

การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยไนโวไซม์ 435
โดยใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลายร่วม

นางสาว มาริสา สัจพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTINUOUS BIODIESEL PRODUCTION FROM REFINED PALM OIL
BY NOVOZYM 435 USING *t*-BUTANOL AS A CO-SOLVENT

Miss Marisa Sujjapunroj

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Biotechnology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์
ด้วยไนโวไซม์ 435 โดยใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็น
ตัวทำละลายร่วม

โดย

นางสาว มาริสา สัจพันธ์

สาขาวิชา

เทคโนโลยีชีวภาพ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. วรวิมล จุฬาลักษณ์นกุล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา บุญหลง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. วรวิมล จุฬาลักษณ์นกุล)

..... กรรมการ
(ดร. กิตตินันท์ โกมลภิส)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ปกรณ์ วิษยานุวัติคุณ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภางค์ จุฬาลักษณ์นกุล)

มาริสสา สัจพันธ์ : การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วย
 โนวโอไซม์ 435 โดยใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลายร่วม. (CONTINUOUS
 BIODIESEL PRODUCTION FROM REFINED PALM OIL BY NOVOZYM 435
 USING *t*-BUTANOL AS A CO-SOLVENT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :
 รศ. ดร. วรุดมิ จุฬาลักษณ์านุกูล, 114 หน้า.

จากการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ โดยใช้โนโวไซม์
 435 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลายร่วม ด้วยเครื่อง
 ปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุ พบว่า ภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยา คือ อัตราส่วนโดย
 ปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เท่ากับ 1:1 อัตราส่วนโดยโมลของ
 เมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เท่ากับ 6:1 อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นเท่ากับ 40
 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที และโนโวไซม์ 435
 ปริมาณ 3 กรัม หลังจากผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 เดือน (720 ชั่วโมง) ด้วย
 ภาวะดังกล่าว พบว่า เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตลดลงเพียงเล็กน้อย
 ซึ่งเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตโดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 1 เดือนที่ได้
 เท่ากับ 90.10 เปอร์เซ็นต์ และ 12.22 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ

สาขาวิชา.....เทคโนโลยีชีวภาพ..... ลายมือชื่อนิติ.....
 ปีการศึกษา.....2552..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

4972442523 : MAJOR BIOTECHNOLOGY

KEYWORDS : Biodiesel / Lipase / Transesterification / Continuous Production /
Co-solvent System

MARISA SUJJAPUNROJ : CONTINUOUS BIODIESEL PRODUCTION FROM
REFINED PALM OIL BY NOVOZYM 435 USING *t*-BUTANOL AS A CO-
SOLVENT. ADVISOR : ASSOC. PROF. WARAWUT CHULALAKSANANUKUL,
114 pp.

The results of continuous biodiesel production from refined palm oil catalyzed by Novozym 435 using *t*-butanol as a co-solvent in packed bed reactor showed that the optimal condition for this system was volume ratio of *t*-butanol to oil as 1:1, molar ratio of methanol to oil as 6:1, temperature of reaction as 40 °C, flow rate of substrate solution as 0.25 ml/min, and amount of Novozym 435 as 3 g. After continuously producing biodiesel with this optimal condition for 1 month (720 hours), the results showed slightly decreased in conversion and production rate with 90.10% of average 1 month conversion, and 12.22 mmol/g/h of average 1 month production rate, respectively.

Field of Study :Biotechnology..... Student's Signature

Academic Year :2009..... Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วรวิมล จุฬาลักษณ์านุกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา บุญ-หลง ที่กรุณามาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

กราบขอบพระคุณ ดร. กิตตินันท์ โกมลภิส อาจารย์ ดร. ปกรณ์ วินะยานุวัติคุณ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภาวงศ์ จุฬาลักษณ์านุกูล ที่กรุณามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ที่ให้ทุนสำหรับดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาหลักสูตรเทคโนโลยีชีวภาพ และ ภาควิชาพฤกษศาสตร์ สำหรับความช่วยเหลือดีจากเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ตลอดจน สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือ ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ หน่วยปฏิบัติการวิจัยการวิจัยการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ สำหรับความรู้และประสบการณ์รูปแบบต่างๆ ตลอดจน ทุนสนับสนุนการวิจัย สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือทั้งหมดในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ พี่น้อง ในหน่วยปฏิบัติการวิจัยทุกๆ ท่าน ที่ช่วยเหลือในการทำงานวิจัย และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้า จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ นางสาวสุวิมล ทรัพย์ทวีวุฒิ รุ่นพี่ ผู้ที่คอยส่งสอน ชี้แนะ ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือที่ดี มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนทางการเงิน และคอยห่วงใยข้าพเจ้าเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ขั้นตอนการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 น้ำมันพืช.....	5
2.2 แอลกอฮอล์.....	5
2.3 ไบโอดีเซล.....	5
2.3.1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	6
2.3.2 มาตรฐานไบโอดีเซล.....	7
2.4 ปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	10
2.4.1 การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิริยาทางเคมี.....	10
2.4.2 การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิริยาทางเคมี.....	11
2.4.3 การใช้ไลเพสเป็นตัวเร่งปฏิริยาทางชีวภาพ.....	11
2.4.4 การทำให้เป็นของไหลที่ภาวะเหนือวิกฤต.....	11
2.5 ไลเพส.....	14
2.5.1 ความสามารถในการเร่งปฏิริยาของไลเพส.....	14
2.5.2 ความจำเพาะของไลเพส.....	16

	หน้า
2.6 การใช้ไลเพสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	16
2.6.1 ไลเพสอิสระ.....	17
2.6.2 ไลเพสตรึงรูป.....	17
2.6.3 โนโวไซม์ 435.....	17
2.6.4 ผลของแอลกอฮอล์ที่มีต่อไลเพสตรึงรูป.....	18
2.7 ตัวทำละลายอินทรีย์.....	19
2.8 ระบบการผลิตไบโอดีเซล.....	19
2.8.1 การผลิตแบบกะ.....	19
2.8.2 การผลิตแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน.....	19
2.8.3 การผลิตแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ.....	20
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	25
วัตถุประสงค์.....	25
สารเคมี.....	26
วิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.1 การผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAME) แบบต่อเนื่อง โดยการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์ เบดบรรจุ.....	27
3.2 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.	31
3.2.1 การศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรที่เหมาะสมของเทอร์เชียรีบิวทานอล ต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์.....	31
3.2.2 การศึกษาอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม บริสุทธิ์.....	32
3.2.3 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา.....	32
3.2.4 การศึกษาอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา...	32
3.2.5 การศึกษาปริมาณโนโวไซม์ 435 ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา.....	33
3.3 การศึกษาความเสถียรในระยะยาวของระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ.....	33
3.4 การวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน.....	34

	หน้า
3.4.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์.....	34
3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและ องค์ประกอบอื่นๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครมาโทกราฟีของเหลวแบบ สมรรถนะสูง.....	34
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	37
4.1 ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์ เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	37
4.1.1 ผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์ม บริสุทธิ์.....	37
4.1.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์.....	40
4.1.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	43
4.1.4 ผลของอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	46
4.1.5 ผลของปริมาณไนโวไซม์ 435 ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	49
4.2 ผลการศึกษาความเสถียรในระยะยาวของระบบการผลิตไบโอดีเซล แบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ.....	52
บทที่ 5 วิจัยณ์ผลการทดลอง.....	57
5.1 ผลของการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์ เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	57
5.2 ผลการศึกษาความเสถียรในระยะยาวของระบบการผลิตไบโอดีเซล แบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ.....	62
บทที่ 6 สรุปการทดลอง.....	63
รายการอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก.....	72
ภาคผนวก ข.....	81
ภาคผนวก ค.....	86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	114

สารบัญญัตินำ

ตารางที่		หน้า
1	กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรด ไขมัน พ.ศ. 2550.....	8
2	การเปรียบเทียบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีต่างๆ.....	13
ก-1	องค์ประกอบของกรดไขมัน ค่าการเกิดสบู่ (Saponification Number, SN) ค่า ไอโอดีน (Iodine Value, IV) และค่าซีเทน (Cetane Number, CN) ของ ไบโอดีเซล (FAME) จากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์.....	73
ก-2	ข้อมูลจากโครมาโทแกรมในรูปที่ ก-1.....	77
ก-3	ข้อมูลจากการทดลองเรื่องการศึกษ้อัตราส่วนโดยปริมาตรที่เหมาะสมของ เทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์.....	80
ข-1	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทั้งหมด.....	81
ค-1	ข้อมูลจากการศึกษ้อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมัน ปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์ม บริสุทธิ์ที่ 1.4:1).....	86
ค-2	ข้อมูลจากการศึกษ้อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมัน ปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์ม บริสุทธิ์ที่ 1.2:1).....	87
ค-3	ข้อมูลจากการศึกษ้อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมัน ปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์ม บริสุทธิ์ที่ 1.0:1).....	88
ค-4	ข้อมูลจากการศึกษ้อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมัน ปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์ม บริสุทธิ์ที่ 0.8:1).....	89
ค-5	ข้อมูลจากการศึกษ้อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมัน ปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์ม บริสุทธิ์ที่ 0.6:1).....	90

ตารางที่	หน้า
ค-19	ข้อมูลจากการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 60 องศาเซลเซียส)..... 104
ค-20	ข้อมูลจากการศึกษาอัตราการไหลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที)..... 105
ค-21	ข้อมูลจากการศึกษาอัตราการไหลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที)..... 106
ค-22	ข้อมูลจากการศึกษาอัตราการไหลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.30 มิลลิลิตรต่อนาที)..... 107
ค-23	ข้อมูลจากการศึกษาอัตราการไหลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.40 มิลลิลิตรต่อนาที)..... 108
ค-24	ข้อมูลจากการศึกษาปริมาณไนโวไซม์ 435 ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ไนโวไซม์ 435 ปริมาณ 2 กรัม)..... 109
ค-25	ข้อมูลจากการศึกษาปริมาณไนโวไซม์ 435 ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ไนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม)..... 110
ค-26	ข้อมูลจากการศึกษาปริมาณไนโวไซม์ 435 ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ไนโวไซม์ 435 ปริมาณ 4 กรัม)..... 111
ค-27	ข้อมูลจากการศึกษาความเสถียรในระยะยาวของระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ซึ่งใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย..... 112

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์.....	10
2	ปฏิกิริยาที่สามารถเร่งได้โดยไลเปส ทั้งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาการสังเคราะห์ต่างๆ.....	15
3	แผนภาพของระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ.....	28
4	ระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย.....	29
5	เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ซึ่งบรรจุแบบแยกโนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว.....	30
6	แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	36
7	การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 3:1.....	38
8	การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 3:1.....	39

ภาพที่	หน้า	
9	<p>การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมัน ปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้น ที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่ออนาที และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1.....</p>	41
10	<p>การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์ เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้ เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหล ของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่ออนาที และอัตราส่วนโดยปริมาตรของ เทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1.....</p>	42
11	<p>การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมัน ปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่ออนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1.....</p>	44
12	<p>การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์ เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้ เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่ออนาที อัตราส่วนโดยโมลของ เมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของ เทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1.....</p>	45

ภาพที่	หน้า
<p>13 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1.....</p>	47
<p>14 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1.....</p>	48
<p>15 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1.....</p>	50
<p>16 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยควบคุมภาวะการทดลองดังนี้ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1.....</p>	51

ภาพที่	หน้า	
17	<p>การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ซึ่งใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1.....</p>	53
18	<p>การเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับ เมทานอล ในระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ซึ่งใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1.....</p>	54
19	<p>ปริมาณรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย ตลอดระยะเวลา 1 เดือน.....</p>	55
20	<p>ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย ก่อนและหลังจากการกลั่นเพื่อแยกตัวทำละลาย.....</p>	55
21	<p>การแยกชั้นของไบโอดีเซลและกลีเซอรอลหลังจากการกลั่นเพื่อแยกตัวทำละลาย ซึ่งได้จากระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบด บรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย.....</p>	56

ภาพที่		หน้า
ก-1	โครมาโทแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ซึ่งใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยควบคุมภาวะการผลิตดังนี้ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1.....	76
ข-1	กราฟมาตรฐานของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน.....	82
ข-2	กราฟมาตรฐานของไตรกลีเซอไรด์.....	82
ข-3	กราฟมาตรฐานของ 1, 3 ไตรกลีเซอไรด์.....	83
ข-4	กราฟมาตรฐานของ 1, 2 ไตรกลีเซอไรด์.....	83
ข-5	กราฟมาตรฐานของโมโนกลีเซอไรด์.....	84
ข-6	กราฟมาตรฐานของกรดไขมันอิสระ.....	84
ข-7	โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐาน.....	85

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

FAAEs	แอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid alkyl esters)
FAMEs	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid methyl esters)
DIN 51606	มาตรฐานไบโอดีเซลของเยอรมัน
EN 14214	มาตรฐานไบโอดีเซลของยุโรป
ASTM D6751	มาตรฐานไบโอดีเซลของสหรัฐอเมริกา
log P	ค่าสัมประสิทธิ์การแยก (logarithm of the partition coefficient)
BSPs	วัสดุที่ใช้ในการตรึงเซลล์หรือเอนไซม์ (Biomass Support Particles)
HPLC	เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography)
ELSD	ดีเทคเตอร์อีแอลเอสดีสำหรับเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง (Evaporative Light Scattering Detector)
TAG	ไตรกลีเซอไรด์
1, 3 DAG	1, 3 ไดกลีเซอไรด์
1, 2 DAG	1, 2 ไดกลีเซอไรด์
MAG	โมโนกลีเซอไรด์
FFA	กรดไขมันอิสระ

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันไบโอดีเซล (biodiesel) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในฐานะที่เป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่สามารถใช้แทนพลังงานเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมฟอสซิล เช่น น้ำมันดีเซล ได้ อีกทั้งยังสามารถช่วยลดการนำเข้าพลังงานเชื้อเพลิงจากต่างชาติได้ เพราะไบโอดีเซลใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียน (renewable source) เช่น น้ำมันพืช ที่ได้จากพืชน้ำมันในประเทศ เป็นวัตถุดิบในการผลิต รวมทั้งยังสามารถช่วยลดปัญหามลภาวะให้กับสภาพแวดล้อมในปัจจุบันได้ เนื่องจากไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในการย่อยสลายทางชีวภาพ มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (carbonmonoxide) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbondioxide) ซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะเรือนกระจกในปริมาณที่น้อยกว่าปิโตรเลียมฟอสซิล และจากที่ไบโอดีเซลไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ จึงไม่มีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfurdioxide) ซึ่งเป็นสาเหตุของฝนกรดเกิดขึ้นในกระบวนการเผาไหม้ (Meher, Sagar และ Naik, 2006)

การใช้น้ำมันพืชเป็นพลังงานทดแทนโดยตรงนั้นไม่สามารถทำได้ เนื่องจากไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันพืชมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่มาก จึงทำให้เกิดปัญหาการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และที่สำคัญคือน้ำมันพืชมีความหนืดที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลมาก ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหากับเครื่องยนต์ได้ จึงจำเป็นที่จะต้องลดความหนืดของน้ำมันพืชลง โดยการเปลี่ยนน้ำมันพืชไปเป็นไบโอดีเซล ซึ่งสามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (tranesterification) ระหว่างไตรกลีเซอไรด์จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ กับแอลกอฮอล์สายสั้น เช่น เมทานอล (methanol) เอทานอล (ethanol) เป็นต้น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid alkyl esters, FAEs) หรือที่เรียกว่า ไบโอดีเซล และมีกลีเซอรอล (glycerol) เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี เช่น กรด เบส หรือโลหะ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ (Barnwal และ Sharma, 2005; Ma และ Hanna, 1999)

การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม พบว่าก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ขึ้น เนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่ยุงยากหลายขั้นตอน เพราะกรดไขมันอิสระที่ปนอยู่ในน้ำมันพืชสามารถทำปฏิกิริยากับเบสเกิดเป็นสบู่ รบกวนปฏิกิริยา ทำให้ปริมาณไบโอดีเซลที่ได้ลดลง ดังนั้นน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลซึ่งใช้เบสเป็นตัวเร่ง

ปฏิกิริยาทางเคมี จึงจำเป็นต้องเป็นน้ำมันพืชที่มีคุณภาพสูง มีกรดไขมันอิสระปนอยู่น้อย และยังต้องเพิ่มขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพวัตถุดิบ (pretreatment) ด้วยกรดเพื่อลดการเกิดสบู่ลง นอกจากนี้ การสบู่มีปนเปื้อนยังทำให้การแยกกลีเซอรอลเพื่อทำให้บริสุทธิ์นั้นทำได้ยาก เนื่องจากกระบวนการแยกกลีเซอรอลจำเป็นต้องมีการปรับภาวะก่อน ซึ่งส่งผลให้เกิดเป็นเกลือปนเปื้อนในกลีเซอรอล กระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระดับอุตสาหกรรม นอกจากจะมีขั้นตอนที่ยุ่งยากมากมาย และใช้พลังงานสูงในกระบวนการผลิตแล้ว ยังทำให้เกิดน้ำเสียซึ่งเป็นมลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่างๆ อีกด้วย (Harding และคณะ, 2007; Mittelbach, 1990) ดังนั้น งานวิจัยจำนวนมากจึงสนใจศึกษาการใช้ไลเพสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทนการใช้สารเคมี เนื่องจากกระบวนการผลิตที่ใช้ไลเพสตัวเร่งปฏิกิริยาถือเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่มีสารพิษและของเสียทางเคมีเกิดขึ้น และใช้ภาวะที่ไม่รุนแรงในการผลิต อีกทั้งยังสามารถลดขั้นตอนการผลิตที่ยุ่งยากลงได้ เนื่องจากไม่มีสบู่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง สามารถแยกไบโอดีเซลและกลีเซอรอลได้ง่ายขึ้น และสามารถใช้วัตถุดิบได้หลากหลายชนิด เช่น ไขมันสัตว์ น้ำมันพืชชนิดต่างๆ น้ำมันพืชใช้แล้ว น้ำมันพืชที่ไม่สามารถบริโภคได้ เช่น น้ำมันสบู่ดำ หรือแม้แต่น้ำมันพืชคุณภาพต่ำที่มีกรดไขมันอิสระและน้ำปนอยู่ในปริมาณมาก ซึ่งการใช้ไขมันพืชชนิดดังกล่าว จะสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตลงได้ (Kaieda และคณะ, 1999; Zhang และคณะ, 2003)

ดังนั้น ไลเพสจากจุลินทรีย์บางชนิดจึงถูกพัฒนาขึ้น เช่น ไลเพสจาก *Candida antarctica* ที่มีชื่อทางการค้าว่า โนวอไซม์ 435 (Novozym 435) ซึ่งเป็นไลเพสตรังรูปที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันได้ เหมาะกับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม เพราะสามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ และการใช้ไลเพสตรังรูปในกระบวนการผลิตจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีการปนเปื้อนของตัวเร่งปฏิกิริยา จึงทำให้กระบวนการแยกและทำให้บริสุทธิ์ทำได้ง่ายขึ้น (Fukuda, Kondo และ Noda, 2001) อย่างไรก็ตาม ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ไม่สามารถนำไลเพสตรังรูปกลับมาใช้ซ้ำอย่างต่อเนื่องได้ คือ ปริมาณเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและกลีเซอรอลซึ่งถูกดูดซับไว้บนผิวของวัสดุที่ใช้ตรึงเอนไซม์ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการทำงานและความเสถียรของไลเพส (Wang และคณะ, 2006)

โดย Watanabe และคณะ (2000) อธิบายถึงปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า เกิดจากเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและไม่สามารถละลายเข้ากับน้ำมันได้ ซึ่งอยู่ในรูปหยดเล็กๆ และกระจายอยู่ในน้ำมัน จะผ่านเข้าไปสะสมในชั้นของกลีเซอรอลที่ล้อมรอบอนุภาคไลเพสตรังรูป และเมื่อความเข้มข้นของเมทานอลเพิ่มสูงขึ้นในชั้นของกลีเซอรอล ก็จะมีผลทำให้ไลเพสเสียสภาพและ

ไม่สามารถทำงานต่อไปได้ ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการใช้ตัวทำละลายร่วมในปฏิกิริยา การเติมเมทานอลแบบเป็นขั้น (stepwise addition) การเติมตัวดูดซับเพื่อจับกลีเซอรอลออก การล้างไลเพสตรังรูปด้วยตัวทำละลาย และการออกแบบกระบวนการผลิตในรูปแบบต่างๆ (Su และ Wei, 2008)

การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง (continuous biodiesel production) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุโดยใช้ไลเพสตรังรูปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากระบบการผลิตของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุมุ่งเน้นการผลิตในปริมาณมาก และสามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่องยาวนาน เหมาะสำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม อีกทั้งยังประหยัดแรงงาน ค่าใช้จ่าย และใช้พลังงานในการผลิตต่ำ (Chang และคณะ, 2007; Watanabe และคณะ, 2001) และปัจจุบันได้มีการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุ ซึ่งใช้ไลเพสตรังรูปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอินเตอร์เอสเทอริฟิเคชัน (interesterification) ในการผลิตระดับอุตสาหกรรมแล้ว (Osório, Fonseca และ Ferreira-Dias, 2006) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันแบบต่อเนื่อง โดยการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และเมทานอล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุ ซึ่งใช้โนโวไซม์ 435 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้เทอร์เชียรีบิวทานอล (*t*-butanol) เป็นตัวทำละลาย และศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันแบบต่อเนื่อง โดยการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุ ซึ่งใช้โนโวไซม์ 435 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและกลีเซอรอลที่เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม
2. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันแบบต่อเนื่อง และทำการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องเพื่อดูความเสถียรของระบบการผลิต

ขั้นตอนการวิจัย

1. รวบรวมเอกสาร และข้อมูลจากฐานข้อมูลต่างๆ
2. ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และเมทานอล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุ ซึ่งใช้ไนโอไซม์ 435 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย
3. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันแบบต่อเนื่อง
4. ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่อง เพื่อดูความเสถียรของระบบการผลิต
5. วิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ (%conversion) และอัตราการผลิตไบโอดีเซล (production rate) ที่ได้
6. รวบรวมผลการทดลอง วิเคราะห์ข้อมูล และเขียนวิทยานิพนธ์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และเมทานอล ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุที่ใช้ไนโอไซม์ 435 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลายได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาานาน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำมันพืช

ปัจจุบันการเลือกใช้น้ำมันพืชซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลขึ้นกับแหล่งวัตถุดิบที่มีมากในแต่ละประเทศ เช่น ยุโรปใช้น้ำมันเมล็ดเรพ (rapeseed oil) สหรัฐอเมริกาและลาตินอเมริกาใช้น้ำมันถั่วเหลือง เอเชียและประเทศไทยใช้น้ำมันปาล์มเป็นหลัก โดยปาล์มน้ำมันเป็นพืชน้ำมันที่มีปริมาณการผลิตสูงที่สุดเมื่อเทียบกับพืชน้ำมันหลักทั้ง 7 ชนิดของประเทศไทย ได้แก่ ปาล์มน้ำมันมะพร้าว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ทานตะวัน ละหุ่ง และงา อีกทั้งน้ำมันจากทุกส่วนของปาล์มน้ำมัน เช่น น้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันปาล์มโอสลิน ไชสเตียรีน กรดไขมันปาล์มกลั่น และน้ำมันจากเมล็ดปาล์ม ยังสามารถนำการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลได้อีกด้วย ดังนั้นน้ำมันปาล์มจึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลัก เพื่อการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย (กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2549; Nielson, Brask และ Fjerbaek, 2008)

2.2 แอลกอฮอล์

แอลกอฮอล์หลายชนิดสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลได้ เช่น เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล เป็นต้น โดยในปัจจุบันแอลกอฮอล์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล คือ เมทานอล เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาได้ดีในกระบวนการผลิตที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และมีราคาถูก ซึ่งจะสามารถช่วยลดต้นทุนด้านวัตถุดิบลงได้ (Du และคณะ, 2004)

2.3 ไบโอดีเซล

น้ำมันพืชสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ได้ ดังที่ Rudolph Diesel ผู้ซึ่งคิดค้นเครื่องยนต์ดีเซลได้ใช้น้ำมันถั่วลิสงเป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ดีเซลเครื่องแรกของโลกเมื่อปี ค.ศ. 1911 แต่อย่างไรก็ตามด้วยคุณสมบัติและความหนืดของน้ำมันพืชที่สูงกว่าน้ำมันดีเซลถึง 11-17 เท่า จึงทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบการเผาไหม้เมื่อนำไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลที่ไม่มีการดัดแปลง ดังนั้นการนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรงนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องมีการเปลี่ยนน้ำมันพืชไปเป็นไบโอดีเซลก่อน (Srivastava และ Prasad, 2000)

ไบโอดีเซล หมายถึง เชื้อเพลิงที่ผลิตจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ซึ่งผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับเครื่องยนต์ (Barnwal และ Sharman, 2005) ดังนั้นเชื้อเพลิงทดแทนที่ได้จากพืช ซึ่งเป็นสารเอสเทอร์ที่สามารถใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้ จึงถูกเรียกรวมว่า ไบโอดีเซล โดยไบโอดีเซลที่นำไปใช้โดยไม่มี การนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลก่อน เรียกว่า B100 และไบโอดีเซลที่นำไปผสมกับน้ำมันดีเซลจะถูกเรียกตามอัตราส่วนผสม เช่น ไบโอดีเซลที่นำไปผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน ไบโอดีเซล 20 เปอร์เซ็นต์ ต่อ น้ำมันดีเซล 80 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร จะเรียกว่า B20 เป็นต้น โดยตามมาตรฐานไบโอดีเซลของเยอรมัน ยุโรป และสหรัฐอเมริกา (DIN 51606, EN 14214 and ASTM D6751) แนะนำว่า ไบโอดีเซลควรเป็นสารประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid methyl esters, FAMES) (Nielson, Brask และ Fjerbaek, 2008; Pinto และคณะ, 2005)

2.3.1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล (Ma และ Hanna, 1999)

กระบวนการที่ใช้ในการเปลี่ยนน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ไปเป็นเชื้อเพลิงไบโอดีเซล ที่สามารถใช้ในเครื่องยนต์มีด้วยกันหลายวิธี ได้แก่

2.3.1.1 การใช้โดยตรงหรือการผสมกับน้ำมันดีเซล (direct use and blending)

การนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงหรือนำน้ำมันพืชมาผสมกับน้ำมันดีเซล เป็นวิธีทดลองที่ใช้ในระยะแรกของการพยายามนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นพลังงานหมุนเวียนแทนน้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมฟอสซิล ซึ่งไบโอดีเซลที่ได้จากวิธีนี้ไม่เป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้ในเครื่องยนต์ เพราะมีความหนืดที่ยังสูงอยู่ มีส่วนประกอบจำพวกกรดไขมันอิสระมาก และเมื่อใช้ในเครื่องยนต์ พบว่า ยังคงเกิดปัญหาด้านการเผาไหม้ และทำให้เครื่องยนต์ติดขัดเนื่องจากความหนืดที่สูง

2.3.1.2 ไพโรไลซิส (pyrolysis)

ไพโรไลซิสหรือที่เรียกอีกอย่างว่ากระบวนการ cracking เป็นการนำพลังงานร้อนในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบเชิงซ้อนให้กลายเป็น

สารประกอบที่มีโครงสร้างที่เล็กกลง โดยน้ำมันพืชสามารถใช้กระบวนการนี้ในการลดความหนืด และปรับปรุงค่าซีเทน (cetane number) ได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเปลี่ยนน้ำมันพืชด้วยกระบวนการนี้ คือ อัลเคน (alkane) อัลซีน (alkene) และกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) โดยข้อเสียของกระบวนการนี้คือ ต้นทุนในการผลิตที่สูง เนื่องจากราคาเครื่องมือที่แพง และยังต้องมีเครื่องมือที่ใช้ในการในการกลั่นแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้ รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความคล้ายคลึงกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียมมาก

2.3.1.3 ไมโครอิมัลชัน (microemulsification)

เป็นกระบวนการที่ใช้ในการผสมอนุภาคของสารชนิดต่างๆ เข้าด้วยกัน โดยในการผลิตไบโอดีเซลนั้นจะใช้การผสมน้ำมันดีเซล น้ำมันพืช แอลกอฮอล์สายสั้นๆ เช่น เมทานอล เอทานอล โพรพานอล เป็นต้น สารลดแรงตึงผิว และแอลคิลไนเตรท (alkyl nitrate) เข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนืดที่ลดลง แต่พบว่าเมื่อนำไปใช้ในเครื่องยนต์ก็ยังคงก่อให้เกิดปัญหาการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์อยู่

2.3.1.4 ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (tranesterification)

