

การผลิตมอนอกลิเซอไรด์แบบไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาจากกลีเซอรอลและน้ำมันปาล์ม



นางสาวฐิติวรดา ยิ่งยง

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CATALYST-FREE MONOGLYCERIDES PRODUCTION FROM GLYCEROL AND PALM OIL



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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตมอนอกลิเซอไรด์แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากกลีเซอรอลและน้ำมันปาล์ม
โดย	นางสาวฐิติวรดา ยิ่งยง
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสุทธี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. เรืองวิทย์ สว่างแก้ว

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสุทธี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร. เรืองวิทย์ สว่างแก้ว)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. อนุรักษ์ วินิตสร)

ฐิติวรดา ยิ่งยง : การผลิตมอนอกลิเซอไรด์แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากกลีเซอรอลและน้ำมันปาล์ม (CATALYST-FREE MONOGLYCERIDES PRODUCTION FROM GLYCEROL AND PALM OIL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสุทธิ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. เรืองวิทย์ สว่างแก้ว, 98 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตมอนอกลิเซอไรด์จากน้ำมันปาล์มและกลีเซอรอลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้การออกแบบทดลองแบบ Central composite design จำนวน 48 การทดลองโดยใช้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์เป็นผลตอบสนองหลัก ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ (220, 240 และ 260 องศาเซลเซียส) ระยะเวลาทำปฏิกิริยา (30, 90 และ 150 นาที) และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์ม (0, 15 และ 30) โดยศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มคงที่ เท่ากับ 5 ต่อ 1 และปริมาตรของสารใส่ในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับร้อยละ 60 จากการทดลองพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์มากที่สุด ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้พบว่า ร้อยละไดกลีเซอไรด์และร้อยละกรดไขมันไม่มีความสัมพันธ์กับภาวะในการทำปฏิกิริยา ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ไอโซโพรพานอลไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ นอกจากนี้มีการศึกษาเปรียบเทียบการผลิตมอนอกลิเซอไรด์โดยใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบเป็นสารตั้งต้น ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดพบที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 5:1 ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ที่ผลิตได้จากกลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบ 37.48 และ 46.58 ตามลำดับ เนื่องจากในกลีเซอรอลดิบมีการปนเปื้อนของน้ำร้อยละ 10 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้เร็วกว่าการสลายตัวทางความร้อนเพียงอย่างเดียวส่งผลให้การผลิตมอนอกลิเซอไรด์ด้วยกลีเซอรอลดิบได้ผลดีกว่ากลีเซอรอลบริสุทธิ์

ภาควิชา เคมีเทคนิค

สาขาวิชา เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5771966023 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS: MONOGLYCERIDE GLYCEROLYSIS PALM OIL GLYCEROL

THITIWORRADA YINGYONG: CATALYST-FREE MONOGLYCERIDES PRODUCTION FROM GLYCEROL AND PALM OIL. ADVISOR: PROF. SOMKIAT NGAMPRASERTSITH, Ph.D., CO-ADVISOR: RUENGWIT SAWANGKAEW, Ph.D., 98 pp.

This work studied the production of monoglycerides by catalyst-free process. The experimental design was a central composite design of 48 experiments by using monoglycerides content (%MG) as major response. The investigated parameters were temperature (220, 240 and 260 °C), reaction time (30, 90 and 150 minutes), and molar ratio of isopropanol to glycerol to palm oil (0, 15 and 30). The glycerol to palm oil molar ratio and reactor loading were constant at 5 to 1 and 60%, respectively. The results show that parameters affected %MG were temperature and reaction time. In addition, diglyceride and fatty acid contents had no relationship with reacting conditions. At the 99% of confidence level, the molar ratio of isopropanol was not significant effect on %MG. A comparative study of monoglyceride production by using pure and crude glycerol was also investigated. The highest %MG was obtained at 260 °C, 150 minutes of reaction time and 5:1 of glycerol to palm oil molar ratio. The %MG in the products obtained from pure and crude glycerol were 37.48 and 46.58, respectively. Since the crude glycerol contains 10% of water which reacts with triglycerides faster than thermal decomposition, the monoglyceride production by crude glycerol could provide the better result than pure glycerol.

Department: Chemical Technology Student's Signature .....

Field of Study: Fuel Technology Advisor's Signature .....

Academic Year: 2017 Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. เรืองวิทย์ สว่างแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และดร. วินัญญา ศักดาศรี ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ชี้แนวทาง และช่วยสนับสนุนจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์ ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต งามจรุสศรีวิชัย และ ดร. อนุรักษ์ วินิตสร ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ยิ่ง

ขอขอบพระคุณบริษัท บางจาก ไปโอฟุเอล จำกัด ที่เอื้อให้ความอนุเคราะห์กลีเซอรอลดิบและการวิเคราะห์ห้องประกอบกลีเซอรอลดิบ ทุนการศึกษาจากภาควิชาเคมีเทคนิค ทุนยุทธศาสตร์การวิจัยเชิงลึก ประจำปีงบประมาณ 2559 คลัสเตอร์พลังงาน (Energy Cluster) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโครงการทุนพัฒนาศักยภาพการวิจัยเชิงสถาบันของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนด้านค่าเล่าเรียนและทุนวิจัยจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง และขอขอบคุณการสนับสนุนเครื่องมือจากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ช่างเทคนิค และบุคลากรทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกและช่วยอบรมการใช้เครื่องมือในการใช้ห้องปฏิบัติการ และที่ขาดไม่ได้เลยขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนในภาควิชาเคมีเทคนิค และนอกภาควิชาที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจจนงานวิจัยนี้สำเร็จไปด้วยดี

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป .....	1
สารบัญตาราง.....	1
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 การผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรม.....	6
2.2 ก्लीเซอร์อล.....	7
2.2.1 สมบัติทางกายภาพของกลีเซอร์อล.....	7
2.2.2 สมบัติทางเคมีของกลีเซอร์อล .....	8
2.2.3 การสังเคราะห์กลีเซอร์อล .....	9
2.3 ลักษณะของกลีเซอร์อลดิบ.....	11
2.4 การผลิตและการตลาดของกลีเซอร์อลทั่วโลก.....	12
2.4.1 การผลิตไบโอดีเซลและกลีเซอร์อลทั่วโลก.....	12
2.4.2 การตลาดไบโอดีเซลและกลีเซอร์อล.....	14

2.4.3	ราคากลิเซอรินหรือกลีเซอรอลทั่วโลก.....	15
2.5	สถานการณ์กลีเซอรอลในประเทศไทย .....	16
2.6	ทางเลือกสำหรับการใช้กลีเซอรอล .....	17
2.6.1	การสังเคราะห์ทางเคมี.....	17
2.6.2	สารเพิ่มคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง .....	18
2.6.3	การผลิตไฮโดรเจน.....	18
2.6.4	ไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน.....	18
2.6.5	กระบวนการหมักทางชีวภาพ .....	19
2.6.6	การผลิตเมทานอล .....	19
2.6.7	แหล่งคาร์บอนในการบำบัดน้ำเสีย.....	19
2.7	มอนอกลิเซอไรด์ .....	20
2.7.1	การสังเคราะห์ .....	21
2.7.2	วิธีการผลิตมอนอกลิเซอไรด์.....	24
2.7.3	การใช้ประโยชน์มอนอกลิเซอไรด์.....	31
2.8	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตมอนอกลิเซอไรด์.....	32
2.8.1	อุณหภูมิ.....	32
2.8.2	อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อกลีเซอรอล .....	33
2.8.3	เวลาการเกิดปฏิกิริยา.....	34
2.8.4	ความดัน .....	34
2.8.5	ตัวทำละลายอินทรีย์ .....	35
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	39
3.1	สารที่ใช้ในการทดลอง .....	39



3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	40
3.3 การออกแบบการทดลอง.....	40
3.4 การทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา .....	41
3.5 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ .....	42
3.5.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas chromatograph, GC) .....	42
3.5.2 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas chromatography mass spectrometer, GC-MS).....	43
3.5.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	46
4.1 การวิเคราะห์ทางสถิติและสมการถดถอย .....	46
4.1.1 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยต่างๆ.....	49
4.1.2 วิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการถดถอย.....	56
4.2 ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ .....	57
4.2.1 อุณหภูมิกับเวลาการเกิดปฏิกิริยา (AB).....	57
4.2.2 อุณหภูมิกับอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์ม (X:5:1) (AC).....	58
4.2.3 เวลาการเกิดปฏิกิริยากับอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์ม (X:5:1) (BC).....	59
4.3 การเปรียบเทียบร้อยละมอนอกลิเซอไรด์โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับวิธีต่างๆ .....	60
4.4 การใช้กลีเซอรอลดิบเป็นสารตั้งต้น.....	63
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	70
รายการอ้างอิง .....	71

ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ความแปรปรวน .....	77
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ส่วนตัก้าง .....	81
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ .....	87
ภาคผนวก ง ความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอล .....	91
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแยกตามองค์ประกอบ .....	92
ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์ร้อยละไอโซโพรพิลเอสเทอร์ .....	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	98



## สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์ .....	1
รูปที่ 1.2 การผลิตมอนอกลิเซอไรด์ผ่านปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับ กลีเซอรอล .....	2
รูปที่ 2.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์.....	7
รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมัน .....	7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอล.....	8
รูปที่ 2.4 กระบวนการสังเคราะห์กลีเซอรอล.....	9
รูปที่ 2.5 ปฏิกริยาสะพอนิฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	10
รูปที่ 2.6 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์.....	10
รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล.....	11
รูปที่ 2.8 การใช้น้ำมันพืชสำหรับการผลิตไบโอดีเซลทั่วโลก .....	13
รูปที่ 2.9 แสดงการผลิตและราคากลิเซอรอลทั่วโลก .....	14
รูปที่ 2.10 สถิติราคากลิเซอรอลที่บริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 .....	16
รูปที่ 2.11 ความผันผวนของราคากลิเซอรอลในตลาดโลก .....	16
รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีทั่วไปของมอนอกลิเซอไรด์.....	20
รูปที่ 2.13 ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์และกลีเซอรอล .....	21
รูปที่ 2.14 ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและกลีเซอรอล .....	22
รูปที่ 2.15 ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสของมอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์.....	23
รูปที่ 2.16 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมัน .....	23
รูปที่ 2.17 กลไกการเกิดปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกริยาเอกพันธ์.....	26
รูปที่ 2.18 กลไกการเกิดปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกริยารวิพันธ์.....	27

รูปที่ 2.19 กลไกการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของเหลวไอออนิก แอลคาไลน์.....	29
รูปที่ 2.20 การผลิตมอนอกลิเซอไรต์โดยใช้เอนไซม์ไลเปส .....	30
รูปที่ 2.21 ลักษณะของสารลดแรงตึงผิว .....	31
รูปที่ 2.22 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนไปของไตรกลีเซอไรต์และองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ ตัวอื่น ๆ ของการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันดอกทานตะวัน .....	33
รูปที่ 2.23 ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของไตรกลีเซอไรต์ .....	34
รูปที่ 2.24 ผลของปริมาตรของสารที่ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรต์ .....	35
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และอ่างทรายฟลูอิดซ์.....	41
รูปที่ 3.2 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี .....	42
รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี แมสสเปกโตรมิเตอร์.....	44
รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น 6890N ของ Agilent .....	45
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละมอนอก ลิเซอไรต์.....	57
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล กลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรต์.....	58
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเกิดปฏิกิริยากับอัตราส่วนโดยโมลของไอโซ โพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรต์ .....	59
รูปที่ 4.4 โครมาโทแกรม GC-MS ของผลิตภัณฑ์ของกลีเซอรอลดิบ.....	61
รูปที่ 4.5 โครงสร้างไตรโอเลออิน.....	62
รูปที่ 4.6 โครงสร้างไตรกลีเซอไรต์ .....	63
รูปที่ 4.7 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรต์กับกลีเซอรอลดิบ .....	64
รูปที่ 4.8 โครมาโทแกรม GC-MS ของผลิตภัณฑ์ของกลีเซอรอลดิบ .....	65
รูปที่ 4.9 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรต์กับกลีเซอรอลดิบ .....	66
รูปที่ 4.10 โครมาโทแกรม GC-MS ของผลิตภัณฑ์ของกลีเซอรอลดิบ .....	68

<b>รูปที่ ข.1</b> ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (Residuals) กับความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal % Probability) ของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละมอดอกลิเซอไรด์ .....	81
<b>รูปที่ ข.2</b> ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายจากสมการถดถอย (Predicted Value) กับ ส่วนตกค้าง (Residuals) ของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละมอดอกลิเซอไรด์ .....	81
<b>รูปที่ ข.3</b> ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ลำดับเก็บข้อมูล (Run number) กับ ส่วนตกค้างของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละมอดอกลิเซอไรด์ .....	82
<b>รูปที่ ข.4</b> ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นแบบปกติของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละไดกลีเซอไรด์ .....	82
<b>รูปที่ ข.5</b> ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายจากสมการถดถอยกับส่วนตกค้างของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละไดกลีเซอไรด์ .....	83
<b>รูปที่ ข.6</b> ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ลำดับเก็บข้อมูลกับส่วนตกค้างของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละไดกลีเซอไรด์ .....	83
<b>รูปที่ ข.7</b> ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นแบบปกติของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละกรดไขมัน .....	84
<b>รูปที่ ข.8</b> ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายจากสมการถดถอยกับส่วนตกค้างของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละกรดไขมัน .....	84
<b>รูปที่ ข.9</b> ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ลำดับเก็บข้อมูลกับส่วนตกค้างของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละกรดไขมัน .....	85
<b>รูปที่ ข.10</b> ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นแบบปกติของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละไตรกลีเซอไรด์ .....	85
<b>รูปที่ ข.11</b> ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายจากสมการถดถอยกับส่วนตกค้างของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละไตรกลีเซอไรด์ .....	86
<b>รูปที่ ข.12</b> ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ลำดับเก็บข้อมูลกับส่วนตกค้างของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละไตรกลีเซอไรด์ .....	86
<b>รูปที่ ค.1</b> โครมาโทแกรมของสารมาตรฐานแต่ละชนิดที่ Retention time ที่แตกต่างกัน .....	87

รูปที่ ค.2 กราฟมาตรฐานของ และ (ก) มอนอโอลลีน (ข) ไดปาล์มิติน (ค) ไดโอลลีน (ง) ไตรปาล์มิติน (จ) ไตรโอลลีน (ฉ) กรดปาล์มิติก และ (ช) กรดโอเลอิก.....	90
รูปที่ ง.1 กราฟมาตรฐานของกลีเซอรอล.....	91



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	เปรียบเทียบผลจากงานวิจัยที่ศึกษาการผลิตมอนอกลิเซอไรด์.....	4
ตารางที่ 2.1	สมบัติทั่วไปของกลีเซอรอล.....	9
ตารางที่ 2.2	องค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบจากอุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซล.....	12
ตารางที่ 2.3	แสดงภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอนอกลิเซอไรด์ในแต่ละวิธี.....	24
ตารางที่ 2.4	ความมีขี้ของตัวทำละลายชนิดต่างๆ.....	35
ตารางที่ 2.5	ความสามารถในการละลายน้ำมันในตัวทำละลายชนิดต่างๆ.....	36
ตารางที่ 3.1	ตัวแปรและระดับค่าตัวแปรของการออกแบบ Central Composite Design.....	41
ตารางที่ 3.2	ภาวะการวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง GC.....	43
ตารางที่ 3.3	ภาวะการวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง GC-MS.....	44
ตารางที่ 3.4	ภาวะการวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลในผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง GC.....	45
ตารางที่ 4.1	ตัวแปรและระดับค่าตัวแปรของการออกแบบ Central Composite Design.....	47
ตารางที่ 4.2	ภาวะที่ใช้ในการทดลอง ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ ไคกลีเซอไรด์ กรดไขมัน และไตรกลีเซอไรด์.....	47
ตารางที่ 4.3	การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์.....	50
ตารางที่ 4.4	ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรม (A) เวลาการเกิดปฏิกิริยา (B) และอัตราส่วนโดยโมลของ ไอโซโพรพานอล (C) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) ของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์.....	51
ตารางที่ 4.5	การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละไคกลีเซอไรด์.....	52
ตารางที่ 4.6	ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรม (A) เวลาการเกิดปฏิกิริยา (B) และอัตราส่วนโดยโมลของ ไอโซโพรพานอล (C) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละไคกลีเซอไรด์.....	53
ตารางที่ 4.7	การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละกรดไขมัน.....	53

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (A) เวลาการเกิดปฏิกิริยา (B) และอัตราส่วนโดย โมลของไอโซโพรพานอล (C) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละกรด ไขมัน.....	54
ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละไตรกลีเซอไรด์ .....	55
ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (A) เวลาการเกิดปฏิกิริยา (B) และอัตราส่วนโดย โมลของไอโซโพรพานอล (C) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละไตร กลีเซอไรด์ .....	56
ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดที่ภาวะอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และไม่มีการเติมไอโซโพรพานอล .....	60
ตารางที่ 4.12 แสดงภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอนอกลิเซอไรด์ในแต่ละวิธี .....	61
ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบกลีเซอรอลดิบจากบริษัทบางจากไบโอฟูเอลจำกัด .....	64
ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ที่เกิดขึ้นจากการใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ และ กลีเซอรอลดิบ .....	67
ตารางที่ 4.15 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดจากการทำปฏิกิริยา กลีเซอรไรไลซิสระหว่างน้ำมันปาล์มกับกลีเซอรอลดิบ .....	68
ตารางที่ ก.1 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ .....	77
ตารางที่ ก.2 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละไดกลีเซอไรด์ .....	78
ตารางที่ ก.3 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละกรดไขมัน .....	79
ตารางที่ ก.4 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละไตรกลีเซอไรด์ .....	80
ตารางที่ จ.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแสดงร้อยละมอนอปาล์มิติน (MP) ร้อยละมอนอ โอลิอิน (MO) ร้อยละไดปาล์มิติน (DP) ร้อยละไดโอลิอิน (DO) ร้อยละกรดปาล์มิติก (PA) และร้อยละกรดโอลิอิก (OA).....	92
ตารางที่ จ.2 ค่าเฉลี่ยผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแสดงค่า ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ (MG) ร้อยละได กลีเซอไรด์ (DG) ร้อยละไตรกลีเซอไรด์ (TG) ร้อยละกรดไขมัน (FA) และร้อยละไอโซโพรพิลเอส เทอร์ (ET) จากกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (PG) และกลีเซอรอลดิบ (CG).....	94



ตารางที่ ฉ.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแสดงร้อยละไอโซโทปฟอสเฟตจากกาลีเซอรอลบริสุทธิ.....	95
ตารางที่ ฉ.2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแสดงร้อยละไอโซโทปฟอสเฟตจากกาลีเซอรอลดิบ .....	97

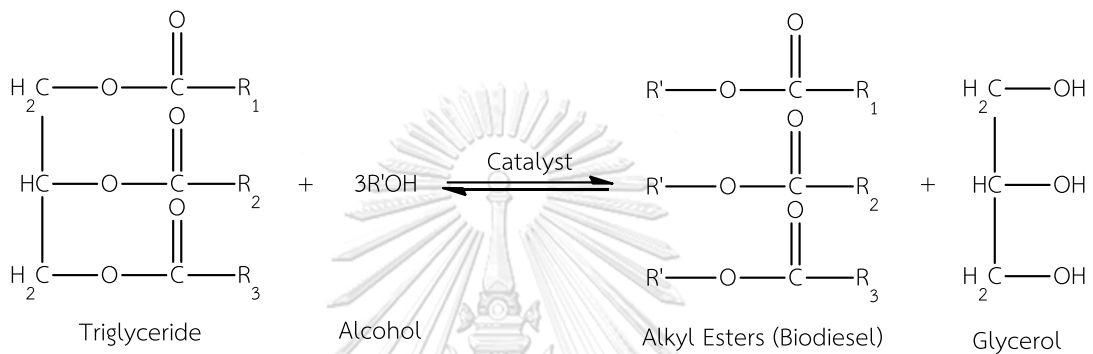


# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Transesterification) ของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์เพื่อผลิตไบโอดีเซลแสดงดังรูปที่ 1.1 [1]



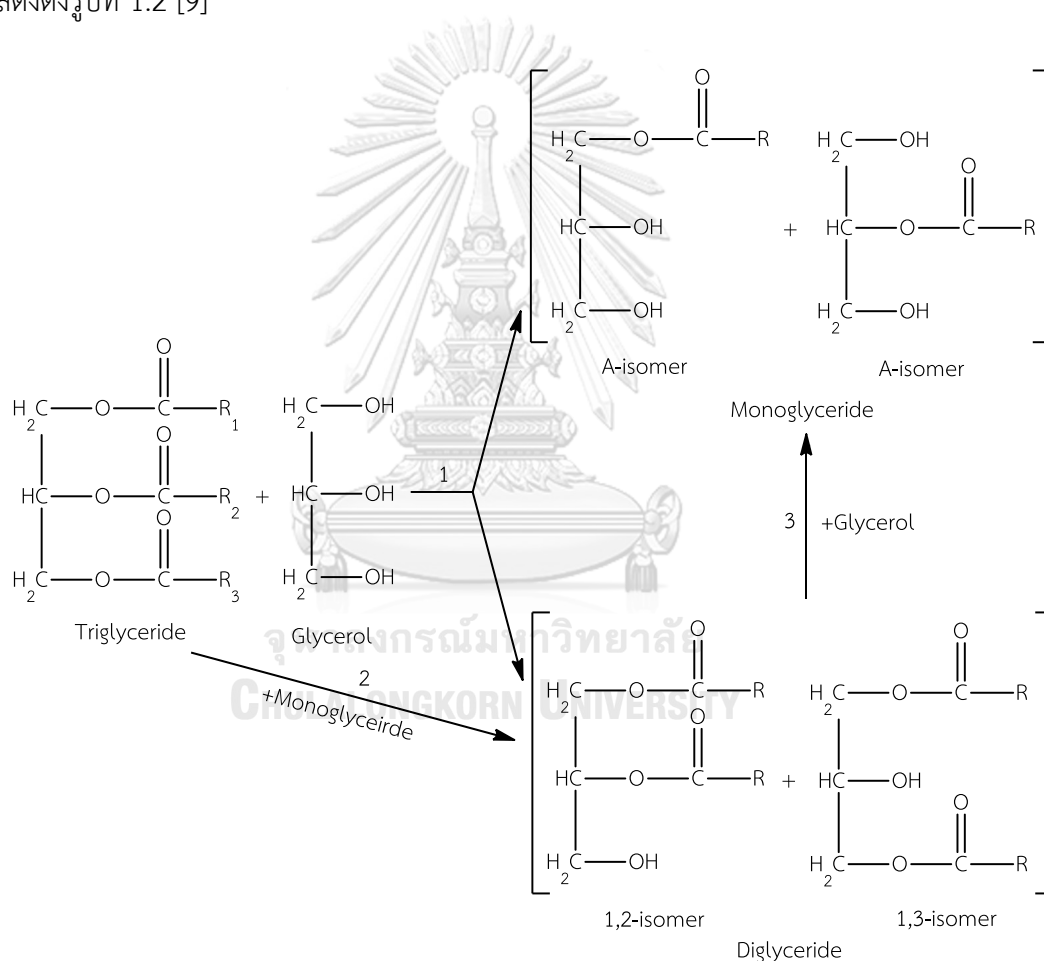
รูปที่ 1.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์ [1]

การผลิตไบโอดีเซลในอุตสาหกรรมปัจจุบันมีกลีเซอรอลดิบเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักไบโอดีเซลที่ผลิตได้ กลีเซอรอลบริสุทธิ์จะถูกใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยาและอุตสาหกรรมอาหาร การทำกลีเซอรอลดิบให้บริสุทธิ์มีค่าใช้จ่ายสูง และปริมาณกลีเซอรอลบริสุทธิ์มีเพียงพอที่จะใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยาและอุตสาหกรรมอาหาร ดังนั้นการนำกลีเซอรอลดิบไปใช้ในการผลิตสารอนุพันธ์ของกลีเซอรอล อาทิ มอนอกลิเซอไรด์ (Monoglyceride) จะเป็นการเพิ่มมูลค่าของกลีเซอรอลดิบที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลอีกทางหนึ่ง

มอนอกลิเซอไรด์ หรือ อะซิลกลีเซอรอล (Acylglycerol) หรือ มอนออะซิลกลีเซอรอล (Monoacylglycerol) [1] เป็นมอนอเอสเทอร์กลีเซอรอลของกรดไขมันที่ประกอบด้วยโมเลกุลที่ชอบน้ำบริเวณส่วนหัว และโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำบริเวณส่วนหาง ซึ่งใช้เป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) และสารอิมัลซิฟายเออร์ (Emulsifying) สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในทางด้านอาหาร พลาสติกไฮเซออร์ ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เครื่องสำอาง และยา [2, 3] เช่น เป็นสารที่มีความสามารถในการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์และมีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นสารป้องกันการติดเชื้อไวรัสที่ทำให้เกิดโรคมุ้มน้ำคั่งในบภพรวง [4] นอกจากนี้ยังมีความน่าสนใจเชิงเศรษฐศาสตร์เพราะมอนอกลิเซอไรด์มีราคาประมาณ 1700–4600

ดอลลาร์ต่อตัน ในขณะที่ราคาไบโอดีเซลประมาณ 635–865 ดอลลาร์ต่อตัน [5] และราคากลิเซอรอลเท่ากับ 500–560 ดอลลาร์ต่อตัน [6]

การผลิตมอนอกลิเซอไรด์มี 2 วิธีคือ ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสระหว่างไตรกลีเซอไรด์ (ไขมันและน้ำมัน) หรือแอลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน กับกลีเซอรอล [7] และปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดไขมันอิสระกับกลีเซอรอล [8] ในกรณีของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับกลีเซอรอล จะได้ผลิตภัณฑ์มอนอกลิเซอไรด์เป็นหลักและไดกลีเซอไรด์เป็นผลพลอยได้ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ผลิตภัณฑ์เป็นมอนอกลิเซอไรด์มี 3 แบบ และปฏิกิริยาย้อนกลับที่คาดว่าจะเกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 1.2 [9]



รูปที่ 1.2 การผลิตมอนอกลิเซอไรด์ผ่านปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับกลีเซอรอล

[9]

จากงานวิจัยที่ศึกษาการผลิตมอนอกลิเซอไรด์แบบดั้งเดิมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalysts) เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่อุณหภูมิประมาณ 255 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ประมาณ 40–60 ซึ่งแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ยากและกระบวนการทำให้เป็นกลางด้วยปฏิกิริยาสะเทินสามารถเกิดเป็นสบู่และเกลือที่สูง [9] อีกทางเลือกหนึ่งของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalysts) เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาเมโซพอร์ MCM-41 และไฮโดรทัลไซต์ (Hydrotalcite) ซึ่งแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่ายและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่มีอายุการใช้งานที่สั้น ได้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ประมาณ 70 [7] นอกจากนี้มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของเหลวไอออนิกแอลคาไลน์ (Alkaline ionic liquid) เช่น 1-บิวทิล-3-เมทิลอิมิดาโซเลียมไฮดรอกไซด์ (1-Butyl-3-Methylimidazoliumhydroxide [Bmim]OH) และ 1-บิวทิล-3-เมทิลอิมิดาโซเลียมอิมิดาโซลิด (1-Butyl-3-Methylimidazoliumimidazolid [Bmim]Im) ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ประมาณ 69 สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และวิวิธพันธุ์ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ แต่ของเหลวไอออนิกแอลคาไลน์มีราคาแพงและมีขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ซับซ้อน [9] ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอนไซม์ เช่น Novozyme 435 และ Lipozyme RM IM ใช้อุณหภูมิต่ำช่วง 40–60 องศาเซลเซียส สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ใช้เวลาการเกิดปฏิกิริยาหลายชั่วโมง [10] นอกจากนี้มีการเติมตัวทำละลายเข้าไปช่วยทำปฏิกิริยากลิเซอไลไรซิสระหว่างน้ำมันและกลีเซอรอลเพื่อลดความหนืดของของผสม ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อาทิ แอซีโตน พบว่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความดัน 1.8 เมกะพาสคัล เวลาเกิดปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันกับกลีเซอรอล 1:5 ได้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ 52.0 [11] และมีการเปรียบเทียบผลร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ สารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยา และภาวะที่เหมาะสมที่ได้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุด จากงานวิจัยที่ศึกษาการผลิตมอนอกลิเซอไรด์ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบผลจากงานวิจัยที่ศึกษาการผลิตมอนอกลิเซอไรด์

