การใช้กรดไขมันในน้ำมันปาล์มเพื่อผลิตสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพ
Utilization of Fatty Acid in Palm Oil for Bio-based Surfactant

วราภรณ์ ศรีพลเคน[1] ฐิติพร วัฒนกุล[2] ขนิษฐา ปองนาน[2] อาทิตย์ อัศวสุขี[3]
E-mail: artit.au@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพ ได้แก่ น้ำตาลเอสเทอร์ของกรดไขมัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (ได้แก่ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด และเอนไซม์ *Candida Antarctica* lipase B ที่ถูกตรึง) ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรดถูกรายงานว่ามีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของน้ำตาล (ได้แก่ ซูโครส แลคโตส ฟรุกโตส และกลูโคส) และกรดโอเลอิก เพื่อผลิตน้ำตาลโอลีเอตภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด B ให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันสูงสุด (12.08 %) ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรดนี้ช่วยให้กระบวนการผลิตน้ำตาลโอลีเอตเกิดขึ้นได้ง่าย มีประสิทธิภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม น้ำตาลโอลีเอตที่สังเคราะห์ได้จะถูกวิเคราะห์คุณลักษณะโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโทรสโคปี และความสามารถในการกระจายสีย้อม ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าน้ำตาลโอลีเอตทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพได้

คำสำคัญ: สารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพ น้ำตาลเอสเทอร์ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

Abstract

The present work deals with synthesis of bio-based surfactant, namely a sugar fatty acid ester, using a heterogeneous catalyst (i.e. acidic ion exchange resin and immobilized *Candida Antarctica* lipase B). The acidic ion exchange resin catalyst was reported to exhibit a high catalytic activity in esterification of sugar (i.e. sucrose, lactose, fructose and glucose) and an oleic acid to produce sugar oleate under mild condition. The highest fatty acid conversion (12.08 %) was achieved using the acidic resin type B. This heterogeneous resin catalyst enables simple, efficient, and environmentally friendly production of sugar oleate. The synthesized sugar oleate was characterized by Fourier transform infrared spectroscopy and dye displacement. The results indicated sugar oleate acts as bio-based surfactant.

Keywords: Bio-based surfactant, sugar ester, acidic ion exchange resin, esterification reaction

ความเป็นมาของปัญหา

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อาหาร ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด พลาสติก ทำให้กระบวนการผลิตสารลดแรงตึงผิวมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาอุตสาหกรรม และก่อให้เกิดการขยายตัวทางเศรษฐกิจ จากการรายงานปริมาณการใช้สารลดแรงตึงผิวในปี พ.ศ. 2558-2563 พบว่าแนวโน้มปริมาณการใช้สารลดแรงตึงผิวสูงถึง 24 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่ากว่า 1 ล้านล้านบาท อย่างไรก็ตามสารลดแรงตึงผิวดังกล่าวย่อยสลายได้ยาก ก่อให้เกิดปัญหาการตกค้างในสิ่งแวดล้อม ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ (Biosurfactant) จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่กำลังได้รับความสนใจ เนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จากการรายงานปริมาณการใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพในปี พ.ศ. 2560 พบว่ามีมูลค่า 126 ล้านบาทและคาดการณ์ว่าปริมาณการใช้สารลดแรงตึงผิวชีวภาพในปี พ.ศ. 2565 จะเพิ่มขึ้นเป็น 174 ล้านบาท โดยปกติการผลิตสารลดแรงตึงผิวชีวภาพทำได้โดยใช้กระบวนการทางจุลินทรีย์ แต่พบว่ากระบวนการผลิตสารลดแรงตึงผิวชีวภาพมีค่าใช้จ่ายสูง อีกทั้งยังประสบปัญหากระบวนการแยกสารลดแรงตึงผิวชีวภาพให้มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีการปนอยู่กับสารตั้งต้นจากกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพต่ำ และสารอื่นๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตทางจุลินทรีย์ เช่น อาหารเลี้ยงเชื้อ อีกแนวคิดหนึ่งคือการผลิตสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพ (Bio-based surfactant) โดยการผลิตสารลดแรงตึงผิวขึ้นจากสารชีวภาพซึ่งประกอบด้วยส่วนที่มีขั้ว เช่น โปรตีน และน้ำตาลซึ่งเป็นโมเลกุลของหมู่คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล อะมิโน และหมู่ฟอตเฟต เป็นต้น และส่วนที่ไม่มีขั้วเกิดขึ้นจากโมเลกุลของกรดไขมันหรือเอสเทอร์ของกรดไขมันทั้งชนิดอิ่มตัว และไม่อิ่มตัวที่มีขนาดและโครงสร้างแตกต่างกันไปผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) หรือ ทรานส์เอสเทอริเคชัน (Transesterification) โดยประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกน้ำตาลที่สำคัญ และมี