เป็นกระบวนการกระบวนการที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซลมากที่สุด เนื่องจากผลิตภัณฑ์แอลคิลเอสเทอร์ที่ได้มีความหนืดที่ลดลงมากเมื่อเทียบกับน้ำมันพืช และสามารถใช้แทนที่เชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมฟอสซิลได้อีกด้วย

2.3.2 มาตรฐานไบโอดีเซล

ตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน พ.ศ.2550 ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจะต้องมีลักษณะและคุณภาพตามที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550

ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ
1. เมทิลเอสเทอร์	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ไม่ต่ำกว่า 96.5	EN 14103
2. ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °ซ	กิโลกรัม/ ลูกบาศก์เมตร	860 - 900	ASTM D 1298
3. ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °ซ	เซนติสโตกส์	3.5 - 5.0	ASTM D 445
4. จุดวาบไฟ	องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า 120	ASTM D 93
5. กำมะถัน	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTM D 2622
6. กากถ่าน	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.30	ASTM D 4530
7. จำนวนซีเทน		ไม่ต่ำกว่า 51	ASTM D 613
8. เถ้าซัลเฟต	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.02	ASTM D 874
9. น้ำ	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.050	EN ISO 12937
10. สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.0024	EN 12662
11. การกัดกร่อนแผ่นทองแดง		ไม่สูงกว่า หมายเลข 1	ASTM D 130
12. เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °ซ	ชั่วโมง	ไม่ต่ำกว่า 6	EN 14112
13. ค่าความเป็นกรด	มิลลิกรัมไปตัสเซียม ไฮดรอกไซด์/กรัม	ไม่สูงกว่า 0.50	ASTM D 664

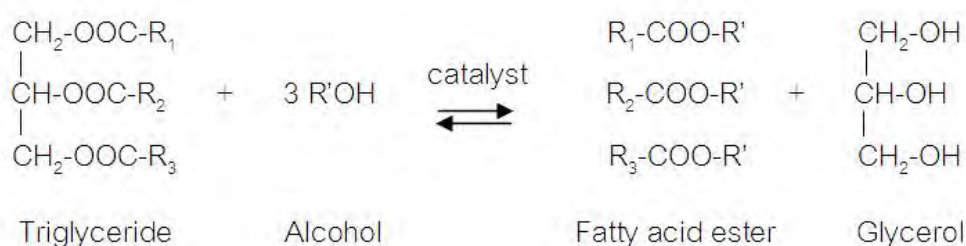
ตารางที่ 1 (ต่อ) กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน
พ.ศ. 2550

ข้อกำหนด	หน่วย	อัตราสูงต่ำ	วิธีทดสอบ
14. ค่าไอโอดีน	กรัมไอโอดีน/ 100 กรัม	ไม่สูงกว่า 120	EN 14111
15. กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 12.0	EN 14103
16. เมทานอล	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14110
17. โมโนกลีเซอไรด์	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.80	EN 14105
18. ไดกลีเซอไรด์	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
19. ไตรกลีเซอไรด์	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.20	EN 14105
20. กลีเซอรินอิสระ	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.02	EN 14105
21. กลีเซอรินทั้งหมด	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.25	EN 14105
22. โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโปแตสเซียม) โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม มิลลิกรัม/กิโลกรัม	ไม่สูงกว่า 5.0 ไม่สูงกว่า 5.0	EN 14108 และ EN 14109 EN 14538
23. ฟอสฟอรัส	เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า 0.0010	ASTM D 4951
24. สารเติมแต่ง (ถ้ามี)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน	

ที่มา : ราชกิจจานุเบกษา, 2550

2.4 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันหรือแอลกอฮอล์ไลซิส (alcohololysis) เป็นปฏิกริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์สายสั้นๆ เช่น เมทานอล เอทานอล เป็นต้น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน และมีกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม (รูปที่ 1) โดยสามารถเรียกปฏิกริยาดังกล่าวได้ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ เช่น ถ้าใช้เมทานอล จะเรียกว่าเมทาโนไลซิส (methanolysis) ถ้าใช้เอทานอล จะเรียกว่า เอทานอไลซิส (ethanolysis) เป็นต้น ซึ่งปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกริยาแบบผันกลับได้ และสามารถใช้ตัวเร่งปฏิกริยาได้หลายชนิด ทั้งตัวเร่งปฏิกริยาทางเคมีที่เป็นกรด เช่น กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCL) เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกริยาทางเคมีที่เป็นเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น และตัวเร่งปฏิกริยาทางชีวภาพ ได้แก่ ไลเพส (Marchetti, Miguel และ Errazu, 2007)



รูปที่ 1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ (Fukuda, Kondo และ Noda, 2001)

2.4.1 การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยาทางเคมี

ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยาผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบด้วยแอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน และกลีเซอรอล ซึ่งจะแยกชั้นกันโดยแอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจะแยกอยู่ที่ชั้นบนเหนือกลีเซอรอล ปฏิกริยาจะเกิดขึ้นสมบูรณ์อย่างรวดเร็ว และกลไกการเกิดปฏิกริยามีโมโนกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์เป็นสารตัวกลาง (intermediate) โดยปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยา จะสามารถทำปฏิกริยาการเปลี่ยนเป็นสบู่ (saponification) กับกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นในระบบได้ ทำให้เกิดสบู่ปนเปื้อนขึ้นในระบบ

2.4.2 การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถเร่งปฏิกิริยาด้วยกรดได้ เช่น กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) กรดไฮโดรคลอริก (HCL) โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ค่อนข้างสูง แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ามาก โดยต้องใช้ภาวะที่รุนแรง ใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 100 องศาเซลเซียส และใช้เวลามากกว่า 3 ชั่วโมง เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์

2.4.3 การใช้ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ

ไลเปสสามารถเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันได้ และมีข้อดีกว่าการใช้กรดหรือเบส คือ การใช้ไลเปสมีความจำเพาะสูง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แอลคิลเอสเทอร์ที่ได้มีความจำเพาะและสามารถแยกกลีเซอรอลที่เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมออกได้ง่าย นอกจากนี้ ไลเปสยังสามารถเร่งปฏิกิริยาได้แม้ว่าระบบจะมีกรดไขมันอิสระปริมาณสูงปนอยู่ ซึ่งไลเปสที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีทั้งแบบที่ปล่อยออกมานอกเซลล์ (extracellular) และแบบที่อยู่ภายในเซลล์ (intracellular) ขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์ที่ผลิต และไลเปสยังสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั้งในระบบที่มีน้ำและไม่มีน้ำ

2.4.4 การทำให้เป็นของไหลที่ภาวะเหนือวิกฤต (supercritical fluid)

การทำให้เป็นของไหลที่ภาวะเหนือวิกฤตเป็นการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำให้แอลกอฮอล์ทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ที่ภาวะเหนือวิกฤต ของไหลที่ภาวะดังกล่าว เรียกว่า ของไหลภาวะเหนือวิกฤต ซึ่งมีสมบัติอยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลว และมีสภาพขั้วลดลง ทำให้สารที่มีสภาพขั้วต่างกัน เช่น ไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น แต่ข้อเสียของการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีนี้ คือ กระบวนการผลิตต้องใช้พลังงานสูง โดยใช้ความร้อนประมาณ 350 องศาเซลเซียส และความดันประมาณ 45 เมกะปาสคาล ซึ่งถือว่าสูงมากในการทำปฏิกิริยา จะทำให้สิ้นเปลืองเป็นอย่างมาก และต้องใช้ต้นทุนที่สูงมากในการลงทุนระดับอุตสาหกรรม

ปัจจุบันปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกริยาที่นิยมใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถลดความหนืดของน้ำมันพืชลงได้ และผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในเครื่องยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้ไลเพสซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกริยาทางชีวภาพมีข้อดีกว่าการใช้กรดและเบสอยู่หลายประการ เพราะการใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยาจะทำให้มีปัญหาในกระบวนการแยกกลีเซอรอล และทำให้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกริยาทางเคมีเหล่านี้ปนอยู่ การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกริยามีข้อเสีย คือ ใช้เวลาในการเกิดปฏิกริยายาวนาน และใช้อุณหภูมิสูงในการเกิดปฏิกริยา การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยามีข้อเสีย คือ ปฏิกริยาสามารถเกิดเป็นสบู่ปนเปื้อนจากกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในระบบได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดได้น้อยลง เนื่องจากมีปฏิกริยาข้างเคียงรบกวน และการแยกแอลคิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลออกจากกันก็เป็นไปได้ยากอีกด้วย (Köse, Tuter และ Aksoy, 2002) จากผลข้างเคียงที่เกิดสบู่อขึ้นในปฏิกริยาที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยา ทำให้ต้องใช้ไขมันพืชที่มีคุณภาพสูงที่มีกรดไขมันอิสระในปริมาณต่ำๆ เป็นสารตั้งต้น ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลให้สูงขึ้น ดังนั้นการใช้ไลเพสเป็นตัวเร่งปฏิกริยาจะสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ โดยไลเพสเป็นตัวเร่งปฏิกริยาทางชีวภาพจึงมีความจำเพาะสูงกว่าการใช้สารเคมี ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความจำเพาะสูง กระบวนการแยกกลีเซอรอล และทำให้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ทำได้ง่าย ผลิตภัณฑ์และกลีเซอรอลที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงกว่าการใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกริยา และไลเพสยังสามารถเร่งปฏิกริยาได้แม้ระบบจะมีกรดไขมันอิสระปนอยู่มาก ไลเพสเร่งปฏิกริยาได้ทั้งในระบบที่มีน้ำและไม่มีน้ำ จึงทำให้สามารถเลือกใช้สารตั้งต้นได้หลากหลายชนิด และสามารถใส่สารตั้งต้นที่มีคุณภาพต่ำได้ เช่น น้ำมันพืชดิบ (crude vegetable oil) น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว กรดไขมันจากการกลั่น (vegetable oil deodorizer distillate) เป็นต้น (Fjerbaek, Christensen และ Norddahl, 2008)

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีต่างๆ

ปัจจัย	การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	การใช้ไลเพสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	การทำเป็นของไหลที่ภาวะเหนือวิกฤต	การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา	60 – 70 องศาเซลเซียส	30 – 40 องศาเซลเซียส	239 – 385 องศาเซลเซียส	55 – 80 องศาเซลเซียส
กรดไขมันอิสระในวัตถุดิบ	ผลิตภัณฑ์สบู่	เมทิลเอสเทอร์	เอสเทอร์	เอสเทอร์
น้ำในวัตถุดิบ	รบกวนปฏิกิริยา	ไม่รบกวนต่อปฏิกิริยา	-	รบกวนปฏิกิริยา
ปริมาณของเมทิลเอสเทอร์	ปกติ	สูง	สูง	ปกติ
กระบวนการเก็บกลีเซอรอล	ยาก	ง่าย	-	ยาก
กระบวนการทำให้บริสุทธิ์	ล้างซ้ำ	ไม่มี	-	ล้างซ้ำ
ต้นทุนการผลิต	ถูก	ค่อนข้างแพง	ปานกลาง	ถูก

ที่มา : Marchetti, Miguel และ Errazu, 2007

อย่างไรก็ตาม การใช้ไลเพสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อการผลิตไบโอดีเซลระดับอุตสาหกรรมยังไม่เป็นนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากราคาของไลเพสที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงมีการศึกษาเพื่อพัฒนาการผลิตไลเพสจากจุลินทรีย์ที่จะสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลระดับอุตสาหกรรมได้ และพัฒนากระบวนการตรึงรูปไลเพสให้สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันซ้ำได้ เพื่อช่วยลดต้นทุนของกระบวนการผลิตลง (Oda และคณะ, 2005) การตรึงไลเพสลงบนวัสดุตรึงที่เป็นของแข็ง นอกจากจะช่วยเพิ่มระยะเวลาการทำปฏิกิริยาและความเสถียรของไลเพสได้แล้ว ยังทำให้การแยกไลเพสกลับมาใช้ซ้ำทำได้ง่ายขึ้นด้วย เป็นผลดีต่อกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากไลเพสตรึงรูปจะไม่ปนเปื้อนกับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (Ayesta, Carelli และ Ferreira, 2007)

2.5 ไลเปส

เอนไซม์ไลเปส (Lipase; EC 3.1.1.3) มีชื่อเรียกตามระบบ International Union of Biochemistry ว่า กลีเซอรอล เอสเทอร์ไฮโดรเลส (glycerol ester hydrolase) นอกจากนี้ยังมีชื่อเรียกอย่างอื่นอีก เช่น เอซิลกลีเซอรอล ไฮโดรเลส (acyl glycerol hydrolase) ไตรเอซิลกลีเซอรอล ไฮโดรเลส (triacyl glycerol hydrolase) นอกจากนี้คณะกรรมการเอนไซม์ (Enzyme Commission; EC) ได้กำหนดการตั้งชื่อเอนไซม์ (nomenclature) โดยได้จำแนกเอนไซม์ออกเป็นพวกต่างๆ (classification) ตามชนิดปฏิกิริยาที่เอนไซม์นั้นเร่ง โดยกำหนดเป็นรหัสประจำตัวเอนไซม์ (code number) รหัสดังกล่าวแบ่งเป็นประกอบด้วยตัวเลขสี่ชุด แต่ละชุดแยกออกจากกันโดยจุด ตัวเลขชุดแรกบ่งบอกถึงพวก (class) ที่เอนไซม์นั้นถูกจัดไว้ ซึ่งมีหกพวก ส่วนตัวเลขชุดที่สองและชุดที่สามของรหัสเอนไซม์ จะบ่งบอกถึงชนิดของปฏิกิริยาที่ถูกเร่ง สำหรับตัวเลขชุดที่สี่จะแยกเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาค้นกันออกจากกันซึ่งเอนไซม์ไลเปสมีรหัสประจำตัวเอนไซม์ ที่บ่งบอกปฏิกิริยา ดังนี้ (Gandhi, 1997)

E.C.3.-.- - Hydrolases.

E.C.3.1.-. - Acting on ester bonds.

E.C.3.1.1. - Carboxylic ester hydrolases.

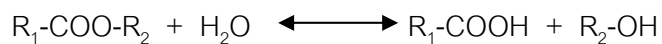
E.C.3.1.1.3 Triglycerol lipase

2.5.1 ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของไลเปส

ไลเปสเป็นเอนไซม์ในกลุ่มไฮโดรเลส (hydrolases) ซึ่งมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ในพันธะเอสเทอร์ (ester bonds) ของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ เป็นไดกลีเซอไรด์ (diglycerides) โมโนกลีเซอไรด์ (monoglycerides) กรดไขมัน (fatty acid) และกลีเซอรอล (glycerol) นอกจากนี้ไลเปสยังสามารถเร่งปฏิกิริยาที่เป็นปฏิกิริยาการสังเคราะห์ (synthesis reaction) ได้แก่ เอสเทอริฟิเคชัน (esterification) และทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันประเภทแอลกอฮอล์ไลซิส (alcoholysis) แอซิโดไลซิส (acidolysis) อินเทอร์เอสเทอริฟิเคชัน (interesterification) และ อะมิโนไลซิส (aminolysis) ได้อีกด้วย (Villeneuve และคณะ, 2000)

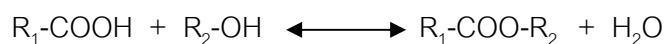
ปฏิกิริยาที่สามารถเร่งได้โดยไลเปส

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

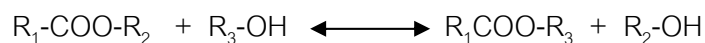


ปฏิกิริยาการสังเคราะห์

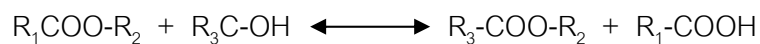
- เอสเทอร์ฟิเคชัน



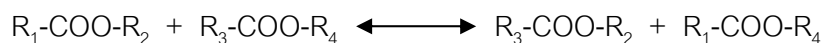
- แอลกอฮอล์ไลซิส



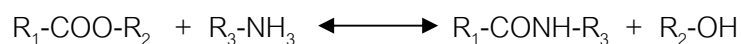
- แอซิโดไลซิส



- อินเทอร์เอสเทอร์ฟิเคชัน



- อะมิโนไลซิส



รูปที่ 2 ปฏิกิริยาที่สามารถเร่งได้โดยไลเปส ทั้งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาการสังเคราะห์ต่างๆ (Villeneuve และคณะ, 2000)

2.5.2 ความจำเพาะของไลเปส

Macrae (1983) จำแนกไลเปสโดยแบ่งตามความจำเพาะต่อตำแหน่งบนโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ เป็น 3 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

กลุ่มที่หนึ่ง ไลเปสที่มีความจำเพาะต่อตำแหน่งที่ 1 และ 3 บนโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ (1, 3 specific lipase) ซึ่งจะไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) ไตรกลีเซอไรด์ได้กรดไขมันอิสระและ 1, 2 ไดกลีเซอไรด์ หรือ 2, 3 ไดกลีเซอไรด์ ได้ 2-โมโนกลีเซอไรด์ เนื่องจากกลีเซอไรด์ที่ได้มักจะไม่เสถียร หากให้เวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นก็จะเกิดการเคลื่อนย้ายหมู่เอซิลได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น 1, 3 ไดกลีเซอไรด์ และ 1-โมโนกลีเซอไรด์ หรือ 3-โมโนกลีเซอไรด์ แต่ถ้าปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ จะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระ

กลุ่มที่สอง ไลเปสที่ไม่มีความจำเพาะต่อทั้งตำแหน่งและชนิดของกรดไขมันบนโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ที่เข้าทำปฏิกิริยา (non-specific lipase) ปฏิกิริยาจะเป็นแบบสุ่ม ทำปฏิกิริยาได้ทุกตำแหน่งบนไตรกลีเซอไรด์ และสามารถที่จะไฮโดรไลซ์ไตรกลีเซอไรด์เป็นกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอลได้อย่างสมบูรณ์

กลุ่มที่สาม ไลเปสที่มีความจำเพาะกับชนิดของกรดไขมัน (fatty acid-specific lipase) ไลเปสจากจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ไม่แสดงสมบัตินี้ แต่มีจุลินทรีย์บางชนิด เช่น *Geotrichum candidum* สามารถผลิตไลเปสที่ไฮโดรไลซ์กลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันสายโมเลกุลยาว ซึ่งประกอบด้วยพันธะคู่ที่เป็น cis-form ในตำแหน่งที่ 9 ได้ดี ส่วนกรดไขมันชนิดอิ่มตัว (saturated fatty acid) หรือชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) ที่ไม่มีพันธะคู่ในตำแหน่งที่ 9 จะถูกไฮโดรไลซ์ได้ไม่ดีนัก

2.6 การใช้ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

งานวิจัยจำนวนมากทำการศึกษาค้นคว้าการใช้ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เพื่อผลิตไบโอดีเซล โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการผลิต คึกษาการใช้สารตั้งต้นชนิดต่างๆ ที่ภาวะต่างๆ กัน โดยพบว่าการใช้ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน สามารถให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ได้สูงกว่า 97 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้เป็นน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการกำจัดยางออก (degum) เนื่องจากฟอสโฟลิปิด (phospholipid) ที่ปนอยู่ในยาง

สามารถยับยั้งการทำงานของไลเปสได้ (Nielson, Brask และ Fjerbaek, 2008; Watanabe และคณะ, 2002)

2.6.1 ไลเปสอิสระ (free lipase)

ไลเปสอิสระชนิดผงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยความเย็น (freeze dry) สามารถนำมาใช้การผลิตไบโอดีเซลได้ การใช้ไลเปสในรูปแบบนี้ต้องมีความระมัดระวังสูง เนื่องจากฝุ่นผงของเอนไซม์สามารถทำให้เกิดอาการภูมิแพ้ได้เมื่อสูดดม โดยข้อดีของการใช้ไลเปสในรูปแบบนี้คือ เหมาะกับกระบวนการผลิตที่ไม่ต้องการให้มีของแข็งเจือปน และมีต้นทุนการผลิตที่ถูกกว่าไลเปสตรังรูป แต่อย่างไรก็ตามปัจจุบันราคาของไลเปสอิสระยังสูงกว่าราคาของสารเคมีที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซลอยู่ ดังนั้นเพื่อลดต้นทุนและแข่งขันกับการใช้สารเคมีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การนำไลเปสกลับมาใช้ซ้ำจึงมีความจำเป็น

2.6.2 ไลเปสตรังรูป (immobilized lipase)

การใช้ไลเปสตรังรูปในระดับอุตสาหกรรมมีการพัฒนาขึ้นมากจากเทคโนโลยีใหม่ๆ ในปัจจุบัน และได้มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยทำปฏิกิริยาอินเทอร์เอสเทอริฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติการละลายของไตรกลีเซอไรด์ใช้ในกระบวนการผลิตเนยเทียม (margarine) (Osório, Fonseca และ Ferreira-Dias, 2006) ข้อดีของการใช้ไลเปสตรังรูปคือ มีขั้นตอนการแยกไลเปสเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำที่ง่าย โดยในกระบวนการผลิตแบบกะ (batch production) การแยกไลเปสสามารถใช้การกรองแยก (filtration) แบบง่ายได้ และไลเปสตรังรูปยังสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุได้ง่ายเช่นเดียวกัน โดยการตรังรูปไลเปสยังสามารถช่วยเพิ่มความเร็วและระยะเวลาของการใช้งานไลเปสได้ ทำให้ไลเปสสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูง และสามารถนำไปใช้ในกระบวนการที่ต้องการให้น้ำเจือปนในปริมาณน้อยได้

2.6.3 โนวัวไซม์ 435

โนวัวไซม์ 435 เป็นไลเปส ที่ถูกตรังรูปบนวัสดุประเภทอะครีลิกเรซิน ซึ่งมีรูพรุนขนาดใหญ่ (macroporous acrylic resin) ไลเปสจากจุลินทรีย์ *Candida antarctica* มีบริเวณเร่ง

ของเอนไซม์ (active site) คล้ายรูปกรวยที่มีฝาปิดเล็กๆ เป็นไลเปสที่ไม่มีความจำเพาะต่อทั้ง ตำแหน่ง และชนิดของกรดไขมันบนโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ที่เข้าทำปฏิกิริยา (Pleiss, Fischer และ Schmid, 1998) โนโวไซม์ 435 เป็นไลเปสที่ใช้ในการสังเคราะห์เอสเทอร์และไขมันสายสั้นๆ นอกจากนี้ โนโวไซม์ 435 ยังจัดเป็นเอนไซม์ในกลุ่มเอสเทอเรส (esterase) ที่ผลิตเอสเทอร์เฉพาะ ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางที่กระบวนการผลิตใช้อุณหภูมิต่ำ และโนโวไซม์ 435 สามารถใช้ซ้ำในกระบวนการสังเคราะห์ไขมันจากปฏิกิริยาที่มีกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระร่วมได้ โดยเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในระดับต่ำประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส ผลพลอยได้จากปฏิกิริยาจะเกิดในระดับต่ำ ทำให้การทำผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์เป็นไปได้ง่ายขึ้น และลดราคาต้นทุน (Novozymes, 2008; Villeneuve และคณะ, 2000)

2.6.4 ผลของแอลกอฮอล์ที่มีต่อไลเปสตรังรูป

แอลกอฮอล์สายสั้นๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น เมทานอล เอทานอล โพรพานอล ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล มีผลต่อความเสถียรและการทำงานของไลเปส โดยสามารถทำให้ไลเปสเสียสภาพและหยุดทำงานได้ จะมีผลมากเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยาขึ้น และแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะสามารถทำให้ไลเปสเสียสภาพได้ง่ายกว่า โดยพบว่าแอลกอฮอล์ที่สามารถทำให้ไลเปสเสียสภาพในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้ มักจะเป็นแอลกอฮอล์ที่เหลือจากปฏิกิริยา ซึ่งไม่สามารถละลายเข้ากับน้ำมันได้

โดย Watanabe และคณะ (2000) ได้อธิบายถึงปรากฏการณ์ที่มีผลต่อการทำงานและความเสถียรของไลเปสนี้ว่า เมื่อทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซล และมีกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม กลีเซอรอลที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นสารมีขั้วจะเข้าไปจับกับไลเปสตรังรูป เกิดเป็นชั้นของกลีเซอรอลล้อมรอบอนุภาคไลเปสตรังรูปไว้ และเมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและไม่สามารถละลายเข้ากับน้ำมันได้ ซึ่งอยู่ในรูปหยดเล็กๆ กระจายอยู่ในน้ำมัน ก็จะไปผ่านเข้าไปสะสมในชั้นของกลีเซอรอล ซึ่งเมื่อความเข้มข้นของเมทานอลเพิ่มสูงขึ้น ก็จะมีผลทำให้ไลเปสเสียสภาพและไม่สามารถทำงานต่อได้ ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการใช้ตัวทำละลายร่วมในปฏิกิริยา การเติมเมทานอลแบบเป็นขั้น (stepwise addition) การเติมตัวดูดซับเพื่อจับกับกลีเซอรอล การใช้ตัวละลายล้างไลเปสเป็นช่วงๆ และการออกแบบกระบวนการผลิตในรูปแบบต่างๆ (Su และ Wei, 2008)

2.7 ตัวทำละลายอินทรีย์

ตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent) สามารถใช้เป็นตัวทำละลายร่วมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้ โดยตัวทำละลายจะไม่ร่วมทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งการใช้ตัวทำละลายจะสามารถช่วยเพิ่มการละลายของเมทานอลในระบบได้ และยังช่วยละลายชั้นของกลีเซอรอลที่ล้อมรอบอนุภาคไลเปสตรึงรูปออกได้ โดยจากงานวิจัยต่างๆ พบว่าไลเปสจะมีแอกทิวิตีสูง เมื่อใช้ตัวทำละลายที่เป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) ที่มีค่า logarithm of the partition coefficient ($\log P$) มากกว่า 2 อย่างไรก็ตามเมทานอลและกลีเซอรอลจะสามารถละลายได้น้อยลงในตัวทำละลายที่เป็นไฮโดรโฟบิก ดังนั้นตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นตัวทำละลายร่วมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ควรที่จะสามารถละลายได้ในน้ำมัน เมทานอล และกลีเซอรอล ซึ่งเทอร์เชียรีบิวทานอล (*tert-butanol*) ก็เป็นหนึ่งในตัวทำละลายที่มีคุณสมบัติดังกล่าว (Li และคณะ, 2006)

2.8 ระบบการผลิตไบโอดีเซล (Nielson, Brask และ Fjerbaek, 2008)

2.8.1 การผลิตแบบกะ (batch production)

เป็นระบบการผลิตที่ใช้มากในระดับห้องปฏิบัติการ สารตั้งต้นที่ใช้ทั้งหมดจะถูกผสมรวมในตอนเริ่มต้น มีประโยชน์ในการเก็บข้อมูลต่างๆ แต่มีข้อเสียคือ ไม่เหมาะสำหรับการผลิตในระดับที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากการผสมสารตั้งต้นทั้งหมดในช่วงเริ่มต้นทำปฏิกิริยา จำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่มาก และใช้ระยะเวลารวมของกระบวนการนาน เพราะการผลิตในครั้งต่อไป ต้องมีการล้างและติดตั้งอุปกรณ์ใหม่ รวมถึงการแยกไลเปสออกมาใช้ซ้ำในการผลิตครั้งต่อไป อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพของไลเปสลดลงได้ ทำให้ต้องเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาขึ้น และที่สำคัญคือ ระบบการผลิตไม่มีความต่อเนื่องทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละครั้งมีความแตกต่างกัน

2.8.2 การผลิตแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน (continuous stirred-tank production)

เป็นระบบการผลิตที่ต้องมีการเติมสารตั้งต้นและดึงผลิตภัณฑ์ที่ได้ออก อาจใช้เครื่องปฏิกรณ์หลายเครื่องต่อกันและควบคุมปัจจัยให้ต่างกันได้ โดยการติดตั้งอุปกรณ์จะทำเพียง

ตอนเริ่มต้นครั้งเดียว ข้อดีของการผลิตด้วยระบบนี้คือ สามารถกำหนดอายุและแอกทีวิตีของไลเพสที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ได้ ทำให้ได้ระบบที่ความคงที่ และสามารถดัดแปลงระบบให้มีการแยกกลีเซอรอลจากแต่ละชั้น ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เครื่องต่อไปได้

2.8.3 การผลิตแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ (continuous packed-bed column production)

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการบรรจุวัสดุที่ใช้เป็นเบดให้ยึดติดอยู่กับบริเวณซึ่งใช้ทำปฏิกิริยา แล้วผ่านสารตั้งต้นเข้าไปทำปฏิกิริยากับบริเวณเบดบรรจุ วิธีการผ่านสารตั้งต้นเข้าไปทำปฏิกิริยาที่บริเวณเบดบรรจุ 3 วิธี คือ ผ่านสารตั้งต้นเข้าทางด้านล่างของเบด (ผ่านขึ้น) ผ่านสารตั้งต้นเข้าทางด้านบนของเบด (ผ่านลง) และผ่านสารตั้งต้นวนเข้า-ออกจากเบด โดยในการผลิตระดับอุตสาหกรรมนิยมใช้วิธีผ่านสารตั้งต้นเข้าทางด้านล่างของเบด (ผ่านขึ้น) เนื่องจากสามารถป้องกันการเกิดแรงกดเบดจากแรงโน้มถ่วงของโลกได้ (Balcao, Paiva และ Malcata, 1996)

การผลิตแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ มีข้อดีคือสารตั้งต้นสามารถสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาได้อย่างทั่วถึง และการแยกผลิตภัณฑ์ทำได้ง่ายกว่า เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกยึดอยู่กับที่ จึงไม่สามารถปนเข้าไปในผลิตภัณฑ์ได้ (Ni และ Meunier, 2007) อีกทั้งยังสามารถผลิตได้ในปริมาณมาก และต่อเนื่องยาวนาน เหมาะสำหรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม (Watanabe และคณะ, 2001) นอกจากนี้ยังประหยัดแรงงาน ค่าใช้จ่าย และใช้พลังงานในการผลิตต่ำอีกด้วย (Kang, Lee และ Kim, 2000; Chang และคณะ, 2007) โดยระบบนี้สามารถดัดแปลงให้มีการแยกกลีเซอรอลออกจากผลิตภัณฑ์ในแต่ละชั้น ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เครื่องต่อไปได้เช่นกัน

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี 1996 Nelson, Foglia และ Marmer ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไลเพสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์จากแหล่งต่างๆ ได้แก่ ไซส์ตว์ น้ำมันเมล็ดเรพ น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะกอก กับแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ พบว่า ไลเพสจาก *Mucor miehei* สามารถเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แอลกอฮอล์ ได้แก่ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล และไอโซบิวทานอล ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ขณะที่ไลเพสจาก *Candida antarctica* สามารถเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แอลกอฮอล์ ได้แก่ ไอโซโพรพานอล และ 2-บิวทานอล ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด โดยทั้งสองปฏิกิริยาให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

ปี 1999 Shimada และคณะ ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ไลเพสจาก *Candida antarctica* เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างส่วนผสมของน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันเมล็ดเรพ กับเมทานอล พบว่า การใช้อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่มากกว่า 1:1.5 จะส่งผลยับยั้งความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของไลเพส ดังนั้น จึงได้ใช้วิธีการเติมเมทานอลแบบเป็นขั้น (stepwise addition) ในการผลิตไบโอดีเซล โดยจะทำการผสมเมทานอลและน้ำมันพืชในอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ 1:1 ในตอนเริ่มต้นทำปฏิกิริยา จากนั้นทำการเติมเมทานอลที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอลที่ 1:1 ในช่วงเวลาที่ 10 และ 24 จากนั้นปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปจนครบ 48 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ พบว่า ได้เท่ากับ 98.4 เปอร์เซ็นต์ และจากการศึกษาเสถียรภาพของไลเพสที่ใช้ พบว่า ไลเพสจาก *Candida antarctica* สามารถใช้ซ้ำในปฏิกิริยาได้มากกว่า 50 รอบ ในระยะเวลา 100 วัน และได้ผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์

ปี 1999 Dossat, Combes และ Marty ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ โดยใช้ Lipozyme RM IM (ไลเพสจาก *Rhizomucor miehei*) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันเมล็ดทานตะวันที่มีโอเลอิกสูง กับบิวทานอล โดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายในปฏิกิริยา พบว่า กลีเซอรอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมมีผลต่อการทำปฏิกิริยา โดยกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นจะถูกดูดซับไว้บนผิววัสดุที่ตรึงไลเพส ทำให้ไลเพสสูญเสียประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น จึงแก้ไขโดยการเพิ่มขั้นตอนการล้างตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย

เทอร์เชียรีบิวทานอลภายหลังการทำปฏิกิริยา เพื่อล้างกลีเซอรอลออกจากผิววัสดุที่ตรึงไลเพส ทำให้ไลเพสไม่สูญเสียประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง

ปี 2006 Wang และคณะ ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ Novozym 435 (ไลเพสจาก *Candida antarctica*) และ Lipozyme TL IM (ไลเพสจาก *Thermomyces lanuginosa*) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างส่วนที่เหลือจากการกลั่นน้ำมันถั่วเหลืองให้บริสุทธิ์ (soybean deodorizer distillate) ซึ่งมีกรดไขมันอิสระปนอยู่มาก กับเมทานอล พบว่า การใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลายในระบบ สามารถช่วยยับยั้งการเสียประสิทธิภาพของไลเพสอันเนื่องมาจากเมทานอลและกลีเซอรอลได้ พบว่า ไลเพสสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ถึง 120 รอบ (60 วัน) โดยไม่ถูกยับยั้ง

ในปี 2006 Nie และคณะ ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ โดยใช้ไลเพสจาก *Candida* sp. 99-125 ที่ตรึงบนผ้าฝ้าย (cheap cotton membrane) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันสลัดและน้ำมันที่ไขแล้ว กับเมทานอล โดยในกระบวนการผลิต ได้มีการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุแบบ 3 คอลัมน์ ต่อกัน และมีเครื่องไฮโดรไซโคลน (hydrocyclone) สำหรับแยกกลีเซอรอลต่ออยู่ที่ปลายคอลัมน์สุดท้าย โดย 1 รอบ ของการทำปฏิกิริยา จะเท่ากับการที่สารตั้งต้นผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุทั้ง 3 คอลัมน์ และเครื่องไฮโดรไซโคลน จากนั้นจะทำการเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องไฮโดรไซโคลน ซึ่งถูกแยกกลีเซอรอลออกแล้ว กลับเข้าไปทำปฏิกิริยาอีกครั้ง โดยทำการเติมเมทานอลที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อเมทานอล เท่ากับ 1:1 นำไปทำปฏิกิริยาต่อไป ในกระบวนการผลิต 1 รอบ จะทำปฏิกิริยาทั้งหมด 3 ครั้ง โดยในการทดลองจะทำการศึกษาตัวทำละลายชนิดต่างๆ ได้แก่ อะซีโตน (acetone) เบนซีน (benzene) คลอโรฟอร์ม (chloroform) โทลูอีน (toluene) ปีโตรเลียมอีเทอร์ (toluene) ไฮโซคลเฮกเซน (cyclohexane) เฮกเซน (hexane) และเฮปเทน (heptane) จากการศึกษา พบว่า ตัวทำละลายที่มีค่า log P มากกว่า 2 สามารถให้ปริมาณเอสเทอร์ได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

ในปี 2007 Royon และคณะ ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ โดยใช้ Novozym 435 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันเมล็ด

ฝ่ายกับเมทานอล โดยใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย พบว่า ได้ผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ สูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์ และสามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่องกว่า 500 ชั่วโมง และผู้วิจัยได้ให้เหตุผล ประกอบงานวิจัยไว้ว่า การใช้ตัวทำละลายในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรมนั้น อาจดูว่าเป็นวิธีที่ไม่สะดวก แต่ตัวทำละลายทั้งหมดที่ใช้นั้นสามารถใช้วิธีการแยกเช่นเดียวกับ เมทานอล และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นการใช้ตัวทำละลายในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จึงถือว่าเป็นการเพิ่มต้นทุนขึ้นแต่อย่างได้

ในปี 2007 Hama และคณะ ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ โดยใช้เซลล์ของ *Rhizopus oryzae* ที่ตรึงบนวัสดุ Biomass Support Particles (BSPs) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันถั่วเหลือง กับเมทานอล โดยใช้วิธีการเติมเมทานอล แบบเป็นขั้นในการผลิต รวมทั้งหมด 3 ขั้น ทำการเติมเมทานอลที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อ เมทานอล เท่ากับ 1:1 ในชั่วโมงที่ 10 และ 24 การผ่านสารตั้งต้นมีลักษณะวนเข้า-ออก จาก การศึกษาพบว่าการใช้อัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่สูงเกินไปจะมีผลทำให้เซลล์ของ *Rhizopus oryzae* ที่ตรึงบนวัสดุ Biomass Support Particles (BSPs) หลุดได้ ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิล เอสเทอร์ที่ได้ลดลง และการใช้อัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่ต่ำเกินไปจะมีผลทำให้กลีเซอรอล สามารถเข้าไปจับกับ Biomass Support Particles (BSPs) ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ตรึงเซลล์ของ *Rhizopus oryzae* ได้ โดยผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้ในรอบแรกของการผลิตเท่ากับ ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ และในรอบที่ 10 ของการผลิต ผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้เท่ากับ ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์

ในปี 2008 Li และคณะ ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้เซลล์ของ *Rhizopus oryzae* ที่ ตรึงบนวัสดุ Biomass Support Particles (BSPs) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ระหว่างน้ำมันถั่วเหลือง กับเมทานอล โดยทำการเปรียบเทียบระบบการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้และไม่ ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย พบว่า การใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลสามารถช่วยรักษา ประสิทธิภาพของเซลล์ของ *Rhizopus oryzae* เมื่อนำไปใช้ซ้ำได้ และผลการวิเคราะห์ พบว่า การ ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลสามารถช่วยลดปริมาณกลีเซอรอลที่จับอยู่บนวัสดุ Biomass Support Particles (BSPs) ที่ใช้ตรึงเซลล์ของ *Rhizopus oryzae* ได้ โดยผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ที่ได้จาก การผลิตเท่ากับ ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์

ในปี 2008 Halim และ Kamaruddin ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซล โดย Lipozym TL IM, Lipozym RM IM และ Novozym 435 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว กับเมทานอล โดยใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย พบว่า การใช้ไขมันปาล์มบริสุทธิ์ให้ผลที่ดีกว่าการใช้ไขมันปาล์มที่ใช้แล้ว เนื่องจากปริมาณน้ำที่ปนอยู่ในน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วมีผลยับยั้งการทำงานของไลเปส และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุด คือ Novozym 435

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุอุปกรณ์

เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง สำหรับการวิเคราะห์

- คอลัมน์โครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง
(High Performance Liquid Chromatography, HPLC) รุ่น Apollo Silica 5U
ความยาว 250 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4.6 มิลลิเมตร (Alltech, USA)
- เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง รุ่น LC-20A (Shimadzu, Japan)
- ดีเทคเตอร์อีแอลเอสดีสำหรับเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง
(Evaporative Light Scattering Detector, ELSD) (Shimadzu, Japan)

ชุดเครื่องมือสำหรับเตรียมตัวอย่าง เพื่อการวิเคราะห์

- ขวดแก้วพร้อมฝาสำหรับเตรียมตัวอย่างวิเคราะห์ (Amani, Thailand)
- ชุดกรองสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ (Sartorius, Germany)
- ตัวกรองสำหรับเตรียมตัวอย่าง ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร (Amani, Thailand)
- ปีกกรองสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ (GAST, USA)

ระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ

- เครื่องทำความร้อนแบบหมุนวน รุ่น UM-HC 2000 (UMAC Scientific, Thailand)
- เครื่องทำความร้อนแบบอัตโนมัติ รุ่น RTE-111 (Neslab, USA)
- เครื่องปั่นกวนพร้อมอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (stirrer - water bath)
(T.S. Instrument, Thailand)
- เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ (Pharmacia, Sweden)
- ปีกดูดจ่ายของเหลว (peristaltic pump) (Ismatec, Switzerland)
- สายยางซิลิโคน เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1 มิลลิเมตร (Atto, Japan)
- สายยางซิลิโคน เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1.02 มิลลิเมตร
(GE Healthcare, Sweden)
- สายยางโพลีเอทิลีน (GE Healthcare, Sweden)

เครื่องเขย่าผสมสาร (vortex mixer) (Scientific Industries, USA)

เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง รุ่น BJ 1000C (Precisa, Switzerland)

เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น HR-200	(AND, Japan)
เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge)	(Hettich Zentrifugen, Germany)
แท่งแม่เหล็กสำหรับปั่นกวน (magnetic bar)	(LeoLab, Thailand)
ออโต้ปิเปต (autopipette)	(Eppendorf, Germany)

สารเคมี

สารเคมีมาตรฐาน สำหรับการวิเคราะห์

- 1, 2 ไดโอะเลอิน (1, 2 diolein, ความบริสุทธิ์ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์)
(Supelco, USA)
- 1, 3 ไดโอะเลอิน (1, 3 diolein, ความบริสุทธิ์ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์)
(Supelco, USA)
- กรดปาล์มมิติก (palmitic acid, ความบริสุทธิ์ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์)
(Sigma, USA)
- กรดลิโนเลอิก (linoleic acid, ความบริสุทธิ์ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์) (Sigma, USA)
- กรดสเตียริก (stearic acid, ความบริสุทธิ์ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์) (Sigma, USA)
- กรดโอเลอิก (oleic acid, ความบริสุทธิ์ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์) (Sigma, USA)
- ไตรโอะเลอิน (triolein, ความบริสุทธิ์ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์) (Supelco, USA)
- เมทิลปาล์มมิเตต (methyl palmitate, ความบริสุทธิ์ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์)
(Sigma, USA)
- เมทิลลิโนลิเอต (methyl linoleate, ความบริสุทธิ์ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์)
(Sigma, USA)
- เมทิลสเตียเรต (methyl stearate, ความบริสุทธิ์ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์)
(Sigma, USA)
- เมทิลโอเลอิก (methyl oleate, ความบริสุทธิ์ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์) (Sigma, USA)
- โมโนโอะเลอิน (monoolein, ความบริสุทธิ์ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์) (Supelco, USA)
- อีโคเซน (eicosane, ความบริสุทธิ์ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์) (Aldrich, Germany)

สารเคมีสำหรับการทดลอง

- เทอร์เชียรีบิวทานอล (*tert*-butanol) (Ajax Finechem, Australia)

- น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Morakot Brand, Thailand)
- โนโวไซม์ 435 (Novozym 435) (Novo Nordisk, Denmark)
- เมทานอล (methanol) (Labscan, Thailand)

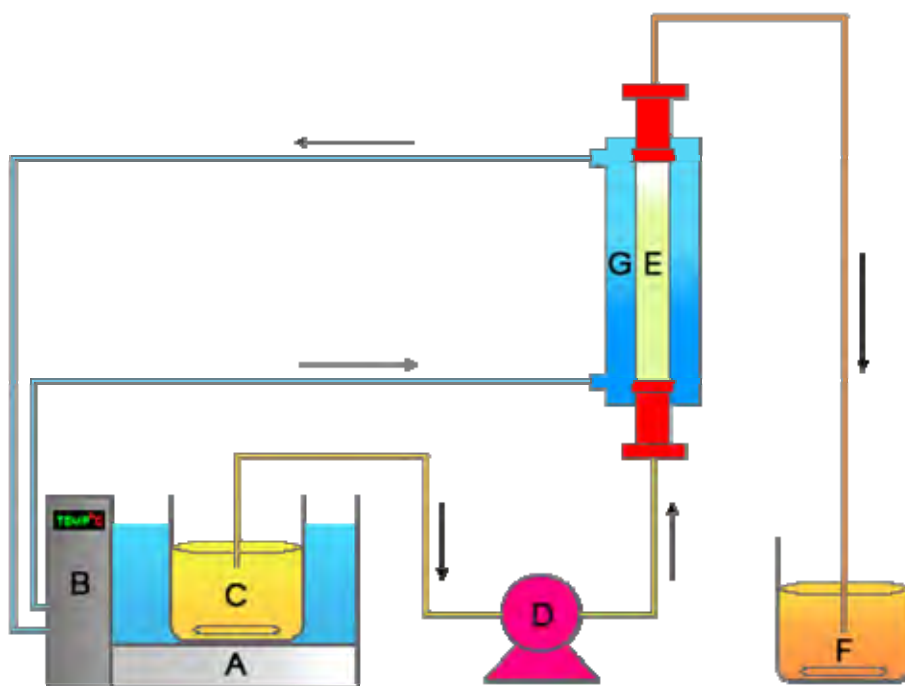
สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง

- กรดฟอร์มิก (formic acid, HPLC grade) (Labscan, Thailand)
- คลอโรฟอร์ม (chloroform, HPLC grade) (Labscan, Thailand)
- เอทิลอะซิเตต (ethyl acetate, HPLC grade) (Labscan, Thailand)
- ไอโซโพรพานอล (isopropanol, HPLC grade) (Labscan, Thailand)
- เฮกเซน (hexane, HPLC grade) (Labscan, Thailand)

วิธีดำเนินการวิจัย

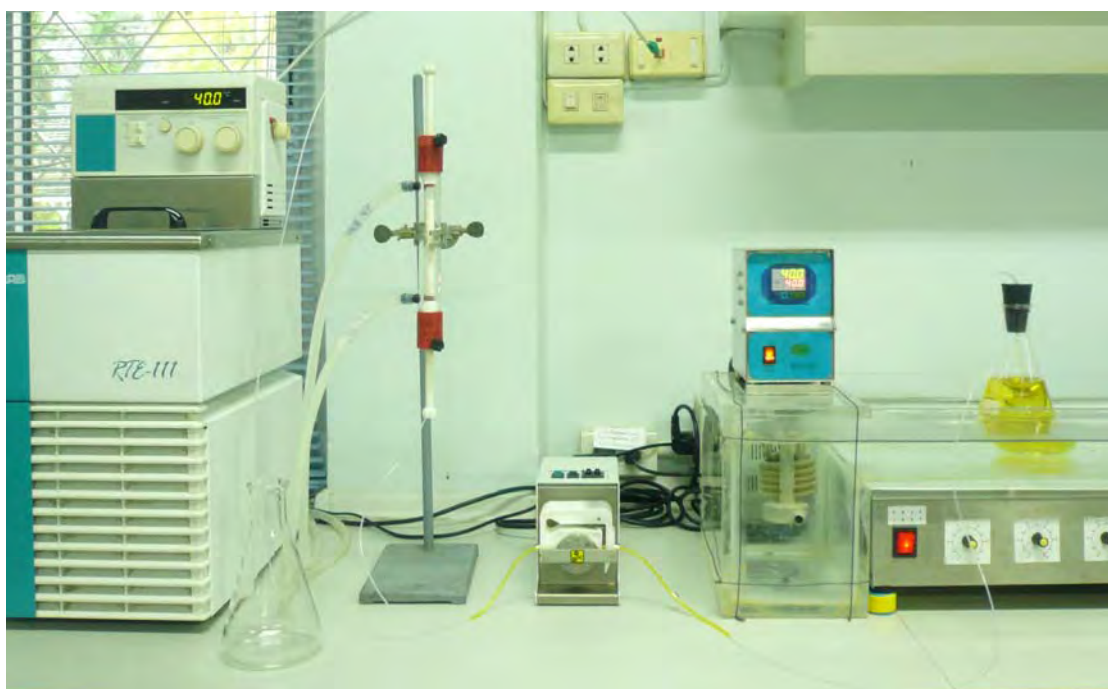
3.1 การผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAME) แบบต่อเนื่อง โดยการ ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ

การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ได้ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ซึ่งใช้โนโวไซม์ 435 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย ควบคุมภาวะการทดลองเริ่มต้น ดังนี้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 3:1 (สุวิมล ทรัพย์ทวีวุฒิ, 2550) แผนภาพการทดลองแสดงในรูปที่ 3 และระบบการผลิตแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งมีขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลดังต่อไปนี้



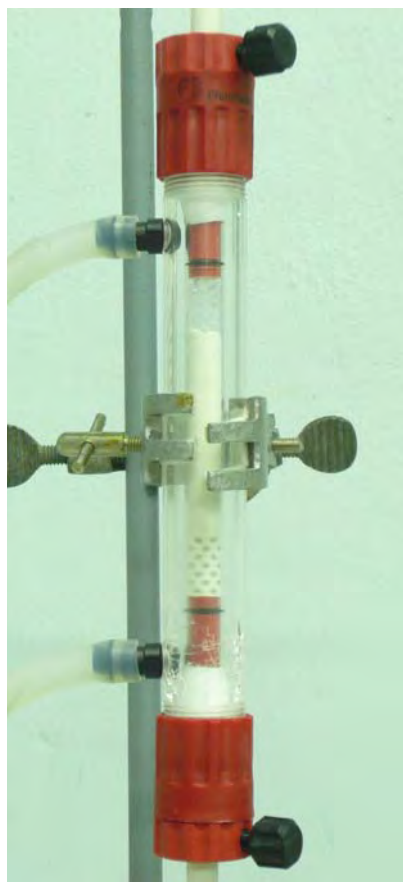
รูปที่ 3 แผนภาพของระบบการผลิตไอน้ำดีเซลแบบต่อเนื่อง
ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ

- เมื่อ A คือ เครื่องปั่นกววนและอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
- B คือ เครื่องทำความร้อนแบบหมุนวน
- C คือ ภาชนะบรรจุสารตั้งต้น
- D คือ ปัมดูดจ่ายของเหลว
- E คือ เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ
- F คือ ภาชนะเก็บผลิตภัณฑ์
- G คือ ท่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ



รูปที่ 4 ระบบการผลิตโพลีบิวทีดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ซึ่งใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย

3.1.1 บรรจุไนโอไซม์ 435 และเม็ดแก้ว (glass bead) ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ (E) ด้วยวิธีการบรรจุแบบแยกไนโอไซม์ 435 และเม็ดแก้ว โดยบรรจุไนโอไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม และเม็ดแก้วปริมาณรวม 4 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ซึ่งบรรจุแบบแยกโนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว

3.1.2 เติมสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลงในภาชนะบรรจุสารตั้งต้น (C) โดยสารตั้งต้นประกอบด้วยน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ผสมกับเมทานอล และตัวทำละลายเทอร์เชียรีบิวทานอล ในอัตราส่วนที่กำหนดโดยเริ่มต้นที่ อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 3:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1 วิธีการคำนวณอัตราส่วนได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

3.1.3 เริ่มต้นการปั่นกวนและให้ความร้อนสารตั้งต้นภายในภาชนะบรรจุสารตั้งต้น (C) ด้วยเครื่องปั่นกวนและอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (A) ที่ต่อเข้ากับเครื่องทำความร้อนแบบหมุนวน (B) ซึ่งใช้ควบคุมอุณหภูมิของสารตั้งต้นภายในภาชนะบรรจุสารตั้งต้น (C) และเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุผ่านทางท่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ (G) โดยกำหนดอุณหภูมิของสารตั้งต้นและเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุที่ 50 องศาเซลเซียส

3.1.4 คูดสารตั้งต้นภายในภาชนะบรรจุสารตั้งต้น (C) เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุ (E) ซึ่งบรรจุโนโวไซม์ 435 ด้วยปั๊มดูดจ่ายของเหลว (D) โดยผ่านทางสายยาง เพื่อทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน และควบคุมอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่ทดลองให้คงที่ ที่อัตราการไหลของสารตั้งต้น 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วยปั๊มดูดจ่ายของเหลว (D)

3.1.5 เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปลายสายยางที่เข้าสู่ภาชนะเก็บผลิตภัณฑ์ (F) ในช่วงเวลาต่างๆ (10, 20, 30, 40, 50 นาที, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 8, 12, 16, 20 และ 24 ชั่วโมง) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง

3.1.6 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ล้างโนโวไซม์ 435 ที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้งด้วยเทอร์เชียรีบิวทานอล โดยใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลปริมาตร 20 มิลลิลิตร แทนที่สารตั้งต้นในภาชนะบรรจุสารตั้งต้น (C) และแทนที่ภาชนะเก็บผลิตภัณฑ์ (F) ด้วยกระบอกตวง เพื่อวัดปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลทั้ง 20 มิลลิลิตรที่ใช้ล้าง

3.2 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

3.2.1 การศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรที่เหมาะสมของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยควบคุมภาวะการทดลองเริ่มต้น ดังนี้ โนวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 3:1 ศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่อัตราส่วนดังต่อไปนี้ 0:1, 0.2:1, 0.4: 1, 0.6: 1, 0.8:1, 1:1, 1.2:1 และ 1.4:1 เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้ ในช่วงเวลาต่างๆ แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและองค์ประกอบอื่นๆ ที่ได้ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง

3.2.2 การศึกษาอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

เมื่อได้อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการปรับภาวะของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยควบคุมภาวะการทดลอง ดังนี้ โนวโซลิม 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จากการทดลองที่ 3.2.1 โดยศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 3:1, 4:1, 5:1, 6:1, 7:1, 8:1, 9:1 และ 12:1 เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้ ในช่วงเวลาต่างๆ แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและองค์ประกอบอื่นๆ ที่ได้ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง

3.2.3 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

เมื่อได้อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์แล้ว จึงทำการปรับภาวะของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยควบคุมภาวะการทดลอง ดังนี้ โนวโซลิม 435 ปริมาณ 3 กรัม อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จากการทดลองที่ 3.2.1 และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จากการทดลองที่ 3.2.2 โดยศึกษาอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้ ในช่วงเวลาต่างๆ แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและองค์ประกอบอื่นๆ ที่ได้ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง

3.2.4 การศึกษาอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

เมื่อได้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาแล้ว จึงทำการปรับภาวะของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์

เบดบรจ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยควบคุมภาวะการทดลอง ดังนี้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จากการทดลองที่ 3.2.1 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จากการทดลองที่ 3.2.2 และอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ได้จากการทดลองที่ 3.2.3 โดยศึกษาอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่ 0.2, 0.25, 0.3 และ 0.4 มิลลิลิตรต่อนาที เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้ ในช่วงเวลาต่างๆ แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและองค์ประกอบอื่นๆ ที่ได้ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง

3.2.5 การศึกษาปริมาณโนโวไซม์ 435 ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

เมื่อได้อัตราการไหลของสารตั้งต้นที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาแล้ว จึงทำการปรับภาวะของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรจ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยควบคุมภาวะการทดลอง ดังนี้ อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จากการทดลองที่ 3.2.1 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จากการทดลองที่ 3.2.2 อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ได้จากการทดลองที่ 3.2.3 และอัตราการไหลของสารตั้งต้นจากการทดลองที่ 3.2.4 โดยศึกษาโนโวไซม์ 435 ที่ปริมาณ 2, 3 และ 4 กรัม เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้ ในช่วงเวลาต่างๆ แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและองค์ประกอบอื่นๆ ที่ได้ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง

3.3 การศึกษาความเสถียรในระยะยาวของระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรจ

เมื่อได้ภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาจากการทดลองที่ 3.2.1-3.2.5 แล้ว จึงนำผลของการศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้น อัตราการไหลของสารตั้งต้น และปริมาณโนโวไซม์ 435 ที่เหมาะสม มาใช้เพื่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันอย่างต่อเนื่อง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรจเป็นเวลานาน 1 เดือน เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้ ทุกๆ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิล

เอสเทอร์ของกรดไขมันและองค์ประกอบอื่นๆ ที่ได้ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์

เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในช่วงเวลาต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง มาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 13,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นดูดตัวอย่างส่วนบนมา 10 ไมโครลิตร เจือจางด้วยคลอโรฟอร์มให้ปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 500 ไมโครลิตร จากนั้นเติมอิโคเซนซึ่งใช้เป็นสารละลายมาตรฐานภายใน (internal standard) 10 ไมโครลิตร กรองและฉีดตัวอย่างปริมาตร 20 ไมโครลิตร เข้าเครื่องวิเคราะห์โครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) เพื่อหาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและองค์ประกอบอื่นๆ ที่สังเคราะห์ได้

3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและองค์ประกอบอื่นๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง

การวิเคราะห์หาปริมาณผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้จากการทดลอง ประกอบไปด้วยการวิเคราะห์หาปริมาณไตรกลีเซอไรด์ ปริมาณ 1, 2 ไตรกลีเซอไรด์ ปริมาณ 1, 3 ไตรกลีเซอไรด์ ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ปริมาณกรดไขมันอิสระ และปริมาณเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้ ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) ของ Shimadzu รุ่น LC-20A โดยใช้คอลัมน์ Apollo Silica 5U ที่ต่อกับดีเทคเตอร์อีแอลเอสดี (Evaporative Light Scattering Detector, ELSD) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส ความดันก๊าซไนโตรเจนที่ 100 เมกะปาสคาล ใช้สารละลาย A และ B เป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) โดยสารละลาย A ประกอบด้วยเฮกเซน ไอโซโพรพานอล เอทิลอะซิเตต และกรดฟอร์มิก ที่อัตราส่วน 85 : 10 : 10 : 0.1 โดยปริมาตร และสารละลาย B ประกอบด้วยเฮกเซนและกรดฟอร์มิก ที่อัตราส่วน 100 : 0.1 โดยปริมาตร ควบคุมอัตราการไหลของสารละลายเฟสเคลื่อนที่ที่ 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที โดยปรับปรุงวิธีการจาก Suppes และคณะ (2004)