สารตั้งต้น	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ตัวทำละลาย	ภาวะที่เหมาะสม				อ้างอิง
			อุณหภูมิ (°C)	เวลา (hr.)	อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อกลีเซอรอล	%MG	
ไตรกลีเซอไรด์	KOH, Ca(OH) <sub>2</sub>	N/R	255	N/R	N/R	50.00	[9]
เมทิลโอเลียด	MgO	–	250	2	1:4.5	77.00	[1]
น้ำมันถั่วเหลือง	[Bmim]Im	–	200	3	1:6	69.00	[9]
กรดปาล์มติก	Novozyme 435	Act-ECO <sub>2</sub> *	50	5	1:3	58.68	[10]
น้ำมันดอกทานตะวัน	–	Acetone	250	2	1:5	52.00	[11]
ไตรโอเลอิน	–	i-Propanol	260	2.5	1:5	67.8	[5]

หมายเหตุ

\* Act-ECO<sub>2</sub> คือ acetone expanded-CO<sub>2</sub> N/R ไม่มีการรายงาน และ %MG คือ ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์

การผลิตมอนอกลิเซอไรด์โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับความสนใจเนื่องจากปฏิกิริยาไม่มีการปนเปื้อนของสารเคมีอันตราย ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการผลิตมอนอกลิเซอไรด์จากน้ำมันปาล์มและกลีเซอรอลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อหาภาวะที่ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุด และมีไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย ซึ่งช่วยลดความหนืดเนื่องจากไอโซโพรพานอลมีความมีขั้วต่ำและสามารถละลายในน้ำมันพืชได้ดีที่อุณหภูมิห้อง [12] นอกจากนี้หาภาวะที่ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดมาทดลองทำปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสระหว่างน้ำมันปาล์มและกลีเซอรอลดิบเพื่อเปรียบเทียบหาร้อยละมอนอกลิเซอไรด์และปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาการผลิตมอนอกลิเซอไรด์จากกลีเซอรอลและน้ำมันปาล์มโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อหาภาวะที่ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดโดยใช้วิธีทางสถิติ

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาการผลิตมอนอกลิเซอไรด์จากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสระหว่างน้ำมันปาล์มกับกลีเซอรอลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ตัวทำละลายเป็นไอโซโพรพานอล ตัวแปรที่สนใจคือ อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณไอโซโพรพานอล ที่อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มคงที่ เท่ากับ 5 ต่อ 1 เนื่องจากต้องการให้กลีเซอรอลมากเกินไปสำหรับการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิส

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมของการผลิตมอนอกลิเซอไรด์จากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

### 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

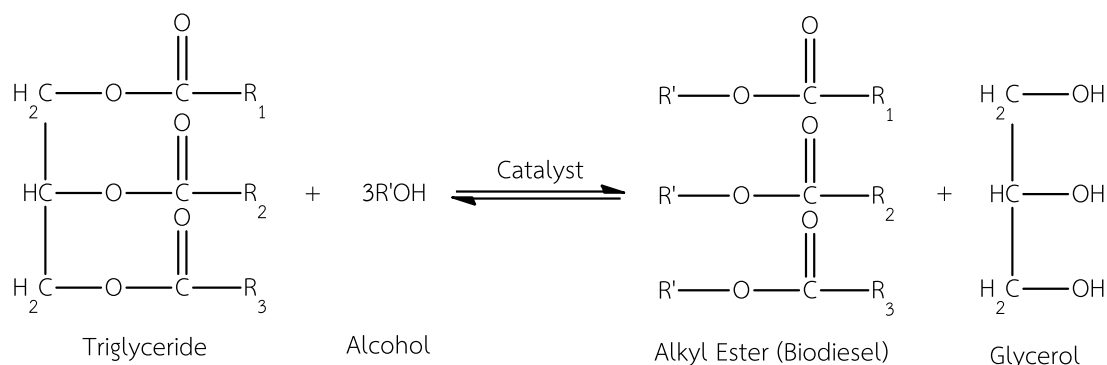
1. ค้นคว้าศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ทั้งในประเทศและต่างประเทศ
2. ศึกษาวิธีการทดลองและการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ในการผลิตมอนอกลิเซอไรด์
3. วางแผนการดำเนินการทดลองและเตรียมอุปกรณ์ สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
4. ออกแบบการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอนอกลิเซอไรด์ แบบ Central Composite Design (CCD) ด้วยโปรแกรม Stat-Ease Design Expert 10
5. ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ที่ได้จากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของน้ำมันปาล์มที่อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มคงที่ เท่ากับ 5 ต่อ 1 และปริมาตรของสารที่ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 60% ประกอบด้วย
  - อุณหภูมิ 220, 240 และ 260 องศาเซลเซียส
  - เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30, 90 และ 150 นาที
  - อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์ม (X:5:1) 0, 15 และ 30
6. ศึกษาปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของน้ำมันปาล์มกับกลีเซอรอลดิบ
7. วิเคราะห์ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ และวิเคราะห์ผลพลอยได้จากปฏิกิริยา ได้แก่ ไตกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระ ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC)
8. วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

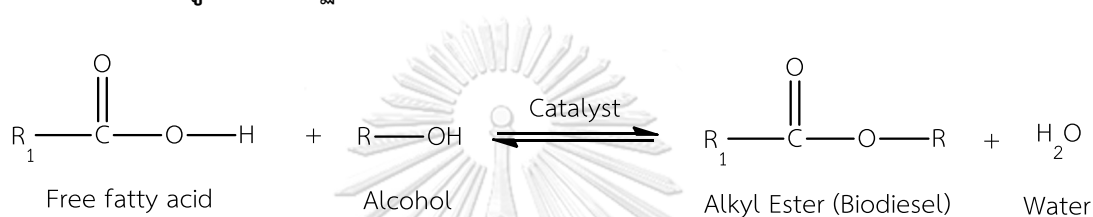
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรม

เชื้อเพลิงชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานรูปแบบใหม่ที่สามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล เพราะเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ได้จากธรรมชาติ สะอาด มีความยั่งยืน ย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติ และช่วยลดมลพิษทางอากาศจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสารเคมีเข้าสู่บรรยากาศ [13] เชื้อเพลิงชีวภาพที่ใช้ในปัจจุบัน เช่น เอทานอลผลิตจากอ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวสาลี และไบโอดีเซลผลิตจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ [14] ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีสถานะเป็นของเหลวที่ได้จากกระบวนการปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันหรือปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ดังรูปที่ 2.1 และ รูปที่ 2.2 ตามลำดับ [15] เมื่อนำไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับดีเซลพบว่า ไบโอดีเซลมีข้อดีกว่าดีเซลในด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ไม่มีกำมะถัน และลดภาวะโลกร้อน รวมทั้งด้านสมรรถนะของเครื่องยนต์ เช่น น้ำมันมีความหล่อลื่น ค่าซีเทนที่สูง และการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ [16] นอกจากนี้ไบโอดีเซลมีสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ดี เช่น จุดวาบไฟสูง ความหนืดและค่าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล การใช้ไบโอดีเซลไปเป็นแหล่งพลังงานทดแทน โดยเริ่มต้นนำไบโอดีเซลผสมร่วมกับน้ำมันชนิดอื่นๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำมันให้ดีขึ้น แล้วนำวางขายสู่ท้องตลาดซึ่งเป็นการเปิดกว้างตลาดทำให้ไบโอดีเซลมีมูลค่าที่สูงขึ้น ซึ่งการกำหนดราคาไบโอดีเซลตามท้องตลาดร้อยละ 75-95 ขึ้นกับราคาวัตถุดิบตั้งต้นของไบโอดีเซล [17] ในทางกลับกันการผลิตไบโอดีเซลเกิดผลพลอยได้ขึ้นคือ กลีเซอรอลเกิดขึ้นร้อยละ 10-20 ของปริมาณไบโอดีเซลทั้งหมด [18, 19] ดังนั้นการผลิตไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้น ทำให้กลีเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้เกิดภาวะล้นตลาด จึงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีในการเปลี่ยนกลีเซอรอลให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจมากขึ้น ได้แก่ อุตสาหกรรมเคมีเชื้อเพลิง อุตสาหกรรมพลาสติก และอื่น ๆ [20]



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ [15]



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมัน [15]

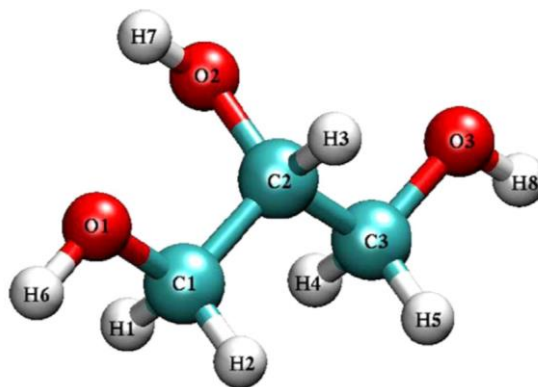
## 2.2 กlycerol

กลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบหลักของไตรกลีเซอไรด์ซึ่งพบได้ในไขมันจากสัตว์ น้ำมันพืช หรือน้ำมันดิบ กลีเซอรอลมาจากสบูหรือจากการผลิตไบโอดีเซล กลีเซอรอลมีการค้นพบครั้งแรกในปี 1779 โดย Scheele พบว่ากลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมของปฏิกิริยาการผลิตสบู่ระหว่างน้ำมันมะกอกกับออกไซด์ของตะกั่ว ต่อมาในปี 1811 Chevreul พบว่ากลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบในไขมันซึ่งอยู่ในรูปของกลีเซอรอลเอสเทอร์ของกรดไขมันจึงเรียกว่า กลีเซอรอล

### 2.2.1 สมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอล

กลีเซอรอลเป็นสารอินทรีย์ประเภทแอลกอฮอล์ และตามระบบ IUPAC มีชื่อทางเคมีว่า โพรเพน-1,2,3- ไตรออล นอกจากนี้ในเชิงทางการค้ามีชื่อว่า กลีเซอริน 1,2,3-โพรเพนไตรออล ไตรไฮดรอกซีโพรเพนกลีเซอริตอล และ ไกลซิสแอลกอฮอล์ กลีเซอรอลเป็นของเหลว ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีโครงสร้างที่คล้ายน้ำตาล จึงทำให้กลีเซอรอลมีรสหวาน และเนื่องจากโมเลกุลมีพันธะไฮโดรเจนจึงทำให้กลีเซอรอลเป็นของเหลวหนืด โครงสร้างโมเลกุลเป็นกลุ่มไฮดรอกซิล 3 กลุ่มมารวมกัน (-OH) จึงทำให้กลีเซอรอลสามารถละลายน้ำได้ดี รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอล [21]





รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอล [21]

กลีเซอรอลสามารถละลายได้ดีกับน้ำ เมทานอล เอทานอล และไอโซเมอร์ของโพรพานอล บิวทานอล และเพนทานอล รวมทั้ง ฟีนอล ไกลคอล โพรเพนไดออล เอมีน และสารประกอบที่เป็นเฮทเทอร์โรไซคลิกที่ประกอบด้วยอะตอมของไนโตรเจนวงแหวน เช่น ไพริดีน ควิโนลีน กลีเซอรอลไม่สามารถละลายได้ในไฮโดรคาร์บอน แอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่ยาว น้ำมันพืชและสัตว์ และตัวทำละลายจำพวกเฮโลเจน เช่น คลอโรฟอร์ม

### 2.2.2 สมบัติทางเคมีของกลีเซอรอล

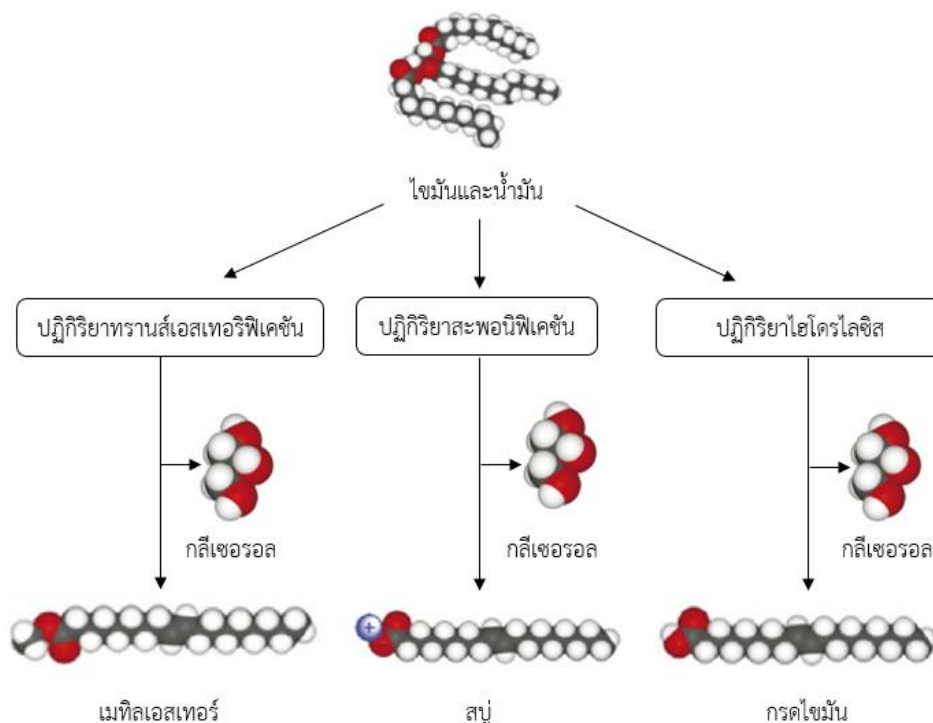
กลีเซอรอลมีความหนืดสูงทั้งอุณหภูมิปกติและอุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อนำกลีเซอรอลละลายในน้ำ มีความหนืดที่ต่ำ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบระบายความร้อนได้ที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากสามารถช่วยชะลอการละลายของน้ำแข็งได้ กลีเซอรอลไม่เกิดการระเหยที่อุณหภูมิต่ำ แต่สามารถเกิดออกซิไดซ์ได้ง่ายระหว่าง กลีเซอรอล กับโลหะ เหล็ก ทองแดง เนื่องจากเกลือที่มีอยู่ในโลหะสามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ นอกจากนี้กลีเซอรอลมีความดันไอต่ำทำให้ดูความชื้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิต่ำ สมบัติทางเคมีของกลีเซอรอล [6] แสดงในตารางที่ 2.1

## ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของกลีเซอรอล

สมบัติ	ค่า
น้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	92.09
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	1260
ความหนืด (พาสคัลวินาที)	1.41
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	18
จุดเดือด (องศาเซลเซียส) ที่ 101.3 กิโลพาสคัล	290
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	177

### 2.2.3 การสังเคราะห์กลีเซอรอล

กระบวนการทั่วไปในการสังเคราะห์กลีเซอรอลปัจจุบัน ได้แก่ ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ปฏิกริยาสะพอนิฟิเคชันของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์จากการผลิตสบู่ และปฏิกริยาการแตกตัวของไขมันหรือน้ำมันพืชด้วยน้ำ ดังรูปที่ 2.4 [20]



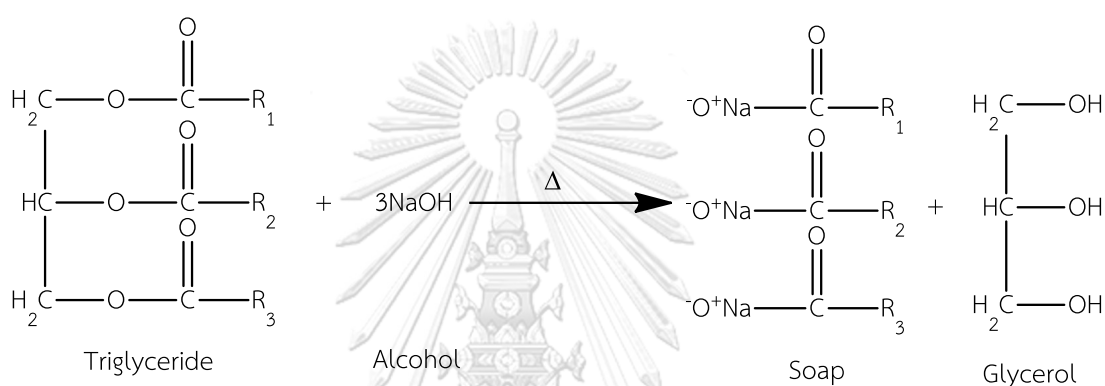
รูปที่ 2.4 กระบวนการสังเคราะห์กลีเซอรอล [20]

### 2.2.3.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอลและเอทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบส จะได้แอลคิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้รูปที่ 2.1 [15]

### 2.2.3.2 ปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชัน

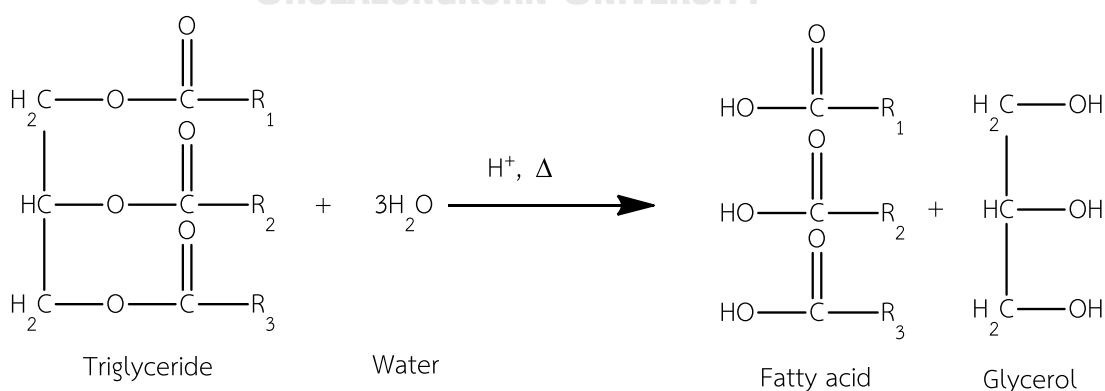
ปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ได้สบู่หรือเกลือโซเดียมของกรดไขมันและกลีเซอรอลดังรูปที่ 2.5 [22]



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ [22]

### 2.2.3.3 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

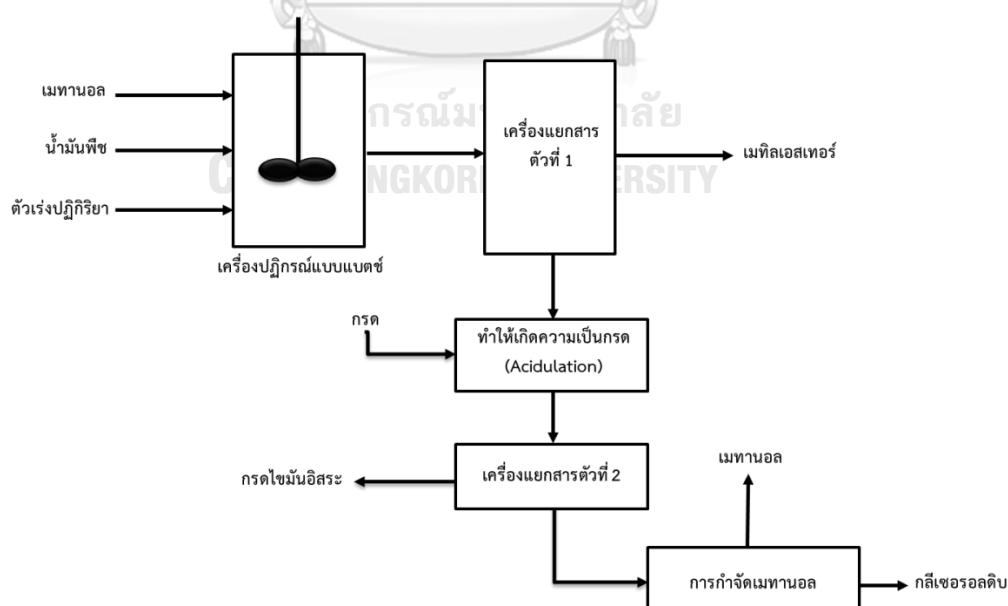
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับน้ำได้กรดไขมันและกลีเซอรอลดังรูปที่ 2.6 [22]



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ [22]

### 2.3 ลักษณะของกลีเซอรอลดิบ

คำว่า กลีเซอรอล ใช้เฉพาะกลีเซอรอลที่บริสุทธิ์หรือเรียกว่า 1,2,3-โพรเพนไตรออล ส่วนคำว่า กลีเซอริน ใช้ในเชิงพาณิชย์ที่มีกลีเซอรอลสูงกว่าร้อยละ 95 กลีเซอรอลมีหลายประเภทที่จำหน่ายตามท้องตลาด เช่น กลีเซอรอลดิบ กลีเซอรอลดิบที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความบริสุทธิ์ และกลีเซอรอลเชิงพาณิชย์ กลีเซอรอลดิบที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมักมีสีน้ำตาลเข้ม มีสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส โดยเกิดจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน นอกจากนี้ต้องทำให้เกิดความเป็นกรด (Acidulation) เพื่อแยกกรดไขมัน ปฏิกิริยาสะเทินให้เป็นกลาง และระเหยเพื่อแยกเมทานอลและน้ำออก ซึ่งเมทานอลสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังรูปที่ 2.7 [23] ในกลีเซอรอลดิบประกอบด้วย กลีเซอรอลร้อยละ 70-88 และสิ่งเจือปน ได้แก่ เมทานอลร้อยละ 1 เกลีอร้อยละ 5-15 น้ำร้อยละ 5-15 และสารอินทรีย์ที่ไม่ใช่กลีเซอรอลร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุชนิดต่างๆ ในกลีเซอรอลดิบที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล พบว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของกลีเซอรอล คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยเฉพาะออกซิเจนมีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 52.2 และรองลงมาเป็นอันดับสองมีคาร์บอนร้อยละ 39.1 จึงทำให้กลีเซอรอลสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ องค์ประกอบของกลีเซอรอลขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้และกระบวนการผลิต ตัวอย่างกลีเซอรอลจากวัตถุดิบเมล็ดมีสตาร์ด มีกลีเซอรอลต่ำกว่าร้อยละ 62 และน้ำมันถั่วเหลืองให้กลีเซอรอลร้อยละ 67.8 ปริมาณเมทานอลร้อยละ 23.4-37.5 [24]



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล [23]

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบในกลีเซอรอลดิบจากอุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซล [24]

ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
คาร์บอน	39.1
ไฮโดรเจน	8.7
ไนโตรเจน	0.0
ออกซิเจน	52.2
กำมะถัน	0.0

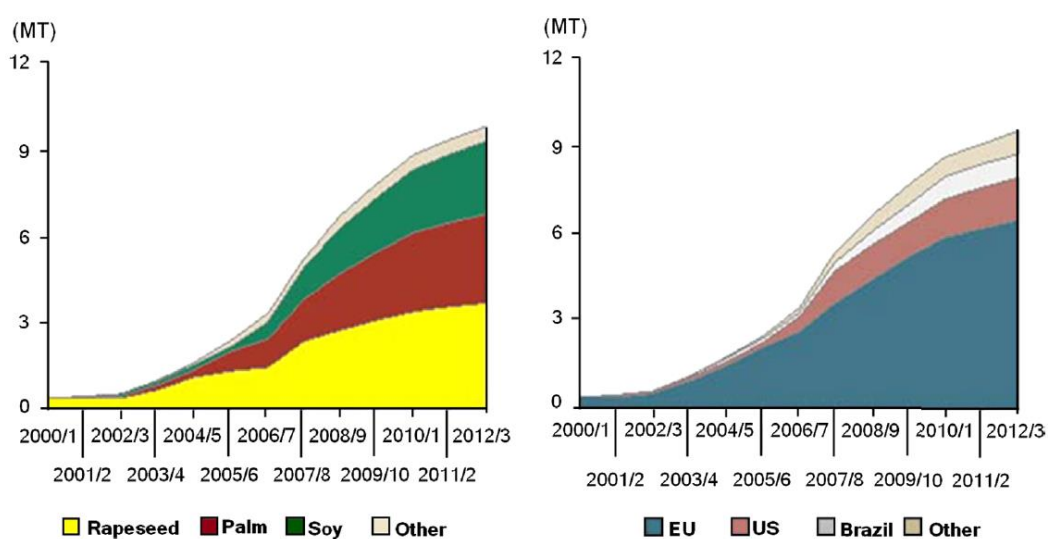
## 2.4 การผลิตและการตลาดของกลีเซอรอลทั่วโลก

การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพทั่วโลกได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะสหภาพยุโรปมีการเติบโตอย่างมากในการผลิตไบโอดีเซล สาเหตุสำคัญที่ทำให้การผลิตและความต้องการไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก และการปรับปรุงด้านพลังงานให้ยั่งยืน ทำให้มีผู้คนให้ความสนใจเพิ่มมากขึ้นทั่วโลก ซึ่งเป็นโอกาสที่จะเพิ่มการพัฒนาเศรษฐกิจของหลายประเทศ [25] แต่การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพใช้ผลผลิตทางการเกษตรเป็นวัตถุดิบ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เนื่องจากส่วนใหญ่ผลผลิตทางการเกษตรเกี่ยวข้องกับอาหาร เช่น ธัญพืช อ้อย และพืชน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมไบโอดีเซลจะมีการเติบโตที่ดีขึ้นกับการใช้ประโยชน์ของกลีเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้ของไบโอดีเซล [26]

### 2.4.1 การผลิตไบโอดีเซลและกลีเซอรอลทั่วโลก

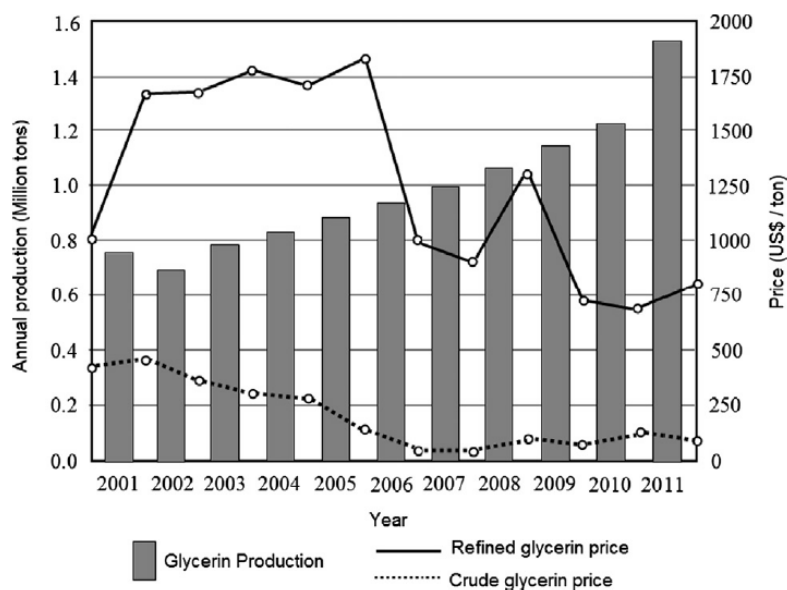
สหภาพยุโรปได้ผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรมมาตั้งแต่ปี 1992 ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่ของเครื่องยนต์ดีเซล หากอนาคตไบโอดีเซลมีการเติบโตอย่างยั่งยืน กลีเซอรอลดิบที่เป็นผลพลอยได้จะเพิ่มขึ้นในตลาดโลกด้วย ในปี 2003 สหภาพยุโรปเป็นผู้ผลิตไบโอดีเซลรายใหญ่ที่สุด ผลิตไบโอดีเซลได้ร้อยละ 82 ของโลก รองลงมาคือสหรัฐอเมริกา บราซิล และประเทศอื่นที่มีการผลิตไบโอดีเซล จากนั้นในปี 2007 สหภาพยุโรปและสหรัฐอเมริกามีการเติบโตเศรษฐกิจไบโอดีเซลอย่างเห็นได้ชัด จากประเทศสมาชิกมีความต้องการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพร้อยละ 5.75 และคาดว่าจะเพิ่มสูงขึ้นถึง 10 ล้านตันต่อปี ซึ่งหมายความว่าจะมีกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ 1 ล้านตันต่อปี ในปี 2008 พบว่าทั่วโลกมีการผลิตไบโอดีเซลถึง 11.1 ล้านตันต่อปี โดยสหภาพยุโรปผลิตไบโอดีเซลได้ร้อยละ 60 สหรัฐอเมริกาผลิตไบโอดีเซลได้ร้อยละ 20 และผู้ผลิตรายอื่นผลิตไบโอดีเซลได้ร้อยละ 20 ในปี 2009 สหภาพยุโรปรายงานการผลิตไบโอดีเซลได้ 20.9 ล้านตันต่อปี โดยประเทศฝรั่งเศสและเยอรมนีผลิตได้มากกว่า 7.7 ล้านตันต่อปี สอดคล้องกับการผลิตน้ำมันพืชทั่วโลกที่เพิ่มขึ้นทุกปีจากปี