[1] นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
[2] นักวิทยาศาสตร์ กองเคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์อุปโภค กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
[3] อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ความสามารถในการผลิตน้ำมันพืชประเภทต่างๆ ได้เองโดยเฉพาะน้ำมันปาล์ม จึงมีศักยภาพด้านวัตถุดิบสำหรับการผลิตสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีการเตรียมสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำตาลมอลโทเฮปทาโอส (Maltoheptaose) กับกรดคาพริก (Capric acid) กรดลอริก (Lauric acid) กรดไมริสติก (Myristic acid) และกรดปาล์มิติก (Palmitic acid) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ชนิดเอกพันธุ์ ได้แก่ *แคนดิดา แอนตาร์กติกา* ไลเปส เอ (*Candida antarctica* lipase A) ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 14 วัน พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันเท่ากับ 22 เปอร์เซ็นต์ (Nguyen et al. 2019) มากไปกว่านั้นยังมีการศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ชนิดวิวิธพันธุ์ ได้แก่ โนโวไซม์ 435 (Novozyme 435) ในการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำตาลแลคโตส (Lactose) กับกรดคาพิลิก กรดลอริก และกรดปาล์มิติก ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 12 วัน พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงกรดไขมัน 77-93 เปอร์เซ็นต์ (Enayati et al., 2018) หรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไลโพไซม์ เอสพี 382 (Lipozyme SP 382) ในการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำตาลฟรุกโตส (Fructose) กับกรดสเตียริก (Stearic acid) เวลาในการทำปฏิกิริยา 46 ชั่วโมง โดยให้ผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ 8.6 เปอร์เซ็นต์ (Chang & Shaw, 2009) อย่างไรก็ตามกระบวนการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เอนไซม์ทั้งชนิดเอกพันธุ์และวิวิธพันธุ์มีค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเอนไซม์สูง อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาไม่สูงมากนักและใช้เวลานานในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะพัฒนากระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเตรียมสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสชนิดเอกพันธุ์ (Homogeneous catalyst) คือโพแทสเซียมคาร์บอเนตผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำตาลและเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน โดยกระบวนการดังกล่าวให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่สูงขึ้น แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนตถูกแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ยาก ทำให้มีค่าใช้จ่ายในกระบวนการทำให้สารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพบริสุทธิ์ จึงมีความพยายามในการผลิตสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด (Acidic ion exchange resin) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคมี และตัวเร่งปฏิกิริยานี้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด จะช่วยแก้ปัญหากระบวนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีสถานะเป็นของแข็ง จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรดในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้สารตั้งต้นเป็นกรดโอเลอิกและเมทานอล (Ilgen, 2014) อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรดสำหรับการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้สารตั้งต้นเป็นน้ำตาล และกรดไขมันอิสระ เช่น กรดโอเลอิก สำหรับใช้ในกระบวนการผลิตสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพยังมีอยู่อย่างจำกัด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการเตรียมสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระที่เป็นส่วนประกอบหลักในน้ำมันปาล์มที่ได้หลังจากการกลั่นน้ำมันปาล์มดิบ (Palm fatty acid distillate) ได้แก่ กรดโอเลอิก โดยการทำปฏิกิริยากับน้ำตาล ได้แก่ ซูโครส แลคโตส ฟรุกโตส และกลูโคส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst) ได้แก่ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรดเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ และวิเคราะห์สมบัติของสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพในเบื้องต้น งานวิจัยนี้จะช่วยสนับสนุนการสร้างนวัตกรรมที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม และน้ำตาลได้ และเป็นการสนับสนุนเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว (Bio-Circular-Green Economy; BCG economy)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะและประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด
2. เพื่อศึกษาสมบัติของสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพที่เตรียมได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สารเคมี