ทำการวิเคราะห์และแปรผลจากโครมาโทแกรมที่ได้ด้วยโปรแกรม LC solution ของ Shimadzu นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ (%conversion) และอัตราการผลิต (production rate) โดยใช้สมการการคำนวณดังต่อไปนี้ (Chulalaksananukul และคณะ, 2002)

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์

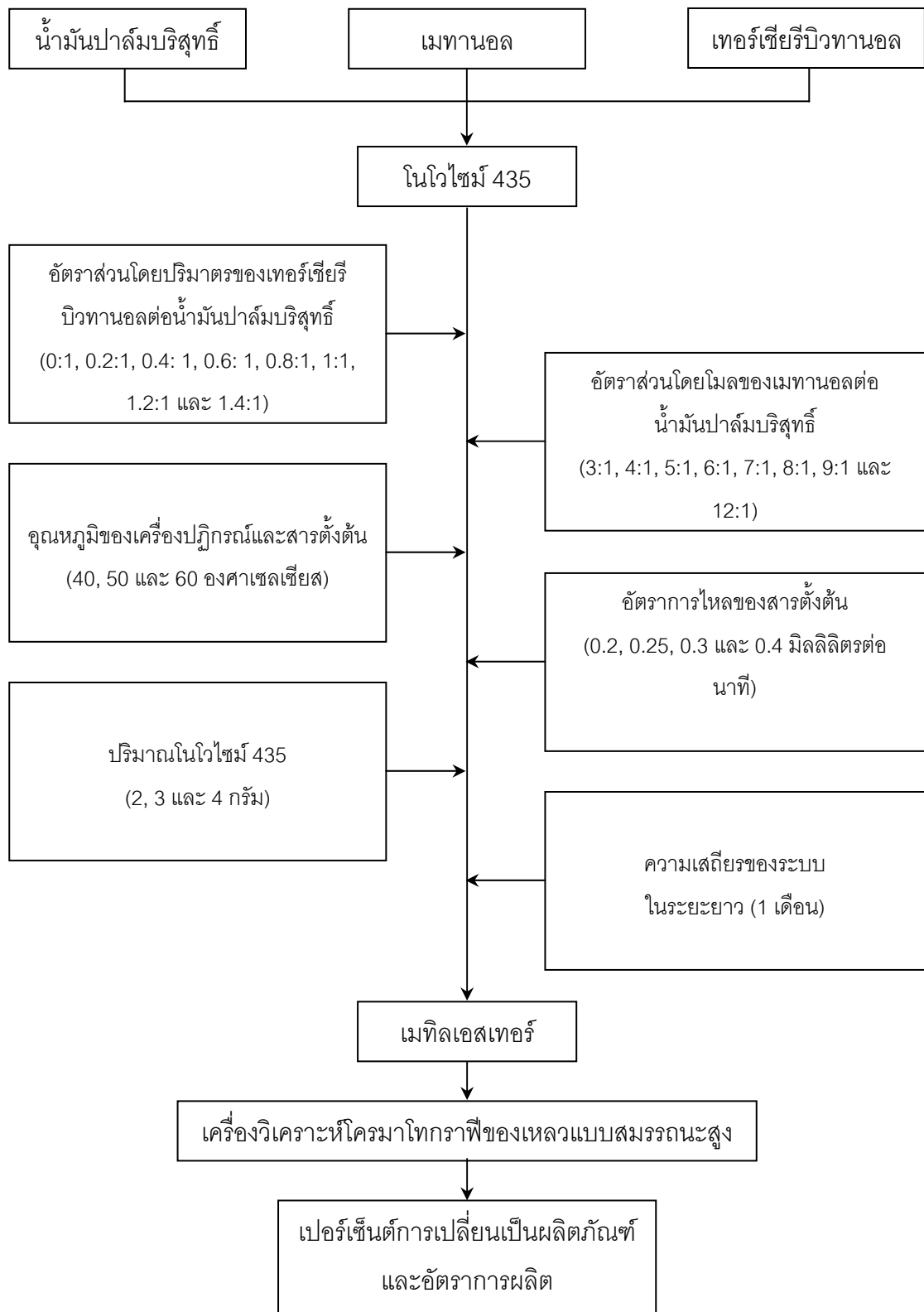
$$\% \text{ Conversion} = \frac{[\text{FAME}] \times 100}{3[\text{TAG}] + 2[1, 3 \text{ DAG}] + 2[1, 2 \text{ DAG}] + [\text{MAG}] + [\text{FFA}] + [\text{FAME}]}$$

เมื่อ % Conversion	คือ	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์
[FAME]	คือ	ความเข้มข้นของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (มิลลิโมลาร์)
[TAG]	คือ	ความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ (มิลลิโมลาร์)
[1, 3 DAG]	คือ	ความเข้มข้นของ 1, 3 ไดกลีเซอไรด์ (มิลลิโมลาร์)
[1, 2 DAG]	คือ	ความเข้มข้นของ 1, 2 ไดกลีเซอไรด์ (มิลลิโมลาร์)
[MAG]	คือ	ความเข้มข้นของโมโนกลีเซอไรด์ (มิลลิโมลาร์)
[FFA]	คือ	ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระ (มิลลิโมลาร์)

อัตราการผลิต

$$P = \left(\frac{\text{FAME}_{\text{ave}} \times D}{10^3} \right) \left(\frac{\text{FR} \times 60}{E} \right)$$

เมื่อ P	คือ	อัตราการผลิต (มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง)
FAME _{ave}	คือ	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (มิลลิโมลาร์)
D	คือ	Dilution factor จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC
FR	คือ	อัตราการไหลของสารตั้งต้น (มิลลิลิตรต่อนาที)
E	คือ	ปริมาณไนโวไซม์ 435 (กรัม)



รูปที่ 6 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

บทที่ 4

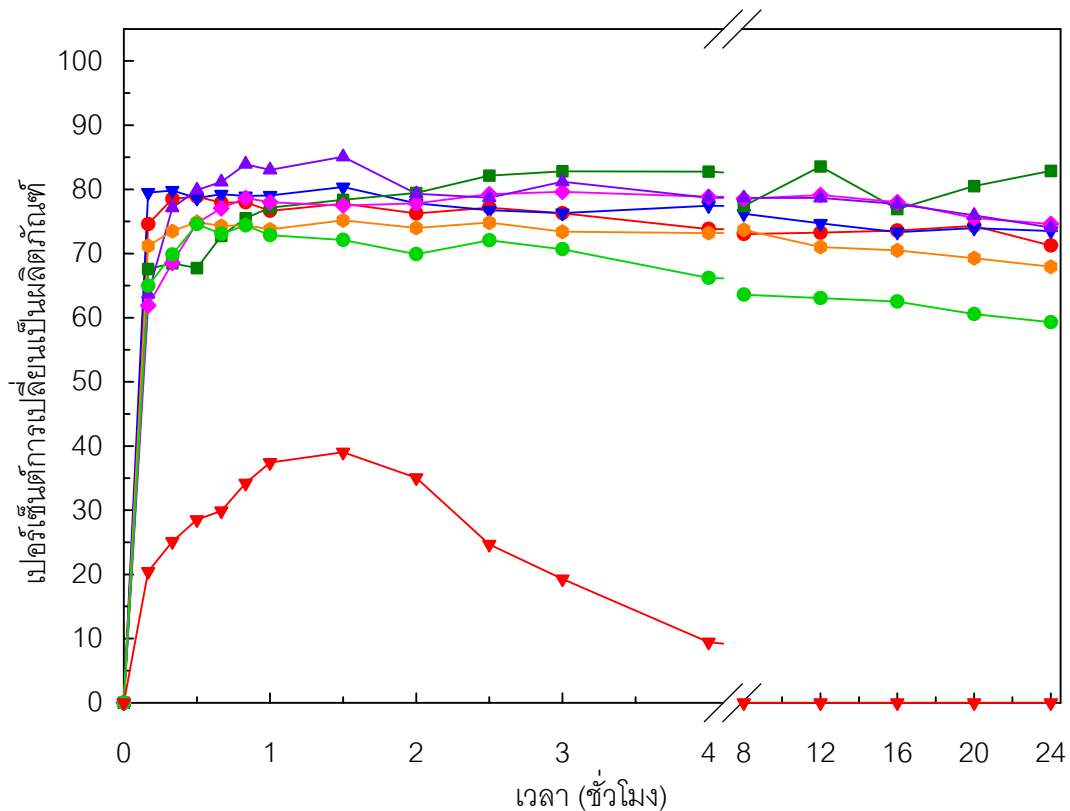
ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

4.1.1 ผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

ผลการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAME) แบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยควบคุมภาวะการทดลองเริ่มต้น ดังนี้ โนวาไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 3:1 โดยศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่อัตราส่วนดังต่อไปนี้ 0:1, 0.2:1, 0.4:1, 0.6:1, 0.8:1, 1:1, 1.2:1 และ 1.4:1 พบว่า ในช่วงอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ตั้งแต่ 0:1 จนถึง 1:1 เมื่อเพิ่มปริมาตรเทอร์เชียรีบิวทานอลในสารตั้งต้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยและอัตราการผลิตตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะเพิ่มขึ้นด้วย อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 0:1, 0.2:1, 0.4:1, 0.6:1, 0.8:1 และ 1:1 มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ย เท่ากับ 1.57, 62.53, 70.93, 77.29, 77.43 และ 80.67 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และมีอัตราการผลิต เท่ากับ 0.13, 5.24, 5.86, 6.30, 6.46 และ 7.13 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 โดยอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 1:1 ให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ย รวมถึงมีอัตราการผลิตที่สูงที่สุด

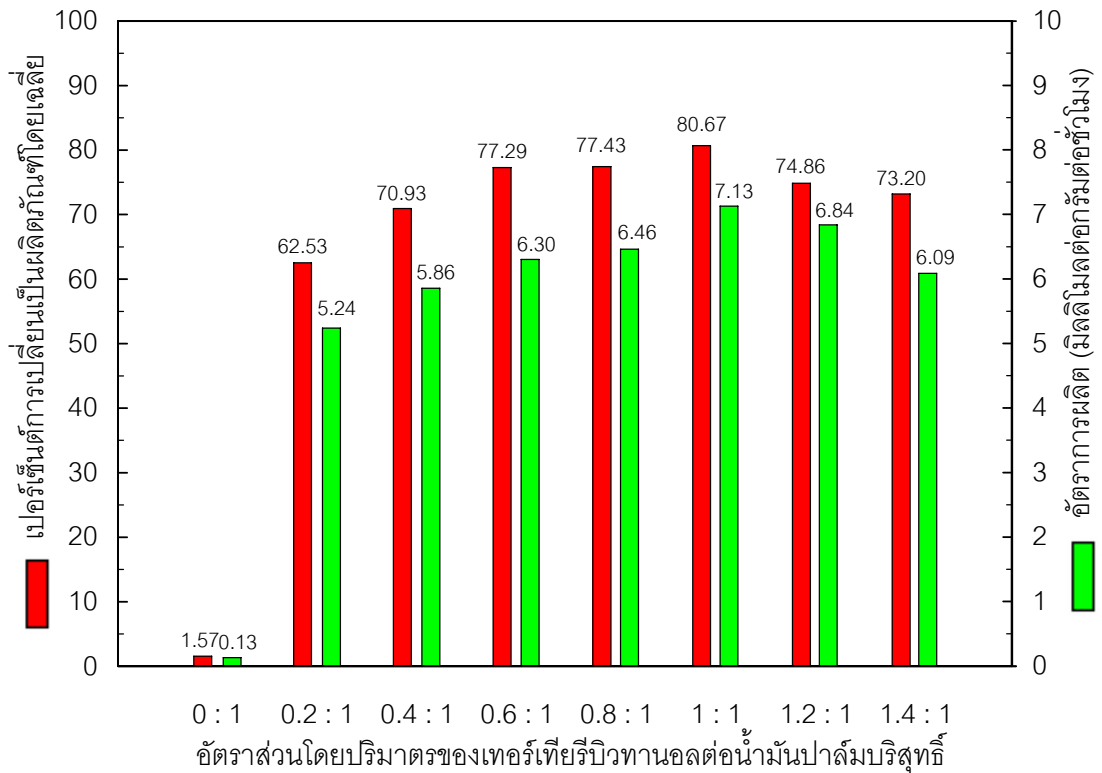
แต่เมื่อเพิ่มปริมาตรเทอร์เชียรีบิวทานอลให้มากขึ้น กลับพบว่าทั้งเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยและอัตราการผลิตตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะลดลง อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 1.2:1 และ 1.4:1 มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ย เท่ากับ 74.86 และ 73.20 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราการผลิต เท่ากับ 6.84 และ 6.09 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังนั้น จึงเลือกอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 1:1 สำหรับการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 7 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 3:1

เมื่อ

- ▼ คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 0:1
- คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 0.2:1
- ◻ คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 0.4:1
- ▲ คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 0.6:1
- ◆ คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 0.8:1
- ◻ คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1.0:1
- ▼ คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1.2:1
- คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1.4:1

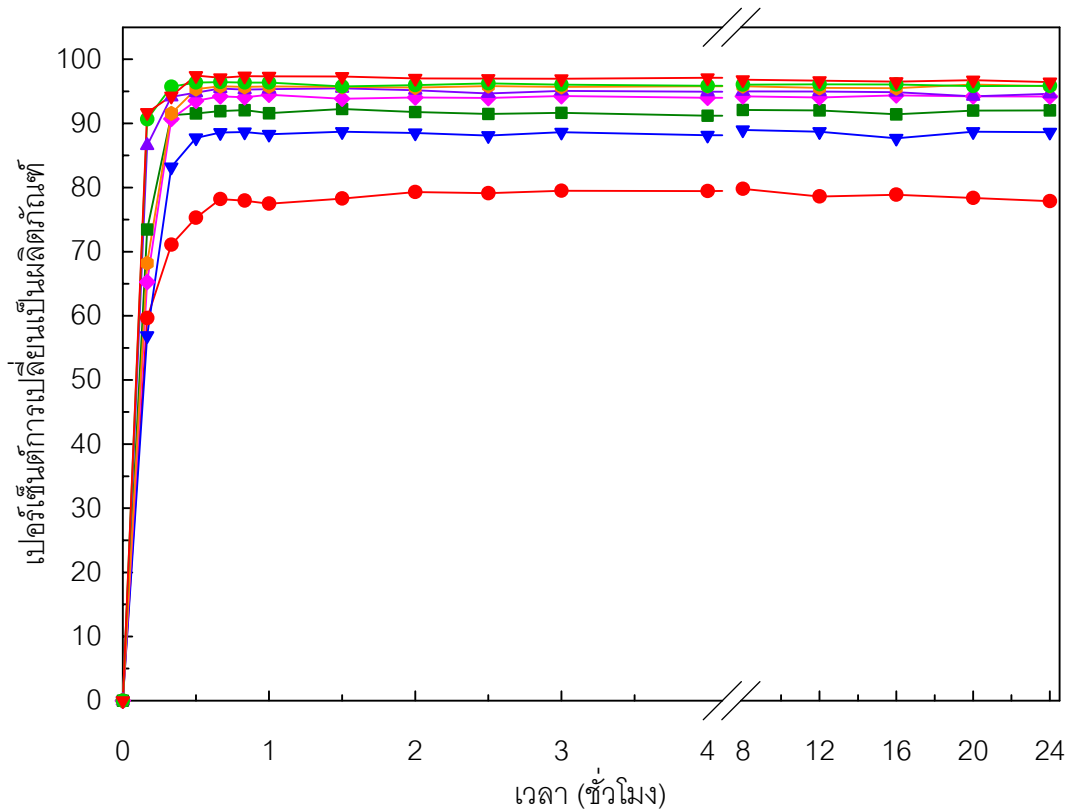


รูปที่ 8 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อ น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 3:1

4.1.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

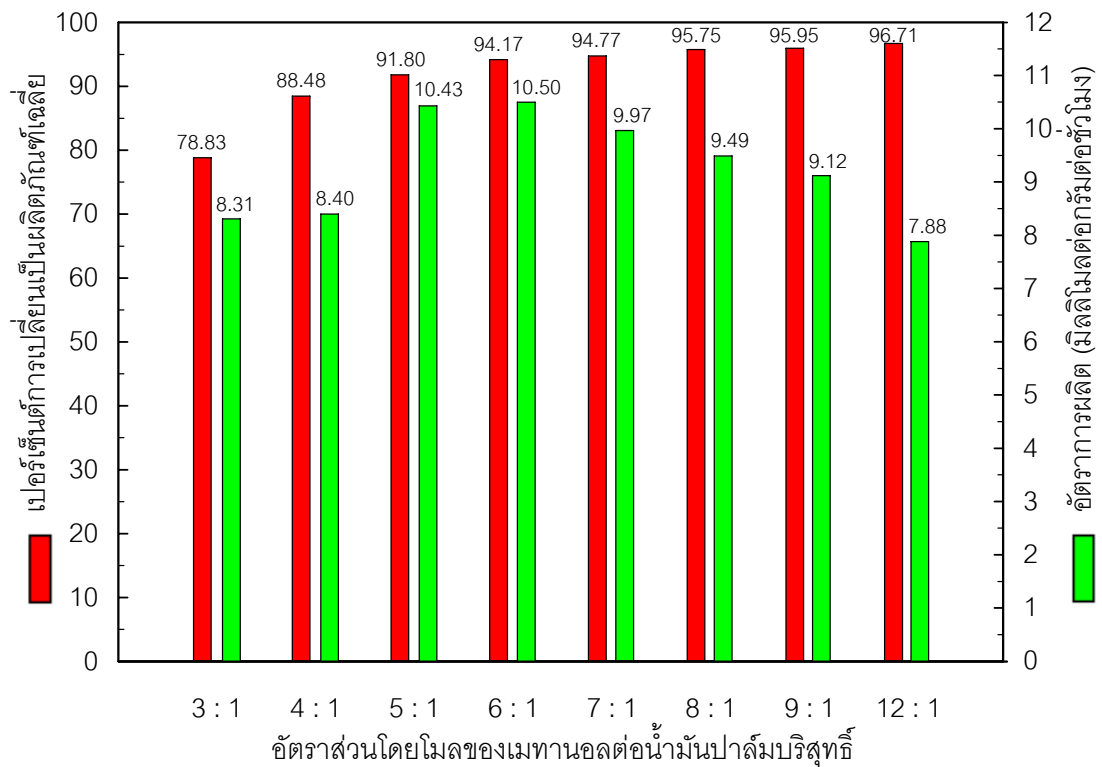
ผลการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เพื่อผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAME) แบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยควบคุมภาวะการทดลองเริ่มต้น ดังนี้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1 โดยศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 3:1, 4:1, 5:1, 6:1, 7:1, 8:1, 9:1 และ 12:1 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอลในสารตั้งต้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 3:1, 4:1, 5:1, 6:1, 7:1, 8:1, 9:1 และ 12:1 มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ย เท่ากับ 78.83, 88.48, 91.80, 94.17, 95.75, 95.95 และ 96.71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 12:1 ให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยที่สูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10

ในส่วนของการผลิต พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเมทานอลในสารตั้งต้นอัตราการผลิตตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 3:1, 4:1, 5:1 และ 6:1 มีอัตราการผลิต เท่ากับ 8.31, 8.40, 10.43 และ 10.50 ตามลำดับ โดยพบว่าอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 6:1 มีอัตราการผลิตที่สูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันขึ้นอีก นั่นคือที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 7:1, 8:1, 9:1 และ 12:1 พบว่าอัตราการผลิตจะค่อยๆ ลดลง โดยอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 7:1, 8:1, 9:1 และ 12:1 มีอัตราการผลิต เท่ากับ 9.97, 9.49, 9.12 และ 7.88 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 6:1 สำหรับการศึกษาลำดับอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 9 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1

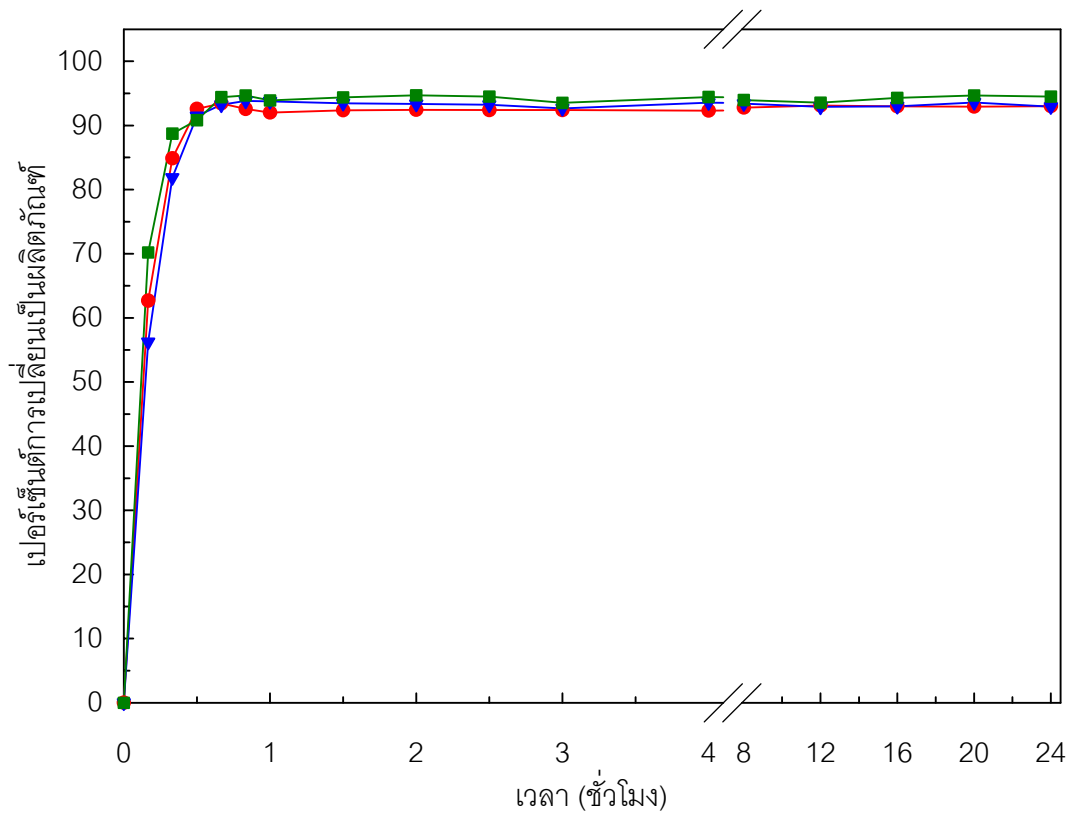
- เมื่อ
- คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 3:1
 - ▼ คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 4:1
 - คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 5:1
 - ◆ คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1
 - ▲ คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 7:1
 - คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 8:1
 - คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 9:1
 - ▼ คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 12:1



รูปที่ 10 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตรต่ออนาที และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1

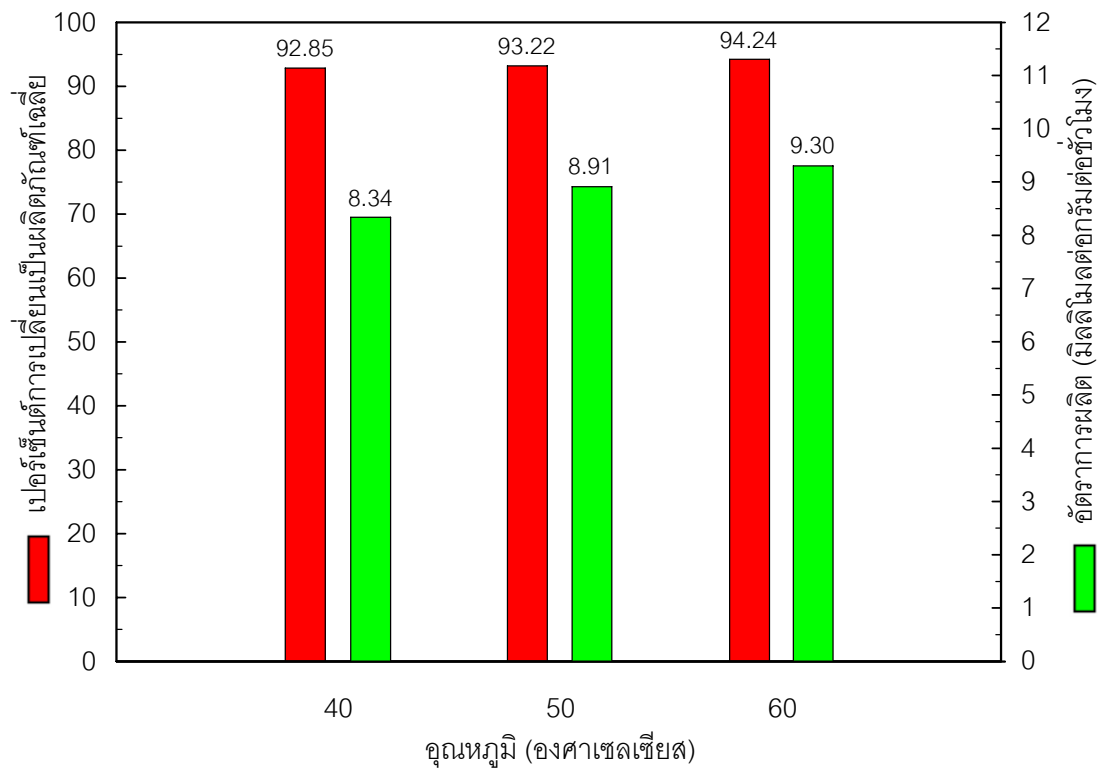
4.1.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ผลการศึกษาเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAME) แบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยควบคุมภาวะการ ทดลองเริ่มต้น ดังนี้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดย ปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1 โดยศึกษาอุณหภูมิของเครื่อง ปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของเครื่อง ปฏิกรณ์และสารตั้งต้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยและอัตราการผลิตตลอด ระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็น ผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยและอัตราการผลิตจะเพิ่มขึ้นสูงที่สุด รองลงมาคือที่ 50 และ 40 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยที่ได้ เท่ากับ 94.24, 93.22 และ 92.85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีอัตราการผลิต เท่ากับ 9.30, 8.91 และ 8.34 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12 ซึ่งเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยและอัตรา การผลิตที่ได้ มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้น จึงเลือกใช้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และ สารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส สำหรับการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 11 การเปลี่ยนเป็นผลิตรักัดณ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1

- เมื่อ ● คือ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส
- เมื่อ ▼ คือ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 50 องศาเซลเซียส
- เมื่อ ■ คือ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 60 องศาเซลเซียส

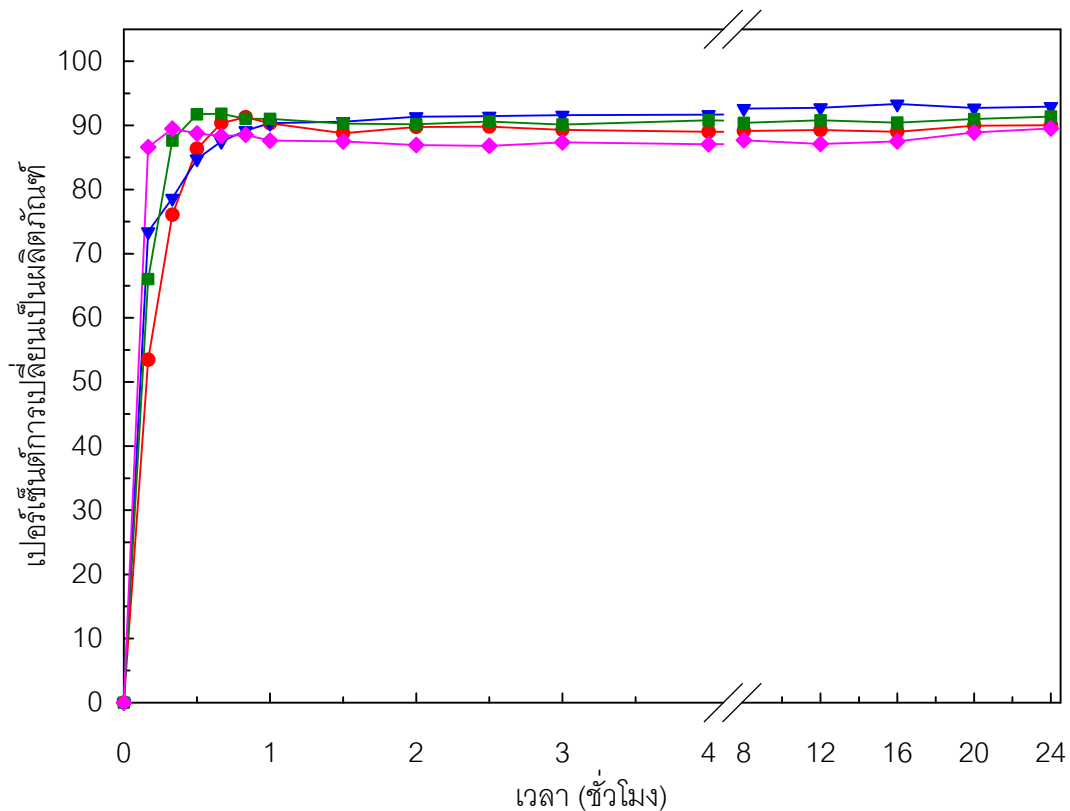


รูปที่ 12 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ไนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.2 มิลลิตรต่ออนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1