2007/08–2012/13 มีการผลิตน้ำมันพืชทั่วโลกเพิ่มขึ้นจาก 128.8–159.64 ล้านตันต่อปี อย่างไรก็ตามในปี 2013 ราคาน้ำมันดีเซลลดลงและอัตราค่าไร่ที่ผันผวนส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมไบโอดีเซลในเชิงลบ ทำให้มีกำลังการผลิตไบโอดีเซลลดลงร้อยละ 25 ตลาดกลีเซอรอลมีความอึมตัว รูปที่ 2.8 แสดงการใช้น้ำมันพืชสำหรับการผลิตไบโอดีเซลทั่วโลก น้ำมันเมล็ดเรพและน้ำมันถั่วเหลืองส่วนใหญ่ใช้เป็นวัตถุดิบในสหภาพยุโรปและสหรัฐอเมริกา น้ำมันปาล์มใช้เป็นวัตถุดิบในประเทศมาเลเซียและอินโดนีเซีย [27]



รูปที่ 2.8 การใช้น้ำมันพืชสำหรับการผลิตไบโอดีเซลทั่วโลก [27]

ในสหภาพยุโรปและสหรัฐอเมริกากลีเซอรอลดิบส่วนใหญ่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันพืช และไขมันวัว โดยทวีปเอเชีย-แปซิฟิกเป็นผู้ผลิตกลีเซอรอลใหญ่ที่สุดในโลก ในปี 2007 กลีเซอรอลมากกว่าร้อยละ 44 ผลิตในเอเชีย ในขณะที่กลีเซอรอลร้อยละ 35 ผลิตในยุโรปตะวันตก ตั้งแต่ในปี 2002–2011 กลีเซอรอลทั่วโลกมีการผลิตสูงขึ้นทุกปี จากประมาณ 750,000 ตันต่อปี เพิ่มขึ้นไปถึง 1.5 ล้านตันต่อปี ดังในรูปที่ 2.9 [6]



รูปที่ 2.9 แสดงการผลิตและราคากลิเซอรอลทั่วโลก [6]

#### 2.4.2 การตลาดไบโอดีเซลและกลีเซอรอล

การผลิตไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้นทำให้กลีเซอรอลเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและตลาดอยู่ในช่วงอึมครึม ในปี 2005 ความต้องการกลีเซอรอลของโลกอยู่ที่ประมาณ 900,000 ตัน ในปี 2007 เอเชียเป็นผู้บริโภครายใหญ่ที่สุดของกลีเซอรอลถึงร้อยละ 28 อันดับสองเป็นยุโรปตะวันตกร้อยละ 25 และสุดท้ายอเมริกาเหนือ โดยทั่วไปยุโรปเป็นผู้นำเข้ากลีเซอรอลจากแถบเอเชีย และส่วนสหรัฐอเมริกาเป็นผู้นำเข้ากลีเซอรอลจากประเทศอินโดนีเซีย มาเลเซีย อาร์เจนตินา และยุโรป ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาจีนเป็นประเทศผู้นำเข้ารายใหญ่ แทนสหรัฐอเมริกา เพราะต้นทุนการขนส่งสินค้าที่เพิ่มมากขึ้น ในปี 2009 ทวีปเอเชีย-แปซิฟิกเริ่มเข้าสู่ตลาดยุโรปเป็นตลาดใหญ่ที่สุดจนถึงปัจจุบัน มีการใช้กลีเซอรอลเพิ่มขึ้นในหลายส่วน เช่น ยา สุขอนามัย อาหาร และเครื่องดื่ม ทำให้เป็นตลาดที่มีการเติบโตเร็วที่สุดในโลก คาดการณ์ว่าจะมีการเติบโตร้อยละ 3.3 ต่อปี ควบคู่ไปกับกลีเซอรอลที่เพิ่มความบริสุทธิ์เป็นตลาดใหม่ที่ตอบโจทย์ความต้องการของผู้ซื้อมากขึ้น ถัดมาในปี 2010 เอเชียยังคงเป็นตลาดส่งออกกลีเซอรอลที่ใหญ่ที่สุดเนื่องจากความต้องการกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นสำหรับการใช้งานหลายประเภท รวมทั้งตลาดใหม่สำหรับกลีเซอรอลที่เพิ่มความบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตาม ตลาดกลีเซอรอลทั่วโลกเป็นลักษณะที่คาดเดาไม่ได้และซับซ้อนเนื่องจากเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซล เห็นได้จากในปี 2008-2009 การผลิตสารเคมีจากความต้องการของกลุ่มการใช้งานต่างๆ ลดลง ทำให้ความต้องการกลีเซอรอลลดลง ตลาดกลีเซอรอลคาดการณ์ว่าจะฟื้นตัวภายในปี 2011/2012 และจะรักษาอัตราการเติบโตในปีต่อ ๆ ไป และในปี 2016 กลีเซอรอลจะเป็นที่ยอมรับในการใช้งานต่างๆ ในจีนร้อยละ 27 การเติบโตของการส่งออกกลีเซอรอลในประเทศไทย อินโดนีเซีย และมาเลเซียจะมีอัตราการ

เดบิตที่สูงขึ้น และการบริโภคในเอเชียจะเพิ่มขึ้นอย่างมากถึงร้อยละ 45 ของปริมาณกลีเซอรอลทั้งหมดในปี 2016 [28-31]

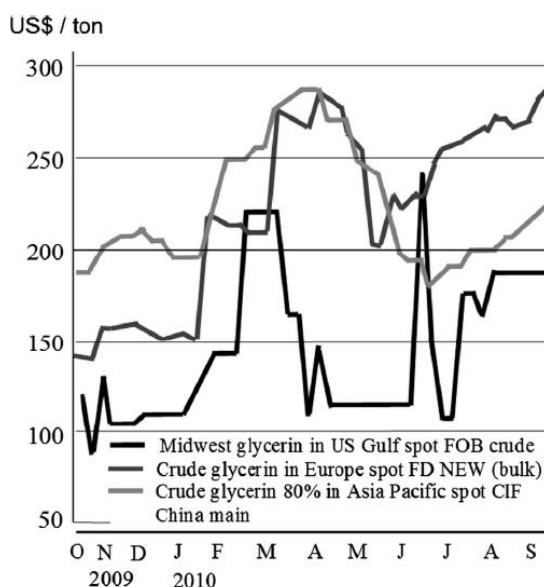
### 2.4.3 ราคากลีเซอรินหรือกลีเซอรอลทั่วโลก

ตั้งแต่ปี 1970–2004 กลีเซอรินหรือกลีเซอรอลที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าร้อยละ 95 มีราคาเฉลี่ยระหว่าง 1200–1800 เหรียญสหรัฐฯต่อตัน ดังรูปที่ 2.10 เมื่อราคากลีเซอรอลสูงผู้ใช้สามารถนำกลีเซอรอลไปใช้ในด้านต่างๆ เช่น สารให้ความหวาน และการสังเคราะห์กลีเซอรอล ในขณะที่ราคากลีเซอรอลต่ำสามารถนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตัวอื่น ราคากลีเซอรอลมีแนวโน้มเป็นไปตามตลาดปิโตรเคมี มูลค่ากลีเซอรอลมีความสำคัญต่อรูปแบบธุรกิจ ในปี 2005 ราคากลีเซอรอลลดลงอย่างคงที่และปริมาณของกลีเซอรอลที่มีจำนวนมาก บริษัทที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกลีเซอรอลจึงหันมาแก้ไขปัญหาในการทำกลีเซอรอลให้บริสุทธิ์ ตลาดในยุโรปที่มีการผลิตกลีเซอรอลในท้องถิ่นและการนำเข้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วซึ่งมีบทบาทสำคัญในการกำหนดราคา ทำให้ราคากลีเซอรอลดิบลดลงภายในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา กลีเซอรอลส่วนใหญ่มาจากน้ำมันปาล์มในประเทศมาเลเซียและอินโดนีเซีย (ผู้ผลิตกลีเซอรอลที่ใหญ่ที่สุด) มีส่วนทำให้ราคากลีเซอรอลลดลง ในปี 2006 ราคากลีเซอรอลค่อนข้างคงที่ 600 เหรียญสหรัฐฯต่อตัน และมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการผลิตไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 ส่วนราคากลีเซอรอลดิบในปี 2006 (กลีเซอรอลร้อยละ 80) มีราคา 148 เหรียญสหรัฐฯต่อตัน ดังรูปที่ 2.9 และ 2.10 แสดงให้เห็นถึงสถิติของราคากลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลที่บริสุทธิ์ ผู้ผลิตไบโอดีเซลจึงจัดเก็บกลีเซอรอลเพื่อรอตลาดที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม กลีเซอรอลเป็นสินค้าและราคาที่มีความผันผวนสูงดังรูปที่ 2.11 ในปี 2007 ราคากลีเซอรอลที่บริสุทธิ์มีราคาต่ำอยู่ในช่วง 440–660 เหรียญสหรัฐฯต่อตัน ขึ้นอยู่กับคุณภาพและความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอล เมื่อปี 2010 ราคากลีเซอรอลจากน้ำมันพืชในตะวันออกเฉียงเหนือของยุโรปอยู่ที่ 462–506 เหรียญสหรัฐฯต่อตัน ในเอเชีย 506–550 เหรียญสหรัฐฯต่อตัน และสหรัฐอเมริกา 594–682 เหรียญสหรัฐฯต่อตัน ต่อมาในปี 2012 กลีเซอรอลจากน้ำมันพืชมีราคา 925–1080 เหรียญสหรัฐฯต่อตัน และจากไขมันสัตว์ 892–1069 เหรียญสหรัฐฯต่อตัน แต่ราคากลีเซอรอลดิบลดลงอย่างต่อเนื่องจากราคา 500–571 เหรียญสหรัฐฯต่อตัน ไปอยู่ที่ช่วงราคา 380–450 เหรียญสหรัฐฯต่อตัน จะเห็นว่าราคากลีเซอรอลดิบมีแนวโน้มลดลงและกลีเซอรอลที่บริสุทธิ์มีราคาค่อนข้างคงที่ งานวิจัยนี้จึงหาทางแก้ไขโดยการนำกลีเซอรอลมาผลิตเป็นอนุพันธ์ของกลีเซอรอล เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับกลีเซอรอล [6]





รูปที่ 2.10 สถิติราคากลิเซอรอลที่บริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 [6]



รูปที่ 2.11 ความผันผวนของราคากลิเซอรอลในตลาดโลก [6]

## 2.5 สถานการณ์กลีเซอรอลในประเทศไทย

ในปี 2015 กลีเซอรอลในประเทศไทยมีการส่งออกประมาณ 3 ล้านลิตรต่อปี ซึ่งเป็นผู้ส่งออกกลีเซอรอลเป็นอันดับสองของอาเซียนรองจากอินโดนีเซีย ที่มีปริมาณกลีเซอรอลส่งออกสูงมากถึงประมาณ 180 ล้านลิตรต่อปี สูงเป็นอันดับสองของโลก อินโดนีเซียมีความแข็งแกร่งของอุตสาหกรรมในด้านการปลูกปาล์มน้ำมันที่เป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำ แต่การนำกลีเซอรอลไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์รูปแบบต่างๆ ยังไม่ค่อยมีความพร้อม ทำให้ต้องส่งออกกลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นหลัก จึงเป็นข้อได้เปรียบของไทยที่มีความแข็งแกร่งอุตสาหกรรมทั้งสองด้านในแง่การปลูกปาล์มน้ำมันและยังสามารถเพิ่มมูลค่าให้แก่กลีเซอรอลได้อย่างหลากหลายด้วยการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์รูปแบบต่างๆ โดยมูลค่าการแปรรูปกลีเซอรอลจะสูงกว่าการขายกลีเซอรอลบริสุทธิ์ถึง 7 เท่า ทำให้ประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำที่สามารถควบคุมต้นทุนการผลิตได้ตลอดทั้งสายการผลิต

ประกอบกับประเทศไทยมีชื่อเสียงและความแข็งแกร่งผลิตภัณฑ์แบรนด์ไทยที่มีความเป็นเอกลักษณ์ ทำให้สามารถดึงดูดผู้ซื้อจากประเทศต่างๆ ได้ แต่ไทยมีข้อเสียเปรียบอินโดนีเซียในด้านต้นทุนวัตถุดิบ ปาล์มน้ำมันที่สูงกว่ามาก เนื่องจากมีพื้นที่ในการเพาะปลูกน้อย และผลผลิตต่อไร่ต่ำ ทำให้ต้นทุนต่อหน่วยสูงกว่า ดังนั้นไทยจึงหาทางแก้ไขในการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันให้เพิ่มผลผลิตต่อไร่ในพื้นที่ที่จำกัดให้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องตามแผนพัฒนาพลังงานทางเลือกของไทยฉบับล่าสุดที่ตั้งเป้าหมายว่าในปี ค.ศ. 2026 [32] จะผลิตไบโอดีเซลให้ได้ 10 ล้านลิตรต่อวัน ทำให้มีกลีเซอรอลผลิตออกมาได้มากกว่า 1 ล้านลิตรต่อวัน และทำให้ต้นทุนวัตถุดิบต่อหน่วยต่ำลง ส่งผลทำให้ไทยสามารถแข่งขันกับผู้ส่งออก รายใหญ่อย่างอินโดนีเซียได้ โดยมีความข้อได้เปรียบของอุตสาหกรรมตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ ปัจจุบัน อินโดนีเซียมีการส่งออกกลีเซอรอลอยู่ที่ 5 แสนลิตรต่อวันได้ ในอนาคตศูนย์วิจัยเศรษฐกิจและธุรกิจ ของธนาคารประเทศไทย คาดการณ์ว่าไทยมีโอกาสสูงที่จะเป็นผู้ส่งออกกลีเซอรอลบริสุทธิ์ และการ แปรรูปกลีเซอรอลในรูปแบบผลิตภัณฑ์แบบต่างๆ เนื่องจากแผนพัฒนาพลังงานทางเลือกของไทยปี ล่าสุด สนับสนุนให้มีการเพิ่มผลิตไบโอดีเซลและความต้องการใช้ไบโอดีเซล ทำให้มีกลีเซอรอลซึ่งเป็น ผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซลออกมามาก นอกจากนี้ภาครัฐมีนโยบายส่งเสริมผลักดันให้ไทยเป็น ศูนย์กลางของอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เพราะไทยมีความพร้อมของอุตสาหกรรมตั้งแต่ต้นน้ำไปถึง ปลายน้ำ ซึ่งจะทำให้ไทยมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมในอาเซียน ทั้งการส่งออกในรูปแบบ กลีเซอรอลบริสุทธิ์เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบ และรูปแบบผลิตภัณฑ์ของกลีเซอรอลจากการแปรรูป ซึ่งช่วย สนับสนุนภาคการส่งออกของประเทศ เป็นการเพิ่มรายได้และขยายตลาดให้ผู้ประกอบการไทยต่อไป ในอนาคต [33]

## 2.6 ทางเลือกสำหรับการใช้กลีเซอรอล

กลีเซอรอลสามารถเปลี่ยนเป็นรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์มากมาย โดยกระบวนการทาง เคมีและทางชีวภาพ ในปี 2013 ผู้ผลิตกลีเซอรอลในยุโรปได้ริเริ่มโครงการผลิตกลีเซอรอลเป็น ผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าในอุตสาหกรรม กำหนดวัตถุประสงค์เพื่อหาทางออกและใช้เทคโนโลยีในการ เปลี่ยนกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์ เมื่อเร็ว ๆ นี้มีงานวิจัยมุ่งเน้นการใช้กลีเซอรอลในการ สร้างสารประกอบต่างๆ ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจน สารเติมแต่งเชื้อเพลิง สารตั้งต้นสำหรับการหมัก เป็นอาหารสัตว์ การสร้างเมทานอลในการบำบัดน้ำเสียและอื่น ๆ [34]

### 2.6.1 การสังเคราะห์ทางเคมี

กลีเซอรอลเป็นวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตสารเคมีที่มีการใช้งานที่หลากหลาย โครงสร้าง ของกลีเซอรอลมีกลุ่มไฮดรอกซิลที่ช่วยในการเปลี่ยนรูปทางชีวเคมีของกลีเซอรอลเป็นสารเคมีที่มี มูลค่ามากกว่ากลุ่มไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากปิโตรเคมี เช่น การผลิต 1,3-โพรเพนไดออลเพื่อใช้เป็น

องค์ประกอบเคมีในการผลิตพอลิไตรเมทิลลีนเทรฟทาเลต ซึ่งเป็นพอลิเอสเตอร์ชนิดใหม่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเส้นใยเพราะมีความยืดหยุ่น คงทนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [35] การผลิตสารประกอบพอลิออลใช้กลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตโพรพอลิยูรีเทน [36]

### 2.6.2 สารเพิ่มคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง

กลีเซอรอลสามารถเปลี่ยนเป็นโมเลกุลที่มีหมู่ออกซิเจน เช่น แอลกอฮอล์ และอีเทอร์ ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมกับน้ำมันเบนซิน ดีเซลและไบโอดีเซล สารเพิ่มคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากกลีเซอรอลจะช่วยเพิ่มสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล เช่น การเพิ่มค่าออกเทน ลดจุดหมอก เพิ่มความหนืด และปรับปรุงสมบัติที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้เป็นสารที่ไม่อันตรายและไม่ก่อปัญหามลพิษทางอากาศ [21] ปัจจุบันมีการลดใช้สารเมทิลเทอที่รีบิวทิลอีเทอร์ที่ใช้เป็นสารเพิ่มคุณภาพน้ำมันเบนซิน เพราะเป็นสารที่อันตราย แล้วใช้สารเคมีตัวอื่นที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจากแหล่งกลีเซอรอลที่เป็นพลังงานทดแทน [37]

### 2.6.3 การผลิตไฮโดรเจน

การผลิตไฮโดรเจน จากการเปลี่ยนกลีเซอรอลเป็นแก๊สไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยารีฟอร์มมิงในเฟสน้ำเป็นกระบวนการรีฟอร์มมิงแบบขั้นตอนเดียวซึ่งง่ายต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและง่ายต่อการทำแก๊สไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์ด้วยการทำปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับน้ำได้ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการที่ 2.1 [38]



กระบวนการนี้ดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ และก่อให้เกิดสารประกอบแอลเคน มีเทน อีเทน และโพรเพนที่มีความเข้มข้นที่ต่ำ ปฏิกิริยาการก่อเกิดสารประกอบแอลเคนเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนซึ่งจะช่วยในการเกิดไฮโดรเจนซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายในการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงในเฟสน้ำเท่ากับ 3.04 ปอนด์ต่อกิโลกรัมไฮโดรเจน ซึ่งสูงกว่าการผลิตจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ที่ใช้แก๊สธรรมชาติเป็นสารป้อนซึ่งมีราคา 2.66 ปอนด์ต่อกิโลกรัมไฮโดรเจน แต่ก็ต่ำกว่าการผลิตไฮโดรเจนด้วยการแยกสลายด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีต้นทุนอยู่ที่ 4.94 ปอนด์ต่อกิโลกรัมไฮโดรเจน

### 2.6.4 ไพรโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน

เทคโนโลยีไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นควบคู่กัน กล่าวคือนำชีวมวลเมื่อถูกทำให้แห้งโดยการระเหยความชื้นทิ้งไปแล้วจะนำความร้อนจากการเผาไหม้มาทำให้ตัวเองเกิดการแตกสลายทางความร้อนและกลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ขณะเดียวกันมักมีการจ่าย

ออกซิโดเซอร์เข้ามาบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาด้วยเพื่อช่วยให้เกิดการเผาไหม้บางส่วน ซึ่งจะได้ความร้อนเกิดขึ้นมาจากปฏิกิริยาและนำไปใช้ในกระบวนการแตกสลายทางความร้อน ดังนั้นไพโรไลซิสและแกซิฟิเคชัน มักเกิดขึ้นควบคู่กัน ผลิตรัศที่ได้อาจอยู่ในรูป แก๊ส น้ำมันชีวภาพ (bio-oil) และถ่าน โดยส่วนใหญ่จะนำกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและวัตถุดิบทางชีวภาพเช่น เศษวัสดุปาล์มและเมล็ดพืช มาใช้เป็นวัตถุดิบร่วมในกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปทางเคมีด้วยความร้อน โดยได้ผลิตรัศหลักที่ได้คือ น้ำมันชีวภาพ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และทาร์ [39]

### 2.6.5 กระบวนการหมักทางชีวภาพ

กลีเซอรอลเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับจุลินทรีย์โดยเริ่มต้นเกิดปฏิกิริยาการสร้างกรดของกระบวนการชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาการสร้างมีเทนซึ่งเป็นผลิตรัศที่ได้จะเป็นแก๊สชีวภาพ ซึ่งได้ผลิตรัศหลักคือ มีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกระบวนการเปลี่ยนกลีเซอรอลด้วยเชื้อจุลินทรีย์จะต้องใช้กลีเซอรอลที่ค่อนข้างเจือจางและได้แก๊สชีวภาพที่มีค่าความร้อนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กลีเซอรอลเป็นเชื้อเพลิงร่วมเพื่อผลิตพลังงานความร้อน [40] กระบวนการเปลี่ยนรูปกลีเซอรอลเป็นผลิตรัศหลายประเภทด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เช่น การผลิต 1,3-โพรเพนไดออล แอซิเตด บิวทิเรต บิวทานอล เอทานอล ไฮโดรเจน และกรดอินทรีย์อื่นๆ [41] โดยเชื้อจุลินทรีย์ที่มีความสามารถหมักกลีเซอรอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ Clostridium [42], Lactobacillus [43] และ Klebsiella [44] โดยเชื้อจุลินทรีย์ชนิด Klebsiella มีความทนทานต่อกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้นสูง เหมาะในการสังเคราะห์ 1,3-โพรเพนไดออลออกจากกลีเซอรอลดิบ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำคัญสำหรับใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ เช่น พอลิเอสเทอร์ และพอลิยูรีเทน

### 2.6.6 การผลิตเมทานอล

เมทานอลเป็นสารตัวกลางในการสังเคราะห์สารเคมีจำนวนมาก ใช้เป็นเชื้อเพลิงภายในเครื่องยนต์เผาไหม้โดยตรงหรือผสมกับน้ำมันเบนซิน และเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล การนำเมทานอลที่เหลือในกลีเซอรอลดิบผ่านกระบวนการต่างๆ นำกลับไปใช้ใหม่ ช่วยลดต้นทุนการผลิตไบโอดีเซล โดยการเปลี่ยนกลีเซอรอลเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยารีฟอร์มมิงในเฟสของน้ำและเปลี่ยนเป็นเมทานอล ซึ่งในกลีเซอรอลดิบมีแหล่งคาร์บอนร้อยละ 60 จะได้เมทานอลสูงสุดเท่ากับ 0.62 กิโลกรัมของเมทานอลต่อกิโลกรัมของกลีเซอรอลดิบ [45]

### 2.6.7 แหล่งคาร์บอนในการบำบัดน้ำเสีย

การกำจัดไนเตรตออกจากน้ำเสียต้องอาศัยแหล่งคาร์บอนที่เป็นอาหารของแบคทีเรียในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน แหล่งคาร์บอนที่ใช้มีหลายชนิด เช่น เอทานอล เมทานอล กรดแอซิติค

เป็นต้น ในต่างประเทศนิยมใช้เมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนเพราะมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับสารอื่นๆ แต่ในประเทศไทยมีการลงทุนในการบำบัดน้ำเสียค่อนข้างต่ำ จำเป็นต้องศึกษาแหล่งคาร์บอนทางเลือกสำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรต แนวทางหนึ่งคือการนำกลีเซอรอลดิบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซลไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับแบคทีเรียในการกำจัดไนเตรต ซึ่งจะช่วยในการลดต้นทุนการบำบัดน้ำเสียและเป็นการกำจัดผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้อีกทางหนึ่ง [46]

## 2.7 มอนอกลิเซอไรด์

มอนอกลิเซอไรด์เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันเพียงหนึ่งโมเลกุลและส่วนที่เหลือเป็นหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ 2 หมู่ มอนอกลิเซอไรด์ไม่ค่อยพบมากในธรรมชาติ แต่จะพบในไขมันที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ไม่สมบูรณ์ โดยจะมีประโยชน์ในการนำไปใช้สังเคราะห์หรือดัดแปลงโครงสร้างไตรกลีเซอไรด์ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจหรือนำมอนอกลิเซอไรด์ไปใช้เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ในผลิตภัณฑ์อาหาร ยา และเครื่องสำอางชนิดต่างๆ โดยทั่วไปมอนอกลิเซอไรด์มีโครงสร้างแบบ 2 ไอโซเมอร์คือ แบบแอลฟา ( $\alpha$ ) และเบตา ( $\beta$ ) ดังรูปที่ 2.12 [3] ซึ่งมอนอกลิเซอไรด์ไอโซเมอร์แบบแอลฟา มีจำนวนมากกว่าไอโซเมอร์แบบเบตา



1-monoacylglyceride (Alpha-monoacylglyceride)

2-monoacylglyceride (Beta-monoacylglyceride)

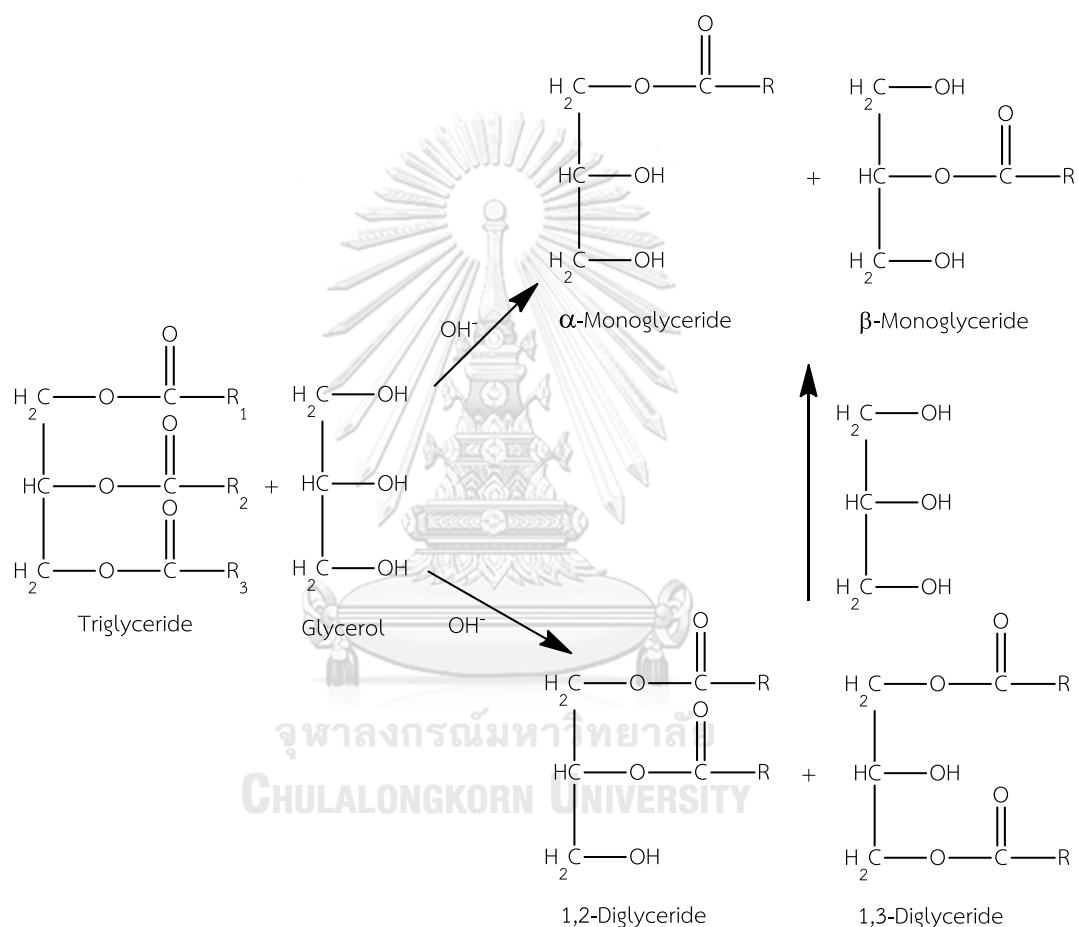
รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีทั่วไปของมอนอกลิเซอไรด์ [3]

## 2.7.1 การสังเคราะห์

ในอุตสาหกรรมมอนอกลิเซอไรด์สามารถสังเคราะห์ได้จาก 3 ปฏิกริยาหลัก ได้แก่

### 2.7.1.1 ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์

ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับกลีเซอรอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาเอกพันธ์หรือวิวิธพันธุ์ชนิดเบส ภายใต้ภาวะไนโตรเจน ที่ช่วงอุณหภูมิ 250–255 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.13 [9]

