีสมรรถนะการกลั่นต่ำกว่า กรณีที่ 2 และ 3 เนื่องจากกรณีมีการควบแน่นเอทานอลนอกถังกลั่นซึ่งอุณหภูมิสารละลายในถังกลั่นเอทานอลไม่เพียงพอที่จะทำให้ไอเอทานอลลอยออกไปควบแน่นนอกถังกลั่นได้ และในกรณีการทดลองที่ 3 มีอัตราการกลั่นและประสิทธิภาพมากกว่าทุกกรณีการทดลอง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Therdyothin *et al.* (2006) ที่ได้ทำการกลั่นเอทานอลจากโรงกลั่นเอทานอลพลังงานรังสีอาทิตย์โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบเป็นแหล่งให้ความร้อนแก่ระบบกลั่น และมีระบบควบแน่นเอทานอลโดยใช้น้ำหมุนเวียนบนฝาถังกลั่นเอทานอลตลอดการการกลั่น

เริ่มตั้งแต่ 08.00-20.00 น. พบว่าความร้อนสะสมของน้ำควบแน่นบนฝาถังกลั่นมีอุณหภูมิสูงช่วง 14.00 น. เป็นต้นไป ส่งผลต่อปริมาณการกลั่นเอทานอลที่ลดลงในช่วงเวลาดังกล่าว เนื่องจากอุณหภูมิ น้ำควบแน่นที่สูงขึ้นทำให้การควบแน่นเอทานอลมีประสิทธิภาพลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jareanjit *et al.* (2015); Siangsukone *et al.* (2008) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการกลั่นเอทานอลแบบถังกลั่นแบบมีฝาควบแน่นแบบกรวย หายมีน้ำเย็นควบแน่นไหลผ่านบนฝาใช้ความร้อนจากคู่อบและคอยล์ร้อนตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ และตั้งเวลาน้ำเข้าสู่ฝาควบแน่น 30 นาที/ครั้ง ที่มีอุณหภูมิ น้ำควบแน่นต่ำกว่าแบบหมุนเวียนบนฝาถังกลั่นตลอดเวลา และส่งผลทำให้ปริมาณเอทานอลที่กลั่นได้มีปริมาณมากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหาสมรรถนะการกลั่นเอทานอล

Case	Initial (ml)	Ethanol (ml)	Eff (%)
1	10,000	1,320	13.2
2	10,000	3,020	30.2
3	10,000	3,190	32.29

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการกลั่นเอทานอล

Case Study 1			
19.47 MJ/m ² -Batch		Initial Concentration 10%v/v Volume 10 liters	
Time Interval	Product (%v/v)	Product (cc.)	Pure Ethanol (cc.)
09.00-10.00	30	70	21
10.00-11.00	35	150	53
11.00-12.00	35	180	70
12.00-13.00	32	220	70
13.00-14.00	30	160	48
14.00-15.00	25	110	27
15.00-16.00	20	80	16
16.00-07.00	18	350	63
Total	28	1,320	370

ตารางที่ 3 (ต่อ)

Case Study 2			
18.30 MJ/m ² -Batch		Initial Concentration 10%v/v Volume 10 liters	
Time Interval	Product (%v/v)	Product (cc.)	Pure Ethanol (cc.)
09.00-10.00	38	220	84
10.00-11.00	45	290	130
11.00-12.00	42	420	176
12.00-13.00	42	430	180
13.00-14.00	38	380	144
14.00-15.00	35	260	91
15.00-16.00	30	150	45
16.00-07.00	25	870	217
Total	37	3,020	1,117

Case Study 3			
18.35 MJ/m ² -Batch		Initial Concentration 10%v/v Volume 10 liters	
Time Interval	Product (%v/v)	Product (cc.)	Pure Ethanol (cc.)
09.00-10.00	44	240	106
10.00-11.00	50	320	160
11.00-12.00	48	450	216
12.00-13.00	42	430	181
13.00-14.00	38	380	144
14.00-15.00	35	280	98
15.00-16.00	30	170	51
16.00-07.00	25	1020	255
Total	39	3,290	1,283

สรุป

จากผลการทดลองออกแบบฝาควบแน่นถึงกลั่นเอทานอลพลังงานรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอนทั้ง 3 กรณี สรุปผลได้ว่ากรณีที่ 1 ปริมาณการกลั่นเอทานอลน้อยกว่าทุกกรณี เนื่องจากมีการควบแน่นเอทานอลนอกถังกลั่นซึ่งอุณหภูมิสารละลายในถัง

กลั่นเอทานอลไม่เพียงพอที่จะทำให้ไอเอทานอลลอยออกไปควบแน่นนอกถังกลั่นได้ ส่วนในกรณีที่ 2 ทำการปรับเปลี่ยนฝาควบแน่นถึงกลั่นเอทานอลโดยให้น้ำหล่อเย็นหมุนวนอยู่บนฝาและให้เอทานอลควบแน่นในถังกลั่นโดยตรง ทำให้ได้เอทานอลที่กลั่นออกมาปริมาณสูงกว่ากรณีที่ 1 ในกรณีที่ 3 มี

การทดลองคล้ายกับกรณีที่ 2 แตกต่างกันที่การตั้งเวลาให้น้ำหล่อเย็นเข้าสู่ฝาครอบแน่นเป็นการตั้งเวลาเป็นช่วง ๆ คือ 30 นาที/ครั้ง สมรรถนะกลั่นรวมตลอดช่วงการทดลอง 3,290 มิลลิลิตร ที่อัตราความเข้มข้นร้อยละ 39 โดยปริมาตรคิดเป็นร้อยละ 32.9 ของปริมาณสารละลายเอทานอล-น้ำเริ่มต้น สมรรถนะการกลั่นเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ 1 ร้อยละ 59.87 และสมรรถนะการกลั่นเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ 2 ร้อยละ 8.20 เปรียบเทียบการทดลองกรณีที่ 2 พบว่าการทดลองกรณีที่ 3 สามารถกลั่นเอทานอลได้ปริมาณสูงกว่าเนื่องจากในกรณี 3 มีตั้งเวลาน้ำเข้าสู่ฝาครอบแน่น 30 นาที/ครั้ง ทำให้น้ำอุณหภูมิในถังกลั่นร้อนเร็วกว่ากรณีที่ 2 ที่มีระบบน้ำครอบแน่นคล้ายคลึงกันกับกรณีที่ 3 แต่น้ำครอบแน่นจะหมุนวนแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารละลายเอทานอลในถังกลั่นตลอดช่วงเวลาการทดลองทำให้อุณหภูมิในน้ำครอบแน่นมีอุณหภูมิสูงสมรรถนะการควบแน่นจึงต่ำกว่ากรณีที่ 3

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยนครพนม ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2562 สำหรับการดำเนินงานครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ สาขาวิศวกรรมพลังงานวิทยาลัยราชนครพนม มหาวิทยาลัยนครพนมที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลองจนงานสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

ASHRAE, Standard 93-2003. 2003. Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors, pp. 2-7. In **American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers**. New York.

- Duffie, J.A. and Beckman, W.A. 1991. **Solar Engineering of Thermal Processes**. John Wiley and Sons, New York.
- Hong, J., Voloch, M., Ladisch, M.R. and Tsao, G.T. 1982. Adsorption of Ethanol-Water Mixtures by Biomass Materials. **Biotechnology Bio Engineering** 24(3): 725-730.
- Jareanjit, J., Tiansuwan, J., Amornkitbamrung, M and Kiatsiriroat, T. 2004. Comparison study on ethanol distillation performance using evacuated-heat pipe and flat-plate solar collectors, pp. 5-10. In **3rd CMU Annual Conference on Heat & Mass Transfer (21-22 August 2004)**. Chiang Mai, Thailand. (in Thai)
- Jareanjit, J., Tiansuwan, J., Terdyothin, A., Tia, W., Thavarungkul, N and Siangsukone, P. 2008. Comparison Study on Ethanol Distillation Performance Using Water and Heat Transfer Oil are Working Fluids, pp. 181-185. In **7th CMU Annual Conference on Heat & Mass Transfer (13-14 March 2008)**. Chiang Mai, Thailand. (in Thai)
- Jareanjit, J., Siangsukone, P., Wongwailikit, K. and Tiansuwan, J. 2014. Development of A Mathematical Model and Simulation of MassTransfer of Solar Ethanol Distillation in Modified Brewery Tank. **Applied Thermal Engineering** 73(1): 723-731.
- Jareanjit, J., Siangsukone, P., Wongwailikit, K. and Tiansuwan, J. 2015. Management of Ethanol Waste from The Solar Distillation Process: Experimental and Theoretical Studies. **Energy Conversion and Management** 89: 330-338.

- Jorapur, R.M. and Rajvanshi, A.K. 1991. Alcohol Distillation by Solar Energy, pp. 772-777. **In Solar World Congress Proceedings.** Pergamon Press, ISES.
- Meukam, P., Njomo, D., Gbane, A. and Toure, S. 2004. Experimental Optimization of a Solar still: Application to Alcohol Distillation. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification** 43(12): 1569-1577.
- Minmin, W., Siping, D., Li, D. and Xuefen, W. 2022. PPy nanotubes-enabled in-situ heating nanofibrous composite membrane for solar-driven membrane distillation. **Separation and Purification Technology** 281: 119995.
- Perry, R.H. and Grenn, D.W. 1984. **Perry's Chemical Engineers' Handbook.** McGraw-Hill, New York.
- Rabelo, S.C., Carrere, H., Filho, R.M. and Costa, A.C. 2011. Production of bioethanol, methane and heat from sugarcane bagasse in a biorefinery concept. **Bioresource Technology** 102(17): 7887-7895.
- Robertson, G.H., Doyle, L.R. and Pavlath, A.E. 1983. Intensive Use of Biomass Feedstock in Ethanol Conversion: The Alcohol-Water, Vapor-Phase Separation. **Biotechnology and Bioengineering** 25(12): 3133-3148.
- Sarkar, N., Ghosh, S.K., Bannerjee, S. and Aikat, K. 2012. Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. **Renewable Energy** 37(1): 19-27.
- Siangsukone, P., Jareanjit, J., Therdyothin, A., Tia, W., Wongwailikit, K. and Tiansuwan, J. 2008. Development of Solar Ethanol Distillation System for Thai Local Community, pp. 1-7. **In Proceedings of The 8th ASEAN Science and Technology Week Scientific and Technical Conferences (3-4 July 2008).** Pasay City, Philippines.
- Therdyothin, A., Sriroth, K., Kiatsiriroat, T. and Tiansuwan, J. 2006. **Research Report on Pilot Project for Cost Reduction of Ethanol Production Using Solar Energy.** National Research Council of Thailand, Bangkok. (in Thai)
- Tiwari, G.N., Singh, H.N. and Tripathi, R. 2003. Present Status of Solar Distillation. **Solar Energy** 75(5): 367-373.
- Toe, W.K. and Ruthven, D.M. 1986. Adsorption of Water from Aqueous Ethanol Using 3-A Molecular Sieves. **Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development** 25(1) :17-21.
- Vorayos, N., Kiatsiriroat, T., Vorayos, N. and Kongboon, P. 2003. Mathematical and Experimental Studies of a Batch-Type Solar Ethanol Distiller, pp. 479-486. **In The Proceeding of the 2nd Regional Conference on Energy Technology towards a Clean Environment.** Phuket. (in Thai)

การออกแบบและพัฒนาเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำ สำหรับระบบจัดการฐานข้อมูลคลินิกสัตว์

Design and Development of Low-Frequency RFID Readers for Database Management System in Veterinary Clinic

คณะวิจิ เนื่องวงษา¹ ชัชชัย พุ่มพวง^{2*} ศักดิ์ชัย ก้อนเทียน² และ พิชชานันท์ วงศ์ศิริธร³

Kanawat Nuangwongsa¹, Tajchai Pumpoung^{2*}, Sakchai Konthien² and Pichanun Wongsiritorn³

Received: 27 October 2020, Revised: 15 June 2022, Accepted: 27 June 2022

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการนำสัตว์เข้ามารับการรักษาในสถานพยาบาลสัตว์เพิ่มมากขึ้นทำให้การจัดการฐานข้อมูลของสัตว์ที่เข้ามาทำการรักษาในสถานพยาบาลสัตว์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น วิธีการสำหรับเก็บข้อมูลทะเบียนประวัติของสัตว์แบบเดิม ส่วนมากเป็นการเก็บข้อมูลด้วยการจดบันทึก ร่วมกับการใช้บัตรประจำตัวสัตว์จากการเขียนด้วยมือ การเก็บข้อมูลลักษณะนี้อาจจะไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการได้ทั้งหมด และอาจก่อให้เกิดปัญหาเช่น การใช้พื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูล การเสียเวลาต่อการค้นหา และการเกิดความผิดพลาดโดยมนุษย์ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี ตามมาตรฐานย่านความถี่ต่ำ 125 kHz สำหรับระบบจัดการฐานข้อมูลคลินิกสัตว์ ซึ่งจะช่วยลดความผิดพลาดให้ระบบการจัดการข้อมูลในสถานพยาบาลสัตว์และเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการให้บริการ โดยมุ่งเน้นให้สามารถใช้งานได้กับสถานพยาบาลสัตว์ขนาดเล็ก ทดแทนการจัดการฐานข้อมูลแบบเดิมซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของงานวิจัย โดยระบบที่ได้ทำการออกแบบประกอบด้วยเครื่อง

¹ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

¹ Department of Electronics and Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus, Nai Mueang, Mueang, Khonkaen 40000, Thailand.

² สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลางนครราชสีมา ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² Department of Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima Center, Nai Mueang, Mueang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

³ สาขาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ตำบลศาลา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

³ Department of Logistics Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Salaya, Phutthamonthon, Nakhon Pathom 73170, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): tajchai.pu@rmuti.ac.th

อ่านอาร์เอฟไอดี แบบมือถือย่านความถี่ต่ำ ชิพวงรวมเบอร์ ID-2LA โปรแกรม Visual Basic สำหรับแสดงข้อมูลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ และ ฐานข้อมูลภาษา SQL จากผลการทดสอบการทำงานของเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีที่ได้ทำการออกแบบ ระยะใกล้สุดที่เครื่องอ่านยังคงอ่านแท็กได้ 100 เปอร์เซ็นต์คือ 11 เซนติเมตร โดยการนำระบบอาร์เอฟไอดีร่วมกับระบบจัดการฐานข้อมูลคลินิกสัตว์ที่นำเสนอสามารถลดความผิดพลาดจากการให้บริการร้อยละ 0.25 เหลือ ร้อยละ 0.05 และเพิ่มความพึงพอใจในการให้บริการ ของผู้ที่มาใช้บริการจากร้อยละ 3.24 เป็นร้อยละ 3.5 โปรแกรมการใช้งานที่ได้ทำการออกแบบสามารถจัดเก็บข้อมูลพื้นฐานได้ เช่น ข้อมูลของสัตว์ ข้อมูลเจ้าของสัตว์ รวมถึงประวัติการทำการทำวัคซีนพื้นฐาน และประวัติการรักษาของสัตว์ไว้ในฐานข้อมูลได้

คำสำคัญ: เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำ, แท็กอาร์เอฟไอดี, สายอากาศแบบบ่วง, โปรแกรมทำฐานข้อมูล, คลินิกรักษาสัตว์

ABSTRACT

Nowadays, there is an increasing number of animals being brought into veterinary sanatoriums, resulting in the growth of treated animal database management. For the conventional technique for collecting animal registration and history, most of the information is collected by taking notes together with the use of handwritten animal identification cards. However, this type of data collection cannot meet all of the requirement. Besides, it can cause a problem such as using space for data storage, taking the time for searching the document and an occurrence of human error. This research proposed a design and development of RFID readers according to the low-frequency band with 125 kHz for database management system in a veterinary clinic. The presented system can reduce the error of the information management system in the veterinary clinic and increase the convenience of service which is the purpose of this research. The presented management system focuses on being able to be used in a small veterinary sanatorium and replacing traditional database management. The designed system consists of handheld low-band RFID readers, IC chip of ID-2LA, Visual Basic for displaying information on the computer screen, and SQL databases. The farthest distance at which the designed RFID reader can still read tags with 100% accuracy is 11 centimeters. By combining the proposed RFID with the proposed veterinary clinic database management system, the service errors can be reduced by 0.25% to 0.05% and it can increase the service scarification from 3.24% to 3.5%. The designed applications can store basic information such as animal information and animal owner information including basic immunization history and the treatment history of the animal in the database.

Key words: low frequency RFID reader, RFID tag, loop antenna, database programming, veterinary clinic

บทนำ

ในปัจจุบันมนุษย์ให้ความสนใจต่อสัตว์มากยิ่งขึ้น (Kantha, 2017) โดยเฉพาะสัตว์เลี้ยง เช่น สุนัข และแมว (Dear friend of different species, 2020) ซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวของธุรกิจสถานพยาบาลสัตว์ (Ministry of Agriculture and Cooperatives, 2015) ที่เพิ่มมากขึ้น การขยายตัวของธุรกิจนี้อาจไม่ส่งผลต่อบริหารจัดการฐานข้อมูลของโรงพยาบาลสัตว์ เนื่องจากอาจถูกวางระบบมาไว้ตั้งแต่เริ่มแรกของการเริ่มประกอบธุรกิจแล้ว แต่อาจส่งผลกระทบต่อคลินิกรักษาสัตว์ที่จะต้องมีการปรับระบบการจัดการข้อมูลให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเพื่อรองรับกับการบริหารจัดการข้อมูลในปริมาณมาก จึงเป็นที่มาและความสำคัญของงานวิจัยนี้

โดยทั่วไปข้อมูลที่คลินิกรักษาสัตว์จะจัดเก็บนั้นจะประกอบไปด้วยข้อมูลทั่วไป เช่น ข้อมูลของเจ้าของสัตว์ ข้อมูลของสัตว์ และข้อมูลประวัติการรักษาของสัตว์ เช่น ข้อมูลการฉีดวัคซีน ข้อมูลการรักษา เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ล้วนมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์โรคของสัตว์จากประวัติการรักษาที่ผ่านมาเพื่อประกอบการรักษาปัจจุบันตามอาการโรคของสัตว์ในขณะนั้น ปัจจุบันคลินิกรักษาสัตว์หลายแห่งยังคงจัดเก็บข้อมูลด้วยการบันทึกลงในสมุดบันทึกการรักษา ซึ่งยุ่งยากต่อการจัดเก็บและสืบค้น ในขณะที่บางแห่งได้มีพัฒนานำเทคโนโลยีสารสนเทศเข้ามาใช้แล้วงานวิจัยที่เคยมีมาก่อนหน้าแต่ก็ยังมีความจำกัดในเรื่องความคล่องตัวในการทำงานอยู่ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาระบบ (โปรแกรมคอมพิวเตอร์) ในการจัดการคลินิกโรงพยาบาลสัตว์ขนาดเล็ก เพื่อใช้ในการปรับกระบวนการให้บริการให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นซึ่งถูกนำเสนอโดย (Promkot et al., 2015) อย่างไรก็ตาม งานที่นำเสนอเป็นการนำเสนอเพียงโปรแกรมระบบจัดการที่มีประสิทธิภาพ แต่ทว่ายังมีส่วนที่สามารถพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อให้มี

ประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มมากขึ้นได้เช่นการใช้เทคโนโลยีรหัสแท่ง หรือเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี เพื่อเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการทำงาน ลดขั้นตอนในการกรอกข้อมูล และลดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากมนุษย์

ดังนั้น เพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการในยุคปัจจุบัน ระบบอาร์เอฟไอดีซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ระบุตัวตนอัตโนมัติ (Auto-ID) อย่างหนึ่ง ที่สามารถเข้าถึงรหัสประจำตัวของสิ่งต่าง ๆ ที่นำไปติดได้โดยใช้การสัมผัสด้วยแท็ก (Tag) (Pumpoung et al., 2016a) จึงถือได้ว่าตอบสนองต่อความต้องการของการใช้งานในรูปแบบการจัดเก็บฐานข้อมูลได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งอำนวยความสะดวกที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้กับสัตว์ งานวิจัยที่ได้เคยถูกนำเสนอไว้ (Dogan et al., 2016) การประยุกต์ใช้งานระบบอาร์เอฟไอดีอำนวยความสะดวกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ประสิทธิผลของการทำงานและลดการผิดพลาดของมนุษย์สำหรับการเลี้ยงสัตว์ภายในประเทศไทย โดยเน้นทางด้านปลาสวยงามและสุกร ได้ถูกนำเสนอโดย (Chavananikul, 2013) ระบบตรวจสอบและจัดการด้วยการประยุกต์ใช้งานระบบอาร์เอฟไอดีสำหรับการเลี้ยงกวาง (Rizzo et al., 2020) เพื่อแก้ปัญหาด้านติดตามข้อมูลด้านสุขภาพของกวาง เช่น น้ำหนัก ส่วนสูง สายพันธุ์ ได้อย่างรวดเร็ว

ปัจจุบันการใช้งานระบบอาร์เอฟไอดีมีอยู่แพร่หลาย และอุปกรณ์สำเร็จรูปนั้นสามารถซื้อได้ทั้งร้านค้าออนไลน์ (ThaiEasyElec, 2021) และรูปแบบบริษัท (Smart Identify, 2021) จากการสำรวจพบว่าเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ เครื่องอ่านที่อยู่ในรูปแบบตั้งโต๊ะ (Desktop) (Smart Identify, 2021) แบบประตู (Gate) (IndiaMART InterMESH, 2021) และแบบมือถือ (Handheld) (Focus Technology, 2021) ซึ่งแบบที่เหมาะสมที่สุดกับการนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้

คือ แบบมือถือ เนื่องจากลักษณะการใช้งานกับสัตว์นั้น อาจมีการเคลื่อนไหว ไม่สามารถควบคุมทิศทางได้ อย่างแน่ชัด โดยเครื่องอ่านแบบมือถือนั้นยังสามารถ แบ่งตามลักษณะการใช้งานได้เป็น 2 แบบ คือ

1) แบบถ่ายโอนข้อมูลภายหลังการใช้งาน โดยระบบสาย USB (Universal Serial Bus) หรือ เมมโมรีการ์ด (Memory card) ลักษณะแบบนี้ข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูล จะไม่เป็นเวลาจริง (Real time) ข้อมูลจะถูกอัปเดตภายหลัง จากการใช้งานเสร็จสิ้นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

2) แบบถ่ายโอนข้อมูลทันที ด้วยการเชื่อมต่อ ข้อมูลโดยระบบสาย หรือไร้สาย เช่น บลูทูธ (Bluetooth) หรือ ไวไฟ (WiFi) ลักษณะแบบนี้ข้อมูลที่มีอยู่ใน ฐานข้อมูลจะถูกอัปเดตไปในทันทีขณะที่ใช้งาน โดยเป็น เวลาจริงในขณะนั้น

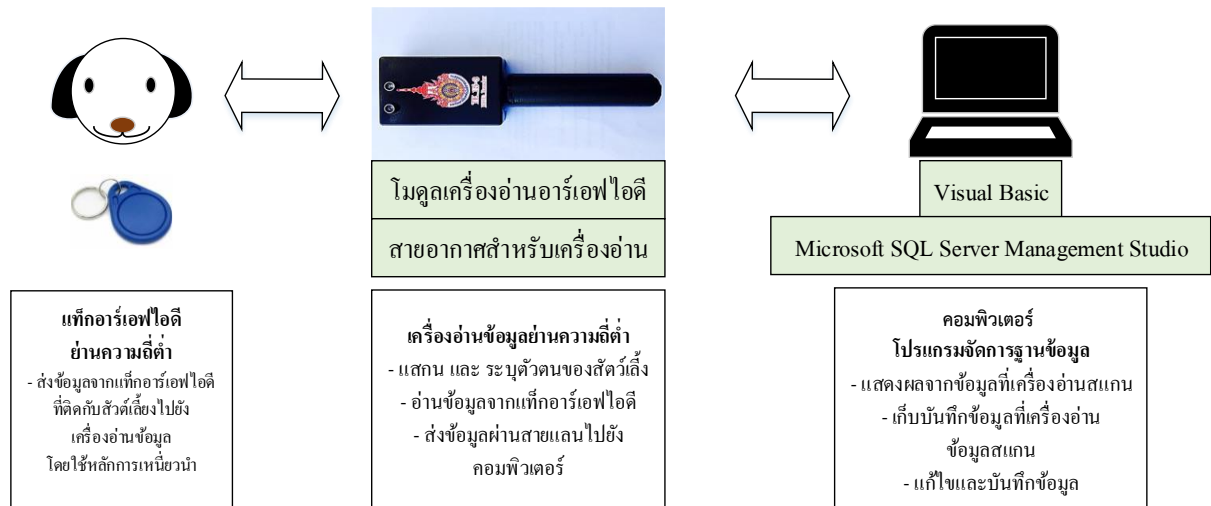
จะเห็นได้ว่าเครื่องอ่านแบบมือถือ แบบที่ 2 จะมีความสะดวกสบายมากกว่าแต่จะมีราคาที่สูง ซึ่งราคาที่ยังไม่รวมค่าใช้จ่ายในการพัฒนาโปรแกรม ให้เหมาะสมต่อการใช้งานนั้นอยู่ที่ราคาประมาณตั้งแต่ 7,000 บาท (SLon Technology, 2021) ถึง 13,000 บาท (FAREAD, 2021) เมื่อเทียบกับเครื่องอ่านแบบตั้งโต๊ะแต่ ที่มีราคาอยู่ที่ประมาณ 180 บาท (Cytron (Thailand), 2021) ถึง 900 บาท (THEMESWP, 2021) (ไม่รวมภาษา และ โปรแกรมพัฒนา) โดยโปรแกรมสำเร็จรูปที่มากับ เครื่องนั้นก็ไม่ได้เป็นโปรแกรมที่มีความเหมาะสมกับ การนำไปประยุกต์ใช้สำหรับคลินิกรักษาสัตว์โดยตรง ดังนั้นการพัฒนาเครื่องต้นแบบที่สามารถนำไป ประยุกต์ใช้ในสถานพยาบาลขนาดเล็กที่มีราคาไม่แพง จึงเป็นสิ่งที่มีความท้าทายและมีความจำเป็น

โดยการทำงานวิจัยที่ได้นำเสนอมีวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี (RFID: Radio Frequency Identification) ย่านความถี่ต่ำ (LF: Low frequency) (Pumpoung *et al.*, 2016b) สำหรับ ใช้งานกับระบบจัดการฐานข้อมูลภายในคลินิกรักษาสัตว์ที่ถูกจัดทำขึ้นมาใหม่ในรูปแบบไฟล์อิเล็กทรอนิกส์

เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถทำงานได้คล่องตัวมากยิ่งขึ้น โดยงานวิจัยที่ได้นำเสนอในบทความนี้ได้ทำออกแบบ และพัฒนา 2 ส่วน คือ 1) เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำแบบมือถือ (Handheld) ที่ใช้ชิพวงจรรวมเบอร์ ID-2LA (Digi-Key Electronics, 2019) และสายอากาศเครื่องอ่านแบบลูปีสี่เหลี่ยม 2) ระบบจัดการฐานข้อมูลคลินิกรักษาสัตว์ด้วยโปรแกรม Visual Basic 2013 (Vathin, 2013) สำหรับแสดงข้อมูลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ และการทำฐานข้อมูลด้วยภาษา SQL (Suwanasiri, 2018) เพื่อเขียนฐานข้อมูลของสัตว์ ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดไว้ในลำดับถัดไป

วิธีดำเนินการวิจัย

การติดต่อสื่อสารของระบบอาร์เอฟไอดีของ สัตว์ที่นำมารักษาระบบฐานข้อมูลของคลินิก เมื่อสัตว์เลี้ยงนำมาที่คลินิกเจ้าหน้าที่จะทำการสแกน แท็กที่ติดที่ปลอกคอกคือฝั่กที่ตัวของสัตว์โดยใช้เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี ข้อมูลจากแท็กจะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องอ่านโดยใช้หลักการคัปปลิง ในส่วนต่อมาข้อมูล จากเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีจะถูกส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยคอมพิวเตอร์ทำการแสดงผลข้อมูลที่ อ่านได้มากจากเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี และเมื่อทำการ รักษาเรียบร้อยแล้วสามารถบันทึกข้อมูลใหม่ในฐานข้อมูล ได้โดยเมื่อนำสัตว์มารักษากลับอีกจะสามารถดึงประวัติ การรักษาล่าสุดมาใช้งานได้ โดยแผนภาพแสดงในภาพ ที่ 1 วิธีการดำเนินการวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาถึง งานวิจัยที่มีมาก่อน จากนั้นทำการออกแบบเครื่องอ่าน อาร์เอฟไอดีพร้อมทำการสร้างสายอากาศเครื่องอ่าน จากนั้นทำการออกแบบระบบจัดการฐานข้อมูลคลินิกรักษาสัตว์ และทำการทดสอบโดยการนำไปใช้งานใน คลินิกรักษาสัตว์ขนาดเล็กเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ การทำงานของระบบ โดยการเก็บข้อมูลทางสถิติจาก กลุ่มตัวอย่างผู้มาใช้บริการในคลินิก จากนั้นนำมา วิเคราะห์ผลความพึงพอใจในการใช้งาน



ภาพที่ 1 แผนภาพรวมของระบบ

1. การออกแบบเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดียานความถี่ต่ำ



ภาพที่ 2 เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีที่ได้นำเสนอ

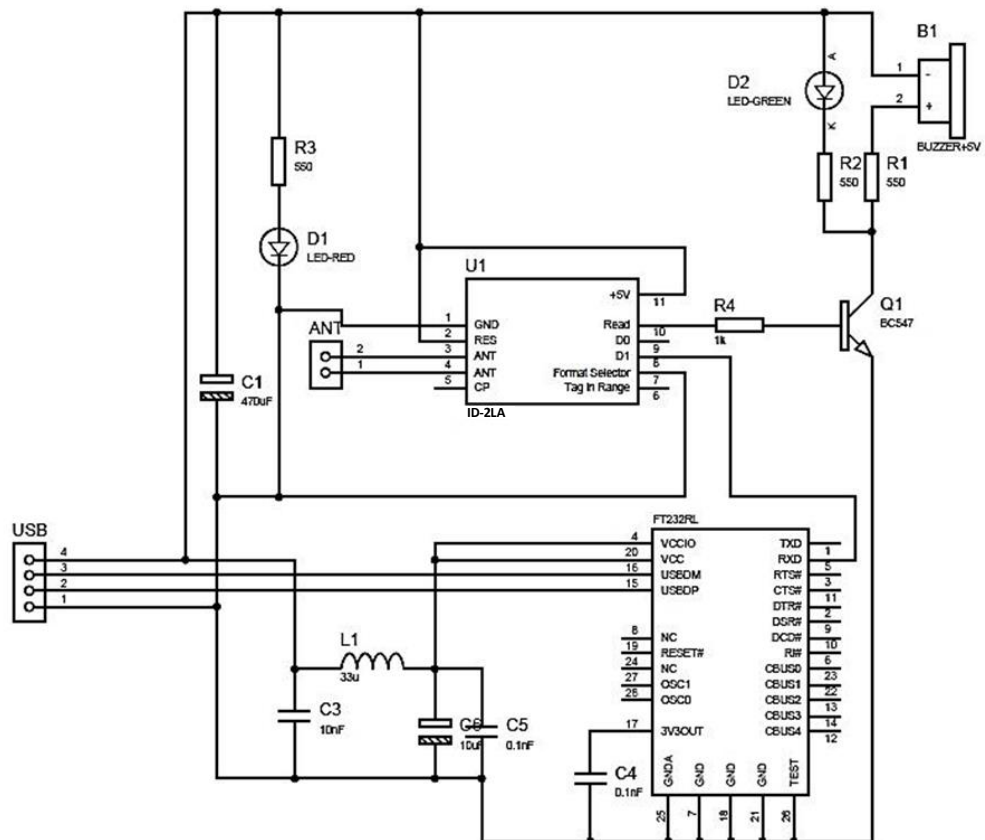
ในการออกแบบเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดียานความถี่ต่ำที่จะถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะถูกออกแบบมาในลักษณะแบบมือถือดังแสดงในภาพที่ 2 (Konthien *et al.*, 2014) โดยภายในกล่องเครื่องอ่านจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ

1.1 วงจรโมดูลเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีที่ทำ การออกแบบร่วมกับชิพวงจรรวม 2 ตัว ได้แก่

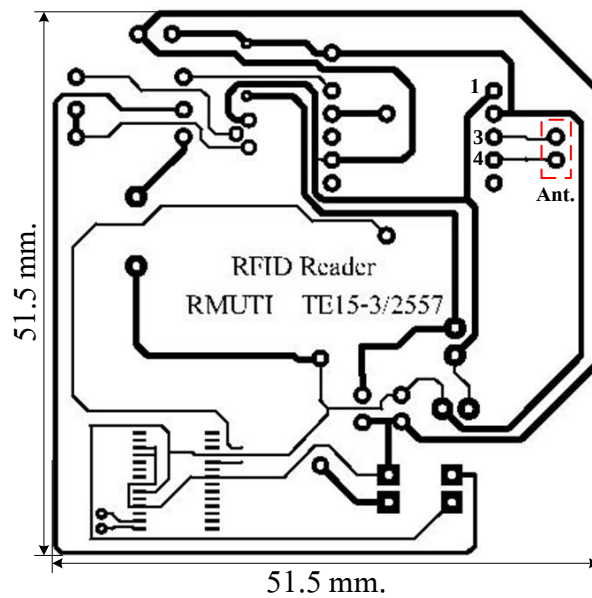
- ชิปวงจรรวมของบริษัท id-innovations รุ่น ID-2LA ทำหน้าที่เป็น โมดูลเครื่องอ่านที่รองรับ

รูปแบบข้อมูล ASCII Wiegand 26 และ Magnetic ABA Track 2 สามารถใช้งานได้กับย่านความถี่ 125 kHz และ

- ชิปวงจรรวมของบริษัท FTDI รุ่น FT232RL (FTDI Chip, 2020) ทำหน้าที่เป็นอินเทอร์เฟซ USB (Universal serial bus) กับ UART (Universal asynchronous receiver and transmitter) แบบอนุกรม ดังที่แสดงแผนภาพผังงานและลายวงจร (Schematic diagram) ในภาพที่ 3 และ 4 ตามลำดับ (Konthien *et al.*, 2014)



ภาพที่ 3 แผนภาพพลังงานที่ได้นำเสนอ



ภาพที่ 4 ลายวงจรที่ออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์

1.2 สายอากาศสำหรับเครื่องอ่านจะถูกออกแบบให้เชื่อมต่อเข้ากับขาที่ 3 และ 4 ของชิพวงจรรวม ID-2LA บนแผ่นวงจรพิมพ์ ดังแผนภาพผังงานในภาพที่ 3 ซึ่งในการออกแบบนั้น สายอากาศจำเป็นต้องถูกออกแบบให้ค่าความเหนี่ยวนำ (L) มีค่าเท่ากับ 1.337 mH หรือใกล้เคียงที่สุด ซึ่งเป็นค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศตามคำแนะนำของแผ่นข้อมูล (Datasheet) ของชิพวงจรรวมที่ได้ให้ไว้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและระยะการอ่านแท็กที่สูงที่สุด โดยโครงสร้างของสายอากาศที่เหมาะสมกับการทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำจากการศึกษาโดยหนังสือทฤษฎีการออกแบบสายอากาศ (Balanis, 2016) คือ โครงสร้างสายอากาศแบบบ่วง (Loop antenna) ซึ่งในงานวิจัยนี้ให้ความสนใจไปที่สายอากาศแบบบ่วงรูปทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular loop antenna) เนื่องจากมีความสอดคล้องกับพื้นที่ของแผ่นวงจรพิมพ์ที่ได้ทำการออกแบบ

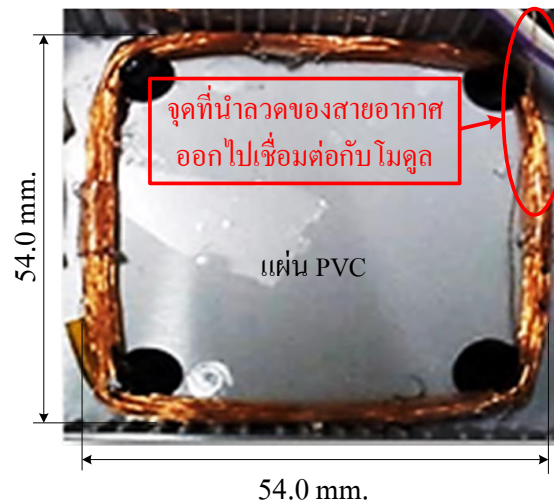
จากภาพที่ 4 จะเห็นได้ว่าแผ่นวงจรพิมพ์ของโมดูลที่ได้ทำการออกแบบไว้นั้นมีขนาด 51.5×51.5 ตร.มม.² ดังนั้นในการออกแบบสายอากาศในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบให้สายอากาศมีขนาดใหญ่กว่าแผ่นวงจรพิมพ์เล็กน้อย เพื่อลดผลกระทบของ

สนามแม่เหล็กที่อาจก่อให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกันระหว่างวงจรโมดูลกับสายอากาศ หรือสภาวะความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual inductance) โดยสายอากาศที่ได้นำเสนอมีลักษณะเป็นบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาดทั้งความกว้าง (w) และยาว (h) 54 มม. ดังแสดงในภาพที่ 5 สร้างขึ้นจากขดลวดทองแดง SWG (Standard wire gauge) เบอร์ 35 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.21 มม. พันวนสกรูพลาสติก 4 แกน เป็นจำนวนรอบ (N) 75 รอบ โดยสายอากาศถูกจัดวางไว้เหนือแผ่นวงจรพิมพ์ในภาพที่ 3 โดยมีแผ่น PVC คั่นไว้ระหว่างกลางดังแสดงในภาพที่ 5 และสายอากาศจะอยู่ด้านเดียวกันกับไฟแสดงสถานะการอ่านดังภาพที่ 2 ซึ่งจำนวนรอบที่ใช้ในการพันรอบสกรูพลาสติก 4 แกน นั้นคำนวณได้จากสมการที่ 1 (Grover, 2004) เมื่อ L_{rec} คือค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศบ่วงรูปทรงสี่เหลี่ยมซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1.337 mH μ_0 คือ ความซึมซาบได้ของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรี/เมตร และ μ คือ ความซึมซาบได้สัมพัทธ์ มีค่าเท่ากับ 1 (ดังนั้น N จะคำนวณได้ประมาณ 75.23 รอบ เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างจึงปัดเศษลดลงเหลือ 75 รอบ โดย

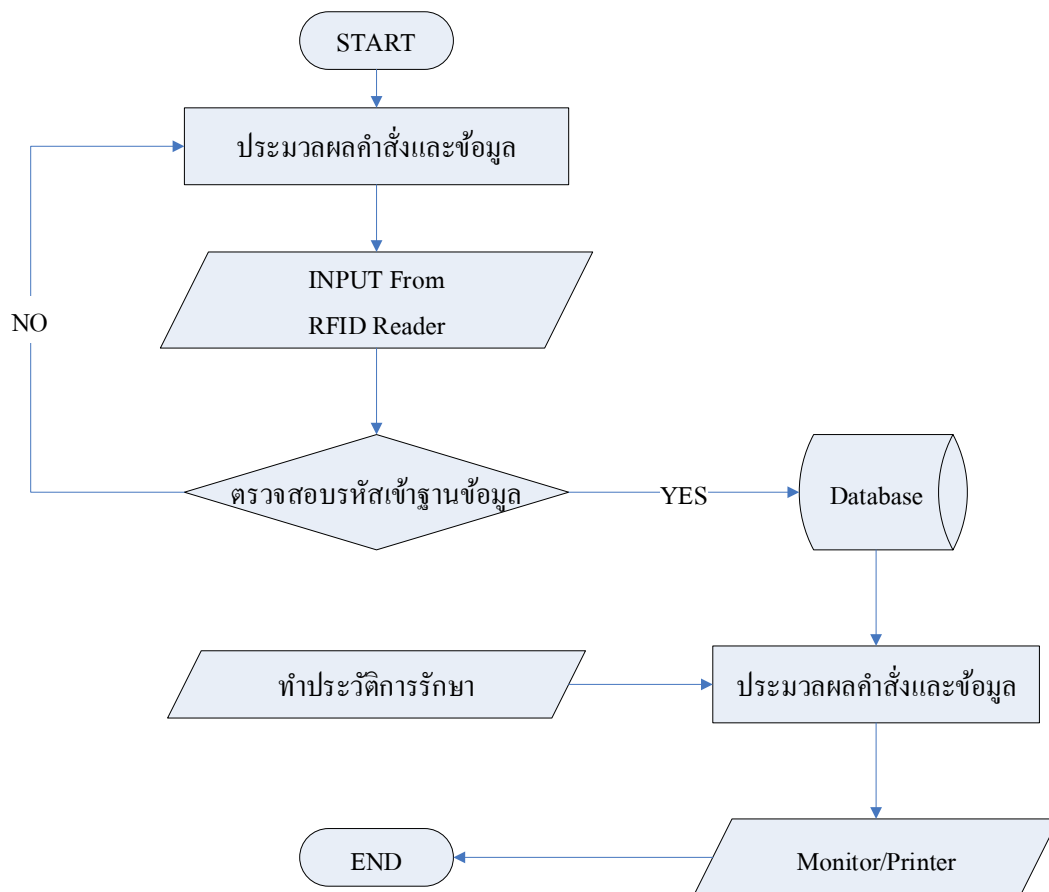
$$N \approx \sqrt{\frac{L_{rec}}{\mu_0 \mu_r \left[\frac{-2(w+h) + 2\sqrt{h^2 + w^2}}{+T} \right]}} \quad (1)$$

และ

$$T = -h \ln \left(\frac{h + \sqrt{h^2 + w^2}}{w^2} \right) - w \ln \left(\frac{w + \sqrt{h^2 + w^2}}{h^2} \right) + h \ln \left(\frac{2h}{d} \right) + w \ln \left(\frac{2w}{d} \right) \quad (2)$$



ภาพที่ 5 สายอากาศเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำแบบบ่วงรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ฉับแบบ



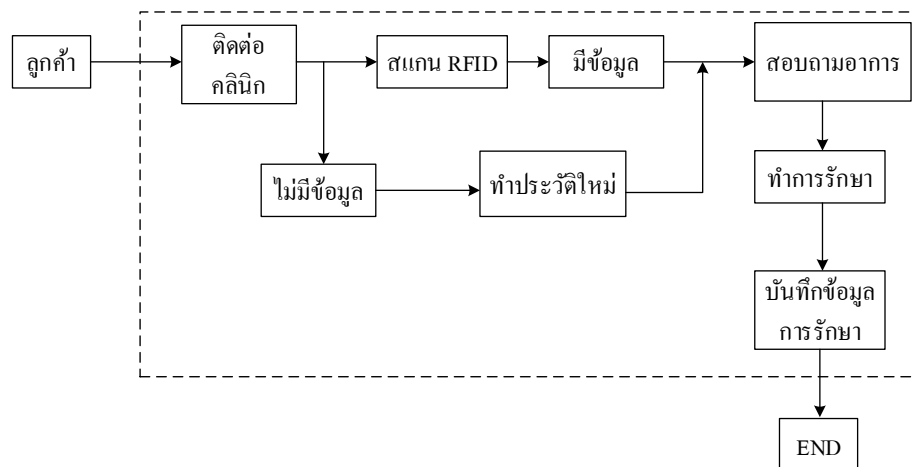
ภาพที่ 6 ผังงานการทำงานของโปรแกรมระบบจัดการฐานข้อมูลคลินิกการรักษาสัตว์ที่ได้นำเสนอ

2. การออกแบบระบบจัดการฐานข้อมูลคลินิกรักษาสัตว์

2.1 ผังงาน (Flow chart) ที่ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 6 อธิบายภาพรวมการทำงานของโปรแกรมระบบจัดการฐานข้อมูลคลินิกรักษาสัตว์ที่ได้ทำการออกแบบ

โดยเริ่มจากการประมวลผลคำสั่งและข้อมูลเพื่อตรวจสอบการทำงานของ ฮาร์ดแวร์ในแต่ละส่วนว่ายังสามารถทำงานได้ปกติหรือไม่ จากนั้นโปรแกรมจะทำการตรวจสอบข้อมูลอินพุตของเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีว่ามีรหัสที่ได้จากเครื่องอ่าน (รหัสของแท็กที่แขวนไว้กับคอของสัตว์) เข้ามาหรือไม่ หากไม่มีอินพุตเข้ามากระบวนการก็จะเริ่มกลับไปทำงานที่ขั้นตอนแรกใหม่อีกครั้ง แต่หากมีอินพุตเข้ามา รหัสของแท็กจะถูกส่งไปตรวจสอบเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่ได้เขียนไว้ หาก

รหัสของแท็กที่อ่านได้ตรงกับฐานข้อมูล ข้อมูลก็จะถูกส่งต่อเพื่อนำไปใช้ในการประมวลผลคำสั่งและข้อมูลต่อไปในลำดับถัดไป ในขั้นตอนการประมวลผลคำสั่งและข้อมูล ข้อมูลส่วนหนึ่งจะถูกนำไปแสดงผลบนจอมอนิเตอร์ (Monitor) เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถบันทึกหรือดูประวัติของสัตว์ตัวนั้นได้ ในขณะที่เดียวกันหากสัตว์แพทย์ต้องการบันทึกประวัติการรักษาในปัจจุบัน เช่น ประวัติการให้ยา หรือว่าตารางการนัดหมายในครั้งต่อไป ก็สามารถดำเนินการได้ในขั้นตอนนี้เช่นเดียวกัน โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกนำไปจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลที่ได้อัปเดตเรียบร้อยแล้ว ซึ่งที่อยู่ปลายทางของการจัดเก็บจะมีความสัมพันธ์กับรหัสประจำตัวจากแท็กที่อ่านได้ทีละตัว (1 รหัสต่อสัตว์ 1 ชนิด)



ภาพที่ 7 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของคลินิกรักษาสัตว์ด้วยเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี



ภาพที่ 8 การใช้เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีที่ได้ทำการออกแบบเพื่ออ่านแท็กที่ติดกับตัวสัตว์เลี้ยง

2.2 การทำงานของคลินิกรักษาสัตว์ด้วยเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีที่ถูกแสดงเป็นภาพโดยรวมในบล็อกไดอะแกรมดังภาพที่ 7 แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการทำงานของกระบวนการตรวจรักษาสัตว์เลี้ยงภายในคลินิกโดยเริ่มต้นจาก

เมื่อลูกค้านำสัตว์เลี้ยงเข้ามาติดต่อกับคลินิก เจ้าหน้าที่จะทำการสแกนแท็กที่ติดอยู่กับตัวของสัตว์หรือห้อยไว้กับปลอกคอ (กรณีลูกค้าเก่า) ดังแสดงในภาพที่ 8 เพื่อตรวจสอบทะเบียนประวัติ โดยแท็กจะเปรียบเสมือนบัตรประจำตัวของสัตว์

แต่หากว่าเป็นลูกค้าใหม่ที่ไม่มีแท็ก เจ้าหน้าที่จะทำการซักประวัติเจ้าของ และสัตว์ เพื่อเก็บประวัติเบื้องต้น แล้วจะทำการสร้างรหัสประจำตัวสัตว์ขึ้นมาใหม่ จากนั้นจึงนำแท็กอันใหม่มาเสกนเพื่อจับคู่ข้อมูลระหว่างแท็กกับรหัสประจำตัวของสัตว์ และทำ

การบันทึกลงในฐานข้อมูล จากนั้นจึงทำการติดแท็กเข้ากับตัวสัตว์

ข้อมูลของสัตว์ที่ถูกตรวจสอบในขั้นตอนก่อนหน้านี้ สัตวแพทย์ผู้รักษจะสามารถทราบได้ทันทีเมื่อนำเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีมาสแกน และสามารถนำข้อมูลมาประกอบรวมกับการวินิจฉัยอาการเบื้องต้นของสัตว์ได้ว่าจะต้องดำเนินการรักษาอย่างไรในลำดับถัดไป โดยข้อมูลการวินิจฉัยโรคของสัตว์นั้น สัตวแพทย์สามารถทำการบันทึกข้อมูลลงในฐานข้อมูลได้ทันที และส่วนงานที่เกี่ยวข้องสามารถดึงข้อมูลส่วนนี้ออกมาใช้ได้ เพื่อออกใบนัดและคิดค่าใช้จ่ายในลำดับถัดไปได้ โดยทั้งหมดที่กล่าวมานี้สามารถทำการบันทึกข้อมูลลงในฐานข้อมูลได้ และสามารถเรียกข้อมูลกลับขึ้นมาดูได้ทุกครั้งที่สัตว์เข้ามารับรักษาโดยการสแกนแท็กอาร์เอฟไอดีที่ติดอยู่กับสัตว์เพียงเท่านั้น

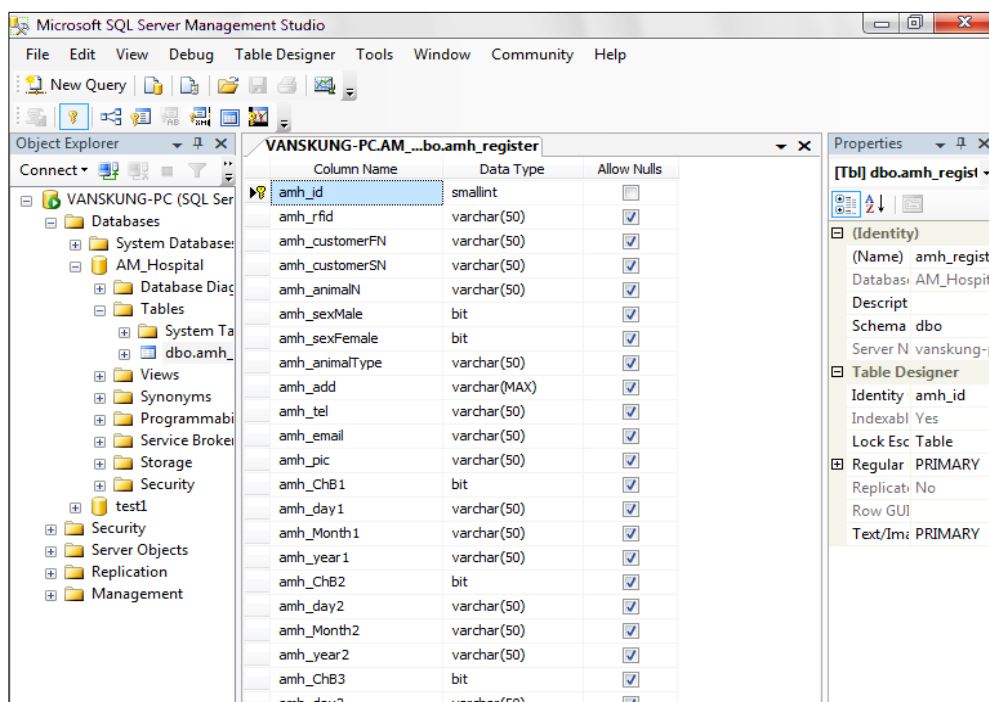
ภาพที่ 9 หน้าต่างโปรแกรมจัดการฐานข้อมูลในโรงพยาบาลสัตว์หน้าแรก

โดยปุ่มค้นหาจะค้นหาข้อมูลของสัตว์ ปุ่มเพิ่มข้อมูลใช้เพิ่มข้อมูลในการลงประวัติการรักษา ปุ่มบันทึกและแก้ไขใช้ในการบันทึกข้อมูลที่มีการแก้ไขใหม่ ปุ่มลบข้อมูลใช้ในการกรณีที่การกรอกข้อมูลผิดพลาด ปุ่มประวัติการรักษาใช้ในการเรียกดูข้อมูลประวัติการรักษา ปุ่มเลือกรูปภาพใช้ในการเลือกรูปภาพของสัตว์เพื่อนำมาทำประวัติ ปุ่มออกโปรแกรม คือ ปุ่มที่ใช้ในการออกจากโปรแกรม

2.3 ระบบจัดการฐานข้อมูลในคลินิกสัตว์ที่ได้นำเสนอในบทความนี้ใช้โปรแกรม Visual Basic 2013 ในการออกแบบหน้าต่างโปรแกรมการใช้งาน ซึ่งการเข้าใช้งานของระบบบนหน้าจอคอมพิวเตอร์จะถูกออกแบบขึ้นเป็น 2 หน้าต่างดังแสดงในภาพที่ 9 เมื่อผู้ใช้งานเปิดโปรแกรมเพื่อใช้งานเริ่มต้นก็จะพบกับหน้าต่างนี้เป็นหน้าแรกซึ่งเป็นหน้าต่างของข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการแจ้งข้อมูลหรือลงทะเบียนสัตว์โดยภาพภายหลังการกรอกข้อมูลแสดงในภาพที่ 14 หลักการออกแบบหน้าต่างโปรแกรมนี้ได้อ้างอิงข้อมูล

จากสถิติการใช้บริการของลูกค้า เช่น การให้วัคซีน การอาบน้ำ ตัดขน หรือ การรับฝากสัตว์ โดยบริการดังกล่าวได้ออกแบบให้เป็นหัวข้อหลักที่จะแสดงไว้บนหน้าจอ ทั้งยังมีลิ้งค์สำหรับพิมพ์บันทึกการรักษา ในบริเวณด้านล่างของหน้าต่างโปรแกรม ที่นอกเหนือจากหัวข้อหลักไว้อีกด้วย เพื่อความสะดวกในการให้บริการ ซึ่งในอนาคตหากมีการเพิ่มรายการวัคซีนหรือมีการแก้ไขรายการที่ต่างที่ต่างออกไปสามารถปรับปรุงได้โดยการปรับปรุงข้อมูลในโปรแกรม Visual Basic หรือ Microsoft SQL Server Management Studio และ ในภาพที่ 10 จะเป็นหน้าต่างที่สองซึ่งเป็นหน้าต่างสำหรับบันทึกประวัติการรักษา เช่นการให้วัคซีน การอาบน้ำ ตัดขน หรือ การรับฝากสัตว์ โดยข้อมูลที่เจ้าหน้าที่ต้องเป็นผู้กรอกข้อมูลเบื้องต้นได้แก่ ชื่อเจ้าของ วันเข้ารักษา ชื่อสัตว์ สายพันธุ์ น้ำหนัก รูปถ่าย ประวัติการรักษา อย่างไรก็ตามระบบที่นำเสนอยังไม่มีการคำนวณค่าใช้จ่ายในการรักษา

ภาพที่ 10 หน้าต่างโปรแกรมจัดการฐานข้อมูลในโรงพยาบาลสัตว์หน้าต่างที่สอง



ภาพที่ 11 ฐานข้อมูลประวัติการรักษา

ตารางที่ 1 การทดสอบการอ่านของเครื่อง RFID Reader กับแท็ก

ระยะ	แท็กที่ 1	แท็กที่ 2	แท็กที่ 3	แท็กที่ 4	แท็กที่ 5	เปอร์เซ็นต์
การอ่าน (เซนติเมตร)	รหัสของแท็ก					ความถูกต้อง
	400073FFCC00	4000742DC8D1	400073E969B3	400073F05F9C	4000741B0926	
1	☺	☺	☺	☺	☺	100 %
2	☺	☺	☺	☺	☺	100 %
3	☺	☺	☺	☺	☺	100 %
4	☺	☺	☺	☺	☺	100 %
5	☺	☺	☺	☺	☺	100 %
6	☺	☺	☺	☺	☺	100 %
7	☺	☺	☺	☺	☺	100 %
8	☺	☺	☺	☺	☺	100 %
9	☺	☺	☺	☺	☺	100 %
10	☺	☺	☺	☺	☺	100 %
11	☺	☺	☺	☺	☺	100 %
12	☹	☹	☹	☹	☹	0 %
13	☹	☹	☹	☹	☹	0 %

หมายเหตุ ☺ หมายถึง เครื่องอ่านข้อมูลสามารถอ่านข้อมูลจากแท็กได้ และ ☹ หมายถึง เครื่องอ่านข้อมูลไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแท็กได้

2.4 การสร้างฐานข้อมูลในงานวิจัยฉบับนี้ สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการจัดเก็บข้อมูลประวัติการรักษาสัตว์ภายในคลินิกที่เข้ามาทำการรักษา โดยใช้โปรแกรม Microsoft.SQL.Server Management Studio โดยใช้ภาษา SQL ในการเขียนฐานข้อมูล ดังแสดงหน้าตาฐานข้อมูลของระบบในภาพที่ 11 ซึ่งเป็นฐานข้อมูลส่วนหนึ่งของประวัติการรักษา โดยที่มาของการออกแบบหน้าตาโปรแกรมหน้านี้ใช้การอ้างอิงข้อมูลมาจากสถิติการใช้บริการของลูกค้าทั่วไปในโรงพยาบาลสัตว์โพธิ์กลาง โดยผลสำรวจพบว่าบริการที่ได้รับความนิยมมากที่สุดได้แก่ การฉีดวัคซีนประจำปี วัคซีนป้องกันเห็บหมัด วัคซีนยาคุม วัคซีนป้องกันโรคผิวหนัง การอาบน้ำ ตัดขน และฝากเลี้ยง โดยบริการดังกล่าวได้ออกแบบให้เป็นหัวข้อหลักที่จะแสดงไว้บนหน้าจอ และยังมีบล็อกสำหรับพิมพ์บันทึกการรักษาที่นอกเหนือจากหัวข้อหลักไว้อีกด้วย เพื่อความสะดวกในการให้บริการดังที่ได้แสดงในภาพที่ 9 และ 10 ไปแล้ว

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การทดสอบและวิจารณ์ผลระยะการอ่านของเครื่องกับแท็ก

ภาพที่ 12 แสดงลักษณะการทดสอบระยะการอ่านสูงสุดระหว่างเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีที่ได้ทำการออกแบบกับแท็กที่ใช้ติดกับปลอกคอสัตว์ (Thesprucepets, 2022) โดยทำการทดลองจากแท็ก 10 ตัว และกำหนดให้แต่ละตัวมีรหัสที่แตกต่างกัน และปรับเปลี่ยนระยะการอ่านทดสอบเป็น 10 ระยะ จาก 1 ถึง 10 ซม.ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 1

ผลจากการสอบพบว่าเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี ยานความถี่ต่ำ (Noothong *et al.*, 2004) ที่ได้ทำการออกแบบในงานวิจัยนี้สามารถอ่านแท็กได้อย่างทั้ง 10 ตัว ได้ระยะสูงสุดคือ 11 ซม. โดยผลจากการอ่านทั้งหมดที่กล่าวมาคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ถ้าวางแท็กไว้ห่างจากเครื่องอ่านมากกว่า 11 ซม. เครื่องอ่านจะไม่สามารถอ่านแท็กได้ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 12 การทดสอบระยะการอ่านได้สูงสุด

2. การทดสอบและวิจารณ์ผลระบบจัดการฐานข้อมูล คลินิกกรักษาสัตว์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี

ภาพที่ 13 แสดงการทดสอบการอ่านแท็กที่ติดอยู่กับปลอกคอสุนัขสายพันธุ์ ชิววา (น้องแฮปปี้) (Konthien *et al.*, 2014) เพื่อทดสอบการเข้าใช้งานโปรแกรมในขณะเริ่มต้น โดยระยะห่างระหว่างเครื่อง

คอมพิวเตอร์กับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ต่ำชนิดมือถือที่ได้นำเสนอนั้นจะมีระยะห่างกันประมาณ 1 เมตร เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างสะดวก โดยความเป็นจริงนั้นสามารถใช้งานได้ห่างมากกว่าขึ้นอยู่กับคุณภาพสาย USB ที่ใช้งาน (Wang *et al.*, 2013)



ภาพที่ 13 การทดสอบการอ่านแท็กที่ติดกับตัวสัตว์ (สุนัข)

ระบบจัดการฐานข้อมูลในโรงพยาบาลสัตว์

ลงทะเบียนสัตว์เลี้ยง

รหัสลูกค้า	400073	เลขที่ RFID	400073FFCC00
ชื่อลูกค้า	ค.ญ. จันทน์เจ้า	นามสกุล	สิมมา
ชื่อสัตว์เลี้ยง	แฮปปี้	เพศ	☐ เพศผู้ ☒ เพศเมีย
ชนิดสัตว์เลี้ยง	หมา		
เบอร์โทรศัพท์	089-6911393	E-mail	aaa@bbb.com
ที่อยู่	355-359 ก.โพธิ์กลาง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000		

RFID Reader by TE15-3@RMUTI

ค้นหาด้วย RFID เพิ่มข้อมูล บันทึก/แก้ไข ลบข้อมูล ประวัติการรักษาสัตว์ ออกจาก

ภาพที่ 14 หน้าต่างโปรแกรมแสดงฐานข้อมูลของสัตว์เริ่มต้นเมื่อมีการอ่านค่าแท็ก

จากการทดสอบและบันทึกผล สังเกตได้ว่าลักษณะของหน้าต่างโปรแกรมเมื่อมีการดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลการรักษาของสัตว์ที่ได้ถูกเขียนไว้แล้วนั้น จะมีลักษณะหน้าต่างแรกดังภาพที่ 14 สอดคล้องและเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ และเมื่อต้องการเข้าถึงประวัติการรักษาของสัตว์ก็สามารถคลิกเข้าไปได้ที่ปุ่ม “ประวัติการรักษา” จากนั้นภาพหน้าต่างประวัติการรักษาที่ปรากฏจะแสดงดังภาพที่ 15 และหาก

ต้องการบันทึกประวัติการรักษาก็สามารถทำการคลิกเข้าไปได้ที่ปุ่ม “บันทึก” โดยการนำระบบอาร์เอฟไอดีร่วมกับระบบจัดการฐานข้อมูลคลินิกรักษาสัตว์ที่นำเสนอสามารถลดความผิดพลาดจากการให้บริการร้อยละ 0.25 เหลือ ร้อยละ 0.05 และเพิ่มความพึงพอใจในการให้บริการของผู้ที่มาใช้บริการจากร้อยละ 3.24 เป็น ร้อยละ 3.5 ระยะเวลาในการจัดการข้อมูลในการให้บริการจาก 5 นาที โดยเฉลี่ยเหลือเพียง 0.5 นาที