4.1.4 ผลของอัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

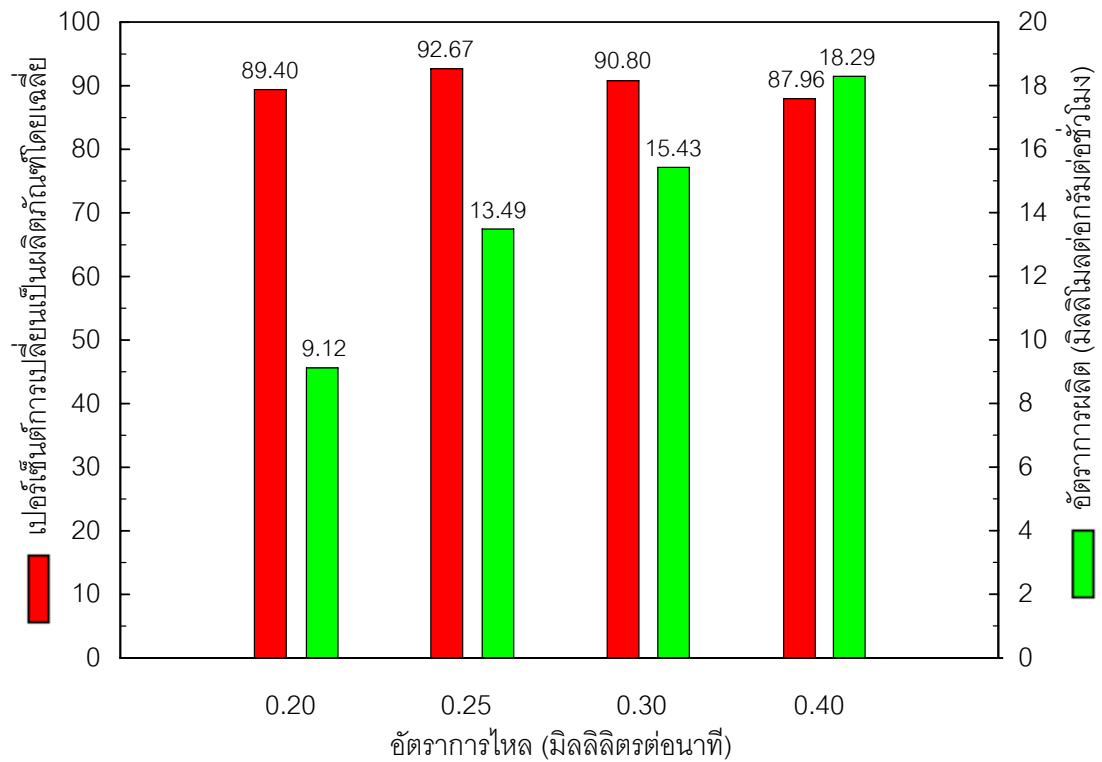
ผลการศึกษาเพื่อหาอัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เพื่อผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAME) แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยควบคุมภาวะการทดลองเริ่มต้น ดังนี้ โนวโซล 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1 โดยศึกษาอัตราการใช้ของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.20, 0.25, 0.30 และ 0.40 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า อัตราการใช้ที่ให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่สูงที่สุด คือ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที รองลงมาคือ 0.30, 0.20 และ 0.40 มิลลิลิตรต่อนาที เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยที่ได้ เท่ากับ 92.67, 90.80, 89.40 และ 87.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 13

อัตราการใช้ที่ให้อัตราการผลิตตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่สูงที่สุด คือ 0.40 มิลลิลิตรต่อนาที รองลงมาคือ 0.30, 0.25 และ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที โดยอัตราการผลิตที่ได้เท่ากับ 18.29, 15.43, 13.49 และ 9.12 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งอัตราการผลิตจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราการใช้ของสารตั้งต้น ดังแสดงในรูปที่ 14 และเลือกใช้อัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับการศึกษาค้นคว้าวิจัยอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 13 การเปลี่ยนเป็นผลิตรักัดณฐ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1

- เมื่อ
- คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที
 - ▼ คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที
 - คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.30 มิลลิลิตรต่อนาที
 - ◆ คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.40 มิลลิลิตรต่อนาที

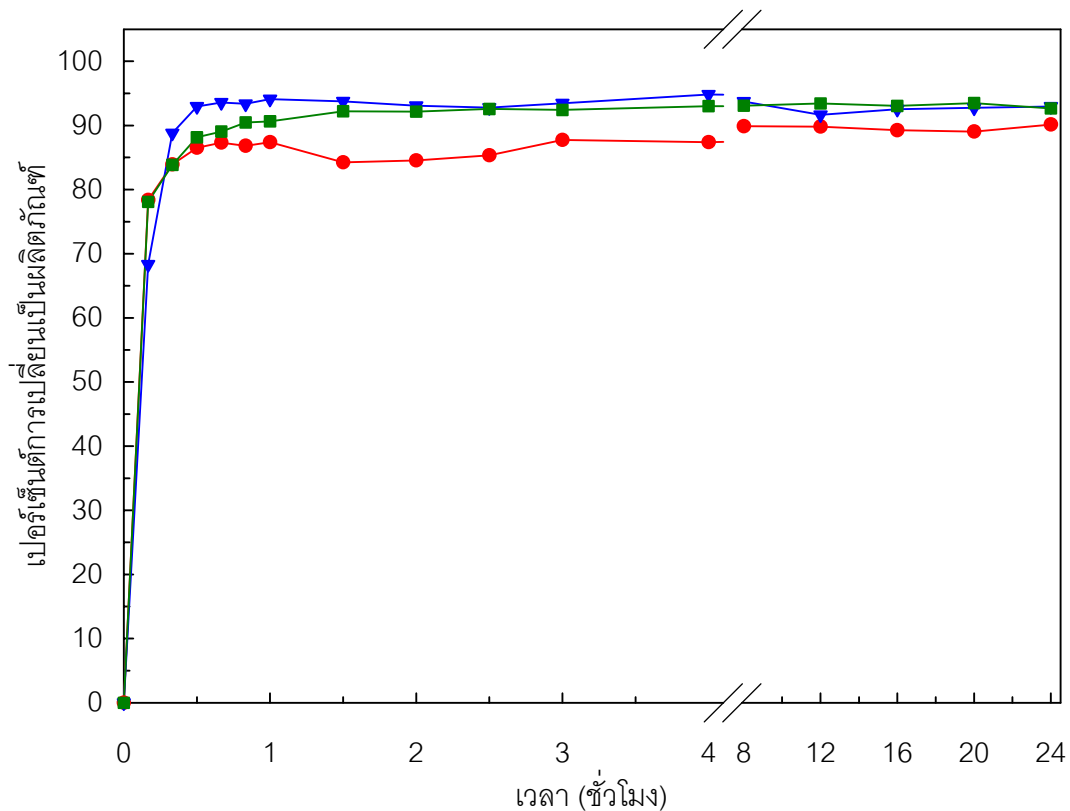


รูปที่ 14 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม คุณสมบัติของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1

4.1.5 ผลของปริมาณโนโวไซม์ 435 ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ผลการศึกษาเพื่อหาปริมาณโนโวไซม์ 435 ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เพื่อผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAME) แบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยควบคุมภาวะการทดลองเริ่มต้น ดังนี้ คุณสมบัติของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1 โดยศึกษาโนโวไซม์ 435 ปริมาณ 2, 3 และ 4 กรัม พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณโนโวไซม์ 435 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยโนโวไซม์ 435 ปริมาณ 4 กรัม จะให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือโนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม และ 2 กรัม เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยที่ได้ เท่ากับ 93.12, 93.07 และ 89.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งโนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม จะให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยแตกต่างจากโนโวไซม์ 435 ปริมาณ 4 กรัม เพียงเล็กน้อย

อัตราการผลิตจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณโนโวไซม์ 435 ขึ้น โดยโนโวไซม์ 435 ปริมาณ 2 กรัม ให้อัตราการผลิตตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่สูงที่สุด คือ 19.51 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง รองลงมาคือโนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 และ 4 กรัม อัตราการผลิตที่ได้ เท่ากับ 12.77 และ 9.55 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 15 และ 16 และเลือกใช้โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม เป็นปัจจัยควบคุมในการทดลองต่อไป

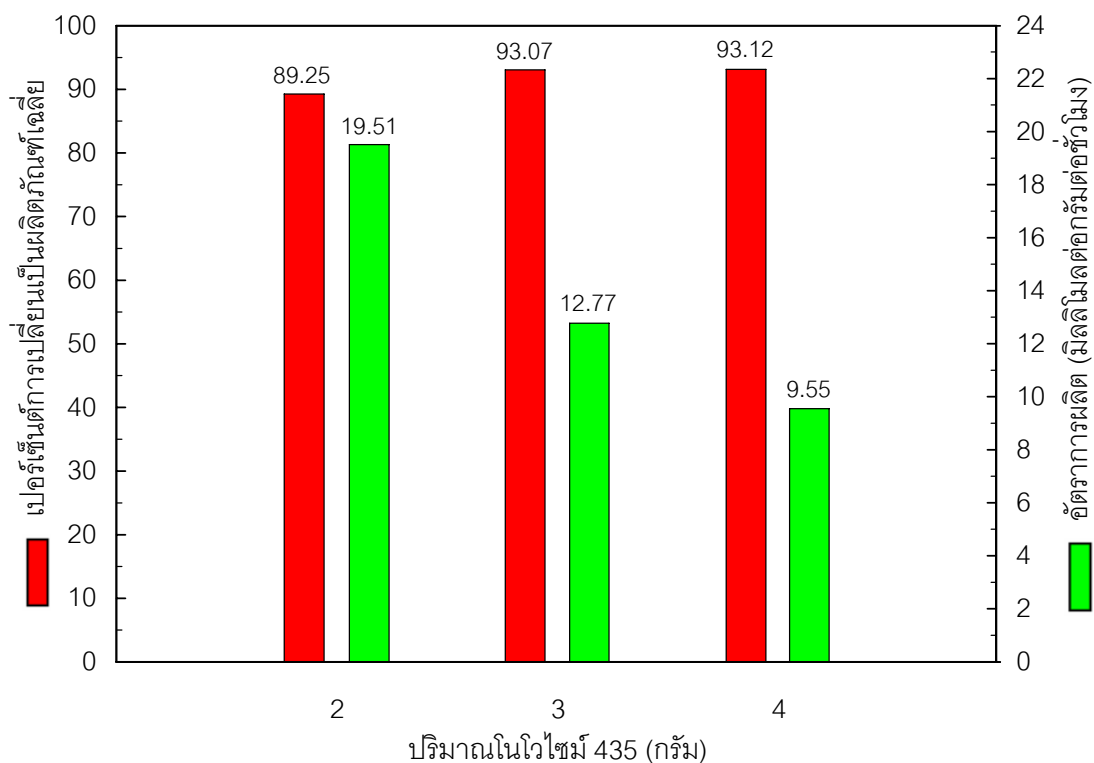


รูปที่ 15 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1

เมื่อ ● คือ โนวोไซม์ 435 ปริมาณ 2 กรัม

▼ คือ โนวอไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม

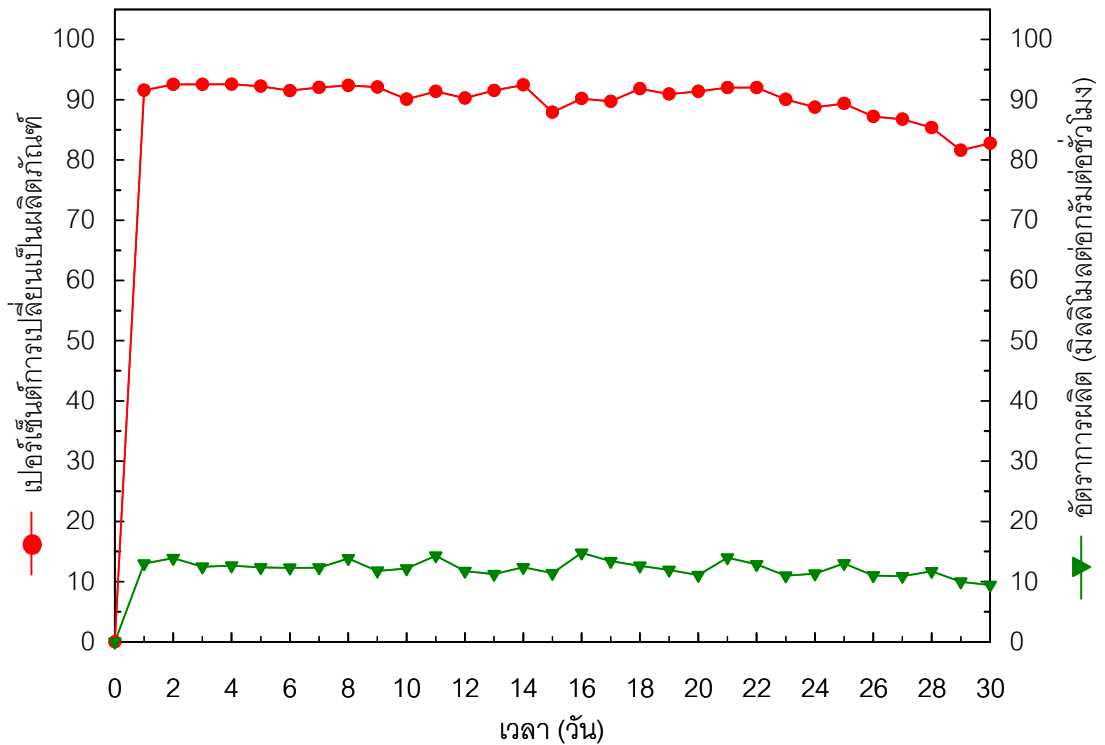
■ คือ โนวอไซม์ 435 ปริมาณ 4 กรัม



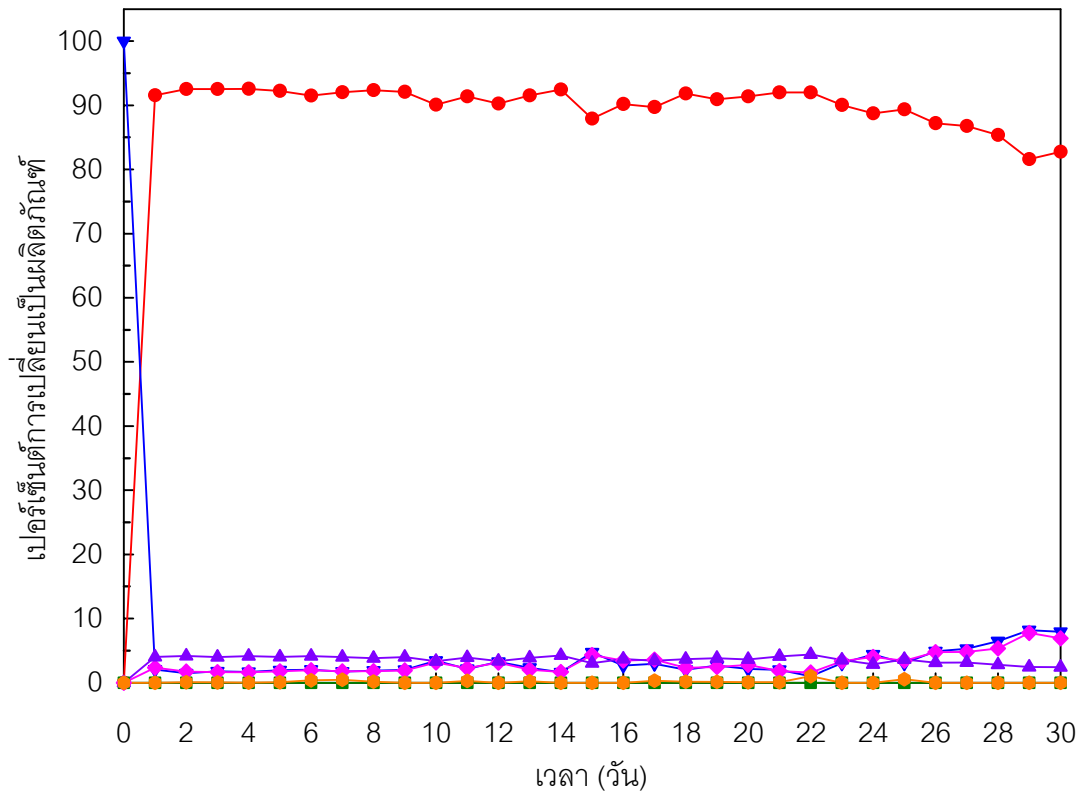
รูปที่ 16 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1

4.2 ผลการศึกษาความเสถียรในระยะยาวของระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ

ผลการศึกษาความเสถียรของระบบการผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAME) แบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยทำการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 เดือน (720 ชั่วโมง) โดยควบคุมภาวะการทดลองเริ่มต้น ดังนี้ โนวาไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1 พบว่า ระบบสามารถผลิตไบโอดีเซลได้อย่างต่อเนื่อง โดยพบการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตเพียงเล็กน้อย ซึ่งตลอดระยะเวลา 1 เดือน ระบบสามารถผลิตไบโอดีเซลที่มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 1 เดือน เท่ากับ 90.10 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราการผลิตตลอดระยะเวลา 1 เดือน เท่ากับ 12.22 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง และเมื่อทำการวัดอัตราการไหลของสารตั้งต้นเป็นช่วงๆ ตลอดระยะเวลา 1 เดือน พบว่า อัตราการไหลของสารตั้งต้น ซึ่งเริ่มต้นที่ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที เริ่มลดลงในช่วงวันที่ 22 และลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยในวันที่ 30 ของการทำปฏิกิริยา พบว่ามีอัตราการไหลของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.18 มิลลิลิตรต่อนาที (รูปที่ 17 และ 18) และปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้ตลอดระยะเวลา 1 เดือน เท่ากับ 7.74 ลิตร (รูปที่ 19) ซึ่งเมื่อทดลองกลั่นแยกตัวทำละลายออกจากผลิตภัณฑ์ปริมาตร 500 มิลลิลิตร พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเกิดการแยกชั้นเป็นไบโอดีเซล 240 มิลลิลิตร และกลีเซอรอล 10 มิลลิลิตร (รูปที่ 20 และ 21)



รูปที่ 17 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ซึ่งใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนวาไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่ออนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1



รูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุ ซึ่งใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยใช้ โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม คุณสมบัติของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1

- เมื่อ ● คือ เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน
 ▼ คือ ไตรกลีเซอไรด์
 ■ คือ 1, 3 ไดกลีเซอไรด์
 ◆ คือ 1, 2 ไดกลีเซอไรด์
 ▲ คือ โมโนกลีเซอไรด์
 ◆ คือ กรดไขมันอิสระ



รูปที่ 19 ปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย ตลอดระยะเวลา 1 เดือน



รูปที่ 20 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย ก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) จากการกลั่นเพื่อแยกตัวทำละลาย



รูปที่ 21 การแยกชั้นของไบโอดีเซล (ชั้นบน) และกลีเซอรอล (ชั้นล่าง) ภายหลังจากการกั่นเพื่อแยกตัวทำละลาย ซึ่งได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบด บรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ผลของการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

5.1.1 ผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

จากผลการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เนื่องจากเทอร์เชียรีบิวทานอลจัดเป็นตัวทำละลายชนิดหนึ่ง ซึ่งมีส่วนช่วยเพิ่มการละลายของเมทานอลในน้ำมัน ปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลจึงมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาตรเทอร์เชียรีบิวทานอลในสารตั้งต้น ในช่วงอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ตั้งแต่ 0:1 ถึง 1:1 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยและอัตราการผลิตตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 1:1 ให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยและอัตราการผลิตที่สูงที่สุด คือ 80.67 เปอร์เซ็นต์ และ 7.13 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเทอร์เชียรีบิวทานอลช่วยเพิ่มการละลายของเมทานอลในน้ำมันให้มากขึ้น ดังนั้นการทำปฏิกิริยาจึงสามารถเกิดได้มากขึ้น ส่งผลให้ได้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยและอัตราการผลิตที่สูงขึ้น แต่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาตรเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อ เป็นอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 1.2:1 และ 1.4:1 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยและอัตราการผลิตกลับค่อยๆ ลดลง ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเพิ่มปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลในสารตั้งต้นที่มากเกินไป ส่งผลต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้น ทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นถูกเจือจางลง จึงมีผลให้การเกิดปฏิกิริยา เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ย และอัตราการผลิตลดลงด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาเพื่อหาปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน ในงานวิจัยของ Wang และคณะ (2006) ที่ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากส่วนที่เหลือจากการกลั่นน้ำมันถั่วเหลืองให้บริสุทธิ์ (soybean deodorizer distillate) โดยมีการเติมตัวขับน้ำออกจากระบบ และใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li และคณะ (2006) เช่นเดียวกัน ที่ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพ (rapeseed oils) ในระบบที่ใช้

เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย จากผลการทดลองข้างต้น ดังนั้นอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่เหมาะสม คือ อัตราส่วน 1:1

5.1.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

จากผลการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาตรเมทานอลในสารตั้งต้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะเพิ่มขึ้นด้วย อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 3:1, 4:1, 5:1, 6:1, 7:1, 8:1, 9:1 และ 12:1 มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ย เท่ากับ 78.83, 88.48, 91.80, 94.17, 95.75, 95.95 และ 96.71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 6:1 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยจะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ ซึ่งผลการทดลองข้างต้นสอดคล้องกับหลายๆ งานวิจัย เช่น งานวิจัยของ Halim และ Kamaruddin (2008) ที่ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มใช้แล้ว Royon และคณะ (2007) ที่ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดฝ้าย โดยพบว่าความสามารถในการละลายของเมทานอลจะเพิ่มขึ้นในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาตรเมทานอลจนมากเกินไปในสารตั้งต้น ก็จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้มากขึ้น ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยจึงเพิ่มขึ้น

ในส่วนของการผลิต พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาตรเมทานอลในสารตั้งต้น อัตราการผลิตตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 6:1 มีอัตราการผลิตสูงที่สุด เท่ากับ 10.50 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อ พบว่าอัตราการผลิตค่อยๆ ลดลง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวคาดว่าเกิดขึ้นจากการเพิ่มปริมาตรของเมทานอลที่มากเกินไป มีผลทำให้ความสามารถในการละลายของเมทานอลค่อยๆ ลดลง เกิดเป็นเมทานอลส่วนเกินขึ้น และคาดว่าจากปริมาตรของเมทานอลที่มากเกินไปนี้ ได้ส่งผลให้เมทานอลส่วนเกินที่เกิดขึ้นทำลายโนโวไซม์ 435 บางส่วนลง ทำให้ประสิทธิภาพของโนโวไซม์ 435 ลดลง อัตราการผลิตจึงลดลงด้วย ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยยังคงเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากโนโวไซม์ 435 ส่วนที่เหลือนั้น ยังคงสามารถทำงานได้อยู่ และปริมาตรเมทานอลที่มากเกินไป มีผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยจึงยังคงเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้น

อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 6:1 จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของการทำปฏิกิริยา

5.1.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา นอกจากจะมีผลต่อการทำงานของไนโอซิม 435 ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพแล้ว ยังมีผลต่อการละลายของเมทานอลในน้ำมันอีกด้วย โดยจากการศึกษาผลของการเพิ่มและลดอุณหภูมิต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ย และอัตราการผลิตต่อระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยและอัตราการผลิตจะเพิ่มขึ้น และเมื่อลดอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นลง เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยและอัตราการผลิตก็จะลดลงด้วย โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยและอัตราการผลิตสูงสุดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ย เท่ากับ 94.24 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือที่ 50 และ 40 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยที่ได้ เท่ากับ 93.22 และ 92.85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนอัตราการผลิต เท่ากับ 9.30, 8.91 และ 8.34 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60, 50 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยและอัตราการผลิตที่ได้ มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ผลการทดลองมีความคล้ายคลึงกับการศึกษาของ Du, Xu และ Liu (2003) ซึ่งศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ต่อการผลิตไบโอดีเซลด้วยน้ำมันถั่วเหลืองในระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง พบว่า ในระบบการผลิตแบบกะ (ไม่ต่อเนื่อง) ช่วงอุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส ถือเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยไลเพสมีค่าแอกทิวิตีสูงในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว แต่เมื่อนำมาทำปฏิกิริยาในระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง พบว่า ค่าแอกทิวิตีของไลเพสกลับลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาในระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง คือ 30-40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ไลเพสสามารถรักษาค่าแอกทิวิตีที่สูงไว้ได้อย่างต่อเนื่อง และเป็นช่วงอุณหภูมิที่ไม่สูงเกินไปจนทำให้ไลเพสเสียสภาพ

จากผลงานวิจัยดังกล่าวและการพิจารณาถึงความคุ้มค่าของการผลิตในระดับอุตสาหกรรม และเสถียรภาพของระบบในระยะยาวแล้ว การใช้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส ถือเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

5.1.4 ผลของอัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

อัตราการใช้ของสารตั้งต้นมีผลโดยตรงต่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้น และปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยอัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่ต่ำทำให้สารตั้งต้นอยู่ในคอลัมน์นานขึ้น และสามารถทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ได้นานขึ้น แต่ก็ทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์รวมที่น้อยลงเช่นกัน ผลการศึกษาเพื่อหาอัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการใช้ของสารตั้งต้นจาก 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที่ เป็น 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที่ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพิ่มขึ้นจาก 90.80 เปอร์เซ็นต์ เป็น 92.67 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มอัตราการใช้ของสารตั้งต้นเป็น 0.30 และ 0.40 มิลลิลิตรต่อนาที่ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยกลับลดลง โดยมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยเท่ากับ 89.40 และ 87.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราการใช้ของสารตั้งต้นจาก 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที่ เป็น 0.25, 0.30 และ 0.40 มิลลิลิตรต่อนาที่ พบว่าอัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่สูงขึ้นตามอัตราการใช้ของสารตั้งต้น โดยอัตราการใช้ของสารตั้งต้นตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่ได้ เท่ากับ 9.12, 13.49, 15.43 และ 18.29 มิลลิเมตรต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกอัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที่ เป็นอัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งผลการทดลองข้างต้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chulalaksananukul และคณะ (2002) ที่ศึกษาการผลิตเจรานิลอะซิเตต (geranyl acetate) ด้วยไลเพสตรูปร่างในเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการใช้ของสารตั้งต้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ลดลง แต่อัตราการใช้ของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการใช้ของสารตั้งต้นมีผลทำให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในคอลัมน์ลดน้อยลง เวลาในการทำปฏิกิริยาจึงลดลง ทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ลดลง ในขณะที่ปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้เพิ่มขึ้นจากอัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่สูงขึ้น แต่ทั้งนี้การเลือกภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา สามารถพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ และความเสถียรของระบบ โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่สูง หมายถึง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่สูง มีความบริสุทธิ์มาก ซึ่งทำให้กระบวนการแยกผลิตภัณฑ์เพื่อทำให้บริสุทธิ์ทำได้ง่าย และระบบที่มีความเสถียรจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพคงที่ ง่ายต่อการทำให้บริสุทธิ์เช่นเดียวกัน นอกจากนี้การใช้อัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่สูงขึ้น ทำให้ต้องใช้ปริมาตรสารตั้งต้นที่มากขึ้นด้วย แต่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้กลับต่ำลง จึงถือว่าเป็นการใช้สารตั้งต้นอย่างไม่มีประสิทธิภาพและสิ้นเปลือง

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่สนับสนุนผลการทดลองนี้คือ งานของ Hama และคณะ (2007) ซึ่งศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยน้ำมันถั่วเหลือง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ โดยใช้ *Rhizopus oryzae* ที่ตรึงบน Biomass Support Particals (BSPs) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

พบว่า การใช้อัตราการใช้ไอน้ำที่ต่ำเกินไป ทำให้เกิดชั้นของกลีเซอรอลสะสมบนผิววัสดุค้ำจุน มีผลให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ลดลง และการใช้ไอน้ำที่สูงเกินไป มีผลทำให้ความเสถียรของไลเปสตรงรูปลดลง เนื่องจากความรุนแรงของอัตราการใช้ไอน้ำที่สูง ทำให้ไลเปสหลุดออกจากวัสดุค้ำจุน ทำให้ระบบไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องในระยะยาว