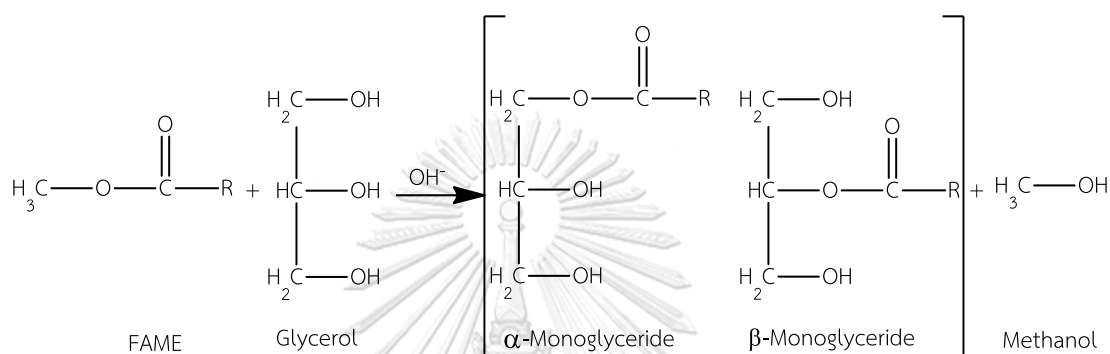


รูปที่ 2.13 ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์และกลีเซอรอล [9]

### 2.7.1.2 ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

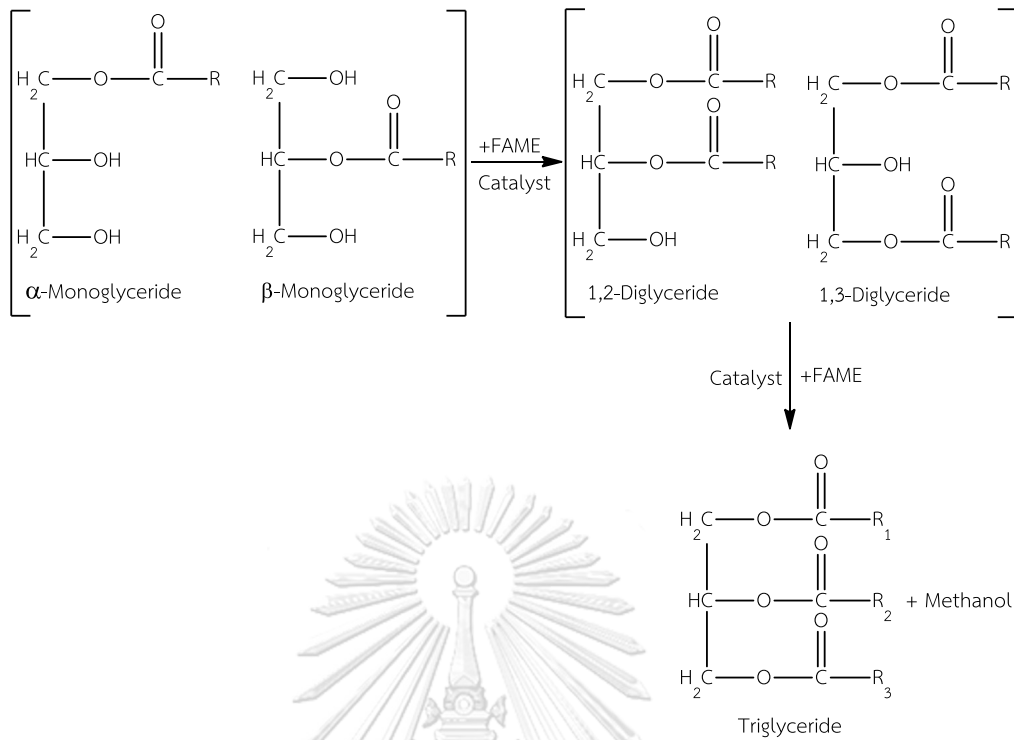
ปฏิกริยากลิเซอโรไลซิสระหว่างเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอรอล ดังรูปที่ 2.14 [1] เป็นปฏิกริยาที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์มอนอกลิเซอไรด์ เพราะใช้เวลาการเกิดปฏิกริยาน้อยกว่าปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมัน โดยเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ใช้เป็นสารตั้งต้นได้มาจากปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ซึ่งสามารถแยก

ให้บริสุทธิ์ได้ง่ายและมีฤทธิ์การกัดกร่อนน้อยกว่ากรดไขมัน นอกจากนี้ข้อดีของการใช้เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสสามารถละลายเข้ากับกลีเซอรอลได้ดีกว่าไตรกลีเซอไรด์ ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจึงเกิดได้ที่อุณหภูมิไม่สูงมาก ช่วงอุณหภูมิ 120–230 องศาเซลเซียส และปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิสูงประมาณ 260 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการมีการปนเปื้อนของเมทานอลจึงไม่เหมาะกับการใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร



รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและกลีเซอรอล [1]

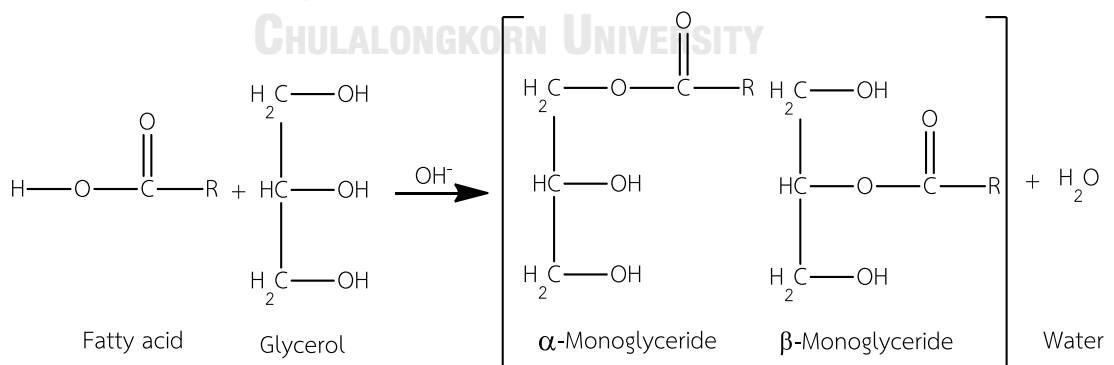
มอนอกลิเซอไรด์ที่เกิดผ่านปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสระหว่างเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เป็นสารตั้งต้นได้เป็นไดกลีเซอไรด์และไตรกลีเซอไรด์ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.15 [1] ซึ่งมอนอกลิเซอไรด์ที่สังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดไขมันกับกลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบเดียวกัน



รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของมอนอกลิเซอไรด์ ไคกลิเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ [1]

### 2.7.1.3 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมัน

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดไขมันกับกลีเซอรอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์หรือวิวิธพันธุ์ชนิดกรด ภายใต้ภาวะไนโตรเจน ที่ช่วงอุณหภูมิ 140–160 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.16 [8]



รูปที่ 2.16 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมัน [8]



## 2.7.2 วิธีการผลิตมอนอกลิเซอไรด์

ในกระบวนการผลิตมอนอกลิเซอไรด์ในระบบโรงงานอุตสาหกรรม จะผลิตโดยกระบวนการกลีเซอโรไลซิสน้ำมันและไขมันโดยวิธีทางเคมีตามแต่ละวิธีที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอนอกลิเซอไรด์ในแต่ละวิธี

สารตั้งต้น	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ตัวทำละลาย	ภาวะที่เหมาะสม			
			อุณหภูมิ (°C)	เวลา (hr.)	อัตราส่วนโดย โมลของน้ำมัน ต่อ กลีเซอรอล	%MG
ไตรกลีเซอไรด์ [9]	KOH, Ca(OH) <sub>2</sub>	N/R	255	N/R	N/R	50.00
เมทิลโอเลเอต [1]	MgO	—	250	2	1:4.5	77.00
น้ำมันถั่วเหลือง [9]	[Bmim]Im	—	200	3	1:6	69.00
กรดปาล์มติก [10]	Novozyme 435	Act-ECO <sub>2</sub> *	50	5	1:3	58.68
น้ำมันดอกทานตะวัน [47]	—	Acetone	250	2	1:5	52.00
ไตรโอเลอิน [5]	—	i-Propanol	260	2.5	1:5	67.8

หมายเหตุ

\* Act-ECO<sub>2</sub> คือ acetone expanded-CO<sub>2</sub> N/R ไม่มีการรายงาน และ %MG คือ ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์

### 2.7.2.1 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

การผลิตมอนอกลิเซอไรด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบดั้งเดิมคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ได้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ประมาณ 40–50 ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ทำให้เกิดข้อเสียในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ยากและต้องผ่านกระบวนการทำให้เป็นกลางด้วยปฏิกิริยาสะเทินเกิดเป็นสบู่และเกลือที่สูง กลไกการเกิดปฏิกิริยาไกลีเซอโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ ดังรูปที่ 2.17 [9]

### ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

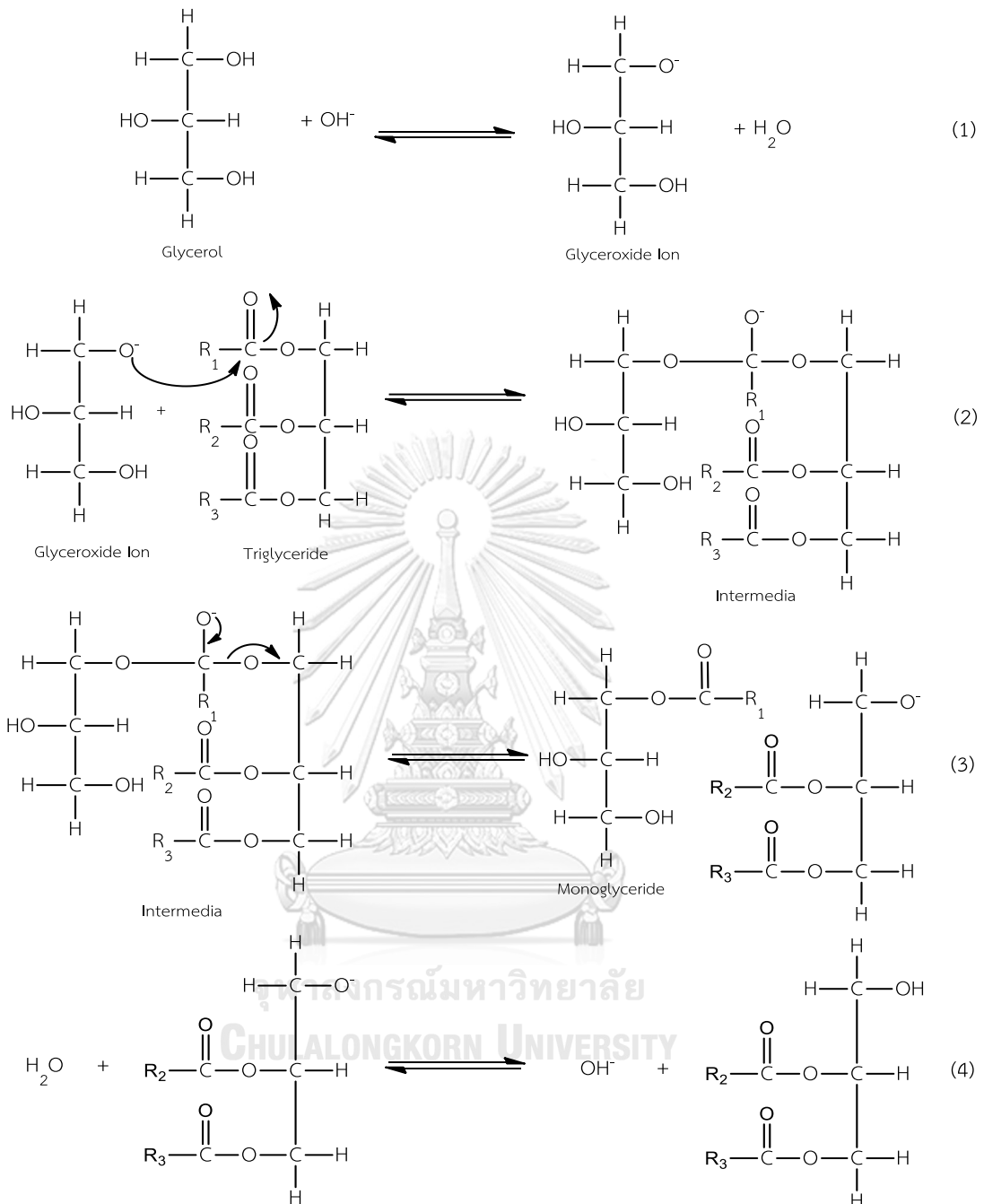
2.7.2.1.1 การทำปฏิกิริยาของโซเดียมไฮดรอกไซด์กับกลีเซอรอล โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ตั้งโปรตอนออกจากกลีเซอรอล ทำให้กลีเซอรอลเป็นประจุลบ เกิดเป็นกลีเซอไรด์ไอออน (Glyceroxide ion) กับเบสที่ถูกโปรตอน

2.7.2.1.2 โซเดียมดึงอิเล็กตรอนของออกซิเจนในหมู่คาร์บอนิลของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้คาร์บอนเป็นบวก กลีเซอไรด์ไอออนเข้าทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ ประจุลบของออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาที่คาร์บอนเป็นประจุบวก เกิดเป็นสารตัวกลาง (Intermedia)

2.7.2.1.3 เกิดการจัดเรียงโมเลกุลของสารตัวกลาง อิเล็กตรอนของออกซิเจนเคลื่อนที่กลับมาที่คาร์บอนทำให้เกิดพันธะคู่ และออกซิเจนของไตรกลีเซอไรด์ไปรับโปรตอนกลายเป็นประจุลบ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นมอนอกลิเซอไรด์ และไตรออกไซด์ไอออน

2.7.2.1.4 ดีโปรตอนชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไตรออกไซด์ไอออน ซึ่งทำให้ได้ไตรกลีเซอไรด์ เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงและตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสภาพพร้อมทำงานเช่นเดิม





รูปที่ 2.17 กลไกการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ [9]

### 2.7.2.2 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์

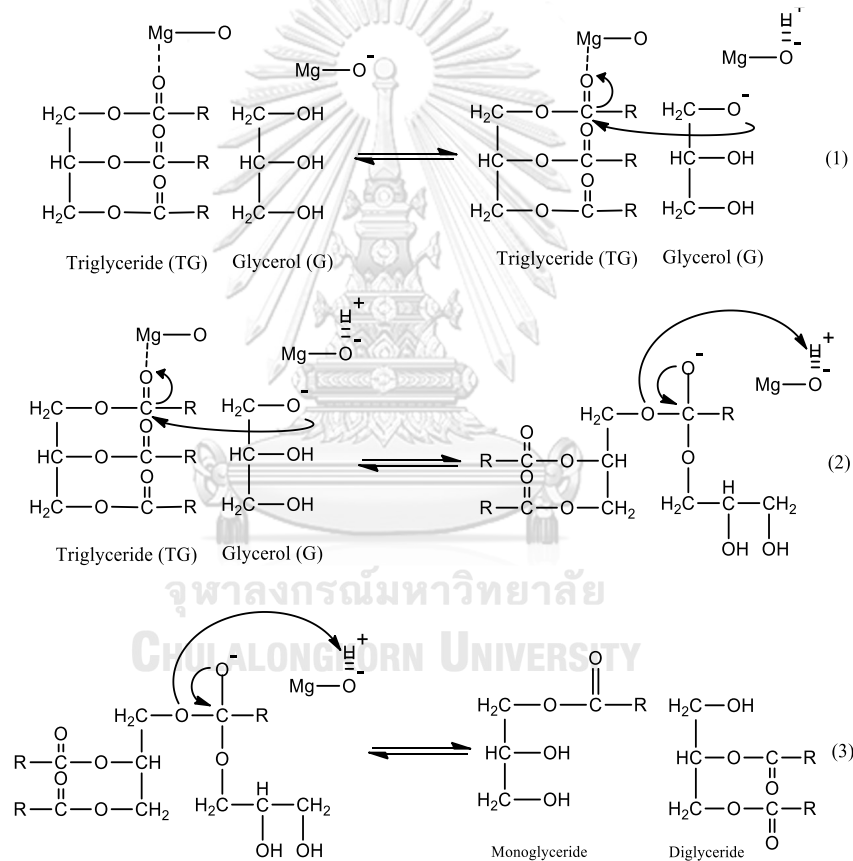
การผลิตมอนอกลิเซอไรด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์, ซิลิกาเมโซพอร์ MCM-41 และไฮโดรทัลไซต์ (Hydrotalcite) ซึ่งข้อดีแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่ายและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ข้อเสียมีอายุการใช้งานที่สั้น กลไกการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวซ์ แสดงดังรูปที่ 2.18 [1, 7]

### ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไกลเซอโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

2.7.2.2.1 แมกนีเซียมดึงอิเล็กตรอนของออกซิเจนในคาร์บอนิลกรู๊ปของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้คาร์บอนเป็นบวก ขณะเดียวกันแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ดึงโปรตอนออกจากกลีเซอรอล ทำให้กลีเซอรอลเป็นประจุลบ

2.7.2.2.2 ประจุลบของออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาที่คาร์บอนประจุบวก กลายเป็นสารตัวกลาง (intermedia)

2.7.2.2.3 อิเล็กตรอนของออกซิเจนเคลื่อนที่กลับมาที่คาร์บอนทำให้เกิดพันธะคู่ และออกซิเจนของไตรกลีเซอไรด์ไปรับโปรตอนจากแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นมอนอกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์



รูปที่ 2.18 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไกลเซอโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ [1]

### 2.7.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาของเหลวไอออนิกแอลคาไลน์

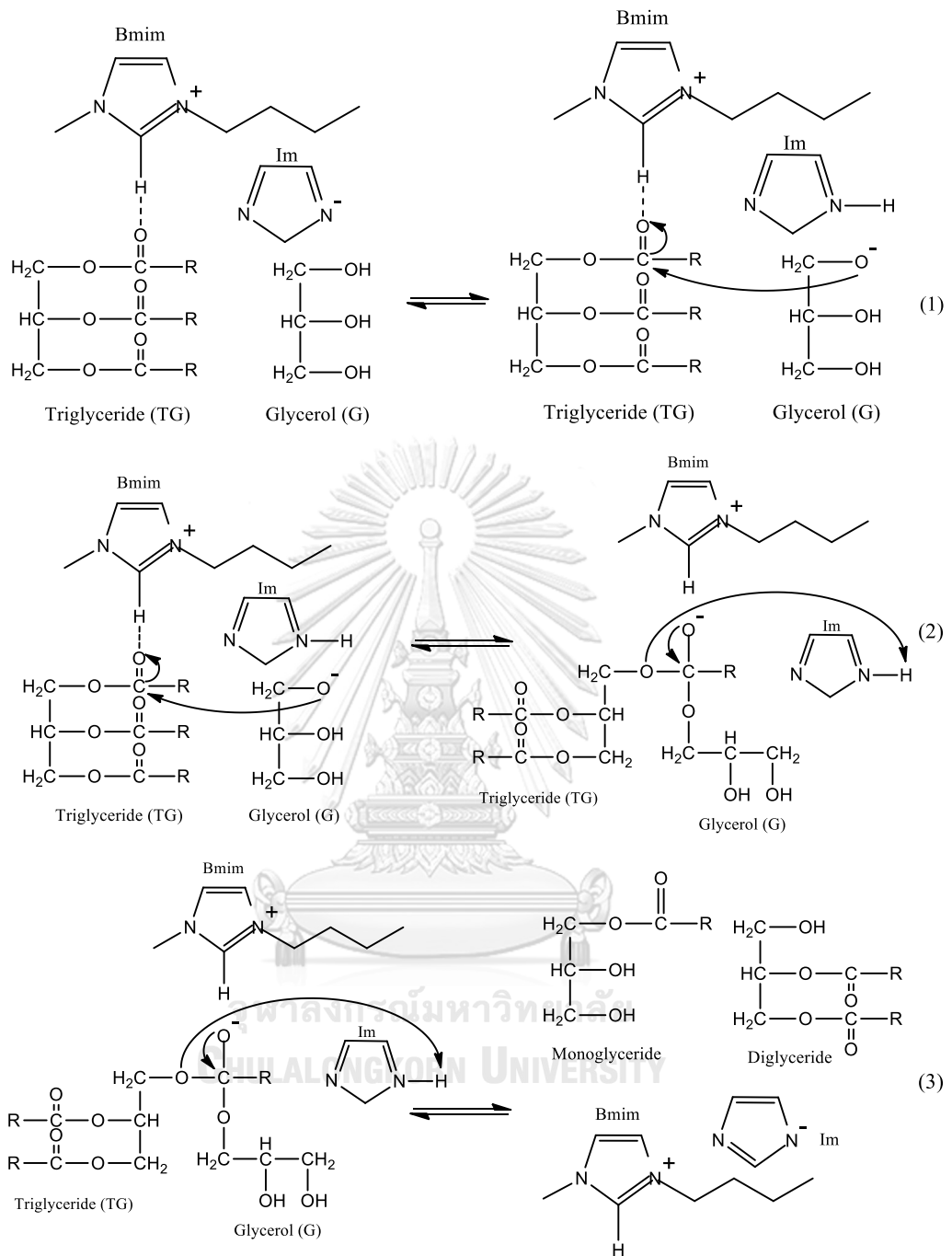
การผลิตมอนอกลิเซอไรด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของเหลวไอออนิกแอลคาไลน์ (Alkaline ionic liquid) เช่น 1-บิวทิล-3-เมทิลอิมิดาโซเลียมไฮดรอกไซด์ (1-Butyl-3-Methylimidazoliumhydroxide [Bmim]OH) และ 1-บิวทิล-3-เมทิลอิมิดาโซเลียมอิมิดาโซไรด์ (1-Butyl-3-Methylimidazoliumimidazolid [Bmim]Im) ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ประมาณ 69 สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และวิธพันธ์ ซึ่งข้อดีสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ แต่ข้อเสียของของเหลวไอออนิกแอลคาไลน์มีราคาแพงและมีขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ซับซ้อน แสดงดังรูปที่ 2.19 [9]

#### ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสแบบของเหลวไอออนิกแอลคาไลน์

2.7.2.2.1 อิมิดาโซเลียม (Bmim) ดึงอิเล็กตรอนของออกซิเจนในคาร์บอนิลกรุปของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้คาร์บอนเป็นบวก ขณะเดียวกันอิมิดาโซไรด์ (Im) ดึงไฮโดรเจนออกจากกลีเซอรอล ทำให้ออกซิเจนของกลีเซอรอลเป็นลบ

2.7.2.2.2 ประจุลบของออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาที่คาร์บอนประจุบวก กลายเป็นสารตัวกลาง (intermedia)

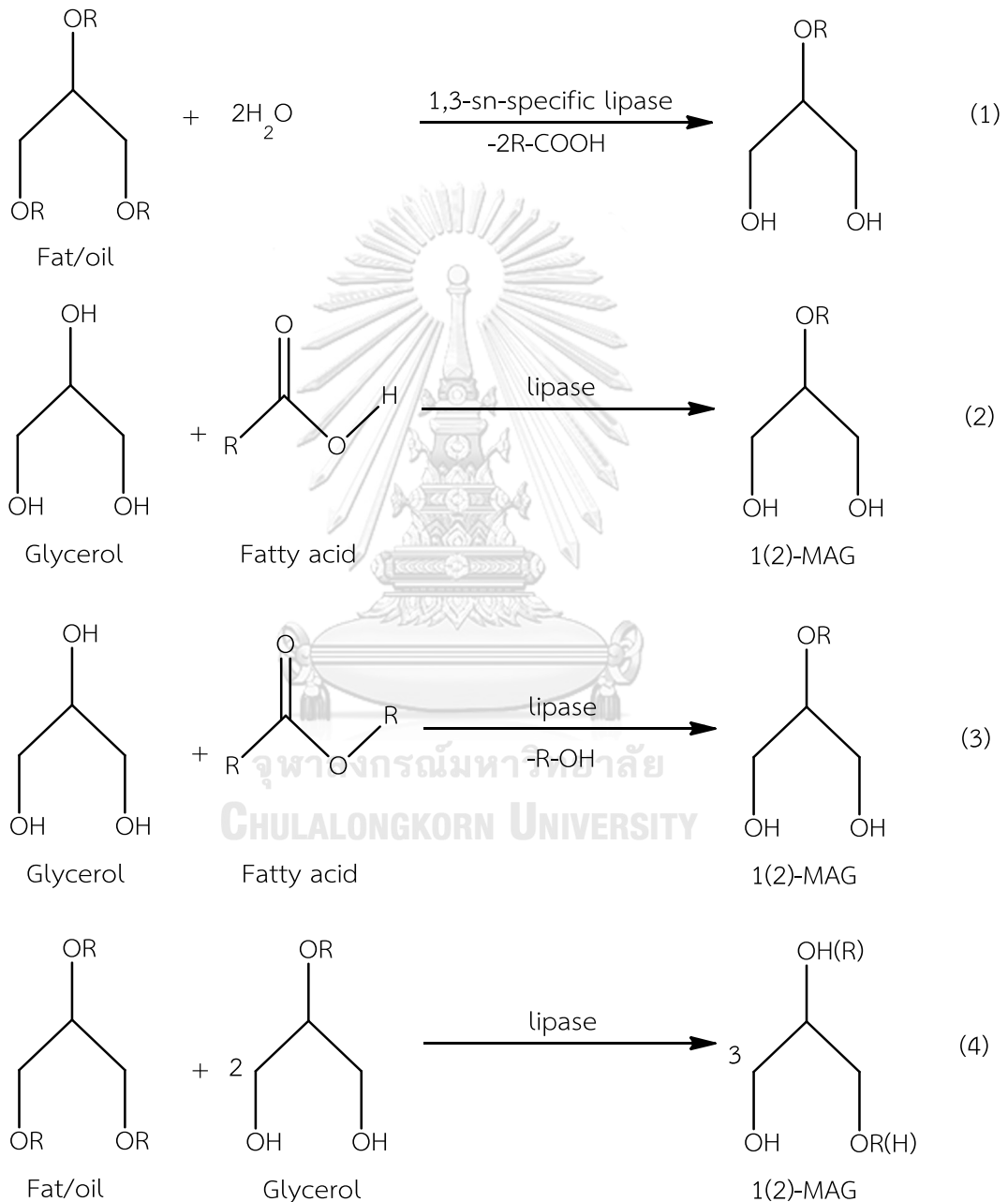
2.7.2.2.3 อิเล็กตรอนของออกซิเจนเคลื่อนที่กลับมาที่คาร์บอนทำให้เกิดพันธะคู่ และออกซิเจนของไตรกลีเซอไรด์ไปรับโปรตอนจากอิมิดาโซไรด์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นมอนอกลิเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์



รูปที่ 2.19 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเกลือโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของเหลวไอออนิกแอลคาลีน

### 2.7.2.4 การใช้เอนไซม์

การผลิตมอนอกลิเซอไรด์โดยใช้เอนไซม์ไลเปสดังรูปที่ 2.20 [10] มีข้อดีคือ เกิดปฏิกิริยาไม่รุนแรง เกิดได้ด้วยความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 30–50 องศาเซลเซียส ใช้ขนาดของถัง ปฏิกิริยาเล็กกว่า ทำให้ประหยัดพลังงาน ปฏิกิริยามีความจำเพาะสูง เกิดของเสียและวัสดุเหลือทิ้งน้อย แต่ข้อเสียใช้ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยานาน



รูปที่ 2.20 การผลิตมอนอกลิเซอไรด์โดยใช้เอนไซม์ไลเปส [10]

### 2.7.2.5 การใช้ตัวทำละลาย [5]

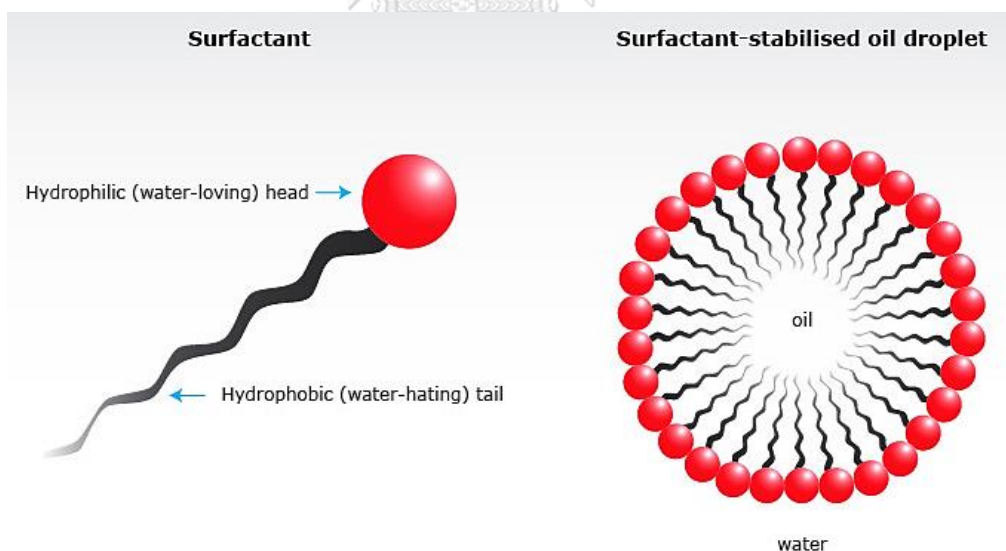
การผลิตมอนอกลิเซอไรด์โดยใช้การเติมตัวทำละลายเข้าไปช่วยทำปฏิกิริยากลิเซอไลไรซิสระหว่างน้ำมันและกลีเซอรอลเพื่อลดความหนืดของของผสม ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แอซีโตน และไอโซโพรพานอล