ลำดับ	โรค/อาการ	วันที่	เวลา	บันทึก	ลบ
1.	โรคฉี่หนู	วัน/เดือน/ปี	ค.ค.	บันทึก	ลบ
2.	โรคไข้หวัด	วัน/เดือน/ปี	ค.ค.	บันทึก	ลบ
3.	โรคหัดและหัดคอม	วัน/เดือน/ปี	ค.ค.	บันทึก	ลบ
4.	โรคพิษสุนัขบ้า	วัน/เดือน/ปี	ค.ค.	บันทึก	ลบ
5.	โรคพิษสุนัขบ้า	วัน/เดือน/ปี	ค.ค.	บันทึก	ลบ
6.	โรคพิษสุนัขบ้า	วัน/เดือน/ปี	ค.ค.	บันทึก	ลบ
7.	โรคพิษสุนัขบ้า	วัน/เดือน/ปี	ค.ค.	บันทึก	ลบ
8.	โรคพิษสุนัขบ้า	วัน/เดือน/ปี	ค.ค.	บันทึก	ลบ

ภาพที่ 15 หน้าต่างโปรแกรมประวัติการรักษาของสัตว์

สรุป

ผลการดำเนินงานจากการออกแบบและสร้างระบบจัดการฐานข้อมูลในคลินิกสัตว์ด้วยเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีอำนวยความสะดวกที่ได้นำเสนอแนะ นำเครื่องอ่านต้นแบบนี้ไปใช้งานได้จริง และสามารถช่วยให้ระบบการจัดการฐานข้อมูลในคลินิกสัตว์มีความสะดวกรวดเร็วต่อการจัดเก็บและบันทึกข้อมูลได้ ถึงแม้ข้อมูลประวัติการรักษาของแต่ละที่อาจมีความแตกต่างกันบ้าง แต่อยู่บนพื้นฐานการพัฒนา

ฐานข้อมูล และหน้าต่างการเข้าใช้แบบเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมการใช้งานในอนาคต ซึ่งระยะเวลาใช้งานที่เหมาะสมระหว่างเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีที่ได้ทำการสร้างขึ้นกับแท็ก คือ ระยะ 0 ถึง 11 ซม. ซึ่งความพิเศษของระบบที่ได้แนะนำเสนอ คือ การนำเอาเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีซึ่งเป็นเทคโนโลยีแบบไร้สายมาใช้ จึงทำให้ลดการสัมผัสในขณะที่ใช้งาน การทำงานไม่จำเป็นต้องทำงานอยู่ในระบบสายตาเสมอ (ถ้าเทียบกับบาร์โค้ด) ทำให้สะดวกและสบายต่อการใช้งาน แต่เนื่องจากการพัฒนา

ต้นแบบรุ่นแรกจึงยังมีข้อจำกัด และสิ่งที่ต้องแก้ไขในอนาคตคือ ณ ปัจจุบันระบบจัดการฐานข้อมูลในคลินิกสัตว์ด้วยเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีที่ได้นำเสนอยังไม่สามารถดึงข้อมูลประวัติการรักษาขึ้นมาให้สัตวแพทย์หรือผู้ใช้งานเข้าดูได้ทันทีแบบเรียลไทม์ (Real-time) แต่สามารถเก็บประวัติการรักษาได้ทั้งหมดตามที่เขียนหน้าตาการใช้งานไว้ ซึ่งปัจจุบันหากต้องดูข้อมูลประวัติการรักษาย้อนหลัง สามารถทำได้โดยการนำข้อมูลดิบมาแปลงเป็นผล หรือปรีนข้อมูลออกมาดู ดังนั้น สิ่งที่จะต้องพัฒนาต่อไปในอนาคตคือการเขียนหน้าตาโปรแกรมการใช้งานเพิ่มเติมเพื่อเชื่อมโยงกับฐานข้อมูลและแสดงข้อมูลออกมายังหน้าจอแบบเรียลไทม์เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถค้นหาข้อมูลย้อนหลังได้ทันที

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ตามสัญญาเลขที่ ENG13/63

ขอขอบคุณ นางสาวเพชรภรณ์ เสนอกกลาง และ นางสาวนวลละหงส์ ดีแก่ สำหรับการช่วยเก็บข้อมูลให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

และขอขอบคุณ โรงพยาบาลสัตว์โพธิ์กลาง ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการเก็บข้อมูลและทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Balanis, C.A. 2016. **Antenna theory: analysis and design**. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Chavananikul, V. 2013. **Case Study: Implementation of RFID for animal production of**

Thailand. Available Source: <https://www.vincithai.com/Files/Name2/CONTENT588871df26f5341500b3cf63556203873648455.pdf>, October 6, 2023. (in Thai)

Cytron (Thailand). 2021. **125KHz USB RFID Smart Card Reader EM4100**. Available Source: <https://th.cytron.io/p-125khz-usb-rfid-smart-card-reader-em4100>, February 21, 2021. (in Thai)

Dear friend of different species. 2020. **The bond between humans and dogs**. Human vs dog. Available Source: <https://sites.google.com/site/dearfriendififferentpecies/khwam-phukphan-rahwang-mnusy-kab-sunakh>, October 13, 2020. (in Thai)

Digi-Key Electronics. 2019. **ID-2LA, ID-12LA, ID-20LA Low Voltage Series Reader Modules**. ID-2LA, ID-12LA, ID-20LA Datasheet by SparkFun Electronics. Available Source: <https://www.digkey.com/htmldatasheets/production/2365338/0/0/1/id-2la-id-12la-id-20la.html>, October 13, 2020.

Dogan, H., Çaglar, M.F., Yavuz, M. and Gözel, M.A. 2016. Use of radio frequency identification systems on animal monitoring. **SDU International Journal of Technological Science** 8(2): 38-53.

FAREAD. 2021. **FRD420F Animal Stick Reader**. Animal Reader. Available Source: <http://www.faread.com/product/readers/reader/frd420f-animal-stick-reader-4661.html>, February 14, 2021.

Focus Technology. 2021. **Animal RFID Handheld Reader Tag Reader Scanner**. Available Source: <https://hiprove.en.made-in-china.com/product/>

- pBNvaboHkrJ/China-Animal-RFID-Handheld-Reader-Tag-Reader-Scanner.html, February 14, 2021.
- FTDI Chip. 2020. **Future Technology Devices International Ltd. FT232R USB UART IC Datasheet.** FT232R USB UART IC Datasheet Version 2.16. Available Source: https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf, May 21, 2020.
- Grover, F.W. 2004. **Inductance calculations: working formulas and tables.** Courier Corporation, New York.
- IndiaMART InterMESH. 2021. **STL991 Wireless Walk-IN RFID Reader.** RFID Readers. Available Source: <https://www.indiamart.com/siliconwirelessystems/rfid-readers.html>, February 21, 2021.
- Kantha, P. 2017. Ontological Pluralism in the Parallelism between Animal and Human. **Journal of Social Sciences, Naresuan University: JSSNU** 13(2): 5-20. (in Thai)
- Konthien, S., Sanerklang, P. and Deekae, D. 2014. Database Management System with RFID Reader in an animal hospital. Bachelor Thesis of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan. (in Thai)
- Ministry of Agriculture and Cooperatives. 2015. Re: Rules, procedures, and conditions of veterinary sanatoriums which are not subject to the law on veterinary sanatoriums as must be operated under the law on veterinary sanatoriums (December 23, 2015) Government Gazette vol. 132(Special episode 399 D), pp. 18-22. (in Thai)
- Noothong, W., Noimai, A. and Wansawang, P. 2004. RFID, Versatile technology. **Nectec** 11(60): 15-22. (in Thai)
- Promkot, A.N., Srihard, N. and Wongsupa, U. 2015. System development for veterinary clinic management. **SNRU Journal of Science and Technology** 7(2): 71-83. (in Thai)
- Pumpoung, T., Nuangwongsa, K., Kupimai, M., and Suripol, U. 2016a. Radio Frequency Identification Tag. **Journal of Industrial Technology Rambhai Barni** 6(2): 52-56. (in Thai)
- Pumpoung, T., Nuangwongsa, K., Kupimai, M. and Suripol, U. 2016b. Radio Frequency Identification Systems: RFID. **Journal of Industrial Technology Rambhai Barni** 6(2): 39-51. (in Thai)
- Rizzo, M.A.R., Murizah, K.N.Y.C. and Roslina, M. 2020. RFID Monitoring System and Management on Deer Husbandry, pp. 1-14. **In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** 540 (2020).
- SLon Technology. 2021. **LF RFID reader Livestock RFID Handheld Reader device for animal management (EMID/FDX-B(ISO11784/785)/EDX-A).** RFID Handheld Readers. Available Source: <http://www.slonrfid.com/pid15369177/LF-RFID-reader-Livestock-RFID-Handheld-Reader-device-for-animal-managerment-EMID-FDX-B-ISO11784-785-EDX-A.htm>, February 21, 2021.

Smart Identify. 2021. **We are RFID Hardware**

Provider. Available Source: <https://www.smartiden.com>, February 21, 2021. (in Thai)

Suwanasiri, S. 2018. **What is a SQL.** Database

system. Available Source: <https://sites.google.com/site/supatrasuwannasiri25/sql-khux-xari>, February 2, 2018. (in Thai)

ThaiEasyElec. 2021. **RFID / NFC.** Available Source:

<https://www.thaieasyelec.com/category/19/rfid-nfc>, February 21, 2021. (in Thai)

THEMESWP. 2021. **Read head PROXIMITY**

125KHZ RFID READER for android mobile phone. Articles. Available Source: <https://www.fuyashop.com/product/หัวอ่าน-proximity-125khz-rfid-reader-สำหรับมือถือแอนดรอย/>, February 21, 2021. (in Thai)

Thesprucepets. 2022. **8 Different Types of Dog**

Collars. Pet news. Available Source: <https://www.thesprucepets.com/different-types-of-dog-collars-1118613>, March 21, 2022.

Vathin, L. 2013. **History of Visual Basic.**

Aj.Luxsana Classroom. Available Source: <https://sites.google.com/site/luxsanavathin/gui/xngkh-prakxb-phun-than>, June 10, 2013. (in Thai)

Wang, A., Li, Z., Yang, X. and Feng, B. 2013. A new

security problem of USB: Monitoring cable attack and countermeasures, pp. 129-137. *In*

Proceedings of the 2012 International Conference on Information Technology and Software Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg.

การเพิ่มคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเสริมฐานถั่งเช่าสีทอง

The Enhancing Nutritional Value of Crispy Snack with Solid Medium with Mycelium Remained from *Cordyceps militaris* Culture Processing

พรพรรณ รัตนะสัจจะ¹ ดวงหทัย รัตนสัจธรรม¹ สามารต ต่ายขาว¹ สุนทรา เฟื่องฟุ้ง¹
พิชญ์ ตั้งสมบัติวิจิตร^{2*} และ อุทาน บุณนศักดิ์ศรี³

Pornpan Ruttanasutja¹, Doungthai Rattanasatchatham¹, Samart Taikhao¹, Suntara Fueangfung¹
Pitchya Tangsombatvichit^{2*} and Utharn Buranasaksee³

Received: 10 October 2021, Revised: 16 September 2022, Accepted: 19 September 2022

บทคัดย่อ

ข้าวเกรียบจัดเป็นขนมขบเคี้ยวประเภทหนึ่งเป็นที่นิยมของผู้บริโภค งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและเพิ่มคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบด้วยการเสริมฐานถั่งเช่าสีทองที่เหลือจากกระบวนการเพาะเลี้ยงถั่งเช่าสีทอง ผลการทดลองพบว่า สารคอร์ไดเซปินและอะดีโนซีนในฐานถั่งเช่าสีทองผงที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง มีค่ามากกว่าการตากแดดเป็นเวลา 3 วัน จากนั้นฐานถั่งเช่าสีทองผงที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนถูกนำมาตรวจสอบคุณค่าทางอาหาร พบว่า มีโปรตีน 8.95 ± 0.08 กรัมต่อ 100 กรัม และไขมัน 12.03 ± 0.04 กรัมต่อ 100 กรัม นอกจากนี้ยังพบว่ามีสารปนเปื้อนของสารหนู ตะกั่ว ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน ไม่พบปรอท และไม่พบเชื้อจุลินทรีย์ *Escherichia coli* *Salmonella* spp. และ *Staphylococcus aureus* สำหรับสูตรข้าวเกรียบเสริมฐานถั่งเช่าสีทองผงที่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคทั่วไป ในระดับชอบมากที่สุด (คะแนนความชอบโดยรวมเฉลี่ย เท่ากับ 7.40 ± 0.49) มีส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลังต่อเนื้อมันฝรั่งดัมสุก (1:1) ผสมฐานถั่งเช่าสีทองผง 3% ผลการทดลองพบว่า ข้าวเกรียบสูตรนี้ มีโปรตีน 2.25 ± 0.05 กรัมต่อ 100 กรัม และไขมัน 6.48 ± 0.05 กรัมต่อ 100 กรัม ไม่พบการปนเปื้อนของโลหะหนักและเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคทางเดินอาหารตามมาตรฐาน

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

¹ Department of Science, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Phranakhon Si Ayutthaya 13000, Thailand.

² สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จังหวัดสุพรรณบุรี 72130

² Department of Science, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Suphanburi 72130, Thailand.

³ สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จังหวัดสุพรรณบุรี 72130

³ Department of Computer Science, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Suphanburi 72130, Thailand.

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

ของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา ข้าวเกรียบเสริมฐานถึงเข้าสู่ท้องผสุตรนี้ยังพบว่ามีสารคอร์ไดเซปิน และอะดีโนซีน เท่ากับ 26.33 ± 0.47 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และ 1.40 ± 0.08 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ งานวิจัยนี้สามารถลดส่วนที่เหลือทิ้งจากกระบวนการเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ท้อง และพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบที่มีคุณค่าทางอาหารและปลอดภัยต่อผู้บริโภค

คำสำคัญ: ข้าวเกรียบ, ฐานถึงเข้าสู่ท้อง, คุณค่าทางอาหาร, คอร์ไดเซปิน, อะดีโนซีน

ABSTRACT

Crispy snack is one of popular snake food of consumers. The objectives of this experiment were to develop and add nutritional value of crispy snack with solid medium with mycelium remained byproducts from *Cordyceps militaris* culture processing. The results showed that the cordycepin and adenosine of the solid medium with mycelium remained byproducts via hot air oven dried at 60°C method for 18 hours which was higher than sun dried for 3 days. After that, its nutritional value of the solid medium with mycelium remained byproducts via hot air oven and it was observed that it had protein as 8.95 ± 0.08 g/100g and dietary fiber as 12.03 ± 0.04 g/100g. Moreover, it was found that Arsenic Lead less than standard and it was not found Mercury. *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. and *Staphylococcus aureus* were not found. For crispy snack treatment, it was accepted by general consumers at the most level (the average overall score as 7.40 ± 0.49) and the ingredients included tapioca starch and boiled potatoes (ratio 1:1) with 3% of solid medium with mycelium remained byproducts. The results indicated that this treatment had protein as 2.25 ± 0.05 g/100g and dietary fiber as 6.48 ± 0.05 g/100g. In addition, heavy metal contamination and food microbial pathogens were not found following The Food and Drug Administration standard. This treatment also showed cordycepin and adenosine as 26.33 ± 0.47 mg/100g and 1.40 ± 0.08 mg/100g, respectively. This research suggests that this experiment can reduce byproducts from *C. militaris* culture processing and develops crispy snack for high nutritional value and safety for consumers.

Key words: crispy snack, solid medium with mycelium remained, nutritional value, cordycepin, adenosine

บทนำ

ถึงเช่า (*Cordyceps*) เป็นฟังไจชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมในการศึกษาค้นคว้าและวิจัยกันอย่างแพร่หลาย ในประเทศจีนมีการนำถึงเช่ามาใช้เพื่อประโยชน์ในทางการแพทย์ใช้ในการรักษาโรคต่าง ๆ ใช้เป็นยาบำรุงสุขภาพให้แข็งแรง (Huang *et al.*, 2009; Shrestha *et al.*, 2012) ด้วยความก้าวหน้า

ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ร่วมกับการสร้างเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ในการตรวจวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในผลิตภัณฑ์ ทำให้ทราบว่าถึงเช่ามีสารสำคัญหลายชนิด อาทิเช่น เบต้ากลูแคน โปรตีนและแร่ธาตุ พอลิแซคคาไรด์ สารต้านอนุมูลอิสระที่เป็นเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (SOD) คอร์ไดเซปิน (cordycepin) และ อะดีโนซีน

(adenosine) เป็นต้น สารสำคัญเหล่านี้มีสรรพคุณส่งเสริมระบบภูมิคุ้มกัน ลดอาการภูมิแพ้ เพิ่มสมรรถนะทางเพศ กระตุ้นการทำงานของ sexual potentiator ส่งเสริมการสร้างฮอร์โมนเทสโทสเตอโรน (testosterone) ทำให้ผลิตสเปิร์มที่แข็งแรง ส่งเสริมการไหลเวียนเลือดในร่างกาย ลดอัตราการเกิดเนื้องอก หรือยับยั้งการเกิดมะเร็ง (anti-cancer) รวมทั้งช่วยต้านอนุมูลอิสระ (anti-oxidant) ช่วยชะลอความชรา (anti-aging) และยังมีฤทธิ์ที่ยับยั้งการอักเสบ (anti-inflammatory) อีกด้วย (Huang *et al.*, 2009; Shrestha *et al.*, 2012) ปัจจุบันถั่งเช่าที่นิยมเพาะเลี้ยงกันอย่างแพร่หลายมี 3 สายพันธุ์ คือ ถั่งเช่าทิเบต (*Cordyceps sinensis*) มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพคุณภาพดีในประเทศจีน ถั่งเช่าหิมะ (*Isaria japonica*) และถั่งเช่าสีทอง (*Cordyceps militaris*) สำหรับในประเทศไทยนิยมเพาะเลี้ยงถั่งเช่าสีทอง เพราะถั่งเช่าชนิดนี้เพาะเลี้ยงง่ายในห้องปฏิบัติการ หรือห้องเพาะเลี้ยงที่สร้างสภาพแวดล้อมเลียนแบบธรรมชาติ การเจริญของถั่งเช่าได้ ควบคุมกระบวนการผลิตได้ง่าย และมีสารสำคัญเช่นเดียวกับถั่งเช่าที่เจริญในธรรมชาติ รวมทั้งสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ได้มีคุณสมบัติที่ดีใกล้เคียงกับถั่งเช่าทิเบต ด้วยคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลายของถั่งเช่าสีทอง ทำให้ถั่งเช่าสายพันธุ์นี้ถูกนำมาเพาะเลี้ยงในเชิงพาณิชย์ และออกวางจำหน่ายในรูปแบบผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ ในประเทศไทยการผลิตและจำหน่ายถั่งเช่าสีทองในรูปแบบผลิตภัณฑ์อบแห้ง และแคปซูลสกัด มีราคาอยู่ที่ประมาณกิโลกรัมละ 4-6 หมื่นบาท (Tapingkae, 2012) ในขั้นตอนการเพาะเลี้ยงถั่งเช่าสีทอง หลังการเก็บเกี่ยวบริเวณส่วนดอกไปผ่านกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ด้วยกรรมวิธีที่ปลอดภัยแล้ว คงเหลือส่วนที่ไม่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ เนื้อมันฝรั่งต้มที่ถูกใช้ในการเตรียมอาหารเพาะเลี้ยงถั่งเช่าสีทอง ฐานถั่งเช่าสีทอง

ที่มีส่วนของถั่งเช่าติดกับส่วนอาหารแข็ง เหลือทิ้งในกระบวนการในปริมาณมาก วิธีการกำจัดของเหลือเหล่านี้ โดยทั่วไปมันฝรั่งต้มจะถูกนำไปหมักทำปุ๋ย ผักกาดหรือทิ้ง ส่วนฐานถั่งเช่าสีทองสามารถขายได้แต่ราคาต่ำ ซึ่งของเหลือในกระบวนการเหล่านี้ สร้างภาระให้กับเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงถั่งเช่าสีทอง และหน่วยงานภาครัฐในการกำจัดขยะอินทรีย์ หากกำจัดไม่ถูกวิธีมีโอกาสส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ มีงานวิจัยของ Tangsombatvichit *et al.* (2021) ได้นำเนื้อมันฝรั่งต้มสุกที่ถูกใช้ในการเตรียมอาหารเพาะเลี้ยงถั่งเช่าสีทองมาแปรรูปพัฒนาผลิตภัณฑ์เป็นข้าวเกรียบ โดยใช้เนื้อมันฝรั่งต้มสุกทดแทนแป้งมันสำปะหลังหรือแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ เพิ่มคุณค่าทางอาหารให้กับข้าวเกรียบ พบว่า ข้าวเกรียบที่ผลิตจากเนื้อมันฝรั่งต้มสุก มีโปรตีน 1.9% และมีไขมันที่ละลายน้ำได้ 4% นอกจากนี้เนื้อมันฝรั่งต้มสุกใช้ทดแทนแป้งสาลี ทำให้ผู้ที่แพ้แป้งสาลีสามารถทานข้าวเกรียบสูตรนี้ได้ รวมทั้งแป้งในมันฝรั่ง ยังเป็นแป้งที่มีคุณสมบัติทนการย่อยด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารและไม่ถูกดูดซึมในลำไส้เล็กของมนุษย์ (resistant starch) แป้งชนิดนี้มีคุณสมบัติเป็น 프리ไบโอติก (prebiotic) อาหารของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ในลำไส้ใหญ่ ช่วยระบบการขับถ่าย มันฝรั่งยังมีคุณค่าทางอาหารหลากหลาย คือ มีใยอาหารสูง มีวิตามินซี วิตามินบี 6 แคลเซียม และโฟเลตสูง (Beals, 2018) วิธีการหนึ่งที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติของแป้งทนย่อยในมันฝรั่งคือการต้มให้สุกแล้วนำมาพักไว้ให้เย็น จากนั้นทำให้เย็นที่ 0-5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้โครงสร้างแป้งที่ถูกทำลายด้วยความร้อนขึ้นจากการต้มแล้ว เปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างที่ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในกระบวนการย่อยปกติในร่างกายจนผ่านไปถึงลำไส้ใหญ่ได้ (Sawicka and Gupta 2018) สำหรับฐานถั่งเช่าสีทองมีเพียงงานวิจัยของ Ni *et al.* (2009)

ได้นำฐานถึงเข้าสู่ห้องมาศึกษาตรวจสอบสารสำคัญ ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ พบว่า สารออกฤทธิ์ยังตรวจพบอยู่ คือคอร์โคเซปิน ถึงจะเป็นส่วนเหลือทิ้ง แต่ก็มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น

ข้าวเกรียบจัดเป็นอาหารว่างที่คนทั่วไปนิยมบริโภค ข้าวเกรียบผลิตจากแป้งผสมกับวัตถุดิบอื่นที่ให้สี กลิ่นรส เพื่อเพิ่มความน่ารับประทานมากขึ้น มีการเรียกข้าวเกรียบต่าง ๆ กันไปตามชนิดของวัตถุดิบที่ให้สีหรือกลิ่น เช่น ข้าวเกรียบกุ้ง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีกุ้งเป็นส่วนผสม ข้าวเกรียบเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่มีกรรมวิธีผลิตไม่ยุ่งยาก ขนมอบเคี้ยวชนิดนี้เป็นที่นิยมของผู้บริโภคทุกเพศทุกวัย ข้าวเกรียบจัดเป็นอาหารว่าง (snack food) ที่รับประทานได้ทุกช่วงเวลา และสามารถซื้อเป็นของฝากได้อีกด้วย ข้าวเกรียบมีวัตถุดิบหลักในส่วนผสมคือแป้งมันสำปะหลังผสมกับเครื่องปรุงรสผสมให้เข้ากัน แล้วทำให้สุกด้วยการนึ่ง จากนั้นนำมาหั่นเป็นชิ้นขนาดเล็ก แล้วนำไปตากหรืออบให้แห้ง อาจทอดหรือไม่ทอดก่อนบรรจุก็ได้ (Thai community product standard, 2011) ไม่ว่าเศรษฐกิจของประเทศหรือเศรษฐกิจของโลกจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ขนมอบเคี้ยวก็ยังคงมีการแข่งขันทางการตลาดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกปี ตลาดขนมอบเคี้ยวในประเทศไทยก็มีการเติบโตอย่างต่อเนื่องทุกปี เช่นกัน ตั้งแต่ปี 2560 จนถึงปี 2562 ตลาดขนมอบเคี้ยวมีมูลค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2,000 ล้านบาทต่อปี และมีผลิตภัณฑ์ใหม่จากหลายบริษัทออกวางจำหน่ายอย่างต่อเนื่อง มีการคาดการณ์ว่าตลาดนี้ยังมีการเติบโตอย่างต่อเนื่องในอนาคต ข้าวเกรียบก็เป็นขนมอบเคี้ยวที่เป็นที่นิยมของผู้บริโภค มีส่วนแบ่งการตลาดอยู่ไม่น้อย โดยมีมูลค่าทางการตลาดสูง เท่ากับ 1,333 ล้านบาท (Marketeer, 2019) ในปัจจุบันผู้บริโภคส่วนใหญ่หันมาใส่ใจเรื่องสุขภาพมากขึ้นโดยเฉพาะการเลือกรับประทานอาหาร ผู้บริโภคจะเลือกรับประทานอาหารที่มีไขมันต่ำและมีประโยชน์ต่อสุขภาพ

ข้าวเกรียบเป็นอาหารที่มีแป้ง คาร์โบไฮเดรต และไขมันสูง ทำให้ปัจจุบันมีการคัดเลือกวัตถุดิบอื่นทดแทนส่วนประกอบหลักของข้าวเกรียบ เช่น ทดแทนแป้งมันสำปะหลัง ทดแทนน้ำมันปาล์ม เป็นต้น ในขณะเดียวกันก็ศึกษาและวิจัยส่วนผสมอื่นเพื่อเพิ่มคุณค่าทางอาหารให้กับข้าวเกรียบ เช่น การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาทุสริมใบถั่วดาวอินคา การใช้เนื้อปลาทุ เป้งข้าวเหนียว และใบถั่วดาวอินคาเสริมในข้าวเกรียบทำให้ข้าวเกรียบมีโปรตีนเพิ่มเป็น 5% เพิ่มแคลเซียม มีสารต้านอนุมูลอิสระ และมีไขมันน้อยลง เมื่อเทียบกับข้าวเกรียบปลาทุสรทั่วๆไป รวมทั้งลดปริมาณแป้งมันสำปะหลังลง แต่อย่างไรก็ตาม ข้าวเกรียบสูตรนี้มีใยอาหาร 0.8% (Mekarat *et al.*, 2018) ทั้งนี้เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคโดยวัตถุดิบที่นำมาทดแทนนั้นจะเป็นวัตถุดิบที่มีประโยชน์ต่อร่างกายและหาได้ง่ายในท้องถิ่น

เนื่องจากเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ห้องได้ให้ข้อมูลด้วยการสัมภาษณ์แบบมีส่วนร่วมว่า การเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ห้อง 150 ขวด จะมีฐานถึงเข้าสู่ห้องเหลือทิ้ง 5 กิโลกรัม ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต่อยอดผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบที่มีส่วนผสมของเนื้อมันฝรั่งต้มสุกที่เหลือในกระบวนการเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ห้อง ด้วยการเสริมฐานถึงเข้าสู่ห้องที่เหลือในกระบวนการเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ห้อง เริ่มต้นจากการแปรรูปฐานถึงเข้าสู่ห้องให้มีลักษณะเหมาะสมในการผสมลงในอาหาร โดยการทำแห้ง 2 วิธี คือ การอบแห้งและการตากแดดให้แห้ง จากนั้นทำให้เป็นผง แล้วจึงทำการวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์สำคัญของฐานถึงเข้าสู่ห้องผง จากนั้นตรวจวิเคราะห์คุณค่าทางอาหาร การปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค และโลหะหนักที่มีโอกาสปนเปื้อนในฐานถึงเข้าสู่ห้องผง เพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค ขั้นตอนต่อมา กำหนดสูตรข้าวเกรียบเสริมฐานถึงเข้าสู่ห้องผง จากนั้นนำข้าวเกรียบมา

ตรวจวิเคราะห์คุณค่าทางอาหาร การปนเปื้อนของ เชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค โลหะหนักที่มีโอกาสปนเปื้อน ในผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ และวิเคราะห์ปริมาณสาร ออกฤทธิ์สำคัญของข้าวเกรียบเสริมฐานถึงเข้าสู่ท้องผ ให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ข้าวเกรียบ ของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และ สำนักงานคณะกรรมการ อาหารและยา เพื่อเป็นต้นแบบผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ เสริมฐานถึงเข้าสู่ท้อง ที่มีคุณค่าทางอาหารต่อ ผู้บริโภค เพิ่มมูลค่าสินค้าของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ ลดปริมาณของเหลือทิ้งประเภทขยะอินทรีย์ใน กระบวนการเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ท้องตามวิถีเปลี่ยนขยะ ให้เป็นศูนย์ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมฐานถึงเข้าสู่ท้อง และการตรวจสอบ ปริมาณสารออกฤทธิ์สำคัญของฐานถึงเข้าสู่ท้องผ

นำฐานถึงเข้าสู่ท้องจากฟาร์มเกษตรกร เพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ท้อง สมาร์ทคอร์ดี ฟาร์ม ปริมาณ 2 กิโลกรัม มาแบ่งเป็น 2 ส่วนเท่ากัน ส่วนแรก 1 กิโลกรัม ทำให้แห้งด้วยวิธีการอบด้วยตู้อบลมร้อน ที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ส่วน ที่สอง 1 กิโลกรัม ทำให้แห้งด้วยการตากแดดเป็น ระยะเวลา 3 วัน ช่วงเวลา 8.00 - 16.30 น. จากนั้น นำมาปั่นให้ละเอียดเป็นผง ขั้นตอนการตรวจสอบ ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของฐานถึงเข้าสู่ท้อง ผ ทำโดยนำตัวอย่างฐานถึงเข้าสู่ท้องผปริมาณ 1 กรัม เติมน้ำกลั่น (1:1) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปสกัดสารคอร์ไดเซปิน และ อะดีโนซีน ด้วย เครื่องอัลตราโซนิกที่มีคลื่นความถี่สูง 75 วัตต์ เป็น เวลา 30 นาที นำสารละลายตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงที่ ความเร็วรอบ 6,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ทำการกรองสารละลายด้วยตัว กรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร จากนั้นนำสารละลาย

กรองแล้วไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีเหลว สมรรถนะสูง (HPLC) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ เปรียบเทียบ กับกราฟมาตรฐานของสารสารคอร์ไดเซปิน และ อะดีโนซีนที่บริสุทธิ์ ในหน่วย 100 กรัม คัดแปลงจาก Huang *et al.* (2009)