กรดโอเลอิก (Oleic acid, AR Grade), น้ำตาลกลูโคส (Glucose, AR Grade), น้ำตาลซูโครส (Sucrose, AR Grade), น้ำตาลฟรุกโตส (Fructose, AR Grade), น้ำตาลแลคโตส (Lactose, AR Grade), เรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรดชนิด A และชนิด B (AR Grade)

2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด

ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรดจะถูกล้างด้วยน้ำกลั่น 4-5 ครั้ง ทิ้งให้แห้งในอากาศเป็นเวลา 4-5 ชั่วโมง หลังจากนั้นแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นเวลา 30 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่นและตามด้วยเอทานอล กรองแยกตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วทิ้งให้แห้งในอากาศเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (Sharma et al., 2014)

3. การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์ปริมาณตำแหน่งกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการไทเทรตแบบย้อนกลับ (Back titration) ทำได้โดยการนำตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด 0.1 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ จำนวน 50 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 20 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการกรองตัวเร่งปฏิกิริยาออกแล้วนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการกรองจำนวน 20 มิลลิลิตร ไปไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ คำนวณตำแหน่งกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาในหน่วยมิลลิโมลต่อกรัม (ปรับปรุงจาก Xie, et al. 2007)

4. การศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาการผลิตสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพ

4.1 การศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาการผลิตสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพ

การศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของน้ำตาล (ซูโครส แลคโตส ฟรุกโตส และกลูโคส) กับกรดโอเลอิกทำได้โดยชั่งน้ำตาลลงในภาชนะ จากนั้นเติมตัวทำละลายที่เหมาะสม ปั่นกวนโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสในอ่างควบคุมอุณหภูมิจนกระทั่งน้ำตาลละลาย ทิ้งให้เย็น เติมตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 13 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำตาล ปั่นกวนที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมกรดโอเลอิก โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลต่อกรดโอเลอิกเป็น 0.45 โมลต่อกิโลกรัม ต่อ 0.45 โมลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง

4.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยการวิเคราะห์ค่ากรด (Acid value)

ภายหลังจากเสร็จสิ้นปฏิกิริยา นำภาชนะบรรจุตัวอย่างไปแช่ในน้ำแข็งเพื่อหยุดปฏิกิริยา หลังจากนั้นเติมตัวทำละลาย ได้แก่ เอทานอล จำนวน 20 มิลลิลิตร ทำการกรองตัวอย่างเพื่อแยกตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วนำตัวอย่างที่กรองแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร จากนั้นเติมฟีนอล์ฟทาลีน แล้วนำมาไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (Neta et al., 2012)

5. การศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์สารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพที่เตรียมได้

5.1 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer; FTIR)

นำตัวอย่างประมาณ 10 มิลลิกรัม ใส่ภาชนะบรรจุ และนำมาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันตั้งแต่เลขคลื่น 4000-650 เซนติเมตร$^{-1}$ ด้วยอัตราการสแกน 0.5 เซนติเมตร$^{-1}$

5.2 การทดสอบความสามารถในการกระจายสีย้อม (Dye displacement) ของสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพ

เติมนมจำนวน 40 มิลลิลิตร ใส่เพลทแก้วขนาด 90 มิลลิเมตร เติมสีย้อมจำนวน 1.5 มิลลิลิตร ซึ่งจะเกิดสีย้อมบนผิวของชั้นน้ำนม หลังจากนั้นหยดตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพจำนวน 50 ไมโครลิตรบนชั้นของสีย้อม สังเกตการกระจายสีย้อมจะเกิดขึ้นหลังจากผ่านไป 10 วินาที (ปรับปรุงจาก Darne et al., 2014)

ผลการวิจัย

1. การทดสอบประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาการผลิตสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพ

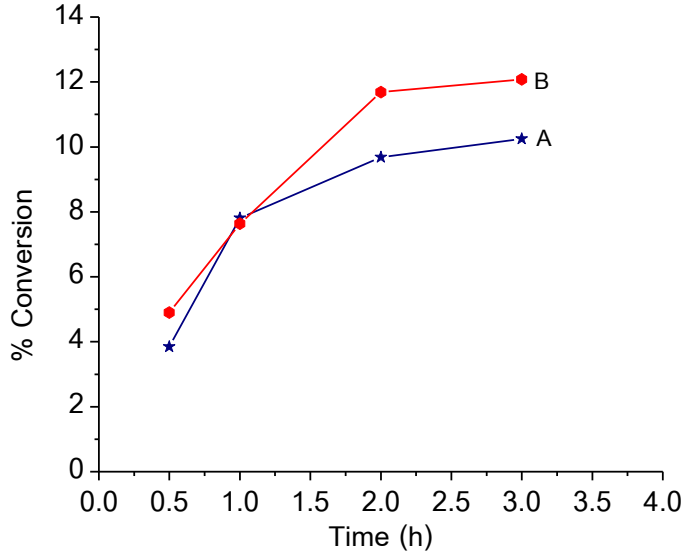
ตัวเร่งปฏิกิริยา	Conversion (%)
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด A	10.25
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด B	12.08
Can/MCM-41	0.16
Can/SBA-15	1.65
Novozyme 435	3.39
Candida antarctica lipase B	6.12
Na_2CO_3	30.43
No catalyst	0.00

สภาวะที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา: อัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกต่อน้ำตาลซูโครส = 1:1, ตัวเร่งปฏิกิริยา = 13 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, อุณหภูมิ = 60 องศาเซลเซียส เวลา = 3 ชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของน้ำตาลซูโครสกับกรดโอเลอิก ให้ผลการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงกรดไขมัน (% Conversion) แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าเมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (No catalyst) ไม่สามารถผลิตสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพได้ ในทางกลับกันเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ ได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) พบว่าให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันสูงสุดเป็น 30.43 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ *Candida antarctica* lipase B ให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันต่ำเพียง 6.12 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการทดสอบโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ ได้แก่ เอนไซม์*แคนดิดา แอนตาร์กติกา* ไลเปส บี ที่ถูกตรึงบนอะคริลิกเรซิน (Novozyme 435) ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์*แคนดิดา แอนตาร์กติกา* ไลเปส บีที่ถูกตรึงบนวัสดุซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลาง MCM-41 (Can/MCM-41) และ SBA-15 (Can/SBA-15) พบว่าให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันต่ำ ในขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด A และชนิด B พบว่ามีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูง โดยให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันเป็น 10.25 และ 12.08 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินที่มีตำแหน่งที่ว่องไวเป็นกรดซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ในการทดสอบปฏิกิริยาต่อไป

2. การศึกษาประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด A และชนิด B มาทดสอบการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน ให้ผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 1



ภาพประกอบที่ 1 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงกรดโอเลอิกกับเวลาเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด A และ B

สภาวะที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา: อัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกต่อน้ำตาลซูโครส 1:1, ตัวเร่งปฏิกิริยา = 13 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, อุณหภูมิ = 60 องศาเซลเซียส

จากภาพประกอบที่ 1 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันโดยใช้ตัวเร่งตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด A และ B พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำตาลซูโครสกับกรดโอเลอิก เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง ให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของกรดโอเลอิกสูงสุดเป็น 10.25 และ 12.08 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด A และ B ตามลำดับ

3. การศึกษาชนิดของน้ำตาลเพื่อผลิตสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพ

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด B มาใช้ในการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของน้ำตาล ได้แก่ ซูโครส แลคโตส ฟรุกโตส และกลูโคส ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 2