5.1.5 ผลของปริมาณไอน้ำ 435 ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ผลการศึกษาเพื่อหาปริมาณไอน้ำ 435 ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไอน้ำ 435 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพิ่มขึ้นด้วย โดยไอน้ำ 435 ปริมาณ 4 กรัม ให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 93.12 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการใช้ไอน้ำ 435 ปริมาณ 3 กรัม และ 2 กรัม จะได้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยที่ได้ เท่ากับ 93.07 และ 89.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งไอน้ำ 435 ปริมาณ 3 กรัม มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับไอน้ำ 435 ปริมาณ 4 กรัม แต่พบว่าอัตราการผลิตตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง ลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณไอน้ำ 435 ทั้งนี้การใช้ไอน้ำ 435 ปริมาณ 2 กรัม ให้อัตราการผลิตสูงสุด เท่ากับ 19.51 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ส่วนการใช้ไอน้ำ 435 ปริมาณ 3 และ 4 กรัม อัตราการผลิตมีค่า เท่ากับ 12.77 และ 9.55 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chulalaksananukul และคณะ (2002) ที่ศึกษาการผลิตเจอรานิลอะซิเตต (geranyl acetate) ด้วยไลเปสตรงรูปในเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณไลเปสตรงรูป เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยจะสูงขึ้น แต่อัตราการผลิตที่ได้จะลดลง ทั้งนี้ปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา ควรพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ และความเสถียรของระบบ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง ดังนั้น ไอน้ำ 435 ปริมาณ 3 กรัม จึงเป็นปริมาณการใช้ที่เหมาะสม

5.2 ผลของการศึกษาความเสถียรในระยะยาวของระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ

ผลการศึกษาความเสถียรของระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยทำการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 เดือน (720 ชั่วโมง) พบว่า ระบบสามารถผลิตไบโอดีเซลได้อย่าง

ต่อเนื่อง โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ยและอัตราการผลิตตลอดระยะเวลา 1 เดือน เท่ากับ 90.10 เปอร์เซ็นต์ และ 12.22 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์เริ่มมีการลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงวันที่ 22 จากอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่ลดลง ซึ่งเกิดจากการอุดตันและสะสมของสิ่งสกปรกภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ โดยปริมาตรรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้ตลอดระยะเวลา 1 เดือน เท่ากับ 7.74 ลิตร

ซึ่งเมื่อทดลองกลั่นแยกตัวทำละลายออกจากผลิตภัณฑ์รวมปริมาตร 500 มิลลิลิตร พบว่าได้เป็นไบโอดีเซล 240 มิลลิลิตร และกลีเซอรอล 10 มิลลิลิตร ดังนั้นจากผลิตภัณฑ์รวมซึ่งได้จากการผลิตอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 เดือน ปริมาตร 7.74 ลิตร จะต้องได้เป็นไบโอดีเซลประมาณ 3.72 ลิตร และกลีเซอรอลประมาณ 0.15 ลิตร

บทที่ 6

สรุปการทดลอง

ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล โดยใช้ โนโวไซม์ 435 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ เพื่อผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAME) แบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ในระบบที่ใช้เทอร์เชียรีบิวทานอล เป็นตัวทำละลาย พบว่า อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 1:1 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่ 6:1 อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และ สารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นที่ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที และโนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำปฏิกิริยา

ความเสถียรในระยะยาวของระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์ แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ซึ่งใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย พบว่า ระบบสามารถผลิตไบโอดีเซลได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 เดือน (720 ชั่วโมง) โดยพบการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิต ซึ่งตลอดระยะเวลา 1 เดือน ระบบ สามารถผลิตไบโอดีเซลที่มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ย เท่ากับ 90.10 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราการผลิต เท่ากับ 12.22 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง นั่นคือ ในระยะเวลา 1 เดือน (720 ชั่วโมง) โนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม สามารถผลิตไบโอดีเซล 12.22 มิลลิโมล ได้ประมาณ 3.72 ลิตร อย่างต่อเนื่อง

ระบบการผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAME) แบบต่อเนื่อง ด้วย เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ โดยใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลายนี้ ประสบความสำเร็จในการผลิตไบโอดีเซลที่มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์สูงได้อย่างต่อเนื่อง แต่ อย่างไรก็ตามเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้น ยังต่ำกว่าค่ามาตรฐานไบโอดีเซลตาม ประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิล เอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2550 อยู่ (ตามมาตรฐานดังกล่าวต้องมีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ไม่ต่ำกว่า 96.5 เปอร์เซ็นต์) และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณน้อย ซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจจะสามารถแก้ไข ได้โดยการพัฒนาระบบการผลิตที่จะสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ และสามารถใช้อัตราการไหลที่สูงขึ้นได้ เพื่อที่จะสามารถเพิ่มปริมาณการผลิตให้สูงขึ้นได้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ราชกิจจานุเบกษา. 2550. ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 124 ตอนพิเศษ 62 ง ลงวันที่ 23 พฤษภาคม 2550 หน้า 7 – 10 (รายละเอียดแนบท้าย).

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวง. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.). 2549. รอบรู้...เรื่องราว ไบโอดีเซล. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมุทรปราการ: พิมพ์พินิจ การพิมพ์.

สุวิมล ทรัพย์ทวีวุฒิ. 2550. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่เร่งปฏิกิริยาด้วยไลเปสตรึงรูป. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Ayesta, C.G., Carelli, A.A., and Ferreira, M.L. 2007. Relation between lipase structures and their catalytic ability to hydrolyse triglycerides and phospholipids. Enzyme and Microbial Technology 41: 35-43.

Balcao, V.M., Paiva, A.L., and Malcata, F.X. 1996. Review - Bioreactors with immobilized lipases: State of the art. Enzyme and Microbial Technology 18: 392-416.

Barnwal, B.K., and Sharma, M.P. 2005. Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. Renewable & Sustainable Energy Reviews 9: 363-378.

Chang, S.W., Shawa, J.F., Yang, C.K., and Shieh, C.J. 2007. Optimal continuous biosynthesis of hexyl laurate by a packed bed bioreactor. Process Biochemistry 42: 1362-1366.

- Chulalaksananukul, S., Chulalaksananukul, W., Rodriguez, P.L., and Combes, D. 2002. Long-term continuous synthesis of geranyl acetate in a column reactor with an immobilized lipase. Thai Journal of Agricultural Science 35: 9-16.
- Dossat, V., Combes, D., and Marty, A. 1999. Continuous enzymatic transesterification of high oleic sunflower oil in a packed bed reactor: influence of the glycerol production. Enzyme and Microbial Technology 25: 194-200.
- Du, W., Xu, Y., and Liu, D. 2003. Lipase-catalysed transesterification of soya bean oil for biodiesel production during continuous batch operation. Biotechnology and Applied Biochemistry 38: 103-106.
- Du, W., Xu, Y., Liu, D., and Zeng, J. 2004. Comparative study on lipase-catalyzed transformation of soybean oil for biodiesel production with different acyl acceptors. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic 30: 125-129.
- Fjerbaek, L., Christensen, K.V., and Norddahl, B. 2008. A Review of the current state of biodiesel production using enzymatic transesterification. Biotechnology and Bioengineering 102: 1298-1315.
- Fukuda, H., Kondo, A., and Noda, H. 2001. Review - Biodiesel fuel production by transesterification of oils. Journal of Bioscience and Bioengineering 92, 5: 405-416.
- Gandhi, N.N. 1997. Review - Applications of lipase. Journal of the American Oil Chemists' Society 74: 621-634.
- Halim, S.F.A., and Kamaruddin, A.H. 2008. Catalytic studies of lipase on FAME production from waste cooking palm oil in a tert-butanol system. Process Biochemistry 43: 1436-1439.

- Hama, S., Yamaji, H., Fukumizu, T., Numata, T., Tamalampudi, S., Kondo, A., Noda, H., and Fukuda, H. 2007. Biodiesel-fuel production in a packed-bed reactor using lipase-producing *Rhizopus oryzae* cells immobilized within biomass support particles. Biochemical Engineering Journal 34: 273-278.
- Harding, K.G., Dennis, J.S., Blottnitz, H., and Harrison, S.T.L. 2007. A life-cycle comparison between inorganic and biological catalysis for the production of biodiesel. Journal of Cleaner Production 16: 1368-1378.
- Kaieda, M., Samukawa, T., Matsumoto, T., Ban, K., Kondo, A., Shimada, Y., Noda, H., Nomoto, F., Ohtsuka, K., Izumoto, E., and Fukuda, H. 1999. Biodiesel fuel production from plant oil catalyzed by *Rhizopus oryzae* lipase in a water-containing system without an organic solvent. Journal of Bioscience and Bioengineering 88: 627-631.
- Kang, S.H., Lee, G.M., and Kim, B.G. 2000. Justification of continuous packed-bed reactor for retroviral vector production from amphotropic Ψ CRIP murine producer cell. Cytotechnology 34: 151-158.
- Köse, O., Tuter, M., and Aksoy, H.A. 2002. Immobilized *Candida antarctica* lipase-catalyzed alcoholysis of cotton seed oil in a solvent-free medium. Bioresource Technology 83: 125-129.
- Li, L., Du, W., Liu, D., Wang, L., and Li, Z. 2006. Lipase-catalyzed transesterification of rapeseed oils for biodiesel production with a novel organic solvent as the reaction medium. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic 43: 58-62.
- Li, W., Du, W., Liu, D., and Yao, Y. 2008. Study on factors influencing stability of whole cell during biodiesel production in solvent-free and *tert*-butanol system. Biochemical Engineering Journal 41: 111-115.
- Ma, F., and Hanna, M.A. 1999. Biodiesel production: a review. Bioresource Technology 70: 1-15.

- Macrae, A. R. 1983. Lipase-catalyzed interesterification oils and fats. Journal of American oil Chemists' Society. 60: 291-294.
- Marchetti, J.M., Miguel, V.U., and Errazu, A.F. 2007. Possible methods for biodiesel production. Renewable and Sustainable Energy Reviews 11: 1300-1311.
- Meher, L.C., Sagar, D.V., and Naik, S.N. 2006. Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 10: 248-268.
- Mittelbach, M. 1990. Lipase catalyzed alcoholysis of sunflower oil. Journal of the American Oil Chemists' Society 67: 168-170
- Nelson, L.A., Foglia, T.A., and Marmer, W.N. 1996. Lipase-catalyzed production of biodiesel. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 73: 1191-1195.
- Nielson, P.M., Brask, J., and Fjerbaek, L. 2008. Enzymatic biodiesel production: Technical and economical considerations. European Journal of Lipid Science and Technology 110: 692-700.
- Ni, J., and Meunier, F.C. 2007. Esterification of free fatty acids in sunflower oil over solid acid catalysts using batch and fixed bed-reactors. Applied Catalysis A: General 333: 122-130.
- Nie, K., Xie, F., Wang, F., and Tan, T. 2006. Lipase catalyzed methanolysis to produce biodiesel: Optimization of the biodiesel production. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic 43: 142-147.
- Novozymes. 2008. PRODUCTS & SOLUTIONS: NOVOZYM® 435 [online]. แหล่งที่มา: <http://www.novozymes.com/en/MainStructure/ProductsAndSolutions/Oils+and+fats/Oil+based+specialties/Novozym+435/Novozym+435.htm> [17 มีนาคม 2551]

- Oda, M., Kaieda, M., Hama, S., Yamaji, H., Kondoa, A., Izumoto, E., and Fukuda, H. 2005. Facilitatory effect of immobilized lipase-producing *Rhizopus oryzae* cells on acyl migration in biodiesel-fuel production. Biochemical Engineering Journal 23: 45–51.
- Osório, N.M., Fonseca, M.M.R., and Ferreira-Dias, S. 2006. Operational stability of *Thermomyces lanuginosa* lipase during interesterification of fat in continuous packed-bed reactors. European Journal of Lipid Science and Technology 108: 545–553.
- Pinto, A.C., Guarieiro, L.L.N., Rezende, M.J.C., Ribeiro, N.M., Torres, E.A., Lopes, W.A., Pereira, P.A.P., and Andrade, J.B. 2005. Biodiesel: An Overview. Journal of the Brazilian Chemical Society 16: 1313-1330.
- Pleiss, J., Fischer, M., and Schmid, R.D. 1998. Anatomy of lipase binding sites: the scissile fatty acid binding site. Chemistry and Physics of Lipids 93: 67-80.
- Royon, D., Daz, M., Ellenrieder, G., and Locatelli, S. 2007. Enzymatic production of biodiesel from cotton seed oil using *t*-butanol as a solvent. Bioresource Technology 98: 648-653.
- Shimada, Y., Watanabe, Y., Samukawa, T., Sugihara, A., Noda, H., Fukuda, H., and Tominaga, Y. 1999. Conversion of vegetable oil to biodiesel using immobilized *Candida antarctica* lipase. Journal of the American Oil Chemists' Society 76: 789-793.
- Srivastava, A. and Prasad, R. 2000. Triglycerides-based diesel fuels. Renewable and Sustainable Energy Reviews 4: 111-133.
- Su, E., and Wei, D. 2008. Improvement in lipase-catalyzed methanolysis of triacylglycerols for biodiesel production using a solvent engineering method. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic 55: 118-125.

- Suppes, G.J., Dasari, M.A., Daskocil, E.J., Mankidy, P.J., and Goff, M.J. 2004. Transesterification of soybean oil with zeolite and metal catalysts. Applied Catalysis A: General 257: 213-223.
- Villeneuve, P., Muderhwa, J.M., Graille, J., and Haas, M.J. 2000. Review – Customizing lipases for biocatalysis: a survey of chemical, physical and molecular biological approaches. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic 9: 113-148.
- Wang, L., Du, W., Liu, D, Li, L., and Dai, N. 2006. Lipase-catalyzed biodiesel production from soybean oil deodorizer distillate with absorbent present in *tert*-butanol system. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic 43: 29-32.
- Watanabe, Y., Shimada, Y., Sugihara, A., Noda, H., Fukuda, H., and Tominaga, Y. 2000. Continuous production of biodiesel fuel from vegetable oil using immobilized *Candida antarctica* lipase. Journal of the American Oil Chemists' Society 77: 355-360.
- Watanabe, Y., Miyawaki, Y., Adachi, S., Nakanishi, K., and Matsuno, R. 2001. Continuous production of acyl mannoses by immobilized lipase using a packed-bed reactor and their surfactant properties. Biochemical Engineering Journal 8: 213-216.
- Watanabe, Y., Shimada, Y., Sugihara, A., and Tominaga, Y. 2001. Enzymatic conversion of waste edible oil to biodiesel fuel in a fixed-bed bioreactor. Journal of the American Oil Chemists' Society 78: 703-707.
- Watanabe, Y., Shimada, Y., Sugihara, A., and Tominaga, Y. 2002. Conversion of degummed soybean oil to biodiesel fuel with immobilized *Candida antarctica* lipase. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic 17: 151-155.

- Winayanuwattikun, P., Kaewpiboon, C., Piriayakananon, K., Tantong, S., Thakernkarnkit, W., Chulalaksananukul, W., and Yongvanich, T. 2008. Potential plant oil feedstock for lipase-catalyzed biodiesel production in Thailand. Biomass and Bioenergy 32: 1279-1286
- Zhang, Y., Dubé, M.A., McLean, D.D., and Kates, M. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. Bioresource Technology 89: 1-16.

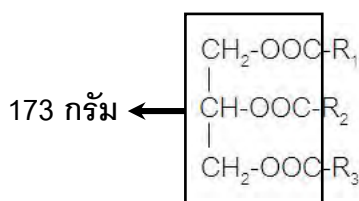
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

1. การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

คำนวณน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จากน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ดังสมการข้างล่าง



$$\text{น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์} = 173 + 3\left(\frac{B}{100} \times A\right)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันแต่ละชนิด - 45

B คือ เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันแต่ละชนิด

ตัวอย่างที่ 1

แทนค่าเปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันแต่ละชนิดในน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ จากตารางที่ ก-1 ตามสมการ

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์} &= 173 + 3 \left[\left(\frac{0.59}{100} \times 155.29 \right) + \left(\frac{0.96}{100} \times 183.35 \right) + \right. \\
 &\quad \left(\frac{38.67}{100} \times 211.40 \right) + \left(\frac{0.11}{100} \times 209.38 \right) + \\
 &\quad \left(\frac{3.32}{100} \times 239.17 \right) + \left(\frac{45.45}{100} \times 237.43 \right) + \\
 &\quad \left(\frac{10.87}{100} \times 235.42 \right) + \left(\frac{0.20}{100} \times 233.40 \right) + \\
 &\quad \left. \left(\frac{0.23}{100} \times 267.19 \right) + \left(\frac{0.02}{100} \times 295.21 \right) \right] \\
 &= 854.72
 \end{aligned}$$

ดังนั้น น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ = 854.72 กรัม

ตารางที่ ก-1 องค์ประกอบของกรดไขมัน ค่าการเกิดสบู่ (Saponification Number, SN) ค่าไอโอดีน (Iodine Value, IV) และค่าซีเทน (Cetane Number, CN) ของไบโอดีเซล (FAME) จากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Winayanuwattikun และคณะ, 2008)

ชื่อสามัญ	ชื่อวิทยาศาสตร์	SN	IV	CN	องค์ประกอบของกรดไขมันอิสระ (%)
ปาล์ม (palm)	<i>Elaeis guineensis</i>	207	60.07	59.11	12:0(0.59), 14:0(0.96), 16:0(38.67), 16:1(0.11), 18:0(3.32), 18:1(45.45), 18:2(10.87), 18:3(0.20), 20:0(0.23), 22:0(0.02)

2. การคำนวณปริมาตรของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

$$\text{หาปริมาตรของน้ำมันปาล์ม จากสูตร} \quad D = \frac{M}{V}$$

เมื่อ D คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำมันปาล์ม (0.89 กรัมต่อมิลลิลิตร)

M คือ มวลน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม

V คือ ปริมาตรของน้ำมันปาล์ม

ตัวอย่างที่ 2.1

กำหนดปริมาตรของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ เท่ากับ 200 มิลลิลิตร

$$\text{ดังนั้น} \quad M = 0.89 \times 200 = 178$$

น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ปริมาตร 200 มิลลิลิตรหนัก 178 กรัม

3. การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอล

$$\text{หาน้ำหนักของเมทานอล จากสูตร} \quad Y = \frac{(A)(B)(MW_{\text{MeOH}})}{MW_{\text{RPO}}}$$

เมื่อ Y คือ น้ำหนักของเมทานอล

A คือ น้ำหนักของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จากการชั่ง

B คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล

MW_{RPO} คือ น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ เท่ากับ 854.72 กรัม

MW_{MeOH} คือ น้ำหนักโมเลกุลของเมทานอล เท่ากับ 32.04 กรัม

ตัวอย่างที่ 3.1

กำหนดอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอล เท่ากับ 1:3 จากนั้น ชั่งน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ซึ่งหนัก 178 กรัม

จะได้
$$Y = \frac{(178)(3)(32.04)}{854.72} = 20.02$$

ดังนั้น น้ำหนักของเมทานอล เท่ากับ 20.02 กรัม

หาปริมาตรของเมทานอล จากสูตร
$$D = \frac{M}{V}$$

เมื่อ D คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำมันปาล์ม (0.791 กรัมต่อมิลลิลิตร)

M คือ มวลน้ำหนักของเมทานอล

V คือ ปริมาตรของเมทานอล

ตัวอย่างที่ 3.2

จากตัวอย่าง 2.1 น้ำหนักของเมทานอล เท่ากับ 20.02 กรัม

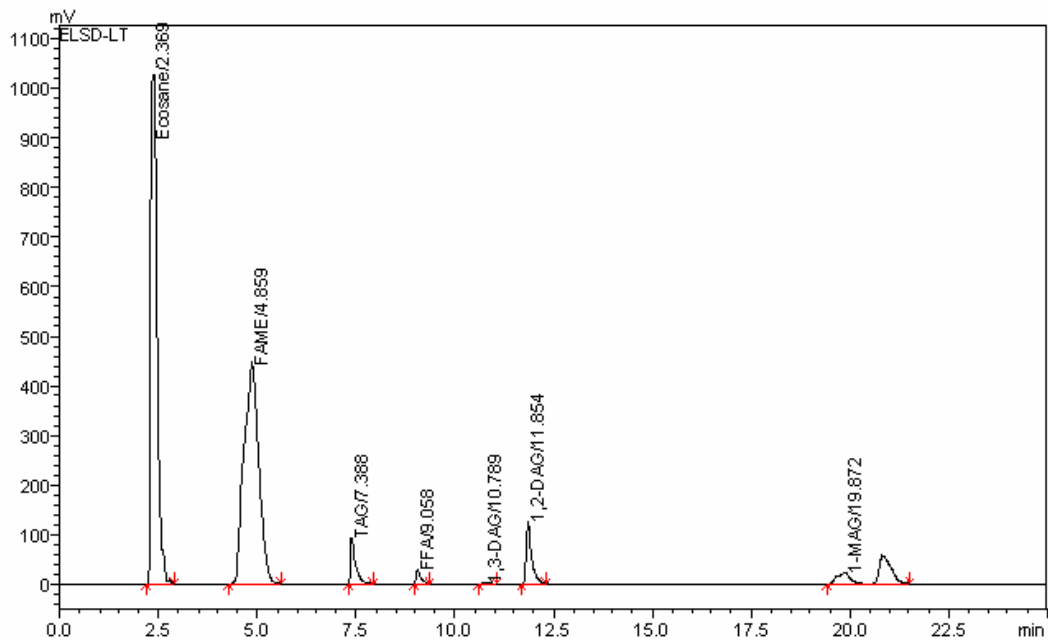
ดังนั้น
$$V = \frac{(20.02)}{0.791} = 25.31$$

ดังนั้น ปริมาตรของเมทานอล เท่ากับ 25.31 มิลลิลิตร

4. การคำนวณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์

ตัวอย่าง 4.1

จากการทดลองเรื่องการศึกษาความเสถียรของโนโวไซม์ 435 ในระยะยาว ของระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ



รูปที่ ก-1 โครมาโทแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอล ในระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ซึ่งใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยควบคุมภาวะการผลิตดังนี้ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่ออนาที อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1 และอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลจากโครมาโทแกรมในรูปที่ ก-1

พีค ลำดับที่	ชื่อสาร	รีเทนชัน ไทม์ (นาที)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)
1	Ecosane	2.369	-
2	FAME	4.859	21.7942
3	TAG	7.388	0.4437
4	FFA	9.058	0.0000
5	1,3 DAG	10.789	0.0000
6	1,2 DAG	11.854	0.5997
7	MAG	19.872	0.7919

แทนค่าจากตารางที่ ก-2 ในสมการต่อไปนี้

$$\% \text{ Conversion} = \frac{[\text{FAME}] \times 100}{3[\text{TAG}] + 2[1, 3 \text{ DAG}] + 2[1, 2 \text{ DAG}] + [\text{MAG}] + [\text{FFA}] + [\text{FAME}]}$$

- เมื่อ % Conversion คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์
- [FAME] คือ ความเข้มข้นของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (มิลลิโมลาร์)
- [TAG] คือ ความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ (มิลลิโมลาร์)
- [1, 3 DAG] คือ ความเข้มข้นของ 1, 3 ไดกลีเซอไรด์ (มิลลิโมลาร์)
- [1, 2 DAG] คือ ความเข้มข้นของ 1, 2 ไดกลีเซอไรด์ (มิลลิโมลาร์)
- [MAG] คือ ความเข้มข้นของโมโนกลีเซอไรด์ (มิลลิโมลาร์)
- [FFA] คือ ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระ (มิลลิโมลาร์)

$$\begin{aligned} \text{ได้ } \% \text{ Conversion} &= \frac{21.7942 \times 100}{3(0.4437) + 2(0) + 2(0) + 0.7919 + 0 + 21.7942} \\ &= 86.77 \end{aligned}$$

ดังนั้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ คือ 86.77 เปอร์เซ็นต์

5. การคำนวณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของไตรกลีเซอไรด์ 1, 3 ไคกลีเซอไรด์ 1, 2 ไคกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระ คำนวณได้จากสมการ

$$\% \text{ Conversion} = \frac{3[\text{TAG}] \text{ หรือ } 2[1, 3 \text{ DAG}] \text{ หรือ } 2[1, 2 \text{ DAG}] \text{ หรือ } [\text{MAG}] \text{ หรือ } [\text{FFA}] \times 100}{3[\text{TAG}] + 2[1, 3 \text{ DAG}] + 2[1, 2 \text{ DAG}] + [\text{MAG}] + [\text{FFA}] + [\text{FAME}]}$$

เมื่อ	% Conversion	คือ	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง
	[FAME]	คือ	ความเข้มข้นของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (มิลลิโมลาร์)
	[TAG]	คือ	ความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ (มิลลิโมลาร์)
	[1, 3 DAG]	คือ	ความเข้มข้นของ 1, 3 ไคกลีเซอไรด์ (มิลลิโมลาร์)
	[1, 2 DAG]	คือ	ความเข้มข้นของ 1, 2 ไคกลีเซอไรด์ (มิลลิโมลาร์)
	[MAG]	คือ	ความเข้มข้นของโมโนกลีเซอไรด์ (มิลลิโมลาร์)
	[FFA]	คือ	ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระ (มิลลิโมลาร์)

ตัวอย่าง 5.1 จากข้อมูลในตารางที่ ก-2 แทนค่าหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของไตรกลีเซอไรด์ได้จากสมการข้างต้น

$$\begin{aligned} \text{ได้ } \% \text{ Conversion} &= \frac{0.4437 \times 100}{3(0.4437) + 2(0) + 2(0) + 0.7919 + 0 + 21.7942} \\ &= 5.30 \end{aligned}$$

ดังนั้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของไตรกลีเซอไรด์ คือ 5.30 เปอร์เซ็นต์

6. การคำนวณอัตราการผลิต

$$\text{คำนวณได้จากสูตร} \quad P = \left(\frac{\text{FAME}_{\text{ave}} \times D}{10^3} \right) \left(\frac{\text{FR} \times 60}{E} \right)$$

$$D = \left(\frac{500 \times (V_{\text{oil}} + V_{\text{t-butanol}})}{V_{\text{oil}} \times 10} \right)$$

- เมื่อ P คือ อัตราการผลิต (มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง)
- FAME_{ave} คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (มิลลิโมลาร์)
- D คือ Dilution factor จากการวิเคราะห์ด้วย HPLC
- FR คือ อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)
- E คือ ปริมาณไนโวไซม์ 435 (กรัม)
- V_{oil} คือ ปริมาณน้ำมันพืชที่ใช้ทดลอง
- $V_{\text{t-butanol}}$ คือ ปริมาณเทอร์เชียรีบิวทานอลที่ใช้ทดลอง

ตัวอย่าง 6.1 จากการทดลองเรื่องการศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรที่เหมาะสมของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ โดยศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1:1 และควบคุมภาวะการผลิตดังนี้ อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นที่ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 3:1 ได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ ก-3

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลจากการทดลองเรื่องการศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรที่เหมาะสมของ เทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

เวลา (ชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)
4.0000	82.76	16.6654
8.0000	77.39	18.2449
12.0000	83.54	17.6205
16.0000	76.93	18.5781
20.0000	80.52	16.6131
24.0000	82.88	19.2131
ค่าเฉลี่ย	80.67	17.8225