2. การตรวจวิเคราะห์คุณค่าทางอาหารของฐานถึงเข้าสู่ ท้องผ

นำฐานถึงเข้าสู่ท้องผที่ผ่านการทำให้แห้ง ด้วยวิธีการอบด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง มาตรวจวิเคราะห์คุณค่า ทางอาหาร ดังนี้ คือ ความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน และ ใยอาหาร คัดแปลงวิธีของ AOAC (2019) คาร์โบไฮเดรต พลังงานจากไขมัน และพลังงานทั้งหมด คัดแปลง จากวิธีของ Sullivan and Carpenter (1993)

3. การตรวจสอบสารปนเปื้อนและเชื้อจุลินทรีย์ก่อ โรคของฐานถึงเข้าสู่ท้องผ

นำฐานถึงเข้าสู่ท้องผที่ผ่านการทำให้แห้ง ด้วยวิธีการอบด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง มาตรวจสอบโลหะ หนัก คือ สารหนู ตะกั่ว ปรอท คัดแปลงวิธีของ AOAC (2019) สำหรับการตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ก่อ โรค ทำโดยนำฐานถึงเข้าสู่ท้องผ 25 กรัมมาใส่ใน 0.85% สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ 225 กรัม การตรวจสอบ *Escherichia coli* ด้วยวิธี MPN คัดแปลง จาก FDA BAM online (2017) ทดสอบด้วยอาหาร เหลวเลี้ยงเชื้อ LST broth ที่บรรจุหลอดดักก๊าซ (Durham tube) นำหลอดทดลองเข้าสู่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำออกมา พิจารณามีหลอดใดที่มีก๊าซเกิดขึ้น ใช้ลูปตะ ของเหลวมานำใส่ในหลอดอาหารเหลวเลี้ยงเชื้อ BGLB broth นำหลอดเข้าสู่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สังเกตหลอดใดที่มีก๊าซเกิดขึ้น ใช้ลูปตะของเหลวมานำใส่ในหลอดอาหารเหลวเลี้ยง เชื้อ EC broth นำหลอดเข้าสู่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศา

เซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สังเกตหลอดใดที่มีก๊าซเกิดขึ้น ใช้ลูปตะขวงเหลว มา spread บนอาหารแข็งเลี้ยงเชื้อ EMB agar นำเข้าตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตรวจสอบผลการทดลองสำหรับ *Salmonella* spp. ตรวจสอบบนอาหารแข็งเลี้ยงเชื้อ Brilliant green agar *Staphylococcus aureus* ตรวจสอบบนอาหารแข็งเลี้ยงเชื้อ Baird-Parker agar วิธีการดัดแปลงจาก AOAC (2019)

4. การกำหนดสูตรข้าวเกรียบเสริมฐานถึงเข้าสู่ท้องผิงและการตรวจวิเคราะห์คุณค่าทางอาหาร

สูตรข้าวเกรียบดัดแปลงจาก Tangsombatvichit *et al.* (2021) มีส่วนผสมแสดงดัง Table 1 แต่ละสูตรทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิธีการทำข้าวเกรียบผสม

ส่วนผสมต่าง ๆ นวดให้เข้ากัน จากนั้นปั้นเป็นก้อนตามยาวมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ห่อด้วยฟิล์มใสสำหรับห่ออาหารทนความร้อน แล้วนำไปนึ่งด้วยลังถึง เป็นเวลา 40 นาที นำมาพักไว้ให้เย็น ทำการหั่นเป็นแผ่น อบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง เก็บใส่ถุงพลาสติกใสสะอาดและที่ไม่มีความชื้น จากนั้นนำข้าวเกรียบแต่ละสูตรมาตรวจวิเคราะห์คุณค่าทางอาหาร ดังนี้ คือ ความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน และใยอาหาร ดัดแปลงวิธีของ AOAC (2019) คาร์โบไฮเดรต พลังงานจากไขมัน และพลังงานทั้งหมด ดัดแปลงจากวิธีของ Sullivan and Carpenter (1993)

Table 1 Ingredients of crispy snack 3 treatments in this experiment

Ingredients	Treatment 1	Treatment 2	Treatment 3
Tapioca flour (g)	500	500	500
Boiled potato (g)	500	500	500
Sugar (g)	15	15	15
Iodine salt (g)	15	15	15
Pepper (g)	5	5	5
Rice bran oil (ml)	40	40	40
Water (ml)	200	200	200
dried solid medium with mycelium remained byproducts powder (g)	0	30	50

5. การตรวจสอบสารปนเปื้อนและเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคในข้าวเกรียบเสริมฐานถึงเข้าสู่ท้องผิง

นำข้าวเกรียบแต่ละสูตรปริมาณ 25 กรัม มาใส่ใน 0.85% สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ 225 กรัม บรรจุในถุงพลาสติกสะอาด นำไปต้บด้วยเครื่อง stomacher 1 นาที จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างข้าวเกรียบแต่ละสูตรมาตรวจสอบโลหะหนัก คือ สารหนู ตะกั่วปรอทดัดแปลงวิธีการของ AOAC (2019)

สำหรับการตรวจสอบ *Escherichia coli* ด้วยวิธี MPN ดัดแปลงจาก FDA BAM online (2017) ตรวจสอบบนอาหารแข็งเลี้ยงเชื้อ EMB agar นำเข้าตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการตรวจสอบการทดลอง สำหรับ *Bacillus cereus* ตรวจสอบบนอาหารแข็งเลี้ยงเชื้อ Mannitol egg yolk polymyxin agar วิธีการดัดแปลงจาก FDA BAM online (2019) *Salmonella* spp. ตรวจสอบบนอาหารแข็งเลี้ยงเชื้อ Brilliant green agar

Staphylococcus aureus ตรวจสอบบนอาหารแข็งเลี้ยงเชื้อ Baird-Parker agar สำหรับ yeast and mold ตรวจสอบบนอาหารแข็งเลี้ยงเชื้อ Dichloran rose Bengal chloramphenicol (DRBC) agar วิธีการดัดแปลงจาก AOAC (2019)

6. การตรวจสอบปริมาณสารออกฤทธิ์สำคัญในข้าวเกรียบเสริมฐานถึงเข้าสู่ท้องผอง

นำข้าวเกรียบแต่ละสูตรมาทำให้เป็นผง จากนั้นนำข้าวเกรียบผงปริมาณ 1 กรัม เติมน้ำตาลคือน้ำ (1:1) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปสกัดสารคอร์โคเซปิน และอะดีโนซีน ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ที่มีคลื่นความถี่สูง 75 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 6,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง แล้วเปิดสารละลายใส่ด้านบนมาใส่ในหลอดทดลองอันใหม่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ทำการกรองสารละลายใส่ด้วยตัวกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร จากนั้นนำสารละลายกรองแล้วไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารสารคอร์โคเซปิน และ อะดีโนซีนที่บริสุทธิ์ ในหน่วย 100 กรัม ดัดแปลงจาก Huang *et al.* (2009)

7. การศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคทั่วไป

นำข้าวเกรียบทอดแต่ละสูตร มาศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคทั่วไปต่อผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเสริมฐานถึงเข้าสู่ท้องผองเปรียบเทียบกับข้าวเกรียบที่ไม่เสริมฐานถึงเข้าสู่ท้องผอง ใช้แบบสอบถามประเมินระดับความชอบผ่านการทดสอบทางประสาทสัมผัส วิธี 9-point hedonic scale ใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน เพื่อประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบด้านลักษณะปรากฏ สี เนื้อสัมผัส รสชาติ กลิ่น ความกรอบ และความชอบโดยรวม ตามวิธีของ Naviglio *et al.* (2014)

8. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ข้อมูลแต่ละชุดการทดลอง มีการวิเคราะห์ผลในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน วิเคราะห์ผลความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างชุดการทดลองด้วยโปรแกรม one-way analysis of variance (ANOVA) SPSS 23.0 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

เมื่อนำฐานถึงเข้าสู่ท้องผอง มาทำให้แห้งด้วยการอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการตากแดดในเดือนตุลาคม 2563 เวลา 8.00 - 16.30 น. เป็นเวลา 3 วัน ผลการทดลองพบว่า น้ำหนักแห้งของฐานถึงเข้าสู่ท้องผองที่ผ่านการอบ เท่ากับ 43.76% ส่วนน้ำหนักแห้งของฐานถึงเข้าสู่ท้องผองที่ผ่านการตากแดด เท่ากับ 40.00% เมื่อนำฐานถึงเข้าสู่ท้องผองแห้งทั้ง 2 แบบไปวิเคราะห์สารออกฤทธิ์สำคัญ คือ คอร์โคเซปินและอะดีโนซีน ผลการทดลองพบว่า ฐานถึงเข้าสู่ท้องผองแบบอบด้วยตู้อบลมร้อน มีสารออกฤทธิ์สำคัญทั้ง 2 ชนิด มากกว่าฐานถึงเข้าสู่ท้องผองแบบตากแดด (Table 2) เนื่องจากการตากแดดเป็นเวลานาน 3 วัน ไม่สามารถควบคุมความร้อนจากรังสียูวีให้คงที่ได้ และความร้อนแต่ละช่วงเวลาของการตากแดดทั้งวัน มีค่าไม่เท่ากัน หากช่วงเวลากากแดดที่มีความร้อนสูง อาจส่งผลทำให้สารออกฤทธิ์สำคัญทั้ง 2 ชนิด เสื่อมสภาพได้ จึงทำให้การวัดค่าคอร์โคเซปินและอะดีโนซีน น้อยกว่าการอบด้วยตู้อบลมร้อน มิงานวิจัยที่ทำการศึกษากการทำให้เข้าสู่ท้องผองให้แห้งด้วยวิธีการ infrared freeze drying ที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่า การทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 หรือ 60 องศาเซลเซียส สารออกฤทธิ์สำคัญ คอร์โคเซปินและอะดีโนซีน รวมทั้งสารต้านอนุมูลอิสระ ยังคงอยู่ในปริมาณมากกว่า ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

เป็นไปได้ว่าอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส มีผลต่อการทำลายโครงสร้างทางชีวเคมีของสารสำคัญที่ทำการตรวจวิเคราะห์ (Wu *et al.*, 2019) ในขณะที่ Que *et al.* (2008) ได้เปรียบเทียบวิธีการทำแห้งผักทองให้แห้งด้วยการอบแห้งและการแช่เยือกแข็ง พบว่า การทำแห้งด้วยการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน ทำให้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ สารต้านอนุมูลอิสระ คุณภาพดีกว่าการแช่เยือกแข็ง เช่นเดียวกันกับ Paramanandam

et al. (2021) ได้รายงานผลการวิจัยว่า การทำผลมะเดื่อหั่นชิ้นให้แห้งด้วยวิธีการอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ส่งผลให้คุณค่าทางอาหารที่ตรวจสอบมีมากกว่าการตากแดด เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนใช้ระยะเวลาสั้นในการดึงน้ำออกจากเซลล์ การเสียดสภาพของโครงสร้างสารชีวเคมีจึงเกิดได้น้อยกว่าการตากแดดที่ใช้ระยะเวลา

Table 2 Measurement of cordycepin and adenosine of solid medium with mycelium remained byproducts under two dried conditions

active ingredient of solid medium with mycelium remained byproducts	dried conditions	
	hot air oven at 60°C	exposed to the sun (3 days)
cordycepin (mg/100g)	583.00 ^a ±1.63	407.00 ^b ±0.82
adenosine (mg/100g)	47.67 ^a ±0.47	14.00 ^b ±0.82

Mean value of 3 replicate measurements ± standard deviation

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

Table 3 The nutritional value of solid medium with mycelium remained byproducts under dried condition via hot air oven at 60°C

Nutrient content	solid medium with mycelium remained byproducts
moisture (g/100g)	6.58±0.13
ash (g/100g)	0.45±0.01
protein(g/100g)	8.95±0.08
carbohydrate(g/100g)	82.87±0.11
fat(g/100g)	1.25±0.05
Calories from fat (Kcal/100g)	11.38±0.15
Calories (Kcal/100g)	378.40±0.50
dietary fiber(g/100g)	12.03±0.04

Mean value of 3 replicate measurements ± standard deviation

จากนั้นเลือกฐานถั่งเช่าสีทองผงแบบอบด้วยตู้อบลมร้อน มาตรวจวิเคราะห์คุณค่าทางอาหาร ผลการทดลองพบว่า มีโปรตีนเท่ากับ 8.95 ± 0.08 กรัมต่อ 100 กรัม มีคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 82.87 ± 0.11 กรัมต่อ 100 กรัม มีไขมันอาหารละลายน้ำได้เท่ากับ 12.03 ± 0.04 กรัมต่อ 100 กรัม ในขณะที่มีไขมันเท่ากับ 1.25 ± 0.05 กรัมต่อ 100 กรัม (Table 3) เนื่องจากฐานถั่งเช่าสีทองมีส่วนของเส้นใยถั่งเช่าและอาหารสังเคราะห์เลียนแบบสภาพธรรมชาติในการเจริญของถั่งเช่าสีทอง สูตรอาหารสังเคราะห์ทั่วไปมีส่วนประกอบของ ข้าว ธัญพืชต่าง ๆ น้ำตาล น้ำดื่มจากมันฝรั่ง เปปโตน ยีสต์สกัด ไข่ไก่ ดักแด้ไหม และวิตามินบี 1 มีรายงานวิจัยพบว่า ดักแด้ไหมเป็นแหล่งโปรตีนที่ดี มีโปรตีนประมาณ 39% (Sihamala *et al.*, 2018) ส่วนประกอบต่าง ๆ ของอาหารสังเคราะห์สำหรับเพาะเลี้ยงถั่งเช่า ไม่มีสารอาหารที่อยู่ในกลุ่มไขมัน จึงทำให้การตรวจวิเคราะห์ไขมันของฐานถั่งเช่าสีทองผงมีปริมาณต่ำ สำหรับการตรวจวิเคราะห์ไขมันอาหารของฐานถั่งเช่าสีทองผงมีปริมาณสูงนั้นมาจากธัญพืชต่าง ๆ คือ พืชตระกูลถั่วที่เป็นส่วนประกอบของอาหารสังเคราะห์ (Mahidol University, 2017) สำหรับการตรวจสอบโลหะหนักที่อาจปนเปื้อนมากับฐานถั่งเช่าสีทอง ผลการทดลองพบว่า ฐานถั่งเช่าสีทองผงในการทดลองครั้งนี้ตรวจพบ สารหนู ตะกั่ว เท่ากับ 0.1 และ น้อยกว่า 0.012 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ตามลำดับ แต่ตรวจไม่พบปรอท อย่างไรก็ตามการตรวจพบสารหนู และ ตะกั่ว ไม่เกินเกณฑ์คุณภาพมาตรฐานที่กำหนด (สารหนู ไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตะกั่ว ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปรอท ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) (Food and Drug Administration, 2019) รวมทั้งเมื่อนำฐานถั่งเช่าสีทองผงมาตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค คือ *E. coli* *Salmonella* spp. และ *S. aureus* ผลการทดลองพบว่า ไม่พบเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด ผลการทดลองฐานถั่งเช่าสีทองผงมีความปลอดภัยสามารถนำมาเป็นส่วนประกอบในอาหารได้ ตามแนวการพิจารณาอนุญาตของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (data not shown) (Food and Drug Administration, 2019)

เมื่อพิจารณาประเมินความปลอดภัยของฐานถั่งเช่าสีทองผงตามคุณภาพมาตรฐานที่สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กำหนดเรียบร้อยแล้ว เริ่มทำการผลิตข้าวเกรียบที่มีส่วนผสมของมันฝรั่งต้มสุก และเสริมฐานถั่งเช่าสีทองผงปริมาณ 0% 3% และ 5% ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ข้าวเกรียบแต่ละสูตรเมื่อผ่านการทอดด้วยน้ำมันปาล์มแล้วมีลักษณะปรากฏดัง Figure 1 คือ ข้าวเกรียบที่ไม่ได้เสริมฐานถั่งเช่าสีทอง (Figure 1A) ข้าวเกรียบที่เสริมฐานถั่งเช่าสีทอง 3% (Figure 1B) และ ข้าวเกรียบที่เสริมฐานถั่งเช่าสีทอง 5% (Figure 1C)

Table 4 The nutritional value of crispy snack 3 treatments compared with other research of crispy snack

Nutrient content	Crispy snack added dried solid medium with mycelium remained byproducts powder			Tangsombatvichit <i>et al.</i> (2021)
	0%	3%	5%	
moisture (g/100g)	9.86 ^a ±0.45	9.87 ^a ±0.26	9.81 ^a ±0.04	11.78±0.14
ash (g/100g)	3.21 ^a ±0.04	3.16 ^a ±0.06	3.15 ^a ±0.07	3.56±0.15
protein (g/100g)	1.89 ^c ±0.02	2.25 ^b ±0.05	2.56 ^a ±0.04	1.91±0.14
carbohydrate (g/100g)	74.33 ^a ±0.34	73.84 ^a ±0.20	73.85 ^a ±0.31	76.79±0.34
fat (g/100g)	5.85 ^a ±0.10	5.88 ^a ±0.07	5.88 ^a ±0.02	5.84±0.08
calories from fat (Kcal/100g)	53.04 ^a ±0.57	52.89 ^a ±0.60	52.61 ^a ±0.14	53.06±0.36
calories (Kcal/100g)	354.86 ^a ±0.58	354.73 ^a ±0.40	355.75 ^a ±0.31	357.53±2.72
dietary fiber(g/100g)	3.96 ^c ±0.12	6.48 ^b ±0.05	7.32 ^a ±0.08	4.02±0.24
water activity (25°C)	0.36 ^a ±0.01	0.35 ^a ±0.02	0.34 ^a ±0.01	0.53±0.04

Mean value of 3 replicate measurements ± standard deviation

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

เมื่อนำข้าวเกรียบแต่ละสูตรมาตรวจสอบ
โลหะหนักที่อาจปนเปื้อน ผลการทดลองพบว่า ข้าว
เกรียบทั้ง 3 สูตรไม่พบสารหนู ตะกั่ว และปรอท
จากนั้นนำข้าวเกรียบแต่ละสูตรมาตรวจสอบการ

ปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค คือ *S. aureus* *B.*
cereus *E. coli* *Salmonella* spp. และ ราและยีสต์ ผล
การทดลองพบว่า ข้าวเกรียบทั้ง 3 สูตรตรวจไม่พบ
การปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (Table 5)

Table 5 Microbiological testing of crispy snack 3 treatments

Microorganisms	Crispy snack added dried solid medium with mycelium remained byproducts powder			Standard level of crispy snack (Thai community product standard, 2011)
	0%	3%	5%	
<i>Staphylococcus aureus</i> (cfu/g)	none	none	none	<100
<i>Bacillus cereus</i> (cfu/g)	none	none	none	<1×10 ³
<i>Escherichia coli</i> (MPN/g)	<3.0	<3.0	<3.0	<100
<i>Salmonella</i> spp. (per 25 g)	ND	ND	ND	Not detected in 25 g
Yeasts and Molds (cfu/g)	none	none	none	<100

none mean not detectable at dilution 1:10

ND mean not detected

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ผลึกภัณฑ์ข้าวเกรียบเสริมฐานถึงเข้าสีทองผงที่พัฒนาขึ้นมามีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ตามข้อกำหนดคุณภาพมาตรฐานการผลิตข้าวเกรียบประเภทข้าวเกรียบดิบ (Thai community product standard, 2011) และแนวการพิจารณาอนุญาตของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (Food and Drug Administration, 2019) จากนั้นนำข้าวเกรียบแต่ละสูตรมาตรวจสอบปริมาณสารออกฤทธิ์สำคัญ คือ คอรัโดเซปินและอะดีโนซีน ผลการทดลองพบว่า ข้าวเกรียบสูตรที่เสริมฐานถึงเข้าสีทองผง 5% พบคอรัโดเซปินและอะดีโนซีนมากที่สุด คือ 43.00 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และ 2.37 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ รองลงมาคือ ข้าวเกรียบสูตรที่เสริมฐานถึงเข้าสีทองผง 3% ข้าว

เกรียบทั้ง 3 สูตร มีคอรัโดเซปินและอะดีโนซีนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น $p < 0.05$ (Table 6) อย่างไรก็ตาม การผลิตข้าวเกรียบเสริมฐานถึงเข้าสีทองผง ต้องเป็นไปตามแนวการพิจารณาอนุญาตของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา คือ มีปริมาณคอรัโดเซปิน ไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และมีปริมาณอะดีโนซีน ไม่เกิน 170 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม (Food and Drug Administration, 2019) ดังนั้นข้าวเกรียบเสริมฐานถึงเข้าสีทองผง สูตรที่เหมาะสมและปลอดภัยต่อผู้บริโภค คือ ข้าวเกรียบสูตรที่เสริมฐานถึงเข้าสีทองผง 3% มีคอรัโดเซปินและอะดีโนซีน อยู่ในเกณฑ์คุณภาพมาตรฐานกำหนด (Table 6)

Table 6 Measurement of cordycepin and adenosine of crispy snack 3 treatments

Bioactive compounds of solid medium with mycelium remained byproducts	Crispy snack added dried solid medium with mycelium remained byproducts powder			Standard level (Food and Drug Administration, 2019)
	0%	3%	5%	
cordycepin (mg/100g)	$0.00^c \pm 0.00$	$26.33^b \pm 0.47$	$43.00^a \pm 0.00$	<30
adenosine (mg/100g)	$1.13^c \pm 0.05$	$1.40^b \pm 0.08$	$2.37^a \pm 0.03$	<170

Mean value of 3 replicate measurements $\pm$ standard deviation

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

เมื่อนำข้าวเกรียบทอดทั้ง 3 สูตร มาทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคทั่วไป ด้วยวิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัส ผลการทดสอบพบว่า ข้าวเกรียบทั้ง 3 สูตรมีคะแนนความชอบในแต่ละด้านแตกต่างกัน ($p < 0.05$) ข้าวเกรียบสูตรที่เสริมฐานถึงเข้าสีทองผง 3% มีคะแนนความชอบเฉลี่ยของลักษณะปรากฏ สีของข้าวเกรียบ เนื้อสัมผัส รสชาติและกลิ่น ความกรอบ และความชอบโดยรวมมากที่สุด รองมาคือ ข้าวเกรียบสูตรที่ไม่เสริมฐานถึงเข้าสีทองผง ในขณะที่ข้าวเกรียบสูตรที่เสริมฐานถึงเข้าสีทองผง 5% มี

คะแนนความชอบเฉลี่ยของลักษณะปรากฏ สีของข้าวเกรียบ และความชอบโดยรวมน้อยที่สุด (Table 7) เนื่องจากฐานถึงเข้าสีทองผงมีสีน้ำตาลเมื่อเสริมเข้าไปในข้าวเกรียบแล้วนำไปทอด จะเห็นเป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้น (Figure 1) ส่งผลให้ได้รับคะแนนความชอบเฉลี่ยของลักษณะปรากฏ สีของข้าวเกรียบ และความชอบโดยรวมน้อยกว่าข้าวเกรียบอีก 2 สูตร

Table 7 Sensory evaluation of crispy snack 3 treatments

Sensory characteristics	crispy snack added dried solid medium with mycelium remained byproducts powder		
	0%	3%	5%
appearance	7.57 ^b ±0.62	8.00 ^a ±0.45	6.80 ^c ±0.60
color	7.30 ^b ±0.59	7.80 ^a ±0.40	6.17 ^c ±0.69
texture	7.50 ^{ab} ±0.50	7.70 ^a ±0.59	7.23 ^b ±0.56
taste	7.57 ^a ±0.62	7.67 ^a ±0.65	7.47 ^a ±0.56
smell	6.77 ^a ±0.50	6.77 ^a ±0.56	6.73 ^a ±0.63
factorability	7.30 ^a ±0.46	7.37 ^a ±0.60	7.23 ^a ±0.67
Overall acceptability	7.23 ^a ±0.56	7.40 ^a ±0.49	6.60 ^b ±0.66

Mean value of 30 replicate measurements ± standard deviation

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

ปัจจุบันผู้บริโภคส่วนใหญ่หันมาใส่ใจเรื่องสุขภาพมากขึ้น โดยเฉพาะการเลือกรับประทานอาหาร ผู้บริโภคจะเลือกรับประทานอาหารที่มีไขมันต่ำและมีประโยชน์ต่อสุขภาพ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจึงมีงานวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง มีการคัดเลือกวัตถุดิบอื่นทดแทนส่วนประกอบหลักของข้าวเกรียบ เช่น ทดแทนแป้งมันสำปะหลัง ทดแทนน้ำมันปาล์ม เป็นต้น ในขณะที่เดียวกันก็ศึกษาและวิจัยส่วนผสมอื่นเพื่อเพิ่มคุณค่าทางอาหารให้กับข้าวเกรียบ และเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น มีงานวิจัยที่ทำการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจากธัญพืชผสมงาดำใน จ.ปทุมธานี ธัญพืชที่ใช้มี ข้าวเหนียวขาว ข้าวเหนียวดำ ข้าวกล้อง ลูกเดือย ถั่วแดง เมล็ดทานตะวัน เผือก หรือกล้วยน้ำว้า เปรียบเทียบกับข้าวเกรียบผสมงาดำ สูตรพื้นฐานที่ใช้แป้งข้าวเจ้า พบว่า ข้าวเกรียบงาดำผสมข้าวเหนียวขาวเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคมากที่สุด สามารถผลิตจำหน่ายเป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าต่อไปได้ (Yimtoe *et al.*, 2012) ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาทะเลผสมแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาเก อัตราส่วน 1:1:4 เสริมด้วยสมุนไพรผงได้แก่ ข่า

ตะไคร้ ใบมะกรูด และพริก อัตราส่วน 1:2:2:1 ตามลำดับ ในจังหวัดนราธิวาส ข้าวเกรียบสูตรที่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค มีโปรตีน 8.15% มีไขมัน 6.87% แต่อย่างไรก็ตาม ข้าวเกรียบสูตรนี้มีไขมันถึง 25.69% (Kheeree, 2015) ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบมันเทศที่ปลูกในชุมชนทับน้ำ บางปะหัน จ.พระนครศรีอยุธยา งานวิจัยนี้ใช้มันเทศหนึ่งทดแทนแป้งมันสำปะหลัง โดยสูตรข้าวเกรียบที่ผู้บริโภคให้การยอมรับมากที่สุดคือ แป้งมันสำปะหลัง 300 กรัม มันเทศหนึ่ง 500 กรัม รายงานว่า ข้าวเกรียบมันเทศ มีแอนโทไซยานิน 125.90 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และ เบต้าแคโรทีน 97.80 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม (Thongrak *et al.*, 2016) รวมทั้งผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาทุเรียนใบถั่วดาวอินคาที่เลือกใช้เนื้อปลาทุเรียน ข้าวเหนียว และใบถั่วดาวอินคา เสริมในข้าวเกรียบทำให้มีโปรตีนถึง 5% เพิ่มแคลเซียม มีสารต้านอนุมูลอิสระ และมีไขมันน้อยลงเมื่อเทียบกับข้าวเกรียบปลาสูตรทั่วไป รวมทั้งลดปริมาณแป้งมันสำปะหลังลง (Mekarat *et al.*, 2018)

สรุป

จากการพัฒนาข้าวเกรียบที่มีส่วนผสมของมันฝรั่งต้มสุกและเสริมฐานถั่งเช่าสีทองที่เหลือทิ้งจากกระบวนการเพาะเลี้ยง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าข้าวเกรียบที่มีส่วนผสมของเนื้อมันฝรั่งต้มสุกผสมกับแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 1:1 และเสริมฐานถั่งเช่าสีทองผง 3% เป็นสูตรที่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคทั่วไป ซึ่งมีคะแนนความชอบโดยรวมเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 7.40 ± 0.49 จึงเหมาะสมควรต่อการผลิตเป็นข้าวเกรียบเสริมฐานถั่งเช่าสีทอง ที่มีโปรตีนเท่ากับ 2.25 ± 0.05 กรัมต่อ 100 กรัม มีใยอาหารละลายน้ำได้เท่ากับ 6.48 ± 0.05 กรัมต่อ 100 กรัม ข้าวเกรียบสูตรนี้ตรวจไม่พบสารหนู ตะกั่ว และปรอท และไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค คือ *S. aureus* *B. cereus* *E. coli* *Salmonella* spp. และ ราและยีสต์ จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบเสริมฐานถั่งเช่าสีทองผงที่พัฒนาขึ้นมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ตามข้อกำหนดคุณภาพมาตรฐานการผลิตข้าวเกรียบประเภทข้าวเกรียบคิบ รวมทั้งข้าวเกรียบสูตรนี้มีคอรัไคเซปิน 26.33 ± 0.47 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และอะดีโนซีน 1.40 ± 0.08 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ซึ่งอยู่ในเกณฑ์คุณภาพมาตรฐานของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยากำหนด งานวิจัยนี้เป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาและเพิ่มคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ ด้วยการใช้น้ำมันฝรั่งต้มสุก ทดแทนแป้งมันสำปะหลัง และเสริมฐานถั่งเช่าสีทองผง นอกจากคุณค่าทางอาหารแล้ว กระบวนการผลิต การเลือกใช้วัตถุดิบในส่วนผสม ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้บริโภคเป็นสำคัญด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัย จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม จาก

สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ผ่านทุนงบประมาณการวิจัยและนวัตกรรมปี 2563 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 2019. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 21st ed. Gaithersburg. AOAC International.
- Beals, KA. 2018. **A review of potatoes and their role in global health**. Available Source: <https://www.potatogoodness.com/wp-content/uploads/2016/09/Potato-nutrition-white-paper.pdf>, April 3, 2018.
- FDA BAM online. 2017. **BAM Chapter 4: Enumeration of *Escherichia coli* and the Coliform bacteria**. Available Source: <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-4-enumeration-escherichia-coli-and-coliform-bacteria>, October 6, 2021.
- FDA BAM online. 2019. **BAM Chapter 14: *Bacillus cereus***. Available Source: <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-14-bacillus-cereus>, October 6, 2021.
- Food and Drug Administration. 2019. **Guidelines for considering the permission of the *Cordyceps militaris* as an ingredient in food**. Available Source: <https://www.fda.moph.go.th/sites/food/Permission/GoldenBucket.pdf>, September 10, 2021. (in Thai)
- Huang, L., Li, Q., Chen, Y., Wang, X. and Zhou, X. 2009. Determination and analysis of cordycepin and adenosine in the products of *Cordyceps* spp.