### 2.7.3 การใช้ประโยชน์มอนอกลิเซอไรด์

มอนอกลิเซอไรด์มีประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย ดังต่อไปนี้

#### 2.7.3.1 อุตสาหกรรมอาหาร

อุตสาหกรรมอาหารมีการใช้มอนอกลิเซอไรด์เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในการผลิตเบเกอรี่ มายองเนส ผลิตภัณฑ์นม ลูกกวาด และผงชูรส โดยทั่วไปมอนอกลิเซอไรด์จะมีลักษณะคล้ายสารลดแรงตึงผิว คือ มีส่วนหัวที่ชอบน้ำและส่วนหางไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความสามารถในการละลายเข้าด้วยกันดังรูปที่ 2.21 [48] โดยเฉพาะมอนออสเตอริยเรตที่ใช้เป็นสารที่ทำให้ขนมเค้กอ่อนนุ่มในระยะเวลาสั้น ทำให้ขนมฟูมีปริมาตรเพิ่มขึ้นร้อยละ 6-11 ของน้ำหนัก ช่วยป้องกันราและกลิ่นอับในขนมปัง นอกจากนี้ใช้เป็นส่วนผสมในการทำเนยเทียมทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ตัว เมื่อโดนความร้อนจะหลอมตัวเป็นหยดของเหลวเล็กน้อย ซึ่งนิยมใช้กันมากในการทำขนมหวาน ตังเม และไอศกรีม



รูปที่ 2.21 ลักษณะของสารลดแรงตึงผิว [48]



### 2.7.3.2 อุตสาหกรรมยา

อุตสาหกรรมยามีการใช้มอนอกลิเซอไรด์เป็นสารยึดเกาะในยาเม็ด และผสมในตัวยาที่ต้องการออกฤทธิ์นาน นอกจากนี้มอนอกลิเซอไรด์ที่มีพวกพอลิกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ในองค์ประกอบ เช่น กรดอีโคซะเพนตะอีโนอิก(Eicosapentaenoic Acid, EPA) และ กรดโดโคซาเฮกซะอีโนอิก(Docosahexaenoic Acid, DHA) สามารถช่วยป้องกันโรคต่างๆ เกี่ยวกับการไหลเวียนของโลหิต โดยเฉพาะมอนอลอเรตกลีเซอไรด์ หรือ มอนอรอริน มีสมบัติเป็นตัวช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์

### 2.7.3.3 อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

อุตสาหกรรมเครื่องสำอางมีการใช้มอนอกลิเซอไรด์เป็นสารเพิ่มเนื้อสัมผัสเพื่อให้ครีมหรือโลชั่นมีความเข้มข้น และปรับปรุงความเหนียวของครีมหรือโลชั่น นอกจากนี้มอนอเพนตะเตคาโนนิลกลีเซอไรด์ใช้ในผลิตภัณฑ์บำรุงเส้นผม

### 2.7.3.4 อุตสาหกรรมเชื้อเพลิง

อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงนำมาใช้เป็นส่วนผสมในสารหล่อลื่น เช่น น้ำมันเกียร์ น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ และน้ำมันหล่อลื่นสำหรับตัดกลึงโลหะ เป็นต้น สารหล่อลื่นประเภทพอลิโออลและเอสเทอร์ มีสมบัติทั่วไปคือ มีค่าดัชนีความหนืดสูง จุดไหลเทต่ำ สามารถลดความฝืดและการสึกหรอในอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ต้องใช้เครื่องจักร และช่วยให้ผลิตภัณฑ์หลุดออกจากอุปกรณ์การผลิตได้ง่าย

### 2.7.3.5 อุตสาหกรรมพลาสติก

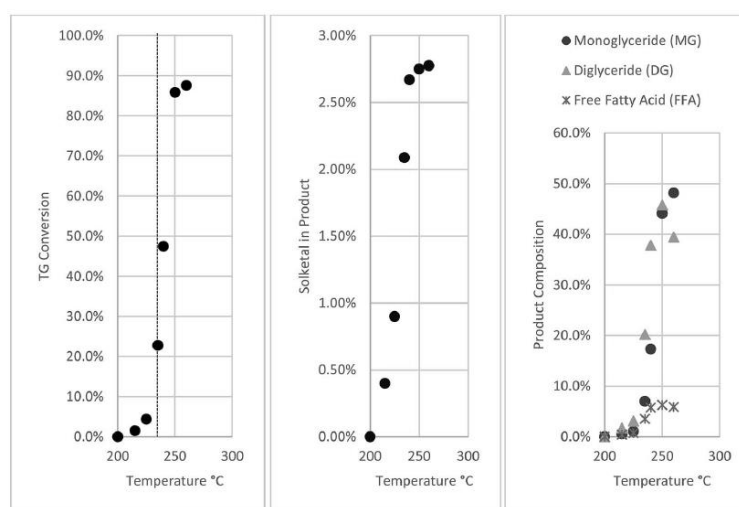
อุตสาหกรรมพลาสติกใช้เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่ช่วยเพิ่มสมบัติความเหนียว ความทนทานต่อความร้อน การอ่อนตัว และความต้านทานการสึกหรอ ตัวอย่างพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยเชื้อจุลินทรีย์จะทำลายโครงสร้างของพลาสติกที่ถูกฝัง ทำให้พลาสติกค่อยๆ สลายเองตามธรรมชาติ

## 2.8 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตมอนอกลิเซอไรด์

### 2.8.1 อุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมของการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสเท่ากับ 220–260 องศาเซลเซียส ภายใต้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดและความดันบรรยากาศแก๊สไนโตรเจน แต่อุณหภูมิใช้กันทั่วไปในการผลิตมอนอกลิเซอไรด์สำหรับอุตสาหกรรมอาหารจะไม่เกิน 255 องศาเซลเซียส เนื่องจากรสชาติ กลิ่น สี จะเสียไปเมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 255 องศาเซลเซียส และอาจเกิดผลิตภัณฑ์ตัวอื่นเกิดขึ้นได้ เช่น กลีเซอรอลเปลี่ยนแปลงเป็นอะโคลินเมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 255 องศาเซลเซียส

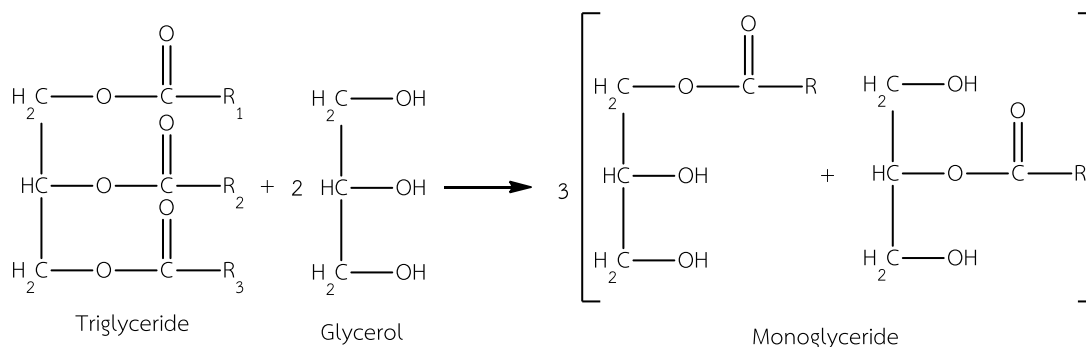
ภายใต้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด โดยส่วนใหญ่การเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาได้ยากเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 230 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สูงขึ้น อัตราการเกิดมอนอกลิเซอไรด์ก็จะสูงขึ้น และลดความหนืดของกลีเซอรอลและปรับปรุงการถ่ายโอนมวลสาร นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ตัวทำละลายเป็นแอซีโตน พบว่าที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียสได้ร้อยละการเปลี่ยนเป็นมอนอกลิเซอไรด์สูงสุด ดังรูปที่ 2.22 [47]



รูปที่ 2.22 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนไปของไตรกลีเซอไรด์และองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ตัวอื่นๆของการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันดอกทานตะวัน ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1 ต่อ 5 [47]

### 2.8.2 อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อกลีเซอรอล

ผลของอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อกลีเซอรอลมีผลต่อปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสในการผลิตมอนอกลิเซอไรด์ จากปริมาณสารสัมพันธ์ของสมการปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์พบว่าต้องใช้ไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล กลีเซอรอล 2 โมล จะได้ผลิตภัณฑ์มอนอกลิเซอไรด์ 3 โมล ดังรูปที่ 2.23 ดังนั้นการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อกลีเซอรอล ให้กลีเซอรอลมากเกินไปจะส่งผลให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของสารผสมทั้งสองชนิด ช่วยให้โมเลกุลของกลีเซอรอลเข้าชนกับโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์มากขึ้น ทำให้เกิดมอนอกลิเซอไรด์มากขึ้น จากการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อกลีเซอรอล ที่ใช้ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสพบว่าอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อกลีเซอรอลที่ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดเท่ากับ 1 ต่อ 5 และให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดเท่ากับ 67.8



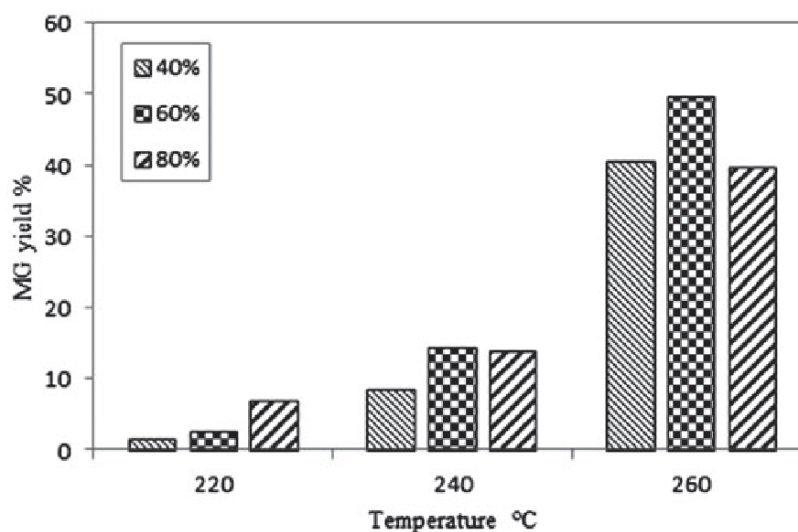
รูปที่ 2.23 ปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์

### 2.8.3 เวลาการเกิดปฏิกิริยา

การศึกษาผลของเวลาต่อการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์จะเริ่มตั้งแต่ให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาตามที่อุณหภูมิกำหนดจากนั้นทิ้งไว้ พร้อมจับเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่กำหนด จากนั้นทำการหยุดปฏิกิริยาโดยให้ความเย็นแก่เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ จากกฎอัตราพบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ดำเนินไปและจะเริ่มคงที่เมื่อเข้าใกล้ค่าสูงสุด จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าภาวะที่ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดจะอยู่ในช่วงเวลาการเกิดปฏิกิริยา 30–150 นาที

### 2.8.4 ความดัน

ผลของความดันเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ จากการศึกษาปริมาตรของสารที่ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ของการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า การใส่ปริมาตรของสารในเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 60 ได้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุด ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1 ต่อ 5 เวลาการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที และใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย ดังรูปที่ 2.24 ดังนั้นปริมาตรของสารที่ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์จะส่งผลต่อความดันบริเวณด้านบนช่องว่างที่เหลือ ที่ความดันสูงทำให้ปริมาณไอโซโพรพานอลเข้าไปในเฟสของเหลวเพื่อช่วยลดความหนืดของสารตั้งต้นระหว่างไตรโอเลอีนกับกลีเซอรอล [5]



รูปที่ 2.24 ผลของปริมาณของสารที่ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 1 ต่อ 5 เวลาการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที และตัวทำละลายไอโซโพรพานอล [5]

### 2.8.5 ตัวทำละลายอินทรีย์

การผลิตมอนอกลิเซอไรด์จากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสระหว่างน้ำมันกับกลีเซอรอล พบว่าเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปทำให้ได้มอนอกลิเซอไรด์สูงขึ้น ส่งผลให้ของผสมในปฏิกิริยากลายสภาพเป็นของแข็ง การผลิตในระบบต่อเนื่องจึงทำได้ยาก การใช้ตัวทำละลายช่วยลดความหนืดของสารตั้งต้นและเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันกับกลีเซอรอล ตัวทำละลายที่ใช้ได้แก่ เมทานอล เอทานอล และไอโซโพรพานอล งานวิจัยนี้จึงสนใจเลือกใช้ตัวทำละลายไอโซโพรพานอล เพราะมีความเป็นขั้วที่ต่ำดังตารางที่ 2.4 และมีความสามารถละลายน้ำมันได้ดีที่อุณหภูมิห้อง ดังตารางที่ 2.5 [12]

ตารางที่ 2.4 ความมีขั้วของตัวทำละลายชนิดต่างๆ [12]

ตัวทำละลาย	สูตรทางเคมี	จุดเดือด (°C)	ความมีขั้ว	ความหนาแน่น (g/mol)
เมทานอล	CH <sub>3</sub> -OH	65	33	0.791
เอทานอล	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -OH	79	24	0.789
ไอโซโพรพานอล	CH <sub>3</sub> -CH(-OH)-CH <sub>3</sub>	82	18	0.785
บิวทานอล	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -OH	118	18	0.810

ตารางที่ 2.5 ความสามารถในการละลายของน้ำมันในตัวทำละลายชนิดต่างๆ [12]

ตัวทำละลาย	ความสามารถในการละลายของน้ำมันที่อุณหภูมิ							
	แตกต่างกัน (องศาเซลเซียส)							
	30	40	50	60	70	80	90	100
เฮกเซน	M							
เอทานอล	4.4	21	41	74	M			
ไอโซโพรพานอล	67	83	M					
เอทิลแอสีเตต	M							
เอทานอลกับน้ำ	2.5	12	25	40	55	65	M	
ไอโซโพรพานอลกับน้ำ	35	50	60	65	M			
เอทิลแอสีเตตกับน้ำ	35	50	60	70	75	M		

หมายเหตุ M คือ ผสมเข้ากันได้

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cristian และคณะ [1] ศึกษาการผลิตมอนอกลิเซอไรด์ จากเมทิลโอเลอเตต (Methyl oleate) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์คือ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เริ่มต้นทำการศึกษานาอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการกวนในถังปฏิกรณ์ ซึ่งในถังปฏิกรณ์ประกอบด้วย 4 เฟสคือ เฟสตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง เฟสของกลีเซอรอลอยู่บริเวณด้านล่าง เฟสของกรดไขมันประกอบด้วยเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและกลีเซอรอล และเฟสของแก๊สประกอบด้วยไนโตรเจนและเมทานอล หลังจากนั้นศึกษาภาวะที่ได้อัตราของมอนอกลิเซอไรด์สูงสุด ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ 200–250 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทิลโอเลอเตตต่อกลีเซอรอล 1:1–1:6 และเวลาการเกิดปฏิกิริยา 0–8 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมกับตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา 177–250 ไมโครเมตรและอัตราการกวนในถังปฏิกรณ์ 700 รอบต่อนาที ส่วนภาวะที่ได้อัตราของมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดประมาณ 77 คือ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทิลโอเลอเตตต่อกลีเซอรอล 1:4.5 และเวลาการเกิดปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

Hui และคณะ [9] ศึกษาการสังเคราะห์มอนอกลิเซอไรด์ จากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของเหลวไอออนิกแอลคาไลน์ (Alkaline ionic liquid) ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของอุตสาหกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ ได้แก่ 1-บิวทิล-3-เมทิลอิมิดาโซเลียมไฮดรอกไซด์ (1-Butyl-3-Methylimidazoliumhydroxide [Bmim]OH) และ 1-บิวทิล-3-เมทิลอิมิดาโซเลียมอิมิดาโซเลต (1-Butyl-3-

Methylimidazoliumimidazolide [Bmim]Im) ทำการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ตัว และหลังจากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดมาศึกษาหาภาวะที่ได้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุด ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ 170–220 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อกลีเซอรอล 1:2–1:10 และเวลาการเกิดปฏิกิริยา 1–5 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา [Bmim]Im มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า [Bmim]OH จากนั้นเมื่อศึกษาการทำปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [Bmim]Im พบว่าให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดเท่ากับ 68.9 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อกลีเซอรอล 1:6 และเวลาการเกิดปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง และสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยา [Bmim]Im กลับมาใช้ใหม่พบว่ามีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเหมือนเดิม

Huan และคณะ [10] ศึกษาการผลิตมอนอกลิเซอไรด์ และ ไดกลีเซอไรด์ จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดปาล์มติก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ได้แก่ Novozyme 435, Lipozyme RM IM, Lipozyme TL IM และ Lipomod 34P และตัวทำละลายร่วมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแอสिटอน ซึ่งศึกษาการเปลี่ยนของกรดไขมันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ที่แตกต่างกัน จากนั้นหาภาวะที่ได้ร้อยละมอนออะซิลกลีเซอรอลสูงสุดโดยใช้วิธีทางสถิติ ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ความดัน 65, 75 และ 85 บาร์ อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส และร้อยละความเข้มข้นของเอนไซม์ 5, 15 และ 25 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าเอนไซม์ที่ให้ร้อยละการเปลี่ยนไปของกรดไขมันมากที่สุดถึง 50 ที่เวลาการเกิดปฏิกิริยา 5 ชั่วโมงคือ Novozyme 435 รองลงมาคือ Lipozyme RM IM, Lipozyme TL IM และ Lipomod 34P ตามลำดับ จากนั้นนำเอนไซม์ Novozyme 435 หาภาวะที่ได้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดถึง 58.68 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความดัน 85 บาร์ อัตราส่วนโดยโมลของกรดปาล์มติกต่อกลีเซอรอล 1:3 และร้อยละความเข้มข้นของเอนไซม์ 25 โดยน้ำหนักของ Novozyme 435

Alchris และคณะ [47] ศึกษาการผลิตสารอนุพันธ์ของกลีเซอไรด์คือ มอนอกลิเซอ และ ไดกลีเซอไรด์ จากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของน้ำมันดอกทานตะวัน โดยใช้แอสिटอนเป็นตัวทำละลาย จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความดัน 1.8 เมกะพาสคัล เวลาการเกิดปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง และอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมัน 5:1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบไปด้วยร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ 52.0 ร้อยละไดกลีเซอไรด์ 35.6 ร้อยละไตรกลีเซอไรด์ 7.1 และร้อยละกรดไขมันอิสระ 6.3 ดังนั้นแอสिटอนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากรด เพราะให้อุณหภูมิ (250 องศาเซลเซียส) สูงกว่าอุณหภูมิจุดวิกฤต (235.5 องศาเซลเซียส) ใช้ภาวะความดันที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

Liu และคณะ [5] ศึกษาการผลิตมอนอกลิเซอไรด์ (MAG) หรือ มอนอโอลลีเอต (MOG) ซึ่งเลือกไตรโอลลีน (TOG) กับกลีเซอรอลเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสในแอลกอฮอล์ (เมทานอล, เอทานอล และ ไอโซโพรพานอล) ที่ภาวะเหนือวิกฤต จากการศึกษาเบื้องต้นในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที อัตราส่วนโดยโมลของไตรโอลลีนต่อกลีเซอรอล 1:5 การเติมแอลกอฮอล์ 4 มิลลิลิตร พบว่า ชนิดของแอลกอฮอล์มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ แต่เมทานอลกับเอทานอลสามารถเกิดปฏิกิริยากับไตรโอลลีนเป็นแอลคิลเอสเทอร์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายช่วยปรับปรุงการถ่ายโอนมวลระหว่างสารตั้งต้น จากการศึกษาผลของความดันพบว่า การเติมตัวอย่างร้อยละ 60 ของปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์ให้ร้อยละผลได้สูงสุด นอกจากนี้ หากภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของไตรโอลลีนในแอลกอฮอล์ภาวะเหนือวิกฤตในช่วงอุณหภูมิ (220–260 องศาเซลเซียส) เวลาการเกิดปฏิกิริยา (30–150 นาที) และการเติมตัวทำละลาย (0–4 มิลลิลิตร) โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) ได้ภาวะที่เหมาะสมคืออุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และเติมตัวทำละลายไอโซโพรพานอล 4 มิลลิลิตร ได้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดถึง 67.8

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตมอนอกลิเซอไรด์โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากกลีเซอรอลและน้ำมันปาล์ม โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ที่ได้จากปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของน้ำมันปาล์ม เพื่อหาภาวะที่ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดโดยใช้วิธีทางสถิติ

#### 3.1 สารที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำมันปาล์มโอเลอินเกรดบริโภาค (Food grade palm olein oil) ยี่ห้อ มรกต จากบริษัท มรกตอินดัสตรีส์ จำกัด (มหาชน)
2. กลีเซอรอลบริสุทธิ์ (Glycerol 99.94%) ยี่ห้อ Fisher จากบริษัท จากบริษัท เอเพกซ์ เคมีคัล จำกัด
3. กลีเซอรอลดิบ (Crude glycerol 80.82%) จากบริษัท บางจากไบโอฟูเอล จำกัด
4. ไอโซโพรพานอล (Iso-propanol 99.7%) ยี่ห้อ Qrec จากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอิร์ต เคมี แล็บ
5. นอร์มอล-เฮปเทน (N-heptane 99.5%) ยี่ห้อ Fisher จากบริษัท จากบริษัท เอเพกซ์ เคมี คัล จำกัด
6. เอทานอล (Ethanol 99.9%) ยี่ห้อ Qrec จากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอิร์ต เคมี แล็บ
7. มอนอปาล์มิติน (Analytical grade monopalmitin 99.5%) ยี่ห้อ Sigma จากห้างหุ้นส่วน จำกัด เอิร์ต เคมี แล็บ
8. มอนอโอลีอิน (Analytical grade monoolein 99.5%) ยี่ห้อ Sigma จากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอิร์ต เคมี แล็บ
9. ไดปาล์มิติน (Analytical grade dipalmitin 99.5%) ยี่ห้อ Sigma จากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอิร์ต เคมี แล็บ
10. ไดโอลีอิน (Analytical grade diolein 99.5%) ยี่ห้อ Sigma จากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอิร์ต เคมี แล็บ
11. ไตรปาล์มิติน (Analytical grade tripalmitin 99.5%) ยี่ห้อ Sigma จากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอิร์ต เคมี แล็บ
12. ไตรโอลีอิน (Analytical grade triolein 99.5%) ยี่ห้อ Sigma จากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอิร์ต เคมี แล็บ



13. กรดโอเลอิก (Oleic acid 99%) ยี่ห้อ SIAL จากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ.ซี.เอส.ซินอน
14. กรดปาล์มิติก (Palmitic acid 99%) ยี่ห้อ Sigma จากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ.ซี.เอส.ซินอน
15. เมทิลเฮปตะเดคาโนเอต (Analytical grade methyl heptadecanoate 99.5%) ยี่ห้อ Sigma จากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอิร์ต เคมี แล็บ
16. อะซิโตน (Commercial acetone) ยี่ห้อ Zen Point จากห้างหุ้นส่วนจำกัด เอิร์ต เคมี แล็บ

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. อ่างทรายฟลูอิดไรซ์สำหรับให้ความร้อน (Fluidized Sand Bath) จากบริษัท OMEGA รุ่น FSB-4
2. เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (Batch Reactor) ทำจากท่อสแตนเลสจากบริษัท Swagelok เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.32 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.20 เซนติเมตร และความยาว 15.00 เซนติเมตร
3. เครื่องชั่งสารความละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance) จากบริษัท Mettler Toledo
4. เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน (Hotplates Magnetic Stirrer) จากบริษัท IKA
5. นาฬิกาจับเวลา
6. ไมโครปิเปต ขนาด 100–1000 ไมโครลิตร
7. ไมโครปิเปต ขนาด 10–100 ไมโครลิตร
8. ไมโครปิเปตทิป (Micropipette Tips) ขนาด 1000 ไมโครลิตร
9. ไมโครปิเปตทิป (Micropipette Tips) ขนาด 100 ไมโครลิตร

### 3.3 การออกแบบการทดลอง

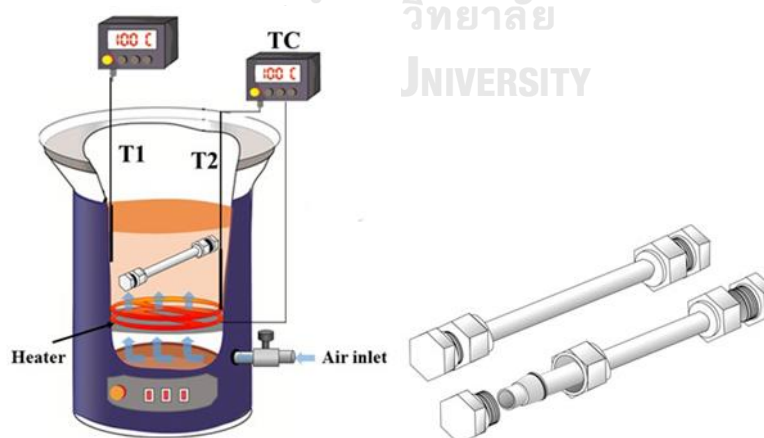
งานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) มีการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ด้วยกระบวนการทางสถิติด้วยโปรแกรม Design Expert เวอร์ชัน 10.10.1 เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอนอกลิเซอไรด์ โดยมีตัวแปรต้นจำนวน 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลาทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล โดยศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อกลีเซอรอลคงที่ เท่ากับ 1 ต่อ 5 ดังแสดงตารางที่ 3.1 การทดลองทั้งหมดรวม 48 การทดลอง ใช้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์เป็นตัวแปรตามในการสร้างสมการถดถอย (Regression Model)

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับค่าตัวแปรของการออกแบบ Central Composite Design

ปัจจัย	ตัวแปร	หน่วย	ระดับ		
			-1	0	1
A	อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	220	240	260
B	เวลาการเกิดปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของ	นาที	30	90	150
C	ไอโซโพรพานอลต่อ กลีเซอรอลต่อน้ำมัน ปาล์ม (X:5:1)	-	0	15	30

### 3.4 การทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตั้งอุณหภูมิอ่างทรายฟลูอิดซ์ ตามที่กำหนด ซึ่งนำหนักน้ำมันปาล์ม กลีเซอรอล และไอโซโพรพานอลตามอัตราส่วน โดยอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันต่อกลีเซอรอลคงที่เท่ากับ 1 ต่อ 5 ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ปิดท่อและนำท่อไปใส่ในอ่างทรายฟลูอิดซ์ตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้ด้วย ควบคุมอุณหภูมิและเขย่าท่อด้วยความเร็วคงที่พร้อมจับเวลาการเกิดปฏิกิริยา หลังจากนั้นอ่านและจดบันทึกอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล เมื่อสิ้นสุดในการเกิดปฏิกิริยานำเครื่องปฏิกรณ์ใส่อ่างน้ำแข็งไว้เพื่อหยุดปฏิกิริยา และชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ได้หลังเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และอ่างทรายฟลูอิดซ์ (TC=Temperature Controller และ T1, T2=Thermocouple)

### 3.5 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

#### 3.5.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas chromatograph, GC)

การวิเคราะห์ปริมาณร้อยละผลได้มอนอกลิเซอไรด์ (% Monoglyceride yield) ร้อยละผลได้ไดกลีเซอไรด์ (% Diglyceride yield) ร้อยละผลได้ไตรกลีเซอไรด์ (% Triglyceride yield) และโพรพิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ในตัวอย่าง ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ รุ่น 7890A ยี่ห้อ Agilent แสดงดังรูปที่ 3.2 ใช้Capillary column รุ่น MTX-65TG ความยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 250 ไมโครเมตร หนา 0.1 ไมโครเมตร และใช้ดีเทคเตอร์ชนิด FID (Flame ionization detector) ภาพการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.2