ดังนั้น

$$P = \frac{(17.8225)(500)(0.20)(60)}{(10^3)(5)(3)}$$

= 7.13 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง

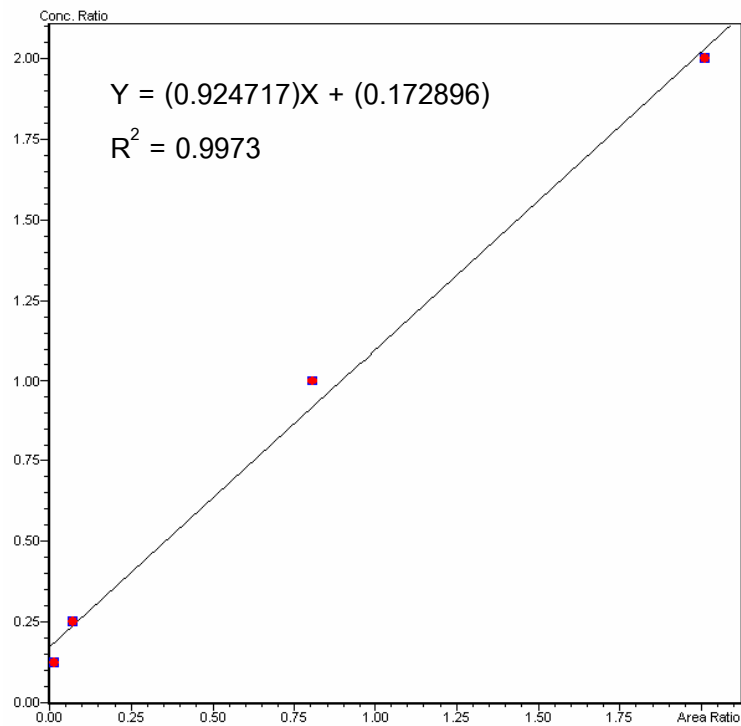
ภาคผนวก ข

HPLC

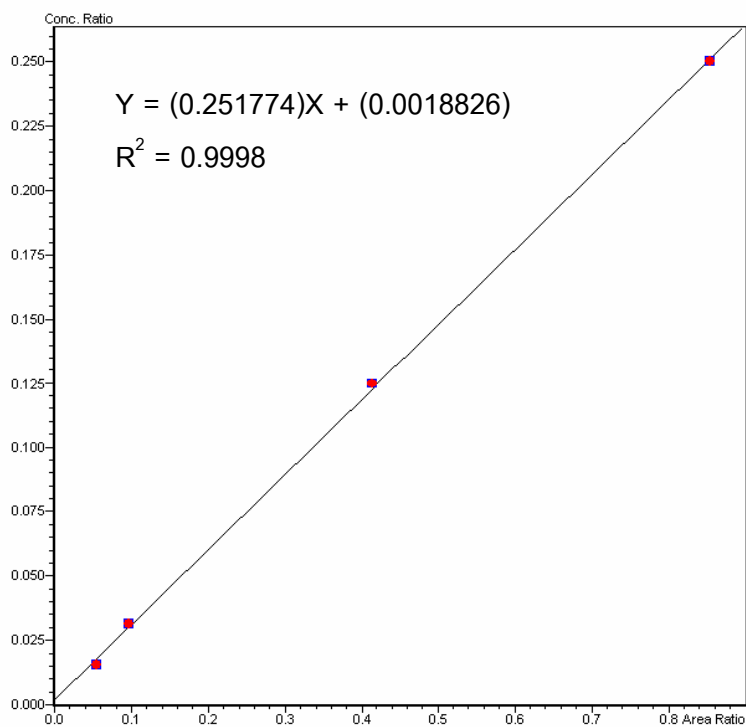
เตรียมสารละลายมาตรฐานของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (เมทิลปาล์มมิเตต เมทิลลิโนลิเกต เมทิลสเตียเรต และเมทิลโอลิเกต) ไตรกลีเซอไรด์ (ไตรโอเลอิน) 1, 3 ไดกลีเซอไรด์ (1, 3 ไดโอเลอิน) 1, 2 ไดกลีเซอไรด์ (1, 2 ไดโอเลอิน) โมโนกลีเซอไรด์ (โมโนโอเลอิน) และกรดไขมันอิสระ (กรดปาล์มมิติก กรดลิโนเลอิก กรดสเทียริก และกรดโอเลอิก) ดังในตารางที่ ข-1 โดยใช้อีโคเซนเป็นสารละลายมาตรฐานภายใน ใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย กราฟมาตรฐานแสดงในรูปที่ ข-1 – ข-6 และโครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานแสดงในรูปที่ ข-7

ตารางที่ ข-1 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทั้งหมด

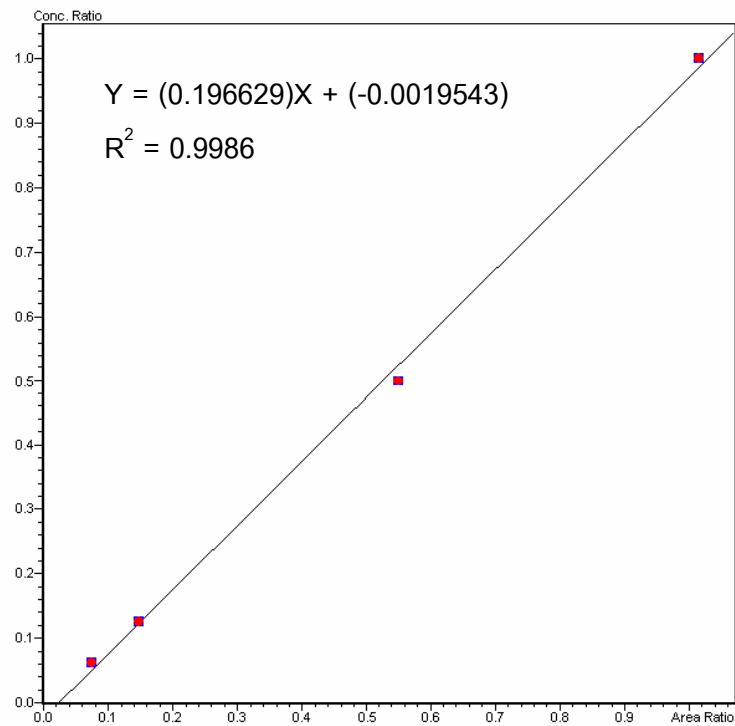
สารละลายมาตรฐาน	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)				
	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าที่ 4	ค่าที่ 5
อีโคเซน	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	2.5000	5.0000	10.0000	20.0000	40.0000
ไตรกลีเซอไรด์	0.3125	0.6250	1.2500	2.5000	5.0000
กรดไขมันอิสระ	1.2500	2.5000	5.0000	10.0000	20.0000
1, 3 ไดกลีเซอไรด์	0.3125	0.6250	1.2500	2.5000	5.0000
1, 2 ไดกลีเซอไรด์	0.3125	0.6250	1.2500	2.5000	5.0000
โมโนกลีเซอไรด์	0.6250	1.2500	2.5000	5.0000	10.0000



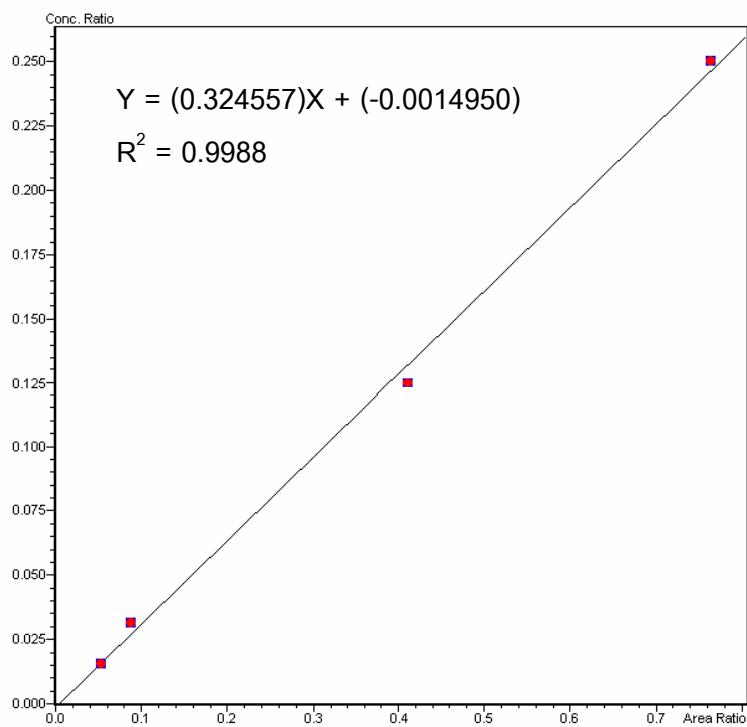
รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานของเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน



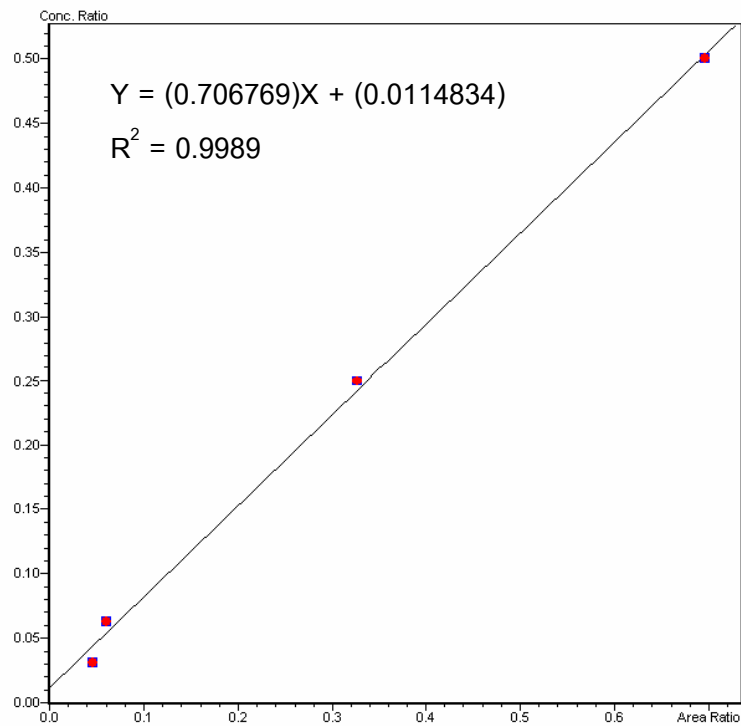
รูปที่ ข-2 กราฟมาตรฐานของไตรกลีเซอไรด์



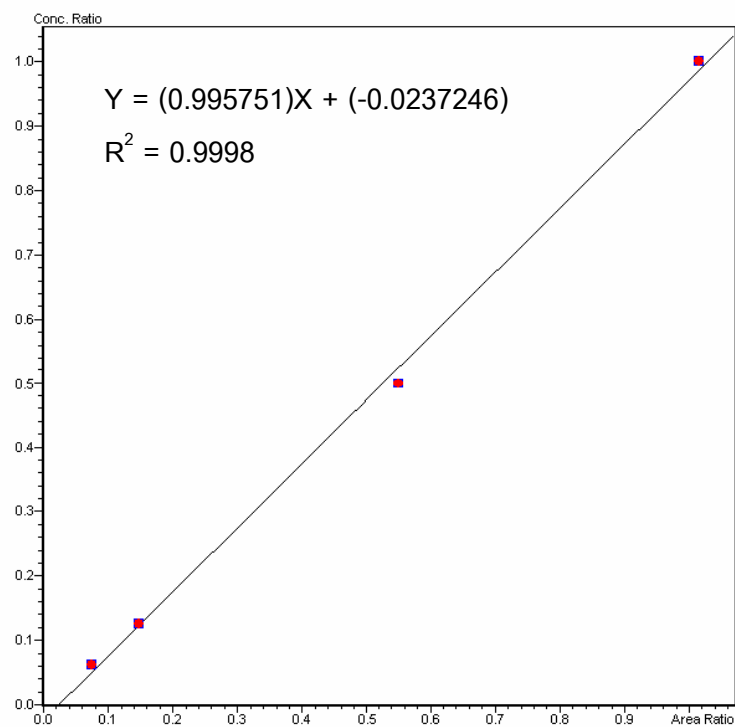
รูปที่ ข-3 กราฟมาตรฐานของ 1, 3 ไดออกซีเซอไรด์



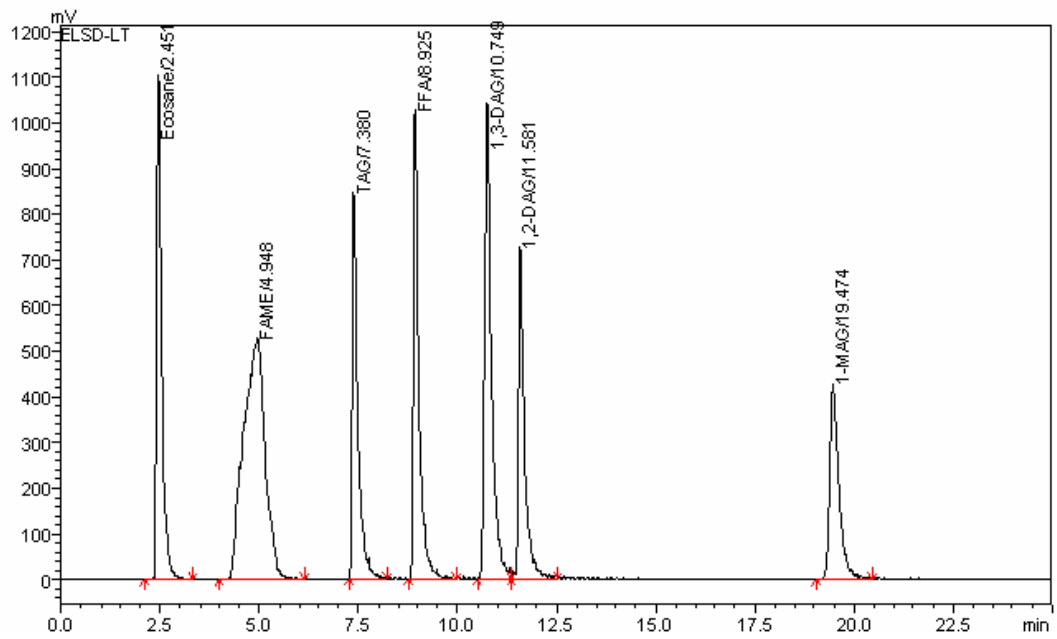
รูปที่ ข-4 กราฟมาตรฐานของ 1, 2 ไดออกซีเซอไรด์



รูปที่ ข-5 กราฟมาตรฐานของโมโนคลอรีเอท



รูปที่ ข-6 กราฟมาตรฐานของกรดไชนันอิสระ



รูปที่ ข-7 โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐาน

ภาคผนวก ค

ข้อมูล

ตารางที่ ค-1 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1.4:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	18.83474	0.39621	0.09231	0.90733	0.90733	1.53266	74.59
0.3333	17.37039	0.26269	0.07056	0.75109	1.64245	0.67462	78.53
0.5000	17.02556	0.26860	0.06799	0.76418	1.54169	0.54796	78.88
0.6667	16.07818	0.27368	0.05785	0.74138	1.60431	0.52870	77.93
0.8333	16.00493	0.28946	0.05224	0.75065	1.56769	0.47358	78.00
1.0000	16.88845	0.33934	0.05762	0.86548	1.70521	0.57371	76.66
1.5000	16.65047	0.34907	0.04194	0.76270	1.49730	0.60629	77.77
2.0000	15.54024	0.34015	0.05097	0.82727	1.50685	0.55716	76.25
2.5000	15.47159	0.32941	0.03921	0.78464	1.46532	0.48130	77.15
3.0000	14.98766	0.34846	0.04483	0.77930	1.47600	0.49302	76.27
4.0000	12.71771	0.18718	0.05151	0.83592	1.57298	0.60211	73.81
8.0000	12.88817	0.19786	0.04205	0.90896	1.57471	0.68826	73.03
12.0000	12.09287	0.19942	0.03559	0.83385	1.48113	0.59735	73.25
16.0000	12.14673	0.2155	0.03367	0.77401	1.42906	0.67403	73.56
20.0000	12.37068	0.14008	0.04556	0.76396	1.49639	0.74279	74.30
24.0000	13.87739	0.18908	0.02606	0.74576	1.61165	1.87964	71.24

ตารางที่ ค-2 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1.2:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	15.09897	0.15509	0.09687	0.54973	1.70879	0.42880	79.49
0.3333	17.83085	0.11912	0.11976	0.59717	2.30038	0.41795	79.81
0.5000	15.14631	0.10693	0.10478	0.58796	2.04593	0.35849	78.65
0.6667	16.62081	0.14816	0.08872	0.60881	2.10862	0.40478	79.25
0.8333	15.29716	0.15434	0.09554	0.60832	1.94197	0.26392	78.96
1.0000	15.59381	0.15583	0.08850	0.54672	1.97696	0.41476	79.06
1.5000	14.64115	0.16745	0.06795	0.50835	1.72987	0.19404	80.36
2.0000	14.53601	0.19427	0.07469	0.62186	1.81718	0.35406	77.80
2.5000	17.67746	0.24474	0.11742	0.74511	2.21250	0.68744	76.74
3.0000	16.42405	0.23946	0.10547	0.67123	2.21778	0.61058	76.31
4.0000	16.82873	0.25711	0.10764	0.65860	2.08433	0.51062	77.45
8.0000	15.16788	0.23510	0.08495	0.70076	1.87783	0.58108	76.21
12.0000	15.42325	0.28067	0.09196	0.73283	1.99441	0.73455	74.71
16.0000	14.59481	0.27422	0.07408	0.77549	1.94243	0.84002	73.34
20.0000	15.60328	0.26644	0.09049	0.67200	2.12011	1.05273	73.95
24.0000	15.62683	0.26412	0.10133	0.72956	2.06574	1.11160	73.51

ตารางที่ ค-3 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 1.0:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	26.56883	0.27112	4.66486	0.96199	0.44718	4.45495	67.57
0.3333	19.14247	0.11853	0.35302	0.31685	3.80446	3.31618	68.47
0.5000	16.11998	0.09061	0.20856	0.19306	3.45374	3.15212	67.73
0.6667	15.92674	0.08777	0.21920	0.19719	2.83290	2.04284	72.73
0.8333	14.82417	0.10131	0.25059	0.22392	2.83019	0.72973	75.49
1.0000	17.57122	0.11089	0.30682	0.26432	3.28469	0.44301	77.16
1.5000	15.73855	0.11694	0.26846	0.25192	2.74697	0.20851	78.36
2.0000	16.84294	0.11917	0.26082	0.25523	2.78283	0.18604	79.44
2.5000	16.87170	0.11202	0.22278	0.22919	2.31906	0.10955	82.14
3.0000	16.70156	0.10060	0.22418	0.22886	2.16708	0.08677	82.83
4.0000	16.66543	0.11033	0.18283	0.18141	2.33158	0.07961	82.76
8.0000	18.24493	0.14064	0.29958	0.38852	3.01804	0.51448	77.39
12.0000	17.62054	0.10842	0.19030	0.17541	2.29648	0.11741	83.54
16.0000	18.57812	0.15294	0.31043	0.42986	3.09544	0.53710	76.93
20.0000	16.61312	0.09946	0.21993	0.30081	2.51303	0.16693	80.52
24.0000	19.21311	0.10054	0.20694	0.28123	2.39573	0.29368	82.88

ตารางที่ ค-4 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 0.8:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	17.27846	0.23760	0.17691	0.55466	2.31234	6.15421	61.88
0.3333	16.97071	0.16854	0.15116	0.43505	2.17984	3.92901	68.55
0.5000	14.29596	0.12555	0.14816	0.33280	2.19176	1.29638	74.76
0.6667	18.81556	0.20602	0.15097	0.46377	2.73056	1.03301	77.03
0.8333	17.75111	0.21666	0.11931	0.47028	2.19653	0.79254	78.65
1.0000	18.79332	0.23558	0.14286	0.52689	2.35487	0.90286	77.99
1.5000	17.79234	0.18657	0.13797	0.49088	2.52287	0.82742	77.49
2.0000	16.98543	0.16707	0.13135	0.41185	2.71615	0.54249	77.80
2.5000	17.30442	0.13934	0.15103	0.41366	2.25894	0.72810	79.24
3.0000	16.98339	0.14547	0.13989	0.36588	2.30069	0.59894	79.62
4.0000	19.15892	0.15858	0.17560	0.42082	2.64875	0.82292	78.85
8.0000	18.29894	0.13493	0.17696	0.40099	2.54194	0.90417	78.52
12.0000	17.84128	0.13888	0.14953	0.34531	2.46197	0.83979	79.12
16.0000	18.31947	0.14198	0.16445	0.39853	2.47587	1.14541	77.98
20.0000	16.08158	0.12622	0.15961	0.38633	2.35199	1.38795	75.53
24.0000	18.01602	0.18543	0.15419	0.47547	2.37307	1.94022	74.62

ตารางที่ ค-5 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 0.6:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	13.57040	0.26782	0.44863	0.52971	2.01070	2.9678	63.68
0.3333	18.73525	0.13531	0.33832	0.41557	2.33752	1.30377	77.13
0.5000	23.04992	0.14325	0.29125	0.39199	2.99858	1.00920	79.88
0.6667	26.55325	0.15087	0.27741	0.42830	3.38836	0.91661	81.15
0.8333	27.18761	0.16479	0.21464	0.39902	2.60089	0.88711	83.92
1.0000	27.95167	0.16544	0.24824	0.40008	2.95109	0.97283	83.02
1.5000	29.46898	0.16960	0.19151	0.38562	2.68221	0.82568	85.07
2.0000	19.51329	0.15727	0.20274	0.41015	2.80544	0.58737	79.31
2.5000	25.35845	0.16286	0.31189	0.54219	3.73853	0.92311	78.71
3.0000	19.48358	0.13541	0.18325	0.37209	2.44181	0.55342	81.20
4.0000	19.94457	0.13366	0.21910	0.42230	3.14823	0.56992	78.69
8.0000	20.15587	0.16465	0.22095	0.43723	2.81658	0.83374	78.68
12.0000	19.42553	0.12899	0.18660	0.46692	2.65481	0.91913	78.67
16.0000	17.83372	0.14998	0.20477	0.40511	2.58052	0.85792	77.73
20.0000	21.30566	0.18467	0.30916	0.47373	3.20534	1.42485	75.94
24.0000	19.47039	0.17948	0.27719	0.51233	2.75270	1.9568	74.04

ตารางที่ ค-6 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 0.4:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	20.68474	0.49691	0.26013	1.11690	2.29596	1.82101	71.21
0.3333	24.14461	0.61994	0.19384	1.25169	3.07711	0.88512	73.48
0.5000	23.81818	0.70244	0.15136	1.05367	2.97594	0.48964	74.90
0.6667	23.06459	0.78513	0.12087	0.98529	3.04365	0.37394	74.28
0.8333	20.02030	0.70043	0.10236	0.88491	2.56585	0.23963	74.42
1.0000	24.08592	0.84294	0.12947	1.16359	3.07589	0.38090	73.75
1.5000	25.06468	0.82168	0.12816	1.16322	2.92152	0.31243	75.16
2.0000	19.41220	0.74290	0.10614	0.83852	2.52630	0.17710	74.00
2.5000	22.30015	0.64722	0.12109	1.02885	2.88283	0.37699	74.83
3.0000	20.81647	0.68089	0.11431	0.97949	2.85360	0.46628	73.38
4.0000	20.03944	0.69173	0.11698	0.97223	2.67121	0.41632	73.19
8.0000	20.92632	0.67079	0.12864	1.00837	2.80099	0.38390	73.69
12.0000	22.67845	0.84125	0.14319	1.28601	3.16959	0.70155	71.02
16.0000	21.18471	0.91402	0.14533	1.08273	2.94325	0.72533	70.49
20.0000	19.47805	0.80410	0.14051	1.14907	2.80194	0.84923	69.27
24.0000	21.17228	0.86939	0.19197	1.35551	3.15923	1.12823	67.94

ตารางที่ ค-7 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 0.2:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	24.08935	1.54237	0.7717	1.89360	2.04573	0.98857	64.96
0.3333	23.68115	1.25442	0.47973	1.43155	2.08096	0.56128	69.84
0.5000	26.07760	1.15199	0.36144	1.30265	1.59818	0.51353	74.56
0.6667	29.27324	1.51175	0.32976	1.55150	1.96432	0.53598	73.05
0.8333	25.18134	1.14284	0.29068	1.31324	1.73203	0.30851	74.37
1.0000	25.25837	1.40658	0.25790	1.27702	1.78563	0.32808	72.87
1.5000	26.33614	1.77413	0.21152	1.26396	1.64781	0.26594	72.11
2.0000	25.46066	1.88518	0.19889	1.48539	1.61652	0.32368	69.90
2.5000	25.24941	1.58145	0.16162	1.35295	1.61208	0.40803	72.05
3.0000	22.14045	1.54718	0.11809	1.29479	1.52147	0.19828	70.67
4.0000	21.32984	2.10218	0.10147	1.33146	1.60413	0.12196	66.18
8.0000	22.22933	2.70073	0.08480	1.50358	1.29460	0.15038	63.60
12.0000	24.22768	2.99087	0.09507	1.54194	1.66685	0.28792	63.05
16.0000	22.18189	2.78344	0.0859	1.43541	1.59296	0.31306	62.52
20.0000	20.32601	2.94124	0.06363	1.38623	1.26666	0.24866	60.56
24.0000	20.65804	3.11355	0.09345	1.42662	1.45983	0.35193	59.28

ตารางที่ ค-8 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยปริมาตรของเทอร์เชียรีบิวทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 0:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	13.83003	12.81870	1.30825	1.52240	0.61437	9.13745	20.43
0.3333	14.48527	10.98692	1.08322	1.42429	0.47523	4.75125	25.11
0.5000	14.87851	10.10716	0.87721	1.18715	0.37747	2.45022	28.53
0.6667	14.91708	9.93475	0.73920	1.04404	0.37118	1.24096	29.89
0.8333	20.31184	11.26645	0.82203	1.16399	0.39251	0.86771	34.23
1.0000	21.97850	10.64700	0.77679	1.16757	0.41572	0.52624	37.41
1.5000	23.39367	11.07918	0.44828	0.90104	0.44773	0.12444	39.05
2.0000	19.20914	10.96556	0.19555	0.98003	0.34089	0.00000	35.05
2.5000	11.75200	11.12383	0.28408	0.81153	0.30634	0.00000	24.68
3.0000	9.01766	11.74290	0.31144	0.82477	0.27775	0.00000	19.27
4.0000	3.92181	11.78628	0.39035	0.61941	0.24002	0.00000	9.44
8.0000	0.00000	12.49511	0.59904	0.56875	0.00000	0.00000	0.00
12.0000	0.00000	11.17754	0.42789	0.38362	0.00000	0.00000	0.00
16.0000	0.00000	12.27777	0.55924	0.54483	0.00000	0.00000	0.00
20.0000	0.00000	11.54422	0.47349	0.39792	0.00000	0.00000	0.00
24.0000	0.00000	11.51504	0.46815	0.37734	0.00000	0.00000	0.00

ตารางที่ ค-9 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่
(อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 3:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	17.89094	0.16198	0.18595	0.59402	2.57434	7.48398	59.65
0.3333	18.88674	0.12099	0.16772	0.53221	2.64673	3.26972	71.09
0.5000	20.18383	0.11019	0.17163	0.54446	3.06787	1.79198	75.29
0.6667	21.97126	0.11613	0.19825	0.60015	2.70195	1.47654	78.20
0.8333	20.19897	0.10298	0.17958	0.54248	2.80351	1.15659	77.95
1.0000	19.69234	0.10771	0.18657	0.54479	2.80817	1.12613	77.49
1.5000	25.50606	0.14460	0.22597	0.60614	3.58532	1.39070	78.29
2.0000	20.69496	0.10451	0.19456	0.49501	2.78365	0.92516	79.30
2.5000	21.69845	0.11932	0.20503	0.47699	2.92041	1.08740	79.11
3.0000	21.69391	0.11174	0.18670	0.48001	2.87637	1.04627	79.51
4.0000	20.72177	0.11823	0.21150	0.45839	2.69312	0.97273	79.45
8.0000	21.90090	0.10667	0.20603	0.43602	2.85692	1.08234	79.80
12.0000	21.27689	0.13034	0.21074	0.41894	3.00896	1.13013	78.61
16.0000	20.34256	0.11926	0.19178	0.35426	2.93967	1.06306	78.86
20.0000	20.73884	0.12376	0.20972	0.35727	3.01912	1.19894	78.37
24.0000	19.62460	0.11879	0.19615	0.37917	2.90872	1.16043	77.87

ตารางที่ ค-10 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่
(อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 4:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	7.68494	0.14656	0.15039	0.18939	1.14133	3.56364	56.89
0.3333	15.56638	0.07283	0.05605	0.07745	1.53246	1.12676	83.19
0.5000	19.99563	0.06636	0.03607	0.07048	1.83746	0.54544	87.74
0.6667	20.10715	0.05819	0.03118	0.05351	1.91974	0.33215	88.57
0.8333	21.93841	0.06142	0.03249	0.07386	2.06369	0.34578	88.66
1.0000	19.45076	0.06415	0.02339	0.07468	1.90900	0.28142	88.29
1.5000	21.59608	0.08132	0.03011	0.09320	1.97027	0.28640	88.71
2.0000	20.35080	0.09077	0.03026	0.11054	1.84006	0.24913	88.51
2.5000	21.56556	0.09849	0.03304	0.11258	2.01603	0.31155	88.10
3.0000	19.90470	0.08801	0.01808	0.08309	1.80397	0.28550	88.62
4.0000	19.39239	0.08978	0.02636	0.07206	1.81562	0.32809	88.14
8.0000	22.07893	0.08395	0.03621	0.10490	1.90994	0.29042	88.98
12.0000	21.95410	0.08381	0.02936	0.09505	1.91494	0.37699	88.72
16.0000	22.55157	0.10218	0.03128	0.13467	2.09172	0.44043	87.67
20.0000	18.55927	0.08363	0.01016	0.07570	1.64628	0.29239	88.71
24.0000	21.43173	0.08823	0.0259	0.10372	1.90624	0.31882	88.63