- African Journal of Microbiology Research** 3(12): 957-961.
- Kanokmedhakul, T., Fuangpaiboon, N. and Tangwongchai, R. 2021. Development of Crispy Snack from Banana (*Musa sapientum* L. cv. Namwa), pp. 512-524. In Wongratanacheewin, S. ed. **The 22nd National Graduate Research Conference**. Khon Kaen University, Thailand. (in Thai)
- Kheeree, N. 2015. Study on the Chemical Properties of Fried Fish Chip with Mixed Herbs, Galangal, Lemon Grass, Kaffir Lime Leaves and Chili. **Princess of Naradhiwas University Journal** 7(2): 129-136. (in Thai)
- Mahidol University. 2017. **Cultivation of *Cordyceps militaris* media**. Available Source: https://patentpub.ipthailand.go.th/_AppPublic/PublicAttach.aspx?id=11705500075, October 6, 2021. (in Thai)
- Marketeer. 2019. **Market share of snack**. Available Source: <https://marketeeronline.co/archives/125874>, October 6, 2021. (in Thai)
- Mekarat, S., Chedoloh, R., Puwaphut, R. and Hilae, A. 2018. The development on formulation of fish cracker supplemented with sachu peanut leaf. **Princess of Naradhiwas University Journal** 11(1): 125-134. (in Thai)
- Naviglio, D., Ferrara, L., Formato, A. and Gallo, M. 2014. Efficiency of conventional extraction technique compared to rapid- solid liquid dynamic extraction (RSLDE) in the preparation of bitter liquors and elixirs. **IOSR Journal of Pharmacy** 4(5): 14-22.
- Ni, H., Zhou, X., Li, H. and Huang, W. 2009. Column chromatographic extraction and preparation of cordycepin from *Cordyceps militaris* waster medium. **Journal of Chromatography B** 877: 2135-2141.
- Paramanandam, V., Jagadeesan, G., Muniyandi, K., Manoharan, A.L., Nataraj, G., Sathyanarayanan, S. and Thangaraj, P. 2021. Comparative and variability analysis of different drying methods on phytochemical, antioxidant and phenolic contents of *Ficus auriculata* Lour. Fruit. **Phytomedicine Plus** 1(3): 1-9.
- Que, F., Mao, L., Fang, X. and Wu, T. 2008. Comparison of hot air- drying and freeze- drying on the physicochemical properties and antioxidant activities of pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.) flours. **International Journal of Food Science & Technology** 43(7): 1195-1201.
- Sawicka, B. and Gupta, P.D. 2018. Resistant starch in potato. **Acta Scientiarum Polonorum Agricultura** 17(3): 1-17.
- Shrestha, B., Zhang, W., Zhang, Y. and Liu, X. 2012. The medicinal fungus *Cordyceps militaris*: research and development. **Mycological Progress** 11(3): 599-614.
- Sihamala, O., Saraboot, N., Chunthanom, P. and Bhulaidok, S. 2018. Nutritional value of Edible insects in Kalasin Province. **King Mongkut's Agricultural Journal** 36(2): 98-105. (in Thai)
- Sullivan, D.M. and Carpenter, D.E. 1993. **Method of Analysis for Nutrition Labeling**. AOAC International, Arlington.
- Tangsombatvichit, P., Nochai, K., Robmuang, D. and Buranasaksee, U. 2021. The development

of crispy snack from boiled potatoes remain
in *Cordyceps militalis* culture processing.

**The Journal of Science and Technology
RMUTSB 5(1): 60-67. (in Thai)**

Tapingkae, T. 2012. Know about *Cordyceps* mushrooms.

Khakaset Magazine 36(4): 113-117. (in Thai)

Thai community product standard. 2011. **Crispy snack,**

khaogriab. Available Source: http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps107_54.pdf, October 6, 2021.
(in Thai)

Thongrak, P. , Rawdsiri, S. , Wongsangthum, W. ,
Khunthachai, W. and Thaisom, R. 2016.

**Research Report on The knowledge
management project for further development
of food products from sweet potatoes of
the community standard communities,
Ban-tubnum, Bang Pahan district Ayutthaya.**
Rajamangala University of Technology
Suvarnabhumi, Phra Nakhon Si Ayutthaya.
(in Thai)

Wu, X., Zhang, M. and Bhandari, B. 2019. A novel
infrared freeze drying (IRFD) technology to
lower the energy consumption and keep the
quality of *Cordyceps militaris*. **Innovative
Food Science & Emerging Technologies**
54(4): 34-42.

Yimtoe, S., Phuksuksakul, A. and Puengksam, O. 2012.

**Research Report on Development of cereals
cracker product.** Food and Nutrition Program,
Faculty of Home Economics Technology,
Rajamangala University of Technology
Thanyaburi. (in Thai)

การเพิ่มความพร้อมและส่งเสริมศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวา โดยการปรับสภาพด้วยความร้อนและคลื่น

Enhancement of Biogas Production Potential from Water Hyacinth by Thermal and Waved Pre-Treatment

นันทนัฐ ศรีประเสริฐ* และ พรพงศ์ ศรีประเสริฐ

Nanthanat Sriprasert* and Pakpong Sriprasert

Received: 4 August 2021, Revised: 23 March 2022, Accepted: 8 June 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการปรับสภาพผักตบชวาโดยใช้ความร้อนและการให้คลื่นเพื่อเพิ่มความพร้อมและส่งเสริมศักยภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เทคนิคการปรับสภาพด้วยความร้อนที่ศึกษาคือ การใช้เตาอบลมร้อน อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ และการให้คลื่นไมโครเวฟและคลื่นอัลตราโซนิก ด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาที่แตกต่างกัน ประสิทธิภาพการปรับสภาพผักตบชวาพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในรูปสารละลายได้แก่ CODs และ VFAs โดยพบว่า CODs มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและระยะเวลาการให้ความร้อนและคลื่นที่สูงขึ้น การให้คลื่นไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 220 °C นาน 10 นาที ให้ CODs สูงที่สุดคือ 3,498 mg/L ขณะที่อัตราการเพิ่มของค่า CODs สูงสุดเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการปรับสภาพคิดเป็น 17.8 เท่าเมื่อให้คลื่นไมโครเวฟที่ 160 °C นาน 10 นาที ขณะที่การให้คลื่นอัลตราโซนิกมีอัตราการเพิ่มขึ้นของ CODs ต่ำที่สุดคือ 1.0 - 2.3 เท่า และมี CODs สูงสุด 533 mg/L เมื่อให้คลื่นอัลตราโซนิก 20 นาทีที่อุณหภูมิห้อง การใช้ความร้อนโดยตรงด้วยเทคนิคอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิมี CODs สูงสุด 2,467 mg/L (100 °C 120 นาที) การใช้เตาอบลมร้อนมี CODs สูงสุด 2,250 mg/L (110 °C 120 นาที) ส่วนการใช้หม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ มี CODs สูงสุด 924 mg/L (105 °C 20 นาที) สรุปได้ว่าการปรับสภาพผักตบชวาโดยใช้ความร้อนและการให้คลื่นส่งผลให้มีสารอินทรีย์ในรูปสารละลายที่มีความพร้อมเพื่อการเป็นสารตั้งต้นสำหรับการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มต่อการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและช่วยส่งเสริมศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

Division of Environmental Technology, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University, Khamriang, Kantarawichai, Maha Sarakham 44150, Thailand.

* ผู้ติดต่อประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): Nanthanat@msu.ac.th Tel: 06 3995 4566

คำสำคัญ: การย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน, ก๊าซชีวภาพ, ผักตบชวา, การปรับสภาพด้วยความร้อน, การปรับสภาพด้วยคลื่น

ABSTRACT

This research aims to study methods for water hyacinth pre-treatment by thermal and waved applications in order to use as a feedstock for anaerobic digestion in attempt to promote biogas production potential and enhancing substrate readily. The thermal pre-treatment techniques applied in this study are hot air oven, temperature controlled water bath, and steam pressure autoclave, while ultrasonic waves are performed at different temperatures and durations. The water hyacinth pre-treatment efficiency was determined by the transformation of organic compounds into soluble form, including CODs and VFAs. It was found that CODs tended to increase with higher temperature and duration of heating and waving. Microwave heating at 220 °C for 10 min yielded the highest CODs at 3,498 mg/L, while the highest CODs increase compared to the absence of conditioning was 17.8 folds at 160 °C for 10 min. Ultrasonic irradiation had the lowest rate of CODs increment of 1.0 - 2.3 folds, and maximum CODs of 533 mg/L was found when ultrasonic was applied for 20 min at room temperature. Direct heating by hot water bath showed maximum CODs of 2,467 mg/L (100 °C 120 min). Hot air oven had a maximum CODs of 2,250 mg/L (110 °C 120 min), whereas an autoclave presented maximum CODs of 924 mg/L (105 °C 20 min). These indicated that the pre-treatment methods of water hyacinth by heating and waving resulted in an increase in organic matter in soluble form which is readily available as a substrate for anaerobic digestion. Therefore, more biodegradable substrate and biogas production potential enhancement could be expected.

Key words: anaerobic digestion, biogas, water hyacinth, thermal pre-treatment, waved pre-treatment

บทนำ

ผักตบชวาได้รับการขนานนามว่าเป็น “วัชพืชน้ำที่เลวร้ายที่สุดในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ” เนื่องจากความสามารถในการเจริญเติบโตและการปรับตัวตามสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่ดี ส่งผลให้ผักตบชวาสามารถเจริญเติบโตเป็นแพหนาอัดแน่นครอบคลุมผิวน้ำได้ในระยะเวลาอันสั้น เพียง 2-3 สัปดาห์ แพหนาของชั้นผักตบชวาบนผิวน้ำนี้เป็นอุปสรรคโดยตรงต่อการใช้ประโยชน์ของแหล่งน้ำจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ (Bhattacharya and Kumar, 2010; Barua and Kalamdhad, 2016) ทั้งใน

ด้านการอุปโภค บริโภค การชลประทาน การคมนาคม และทัศนียภาพ แพหนาของผักตบชวาจะกีดขวางการส่งผ่านของแสงอาทิตย์ลงสู่ใต้ผิวน้ำทำให้พืชน้ำชนิดอื่น ๆ ใต้ผิวน้ำไม่สามารถทำการสังเคราะห์แสงได้ในเวลากลางวัน อีกทั้งยังขัดขวางการละลายของออกซิเจนโดยตรงบริเวณผิวน้ำลงสู่แหล่งน้ำ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำ (dissolved oxygen, DO) มีค่าลดต่ำลงอย่างมาก โดยเฉพาะในช่วงเวลากลางคืน ทำให้แหล่งน้ำเกิดสภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic condition) สัตว์น้ำและพืชน้ำอื่น ๆ ไม่สามารถดำรงอยู่ได้ และแหล่งน้ำเกิดสภาพเน่าเสีย นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่าแหล่งน้ำ

ที่ปกคลุมด้วยแพผักตบชวาจะมีอัตราการระเหยของน้ำสูงกว่าแหล่งน้ำตามปกติสูงถึง 3-8 เท่า (Chanathaworn, 2017; Sukasem *et al.*, 2017) จากการจับใช้ (up taking) และการคายน้ำ (dehydration) ของผักตบชวาซึ่งทำให้แหล่งน้ำสูญเสียความสามารถในการเก็บกักน้ำ (โดยเฉพาะแหล่งน้ำนิ่งที่ปราศจากการไหลถ่ายเท เช่น หนอง บึงหรือทะเลสาบ) นอกจากนี้ เมื่อผักตบชวาทายลงและขาดการเก็บน้ำออก จะทำให้เกิดการสะสมและทับถมของซากผักตบชวาในแหล่งน้ำส่งผลให้เกิดการเน่าเสีย ดินเน่าและสูญเสียความสามารถในการเป็นแหล่งกักเก็บน้ำในที่สุด เมื่อพิจารณาในเชิงสุขอนามัยยังพบว่าแพผักตบชวาเป็นแหล่งเพาะพันธุ์สำคัญของพาหะนำโรคและสัตว์เคี้ยวรื้อนราคาอื่น ๆ เช่น ยุง หนอนแมลงวัน หอยทาก หอยเชอรี่ และงู เป็นต้น (Patil *et al.*, 2014) จากที่กล่าวมาจึงสามารถอนุมานได้ว่าผักตบชวาเป็นวัชพืชซึ่งก่อให้เกิดปัญหาหลักต่อแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ดังนั้น การกำจัด การควบคุม และการใช้ประโยชน์จากวัชพืชที่มีอยู่อย่างมหาศาลและหาได้โดยง่ายของผักตบชวาจึงเป็นแนวทางที่มีความสำคัญเร่งด่วน ซึ่งมีนักวิจัยทั่วโลกให้ความสนใจอย่างกว้างขวาง

หนึ่งในแนวทางการบริหารจัดการวัชพืชชนิดนี้ที่มีประสิทธิภาพคือ การนำไปหมักในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion, AD) เพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานสะอาดและหมุนเวียนได้ทดแทนการพึ่งพาแหล่งพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากผักตบชวามีไนโตรเจนซึ่งเป็นธาตุอาหารสำคัญ และมีองค์ประกอบที่มีแนวโน้มในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบสำคัญในผักตบชวาคือลิกโนเซลลูโลส (lignocellulosic substances) ได้แก่ ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส โดยเฉพาะลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบ

ซับซ้อนที่ยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพตามธรรมชาติ เป็นอุปสรรคและความท้าทายสำคัญอันทำให้ความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลส หลายการศึกษารายงานว่ามีชีวมวลกลุ่มนี้เพียง 20-30 % เท่านั้นที่สามารถถูกย่อยและเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ระหว่างกระบวนการ AD (Sawatdeenarunat *et al.*, 2018; Kucharska *et al.*, 2018) ด้วยเหตุนี้ การปรับสภาพ (pre-treatment) ลิกโนเซลลูโลสจากชีวมวลหลายวิธีเพื่อเพิ่มความสามารถของการย่อยในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ วิธีการดังกล่าวมีทั้งในรูปแบบทางกายภาพ เคมี ชีวภาพรวมถึงการใช้หลายวิธีร่วมกัน (Kumar and Sharma, 2017) ตัวอย่างเช่น การบดสับซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มพื้นที่ผิวโดยรวมของวัตถุดิบ (feedstock) ทำให้การย่อยเป็นไปได้ง่ายขึ้นแต่วิธีการนี้มีปัญหาหลักคือต้องการพลังงานและการดูแลซ่อมบำรุงเครื่องจักรสูง การปรับสภาพด้วยสารเคมี เช่น การเติมกรด ด่าง หรือสารฟอสฟอรัส มีข้อดีคือช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของเฮมิเซลลูโลสและการใช้พลังงานต่ำ แต่มีข้อเสียคืออาจทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารเคมีในวัตถุดิบ การกักตุนถึงปฏิกรณ์และระบบต่อรวมถึงต้นทุนราคาสูงสำหรับสารเคมีที่ใช้เพื่อการปรับสภาพและการปรับค่าพีเอช (Rodriguez *et al.*, 2017) เช่นเดียวกับการปรับสภาพทางชีวภาพซึ่งแม้ว่าจะเป็นวิธีการที่ต้องการพลังงานในการดำเนินการต่ำและมีโอกาสปนเปื้อนสารยับยั้งหรือสารยับยั้ง (inhibitor) ทางชีวภาพน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ก็มีประสิทธิภาพต่ำ อัตราการย่อยเกิดขึ้นได้ช้าเนื่องจากต้องอาศัยความจำเพาะเจาะจงของกลุ่มจุลินทรีย์และเอนไซม์ ส่งผลให้มีความต้องการพื้นที่และปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ รวมถึงเอนไซม์จำเพาะบางชนิดมีราคาสูงมาก

(Seidl and Goulart, 2016) นอกเหนือจากวิธีการต่าง ๆ ที่กล่าวมา การใช้ความร้อน (thermal pre-treatment) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการปรับสภาพวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสซึ่งแม้จะเป็นวิธีการที่มีข้อจำกัดหลักคือความต้องการพลังงานสูง อย่างไรก็ตาม พลังงานความร้อนนี้อาจชดเชยได้ด้วยความร้อนเหลือทิ้งจากส่วนของระบบความร้อนร่วม (combined heat and power, CHP) ในโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ (Wang *et al.*, 2018) การให้ความร้อนกับวัตถุดิบทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ลมร้อน อ่างอังไอน้ำ หม้อนึ่งไอน้ำ การใช้ความร้อนแรงดันสูง และการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งการปรับสภาพด้วยวิธีการนี้จะทำให้โครงสร้างที่ซับซ้อนของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่ห่อหุ้มหรือเคลือบโครงสร้างเซลลูโลสมีแนวโน้มที่จะถูกย่อยได้มากขึ้น (Shrestha *et al.*, 2007) จากการทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างรูปผลึกเชิงซ้อนระหว่างลิกโนเซลลูโลสและเซลลูโลส (cellulose crystallinity) ช่วยให้เกิดช่องว่าง ความพรุน และพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น เอนไซม์สามารถเข้าถึงวัตถุดิบได้ง่าย ทำให้มีผลิตภัณฑ์จากการย่อยลิกโนเซลลูโลสในรูปสารละลาย (solubilization) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่พร้อมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพมากขึ้น (Sawatdeenarunat *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2018; Álvarez *et al.*, 2016) ส่งผลให้มีของแข็งระเหยในวัตถุดิบถูกกำจัด (volatile solid destruction, VSD) ได้ง่ายและมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงขึ้น

การปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสด้วยความร้อนโดยตรงอาศัยหลักสำคัญ 3 ประการสำหรับการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ การนำความร้อน (conduction) การพาความร้อน (convection) และการแผ่รังสี (radiation) ซึ่งจะเริ่มต้นด้วยการพาความร้อน ตามด้วยการนำความร้อนสู่วัตถุดิบเพื่อการทำลายโครงสร้างที่ยาก

ต่อการย่อยสลายทางชีวภาพโดยอาศัยตัวกลาง (medium) ในการพาความร้อนที่แตกต่างกัน เช่น ลมร้อน น้ำร้อน หรือไอน้ำร้อน เป็นต้น จากนั้นความร้อนจะถูกถ่ายเทสู่ภาชนะบรรจุวัตถุดิบและนำความร้อนนั้นไปเพื่อทำลายโครงสร้างผนังเซลล์จากภายนอกทีละชั้นสู่แกนกลางของวัตถุดิบ (Barua and Kalamdhad, 2017a) แตกต่างกับการให้ความร้อนด้วยการให้คลื่นไมโครเวฟ เกิดจากการเหนี่ยวนำโมเลกุลของน้ำในส่วนที่มีขั้วเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงมากจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำเปลี่ยนทิศ สลับไปมาอย่างรวดเร็วตามทิศทางของสนามไฟฟ้าเกิดการเสียดสีกันระหว่างโมเลกุลของน้ำที่สั่นสะเทือนทำให้เกิดความร้อนขึ้นมา (Kaatze, 1995) ซึ่งหากการให้ความร้อนนี้มากเพียงพอจะเกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจนในผนังเซลล์พืช (Toreci *et al.*, 2009; Chatchavanthatri, 2016) ในขณะที่การให้คลื่นอัลตราโซนิกในรูปแบบของคลื่นที่มีการอัดและขยายผ่านตัวกลางของเหลวเกิดสภาวะแรงดันที่เป็นลบภายในตัวกลางส่งผลให้เกิดการยุบตัวของโมเลกุลตัวกลางเกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก ๆ ที่เรียกว่าการเกิดควาเวชัน (cavitation) ความรุนแรงจากการยุบตัวนี้จะทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานรอบ ๆ ฟองอากาศขนาดเล็ก ส่งผลให้วัสดุลิกโนเซลลูโลสมีปริมาตรช่องว่างและรูพรุนหรือมีสภาพเป็นโพรง และมีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น (Lomwichai, 2015) ง่ายต่อการเข้าถึงของเอนไซม์จากจุลินทรีย์เช่นเดียวกับวิธีการให้ความร้อน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาแนวทางการใช้ความร้อนและคลื่นเพื่อการปรับสภาพผักตบชวาให้มีความพร้อมสำหรับการใช้เป็นวัตถุดิบในการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อเสริมสร้างศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการศึกษาวิธีการให้ความร้อนด้วยอากาศร้อน (hot air oven) แรงดันไอน้ำ (autoclave)

น้ำร้อน (hot water bath) และการให้คลื่นไมโครเวฟ (microwave) และคลื่นอัลตราโซนิก โดยประสิทธิภาพการปรับสภาพแต่ละวิธีการพิจารณาจากค่าซีโอดีละลาย (CODs) และค่ากรดไขมันระเหย (VFAs) ซึ่งอนุมานถึงปริมาณสารอินทรีย์ในรูปสารละลายที่มีความพร้อมสำหรับการเป็นสารตั้งต้นเพื่อการผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างผักตบชวา

1.1 เก็บตัวอย่างผักตบชวาจากโครงการอนุรักษ์ฟื้นฟูแหล่งน้ำกุดต่างใจ บริเวณคลองบ้านท่าขอนยาง ต.ท่าขอนยาง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม

1.2 ทำการแยกส่วนใบ ดอก ราก และลำต้น แล้วชั่งน้ำหนักของผักตบชวาแต่ละองค์ประกอบ (พิจารณาเป็นน้ำหนักสด)

1.3 ทุกส่วนประกอบได้ถูกนำมาสับและบดด้วยเครื่องบดให้มีขนาดเล็ก แล้วคลุกเคล้าให้เข้ากัน

1.4 วิเคราะห์ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของผักตบชวาและนำไปปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนด้วยอากาศร้อน (hot air oven) แร้งดันไอน้ำ (autoclave) น้ำร้อน (hot water bath) การให้คลื่นไมโครเวฟ (microwave) และคลื่นอัลตราโซนิก

2. การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของผักตบชวา

นำตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการบดให้ละเอียดปริมาณ 50 g ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 mL หุ้มปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟอยด์ (ยกเว้นกรณีปรับสภาพด้วยเครื่องย่อยไมโครเวฟซึ่งใช้ภาชนะเฉพาะกับเครื่องย่อยไมโครเวฟเท่านั้น) เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและกรดไขมันระเหยเนื่องจากความร้อนจากกระบวนการปรับสภาพ จากนั้นนำไปให้ความร้อนด้วยเทคนิคต่าง ๆ ตามอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนที่กำหนด สภาวะละ 2 บีกเกอร์ (รวมชุดควบคุมของแต่ละสภาวะ) ภายหลัง

การปรับสภาพด้วยเทคนิคต่าง ๆ ทำการแบ่งตัวอย่างผักตบชวาออกเป็น 2 ส่วน เพื่อวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของผักตบชวา (characterization of water hyacinth) คือ การศึกษามวลรวมผักตบชวาจากส่วนใบ ลำต้น และราก และลักษณะสมบัติทางกายภาพเคมีซึ่งประกอบไปด้วย องค์ประกอบของแข็งได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solids, TS) ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (volatile solids, VS) ปริมาณเถ้า (ash) และค่าความชื้น (moisture) พีเอช (pH) ซีโอดีในส่วนของเหลวหรือซีโอดีละลาย (soluble COD, CODs) สภาพด่างทั้งหมด (total alkalinity, TA) และกรดไขมันระเหย (volatile fatty acids, VFAs)

ส่วนที่ 1 ถ่ายตัวอย่างจากบีกเกอร์จำนวน 15 g ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 mL เติมน้ำกลั่น 300 mL (กำหนดอัตราส่วนผักตบชวา/น้ำกลั่น หรืออัตราส่วน solid/liquid, S/L ratio เท่ากับ 5 g/100 mL) ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยกระดาษฟอยด์ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิห้อง 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปแยกส่วนของเหลวด้วยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 6,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นจึงนำเฉพาะของเหลวส่วนใส (supernatant) มาทำการวิเคราะห์ CODs, VFAs และ TA

ส่วนที่ 2 นำตัวอย่างผักตบชวาในส่วนที่เหลือประมาณ 35 g ไปวิเคราะห์ค่า pH, moisture, TS, VS และ ash

3. การรวบรวมข้อมูล

การให้ความร้อนด้วยเตาอบลมร้อน หม้อนึ่ง ความดันไอน้ำ อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ และการให้คลื่นด้วยไมโครเวฟและคลื่นอัลตราโซนิก เป็นการปรับสภาพผักตบชวา โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการปรับสภาพผักตบชวา ซึ่งสภาวะในการให้ความร้อนและการให้คลื่นใน

งานวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการเลือกจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมา (Barua and Kalamdhad, 2017a) เพื่อให้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบกับผลการศึกษานี้

3.1 การหาองค์ประกอบและลักษณะสมบัติของผักตบชวา ดังรายละเอียดในข้อ 1.2

3.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาให้ความร้อนด้วยเทคนิคต่าง ๆ (เตาอบลมร้อน, หม้อนึ่งความดันไอน้ำ และอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ)

3.2.1 อุณหภูมิในการให้ความร้อน

เตรียมตัวอย่างผักตบชวาที่อุณหภูมิแตกต่างกันด้วยระยะเวลาที่กำหนด เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ปรับสภาพผักตบชวา) ของแต่ละสภาวะ โดยรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เตาอบลมร้อน ที่ 80, 90, 100, 110 และ 120 °C เป็นเวลา 120 นาที
2. หม้อนึ่งความดันไอน้ำ ที่ 105, 110, 120 และ 135 °C เป็นเวลา 20 นาที
3. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่ 70, 80, 90 และ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที

3.2.2 ระยะเวลาในการให้ความร้อน

เตรียมผักตบชวาคละแยกแบ่งเป็นชุดควบคุม และชุดที่ปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอน 3.2.1 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เตาอบลมร้อนที่ 30, 60, 90 และ 120 นาที
2. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่ 30, 60, 90 และ 120 นาที

3.3 การศึกษาผลของคลื่นและระยะเวลาให้คลื่นไมโครเวฟ และคลื่นอัลตราโซนิก

3.3.1 อุณหภูมิในการให้คลื่น

เตรียมตัวอย่างผักตบชวาที่อุณหภูมิแตกต่างกันด้วยระยะเวลาที่กำหนด เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ปรับสภาพผักตบชวา) ของแต่ละสภาวะ โดยรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. คลื่นไมโครเวฟ ที่ 160, 180, 200 และ 220 °C เป็นเวลา 10 นาที
2. คลื่นอัลตราโซนิก ทำการศึกษาที่อุณหภูมิห้อง

3.2.2 ระยะเวลาในการให้คลื่น

เตรียมผักตบชวาคละแยกแบ่งเป็นชุดควบคุม และชุดที่ปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอน 3.3.1 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

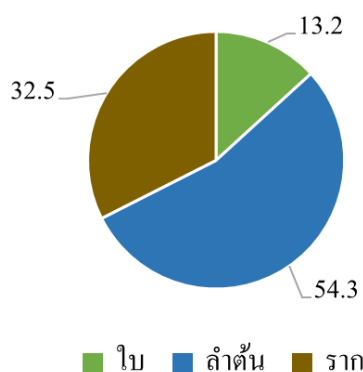
1. คลื่นไมโครเวฟ ที่ 3 และ 5 นาที
2. คลื่นอัลตราโซนิก ที่ 10, 20 และ 30 นาที

ระบุอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนและให้คลื่นเพื่อปรับสภาพผักตบชวาที่เหมาะสมของแต่ละเทคนิคโดยพิจารณาจากค่าซีโอดีในส่วนของเหลว (CODs) เป็นหลัก โดยพารามิเตอร์ CODs, VFAs, TA, pH, moisture, TS, VS และ ash ได้ทำการวิเคราะห์ซ้ำ (replicate) อย่างน้อย 3 ครั้ง โดยรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. องค์ประกอบและลักษณะสมบัติของผักตบชวา

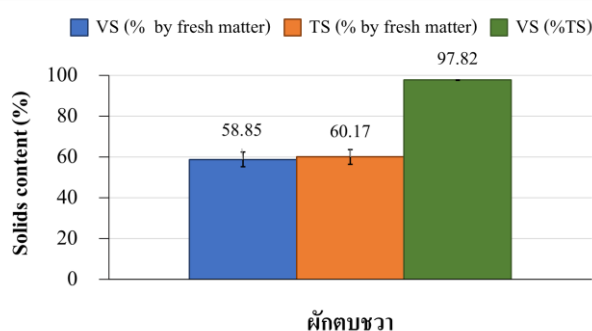
พบ ลำต้น ราก ใบ (คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักสด) มีอัตราส่วน 54.3: 32.5: 13.2 ตามลำดับ ดังภาพที่ 1



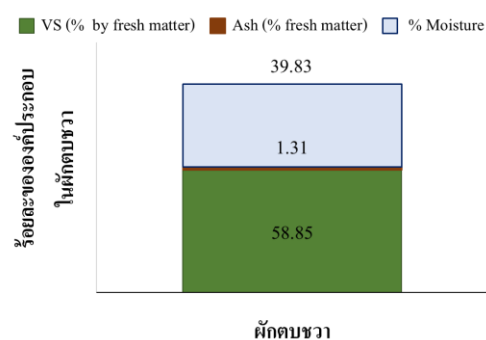
ภาพที่ 1 องค์ประกอบของต้นผักตบชวาร้อยละ โดยน้ำหนักสด (เปียก)

ตัวอย่างผักตบชวาที่ใช้เพื่อวิเคราะห์ลักษณะสมบัติเบื้องต้น และเพื่อการปรับสภาพที่สภาวะต่าง ๆ แต่ผลการทดลอง ได้ทำการเตรียมที่อัตราการส่วนของลำต้น:ใบ:ราก เท่ากับ 54.3: 32.5: 13.2 โดยน้ำหนักสด ตัวอย่างผักตบชวาทุกส่วนถูกนำมาสับและบดด้วยเครื่องบดให้มีขนาดเล็ก จากนั้นคลุกเคล้าให้เข้ากัน

ทั้งในส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลว ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของผักตบชวา (characterization of water hyacinth) โดยพบว่าตัวอย่างผักตบชวาคละเอียดย่อยทุกส่วนมีค่าพีเอช 7.80 ± 0.1 ส่วนองค์ประกอบของแข็งในผักตบชวาแสดงดังภาพที่ 2



(A)



(B)

ภาพที่ 2 องค์ประกอบของแข็ง (A) และค่าความชื้น (B) ในผักตบชวา

พิจารณาภาพที่ 2 พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของมวลรวมผักตบชวา คือของแข็งทั้งหมด (total solids, TS) ประกอบด้วยของแข็งระเหยได้ (volatile solid, VS) ซึ่งหมายถึงสารอินทรีย์ และเถ้าได้แก่ส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก ภาพที่ 2(A) สังเกตพบว่าของแข็งในผักตบชวาส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแข็งระเหย (VS) ซึ่งมีมากถึง 58.85 โดยน้ำหนักสด (% FM) หรือ 97.82 (% TS)