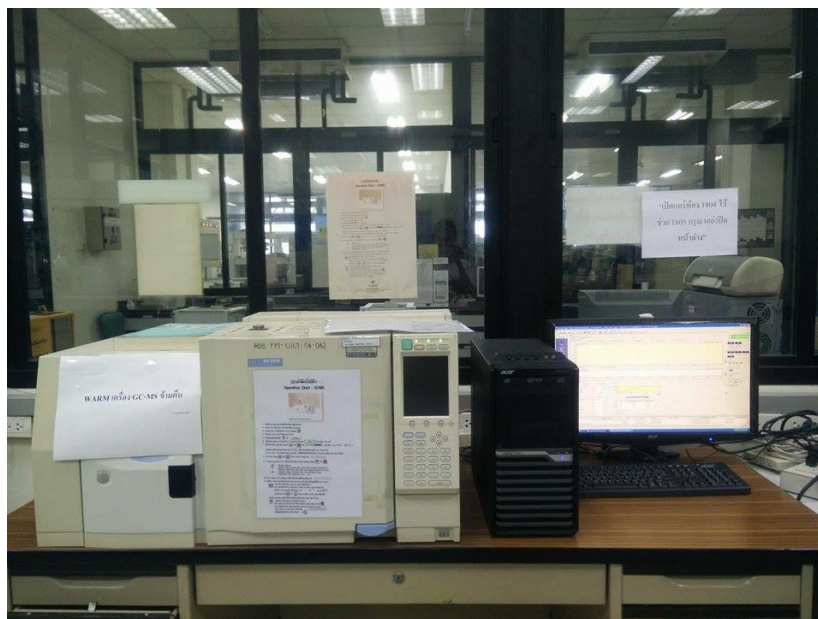
รูปที่ 3.2 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

ตารางที่ 3.2 ภาวะการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง GC

Condition	Value
Carrier gas (He) flow rate	1 mL/min
Heating rate	10°C/min
Detector temperature (FID)	380°C
Split ratio	1:10
Injection part temperature	330 °C
Inject volume	1 µL
Column initial temperature	50 °C
Column temperature	370 °C

### 3.5.2 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas chromatography mass spectrometer, GC-MS)

การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบสารตัวอื่นๆ ในผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง โดยทำการเตรียมตัวอย่าง โดยการนำผลิตภัณฑ์มาเจือจางด้วยเฮปเทนให้มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ แมสสเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น QP2010 ดังรูปที่ 3.3 โดยใช้ Capillary column ยี่ห้อ J&W Scientific รุ่น DB-5 ms ความยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.25 มิลลิเมตร และความหนาฟิล์ม 0.25 ไมโครเมตร ภาวะที่นำมาวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.3 และใช้ฮีเลียมเป็นแก๊สตัวพา



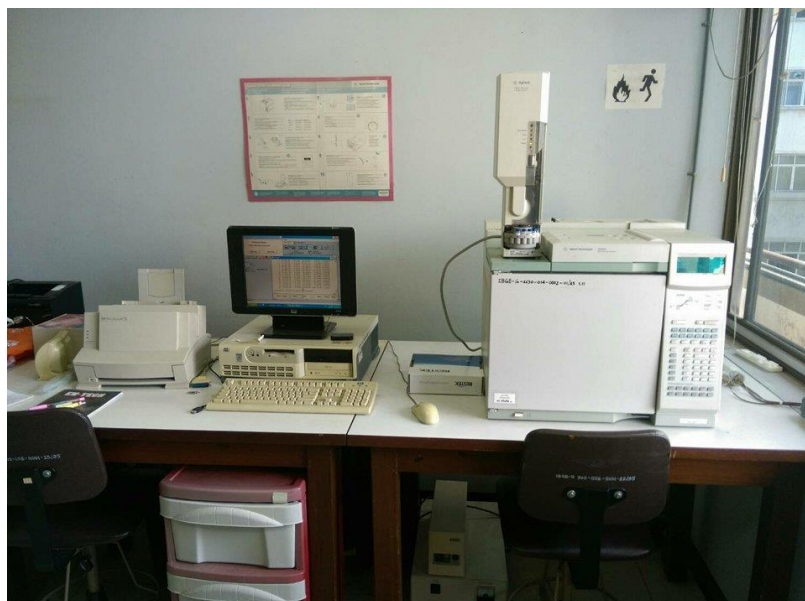
รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ แมสสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 3.3 ภาวะการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง GC-MS

Condition	Value
Molecular weight scan range	50–850 m /z
Solvent cut time	1.75 min
Injection port temperature	250 °C
Ion source temperature	200 °C
Interface temperature	230 °C
Temperature program rate	50 °C for 5 min, Increased to 200 °C at 15 °C/min, 200 °C for 15 min

### 3.5.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

การวิเคราะห์ความบริสุทธิ์ในกลีเซอรอลในผลิตภัณฑ์ โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ รุ่น 6890N ยี่ห้อ Agilent แสดงดังรูปที่ 3.4 ใช้ Capillary column รุ่น MXT-WAX ความยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ 0.25 มิลลิเมตร หน้า 0.25 ไมโครเมตร และใช้ดีเทคเตอร์ชนิด FID ภาวะการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ รุ่น 6890N ของ Agilent

ตารางที่ 3.4 ภาวะการวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลในผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง GC

Condition	Value
Carrier gas (He) flow rate	1 mL/min
Heating rate	10°C/min
Detector temperature (FID)	260°C
Split ratio	1:11.7
Injection part temperature	260 °C
Inject volume	1 µL
Column initial temperature	100 °C
Column temperature	370 °C

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตมอนอกลิเซอไรด์โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากกลีเซอรอลและน้ำมันปาล์ม ออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) ตัวแปรที่นำมาศึกษา ได้แก่

- 1) อุณหภูมิ (220–260 องศาเซลเซียส)
- 2) เวลาการเกิดปฏิกิริยา (30–150 นาที)
- 3) อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมัน (X:5:1) (0–30)

ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองแบบ CCD สามารถแสดงผลกระทบที่มีนัยสำคัญของตัวแปรแต่ละตัวต่อค่าร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ (%Monoglyceride) ซึ่งถือเป็นผลตอบสนอง (Response) หลักที่ใช้ทดลองงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ร้อยละไดกลีเซอไรด์ (%Diglyceridde) ร้อยละไตรกลีเซอไรด์ (%Triglyceride) และร้อยละกรดไขมันอิสระ (%Free fatty acid) เป็นผลตอบสนองร่วม เพื่อทราบถึงความสมบูรณ์ของปฏิกิริยา

#### 4.1 การวิเคราะห์ทางสถิติและสมการถดถอย

การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) ได้กำหนดปัจจัยหรือระดับของตัวแปรไว้ 3 ระดับ เมื่อนำปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย มาใช้กำหนดเป็นค่าของตัวแปรอิสระ โดยค่า 1 และ -1 เป็นค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในการออกแบบการทดลองของแต่ละปัจจัยตามลำดับ ดังแสดงใน Error! Reference source not found. ทำให้ได้การทดลองจำนวน 48 การทดลอง สำหรับใช้ในการเลือกภาวะที่ให้ค่าร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุด ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรและระดับค่าตัวแปรของการออกแบบ Central Composite Design

ปัจจัย	ตัวแปรอิสระ	หน่วย	ระดับ		
			-1	0	1
A	อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	220	240	260
B	เวลาการเกิดปฏิกิริยา	นาที	30	90	150
C	อัตราส่วนโดยโมลของ ไอโซโพรพานอลต่อ กลีเซอรอลต่อน้ำมัน ปาล์ม (X:5:1)	-	0	15	30

ตารางที่ 4.2 ภาวะที่ใช้ในการทดลอง ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ กรดไขมัน และไตรกลีเซอไรด์

การทดลองที่	อุณหภูมิ °C	เวลาการเกิดปฏิกิริยา นาที	อัตราส่วนโดยโมล* (X:5:1)	%MG	%DG	%FA	%TG
9	220	30	0	0.02	3.75	0.06	94.11
1	220	30	0	0.05	0.63	0.06	95.83
34	220	30	0	0.01	1.73	0.04	95.80
37	260	30	0	0.04	1.31	0.09	95.02
48	260	30	0	0.00	1.67	0.09	98.20
29	260	30	0	0.01	1.61	0.05	94.11
21	220	150	0	0.42	1.66	0.05	94.72
2	220	150	0	0.13	1.55	0.08	98.08
47	220	150	0	0.19	2.19	0.09	95.94
16	260	150	0	54.72	8.22	0.56	23.97
30	260	150	0	51.12	7.62	1.44	24.09
22	260	150	0	54.31	11.18	1.42	22.60
14	220	30	30	0.00	1.65	0.04	93.01
26	220	30	30	0.00	1.74	0.05	94.21



การทดลองที่	อุณหภูมิ	เวลาการเกิดปฏิกิริยา	อัตราส่วนโดยโมล*	%MG	%DG	%FA	%TG
	°C	นาที	(X:5:1)				
17	220	30	30	0.00	0.96	0.12	96.15
6	260	30	30	0.16	3.46	0.18	76.40
7	260	30	30	0.11	3.60	0.25	83.51
39	260	30	30	0.31	4.79	0.24	76.15
35	220	150	30	0.02	2.89	0.09	93.96
42	220	150	30	0.92	4.11	0.21	82.85
38	220	150	30	0.04	1.42	0.06	77.89
33	260	150	30	37.30	2.97	1.34	13.82
25	260	150	30	37.37	7.54	0.55	24.05
12	260	150	30	37.77	1.31	0.73	14.06
24	220	90	15	0.02	1.68	0.06	93.32
46	220	90	15	0.07	1.59	0.08	86.96
11	220	90	15	0.69	1.71	0.11	84.83
23	260	90	15	11.77	7.88	0.74	62.34
15	260	90	15	13.65	4.12	1.03	59.85
45	260	90	15	14.53	6.55	0.75	56.58
4	240	30	15	0.00	0.53	0.10	91.94
18	240	30	15	0.00	1.55	0.10	92.55
10	240	30	15	0.00	1.17	0.04	97.41
5	240	150	15	30.85	9.01	0.80	37.41
20	240	150	15	31.82	12.55	1.21	53.73
19	240	150	15	28.65	8.62	0.77	56.85
40	240	90	0	1.11	3.85	0.12	94.42
8	240	90	0	0.72	0.71	0.09	91.54
36	240	90	0	1.30	2.61	0.27	88.67
13	240	90	30	4.19	8.01	0.25	81.40
44	240	90	30	3.17	4.88	0.42	88.61

การทดลองที่	อุณหภูมิ	เวลาการเกิดปฏิกิริยา	อัตราส่วนโดยโมล*	%MG	%DG	%FA	%TG
	°C	นาที	(X:5:1)				
27	240	90	30	3.55	4.72	0.67	76.38
43	240	90	15	4.95	5.67	0.49	68.81
32	240	90	15	5.54	4.06	0.48	69.80
28	240	90	15	7.08	6.57	0.50	74.41
31	240	90	15	6.55	6.08	0.57	57.42
41	240	90	15	3.24	2.77	0.40	69.99
3	240	90	15	6.60	6.80	0.48	78.66

\* อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์ม (X:5:1), %MG = ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์, %DG = ร้อยละไดกลีเซอไรด์, %FA = ร้อยละกรดไขมัน และ %TG = ร้อยละไตรกลีเซอไรด์

จากตารางที่ 4.2 พบว่าการทดลองที่ 3 28 31 32 41 และ 43 จำนวนทั้งหมด 6 การทดลอง มีค่ากลางหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.42 ซึ่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทำให้ทราบความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (Random Error) ของการทดลอง

#### 4.1.1 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยต่างๆ

##### 4.1.1.1 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนที่มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 สามารถนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ของปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อตัวแปรตามร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ (%MG) ได้ดังตารางที่ ก.1 ในภาคผนวก ก โดยที่ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ปัจจัยที่มีค่า p-Value มากกว่า 0.05 ไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ โดยตารางที่ 4.3 แสดงเฉพาะปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ

**ตารางที่ 4.3** การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ (A = อุณหภูมิ B = เวลาการเกิดปฏิกิริยา และ C = อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-Value
Model	11576.72	8	1447.09	160.86	< 0.0001
A	3193.43	1	3193.43	354.99	< 0.0001
B	4412.85	1	4412.85	490.54	< 0.0001
C	48.57	1	48.57	5.40	0.0255
AB	3020.72	1	3020.72	335.79	< 0.0001
AC	89.17	1	89.17	9.91	0.0031
BC	91.52	1	91.52	10.17	0.0028
B <sup>2</sup>	718.87	1	718.87	79.91	< 0.0001
C <sup>2</sup>	129.81	1	129.81	14.43	0.0005
Residual	350.84	39	9.00		
Lack of Fit	326.81	6	54.47	74.79	< 0.0001
Pure Error	24.03	33	0.73		
Cor Total	11927.57	47			

และเมื่อพิจารณาค่า Coefficient Estimate จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าค่าของอุณหภูมิและเวลาการเกิดปฏิกิริยามีค่าเป็นบวก อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลมีค่าเป็นลบ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายค่าร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ ดังสมการที่ 4.1

**ตารางที่ 4.4** ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (A) เวลาการเกิดปฏิกิริยา (B) และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล (C) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) ของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์

Factor	Coefficient Estimate	Standard Error
Intercept	6.21	0.78
A	10.32	0.55
B	12.13	0.55
C	-1.27	0.55
AB	11.22	0.61
AC	-1.93	0.61
BC	-1.95	0.61
B <sup>2</sup>	9.04	1.01
C <sup>2</sup>	-3.84	1.01

สมการถดถอยเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ มีค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ (R<sup>2</sup>) เท่ากับ 0.9706 ทำให้ทราบค่าที่ได้จากสมการถดถอยสามารถใช้ทำนายร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง

$$\%MG = 6.21 + 10.32A + 12.13B - 1.27C + 11.22AB - 1.93AC - 1.95BC + 9.04B^2 - 3.84C^2 \quad (4.1)$$

จากสมการที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ ได้แก่ ปัจจัยหลักอุณหภูมิ (A) ระยะเวลาทำปฏิกิริยา (B) ปัจจัยร่วมอุณหภูมิและเวลาการเกิดปฏิกิริยา (AB) ซึ่งสัมประสิทธิ์ของปัจจัยมีค่าบวก ทำให้ทราบว่าปัจจัยที่มากขึ้นทำให้ได้ค่าร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ที่สูงขึ้น ส่วนปัจจัยหลักที่มีอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล (C) ปัจจัยร่วมอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล (AC) เวลาการเกิดปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล (BC) มีสัมประสิทธิ์เป็นลบ ทำให้ทราบว่าปัจจัยที่มากขึ้นทำให้ได้ค่าร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ที่ลดลง นอกจากนี้ส่วนโค้งเวลาการเกิดปฏิกิริยา (B<sup>2</sup>) มีค่าบวกเมื่อระยะเวลาทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นทำให้ทราบค่าสูงสุดร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ และส่วนโค้งอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล (C<sup>2</sup>) มีค่าลบเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลเพิ่มขึ้นทำให้ทราบค่าต่ำสุดร้อยละ

มอนอกลิเซอไรด์ ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 สำหรับปัจจัยหลักอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล (C) ไม่มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์แต่ถูกเลือกตามลำดับชั้น (Hierarchy Order) ตามส่วนโค้งของอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล

#### 4.1.1.2 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนที่มีผลต่อร้อยละไดกลีเซอไรด์

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 สามารถนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อตัวแปรตามร้อยละไดกลีเซอไรด์ (%DG) ได้ดังตารางที่ ก.2 ในภาคผนวก ก โดยปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า p-Value น้อยกว่า 0.05) แสดงดังตารางที่ 4.5

**ตารางที่ 4.5** การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละไดกลีเซอไรด์ (A = อุณหภูมิ B = เวลาการเกิดปฏิกิริยา และ C = อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-Value
Model	169.49	3	56.50	9.36	< 0.0001
A	71.09	1	71.09	11.77	0.0013
B	98.25	1	98.25	16.27	0.0002
C	0.15	1	0.15	0.025	0.8758
Residual	265.72	44	6.04		
Lack of Fit	185.90	11	16.90	6.99	< 0.0001
Pure Error	79.82	33	2.42		
Cor Total	435.21	47			

และเมื่อพิจารณาค่า Coefficient Estimate จากตารางที่ 4.6 สามารถนำมาใช้เป็นสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายร้อยละไดกลีเซอไรด์ดังสมการที่ 4.2

$$\%DG = 4.06 + 1.54A + 1.81B + 0.071C \quad (4.2)$$

ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ ( $R^2$ ) ของสมการที่ 4.2 มีค่าเพียง 0.3894 ทำให้ทราบว่าสมการถดถอยไม่สามารถใช้ทำนายร้อยละไดกลีเซอไรด์ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากไดกลีเซอไรด์เป็นสารตัวกลาง (intermediate) สามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาการสลายตัวของความร้อนของไตรกลีเซอไรด์ หรือปฏิกิริยาระหว่างมอนอกลิเซอไรด์กับกรดไขมัน

**ตารางที่ 4.6** ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (A) เวลาการเกิดปฏิกิริยา (B) และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล (C) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละไดกลีเซอไรด์

Factor	Coefficient Estimate	Standard Error
Intercept	4.06	0.35
A	1.54	0.45
B	1.81	0.45
C	0.071	0.45

#### 4.1.1.3 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนที่มีผลต่อร้อยละกรดไขมัน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตามร้อยละกรดไขมัน (%FA) ได้ดังตารางที่ ก.3 ในภาคผนวก ก ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ปัจจัยหลักอุณหภูมิ (A) และเวลาการเกิดปฏิกิริยา (B) ปัจจัยร่วมอุณหภูมิและเวลาการเกิดปฏิกิริยา (AB) และส่วนโค้งอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล ( $C^2$ ) ซึ่งมีค่า p-Value น้อยกว่า 0.05 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเฉพาะปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังตารางที่ 4.7

**ตารางที่ 4.7** การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละกรดไขมัน (A = อุณหภูมิ B = เวลาการเกิดปฏิกิริยา และ C = อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-Value
Model	5.55	5	1.11	28.53	< 0.0001
A	2.21	1	2.21	56.96	< 0.0001
B	2.03	1	2.03	52.12	< 0.0001
C	0.022	1	0.022	0.56	0.4591
AB	0.97	1	0.97	25.01	< 0.0001
$C^2$	0.31	1	0.31	8.03	0.0071
Residual	1.63	42	0.039		
Lack of Fit	0.52	9	0.058	1.71	0.1263
Pure Error	1.11	33	0.034		
Cor Total	7.18	47			

และเมื่อพิจารณาค่า Coefficient Estimate จากตารางที่ 4.8 สามารถนำมาใช้เป็นสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายค่าร้อยละกรดไขมันดังสมการที่ 4.3

$$\%FA = 0.49 + 0.27A + 0.26B + 0.027C + 0.20AB - 0.17C^2 \quad (4.3)$$

มีค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.7726 ทำให้ทราบว่าสมการถดถอยไม่สามารถใช้ทำนายร้อยละกรดไขมันได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากกรดไขมันเป็นสารตัวกลางเช่นเดียวกับไตรกลีเซอไรด์เกิดจากปฏิกิริยาสลายตัวของไตรกลีเซอไรด์และเกิดปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์เป็นมอนอกลิเซอไรด์

**ตารางที่ 4. 8** ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (A) เวลาการเกิดปฏิกิริยา (B) และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล (C) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละกรดไขมัน

Factor	Coefficient Estimate	Standard Error
Intercept	0.49	0.046
A	0.27	0.036
B	0.26	0.036
C	0.027	0.036
AB	0.20	0.040
$C^2$	-0.17	0.059

#### 4.1.1.4 วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนที่มีผลต่อร้อยละไตรกลีเซอไรด์

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อตัวแปรตามร้อยละไตรกลีเซอไรด์ (%TG) ได้ดังตารางที่ ก.4 ในภาคผนวก ก เมื่อพิจารณาค่า p-Value พบว่า ปัจจัยหลักอุณหภูมิ (A) เวลาการเกิดปฏิกิริยา (B) และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล (C) ปัจจัยร่วมอุณหภูมิและเวลาการเกิดปฏิกิริยา (AB) ส่วนโค้งเวลาการเกิดปฏิกิริยา ( $B^2$ ) และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล ( $C^2$ ) มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละไตรกลีเซอไรด์ดังแสดงในตารางที่ 4.9

**ตารางที่ 4.9** การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละไตรกลีเซอไรด์ (A = อุณหภูมิ B = เวลาการเกิดปฏิกิริยา และ C = อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-Value
Model	25989.81	6	4331.64	100.60	< 0.0001
A	9480.31	1	9480.31	220.17	< 0.0001
B	9749.18	1	9749.18	226.41	< 0.0001
C	792.86	1	792.86	18.41	0.0001
AB	5266.69	1	5266.69	122.31	< 0.0001
B <sup>2</sup>	440.32	1	440.32	10.23	0.0027
C <sup>2</sup>	579.17	1	579.17	13.45	0.0007
Residual	1765.43	41	43.06		
Lack of Fit	832.42	8	104.05	3.68	0.0036
Pure Error	933.01	33	28.27		
Cor Total	27755.25	47			

จากค่า Coefficient Estimate จากตารางที่ 4.10 สามารถนำมาใช้เป็นสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายค่าร้อยละไตรกลีเซอไรด์ดังสมการที่ 4.4

$$\%TG = 74.18 - 17.78A - 18.03B - 5.14C - 14.81AB - 7.07B^2 + 8.11C^2 \quad (4.4)$$

มีค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ (R<sup>2</sup>) เท่ากับ 0.9364 ทำให้ทราบว่าสมการถดถอยสามารถใช้ทำนายร้อยละไตรกลีเซอไรด์ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง จากสมการ 4.4 พบว่าปัจจัยหลักอุณหภูมิ (A) เวลาการเกิดปฏิกิริยา (B) และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล (C) ปัจจัยร่วมอุณหภูมิและเวลาการเกิดปฏิกิริยา (AB) และส่วนโค้งเวลาการเกิดปฏิกิริยา (B<sup>2</sup>) มีค่าสัมประสิทธิ์ติดลบทั้งหมดหมายความว่าเมื่อปัจจัยมีค่าเพิ่มมากขึ้น ร้อยละไตรกลีเซอไรด์มีค่าลดลง เนื่องจากไตรกลีเซอไรด์เป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา ยกเว้นส่วนโค้งอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล (C<sup>2</sup>) มีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก



ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (A) เวลาการเกิดปฏิกิริยา (B) และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล (C) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละไตรกลีเซอไรด์

Factor	Coefficient Estimate	Standard Error
Intercept	74.18	1.71
A	-17.78	1.20
B	-18.03	1.20
C	-5.14	1.20
AB	-14.81	1.34
B <sup>2</sup>	-7.07	2.21
C <sup>2</sup>	8.11	2.21

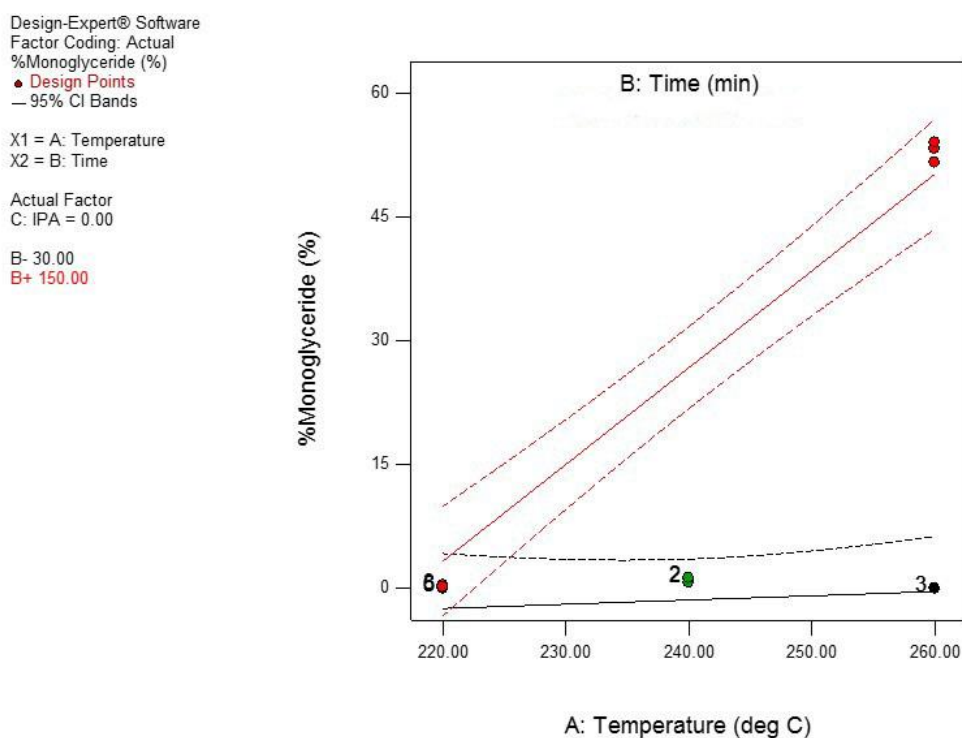
#### 4.1.2 วิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการถดถอย

การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการถดถอย ซึ่งส่วนตกค้างหาได้จากการนำค่าจริงจากการทดลองลบด้วยค่าจากสมการถดถอย เพื่อวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่เหลือจากข้อมูลที่สมการทำนายได้ ซึ่งจะเห็นว่าส่วนตกค้างนี้ต้องเป็นความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (Random Error) โดยมีข้อกำหนดไว้คือ มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ไม่มีแนวโน้ม (Structureless) มีความแปรปรวนคงที่ (Constant Variation) และไม่ขึ้นกับลำดับการเก็บข้อมูล ซึ่งข้อกำหนดทั้งหมดสามารถวิเคราะห์ได้จากการพล็อตส่วนตกค้างกับ Normal % Probability ค่าที่ทำนายจากสมการถดถอย (Predicted Value) และลำดับการทดลอง (Run Order) ตามลำดับ ในภาคผนวก ข รูปที่ ข.1-ข.3 ของร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ รูปที่ ข.4-ข.6 ของร้อยละไดกลีเซอไรด์ รูปที่ ข.7-ข.9 ของร้อยละกรดไขมัน และรูปที่ ข.10-ข.11 ของร้อยละไตรกลีเซอไรด์ พบว่า ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์และร้อยละไตรกลีเซอไรด์ มีการแจกแจงปกติ ไม่มีแนวโน้ม และไม่ขึ้นกับลำดับการเก็บข้อมูล ยกเว้นร้อยละไดกลีเซอไรด์และร้อยละกรดไขมัน

## 4.2 ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์

### 4.2.1 อุณหภูมิกับเวลาการเกิดปฏิกิริยา (AB)

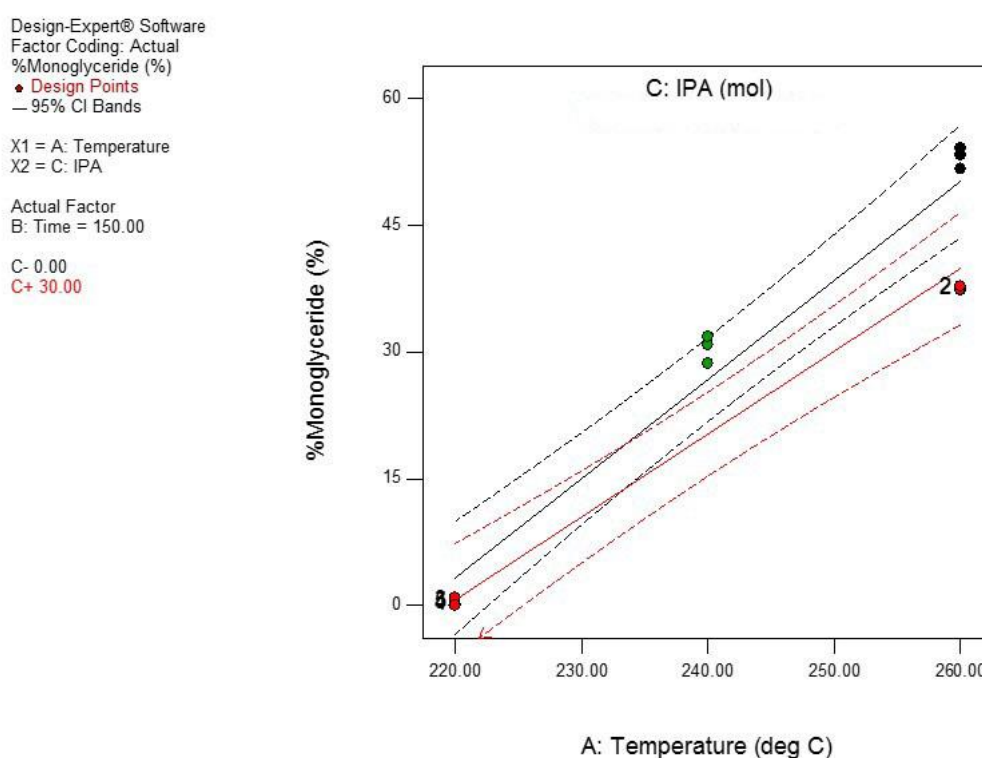
จากรูปที่ 4.1 เส้นทึบแสดงค่าที่ได้จากการทดลอง จุดสีแดงแสดงค่าที่ได้จากการทดลอง และเส้นประแสดงค่าความแปรปรวน พบว่าที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส การทำปฏิกิริยาที่เวลาจาก 30 ถึง 150 นาที ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ที่ต่ำกว่า 10 เนื่องจากอุณหภูมิไม่สูงพอต่อการเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสระหว่างน้ำมันปาล์มกับกลีเซอรอล เช่นเดียวกับอุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ที่ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงกว่าที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเพียงเล็กน้อย เมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส การเพิ่มระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาจาก 30 ไป 150 นาที ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 50 เนื่องจากสารตั้งต้นมีเวลาในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น แสดงว่าทำการทดลองที่อุณหภูมิน้อยกว่า 220 องศาเซลเซียส ไม่เกิดปฏิกิริยา จึงทำให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ดังนั้นการเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาสูง 260 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ ที่ภาวะการทดลองดังนี้ อุณหภูมิ 220–260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 30 - 150 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์ม (30:5:1)