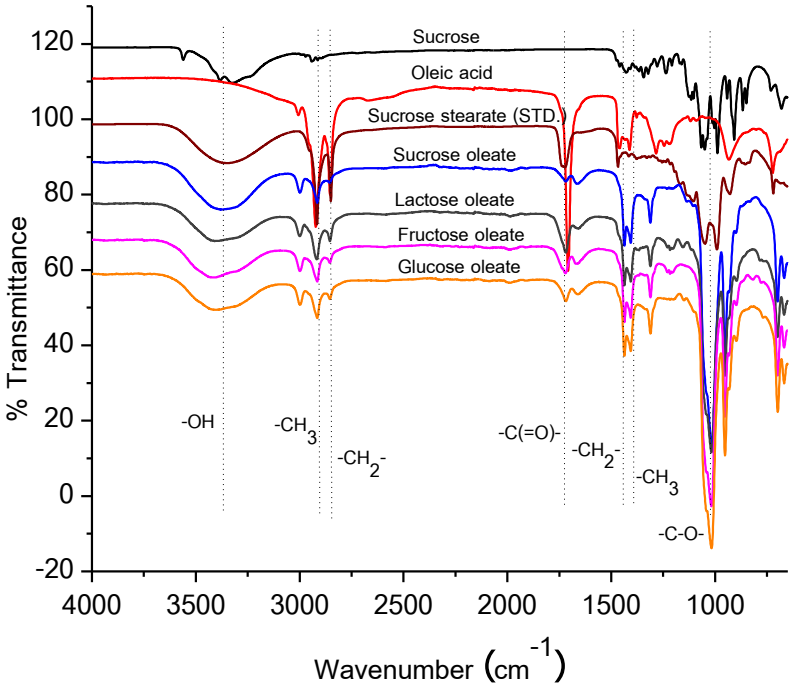
ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาการผลิตสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพ

สารตั้งต้น	Conversion (%)
Sucrose และ Oleic acid	12.08
Lactose และ Oleic acid	8.60
Glucose และ Oleic acid	6.57
Fructose และ Oleic acid	6.74

(สภาวะที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา: ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด B อัตราส่วนโดยโมลของกรดโอเลอิกต่อน้ำตาล 1:1, ตัวเร่งปฏิกิริยา = 13 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, อุณหภูมิ = 60 องศาเซลเซียส, เวลาในการทำปฏิกิริยา = 3 ชั่วโมง)

จากตารางที่ 2 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด B สามารถเร่งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำตาล ได้แก่ ซูโครส แลคโตส ฟรุกโตส และกลูโคส กับกรดไขมันอิสระ ได้แก่ กรดโอเลอิก ให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพได้ โดยสามารถเพิ่มปริมาณของสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพได้ด้วยการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยา

4. การศึกษาผลิตภัณฑ์หลังจากการเร่งปฏิกิริยา



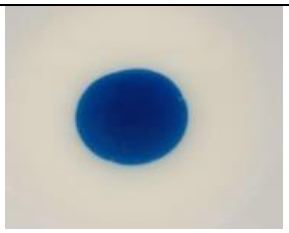
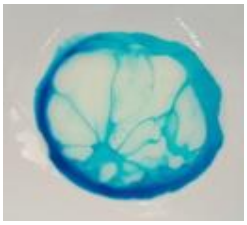
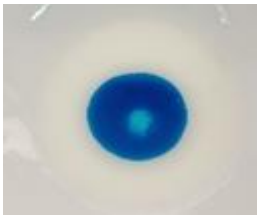
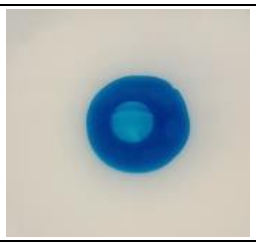
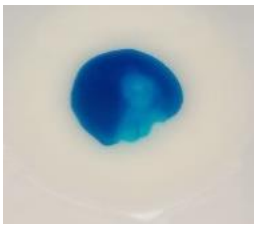
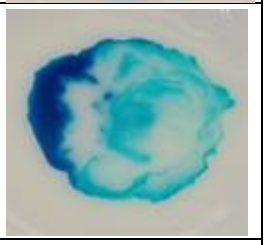
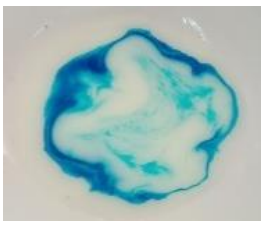
ภาพประกอบที่ 2 สเปคตราของน้ำตาล กรดโอเลอิก สารมาตรฐานซูโครสสเตียเรต และผลิตภัณฑ์น้ำตาลเอสเทอร์ที่ได้จากการเร่งปฏิกิริยา