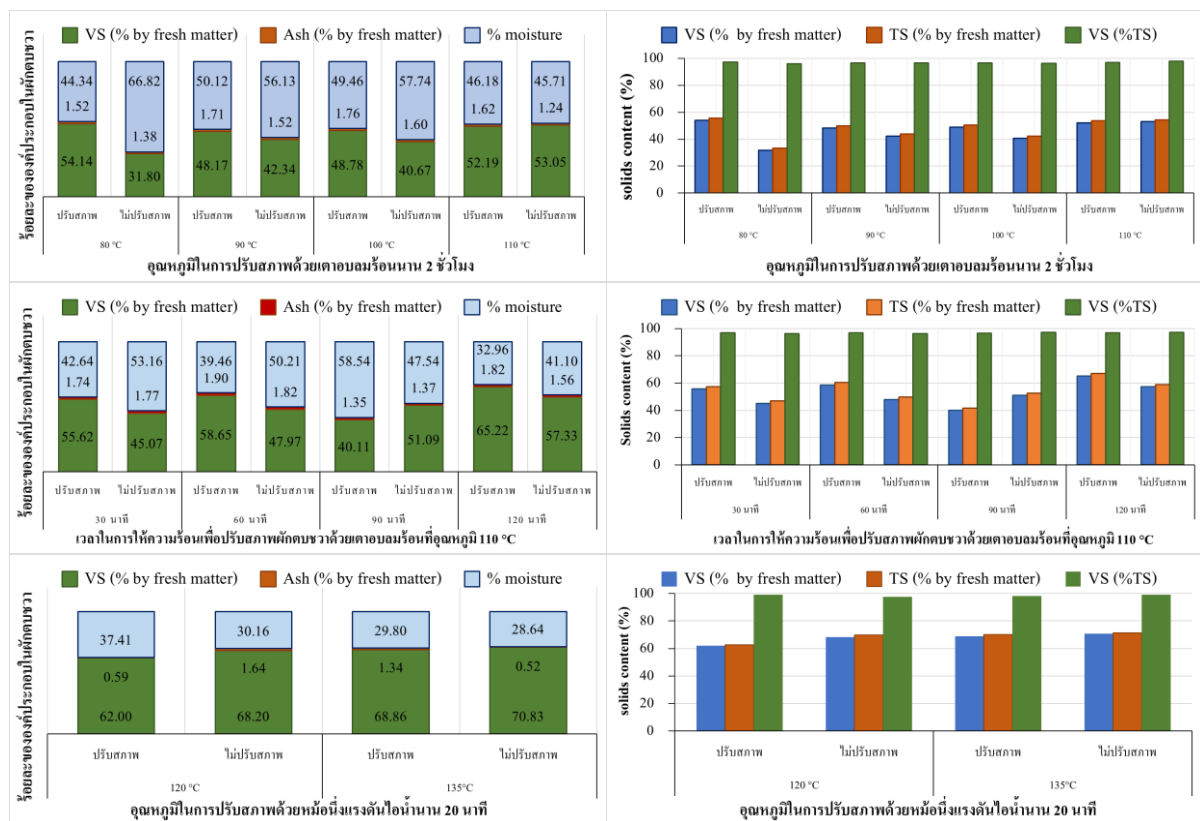
แสดงให้เห็นว่าผักตบชวามีแนวโน้มที่จะมีศักยภาพในการเป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี เนื่องจากปริมาณของแข็งระเหยในผักตบชวา หมายถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่มีศักยภาพในการเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซชีวภาพภายหลังกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยจากภาพที่ 2(B) พบปริมาณเถ้าเพียง 1.31 % โดยองค์ประกอบส่วนที่เหลือคือความชื้นมากถึง 39.83 %

2. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนหรือให้คลื่นเพื่อการปรับสภาพต่อลักษณะสมบัติของผักตบชวา

2.1 องค์ประกอบของแข็ง (solids content)

เทคนิคการเตรียมตัวอย่างผักตบชวาในกระบวนการปรับสภาพได้ทำการห่อหุ้มปากบีกเกอร์ขนาด 250 mL ที่บรรจุผักตบชวา 50 g ด้วยกระดาษฟอยด์เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นระหว่างการปรับสภาพที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ พบว่าหากเปรียบเทียบความชื้นในชุดควบคุมของแต่ละสภาวะ (กรณีไม่ปรับสภาพ) และกรณีปรับสภาพ เกิดการ

สูญเสียความชื้นไม่มากนัก ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าเทคนิคที่ใช้เพื่อการเตรียมตัวอย่างดังกล่าวเป็นวิธีการที่เหมาะสมเนื่องจากไม่ทำให้ลักษณะสมบัติของตัวอย่างด้าน solids content เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 80-110 °C สำหรับเตาอบลมร้อน และ 120-135 °C สำหรับหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยเตาอบลมร้อนและหม้อนึ่งแรงดันสูงต่อ solids content (%) ในผักตบชวาแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการปรับสภาพผักตบชวากับเตาอบลมร้อนและหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำต่อ solids content และ moisture

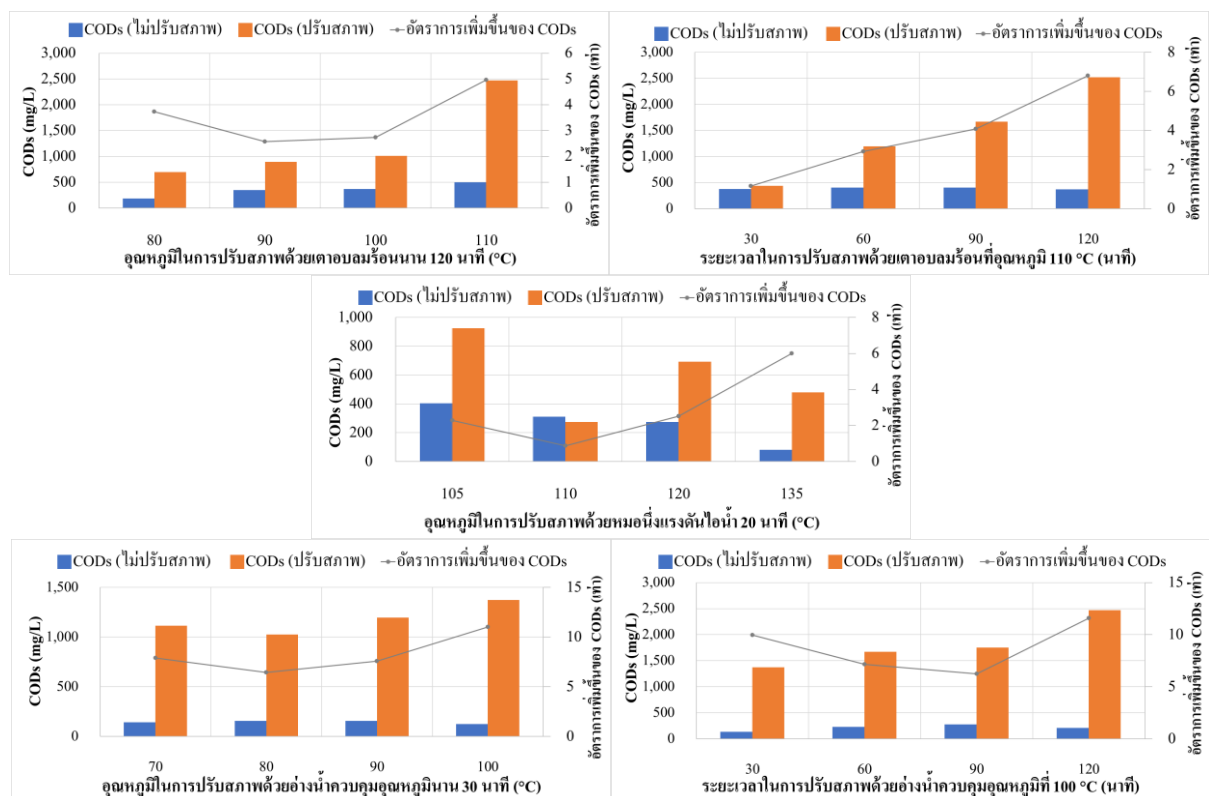
การปรับสภาพผักตบชวาด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 90 100 และ 110 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง และที่ 110 °C เป็นระยะเวลา 30 60 90 และ 120 นาที พบ TS มีค่าระหว่างร้อยละ 33.18 - 67.04 (% FM) พบว่าส่วนใหญ่อยู่ในรูป VS หรือสารอินทรีย์ โดยมีสูงถึง 31.80 - 65.22 (% FM) หรือ 95.84 - 97.71 (% TS) โดยพบว่ามี ash (สารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพ) เพียง 1.24 - 1.90 (% FM)

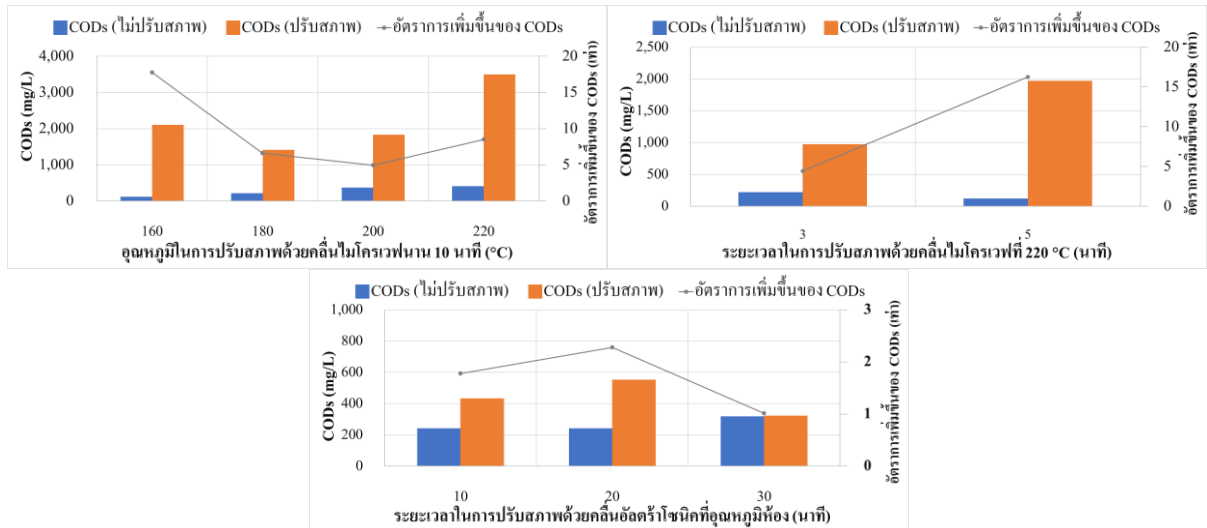
การปรับสภาพด้วยหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 120 และ 135 °C เป็นระยะเวลา 20 นาที พบว่า TS มีค่าระหว่าง 62.59 - 71.36 (% FM) พบว่าส่วนใหญ่อยู่ในรูป VS หรือสารอินทรีย์ โดยมีสูงถึง 62.00 - 70.83 (% FM) หรือ 97.65 - 99.27 (% TS) โดยพบว่ามี ash เพียง 0.52 - 1.64 (% FM)

จึงกล่าวได้ว่าผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ปรับสภาพด้วยเตาอบลมร้อนและหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำในทุกสภาวะมีอัตราส่วนของปริมาณสารอินทรีย์ที่มีศักยภาพในการเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซชีวภาพ (มีเทน) ภายหลังกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสูง และจะเห็นได้ว่ากระบวนการปรับสภาพผักตบชวาไม่ทำให้เกิดการสูญเสียสารอินทรีย์ในรูป VS

2.2 ซีโอดีในส่วนของของเหลวหรือซีโอดีละลาย (soluble COD, CODs)

ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนและการให้คลื่นด้วยเทคนิคต่าง ๆ ต่อ CODs แสดงดังภาพที่ 4





ภาพที่ 4 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการปรับสภาพผักตบชวาต่อ CODs

จากภาพที่ 4 จะเห็นได้ว่า โดยภาพรวมการปรับสภาพผักตบชวากับเทคนิคต่าง ๆ CODs มีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการปรับสภาพ อัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของ CODs มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและระยะเวลาการปรับสภาพที่สูงขึ้น ซึ่งให้ข้อมูลประกอบข้อบ่งชี้ของลักษณะการย่อยสลายของผักตบชวาที่ยากต่อการย่อยสลายซึ่งอยู่ในรูปของแข็งหรือ slurry สามารถถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบของสารอินทรีย์ละลาย (soluble form) ซึ่งมีความพร้อมต่อการเป็นสารตั้งต้นเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้น ช่วยลดระยะเวลาในการปรับตัวของจุลินทรีย์ในช่วง lag phase และเพิ่มศักยภาพโดยรวมของการผลิตก๊าซมีเทน (Phuttaro *et al.*, 2019; Barua and Kalamdhad, 2017b) และช่วยลดระยะเวลาในขั้นตอนการเกิดไฮโดรไลซิส (hydrolysis stage) ซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางว่าขั้นตอนนี้เป็นปัจจัยควบคุมหลักของกระบวนการทั้งหมด (overall rate limitation) ในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน จากการศึกษาพบว่ากรณีใช้เตาอบลมร้อน ให้ค่า CODs สูงที่สุดเท่ากับ 2,250 mg/L จากการปรับสภาพด้วยอุณหภูมิ 110 °C เป็น

เวลา 120 นาที กรณีหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำได้ CODs สูงสุดที่ 924 mg/L (105 °C เป็นเวลา 20 นาที) อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิให้ค่า CODs สูงที่สุดเท่ากับ 2,467 mg/L (100 °C เป็นเวลา 120 นาที) ไมโครเวฟให้ค่า CODs สูงที่สุดเท่ากับ 3,498 mg/L (220 °C เป็นเวลา 10 นาที) และคลื่นอัลตราโซนิกให้ค่า CODs สูงที่สุดเท่ากับ 533 mg/L (อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 นาที)

ในการศึกษานี้แม้ว่าจะมีวิธีการ อุณหภูมิ และช่วงเวลาของการปรับสภาพผักตบชวาที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 4 การปรับสภาพโดยการให้คลื่นอัลตราโซนิกมีอัตราการเพิ่มขึ้นของ CODs น้อยที่สุด (1.0 - 2.3) เท่า เมื่อเทียบกับชุดควบคุม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพลังงานของการให้คลื่นไม่เพียงพอต่อการทำลายโครงสร้างผนังเซลล์พืช ประกอบกับเป็นการทดลอง ณ อุณหภูมิห้อง และการให้คลื่นอัลตราโซนิกมิใช่การปรับสภาพวัตถุดิบโดยการให้ความร้อนโดยตรง นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่า การปรับสภาพวัตถุดิบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกส่วนใหญ่นิยมใช้กับวัตถุดิบที่มีปริมาณน้ำสูง เช่น มูลสัตว์ น้ำเสีย หรือตะกอนจุลินทรีย์ (Braeutigam, *et al.*, 2014; Gallipoli, *et al.*, 2014) เพื่อการส่งผ่านคลื่น

เสี่ยงจากผิวย่อยต่อของน้ำกับของแข็งมากกว่าผิวย่อยต่อของอากาศกับของแข็ง ดังนั้นการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยวิธีการนี้ควรจะมีการเติมน้ำเพิ่มเติม (Rodriguez, 2017)

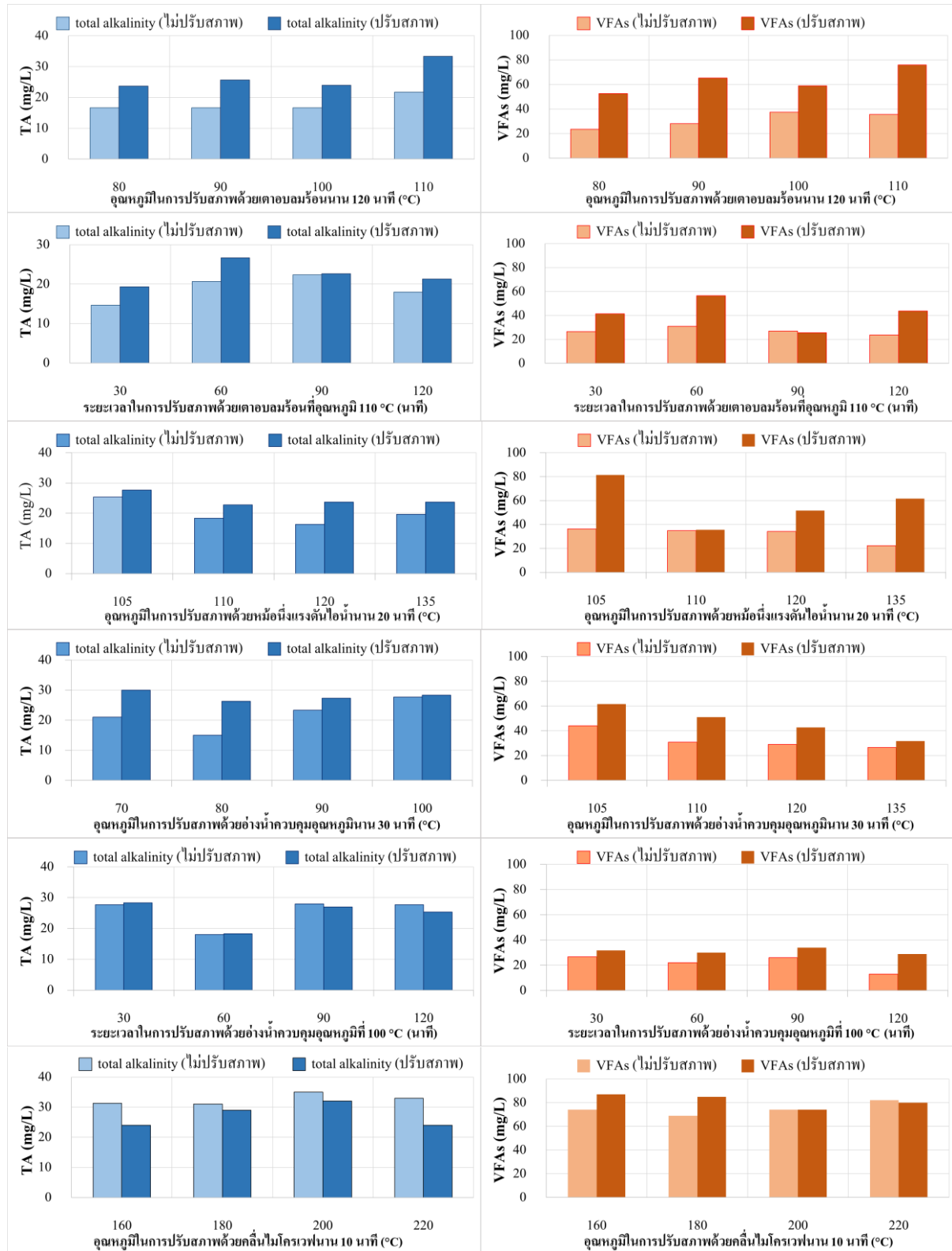
เมื่อพิจารณาการปรับสภาพโดยการพาความร้อนโดยตรงด้วยตัวกลางคือลมร้อน น้ำร้อนและไอน้ำร้อน พบว่าการปรับสภาพด้วยไอน้ำร้อนมีค่า CODs สูงสุดคือ 2,467 mg/L คิดเป็น 11.6 เท่า เมื่อเทียบกับชุดควบคุม ผลการศึกษานี้แตกต่างจากการศึกษาของ Barua and Kalamdhad (2017a) ซึ่งปรับสภาพผักตบชวาด้วยเทคนิคเตาอบลมร้อน ไอน้ำควบคุมอุณหภูมิ หม้อนึ่งไอน้ำและไมโครเวฟ ในช่วงอุณหภูมิ 70 - 220 °C ด้วยระยะเวลา 5 - 150 นาที ได้สรุปว่าการปรับสภาพด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C นาน 60 นาทีเป็นสภาวะที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของ CODs สูงที่สุดคิดเป็น 2.3 เท่าของชุดควบคุม โดยผู้วิจัยให้เหตุผลว่าการใช้อุณหภูมิหรือระยะเวลาสูงกว่าสภาวะดังกล่าวจะทำให้ผักตบชวายุยงเสียสารอินทรีย์ในรูปของ VFAs จากการระเหยรวมถึงการสูญเสียความชื้นที่จะทำให้ผักตบชวามีลักษณะแห้ง และมี CODs ลดลง ซึ่งอาจเป็นเหตุผลที่ทำให้มีผลการทดลองแตกต่างจากผลการศึกษาในครั้งนี้ที่มีการลดการระเหยโดยทำการทดลองในภาชนะปิด

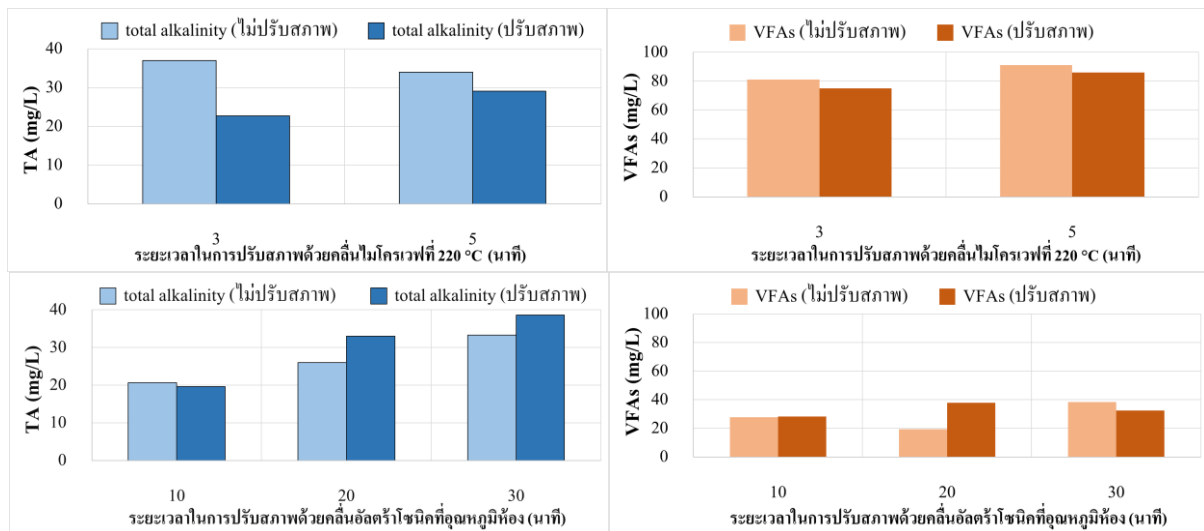
จากภาพที่ 4 เมื่อพิจารณา CODs พบว่าการปรับสภาพด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิสูงสุด 220 °C เป็นเวลานานที่สุด 10 นาทีจะมีค่าสูงที่สุดคือ 3,498 mg/L ขณะที่อัตราการเพิ่มขึ้นของ CODs สูงสุดคิดเป็น 17.8 เท่าเมื่อเทียบกับชุดการทดลองในกรณีชุดควบคุมในกรณีที่ใช้ไมโครเวฟที่ 160 °C นาน 10 นาที แม้จะเห็นว่าเป็นสภาวะที่มี CODs ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่พร้อมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดอย่างไรก็ตาม

ปัจจัยอื่น ๆ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เนื่องจากมีรายงานว่า การปรับสภาพวัตถุดิบลิกโนเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูงเกินไปนอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานแล้วยังมีโอกาask่อให้เกิดสารที่เป็นพิษหรือสารยับยั้งที่เกิดจากการย่อยลิกนินและน้ำตาลบางชนิดเช่น สารประกอบฟีนอล อนุพันธ์ของฟูราน (furan derivatives) โดยเฉพาะ furfural และ 5-hydroxymethylfurfural (HMF) ซึ่งส่งผลเสียต่อจุลินทรีย์ในระบบการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Ghasimi *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018) ตัวอย่างเช่น รายงานของ Phuttaro *et al.* (2019) ศึกษาการปรับสภาพหญ้าเนเปียร์ด้วยเทคนิคน้ำร้อนแรงดันสูง (hydrothermal pretreatment) ที่อุณหภูมิ 125 - 200 °C ซึ่งพบว่าการปรับสภาพที่ 200 °C จะมีปริมาณ CODs สูงที่สุดคิดเป็นประมาณ 20 เท่าของชุดควบคุม อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนแบบ batch พบว่าการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 175 °C ให้ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุด ในขณะที่การปรับสภาพที่ 200 °C มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนต่ำที่สุด เนื่องจากตรวจพบสารยับยั้งจากการปรับสภาพคือ furfural และ HMF ด้วยเหตุนี้ จึงควรดำเนินการศึกษาองค์ประกอบอื่น ๆ ในผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพแล้วโดยเฉพาะสารยับยั้งที่อาจส่งผลต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมถึงศึกษาแนวทางในการลดพลังงานเพื่อการปรับสภาพผักตบชวาในอนาคต

2.3 สภาพด่าง (total alkalinity, TA) และกรดไขมันระเหย (volatile fatty acids, VFAs)

ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนและการให้คลื่นด้วยเทคนิคต่าง ๆ ต่อลักษณะสมบัติของผักตบชวา แสดงดังภาพที่ 5





ภาพที่ 5 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการปรับสภาพผักตบชวาต่อ TA และ VFAs

จากภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่า TA มีค่าไม่เกิน 100 mg/L ซึ่งถือว่ามีความเหมาะสมสำหรับระบบการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้น ในการดำเนินระบบในสถานการณ์จริงซึ่งใช้ปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง (continuous mode) หากไม่ได้รับ alkalinity จากวัตถุดิบเพียงพอ ระบบอาจจำเป็นต้องได้รับการเสริมสภาพต่าง (alkalinity supplementation) ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer solution) เพื่อเป็นการป้องกันไม่ทำให้ระบบถูกยับยั้งด้วยกรดอินทรีย์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการย่อยสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

และเมื่อพิจารณาจากภาพรวมของ VFAs พบว่า VFAs มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นภายหลังการปรับสภาพเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งให้ให้เห็นว่ามีสารอินทรีย์ในรูปสารอินทรีย์ละลายที่พร้อมต่อการเป็นสารตั้งต้นเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพมากขึ้น และมีแนวโน้มที่จะถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายขึ้น สอดคล้องกับแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า CODs โดยทั่วไปกรดอ่อน เช่น กรดฟอร์มิกและกรดอะซิติก จะเกิดขึ้นจากการปรับสภาพวัตถุดิบลิกโนเซลลูโลสด้วยความร้อน ซึ่งจะช่วยกระตุ้นการปรับสภาพเซลลูโลสต่อไปภายใต้สภาวะออกซิเดชันด้วยกรด (oxidative acidic condition) ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นของ

การปรับสภาพ (Yousefifar *et al.*, 2017; Mohapatra *et al.*, 2017) โดยมักจะพบกรดอะซิติกเป็นหลักใน VFAs ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสารอินทรีย์กลุ่มอะเซทิล (acetyl group) ในองค์ประกอบของชีวมวลเฮมิเซลลูโลส (Jönsson and Martín, 2016)

สรุป

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการปรับสภาพผักตบชวาโดยใช้ความร้อนและการให้คลื่นเพื่อเพิ่มความพร้อม มีแนวโน้มในการย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นการส่งเสริมให้มีศักยภาพสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพมากขึ้น โดยเทคนิคการให้ความร้อนโดยตรงได้แก่ เตาอบลมร้อน อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ หม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ และการให้คลื่นไมโครเวฟและอัลตราโซนิก ประสิทธิภาพการเพิ่มความพร้อมต่อการเป็นสารตั้งต้นเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในรูปสารละลายจาก CODs และ VFAs ผลการศึกษาพบว่า การปรับสภาพผักตบชวาส่งผลให้มีค่า CODs สูงขึ้นกว่าการไม่ปรับสภาพ โดย CODs มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระดับอุณหภูมิและ

ระยะเวลาการให้ความร้อนและการให้กลิ่นที่สูงขึ้น การปรับสภาพด้วยวิธีการให้ความร้อนโดยตรงซึ่งมี น้ำร้อนเป็นตัวกลางในการพาความร้อนจากเทคนิค อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิให้ค่า CODs สูงที่สุด อัตรา การเพิ่มขึ้นของ CODs จากวิธีการปรับสภาพด้วยการ ให้กลิ่นอัลตราโซนิกมีค่าต่ำที่สุด ในขณะที่การ เพิ่มขึ้นของ CODs จากการให้กลิ่นไมโครเวฟที่ อุณหภูมิสูงมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับผักตบชวาที่ไม่ มีการปรับสภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ โครงการสนับสนุนทุน นักวิจัยใหม่ (วท.) ประจำปี 2562 ฝ่ายนักเรียนทุน รัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งชาติ และเงินทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณ เงินรายได้ ประจำปี 2563 คณะสิ่งแวดล้อมและ ทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เอกสารอ้างอิง

- Álvarez, C., Reyes-Sosa, F.M. and Díez, B. 2016. Enzymatic hydrolysis of biomass from wood. **Microbial Biotechnology** 9(2): 149-156.
- Barua, V.B. and Kalamdhad, A.S. 2016. Water hyacinth to biogas: a review. **Pollution Research** 35(3): 491-501.
- Barua, V.B. and Kalamdhad, A.S. 2017a. Effect of various types of thermal pretreatment techniques on the hydrolysis, compositional analysis and characterization of water hyacinth. **Bioresource Technology** 227: 147-154.
- Barua, V.B. and Kalamdhad, A.S. 2017b. Biochemical methane potential test of untreated and hot air oven pretreated water hyacinth: A comparative study. **Journal of Cleaner Production** 166: 273-284.
- Bhattacharya, A. and Kumar, P. 2010. Water Hyacinth as a potential biofuel crop. **Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry** 9(1): 112-122.
- Braeutigam, P., Franke, M. and Ondruschka, B. 2014. Effect of ultrasound amplitude and reaction time on the anaerobic fermentation of chicken manure for biogas production. **Biomass and Bioenergy** 63: 109-113.
- Chanathaworn, J. 2017. Operating condition optimization of water hyacinth and earthworm bedding wastewater for biogas production. **Energy Procedia** 138: 253-259.
- Chatchavanthatri, N. 2016. Alkaline and microwave-assisted alkali pretreatments of rice straw for enhancing the efficiency of enzymatic hydrolysis. Master Thesis of Engineering, Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Gallipoli, A., Gianico, A., Gagliano, M.C. and Braguglia, C.M. 2014. Potential of high-frequency ultrasounds to improve sludge anaerobic conversion and surfactants removal at different food/inoculum ratio. **Bioresource Technology** 159: 207-214.
- Ghasimi, D.S.M., Aboudi, K., de Kreuk, M., Zandvoort, M.H. and van Lier, J.B. 2016. Impact of lignocellulosic-waste intermediates on hydrolysis and methanogenesis under

- thermophilic and mesophilic conditions. **Chemical Engineering Journal** 295: 181-191.
- Jönsson, L.J. and Martín, C. 2016. Pretreatment of lignocellulose: Formation of inhibitory by-products and strategies for minimizing their effects. **Bioresource Technology** 199: 103-112.
- Kaatze, U. 1995. Fundamentals of microwaves. **Radiation Physics and Chemistry** 45(4): 539-548.
- Kucharska, K., Hołowacz, I., Konopacka-Łyskawa, D., Rybarczyk, P. and Kamiński, M. 2018. Key issues in modeling and optimization of lignocellulosic biomass fermentative conversion to gaseous biofuels. **Renewable Energy** 129: 384-408.
- Kumar, A.K. and Sharma, S. 2017. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. **Bioresources and Bioprocessing** 4(1): 7.
- Kumar, M., Oyedun, A.O. and Kumar, A. 2018. A review on the current status of various hydrothermal technologies on biomass feedstock. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 81: 1742-1770.
- Lomwichai, K. 2015. Enhancement of bio-methane production from cassava pulp using ultrasonic wave in pretreatment process. Master Thesis of Engineering, Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Mohapatra, S., Mishra, C., Behera, S.S. and Thatoi, H. 2017. Application of pretreatment, fermentation and molecular techniques for enhancing bioethanol production from grass biomass - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 78: 1007-1032.
- Patil, J.H., Antonyraj, M.a.L., Shankar, B.B., Shetty, M.K. and Kumar, B.P.P. 2014. Anaerobic Co-digestion of Water Hyacinth and Sheep Waste. **Energy Procedia** 52: 572-578.
- Phuttaro, C., Sawatdeenarunat, C., Surendra, K.C., Boonsawang, P., Chaiprapat, S. and Khanal, S.K. 2019. Anaerobic digestion of hydrothermally- pretreated lignocellulosic biomass: Influence of pretreatment temperatures, inhibitors and soluble organics on methane yield. **Bioresource Technology** 284: 128-138.
- Rodriguez, C., Alaswad, A., Benyounis, K.Y. and Olabi, A.G. 2017. Pretreatment techniques used in biogas production from grass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 68: 1193-1204.
- Sawatdeenarunat, C., Surendra, K.C., Takara, D., Oechsner, H. and Khanal, S.K. 2015. Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. **Bioresource Technology** 178: 178-186.
- Sawatdeenarunat, C., Nam, H., Adhikari, S., Sung, S. and Khanal, S.K. 2018. Decentralized biorefinery for lignocellulosic biomass: Integrating anaerobic digestion with thermochemical conversion. **Bioresource Technology** 250: 140-147.
- Seidl, P.R. and Goulart, A.K. 2016. Pretreatment processes for lignocellulosic biomass conversion to biofuels and bioproducts. **Current Opinion**

in Green and Sustainable Chemistry 2:
48-53.