ตารางที่ ค-11 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่
(อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 5:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	11.37562	0.31561	0.29039	0.37081	1.20566	0.63803	73.45
0.3333	22.71446	0.06681	0.02141	0.07524	1.50296	0.27442	91.28
0.5000	24.91872	0.06031	0.00000	0.05277	1.64841	0.35974	91.57
0.6667	25.51868	0.05784	0.00000	0.04954	1.69865	0.27349	91.91
0.8333	25.74173	0.06266	0.00000	0.04697	1.67225	0.26461	92.06
1.0000	27.70008	0.06554	0.00000	0.05696	1.82884	0.40383	91.59
1.5000	25.43566	0.06456	0.00000	0.04683	1.63829	0.21630	92.23
2.0000	24.15306	0.06824	0.00000	0.06034	1.67715	0.16816	91.75
2.5000	25.54225	0.08216	0.00000	0.07708	1.79579	0.18907	91.46
3.0000	24.79458	0.08595	0.00000	0.07477	1.64964	0.20511	91.64
4.0000	25.64258	0.08589	0.00000	0.08304	1.75608	0.29559	91.20
8.0000	24.65059	0.08080	0.00000	0.07089	1.5619	0.17252	92.09
12.0000	24.96803	0.07413	0.00000	0.06369	1.61252	0.19469	92.05
16.0000	28.82314	0.08573	0.00000	0.06881	1.91770	0.39062	91.43
20.0000	23.86136	0.06965	0.00000	0.06249	1.53722	0.20169	92.01
24.0000	28.52183	0.07256	0.00000	0.06033	1.81067	0.32017	92.03

ตารางที่ ค-12 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่
(อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 6:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	6.44967	0.21936	0.15927	0.21457	0.87524	1.14890	65.28
0.3333	19.90939	0.06246	0.02820	0.05267	1.27963	0.40938	90.71
0.5000	27.10506	0.05396	0.00000	0.00706	1.22528	0.47759	93.52
0.6667	26.68414	0.04730	0.00000	0.00000	1.25133	0.24318	94.22
0.8333	25.47078	0.04776	0.00000	0.00793	1.30728	0.13683	94.08
1.0000	26.52734	0.04599	0.00000	0.00758	1.25203	0.14742	94.47
1.5000	27.26860	0.04822	0.00000	0.00532	1.36086	0.27374	93.84
2.0000	29.16232	0.04859	0.00000	0.00944	1.39755	0.27875	94.06
2.5000	26.54789	0.05635	0.00000	0.00917	1.30355	0.21555	93.96
3.0000	27.39924	0.05083	0.00000	0.01741	1.27323	0.20492	94.27
4.0000	26.04033	0.05235	0.00000	0.01639	1.29861	0.17954	93.98
8.0000	27.75134	0.05410	0.00000	0.02637	1.32458	0.16323	94.22
12.0000	30.20532	0.05406	0.00000	0.03041	1.38789	0.30372	94.04
16.0000	23.98046	0.05132	0.00000	0.01296	1.16448	0.08871	94.36
20.0000	25.29503	0.05132	0.00000	0.01819	1.19212	0.17069	94.22
24.0000	24.20719	0.04948	0.00000	0.01110	1.19227	0.13002	94.19

ตารางที่ ค-13 ข้อมูลจากการศึกษาข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน
 ปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 7:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	20.69022	0.04464	0.00000	0.02060	0.94555	2.09785	86.54
0.3333	26.13266	0.04166	0.00000	0.00201	0.92839	0.56767	94.15
0.5000	25.41047	0.04254	0.00000	0.00172	0.98962	0.27720	94.79
0.6667	24.75472	0.04260	0.00000	0.00000	0.95375	0.10005	95.44
0.8333	26.30374	0.04472	0.00000	0.00148	1.03717	0.12928	95.28
1.0000	25.59622	0.04400	0.00000	0.00000	0.97404	0.14379	95.34
1.5000	28.45934	0.04226	0.00000	0.00000	1.06152	0.16283	95.47
2.0000	25.63644	0.04539	0.00000	0.00375	1.01777	0.13413	95.19
2.5000	24.48578	0.04725	0.00000	0.02147	1.08506	0.10534	94.68
3.0000	26.41981	0.05099	0.00000	0.01916	0.99420	0.18784	95.06
4.0000	25.76370	0.05251	0.00000	0.02267	0.99888	0.17116	94.94
8.0000	25.26342	0.06219	0.00000	0.03772	0.90031	0.16980	94.99
12.0000	25.61968	0.06712	0.00000	0.03539	0.96215	0.12566	94.96
16.0000	23.43547	0.06017	0.00000	0.03424	0.93053	0.08245	94.89
20.0000	25.29503	0.05132	0.00000	0.01819	1.19212	0.17069	94.22
24.0000	24.12604	0.06637	0.00000	0.03136	1.00363	0.11106	94.60

ตารางที่ ค-14 ข้อมูลจากการศึกษาข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 8:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	9.06626	0.04322	0.00000	0.00436	0.64213	3.44325	68.22
0.3333	18.21686	0.04230	0.00000	0.00000	0.70528	0.84459	91.57
0.5000	22.65673	0.04363	0.00000	0.00000	0.81865	0.15597	95.35
0.6667	23.29330	0.04651	0.00000	0.00576	0.86813	0.00000	95.81
0.8333	24.38430	0.05187	0.00000	0.01945	0.91044	0.00000	95.67
1.0000	22.83884	0.05514	0.00000	0.02123	0.80109	0.00000	95.77
1.5000	23.95607	0.05805	0.00000	0.02772	0.85579	0.00000	95.67
2.0000	22.03051	0.05507	0.00000	0.02012	0.81106	0.00000	95.59
2.5000	24.53707	0.05323	0.00000	0.02498	0.85540	0.00000	95.84
3.0000	22.71430	0.05871	0.00000	0.02228	0.80261	0.00000	95.69
4.0000	23.04400	0.05575	0.00000	0.01727	0.80879	0.00000	95.80
8.0000	23.30100	0.05703	0.00000	0.01893	0.81441	0.00000	95.79
12.0000	25.09649	0.06262	0.00000	0.02532	0.93580	0.00000	95.53
16.0000	23.02344	0.05968	0.00000	0.02003	0.86471	0.00000	95.50
20.0000	23.07534	0.05123	0.00000	0.00598	0.77848	0.00000	96.07
24.0000	24.76498	0.05517	0.00000	0.02105	0.87237	0.00862	95.79

ตารางที่ ค-15 ข้อมูลจากการศึกษาข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน
ปาล์มบริสุทธิ์ (อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 9:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	8.49557	0.04656	0.00000	0.02589	0.59137	0.09286	90.66
0.3333	19.61587	0.04631	0.00000	0.01507	0.71166	0.00000	95.70
0.5000	21.07069	0.04322	0.00000	0.00752	0.65115	0.00000	96.36
0.6667	24.49104	0.04671	0.00000	0.01991	0.72265	0.00000	96.45
0.8333	22.07885	0.04843	0.00000	0.02021	0.64779	0.00000	96.36
1.0000	22.84627	0.05472	0.00000	0.02932	0.63650	0.00000	96.38
1.5000	23.67485	0.06773	0.00000	0.06251	0.72118	0.00000	95.76
2.0000	22.98745	0.06422	0.00000	0.05032	0.67026	0.00000	95.98
2.5000	21.90971	0.05715	0.00000	0.04226	0.60103	0.00000	96.24
3.0000	22.65617	0.06654	0.00000	0.05141	0.63337	0.00000	96.03
4.0000	23.21077	0.07412	0.00000	0.06526	0.65314	0.00000	95.85
8.0000	20.46699	0.05787	0.00000	0.03894	0.59443	0.00000	96.03
12.0000	23.93228	0.06189	0.00000	0.04748	0.69279	0.00000	96.09
16.0000	21.28809	0.06538	0.00000	0.03790	0.59891	0.00000	96.07
20.0000	23.60617	0.06701	0.00000	0.06308	0.70143	0.00000	95.82
24.0000	24.30364	0.06463	0.00000	0.05646	0.74330	0.00000	95.86

ตารางที่ ค-16 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่
(อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่ 12:1)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	5.73483	0.04061	0.00000	0.00000	0.32536	0.07351	91.68
0.3333	12.63989	0.06385	0.00000	0.07087	0.43767	0.00000	94.25
0.5000	21.51666	0.04038	0.00000	0.00000	0.44076	0.00000	97.45
0.6667	19.15180	0.04241	0.00000	0.00000	0.44670	0.00000	97.09
0.8333	22.18926	0.04041	0.00000	0.00000	0.47847	0.00000	97.37
1.0000	22.35554	0.04222	0.00000	0.00000	0.48305	0.00000	97.35
1.5000	21.77059	0.04125	0.00000	0.00146	0.47394	0.00000	97.32
2.0000	20.99298	0.04762	0.00000	0.02064	0.46234	0.00000	97.01
2.5000	21.39170	0.04901	0.00000	0.02752	0.46212	0.00000	96.99
3.0000	20.89834	0.05144	0.00000	0.02924	0.44366	0.00000	96.95
4.0000	20.95874	0.04915	0.00000	0.02736	0.42087	0.00000	97.11
8.0000	16.31371	0.04174	0.00000	0.00000	0.41401	0.00000	96.80
12.0000	19.70108	0.06073	0.00000	0.03958	0.42298	0.00000	96.64
16.0000	21.91106	0.06456	0.00000	0.05313	0.49401	0.00000	96.50
20.0000	19.28741	0.06003	0.00000	0.03530	0.40026	0.00000	96.74
24.0000	20.03006	0.06615	0.00000	0.05715	0.42387	0.00000	96.45

ตารางที่ ค-17 ข้อมูลจากการศึกษาคุณภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (คุณภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ และสารตั้งต้นที่ 40 องศาเซลเซียส)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	10.25746	0.07092	0.00000	0.23776	0.67209	4.74811	62.68
0.3333	18.30218	0.07063	0.00000	0.19578	0.84613	1.81765	84.85
0.5000	19.97672	0.07583	0.00000	0.16000	0.81322	0.24196	92.57
0.6667	24.13456	0.11212	0.00000	0.20777	0.94727	0.00000	93.42
0.8333	21.18381	0.11570	0.00000	0.21784	0.91671	0.00000	92.57
1.0000	25.04430	0.16927	0.00000	0.26251	1.14041	0.00000	92.02
1.5000	21.74855	0.14260	0.00000	0.23815	0.89465	0.00000	92.36
2.0000	20.57404	0.12860	0.00000	0.22325	0.85462	0.00000	92.42
2.5000	20.66100	0.13293	0.00000	0.21738	0.86695	0.00000	92.40
3.0000	21.14783	0.14241	0.00000	0.21963	0.87647	0.00000	92.39
4.0000	20.45978	0.12275	0.00000	0.22074	0.89561	0.00000	92.31
8.0000	19.86232	0.10943	0.00000	0.18220	0.85106	0.00000	92.79
12.0000	20.24638	0.09992	0.00000	0.16390	0.87309	0.00000	93.10
16.0000	20.16562	0.10742	0.00000	0.15549	0.89087	0.00000	92.97
20.0000	23.84955	0.11024	0.00000	0.21520	1.05814	0.00000	92.91
24.0000	20.45799	0.08556	0.00000	0.16161	0.95409	0.00000	93.02

ตารางที่ ค-18 ข้อมูลจากการศึกษาอนุกรมวิธานที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (อนุกรมวิธานของเครื่องปฏิกรณ์ และสารตั้งต้นที่ 50 องศาเซลเซียส)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	8.39495	0.05775	0.00000	0.12458	0.75283	5.35938	56.23
0.3333	17.11914	0.05929	0.00000	0.09692	1.06007	2.36288	81.86
0.5000	21.32382	0.05245	0.00000	0.08382	1.10257	0.55873	91.48
0.6667	23.43302	0.05175	0.00000	0.08004	1.24294	0.14564	93.22
0.8333	24.94091	0.05431	0.00000	0.08820	1.28851	0.01538	93.82
1.0000	23.90159	0.05289	0.00000	0.07613	1.27996	0.00000	93.76
1.5000	25.95333	0.06506	0.00000	0.11228	1.37170	0.02435	93.46
2.0000	23.26215	0.07312	0.00000	0.12383	1.19013	0.00000	93.35
2.5000	22.36293	0.08001	0.00000	0.14286	1.10392	0.00000	93.21
3.0000	21.01744	0.07841	0.00000	0.13192	1.16582	0.00000	92.66
4.0000	23.51632	0.07029	0.00000	0.12005	1.17549	0.00000	93.53
8.0000	21.88699	0.06572	0.00000	0.10838	1.13425	0.00000	93.39
12.0000	21.46096	0.07944	0.00000	0.12385	1.15817	0.00000	92.88
16.0000	21.33743	0.06939	0.00000	0.12575	1.14999	0.00000	92.99
20.0000	22.99893	0.07570	0.00000	0.10619	1.13625	0.00000	93.59
24.0000	22.49441	0.07510	0.00000	0.11804	1.25236	0.00000	92.92

ตารางที่ ค-19 ข้อมูลจากการศึกษาคุณสมบัติที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (คุณสมบัติของเครื่องปฏิกรณ์ และสารตั้งต้นที่ 60 องศาเซลเซียส)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	8.88283	0.06587	0.04841	0.08188	0.96219	2.35091	70.20
0.3333	22.73282	0.04574	0.00000	0.00736	1.37988	1.35784	88.72
0.5000	21.63558	0.05064	0.00000	0.02488	1.15901	0.82774	90.81
0.6667	22.63384	0.04322	0.00000	0.00128	1.13043	0.08051	94.40
0.8333	21.95980	0.04433	0.00000	0.00029	1.09972	0.00000	94.68
1.0000	24.83690	0.04697	0.00000	0.00801	1.29041	0.16831	93.89
1.5000	24.65021	0.04502	0.00000	0.00432	1.22643	0.09703	94.38
2.0000	23.36087	0.04584	0.00000	0.00149	1.16274	0.00000	94.72
2.5000	23.11453	0.04417	0.00000	0.00096	1.17775	0.03794	94.48
3.0000	26.97724	0.04567	0.00000	0.00876	1.50233	0.21507	93.51
4.0000	25.05434	0.04690	0.00000	0.00482	1.25131	0.07722	94.43
8.0000	21.31315	0.04235	0.00000	0.00000	1.17336	0.06772	93.97
12.0000	23.30836	0.04677	0.00000	0.00984	1.12514	0.31976	93.56
16.0000	22.76869	0.04386	0.00000	0.00603	1.18862	0.04812	94.28
20.0000	23.18046	0.04351	0.00000	0.00474	1.16196	0.00000	94.68
24.0000	23.8915	0.04546	0.00000	0.01395	1.22595	0.00000	94.50

ตารางที่ ค-20 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราการไหลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	4.60781	0.12834	0.04171	0.38046	0.60750	2.1779	53.44
0.3333	11.92230	0.11279	0.05048	0.31191	0.98750	1.69907	76.07
0.5000	19.63147	0.09726	0.00000	0.21319	1.26228	1.12137	86.36
0.6667	27.40439	0.10202	0.00000	0.19201	1.24912	0.98685	90.35
0.8333	26.09969	0.09720	0.00000	0.16924	1.18486	0.68551	91.26
1.0000	29.17295	0.11593	0.00000	0.22705	1.39227	0.93070	90.32
1.5000	22.11113	0.12338	0.00000	0.22953	1.21851	0.74707	88.78
2.0000	22.51691	0.13894	0.00000	0.23052	1.13205	0.55901	89.76
2.5000	22.82108	0.13252	0.00000	0.27374	1.19884	0.44771	89.80
3.0000	22.26484	0.15122	0.00000	0.29984	1.05533	0.55952	89.30
4.0000	20.49016	0.15028	0.00000	0.26277	0.99049	0.56310	89.01
8.0000	20.75922	0.17418	0.00000	0.28893	1.01467	0.41859	89.12
12.0000	22.39482	0.18452	0.00000	0.30817	1.07523	0.44193	89.29
16.0000	29.01684	0.19890	0.00000	0.41156	1.36208	0.80461	89.00
20.0000	21.36607	0.15938	0.00000	0.26790	1.02442	0.34322	89.97
24.0000	22.72664	0.16120	0.00000	0.29919	1.08978	0.34655	90.02

ตารางที่ ค-21 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราการไหลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	26.79100	0.68859	0.00000	1.03413	1.11686	4.44265	73.43
0.3333	25.60010	0.32153	0.00000	0.52576	1.23927	3.69519	78.65
0.5000	23.10295	0.22215	0.00000	0.34643	1.14927	1.64198	84.77
0.6667	22.46857	0.20253	0.00000	0.34034	1.03531	0.88269	87.51
0.8333	23.02710	0.21544	0.00000	0.32868	1.04027	0.45125	89.18
1.0000	22.64668	0.22286	0.00000	0.31014	0.98849	0.14215	90.35
1.5000	24.84584	0.18738	0.00000	0.31615	1.20943	0.17679	90.59
2.0000	24.84902	0.20211	0.00000	0.29616	1.03836	0.11610	91.35
2.5000	23.06098	0.15295	0.00000	0.25348	1.10023	0.09592	91.43
3.0000	24.04513	0.15264	0.00000	0.25063	1.13602	0.11179	91.59
4.0000	25.51622	0.12432	0.00000	0.25444	1.24029	0.19533	91.67
8.0000	23.99437	0.09477	0.00000	0.15763	1.18982	0.11872	92.63
12.0000	29.98171	0.08362	0.00000	0.15933	1.55392	0.22202	92.74
16.0000	26.02819	0.07476	0.00000	0.10658	1.32648	0.09157	93.35
20.0000	25.49718	0.07277	0.00000	0.09843	1.35586	0.23644	92.70
24.0000	30.87061	0.07449	0.00000	0.13011	1.60648	0.26023	92.92

ตารางที่ ค-22 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราการไหลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.30 มิลลิลิตรต่อนาที)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	8.81336	0.11715	0.06446	0.40968	1.02459	2.2052	66.05
0.3333	20.37138	0.07570	0.00000	0.23689	1.16898	1.00433	87.64
0.5000	24.66881	0.08372	0.00000	0.19031	1.23906	0.35394	91.73
0.6667	25.66297	0.08769	0.00000	0.21249	1.28934	0.30338	91.84
0.8333	24.00050	0.11398	0.00000	0.27600	1.29487	0.17646	91.03
1.0000	24.99936	0.13077	0.00000	0.30807	1.23007	0.22786	91.02
1.5000	25.53238	0.17747	0.00000	0.37798	1.23986	0.21497	90.30
2.0000	23.31151	0.18351	0.00000	0.36603	1.10862	0.15334	90.16
2.5000	23.01607	0.19053	0.00000	0.32723	1.04549	0.11356	90.61
3.0000	22.78227	0.18964	0.00000	0.36463	1.05494	0.13777	90.14
4.0000	23.34995	0.17895	0.00000	0.32555	1.03140	0.15122	90.78
8.0000	21.98407	0.17705	0.00000	0.32559	1.07170	0.07984	90.40
12.0000	30.79325	0.23608	0.00000	0.40540	1.34630	0.25884	90.79
16.0000	23.12736	0.15763	0.00000	0.32567	1.16321	0.16061	90.43
20.0000	24.59393	0.14701	0.00000	0.32073	1.15992	0.19202	90.99
24.0000	30.41654	0.14883	0.00000	0.29277	1.43069	0.40742	91.38

ตารางที่ ค-23 ข้อมูลจากการศึกษาอัตราการไหลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (อัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 0.40 มิลลิลิตรต่อนาที)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	23.52254	0.21318	0.00000	0.56745	0.98326	0.87795	86.61
0.3333	23.12171	0.23873	0.00000	0.49369	0.91131	0.10601	89.47
0.5000	22.13985	0.27246	0.00000	0.56789	0.85458	0.00025	88.74
0.6667	22.24454	0.31373	0.00000	0.55711	0.86997	0.00969	88.34
0.8333	22.05939	0.34459	0.00000	0.52128	0.78047	0.00000	88.53
1.0000	21.37252	0.37285	0.00000	0.55712	0.78403	0.00000	87.63
1.5000	20.17737	0.34191	0.00000	0.53129	0.79205	0.00000	87.51
2.0000	22.33797	0.36557	0.00000	0.66863	0.91783	0.0019	86.95
2.5000	20.44000	0.34902	0.00000	0.63054	0.79489	0.00000	86.82
3.0000	25.71381	0.43931	0.00000	0.70822	0.95648	0.03572	87.34
4.0000	23.31435	0.40105	0.00000	0.67730	0.90879	0.00000	87.06
8.0000	22.30129	0.36726	0.00000	0.57674	0.88305	0.00000	87.66
12.0000	20.03661	0.36923	0.00000	0.55546	0.74667	0.00000	87.11
16.0000	21.96243	0.38001	0.00000	0.58031	0.83062	0.00954	87.49
20.0000	22.70190	0.32804	0.00000	0.50505	0.83847	0.00000	88.91
24.0000	26.88481	0.30318	0.00000	0.51789	1.09112	0.10943	89.52

ตารางที่ ค-24 ข้อมูลจากการศึกษาปริมาณไนโตรเจน 435 ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ไนโตรเจน 435 ปริมาณ 2 กรัม)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	25.22298	0.73409	0.00000	1.00825	0.91157	1.82983	78.37
0.3333	21.59320	0.48767	0.00000	0.67317	0.80130	0.52567	83.92
0.5000	19.32345	0.38569	0.00000	0.55214	0.74534	0.00605	86.51
0.6667	22.06745	0.41386	0.00000	0.59724	0.76581	0.00000	87.33
0.8333	20.16632	0.38543	0.00000	0.56717	0.77123	0.00000	86.82
1.0000	21.52883	0.40390	0.00000	0.56536	0.76347	0.00000	87.39
1.5000	20.16243	0.61353	0.00000	0.63032	0.67458	0.00000	84.23
2.0000	19.36523	0.51233	0.00000	0.63737	0.72666	0.00000	84.55
2.5000	20.47459	0.49673	0.00000	0.61378	0.80221	0.00000	85.33
3.0000	28.95674	0.51268	0.00000	0.65910	1.08455	0.10116	87.75
4.0000	25.33853	0.50743	0.00000	0.62684	0.88079	0.00000	87.39
8.0000	26.54542	0.32903	0.00000	0.46826	1.06670	0.00000	89.88
12.0000	24.09825	0.27599	0.00000	0.44426	1.01234	0.00411	89.81
16.0000	28.89058	0.36597	0.00000	0.57819	1.14508	0.08219	89.25
20.0000	22.18089	0.28171	0.00000	0.46978	0.94777	0.00000	89.03
24.0000	28.99940	0.31887	0.00000	0.49251	1.19332	0.03575	90.14

ตารางที่ ค-25 ข้อมูลจากการศึกษาปริมาณไนโวไซม์ 435 ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ไนโวไซม์ 435 ปริมาณ 3 กรัม)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	7.04570	0.09409	0.04380	0.30656	0.81252	1.46934	68.33
0.3333	17.53509	0.06490	0.00000	0.17906	1.11542	0.54446	88.80
0.5000	23.10389	0.06351	0.00000	0.11468	1.14368	0.18890	92.95
0.6667	23.17327	0.06427	0.00000	0.11070	1.08072	0.09947	93.56
0.8333	21.84359	0.06766	0.00000	0.10779	0.96101	0.17437	93.36
1.0000	23.03959	0.07179	0.00000	0.11023	0.94206	0.06774	94.10
1.5000	25.47511	0.08533	0.00000	0.16380	1.04027	0.07147	93.76
2.0000	22.30560	0.09067	0.00000	0.16179	1.05479	0.00702	93.08
2.5000	21.41377	0.08875	0.00000	0.17441	1.03471	0.02115	92.76
3.0000	20.98040	0.08247	0.00000	0.16591	0.88744	0.00133	93.46
4.0000	24.79986	0.08448	0.00000	0.14277	0.81718	0.00000	94.82
8.0000	22.14037	0.08788	0.00000	0.17875	0.84510	0.01324	93.74
12.0000	31.26865	0.13544	0.00000	0.30061	1.57850	0.26075	91.66
16.0000	24.95479	0.10167	0.00000	0.22070	1.16289	0.10584	92.53
20.0000	23.47388	0.08752	0.00000	0.17050	1.10218	0.13245	92.74
24.0000	26.63745	0.09975	0.00000	0.18114	1.26894	0.08602	92.96

ตารางที่ ค-26 ข้อมูลจากการศึกษาปริมาณไนโวไซม์ 435 ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ไนโวไซม์ 435 ปริมาณ 4 กรัม)

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
0.1667	28.4415	0.33774	0.00000	0.47334	1.35226	4.68073	78.06
0.3333	23.35857	0.16917	0.00000	0.24024	1.25586	2.25575	83.85
0.5000	22.00396	0.15391	0.00000	0.19279	1.07040	1.03699	88.16
0.6667	22.20919	0.21491	0.00000	0.24586	1.09014	0.50646	89.04
0.8333	24.12873	0.19318	0.00000	0.26919	1.14230	0.28092	90.47
1.0000	25.28521	0.22183	0.00000	0.28404	1.11192	0.26417	90.64
1.5000	22.85777	0.15352	0.00000	0.19846	1.05909	0.01437	92.21
2.0000	23.97696	0.14976	0.00000	0.18250	1.13179	0.09425	92.16
2.5000	23.09521	0.13105	0.00000	0.17514	1.10321	0.01059	92.56
3.0000	27.26400	0.15094	0.00000	0.20200	1.24751	0.13125	92.42
4.0000	25.94880	0.12708	0.00000	0.16702	1.20323	0.02955	93.02
8.0000	23.46519	0.09735	0.00000	0.10880	1.13526	0.09797	93.09
12.0000	23.83721	0.08645	0.00000	0.10732	1.16979	0.03519	93.42
16.0000	27.53778	0.09205	0.00000	0.09520	1.40983	0.18593	93.03
20.0000	24.61522	0.08523	0.00000	0.11248	1.15705	0.07692	93.49
24.0000	27.34292	0.11025	0.00000	0.15099	1.38877	0.14339	92.66

ตารางที่ ค-27 ข้อมูลจากการศึกษาความเสถียรในระยะยาวของระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ซึ่งใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย

เวลา (วัน)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
1	25.99376	0.19411	0.00000	0.33449	1.14065	0.00000	91.57
2	27.79246	0.14751	0.00000	0.26115	1.25036	0.00000	92.55
3	24.90316	0.15850	0.00000	0.22107	1.07260	0.00000	92.55
4	25.28854	0.15166	0.00000	0.22170	1.12770	0.00000	92.58
5	24.66150	0.17234	0.00000	0.23575	1.07068	0.00000	92.23
6	24.59598	0.18310	0.00000	0.26237	1.11411	0.00000	91.49
7	24.64502	0.15502	0.00000	0.23755	1.06807	0.00000	92.03
8	27.72586	0.18860	0.00000	0.26760	1.14151	0.00000	92.37
9	23.53760	0.17105	0.00000	0.24438	1.02049	0.00000	92.09
10	24.31373	0.30823	0.00000	0.42576	0.90261	0.00000	90.08
11	28.61395	0.22563	0.00000	0.35308	1.22805	0.00000	91.39
12	23.52101	0.28281	0.00000	0.40740	0.87356	0.00000	90.26
13	22.50041	0.19131	0.00000	0.25052	0.94902	0.00000	91.54
14	24.72353	0.14401	0.00000	0.22505	1.13697	0.00000	92.45
15	22.77088	0.40692	0.00000	0.5603	0.7892	0.00000	87.91

ตารางที่ ค-27 (ต่อ) ข้อมูลจากการศึกษาความเสถียรในระยะยาวของระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ซึ่งใช้เทอร์เชียรีบิวทานอลเป็นตัวทำละลาย

เวลา (วัน)	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)						เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์
	เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	1, 3 ไดกลีเซอไรด์	1, 2 ไดกลีเซอไรด์	โมโนกลีเซอไรด์	กรดไขมันอิสระ	
16	29.56407	0.29185	0.00000	0.56417	1.20651	0.00000	90.20
17	26.74886	0.29259	0.00000	0.53783	1.02119	0.09422	89.71
18	25.24014	0.18668	0.00000	0.32101	1.00216	0.04294	91.82
19	23.88427	0.23498	0.00000	0.3196	0.99816	0.03845	90.94
20	22.12034	0.17371	0.00000	0.33711	0.87694	0.01580	91.37
21	27.95452	0.20160	0.00000	0.27697	0.00000	0.01992	92.02
22	25.67567	0.09199	0.00000	0.21996	1.22688	0.28733	92.01
23	21.94776	0.24794	0.00000	0.40812	0.86679	0.00000	90.04
24	22.62748	0.37393	0.00000	0.51076	0.73029	0.15804	88.73
25	26.02139	0.29631	0.00000	0.49938	1.05431	0.00000	89.35
26	21.99238	0.41142	0.00000	0.60043	0.79169	0.00000	87.20
27	21.79417	0.44367	0.00000	0.59970	0.79193	0.00000	86.77
28	23.41277	0.59273	0.00000	0.73401	0.76980	0.00000	85.36
29	19.92354	0.66767	0.00000	0.94598	0.60019	0.00000	81.59
30	18.86694	0.60215	0.00000	0.78725	0.55093	0.00000	82.75

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว มาริสา สัจพันโรจน์ เกิดวันที่ 22 ธันวาคม 2526 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ จากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548 จากนั้น เข้าศึกษา ต่อในระดับปริญญาโท วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ ที่คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษาถัดมา และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2552