จากภาพประกอบที่ 2 พบว่าสเปคตราของน้ำตาลซูโครสให้แถบการสั่นที่เลขคลื่น 3362 เซนติเมตร$^{-1}$ ซึ่งแสดงการสั่นแบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซี (-OH) ในขณะที่สเปคตราของกรดโอเลอิกพบแถบการสั่นที่เลขคลื่น 2945 และ 2857 เซนติเมตร$^{-1}$ แสดงการสั่นแบบยืดหดของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H) ของหมู่เมทิล (-CH_3) และหมู่เมทิลีน (-CH_2-) (Petkova et al., 2021) แถบการสั่นที่เลขคลื่น 1708 เซนติเมตร$^{-1}$ แสดงการสั่นแบบยืดหดของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ของกรดโอเลอิก เมื่อพิจารณาสเปคตราของซูโครสโอลีเอต แลคโตสโอลีเอต ฟรุกโตสโอลีเอต และกลูโคสโอลีเอต พบแถบการสั่นที่เลขคลื่น 3300-3400 เซนติเมตร$^{-1}$ แสดงการสั่นแบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซี (-OH) ของน้ำตาล แถบการสั่นที่เลขคลื่น 2945 และ 2857 เซนติเมตร$^{-1}$ แสดงการสั่นแบบยืดหดของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจนของหมู่เมทิล (-CH_3) และหมู่เมทิลีน (-CH_2-) แถบการสั่นที่เลขคลื่น 1722 เซนติเมตร$^{-1}$ แสดงการสั่นแบบยืดหดของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ของเอสเทอร์ แถบการสั่นที่เลขคลื่น 1375 และ 1475 เซนติเมตร$^{-1}$ แสดงการสั่นแบบงอของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H) ของหมู่เมทิล (-CH_3) และเมทิลีน (-CH_2) แถบการสั่นที่เลขคลื่น 1056 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการสั่นแบบยืดหดของพันธะคาร์บอน-ออกซิเจน (C-O) ของเอสเทอร์ (Enayati et al., 2018; Zi-juan et al., 2006) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่ง

ปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด B สามารถเร่งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันให้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลเอสเทอร์ได้และสเปคตราของน้ำตาลเอสเทอร์ที่เตรียมได้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับสารมาตรฐานซูโครสสเตียเรต

5. การทดสอบสมบัติการกระจายสีย้อมของสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพ

ตารางที่ 3 การทดสอบสมบัติการกระจายสีย้อมของสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพที่เตรียมได้

ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ
1. สีย้อมก่อนทดสอบ		6. น้ำยาล้างจาน (สารมาตรฐาน)	
2. ตัวทำละลาย		7. ซูโครสโอลีเอต	
3. กรดโอเลอิก		8. แลคโตสโอลีเอต	
4. น้ำตาลซูโครส		9. กลูโคสโอลีเอต	
5. ซูโครสสเตียเรต (สารมาตรฐาน)		10. ฟรุกโตสโอลีเอต	

จากตารางที่ 3 เมื่อทดสอบสมบัติการกระจายสีย้อมของสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพหรือน้ำตาลเอสเทอร์ที่เตรียมได้ และสารตั้งต้น รวมถึงตัวทำละลาย พบว่าตัวทำละลาย กรดโอเลอิก และน้ำตาลซูโครสไม่สามารถกระจายสีย้อมได้ ในขณะที่ผลิตภัณฑ์น้ำตาลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น สามารถช่วยกระจายตัวของสีย้อมได้เช่นเดียวกับในกรณีของการใช้ซูโครสสเตียเรตที่เป็นสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพเกรดการค้า และน้ำยาล้างจานเกรดการค้า