Shrestha, S., Fonoll, X., Khanal, S.K. and Raskin, L.

2017. Biological strategies for enhanced hydrolysis of lignocellulosic biomass during anaerobic digestion: Current status and future perspectives. **Bioresource Technology** 245: 1245-1257.

Sukasem, N., Khanthi, K. and Prayoonkham, S.

2017. Biomethane Recovery from Fresh and Dry Water Hyacinth Anaerobic Co-Digestion with Pig Dung, Elephant Dung and Bat Dung with Different Alkali Pretreatments. **Energy Procedia** 138: 294-300.

Toreci, I., Kennedy, K.J. and Droste, R.L. 2009.

Evaluation of continuous mesophilic anaerobic sludge digestion after high temperature microwave pretreatment. **Water Research** 43(5): 1273-1284.

Wang, D., Shen, F., Yang, G., Zhang, Y., Deng, S.,

Zhang, J., Zeng, Y., Luo, T. and Mei, Z. 2018. Can hydrothermal pretreatment improve anaerobic digestion for biogas from lignocellulosic biomass?. **Bioresource Technology** 249: 117-124.

Yousefifar, A., Baroutian, S., Farid, M.M., Gapes,

D.J. and Young, B.R. 2017. Fundamental mechanisms and reactions in non-catalytic subcritical hydrothermal processes: A review. **Water Research** 123: 607-622.

สมบัติทางกายภาพและค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้งกล้วยดิบ และคุณภาพของพาสต้าจากแป้งกล้วยดิบ

Physical Properties and Glycemic Index of Unripe Banana Flour and Quality of Pasta from Unripe Banana Flour

นาฏยา อริยสุขโหมิต * และ อโนชา สุขสมบุญ

Narttaya Ariyasukkosit * and Anocha Suksomboon

Received: 24 February 2022, Revised: 24 August 2022, Accepted: 26 August 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของสายพันธุ์กล้วย (กล้วยน้ำว้าและกล้วยหอม) และการเตรียมแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและจากกล้วยทั้งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมีฟิสิกส์ และค่าดัชนีไกลซีมิก (glycemic index, GI) ของแป้งกล้วยดิบ รวมทั้งคุณภาพของพาสต้า ค่า GI และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ จากการวิเคราะห์ค่าสี พบว่า แป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอม (HW และ HP) มีสีน้ำตาลเข้ม (ค่า L^* ต่ำกว่า ค่า a^* และ b^* สูงกว่า) กว่าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้า (NW และ NP) โดยแป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผล (HW และ NW) มีสีน้ำตาลเข้มกว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วย (HP และ NP) จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของน้ำแป้ง พบว่า แป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้า (NW และ NP) มี pasting temperature และ final viscosity สูงกว่าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอม (HW และ HP) และจากการวิเคราะห์ค่าดัชนีการละลายน้ำ พบว่า HW ละลายน้ำได้มากกว่า NW (9.24 และ 7.32 g/g ตามลำดับ) ในส่วนของค่าดัชนีการดูดซับน้ำ พบว่า แป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอม (HW 3.22 และ HP 2.83 g/g ตามลำดับ) ดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้า (NW 3.00 และ NP 2.79 g/g ตามลำดับ) และแป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผล (HW และ NW) ดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วย (HP และ NP) ในส่วนของผลการวิเคราะห์ค่า GI ของแป้งกล้วยดิบ พบว่า แป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มีค่า GI อยู่ที่ 40.46-45.22 และเมื่อนำแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มาเตรียมเป็นเส้นพาสต้าและผ่านกระบวนการทำให้สุก (cooked) พบว่า พาสต้าจากแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มี cooking time ที่แตกต่างกัน (12.30-14.00 นาที) แต่มี cooking loss และ cooking yield ไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) เช่นเดียวกับค่า GI โดยมี GI อยู่ที่ 83.81-85.53 และเมื่อทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HPP) และพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NPP) ได้รับคะแนนความชอบทางด้านลักษณะปรากฏ สี และความชอบโดยรวมสูงที่สุดและไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) เท่ากับ 6.10 และ 6.13 คะแนน ตามลำดับ ดังนั้นการศึกษานี้พบว่า พาสต้าจากแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มีคุณภาพของเส้น และ

ค่า GI ไม่แตกต่างกัน แต่พาสต้าที่เตรียมจากแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยได้รับคะแนนความชอบทางด้านลักษณะปรากฏ สี และความชอบโดยรวมมากกว่าพาสต้าที่เตรียมจากแป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผล ดังนั้น แป้งกล้วยดิบที่เตรียมได้จากเนื้อกล้วยน่าจะเป็นวัตถุดิบที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตพาสต้าต่อไปได้

คำสำคัญ: แป้งกล้วยดิบ, ดัชนีไกลซีมิก, พาสต้า, คุณลักษณะหลังต้มสุก

ABSTRACT

The aim of this research was to study the effect of banana cultivars (Kluai Namwa and Kluai Hom) and preparation of pulp unripe banana flour and whole unripe banana flour on the physical, physicochemical properties and glycemic index (GI) of unripe banana flour including quality of pasta, GI and sensory evaluation of unripe banana flour pasta. From the color analysis, it was found that unripe banana flour from Kluai Hom (HW and HP) have darker brown color (Low L^* values, high a^* and b^* values) than those from unripe banana flour from Kluai Namwa (NW and NP), and it was also found that unripe banana flour from the whole banana (HW and NW) were darker brown than unripe banana flour from the pulp (HP and NP). The pasting properties of flour water showed that unripe banana flour from Kluai Namwa (NW and NP) had higher pasting temperature and final viscosity than that of unripe banana flour from Kluai Hom (HW and HP). The water solubility index analysis showed that HW was more soluble than NW (9.24 and 7.32 g/g, respectively). In terms of water absorption index, it was found that unripe banana flour from Kluai Hom (HW 3.22 and HP 2.83 g/g, respectively.) absorbs more water than unripe banana flour from Kluai Namwa (NW 3.00 and NP 2.79 g/g, respectively), and unripe banana flour from the whole banana (HW and NW) absorbs more water than unripe banana flour from the pulp (HP and NP). As for the GI analysis of unripe banana flour, it was found that all 4 types of unripe banana flour had GI values at 40.46-45.22. Pasta was prepared from 4 types of unripe banana flour and cooked, and it was found that the pasta from all 4 types of unripe banana flour had different cooking times (12.30-14.00 minutes). However, the cooking loss and cooking yield was not significantly different ($p \geq 0.05$) as well as the GI value, with a GI of 83.81-85.53. The results from sensory evaluation showed that the unripe banana flour pasta from the pulp of Kluai Hom (HPP) and unripe banana flour pasta from the pulp of Kluai Namwa (NPP) received the highest liking score on appearance, color and overall acceptability, and there was no difference of ($p \geq 0.05$) at 6.10 and 6.13 points, respectively. Therefore, this study found that the pasta from all 4 types of raw banana flour had no difference in pasta quality and GI value. However, pasta prepared from unripe banana flour from banana pulp received higher scores on appearance, color and overall acceptability than pasta prepared from unripe banana flour from whole bananas. As for the results, unripe banana flour prepared from banana pulp should be raw materials that could be used for pasta production.

Key words: unripe banana flour, glycemic index, pasta, cooking properties

บทนำ

กล้วย (*Musa spp.*) เป็นผลไม้ในวงศ์ Musaceae เป็นหนึ่งในผลไม้ที่สำคัญและนิยมบริโภคมากในประเทศไทย และส่วนอื่น ๆ ของโลก โดยเฉพาะในเขตร้อน (Vatanasuchart *et al.*, 2012) เนื่องจากปลูกง่าย ให้ผลผลิตเยอะ และยังเป็นอาหารที่คนต้องการเป็นอันดับที่ 4 รองจากข้าว ข้าวสาลี และข้าวโพด (Khoozani *et al.*, 2019) กล้วยเป็นผลไม้ที่รับประทานแบบผลสุก และจัดเป็นผลไม้ที่เน่าเสียได้ง่าย จึงทำให้ 10-15% ของกล้วยที่เก็บเกี่ยวได้ทั้งหมดไม่สามารถขายเป็นกล้วยเชิงพาณิชย์ได้ (Campuzano *et al.*, 2018) การลดปัญหาการเน่าเสียจึงมีความสำคัญต่อเกษตรกรและผู้บริโภค จึงต้องเพิ่มประโยชน์ของกล้วยโดยการนำไปแปรรูปให้อยู่ในรูปของแป้ง เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในส่วนผสม หรือผลิตผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ ซึ่งสายพันธุ์ของกล้วยในประเทศไทยที่นิยมนำมาทำเป็นแป้ง ได้แก่ กล้วยน้ำว้า กล้วยไข่ กล้วยหอม และกล้วยเล็บมือนาง (Vatanasuchart *et al.*, 2012) โดยกล้วยน้ำว้าและกล้วยหอมมีผลผลิตต่อปีมากกว่ากล้วยสายพันธุ์อื่นเท่ากับ 918,539 และ 117,427 ตัน/ปี ตามลำดับ (Office of Agricultural Economics Region 1, 2017) มีรายงานว่าแป้งกล้วยดิบมีปริมาณสตาร์ชต้านทานการย่อย (Resistant starch, RS) ชนิดที่ 2 สูง โดย RS คือ สตาร์ชที่ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์และถูกดูดซึมในลำไส้เล็กของมนุษย์ แต่จะถูกหมักด้วยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ จึงทำให้มีคุณสมบัติเป็น prebiotic ซึ่งมีประโยชน์ต่อสุขภาพของโฮสต์ โดยไปกระตุ้นกิจกรรมของ probiotic ในลำไส้ใหญ่ และจากการศึกษา พบว่า สายพันธุ์กล้วยที่แตกต่างกัน มีผลทำให้ปริมาณ RS แตกต่างกัน โดยมีรายงานว่าอัตราการย่อยของแป้งกล้วยจากหลายสายพันธุ์ในประเทศไทยมีค่าแตกต่างกัน และมีปริมาณ RS สูง (52.2-68.1%) (Vatanasuchart *et al.*, 2012) นอกจาก RS แล้ว กล้วย

ยังเป็นแหล่งของสารพฤกษเคมีหลายชนิด เช่น แคโรทีนอยด์ โดยมีรายงานว่าสายพันธุ์กล้วยที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีปริมาณแคโรทีนอยด์แตกต่างกันด้วย โดยในเปลือกกล้วยจะมีปริมาณแคโรทีนอยด์ (carotenoid) มากกว่าเนื้อกล้วยในบางสายพันธุ์ (Pereira and Maraschin, 2015) และเนื่องจากกล้วยเป็นแหล่งของ RS และยังมีสารพฤกษเคมีที่มีประโยชน์ จึงมีการนำแป้งกล้วยมาใช้เป็นวัตถุดิบในอาหารหลายชนิด เช่น การใช้แป้งกล้วยน้ำว้าดิบจากเนื้อกล้วยทดแทนแป้งข้าวเจ้าในผลิตภัณฑ์กล้วยเดี่ยว (Tiboonbun, 2012) และใช้แป้งกล้วยหอมทองดิบจากเนื้อกล้วยทดแทนแป้งเซโมลินาในผลิตภัณฑ์พาสต้า (Boonkong *et al.*, 2014) เพื่อเพิ่มปริมาณ RS ในผลิตภัณฑ์อาหาร แต่ยังไม่พบรายงานการศึกษาค่า GI ของแป้งกล้วยที่สายพันธุ์แตกต่างกัน อีกทั้งรายงานการใช้แป้งกล้วยดิบ 100% จากกล้วยทั้งผล ที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารยังพบน้อย โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์พาสต้า (pasta product) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเส้นที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก และในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา (ค.ศ. 2010-2020) การบริโภคพาสต้าเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า จาก 9 ล้านตันต่อปี เป็น 17 ล้านตันต่อปี (News Italian food, 2021) และวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตพาสต้า คือ แป้งเซโมลินา (semolina) ที่ไม่ได้จากแป้งสาลี durum (durum wheat) (Sriprapai *et al.*, 2018) ซึ่งมีปริมาณกลูเตนสูง ทำให้ผู้ที่ป่วยเป็นโรคแพ้กลูเตน (coeliac disease) ไม่สามารถรับประทานอาหารประเภทนี้ได้ เนื่องจากกลูเตนจะไปทำให้ลำไส้เล็กอักเสบและมีผลต่อเนื้อเยื่อบริเวณผนังลำไส้เล็ก ทำให้พื้นที่ในการดูดซึมอาหารลดลง ซึ่งโรคนี้นิยามได้โดยการงดเว้นรับประทานอาหารที่มีส่วนประกอบของกลูเตน ซึ่งวัตถุดิบที่ไม่มีส่วนประกอบของกลูเตน ได้แก่ ข้าว เช่น ข้าวเจ้า พืชตระกูลถั่ว เช่น ถั่วดำ และพืชตระกูลพืชหัว เช่น กล้วย (Zandonadi *et*

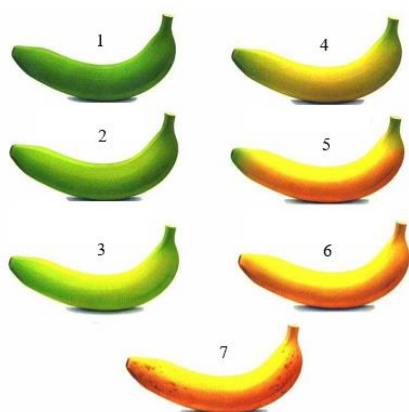
al., 2012; Limroongreungrat and Suksomboon, 2014; Sutheerawattananonda, 2015; Rongchoung and Luangsakul, 2018; Sriprapai *et al.*, 2018) จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า แป้งกล้วยถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อเพิ่มปริมาณ RS อีกทั้งเป็นวัตถุดิบที่ปราศจากกลูเตน แต่อย่างไรก็ตาม มีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยได้ของแป้งกล้วย เช่น สายพันธุ์ (Vatanasuchart *et al.*, 2012) ระดับความแก่ (Campuzano *et al.*, 2018) การทำให้สุก (cooking) (Bi *et al.*, 2017) และการเตรียมแป้งกล้วยจากเนื้อกล้วยและจากกล้วยทั้งผล (Ramli *et al.*, 2009) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของสายพันธุ์กล้วย การเตรียมแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและจากกล้วยทั้งผล ต่อสมบัติทางกายภาพ เคมีฟิสิกส์

และค่า GI ของแป้งกล้วยดิบ คุณภาพของพาสต้า ค่า GI และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมแป้งกล้วยจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล

นำกล้วยดิบ 2 สายพันธุ์ ประกอบด้วย กล้วยน้ำว้า (*Musa* ABB group) สายพันธุ์ปากช่อง 50 และกล้วยหอมทอง (*Musa* AAA group) สายพันธุ์เพชรบุรี โดยใช้กล้วยทั้งเครือ จากสวนเดียวกัน ในการเตรียมแต่ละซ้ำ ที่ระดับความสุกระยะที่ 1 (เปลือกสีเขียวทั้งผล ผลแข็ง ไม่มีส่วนที่สุก) ดังภาพที่ 1



a)



b)



c)

ภาพที่ 1 a) ระดับความสุกของกล้วย (Fernandes and Bonaldo, 2011) b) กล้วยน้ำว้าดิบ และ c) กล้วยหอมดิบ ที่ใช้ในการวิจัย

ล้างด้วยน้ำกลั่นที่มีโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (10 กรัม/ลิตร) แล้วแช่กล้วยดิบในสายละลายกรดซิตริก 0.5% (w/v) เป็นเวลา 15 นาที (กล้วยดิบแต่ละสายพันธุ์ ถูกจำแนกออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 คือกล้วยดิบปอกเปลือก และส่วนที่ 2 คือ กล้วยดิบไม่ปอกเปลือก โดยใช้กล้วยคนละเครือกัน) นำกล้วยดิบไปหั่นให้มีความหนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร แล้ว

นำไปแช่ลงในสารละลายกรดซิตริก 0.5% (w/v) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนได้ความชื้นต่ำกว่า 10% บดให้เป็นผงด้วยเครื่องบดละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช จากนั้นบรรจุแป้งกล้วยดิบลงในถุงสุญญากาศ และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำไปวิเคราะห์

2. การวิเคราะห์คุณภาพของแป้งกล้วยดิบ

2.1 การวิเคราะห์ค่าสี

วัดค่าสีของตัวอย่างแป้ง ตามวิธีของ Pleansri (2019) โดยใช้เครื่องวัดสี Hunter Lab รุ่น Miniscan XE Plus วัดค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง-สีเขียว (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง-สีน้ำเงิน (b^*) นำตัวอย่างแป้งมาใส่ในจานสำหรับวัดสีให้เต็มพื้นที่ของจานโดยไม่มีช่องว่าง แล้วนำมาวัดค่าสีในระบบ CIE

2.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืด

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดตามวิธีของ Pleansri (2019) นำตัวอย่างแป้ง 3 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นปราศจากไอออน 25 กรัม มาวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่อง rapid visco analyser รุ่น RVA 4500 ประเทศสวีเดน โดยใช้สภาวะดังนี้ (1) holding ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที (2) heated ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.42 นาที (3) holding ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.7 นาที (4) cooling ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.88 นาที (5) holding ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที ใช้ความเร็วรอบที่ 960 รอบต่อนาที สำหรับ 10 วินาทีแรก และหลังจากนั้นใช้ความเร็วรอบที่ 160 รอบต่อนาที รายงานผลในรูปแบบของค่า peak viscosity, trough, breakdown, final viscosity, setback from peak, setback from trough และ pasting temperature

2.3 การวิเคราะห์ดัชนีการละลายน้ำและดัชนีการดูดซับน้ำ

วิเคราะห์ดัชนีการละลายน้ำและดัชนีการดูดซับน้ำ ตามวิธีของ Narklaor *et al.* (2011) ชั่งตัวอย่างแป้ง 2.5 กรัม ใส่ในหลอดหมุนเหวี่ยงที่มีฝาและทราบน้ำหนักแน่นอน เติมน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันโดยคนด้วยแท่งแก้ว และคนทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที ล้างส่วนที่ติดมากับแท่งแก้วลงใน

หลอดหมุนเหวี่ยงโดยใช้น้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ 2200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที เทส่วนใสลงในถ้วยอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่ แล้วชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณดัชนีการละลายน้ำ สำหรับหลอดหมุนเหวี่ยงพร้อมส่วนที่เหลือในหลอดนำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณค่าการดูดซับน้ำ ดังสมการ ดัชนีการละลายน้ำ = (น้ำหนักตัวอย่างส่วนที่ละลายน้ำ/น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น) × 100 ดัชนีการดูดซับน้ำ = (น้ำหนักหลอดหมุนเหวี่ยงพร้อมตะกอน - น้ำหนักหลอดหมุนเหวี่ยง)/น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น

2.4 การวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้ง

วิเคราะห์สตาร์ชที่ย่อยได้ในแต่ละเวลาที่คัดแปลงจาก Goñi *et al.* (1997); McCleary *et al.* (2002) โดยใช้ชุด Resistant starch kit ของบริษัท Megazyme นำแป้งกล้วยมาย่อยด้วยเอนไซม์ pancreatic α -amylase เป็นเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที แล้วนำตัวอย่างที่ผ่านการย่อยมาวิเคราะห์ปริมาณกลูโคส โดยการย่อยด้วย amyloglucosidase เป็นเวลา 20 นาที เติม GOPOD reagent แล้วบ่มต่ออีก 20 นาที จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาค่าต่าง ๆ หาปริมาณการย่อยของสตาร์ช ดังสมการ ปริมาณการย่อยของสตาร์ช (%) = $\Delta E \times (F/W) \times 90$ โดย ΔE คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร F คือ การเปลี่ยนหน่วยค่าการดูดกลืนแสงเป็น μg ($F = 100/\text{ค่าการดูดกลืนแสงของกลูโคสมาตรฐาน}$) และ W คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (mg) ($W = \text{น้ำหนักตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์} \times [(100 - \text{ความชื้น})/100]$) จากนั้นหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการย่อยของสตาร์ชกับเวลา (30-180 นาที) โดยแสดงผลเป็นกราฟ จะได้ค่า C_{∞} , C และ t เพื่อหาค่า k ดัง

สมการ $C = C_{\infty}(1 - e^{-kt})$ โดย C คือ ร้อยละของสตาร์ชที่ถูกย่อยที่เวลา t C_{∞} คือ ร้อยละของสตาร์ชที่ถูกย่อยที่ 180 นาที k คือ ค่าคงที่ไคเนติก (min^{-1}) และ t คือ เวลาในการย่อย (min) จากนั้นหาพื้นที่ใต้กราฟ (area under the curve, AUC) ดังสมการ $AUC = C_{\infty}(t_f - t_0) - (C_{\infty}/k)(1 - \exp(-k(t_f - t_0)))$ โดย C_{∞} คือ ค่าสมมูลของปริมาณการย่อยของสตาร์ช t_f คือ เวลาสุดท้าย (180 นาที) t_0 คือ เวลาเริ่มต้น (0 นาที) และ k คือ ค่าคงที่ไคเนติก (min^{-1}) จากนั้นหาค่าดัชนีการย่อย (hydrolysis index, HI) ดังสมการ $HI = (AUC_{\text{sample}}/AUC_{\text{reference}}) \times 100$ (หมายเหตุ reference คือ ขนมอบ่งขาว ทำวิธีเดียวกันกับตัวอย่าง) จากนั้นจึงหาค่าดัชนีไกลซีมิก (GI) ดังสมการ $GI = 39.71 + (0.549 \times HI)$ (Goñi *et al.*, 1997)

3. การเตรียมพาสต้าแป้งกล้วยน้ำว้าดิบและแป้งกล้วยหอมดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล

เตรียมพาสต้าแป้งกล้วยน้ำว้าดิบและแป้งกล้วยหอมดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล คัดแปลงจาก Zheng *et al.* (2015) โดยนำแป้งกล้วยดิบที่เตรียมได้จากข้อที่ 1 (46.0% ของส่วนผสมทั้งหมด) ผสมกับถั่วรูกัม (2.5% ของส่วนผสมทั้งหมด) และแซนแทนกัม (2.5% ของส่วนผสมทั้งหมด) ร่อนผ่านตะแกรง แล้วนำไปผสมให้เข้ากันประมาณ 3 นาที ในเครื่องผสม (kitchen aid) เติมน้ำข้าวผง (6.0% ของส่วนผสมทั้งหมด) และเติมน้ำ (43.0% ของส่วนผสมทั้งหมด) ลงไป ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม โดยใช้หัวผสมแบบตะขอ ที่ความเร็วระดับปานกลางจนเข้ากัน ซึ่งใช้เวลาประมาณ 30 นาที แล้วนำไปรีดผ่านเครื่องรีดแป้ง จนมีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร จากนั้นตัดเส้นด้วยเครื่องรีดแป้งให้มีความกว้างประมาณ 0.6 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง บรรจุพาสต้าในถุงพลาสติกโพลีเอทิลีนและปิดผนึกให้สนิทเพื่อรอการวิเคราะห์คุณภาพต่อไป

4. การวิเคราะห์คุณภาพของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

4.1 การวิเคราะห์คุณภาพหลังการต้ม

วิเคราะห์คุณภาพของพาสต้าแป้งกล้วยดิบหลังการต้ม ตามวิธี AACCC (American Association of Cereal Chemist) (2000) โดยชั่งเส้นพาสต้า (ความยาวเส้น 5 เซนติเมตร) 5 กรัม ต้มในน้ำเดือด 200 มิลลิลิตร หาระยะเวลาที่เหมาะสมในการต้มพาสต้าแป้งกล้วยดิบให้สุก (cooking time) โดยสุ่มตรวจสอบทุก ๆ 30 วินาที หาปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loss) คำนวณจากสมการ ปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (%) = [(น้ำหนักบีกเกอร์หลังการอบ-น้ำหนักบีกเกอร์เปล่า)/ น้ำหนักพาสต้าก่อนต้ม] $\times 100$ และหาน้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield) คำนวณจากสมการ น้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (%) = (น้ำหนักพาสต้าสุก/น้ำหนักพาสต้าก่อนต้ม) $\times 100$

4.2 การวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้า

วิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ โดยนำพาสต้ามาต้มตามเวลาที่เหมาะสมที่วิเคราะห์ได้ในข้อ 4.1 แล้วนำมาทดลองผ่านตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร และวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิกตามวิธีในข้อ 2.4

4.3 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

นำพาสต้าแป้งกล้วยดิบแต่ละสูตรมาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส เตรียมพาสต้าแป้งกล้วยดิบที่ใช้ในการทดสอบโดยใช้เวลาในการต้มพาสต้าแป้งกล้วยดิบให้สุกตามเวลาที่เหมาะสมในการต้มพาสต้าตามข้อ 4.1 แล้วนำมาประเมินความชอบด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น เนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบโดยรวม ใช้วิธีการให้คะแนนตามลำดับความชอบแบบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน

5. การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

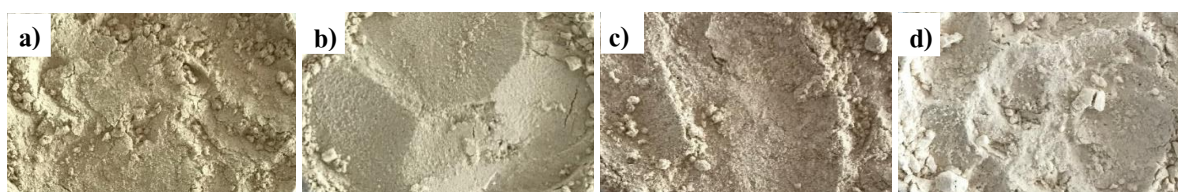
วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และสำหรับการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส วางแผนการทดลองแบบ RCBD (randomized complete block design) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม Minitab 18

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการวิเคราะห์คุณภาพแป้งกล้วยดิบ

1.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสี

แป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ประกอบด้วย แป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล (HW) แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HP) แป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล (NW) และแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NP) โดยแป้งมีลักษณะเป็นผงละเอียด และมีสีที่แตกต่างกัน ตั้งแต่สีขาวนวลไปจนถึงสีน้ำตาลอ่อน ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ลักษณะของแป้งกล้วยดิบ a) แป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล (HW) b) แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HP) c) แป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล (NW) d) แป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NP)

จากการวิเคราะห์ค่าสีของแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด พบว่า สายพันธุ์ของกล้วยและการเตรียมแป้งกล้วยดิบมีผลให้ค่าสี L^* a^* และ b^* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 1) จากตารางแสดงให้เห็นว่าการเตรียมแป้งกล้วยดิบโดยการผสมส่วนเปลือกลงไปด้วย (HW และ NW) ส่งผลให้แป้งมีสีน้ำตาลเข้มกว่าแป้งกล้วยดิบที่เตรียมจากเนื้อกล้วย (HP และ NP) โดยมีค่า L^* ต่ำกว่า และมีค่า a^* และ b^* สูงกว่า เนื่องจากมีรายงานว่าในเปลือกกล้วยมีสารเบต้าแคโรทีน (beta carotene) (Pereira and Maraschin, 2015) และนอกจากนั้นในเปลือกกล้วยดิบยังมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds)

สูง (Charoenteeraboon *et al.*, 2019) ซึ่งสารดังกล่าวบางชนิดเป็นสารที่มีสีเข้ม เช่น แทนนิน (tannin) จึงส่งผลให้แป้งที่มีเปลือกกล้วยผสมมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น จากผลการทดลองสังเกตได้ว่าสายพันธุ์ของกล้วยมีผลต่อสีของแป้งที่ได้ด้วย โดยจะเห็นได้ชัดเจนจากแป้งกล้วยดิบที่เตรียมจากเนื้อกล้วย โดยแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HP) มีสีน้ำตาลเข้มกว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NP) อาจเกิดจากในกล้วยหอมมีรงควัตถุที่เป็นแคโรทีนอยด์มากกว่า จึงทำให้มีสีน้ำตาลเข้มกว่าแป้งกล้วยน้ำว้า (Pereira and Maraschin, 2015)

ตารางที่ 1 ค่าสี L* a* และ b* ของแป้งกล้วยดิบ

ชนิดของแป้งกล้วยดิบ	L*	a*	b*
HW	76.22 ± 0.04 ^d	1.62 ± 0.02 ^b	15.86 ± 0.01 ^a
HP	80.87 ± 0.06 ^b	1.36 ± 0.01 ^c	12.51 ± 0.02 ^c
NW	76.61 ± 0.07 ^c	2.28 ± 0.02 ^a	14.03 ± 0.04 ^b
NP	87.31 ± 0.03 ^a	0.59 ± 0.03 ^d	12.02 ± 0.03 ^d

^{a,b,c,d} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวนอง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

1.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืด

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง rapid visco analyser ดังตารางที่ 2 พบว่า สายพันธุ์ของกล้วยมีผลต่ออุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) โดยแป้งกล้วยหอมดิบ (HW และ HP) มี pasting temperature ต่ำกว่าแป้งกล้วยน้ำว้าดิบ (NW และ NP) อาจเกิดจากแป้งกล้วยหอมดิบสามารถดูดน้ำและเกิดความหนืดในระหว่างการให้ความร้อนได้มากกว่า จึงเกิดความหนืดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ที่แสดงถึงความสามารถในการจับตัวกันของสตาร์ชกับน้ำ เกิดการพองตัวของสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อน พบว่า แป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มีค่า peak viscosity อยู่ที่ 5409.67-6220.33 cP ซึ่งเป็นค่า peak viscosity ที่สูงกว่าแป้งสาลี ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการทำพาสต้า โดยแป้งสาลีจะมีค่า peak viscosity อยู่ที่ 2594.51 cP (216.21 RVU) (Charoenthaikij, 2012)