#### 4.2.2 อุณหภูมิกับอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์ม (X:5:1) (AC)

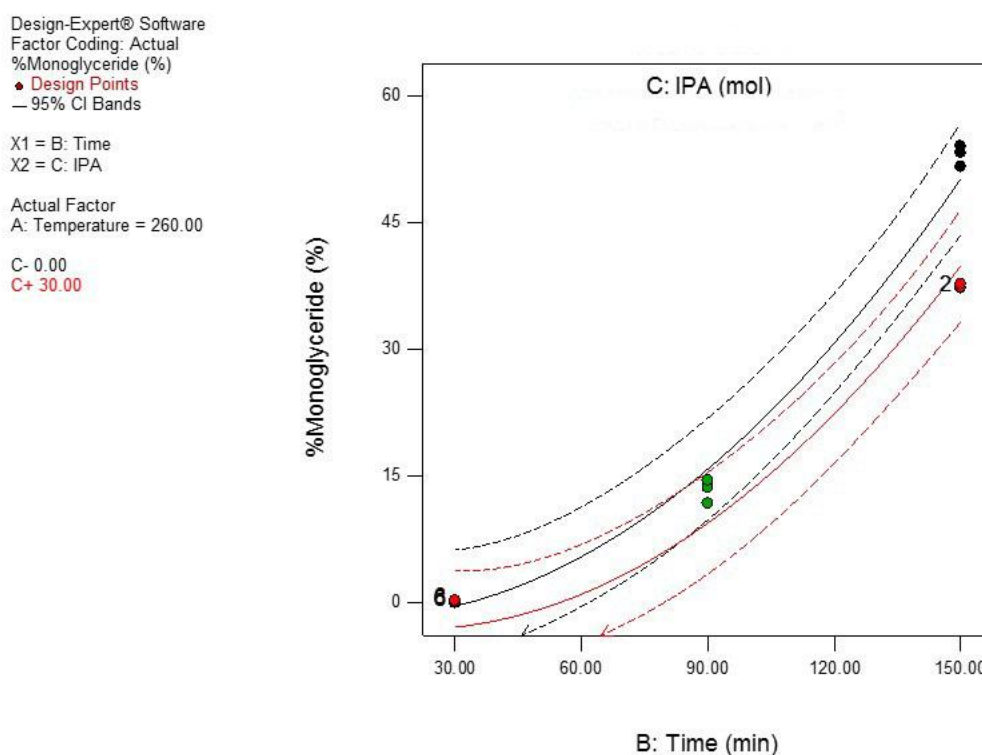
จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลเท่ากับ 0 และ 30 การเพิ่มอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาส่งผลให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์เพิ่มขึ้น และการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ ดังนั้นการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลเท่ากับ 0 ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุด (จุดสีดำ)



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ที่ภาวะการทดลองดังนี้ อุณหภูมิ 220–260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์ม (0–30:5:1)

#### 4.2.3 เวลาการเกิดปฏิกิริยากับอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์ม (X:5:1) (BC)

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลเท่ากับ 30 การเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจาก 30 เป็น 150 นาที ส่งผลให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลเท่ากับ 0 เนื่องจากไตรกลีเซอไรด์มีเวลาในการเกิดปฏิกิริยา กลีเซอไรด์ซิสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล ส่งผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์เพียงเล็กน้อย เนื่องจากไอโซโพรพานอลไม่มีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยา เอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมัน แต่การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลส่งผลต่อความหนืดที่ลดลง ซึ่งเป็นผลดีในการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ดังนั้นการเพิ่มระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาสูงถึง 150 นาที ที่อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลเท่ากับ 0 ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุด



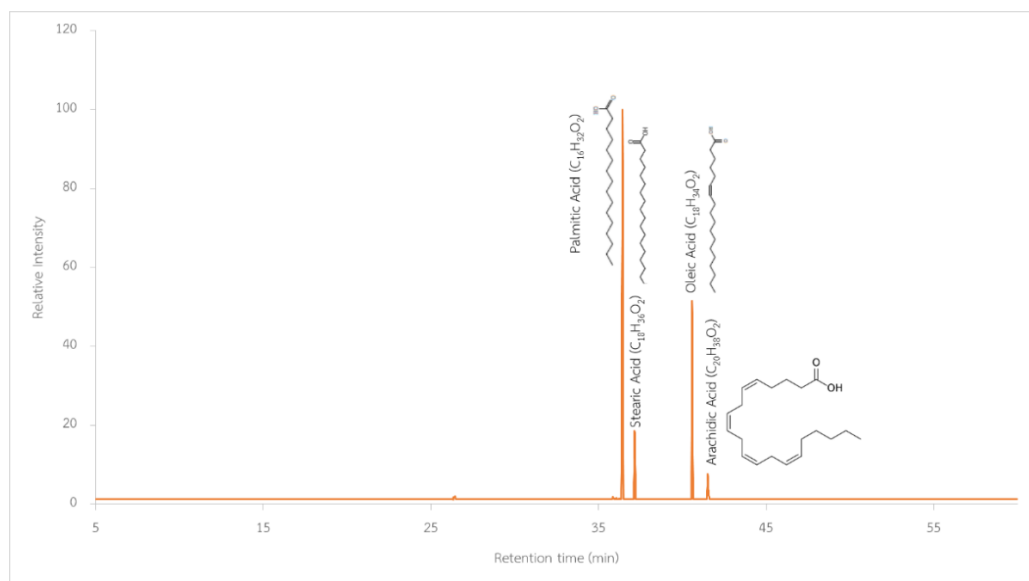
**รูปที่ 4.3** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเกิดปฏิกิริยากับอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มที่มีผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ที่ภาวะการทดลองตั้งนี้ อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์ม (0-30:5:1)

#### 4.3 การเปรียบเทียบร้อยละมอนอกลิเซอไรด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับวิธีต่างๆ

ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดที่ภาวะอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และไม่มีการเติมไอโซโพรพานอล

องค์ประกอบ	ร้อยละที่ได้
มอนอกลิเซอไรด์	53.03
ไดกลีเซอไรด์	9.54
กรดไขมัน	1.10
ไตรกลีเซอไรด์	30.08
รวมทั้งหมด	93.76

จากตารางที่ 4.11 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดในงานวิจัยนี้ ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที ไม่มีการเติมไอโซโพรพานอล ไตรกลีเซอไรด์เหลือร้อยละ 30.08 แสดงว่ายังสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อได้อีก อาจต้องเพิ่มเวลาการเกิดปฏิกิริยา ร้อยละไดกลีเซอไรด์เท่ากับ 9.54 และร้อยละกรดไขมันเท่ากับ 1.10 จะเห็นว่าร้อยละผลิตภัณฑ์ไม่ถึง 100 เนื่องจากอาจมีบางพิกที่ไม่มีสารมาตรฐานมาเปรียบเทียบและพื้นที่ใต้พีคอาจจะน้อยมากจึงไม่นำมารวมในการคำนวณ จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS ดังรูปที่ 4.4 พบว่ามีกรดสเตียริกและกรดอะราคิโดนิก (Arachidonic acid) ดังนั้นจึงคาดว่าสารร้อยละ 6.24 ที่เหลือในผลิตภัณฑ์น่าจะเป็นกรดสเตียริกและกรดอะราคิโดนิก



**รูปที่ 4.4** โครมาโทแกรม GC-MS ของผลิตภัณฑ์ของกลีเซอรอลดิบ ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลดิบต่อน้ำมันปาล์ม 0:5:1

**ตารางที่ 4.12** แสดงภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอนอกลิเซอไรด์ในแต่ละวิธี

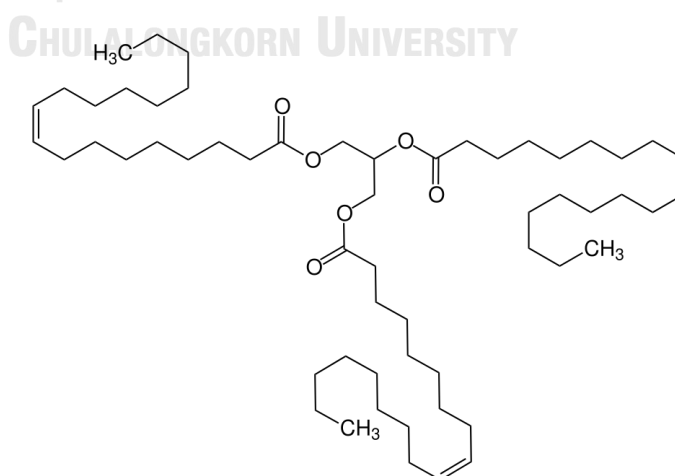
สารตั้งต้น	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ตัวทำละลาย	ภาวะที่ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์			%MG
			สูงสุด			
			อุณหภูมิ (°C)	เวลา* (นาที)	อัตราส่วนโดยโมล*	
ไตรกลีเซอไรด์ [9]	KOH, Ca(OH) <sub>2</sub>	N/R	255	N/R	N/R	50.00
เมทิลโอเลต [1]	MgO	-	250	120	4.5:1	77.00
น้ำมันถั่วเหลือง [9]	[Bmim]Im	-	200	180	6:1	69.00
กรดปาล์มติก [10]	Novozyme 435	Act-ECO <sub>2</sub> *	50	300	3:1	58.68
น้ำมันทานตะวัน [11]	-	Acetone	250	120	5:1	52.00
ไตรโอลีน [5]	-	i-Propanol	260	150	5:1	67.80
น้ำมันปาล์ม	-	i-Propanol	260	150	5:1	37.48
น้ำมันปาล์ม	-	-	260	150	5:1	53.03

- \* Act-ECO2 คือ acetone expanded-CO<sub>2</sub> และ N/R คือ ไม่มีการรายงาน
- \* เวลา คือ เวลาการเกิดปฏิกิริยา
- \* อัตราส่วนโดยโมล คือ อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์ม

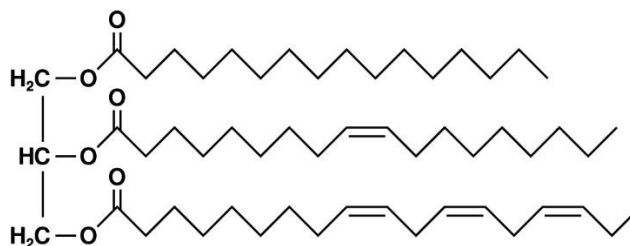
เมื่อนำร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ที่มากที่สุด มาเปรียบเทียบกับวิธีต่างๆ ในการผลิตมอนอกลิเซอไรด์ ดังตารางที่ 4.12 พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์น้อยกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ และของเหลวไอออนิก เนื่องจากมอนอกลิเซอไรด์สูญเสียไปกับการล้างผลิตภัณฑ์ ในงานวิจัยนี้การเติมไอโซโพรพานอลทำให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ลดลงจากร้อยละ 53.03 เหลือร้อยละ 37.48 เนื่องจากโมเลกุลของไอโซโพรพานอลไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยา งานวิจัยที่ใช้ไตรโอลลีนเป็นสารตั้งต้นและใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายได้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์เท่ากับ 67.8 แต่ไม่มีการรายงานร้อยละมอนอกลิเซอไรด์จากระบบที่ไม่มีการเติมตัวทำละลาย [50]

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการใช้ไตรโอลลีนกับน้ำมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ ที่ภาวะเดียวกันที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาทีและมีการเติมไอโซโพรพานอล พบว่าการใช้ ไตรโอลลีนเป็นสารตั้งต้นให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ที่สูงกว่าการใช้น้ำมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น จึงคาดว่าไตรโอลลีนเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าน้ำมันปาล์ม (ไตรกลีเซอไรด์)

จากการวิเคราะห์ปริมาณมอนอกลิเซอไรด์ประกอบด้วยมอนอปาล์มิตินและมอนอโอลลีน ดังภาคผนวก จ ในตารางที่ จ.1 พบว่าได้ร้อยละมอนอโอลลีนมากกว่าร้อยละมอนอปาล์มิติน แสดงว่ากรดโอลลิกในโมเลกุลของน้ำมันปาล์มทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่ากรดปาล์มิติก



รูปที่ 4.5 โครงสร้างไตรโอลลีน [49]



รูปที่ 4.6 โครงสร้างไตรกลีเซอไรด์ [50]

#### 4.4 การใช้กลีเซอรอลดิบเป็นสารตั้งต้น

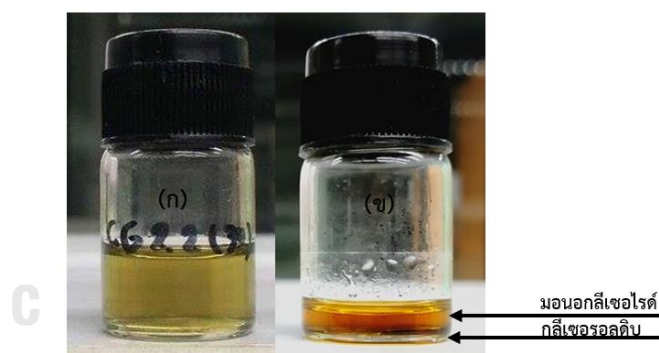
ตารางที่ 4.13 แสดงองค์ประกอบของกลีเซอรอลดิบจาก บริษัท บางจากไบโอฟูเอล จำกัด พบว่าองค์ประกอบหลักคือ กลีเซอรอลร้อยละ 80.82 และน้ำร้อยละ 13.44 แสดงว่าไตรกลีเซอไรด์สามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำเป็นกรดไขมันได้อีก จากตารางที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละมอนอกลิเซอไรด์จากการใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบเป็นสารตั้งต้น โดยมีไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลาย ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 30:5:1 พบว่า ได้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์เท่ากับ 37.48 และ 46.58 เมื่อใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบเป็นสารตั้งต้นตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าน้ำช่วยให้ไตรกลีเซอไรด์สลายตัวเป็นกรดไขมันได้ดีขึ้น ดังแสดงในภาคผนวก จ ตารางที่ จ2 จะพบว่า ปริมาณไตรกลีเซอไรด์เหลือเพียงร้อยละ 4.96 เมื่อใช้กลีเซอรอลดิบเป็นสารตั้งต้น ส่วนการใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นสารตั้งต้นเหลือร้อยละไตรกลีเซอไรด์ในผลิตภัณฑ์เท่ากับ 17.31 แสดงให้เห็นว่าการมีน้ำในกลีเซอรอลดิบช่วยเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับกลีเซอรอลดิบ ที่ภาวะอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 30:5:1 ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเนื้อเดียว หลังจากกระเหยไอโซโพรพานอลออกมีการแยกเป็น 2 ชั้น ดังรูปที่ 4.7 ผลิตภัณฑ์ชั้นบนเป็นมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ และกรดไขมัน และชั้นล่างเป็นกลีเซอรอล แสดงให้เห็นว่าไอโซโพรพานอลเป็นตัวกลางที่ช่วยผสมสารระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับกลีเซอรอลให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำชั้นล่างที่เป็นกลีเซอรอลหารร้อยละกลีเซอรอลดังแสดงในภาคผนวก ง พบว่า ร้อยละกลีเซอรอลลดลงจากร้อยละ 80.82 เหลือร้อยละ 24.54



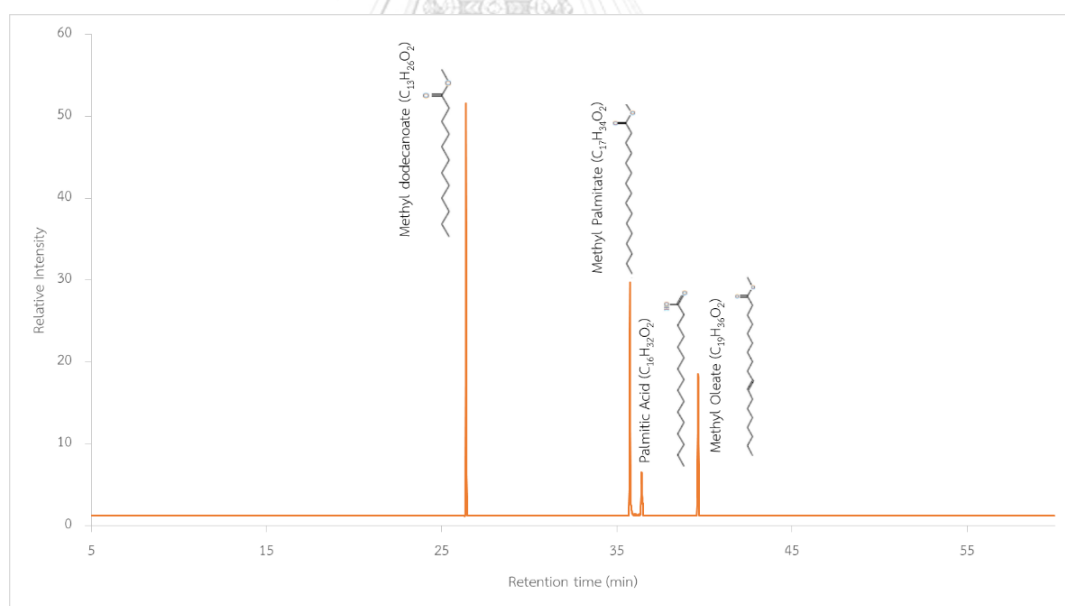
ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบกลีเซอรอลดิบจากบริษัทบางจากไบโอฟูเอลจำกัด

องค์ประกอบ	หน่วย	วิธีทดสอบ	ข้อกำหนด	ผลที่ได้
ปริมาณกลีเซอรอล	ร้อยละโดยน้ำหนัก	BS 5711 part 3:1979	น้อยกว่า 80	80.82
ปริมาณเมทานอล	ร้อยละโดยน้ำหนัก	BS 5711 part 11: 1979	มากที่สุด 0.5	0.007
ปริมาณน้ำ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ISO 2097-1972	-	13.44
ความหนาแน่น ที่ 30 °C	กรัมต่อลูกบาศก์เมตร	Digital Density Meter	-	1.25
ปริมาณเกลือ เช่น NaCl	ร้อยละโดยน้ำหนัก	BS 5711 part 12: 1979	มากที่สุด 7	3.58
เถ้าถ่าน	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ISO 2098-1972	-	1.05
MONG	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ISO 2464-1973	-	1.10
pH	-	pH meter	-	5.78



รูปที่ 4.7 ผลลัพธ์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับกลีเซอรอลดิบที่ภาวะอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 30:5:1 (ก) ผลลัพธ์ที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยา และ (ข) ผลลัพธ์หลังจากระเหยไอโซโพรพานอล

น้ำมันปาล์มที่ทำปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสกับกลีเซอรอลบริสุทธิ์โดยไม่มีไอโซพรีนอลเป็นตัวทำละลาย ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที ได้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์เท่ากับ 53.03 ส่วนการทำปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสระหว่างน้ำมันปาล์มกับกลีเซอรอลดิบโดยไม่มีไอโซพรีนอลเป็นตัวทำละลาย ได้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์เท่ากับ 25.52 ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์จากกลีเซอรอลดิบได้น้อยกว่ากลีเซอรอลบริสุทธิ์เนื่องจากไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับน้ำเปลี่ยนเป็นกรดไขมันได้น้อยเมื่อไม่มีไอโซพรีนอลช่วยลดความหนืดระหว่างน้ำมันปาล์มกับกลีเซอรอล การใช้กลีเซอรอลดิบเป็นสารตั้งต้นน้ำช่วยให้ไตรกลีเซอไรด์สลายตัวเป็นกรดไขมันได้ดีขึ้น จะเห็นว่าเมื่อใช้กลีเซอรอลดิบเป็นสารตั้งต้นได้ร้อยละไตรกลีเซอไรด์เท่ากับ 21.08 ส่วนการใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นสารตั้งต้นมีร้อยละไตรกลีเซอไรด์ในผลิตภัณฑ์เท่ากับ 30.08 ร้อยละไตรกลีเซอไรด์ในผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่อใช้กลีเซอรอลดิบเป็นสารตั้งต้น เนื่องจากมีเมทานอลในกลีเซอรอลดิบทำให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เมทานอลมีโมเลกุลที่เล็กกว่ากลีเซอรอลทำให้เมทานอลเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่ากลีเซอรอล จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS พบเมทิลเอสเทอร์ปนเปื้อนในตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.8



**รูปที่ 4.8** โครมาโทแกรม GC-MS ของผลิตภัณฑ์ของกลีเซอรอลดิบ ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซพรีนอลต่อกลีเซอรอลดิบต่อ น้ำมันปาล์ม 0:5:1

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับกลีเซอรอลดิบที่ภาวะอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 0:5:1 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาและระเหยไอโซโพรพานอล ผลิตภัณฑ์มี 2 เช่นเดียวกับการใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นสารตั้งต้น ชั้นบนเป็นมอนอกลิเซอไรด์ และชั้นล่างเป็นกลีเซอรอล



**รูปที่ 4.9** ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับกลีเซอรอลดิบที่ภาวะอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 0:5:1

**ตารางที่ 4.14** การเปรียบเทียบร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ที่เกิดขึ้นจากการใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบ

สารตั้งต้น	ตัวทำละลาย	ภาวะที่ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุด				%MG	%G*
		อุณหภูมิ (°C)	เวลาการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมัน			
น้ำมันปาล์ม+ กลีเซอรอล บริสุทธิ์	-	260	150	5:1	53.03	56.78	
น้ำมันปาล์ม+ กลีเซอรอล บริสุทธิ์	i-Propanol	260	150	5:1	37.48	87.16	
น้ำมันปาล์ม+ กลีเซอรอลดิบ	-	260	150	5:1	25.52	59.80	
น้ำมันปาล์ม+ กลีเซอรอลดิบ	i-Propanol	260	150	5:1	46.58	24.54	

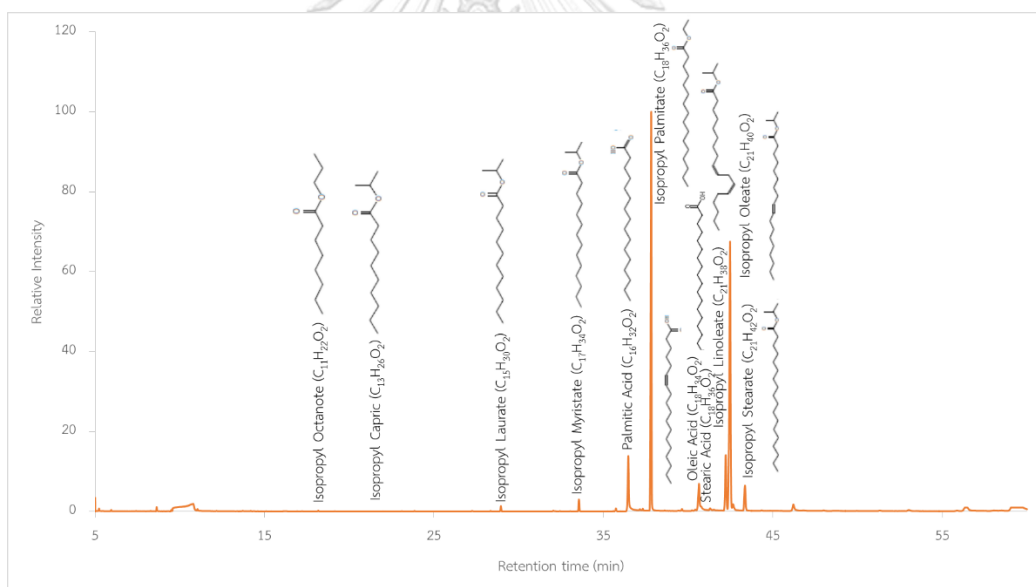
\*%G คือ ความบริสุทธิ์กลีเซอรอลหลังทำปฏิกิริยา

จากตารางที่ 4.15 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกลีเซอรอลดิบ ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดเท่ากับ 46.58 ที่ภาวะอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 30:5:1 องค์ประกอบที่เหลือประกอบด้วย ร้อยละไดกลีเซอไรด์เท่ากับ 3.61 ร้อยละกรดไขมันเท่ากับ 1.05 ร้อยละไตรกลีเซอไรด์เท่ากับ 4.96 และสารอื่นๆ ร้อยละ 43.8 จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกลีเซอรอลดิบด้วยเครื่อง GC-MS พบว่า ผลิตภัณฑ์มีการปนเปื้อนของไอโซโพรพิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 อย่างไรก็ตาม ปริมาณที่แน่นอนของไอโซโพรพิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ปนเปื้อนไม่สามารถตรวจวัดได้ เนื่องจากไม่มีสารมาตรฐานโพรพิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน นอกจากนี้ จะพบว่าร้อยละไอโซโพรพิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์ที่ใช้กลีเซอรอลดิบและกลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นสารตั้งต้นได้ร้อยละไอโซโพรพิลเอสเทอร์เท่ากับ 11.37 และ 8.16 ตามลำดับ ดังภาคผนวก จ ในตารางที่

จ.2 เนื่องจากการมีน้ำในระบบที่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์และไอโซโพรพานอลมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่ากลีเซอรอล

**ตารางที่ 4.15** องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดจากการทำปฏิกิริยากลิเซอรไลซิสระหว่างน้ำมันปาล์มกับกลีเซอรอลดิบ

องค์ประกอบ	ร้อยละที่ได้
มอนอกลิเซอไรด์ (%MG)	46.58
ไดกลีเซอไรด์ (%DG)	3.61
กรดไขมัน (%FA)	1.05
ไตรกลีเซอไรด์ (%TG)	4.96
ไอโซโพรพิลเอสเทอร์	11.37



**รูปที่ 4.10** โครมาโทแกรม GC-MS ของผลิตภัณฑ์ของกลีเซอรอลดิบ ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลดิบต่อน้ำมันปาล์ม 30:5:1

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตมอนอกลิเซอไรด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากกลีเซอรอลบริสุทธิ์และน้ำมันปาล์ม จากการทดลองพบว่า ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์สูงสุดเท่ากับ 53.03 ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที ไม่มีการเติมไอโซโพรพานอล ผลิตภัณฑ์ส่วนที่เหลือเป็นร้อยละไตรกลีเซอไรด์เท่ากับ 23.56 ร้อยละไดกลีเซอไรด์เท่ากับ 9.10 และร้อยละกรดไขมันเท่ากับ 1.14 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และสมการถดถอยพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ ปัจจัยหลักอุณหภูมิ (A) เวลาการเกิดปฏิกิริยา (B) และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล (C) ปัจจัยร่วมอุณหภูมิและเวลาการเกิดปฏิกิริยา (AB) อุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล (AC) เวลาการเกิดปฏิกิริยาและอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล (BC) และปัจจัยส่วนโค้งเวลาการเกิดปฏิกิริยา ( $B^2$ ) และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล ( $C^2$ ) แต่ไม่มีส่วนโค้งของอุณหภูมิแสดงว่า อุณหภูมิมีความสัมพันธ์เชิงเส้น ส่วนร้อยละไดกลีเซอไรด์และร้อยละกรดไขมันไม่มีความสัมพันธ์กับภาวะในการทำปฏิกิริยา ไอโซโพรพานอลไม่ทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอล แต่มีส่วนช่วยลดความหนืดระหว่างน้ำมันปาล์มกับกลีเซอรอล และมีประโยชน์ต่อการผลิตในระบบต่อเนื่องต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบการผลิตมอนอกลิเซอไรด์โดยใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์และกลีเซอรอลดิบเป็นสารตั้งต้น พบว่าได้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ เท่ากับ 37.48 และ 46.58 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มเท่ากับ 30:5:1 เนื่องจากในกลีเซอรอลดิบมีการปนเปื้อนของน้ำร้อยละ 10 ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้เป็นกรดไขมันได้เร็วกว่าการเกิดปฏิกิริยาไกลเซโรไลซิสเพียงอย่างเดียว เมื่อไม่มีการเติมไอโซโพรพานอล การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียสและเวลาการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที การใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์เป็นสารตั้งต้นให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์เท่ากับ 53.03 แต่การใช้กลีเซอรอลดิบเป็นสารตั้งต้นให้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์เพียงร้อยละ 25.52 แสดงให้เห็นว่าไอโซโพรพานอลช่วยทำให้ปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันปาล์มและกลีเซอรอลดิบเกิดได้ดีขึ้น เนื่องจากไอโซโพรพานอลช่วยลดความหนืดของน้ำมันปาล์มกับกลีเซอรอลได้ดี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในระบบที่ไม่มีไอโซโพรพานอลการทำปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับกลีเซอรอลบริสุทธิ์ควรทดลองเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 260 องศาเซลเซียส และเวลาการเกิดปฏิกิริยามากกว่า 150 นาที เพื่อให้ได้ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ที่มากขึ้น

2. ในระบบที่มีไอโซโพรพานอล จะได้ผลิตภัณฑ์ทั้งมอนอกลิเซอไรด์และไอโซโพรพิลเอสเทอร์ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้โดยไม่ต้องกลั่นแยกมอนอกลิเซอไรด์และโพรพิลเอสเทอร์

3. การเกิดปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับกลีเซอรอล น้ำมันปาล์มซึ่งมีทั้งกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัว ควรทดลองใช้น้ำมันพืชชนิดอื่นเป็นสารตั้งต้นเพื่อเปรียบเทียบ

4. ที่ภาวะอุณหภูมิและอัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์มเดียวกันควรมีการเพิ่มเวลาการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น เพื่อจะได้ศึกษาอิทธิพลของเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้



## รายการอ้างอิง

1. Ferretti C.A., Soldano A., Apesteguía C.R., and Di Cosimo J.I. Monoglyceride synthesis by glycerolysis of methyl oleate on solid acid–base catalysts. Chemical Engineering Journal 161 (2010): 346-354.
2. Y. Zheng X.C., Y. Shen Commodity chemicals derived from glycerol, an important biorefinery feedstock. Chem Rev 110 (2010): 1807.
3. Corma A., Hamid S., Iborra S., and Velty A. Lewis and Brønsted basic active sites on solid catalysts and their role in the synthesis of monoglycerides. Journal of Catalysis 234 (2005): 340-347.
4. Thormar H., Hilmarsson H., and Bergsson G. Stable concentrated emulsions of the 1-monoglyceride of capric acid (monocaprin) with microbicidal activities against the food-borne bacteria *Campylobacter jejuni*, *Salmonella* spp., and *Escherichia coli*. Appl Environ Microbiol 72 (2006): 522-6.
5. Liu Q., Yan T., Jiang Z., and Fang T. Sustainable utilization of crude glycerol from biodiesel production: catalyst free monoacylglycerols production. Journal of Chemical Technology & Biotechnology 92 (2017): 1801-1808.
6. Quispe C.A.G., Coronado C.J.R., and Carvalho Jr J.A. Glycerol: production, consumption, prices, characterization and new trends in combustion. Renewable and Sustainable Energy Reviews 27 (2013): 475-493.
7. Ferretti C.A., Fuente S., Ferullo R., Castellani N., Apesteguía C.R., and Di Cosimo J.I. Monoglyceride synthesis by glycerolysis of methyl oleate on MgO: catalytic and DFT study of the active site. Applied Catalysis A: General 413-414 (2012): 322-331.
8. Singh D., Patidar P., Ganesh A., and Mahajani S. Esterification of oleic acid with glycerol in the presence of supported zinc oxide as catalyst. Industrial & Engineering Chemistry Research 52 (2013): 14776-14786.
9. Luo H., Zhai Z., Fan W., Cui W., Nan G., and Li Z. Monoacylglycerol synthesis by glycerolysis of soybean oil using alkaline ionic liquid. Industrial & Engineering Chemistry Research 54 (2015): 4923-4928.