อภิปรายผล

จากการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรดชนิด A และ B พบว่าเมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของน้ำตาลซูโครสกับกรดโอเลอิกได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Martínez et al. (2011) ซึ่งได้ศึกษาการสังเคราะห์สารลดแรงตึงผิวโดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างไดกลีเซอรอลกับกรดโอเลอิกโดยไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าไม่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ได้ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาดังกล่าวไม่สามารถเกิดการเร่งปฏิกิริยาได้ด้วยตัวเอง (Self catalysis) แม้ว่ากรดโอเลอิกจะมีตำแหน่งที่ว่องไวเป็นกรด ในขณะที่การใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสูงเนื่องจากสามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกับสารตั้งต้นในระบบ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Petkova (2015) ที่สังเคราะห์ซูโครสเอสเทอร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะคาร์บอเนต ได้แก่ โพแทสเซียมคาร์บอเนต อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนตสามารถเกิดปฏิกิริยาสปอนนิฟิเคชันซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสบู่ นอกจากนี้การใช้โซเดียมคาร์บอเนต ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ยากทำให้มีค่าใช้จ่ายในกระบวนการทำสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพให้บริสุทธิ์ (Sasayama et al., 2018) ส่วนในกรณีของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์*แคนดิดา แอนตาร์กติกา* ไลเปส บี ให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาต่ำ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nguyen et al. (2019) ที่ได้เตรียมสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างมอลโทเฮปทาโอส กับกรดคาพริก กรดลอริก กรดไมริสติก และกรดปาล์มิติก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ *แคนดิดา แอนตาร์กติกา* ไลเปส เอ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 14 วัน พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันเท่ากับ 22 เปอร์เซ็นต์ หรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ Novozyme 435 พบว่าให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาต่ำ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang & Shaw (2009) ที่พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ Lipozyme SP 382 ในการสังเคราะห์สารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพโดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำตาลฟรุกโตสกับกรดสเตียริกใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 46 ชั่วโมง จึงจะสามารถให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตฟรุกโตสเอสเทอร์ 8.6 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ที่ถูกเตรียมให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันต่ำ เนื่องจากมีตำแหน่งที่ว่องไวของเอนไซม์ในการเกิดปฏิกิริยาต่ำ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ทั้งแบบเอกพันธุ์และวิวิธพันธุ์ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการผลิตสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพ เนื่องจากใช้เวลานานในการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน และมีต้นทุนในการจัดซื้อเอนไซม์ค่อนข้างแพง ส่วนในกรณีของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด A และชนิด B สามารถเร่งปฏิกิริยาได้สูง และสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพ

เมื่อศึกษาประสิทธิภาพและคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรดพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรดชนิด B ให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันสูงกว่าชนิด A เนื่องจากมีปริมาณกรด (Acidity) สูงกว่า (ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด A และ B มีปริมาณกรดเป็น 3.00 และ 3.30 มิลลิโมลต่อกรัมตามลำดับ) เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยามีตำแหน่งกรดสูง จึงสามารถเร่งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของน้ำตาลซูโครส และกรดโอเลอิกได้สูงกว่า เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด B มาทดสอบการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยการเปลี่ยนชนิดของน้ำตาลเพื่อเพิ่มโอกาสในกระบวนการผลิตเชิงพาณิชย์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ชนิด B สามารถผลิตสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพได้ โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้สามารถเพิ่มปริมาณของสารลดแรงตึงผิวชีวภาพได้

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโทรสโคปีเพื่อยืนยันการเกิดขึ้นของน้ำตาลเอสเทอร์ หรือสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพ จะพบแถบการสั่นของพันธะเอสเทอร์เกิดขึ้นที่เลขคลื่น 1056 และ 1722 เซนติเมตร$^{-1}$ และเมื่อทำการทดสอบความสามารถในการกระจายสีย้อมพบว่าน้ำตาลเอสเทอร์ที่เตรียมได้สามารถช่วยกระจายสีย้อมได้เช่นเดียวกับในกรณีของการใช้ซูโครสสเตียเรตซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพเกรดการค้า และน้ำยาล้างจานเกรดการค้า ผลการทดลองดังกล่าวจะช่วยยืนยันได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้เป็นสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพที่มีสมบัติในการใช้เป็นสารซักฟอก (Detergent) จากผลการทดลองดังกล่าวช่วยสนับสนุนการสร้างนวัตกรรมที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มและน้ำตาลได้ และเป็นการสนับสนุนเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว

สรุปผลการวิจัย

สารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพสามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำตาลและกรดโอเลอิก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกรด ภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง อัตราส่วนน้ำตาลต่อกรดไขมันเป็น 1:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 13 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำตาล การประเมินประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยใช้การวิเคราะห์ค่ากรดที่ลดลงของกรดโอเลอิก โดยสภาวะการทดลองที่ศึกษาให้

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันสูงสุด 12.08 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นถูกวิเคราะห์คุณสมบัติในเบื้องต้นด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโทรสโคปี และการทดสอบการกระจายสีย้อม