เนื่องจากเมล็ดสตาร์ชของแป้งสาลีมีกำลังการพองตัวอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอะไมโลสและไขมัน (Sriroth and Piyajomkwan, 2003) ในขณะที่แป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด สามารถรวมตัวกับน้ำได้ดี และเมื่อได้รับความร้อนจะมีกำลังการพองตัวสูง (Suthanukool, 2015) และสายพันธุ์ของกล้วยมีผลต่อค่า setback from peak, setback from trough และ final viscosity โดยแป้งกล้วยน้ำว้า (NW และ NP) มีค่าสูงกว่าแป้งกล้วยหอม (HW และ HP) ค่าความหนืดสุดท้ายจะสัมพันธ์กับปริมาณของอะไมโลส โดยแป้งกล้วยน้ำว้ามีปริมาณอะไมโลสเท่ากับ 32.05% ซึ่งสูงกว่าแป้งกล้วยหอมที่มีปริมาณอะไมโลสอยู่ที่ 26.10% (Bi *et al.*, 2017) โดยแป้งกล้วยที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัว (retrogradation) ได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ (Sriroth and Piyajomkwan, 2003)

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงด้านความหนืดของแป้งกล้วยดิบ

Parameters	HW	HP	NW	NP
Peak viscosity	6044.33 ± 206.89 ^a	6220.33 ± 54.60 ^a	6064.33 ± 32.56 ^a	5409.67 ± 193.24 ^b
Trough	3180.33 ± 55.22 ^b	3151.00 ± 162.82 ^b	3852.00 ± 75.29 ^a	3333.00 ± 140.50 ^b
Breakdown	2864.00 ± 162.75 ^a	3069.33 ± 108.77 ^a	2212.33 ± 43.15 ^b	2076.67 ± 84.95 ^b
Final viscosity	3655.00 ± 64.97 ^c	3819.67 ± 59.16 ^c	4912.67 ± 71.01 ^a	4380.00 ± 114.53 ^b
Setback from peak	474.67 ± 22.28 ^c	668.67 ± 104.89 ^b	1060.67 ± 16.01 ^a	1047.00 ± 39.84 ^a
Setback from trough	-2389.33 ± 144.25 ^b	-2400.67 ± 16.50 ^b	-1151.67 ± 41.65 ^a	-1029.67 ± 122.91 ^a
Peak time (min)	4.71 ± 0.08 ^b	4.69 ± 0.03 ^b	4.91 ± 0.08 ^a	4.71 ± 0.03 ^b
Pasting temperature (°C)	80.07 ± 0.80 ^b	81.47 ± 0.98 ^{ab}	83.45 ± 0.85 ^a	82.27 ± 0.53 ^a

^{a,b,...} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวนอน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

1.3 ผลการวิเคราะห์ดัชนีการละลายน้ำและดัชนีการดูดซับน้ำ

จากผลการวิเคราะห์ดัชนีการละลายน้ำ ดังตารางที่ 3 พบว่า การเตรียมแป้งกล้วยดิบมีผลต่อดัชนีการละลายน้ำ โดยแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล (HW) มีดัชนีการละลายน้ำสูงกว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HP) อาจเกิดจากในเปลือกกล้วยหอมอาจมีองค์ประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น เพคติน และน้ำตาล มากกว่าส่วนเนื้อ แต่ในทางตรงข้าม พบว่า แป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล (NW) มีดัชนีการละลายน้ำต่ำกว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NP) อาจเนื่องจากเนื้อกล้วยน้ำว้ามีส่วนที่ละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาล (Menezes *et al.*, 2011) มากกว่าส่วนเปลือกกล้วยจึงทำให้มีดัชนีการละลายน้ำที่สูงกว่า นอกจากนี้สายพันธุ์ของกล้วยก็มีผลต่อดัชนีการละลายน้ำ โดยแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล (HW) มีดัชนีการละลายน้ำสูงกว่าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล (NW) เนื่องจากในเปลือกกล้วยหอมมีองค์ประกอบที่ละลายน้ำได้ เช่น เพคติน โดยในเปลือกกล้วยหอมมีเพคติน 17.31 ± 0.07 ซึ่งมากกว่าเปลือกกล้วยน้ำว้าที่มีเพคติน 15.89 ± 0.02 (Khamsucharit *et al.*, 2018) ใน

ส่วนของดัชนีการดูดซับน้ำ พบว่า การเตรียมแป้งกล้วยดิบมีผลต่อดัชนีการดูดซับน้ำ โดยแป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผล (HW และ NW) ดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วย (HP และ NP) อาจเนื่องจากส่วนของเปลือกมีองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น เพคติน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่ความสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าสตาร์ช (Alkarkhi *et al.*, 2011) และอาจเกิดจากแป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผลมีปริมาณใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำมากกว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วย มีรายงานว่าแป้งกล้วยหอมจากกล้วยทั้งผลมีอัตราส่วนของใยอาหารที่ละลายน้ำได้กับใยอาหารที่ไม่ละลายในน้ำเท่ากับ 1:6 ในขณะที่แป้งกล้วยหอมจากเนื้อกล้วยมีอัตราส่วนของใยอาหารที่ละลายน้ำได้กับใยอาหารที่ไม่ละลายในน้ำเท่ากับ 1:5 (Bezerra *et al.*, 2013) จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีกว่า และจากตารางจะเห็นได้ว่าสายพันธุ์ที่แตกต่างกันก็มีผลต่อดัชนีการดูดซับน้ำ โดยแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอม (HW และ HP) ดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้า (NW และ NP) อาจเนื่องจากกล้วยหอมมีปริมาณใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำมากกว่ากล้วยน้ำว้า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ของกล้วยแต่ละสายพันธุ์ด้วย

ตารางที่ 3 คำนวณการละลายน้ำและดัชนีการดูดซับน้ำของแป้งกล้วยดิบ

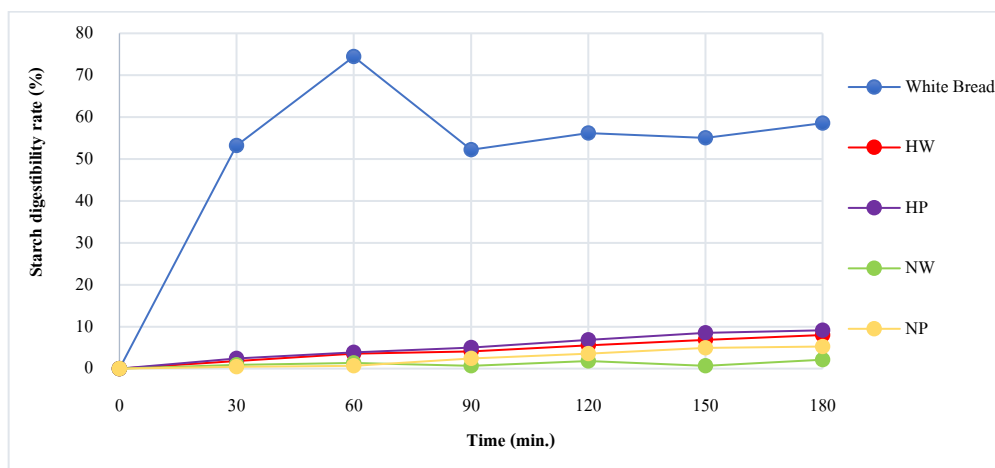
ชนิดของแป้งกล้วยดิบ	ดัชนีการละลายน้ำ (g/g)	ดัชนีการดูดซับน้ำ (g/g)
HW	9.24 ± 0.10^b	3.22 ± 0.02^a
HP	8.45 ± 0.09^c	2.83 ± 0.01^{bc}
NW	7.32 ± 0.17^d	3.00 ± 0.08^b
NP	9.97 ± 0.11^a	2.79 ± 0.11^c

a,b,... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวนอง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

1.4 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้ง

จากกราฟอัตราการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลอง (ภาพที่ 3) พบว่า อัตราการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองของแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ตลอดระยะเวลาการย่อยถึง 180 นาที มีค่าต่ำกว่าขนมปังขาว (ตัวอย่างอ้างอิง) เนื่องจากแป้งกล้วยดิบประกอบด้วย RS2 โดย RS2 เป็นสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกหนาแน่นและเป็นระเบียบ จึงทำให้ยากต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Khoozani *et al.*, 2019)

และจากกราฟแสดงให้เห็นว่าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้า (NW และ NP) มีอัตราการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองต่ำกว่าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอม (HW และ HP) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vatanasuchart *et al.* (2012) ที่รายงานว่า แป้งกล้วย (flour) จากกล้วยน้ำว้า มีความสามารถในการย่อยได้ต่ำกว่าแป้งกล้วยจากกล้วยหอมในช่วง 30-180 นาทีของการย่อย



ภาพที่ 3 อัตราการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองของแป้งกล้วยดิบชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับขนมปังขาว (ตัวอย่างอ้างอิง)

จากผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิก (GI) ของแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด (ตารางที่ 4) จะเห็นได้ว่าการเตรียมแป้งกล้วยดิบมีผลต่อค่า GI โดยแป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผลของกล้วยทั้ง 2 สายพันธุ์ (HW และ

NW) มีค่า GI และมีอัตราการย่อยของสตาร์ชต่ำกว่าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วย (HP และ NP) ซึ่งอาจเกิดจากแป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผล (HW และ NW) มีส่วนของเปลือกกล้วย ซึ่งเปลือกกล้วยมีเส้นใยอาหาร

หรือโพลีแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (non-starch polysaccharides, NPS) เช่น เพคติน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ทำให้เกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนระหว่างสตรัคเจอร์และ NPS จึงสามารถต้านทานและจำกัดการเข้าถึงของเอนไซม์ที่ย่อยแป้งได้ (Vatanasuchart *et al.*, 2012; Bi *et al.*, 2017) นอกจากนี้ยังพบว่า สายพันธุ์ของกล้วยก็มีผลต่อค่า GI โดยแป้งจากกล้วยน้ำว้าดิบ (NW และ NP) มีค่า GI ต่ำกว่าแป้งจากกล้วยหอมดิบ (HW และ HP) ซึ่งอาจขึ้นอยู่กับปริมาณอะไมโลสของ

กล้วยน้ำว้าดิบ (24.11 ± 0.36) มากกว่ากล้วยหอมดิบ (17.65 ± 0.54) (Moongngarm, 2013) โดยแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะทำให้มีค่า GI ต่ำกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ (Dipnaik and Kokare, 2017) ค่า GI ที่วิเคราะห์ได้จากแป้งกล้วยดิบในงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับรายงานของ Kamchansuppasin *et al.* (2021) ที่รายงานเกี่ยวกับค่า GI ของผลไม้ไทย โดยจากงานวิจัย พบว่า กล้วยน้ำว้ามีค่า GI 30.5 ± 2.7 ซึ่งต่ำกว่ากล้วยหอม ที่มีค่า GI 57.0 ± 7.2

ตารางที่ 4 ค่าดัชนีไกลซีมิกของแป้งกล้วยดิบ

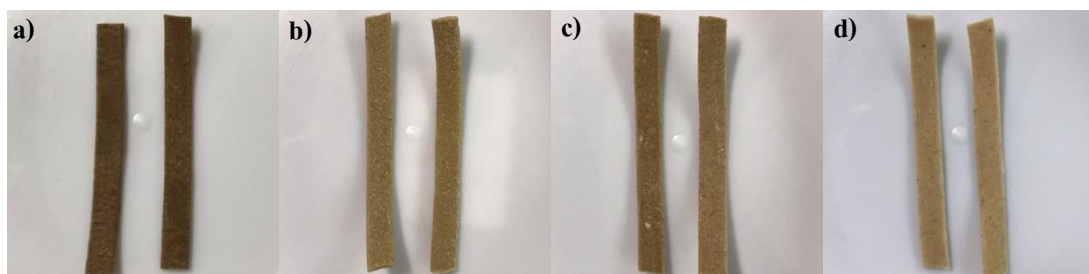
ตัวอย่าง	ค่าดัชนีไกลซีมิก
HW	44.27 ± 0.28^b
HP	45.22 ± 0.06^a
NW	40.46 ± 0.18^d
NP	42.37 ± 0.20^c

a,b,... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวนอน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2. ผลการวิเคราะห์คุณภาพของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

เส้นพาสต้าที่เตรียมจากแป้งกล้วยน้ำว้าดิบ และแป้งกล้วยหอมดิบจากเนื้อกล้วยและกล้วยทั้งผล มีสีที่แตกต่างกันออกไป แสดงดังภาพที่ 4 แต่มีความเรียบของเส้นที่ใกล้เคียงกัน โดยเส้นพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล (HWP) และพาสต้าแป้ง

กล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล (NWP) มีสีน้ำตาลเข้มกว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HPP) และพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NPP) ซึ่ง HWP มีสีน้ำตาลเข้มมากที่สุด และ NPP มีสีอ่อนที่สุด ซึ่งสีของพาสต้าจากแป้งกล้วยดิบสอดคล้องกับสีของแป้งกล้วยดิบ ที่แสดงไว้ในภาพที่ 2



ภาพที่ 4 ลักษณะของเส้นพาสต้าแป้งกล้วยดิบ a) พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยหอมทั้งผล (HWP) b) พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HPP) c) พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยน้ำว้าทั้งผล (NWP) d) พาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NPP)

2.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพของพาสต้าแป้งกล้วยดิบหลังการต้ม

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพของเส้นพาสต้าแป้งกล้วยดิบหลังการต้ม พบว่า พาสต้าแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มีเวลาที่เหมาะสมในการต้มเส้นพาสต้า (cooking time) แป้งกล้วยดิบให้สุกแตกต่างกัน ดังตารางที่ 5 แต่จะสังเกตเห็นว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผลของกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ (HWP และ NWP) มีเวลาที่เหมาะสมในการต้มเส้นพาสต้าให้สุก

น้อยกว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วย (HPP และ NPP) อาจเนื่องจากเปลือกกล้วยอุดมไปด้วยเส้นใยสูง และเมื่อเส้นใยถูกนำไปต้มก็สามารถดูดน้ำได้มากกว่า จึงทำให้พาสต้าที่มีส่วนประกอบของเปลือกกล้วยสุกเร็วกว่า (Rodríguez-Ambroz *et al.*, 2008) แต่อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด มีปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (cooking loss) และน้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (cooking yield) แตกต่างกัน อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

ตารางที่ 5 เวลาที่เหมาะสมในการต้มพาสต้าแป้งกล้วยดิบให้สุก ปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม และน้ำหนักที่ได้หลังการต้มของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

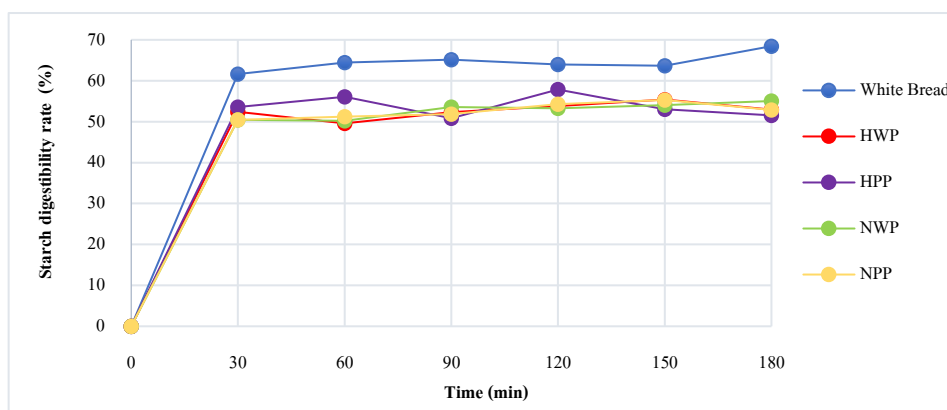
ชนิดของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ	Cooking time (min)	Cooking loss (%) ^{ns}	Cooking yield (%) ^{ns}
HWP	13.00 ± 0.00	7.92 ± 0.06	314.33 ± 0.66
HPP	14.00 ± 0.00	7.65 ± 0.93	334.50 ± 14.60
NWP	12.30 ± 0.00	7.04 ± 0.13	346.81 ± 3.21
NPP	13.00 ± 0.00	7.71 ± 0.99	337.80 ± 31.60

^{ns} หมายถึง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้า

จากกราฟอัตราการย่อยสลายในหลอดทดลองของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ 4 ชนิด (ภาพที่ 5) แสดงให้เห็นว่าอัตราการย่อยสลายในหลอดทดลองของพาสต้าแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ต่ำกว่าขนมปังขาว (ตัวอย่างอ้างอิง) เกิดจาก RS2 ในแป้งกล้วยดิบ

เป็นสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกหนาแน่นและเป็นระเบียบ อีกทั้งยังมีเส้นใยอาหาร จึงทำให้ยากต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Khoozani *et al.*, 2019) แต่อย่างไรก็ตาม จากกราฟจะเห็นได้ว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ก็มีอัตราการย่อยที่ใกล้เคียงกันในช่วง 150-180 นาทีของการย่อย



ภาพที่ 5 อัตราการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลองของพาสต้าแป้งกล้วยดิบชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับขนมปังขาว (ตัวอย่างอ้างอิง)

จากผลการวิเคราะห์ค่า GI ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ดังตารางที่ 6 พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) โดยมีค่า GI อยู่ที่ 83.81-85.53 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม GI สูง และเมื่อเทียบค่า GI ของพาสต้ากับค่า GI ของแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการเตรียมพาสต้า (ตารางที่ 4) ที่มีค่า GI ต่ำ (40.46-45.22) อาจกล่าวได้ว่า เมื่อเส้นพาสต้าแป้งกล้วยดิบถูกต้มให้สุก RS2 ที่อยู่ในพาสต้าก็จะถูกเปลี่ยนเป็น RDS และ SDS จึงทำให้ RS2 ที่เหลือลดลง เพราะเมื่อเส้นพาสต้าถูกต้มให้

สุกเม็ดแป้งก็จะเกิดการพองตัว (swelled) และแตกออก (burst) ทำให้บริเวณที่จับกับเอนไซม์เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้อัตราการย่อยเพิ่มขึ้น (Utrilla *et al.*, 2014) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bi *et al.* (2017) ที่รายงานเกี่ยวกับอัตราการย่อยในหลอดทดลองของแป้งกล้วยดิบสายพันธุ์ต่าง ๆ พบว่า แป้งกล้วยดิบแต่ละสายพันธุ์เมื่อถูกนำไปให้ความร้อนหรือทำให้สุก (cooked) อัตราการย่อยในหลอดทดลองจะเพิ่มสูงขึ้นจาก 8-17% เป็น 40-60%

ตารางที่ 6 ค่าดัชนีไกลซีมิกของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

ตัวอย่าง	ค่าดัชนีไกลซีมิก ^{ns}
HWP	85.40 ± 2.39
HPP	83.81 ± 1.10
NWP	85.53 ± 0.22
NPP	84.10 ± 1.00

^{ns} หมายถึง ไม่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

2.3 การประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส

จากผลการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัสรสชาติ และความชอบโดยรวมของพาสต้าปราศจากกลูเตนจากแป้งกล้วยดิบ ดังตารางที่ 7 พบว่า พาสต้าปราศจากกลูเตนจากแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ได้รับคะแนนความชอบทางด้านกลิ่น เนื้อสัมผัส และรสชาติแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) แต่เมื่อพิจารณาคะแนนความชอบต่อคุณลักษณะทางด้านลักษณะปรากฏ สี และความชอบโดยรวม พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยน้ำว้า (NPP) ได้รับ

คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสทางด้านลักษณะปรากฏ สีและความชอบโดยรวมสูงที่สุด แต่ไม่แตกต่างจากพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยหอม (HPP) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผลของกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ (HWP และ NWP) มีคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสที่ต่ำกว่าพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยของกล้วยทั้งสองสายพันธุ์ (HPP และ NPP) โดยเฉพาะคุณลักษณะทางด้านสี เนื่องจากพาสต้าแป้งกล้วยดิบจากกล้วยทั้งผล (HWP และ NWP) มีส่วนประกอบของเปลือกกล้วย ทำให้เส้นพาสต้ามีสีน้ำตาลเข้ม อาจทำให้ผู้ทดสอบไม่คุ้นเคยจึงให้คะแนนทางด้านดังกล่าวต่ำ

ตารางที่ 7 คะแนนการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ของพาสต้าแป้งกล้วยดิบ

ชนิดของแป้งกล้วยดิบ	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น ^{ns}	เนื้อสัมผัส ^{ns}	รสชาติ ^{ns}	ความชอบโดยรวม
HWP	4.83 ± 1.88 ^c	4.53 ± 2.00 ^b	5.07 ± 1.60	5.37 ± 1.19	5.00 ± 1.34	5.13 ± 1.36 ^b
HPP	6.20 ± 1.71 ^{ab}	6.10 ± 1.81 ^a	5.50 ± 1.59	5.77 ± 1.55	5.57 ± 1.65	6.10 ± 1.69 ^a
NWP	5.50 ± 1.74 ^{bc}	5.07 ± 1.68 ^b	5.10 ± 1.54	5.43 ± 1.38	5.37 ± 1.52	5.50 ± 1.57 ^{ab}
NPP	6.47 ± 1.67 ^a	6.53 ± 1.59 ^a	5.63 ± 1.40	5.63 ± 1.60	5.47 ± 1.65	6.13 ± 1.67 ^a

a,b,... หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

^{ns} หมายถึง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

สรุป

สายพันธุ์กล้วย และการเตรียมแป้งกล้วยดิบจากเนื้อกล้วยและจากกล้วยทั้งผล มีผลต่อสมบัติทางกายภาพเคมีฟิสิกส์ และค่า GI ซึ่งค่า GI ของแป้งกล้วยดิบที่เตรียมได้ทุกตัวอย่างในการวิจัยนี้ จัดอยู่ในกลุ่มอาหาร GI ต่ำ และเมื่อนำแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ไปทำเป็นเส้นพาสต้า พบว่า มีคุณภาพของเส้นและค่า GI ไม่แตกต่างกัน แต่จากการทดสอบทางประสาทสัมผัส พาสต้าที่เตรียมจากเนื้อกล้วยได้รับคะแนนความชอบโดยรวมมากกว่าพาสต้าที่เตรียมจากกล้วยทั้งผล แต่อย่างไรก็ตามพาสต้าที่เตรียมจากแป้งกล้วยดิบทั้ง 4 ชนิด ยังมีค่า GI สูง ในอนาคตจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเลือกวัตถุดิบที่มีค่า GI ลดลงหรือต่ำกว่ามาผสมหรือทดแทนลงในส่วนผสมเพื่อลดค่า GI ในผลิตภัณฑ์พาสต้าปราศจากกลูเตนจากแป้งกล้วยดิบต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- AACC (American Association of Cereal Chemist). 2000. **Approved Methods of the American Association of Cereal Chemist**. American Association of Cereal Chemists, Minnesota.
- Alkarkhi, A.F.M., Ramli, S.B., Yong, Y.S. and Easa, A.M. 2011. Comparing physicochemical properties of banana pulp and peel flours prepared from green and ripe fruits. **Food Chemistry** 129(2): 312-318.
- Bezerra, C.V., Rodrigues, A.M.D.C., Amante, E.R. and Silva, L.H.M.D. 2013. Nutritional potential of green banana flour obtained by drying in spouted bed. **Revista Brasileira de Fruticultura** 35(4): 1140-1146.
- Bi, Y., Zhang, Y., Jiang, H., Hong, Y., Gu, Z., Cheng, L., Li, Z. and Li, C. 2017. Molecular structure and digestibility of banana flour and starch. **Food Hydrocolloids** 72: 219-227.
- Boonkong, J., Bunmee, T. and Ruenkeaw, P. 2014. Application of Resistant Starch from Unripe Banana "Hom Thong" (*Musa sapientum* L., AAA group) in Pasta. **Journal of Food**

- Technology, Siam University** 10(1): 19-29.
(in Thai)
- Campuzano, A., Rosell, C.M. and Cornejo, F. 2018. Physicochemical and nutritional characteristics of banana flour during ripening. **Food Chemistry** 256: 11-17.
- Charoenteeraboon, J., Ngawhirunpat, T., Chaidegumjorn, A. , Asavapichayont, P. , Mahadlek, J. and Tuntarawongsa, S. 2019. Total phenolic content and antioxidant activities of different parts of Hom Thong banana extract and extraction related factors. **Thai Bulletin of Pharmaceutical Science** 14(2): 47-60. (in Thai)
- Charoenthaikij, P. 2012. **Research Reports on The Development of Bread from Wheat Substituted with Glutinous Rice Flour.** Srinakharinwirot University. (in Thai)
- Dipnaik, K. and Kokare, P. 2017. Ratio of Amylose and Amylopectin as indicators of glycaemic index and in vitro enzymatic hydrolysis of starches of long, medium and short grain rice. **International Journal of Research in Medical Sciences** 5(10): 4502-4505.
- Fernandes, S.O. and Bonaldo, S.M. 2011. Anthracnose (*Colletotrichum musae*) control and conservation in post-harvest dwarf banana in Northern Mato Grosso. **Enciclopedia Biosfera** 7(3): 237-247.
- Goñi, I., Garcia-Alonso, A. and Saura-Calixto, F. 1997. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. **Nutrition Research** 17(3): 427-437.
- Kamchansuppasin, A., Sirichakwal, P.P., Bunprakong, L., Yamborisut, U., Kongkachuichai, R., Kriengsinyos, W. and Nounmusig, J. 2021. Glycaemic index and glycaemic load of commonly consumed Thai fruits. **International Food Research Journal** 28(4): 788-794.
- Khamsucharit, P., Laohaphatanalert, K., Gavinlertvatana, P., Sriroth, K. and Sangseethong, K. 2018. Characterization of pectin extracted from banana peels of different varieties. **Food Science and Biotechnology** 27(3): 623-629.
- Khoozani, A. A. , Bekhit, A. E. D. A. and Birch, J. 2019. Effects of different drying conditions on the starch content, thermal properties and some of the physicochemical parameters of whole green banana flour. **International Journal of Biological Macromolecules** 130: 938-946.
- Limroongreungrat, K. and Suksomboon, A. 2014. Effect of Black Bean Flour Substitution on Quality of Extruded Rice Pasta. **Agricultural Science Journal** 45(2)(Suppl.): 541-544. (in Thai)
- McCleary, B.V., McNally, M. and Rossiter, P. 2002. Measurement of Resistant Starch by Enzymatic Digestion in Starch and Selected Plant Materials: Collaborative Study. **Journal of AOAC International** 85(5): 1103-1111.
- Menezes, E. W., Tadini, C. C., Tribess, T. B., Zuleta, A., Binaghi, J., Pak, N., Gloria, V., Dan, M. C. T., Bertolini, A. C., Cordenunsi, B. R. and Lajolo, F. M. 2011. Chemical Composition and Nutritional Value of Unripe Banana Flour (*Musa acuminata*, var. Nanicação). **Plant Foods for Human Nutrition** 66(3): 231-237.
- Moongngarm, A. 2013. Chemical Compositions and Resistant Starch Content in Starchy Foods.

- American Journal of Agricultural and Biological Sciences** 8(2): 107-113.
- Narklaor, D., Sangnark, A. and Limroongreungrat, K. 2011. Improvement in Quality of Jackfruit Seed Flour by Pregelatinization. **Burapha Science Journal** 16(1): 12-21. (in Thai)
- News Italian food. 2021. **World Pasta Day, consumers going crazy for Italian pasta.** Available Source: <https://news.italianfood.net/2021/10/21/the-world-is-increasingly-hungry-for-pasta/>, December 17, 2021.
- Office of Agricultural Economics Region 1. 2017. **Moving forward to push Thai bananas to the world market.** Available Source: <https://www.chiangmainews.co.th/page/archives/633777/>, December 10, 2021. (in Thai)
- Pereira, A. and Maraschin, M. 2015. Banana (*Musa* spp.) from peel to pulp: Ethnopharmacology, source of bioactive compounds and its relevance for human health. **Journal of Ethnopharmacology** 160: 149-163.
- Pleasri, O. 2019. Quality improvement of dried alkaline noodle from rice flour by adding pregelatinized rice flour, guar gum and transglutaminase. Master Thesis of Science (Food Science and Technology), Burapha University. (in Thai)
- Ramli, S., Alkarkhi, A., Yeoh, S.Y., Min-Tze, L. and Easa, A. 2009. Effect of banana pulp and peel flour on physicochemical properties and in vitro starch digestibility of yellow alkaline noodles. **International Journal of Food Sciences and Nutrition** 60(S4): 326-340.
- Rodríguez- Ambriz, S. L. , Islas- Hernández, J. J. , Agama-Acevedo, E. , Tovar, J. and Bello-Pérez, L.A. 2008. Characterization of a fibre-rich powder prepared by liquefaction of unripe banana flour. **Food Chemistry** 107(4): 1515-1521.
- Rongchoung, J. and Luangsakul, N. 2018. Development of cookies product from selected gluten-free flours. **Phranakhon Rajabhat Research Journal** 13(2): 34-45. (in Thai)
- Sripapai, H., Boonchai, C. and Huadong, Y. 2018. Development of Fresh Pasta from Brown Rice Flour. **Thai Journal of Science and Technology** 7(1): 58-69. (in Thai)
- Sriroth, K. and Piyajomkwan, K. 2003. **Flour Technology.** 3rd ed. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Suthanukool, P. 2015. **Research Reports on Research and Development Bananas Production for Fresh Food to Increase Quantity and Quality yields and valued.** Department of Agriculture, Bangkok. (in Thai)
- Sutheerawattananonda, M. 2015. **Research Reports on Increase of resistant starch in rice pasta products.** Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Tiboonbun, W. 2012. Production of High Undigestible Carbohydrates Rice Noodle Using Unripe Banana Flour. Master Thesis of Science (Food Technology), Mahasarakham University. (in Thai)
- Utrilla, R. , Rodríguez- Huevo, M. , Carrillo- Navas, H. , Hernández- Jaimes, C. , Vernon- Carter,

- E.J. and Alvarez-Ramirez, J. 2014. In vitro digestibility, physicochemical, thermal and rheological properties of banana starches. **Carbohydrate polymers** 101: 154-162.
- Vatanasuchart, N., Niyomwit, B. and Wongkrajang, K. 2012. Resistant starch content, in vitro starch digestibility and physico-chemical properties of flour and starch from Thai bananas. **Maejo International Journal of Science and Technology** 6(2): 259-271.
- Zandonadi, R.P., Botelho, R.B., Gandolfi, L., Ginani, J. S. , Montenegro, F. M. and Pratesi, R. 2012. Green Banana Pasta: An Alternative for Gluten- Free Diets. **Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics** 112(7): 1068-1072.
- Zheng, Z., Stanley, R., Gidley, M.J. and Dhital, S. 2015. Structural properties and digestion of green banana flour as a functional ingredient in pasta. **Food and Function** 7(2): 771-778.