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. หน่วยงานของรัฐสามารถนำผลการวิจัยไปใช้เพื่อกำหนดนโยบายการสนับสนุนธุรกิจทางการเกษตรผ่านอุตสาหกรรมเป้าหมายเคมีชีวภาพและเชื้อเพลิงชีวภาพ และนโยบายประเทศไทย 4.0 โดยการส่งเสริมอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันที่ประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตเพื่อเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ปาล์มน้ำมันให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้น และการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจด้วยการวิจัยเป็นฐาน
2. หน่วยงานที่เกี่ยวข้องทางด้านอุตสาหกรรม ตลอดจนบริษัทเอกชนผู้ผลิตน้ำมันปาล์ม และน้ำตาล สามารถนำนวัตกรรมการผลิตสารลดแรงตึงผิวฐานชีวภาพไปสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำตาลเอสเทอร์สูงที่สุด
2. ควรศึกษาวิธีการทำให้น้ำตาลเอสเทอร์มีความบริสุทธิ์ขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) สัญญาเลขที่ CRP6305030680

เอกสารอ้างอิง

Chang, S.W., & Shaw, J.F. (2009). Biocatalysis for the production of carbohydrate esters. **New Biotechnology**. 26, 109-116.

Darne, P., Mehta, M., Dubey. P., & Prabhune, A. (2014). Bauhinia seed oil, a novel substrate for sophorolipid production. **World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences**. 3(11), 791-804.

Enayati, M., Gong, Y., Goddard, J.M., & Abbaspourrad, A., (2018). Synthesis and characterization of lactose fatty acid ester biosurfactants using free and immobilized lipases in organic solvents. **Food Chemistry**. 266, 508-513.

Ilgen, Q. (2014). Investigation of reaction parameters, kinetics and mechanism of oleic acid esterification with methanol by using Amberlyst 46 as a catalyst. **Fuel Processing Technology**. 124, 134-139.

Martínez, M., Oliveros, R., & Aracil, J. (2011). Synthesis of biosurfactants: Enzymatic esterification of diglycerol and oleic acid. 1. Kinetic modeling. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 50, 6609-6614.

Neta, N.D.A.S., Santos, J.C.S.D., Sancho, S.D.O., Rodrigues, S., Gonçalves, L.R.B., Rodrigues, L.R., & Teixeira, J.A. (2012). Enzymatic synthesis of sugar esters and their potential as surface-active stabilizers of coconut milk emulsions. **Food Hydrocolloids**. 27, 324-331.

Nguyen, P.C., Nguyen, M.T.T., Lee, C.K., Oh, I.N., Kim, J.H., Hong, S.T., & Park, J.T., (2019). Enzymatic synthesis and characterization of maltoheptaose-based sugar Esters. **Carbohydrate Polymers**. 218, 126-135.

Petkova, N. (2015). Ultrasound-assisted synthesis of undecylenoyl sucrose ester. **International Scientific Conference**. I-517-I-521.

Petkova, N., Arabadzhieva, R., Hambarliyska, I., Vassilev, D., Gencheva, G., Tumbarski, Y., Ignatova-Ivanova, T., Ibryamova, S., Koleva, M., & Denev, P., (2021). Ultrasound-Assisted Synthesis of Antimicrobial Inulin and Sucrose Esters with 10-Undecylenic Acid. **Biointerface Research in Applied Chemistry**. 11(4), 12055-12067.

Sasayama, T., Kamikanda, Y., & Shibasaki-Kitakawa, N. (2018). Process design for green and selective production of bio-based surfactant with heterogeneous resin catalyst. **Chemical Engineering Journal**. 334, 2231-2237.

Sharma, M., Wanchoo, R.K., & Toor, A.P. (2014). Amberlyst 15 catalyzed esterification of nonanoic acid with 1-propanol: Kinetics, modeling, and comparison of its reaction kinetics with lower alcohols. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 53, 2167-2174.

Xie, W., Huang, X., & Li, H. (2007). Soybean oil methyl esters preparation using NaX zeolites loaded with KOH as a heterogeneous catalyst. **Bioresource Technology**. 98, 936-939.

Zi-juan, S., Shu-jun, L., Xi, C., Li-mei, L., & Zhan-qian, S. (2006). Synthesis of insecticidal sucrose ester. **Forestry Studies in China**. 8(3), 26-29.