10. Tai H.P. and Brunner G. Mono- and di-acylglycerol synthesis in CO<sub>2</sub>-expanded acetone. The Journal of Supercritical Fluids 59 (2011): 87-91.
11. Go A.W., Sutanto S., Ismadji S., and Ju Y.-H. Catalyst free production of partial glycerides: acetone as solvent. RSC Adv. 5 (2015): 30833-30840.
12. Bera D., Lahiri D., Antonella D.L., De K.B., and Nag A. A novel azeotropic mixture for solvent extraction of edible oils. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal 8 (2006): 1-6.
13. Jaecker-Voirol A., Durand I., Hillion G., Delfort B., and Montagne X. Glycerin for new biodiesel formulation. Oil & Gas Science and Technology - Revue de l'IFP 63 (2008): 395-404.
14. Demirbas A. Political, economic and environmental impacts of biofuels: a review. Applied Energy 86 (2009): S108-S117.
15. Andreani L. and Rocha J.D. Use of ionic liquids in biodiesel production: a review Brazilian Journal of Chemical Engineering 29 (2011): 1-13.
16. Bournay L., Casanave D., Delfort B., Hillion G., and Chodorge J.A. New heterogeneous process for biodiesel production: a way to improve the quality and the value of the crude glycerin produced by biodiesel plants. Catalysis Today 106 (2005): 190-192.
17. Yuste A.J. and Dorado M.P. A neural network approach to simulate biodiesel production from waste olive oil. Energy & Fuels 20 (2006): 399-402.
18. Gonzalez-Pajuelo M., Andrade J.C., and Vasconcelos I. Production of 1,3-propanediol by clostridium butyricum VPI 3266 using a synthetic medium and raw glycerol. Industrial Microbiology Biotechnology 31 (2004): 442-6.
19. Melero J.A., Vicente G., Morales G., Paniagua M., Moreno J.M., Roldán R., Ezquerro A., and Pérez C. Acid-catalyzed etherification of bio-glycerol and isobutylene over sulfonic mesostructured silicas. Applied Catalysis A: General 346 (2008): 44-51.
20. Yazdani S.S. and Gonzalez R. Anaerobic fermentation of glycerol: a path to economic viability for the biofuels industry. Current Opinion in Biotechnology 18 (2007): 213-9.

21. Rahmat N., Abdullah A.Z., and Mohamed A.R. Recent progress on innovative and potential technologies for glycerol transformation into fuel additives: A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010): 987-1000.
22. Tan H.W., Abdul Aziz A.R., and Aroua M.K. Glycerol production and its applications as a raw material: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 27 (2013): 118-127.
23. Oil-gasportal [Internet]. [cited Nov 6, 2017]. Available from. <http://www.oil-gasportal.com/wp-content/uploads/2015/01/Imagine41.png>.
24. Bohon M.D., Metzger B.A., Linak W.P., King C.J., and Roberts W.L. Glycerol combustion and emissions. Proceedings of the Combustion Institute 33 (2011): 2717-2724.
25. Francis G., Edinger R., and Becker K. A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India: need, potential and perspectives of jatropha plantations. Natural Resources Forum 29 (2005): 12-24.
26. Banse M., van Meijl H., Tabeau A., Woltjer G., Hellmann F., and Verburg P.H. Impact of EU biofuel policies on world agricultural production and land use. Biomass and Bioenergy 35 (2011): 2385-2390.
27. Crude and refined palm oil global market information [Internet]. [cited Nov 20, 2017]. Available from. <http://www.palm-oil.org/>.
28. Sabourin-Provost G. and Hallenbeck P.C. High yield conversion of a crude glycerol fraction from biodiesel production to hydrogen by photofermentation. Bioresour Technol 100 (2009): 3513-7.
29. Glycerin [Internet]. [cited Nov 6, 2017]. Available from. <https://www.ihs.com/products/glycerin-chemical-economics-handbook.html>.
30. Biodiesel and glycerol market [Internet]. [cited Nov 17, 2017]. Available from. <https://www.icis.com/chemicals/dashboard/#>.

31. Glycerol market [Internet]. [cited Nov 17, 2017]. Available from. <http://www.biodieselmagazine.com/articles/1123/combating-the-glycerin-glut/>.
32. กระทรวงพลังงาน แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก Alternative Energy Development Plan 1 (2015): 1-22.
33. Oleochemicals [Internet]. [cited Nov 15, 2017]. Available from. <https://www.scbeic.com/th/detail/product/2271>.
34. GRAIL Glycerol biorefinery approach for the production of high quality products of industrial value. European Programme 1 (2014).
35. Gong L., LÜ Y., Ding Y., Lin R., Li J., Dong W., Wang T., and Chen W. Solvent effect on selective dehydroxylation of glycerol to 1,3-propanediol over a Pt/WO<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> catalyst. Chinese Journal of Catalysis 30 (2009): 1189-1191.
36. Bueno L., Toro C., and Martín M. Techno-economic evaluation of the production of polyesters from glycerol and adipic acid. Chemical Engineering Research and Design 93 (2015): 432-440.
37. Mota C.J.A. Valorization of the glycerol by-product of biodiesel production. Woodhead Publishing 1 (2012): 232-253.
38. Chen H., Ding Y., Cong N.T., Dou B., Dupont V., Ghadiri M., and Williams P.T. A comparative study on hydrogen production from steam-glycerol reforming: thermodynamics and experimental. Renewable Energy 36 (2011): 779-788.
39. Skoulou V.K. and Zabaniotou A.A. Co-gasification of crude glycerol with lignocellulosic biomass for enhanced syngas production. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 99 (2013): 110-116.
40. Siles Lopez J.A., Martin Santos Mde L., Chica Perez A.F., and Martin Martin A. Anaerobic digestion of glycerol derived from biodiesel manufacturing. Bioresour Technol 100 (2009): 5609-15.
41. Rossi D.M., da Costa J.B., de Souza E.A., Peralba M.d.C.R., and Ayub M.A.Z. Bioconversion of residual glycerol from biodiesel synthesis into 1,3-propanediol and ethanol by isolated bacteria from environmental consortia. Renewable Energy 39 (2012): 223-227.

42. Gallardo R., Alves M., and Rodrigues L.R. Modulation of crude glycerol fermentation by *Clostridium pasteurianum* DSM 525 towards the production of butanol. Biomass and Bioenergy 71 (2014): 134-143.
43. Schütz H. and Radler F. Anaerobic reduction of glycerol to propanediol-1,3 by *Lactobacillus brevis* and *Lactobacillus buchneri*. Systematic and Applied Microbiology 5 (1984): 169-178.
44. Wu K.-J., Lin Y.-H., Lo Y.-C., Chen C.-Y., Chen W.-M., and Chang J.-S. Converting glycerol into hydrogen, ethanol, and diols with a *Klebsiella* sp. HE1 strain via anaerobic fermentation. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 42 (2011): 20-25.
45. Gutiérrez Ortiz F.J., Serrera A., Galera S., and Ollero P. Methanol synthesis from syngas obtained by supercritical water reforming of glycerol. Fuel 105 (2013): 739-751.
46. Bodík I., Blstáková A., Sedláček S., and Hutnán M. Biodiesel waste as source of organic carbon for municipal WWTP denitrification. Bioresour. Technol. 100 (2009): 2452-2456.
47. Go A.W., Sutanto S., Ismadji S., and Ju Y.-H. Catalyst free production of partial glycerides: acetone as solvent. Royal Society of Chemistry 5 (2015): 30833-30840.
48. Surfactants [Internet]. [cited Nov 16, 2017]. Available from. <https://www.sciencelearn.org.nz/images/1291-surfactants>.
49. Triolein [Internet]. [cited Dec 12, 2017]. Available from. <https://en.wikipedia.org/wiki/Triolein>.
50. Triglyceride [Internet]. [cited Dec 12, 2017]. Available from. <https://en.wikipedia.org/wiki/Triglyceride>.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

**ภาคผนวก ก**  
**การวิเคราะห์ความแปรปรวน**

**ตารางที่ ก.1** การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละมอนอกีเซอไรต์  
(A = อุณหภูมิ B = เวลาการเกิดปฏิกิริยา และ C = อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-Value
A	3193.43	1	3193.43	347.55	< 0.0001
B	4412.85	1	4412.85	480.26	< 0.0001
C	48.57	1	48.57	5.29	0.0271
AB	3020.72	1	3020.72	328.75	< 0.0001
AC	89.17	1	89.17	9.70	0.0035
BC	91.52	1	91.52	9.96	0.0031
A <sup>2</sup>	1.68	1	1.68	0.18	0.6717
B <sup>2</sup>	625.31	1	625.31	68.05	< 0.0001
C <sup>2</sup>	125.74	1	125.74	13.68	0.0007
Residual	349.16	38	9.19		
Lack of Fit	325.13	5	65.03	89.28	< 0.0001
Pure Error	24.03	33	0.73		
Cor Total	11927.57	47			

ตารางที่ ก.2 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละไดกลีเซอไรด์  
(A = อุณหภูมิ B = เวลาการเกิดปฏิกิริยา และ C = อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-Value
A	71.09	1	71.09	13.98	0.0006
B	98.25	1	98.25	19.32	< 0.0001
C	0.15	1	0.15	0.029	0.8649
AB	17.76	1	17.76	3.49	0.0694
AC	4.88	1	4.88	0.96	0.3336
BC	15.49	1	15.49	3.05	0.0890
A <sup>2</sup>	12.07	1	12.07	2.37	0.1317
B <sup>2</sup>	1.37	1	1.37	0.27	0.6062
C <sup>2</sup>	8.33	1	8.33	1.64	0.2084
Residual	193.22	38	5.08		
Lack of Fit	113.40	5	22.68	9.38	< 0.0001
Pure Error	79.82	33	2.42		
Cor Total	435.21	47			

ตารางที่ ก.3 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละกรดไขมัน  
(A = อุณหภูมิ B = เวลาการเกิดปฏิกิริยา และ C = อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล)

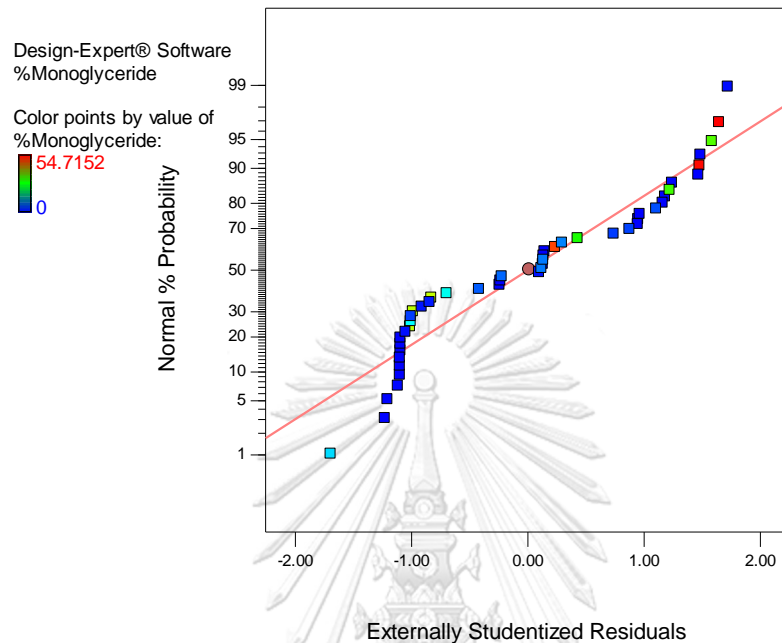
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-Value
Model	5.61	9	0.62	15.07	< 0.0001
A	2.21	1	2.21	53.55	< 0.0001
B	2.03	1	2.03	49.01	< 0.0001
C	0.022	1	0.022	0.52	0.4732
AB	0.97	1	0.97	23.52	< 0.0001
AC	8.419E-003	1	8.419E-003	0.20	0.6544
BC	0.047	1	0.047	1.14	0.2926
A <sup>2</sup>	1.253E-003	1	1.253E-003	0.030	0.8627
B <sup>2</sup>	6.045E-003	1	6.045E-003	0.15	0.7043
C <sup>2</sup>	0.24	1	0.24	5.76	0.0214
Residual	1.57	38	0.041		
Lack of Fit	0.46	5	0.091	2.71	0.0369
Pure Error	1.11	33	0.034		
Cor Total	7.18	47			



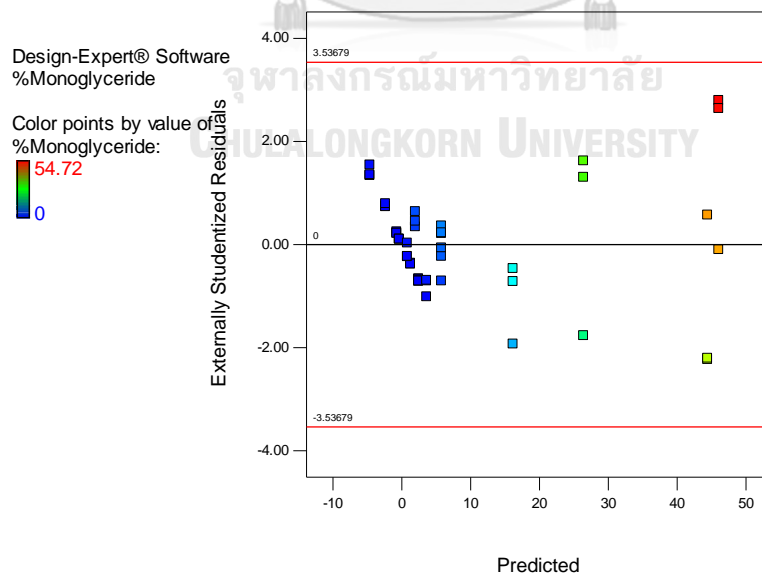
**ตารางที่ ก.4** การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละไตรกลีเซอไรด์  
(A = อุณหภูมิ B = เวลาการเกิดปฏิกิริยา และ C = อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอล)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-Value
Model	26224.88	9	2913.88	72.35	< 0.0001
A	9480.31	1	9480.31	235.40	< 0.0001
B	9749.18	1	9749.18	242.08	< 0.0001
C	792.86	1	792.86	19.69	< 0.0001
AB	5266.69	1	5266.69	130.78	< 0.0001
AC	117.92	1	117.92	2.93	0.0952
BC	14.64	1	14.64	0.36	0.5502
A <sup>2</sup>	102.51	1	102.51	2.55	0.1189
B <sup>2</sup>	277.95	1	277.95	6.90	0.0123
C <sup>2</sup>	677.92	1	677.92	16.83	0.0002
Residual	1530.37	38	40.27		
Lack of Fit	597.36	5	119.47	4.23	0.0044
Pure Error	933.01	33	28.27		
Cor Total	27755.25	47			

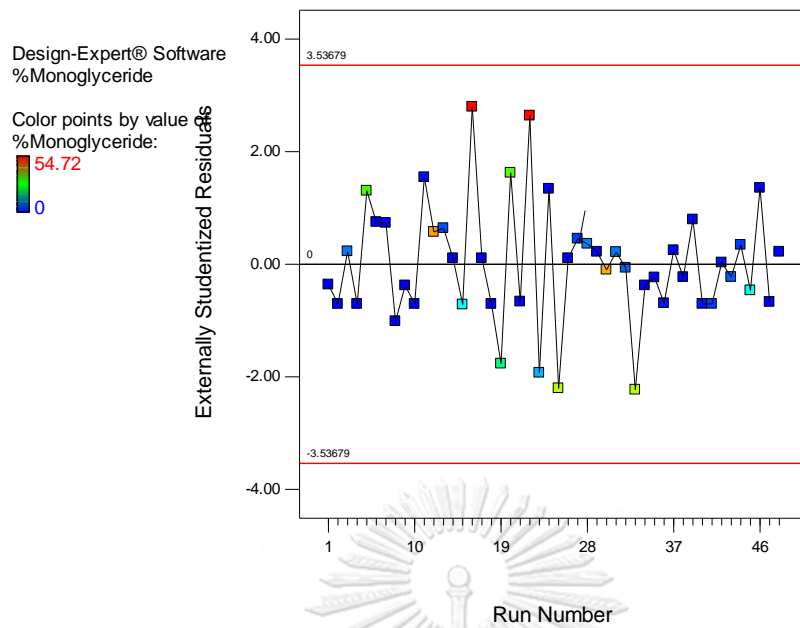
ภาคผนวก ข  
การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง



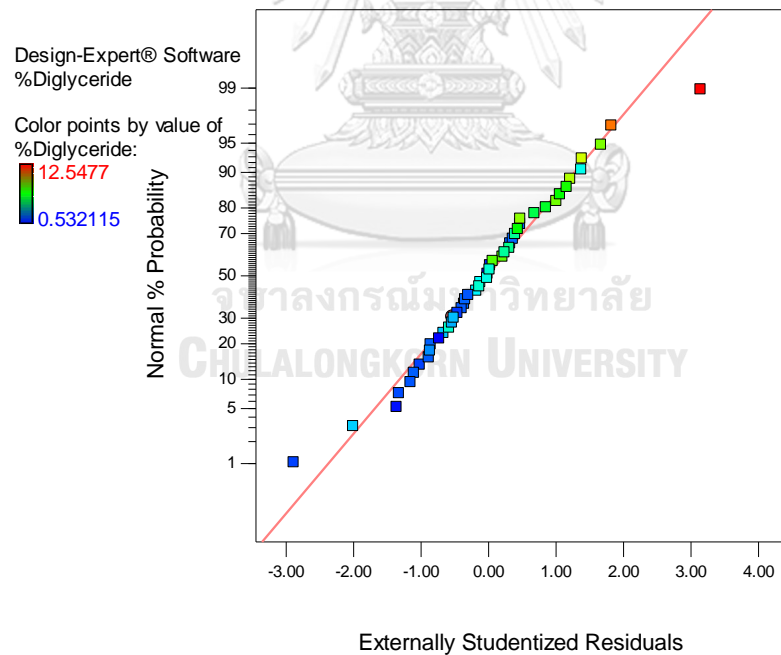
รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (Residuals) กับความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal % Probability) ของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละไขมันออกลิเซอไรด์



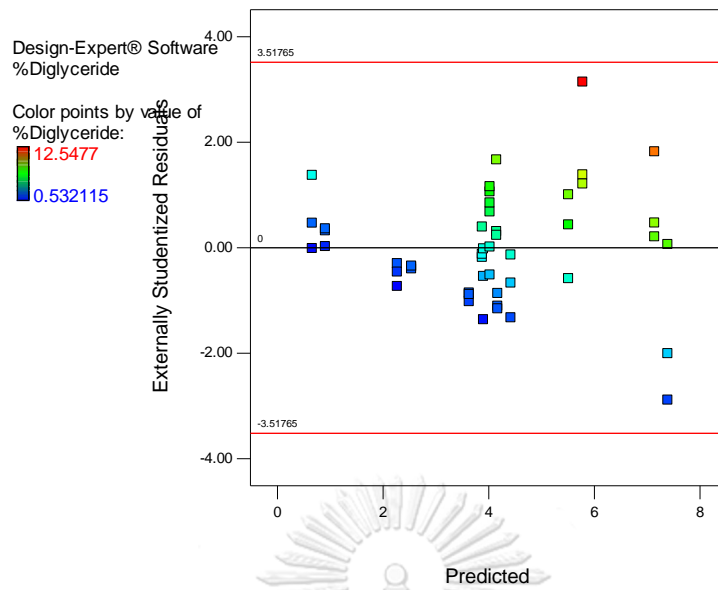
รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายจากสมการถดถอย (Predicted Value) กับ ส่วนตกค้าง (Residuals) ของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละไขมันออกลิเซอไรด์



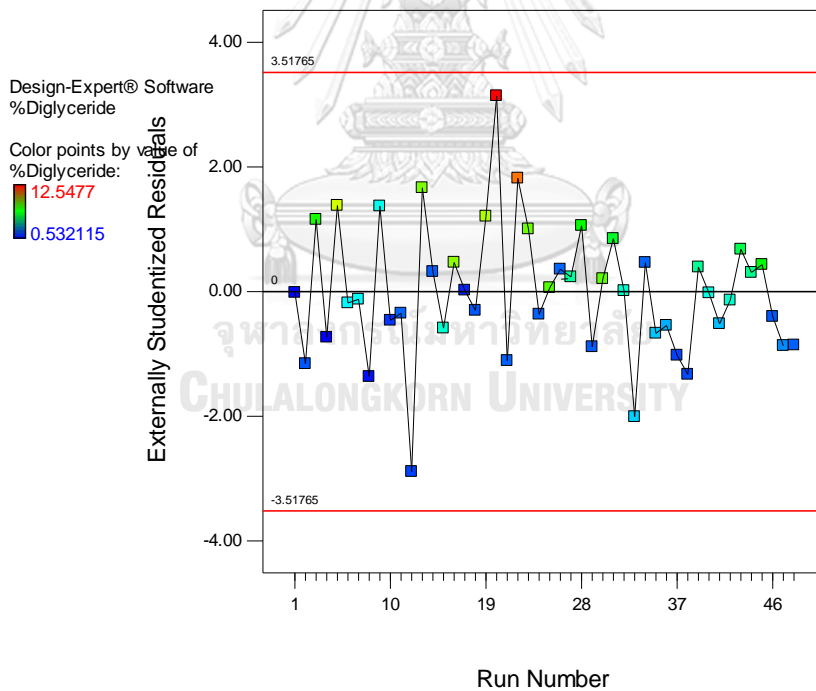
รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ลำดับเก็บข้อมูล (Run number) กับ ส่วนตกค้างของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละมอนอกลิเซอไรด์



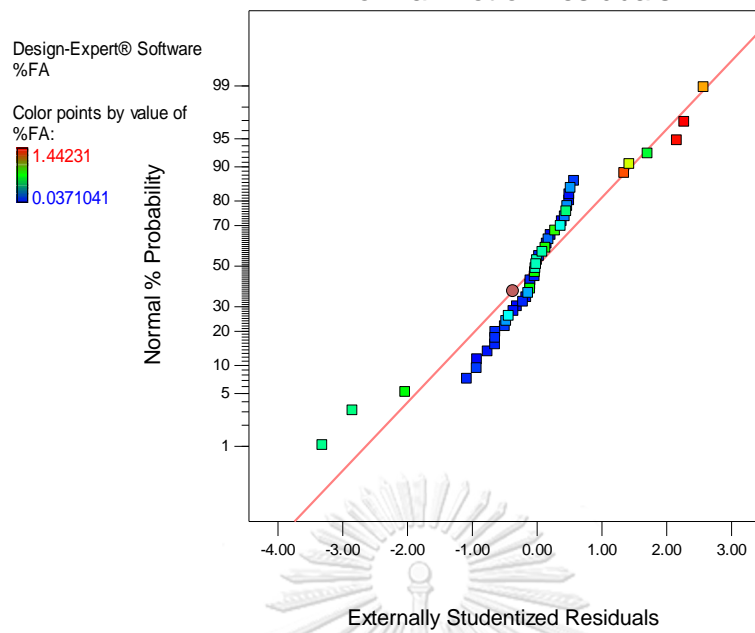
รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นแบบปกติของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละไดกลีเซอไรด์



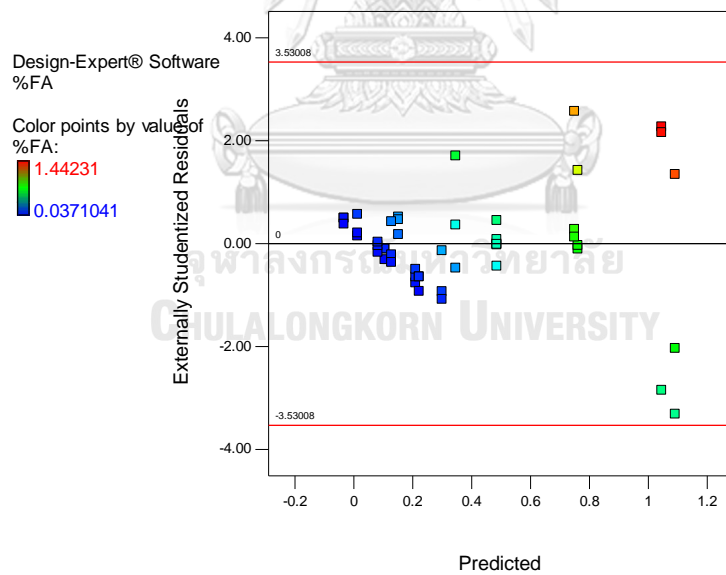
รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายจากสมการถดถอยกับส่วนตกค้างของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละไตรกลีเซอไรด์



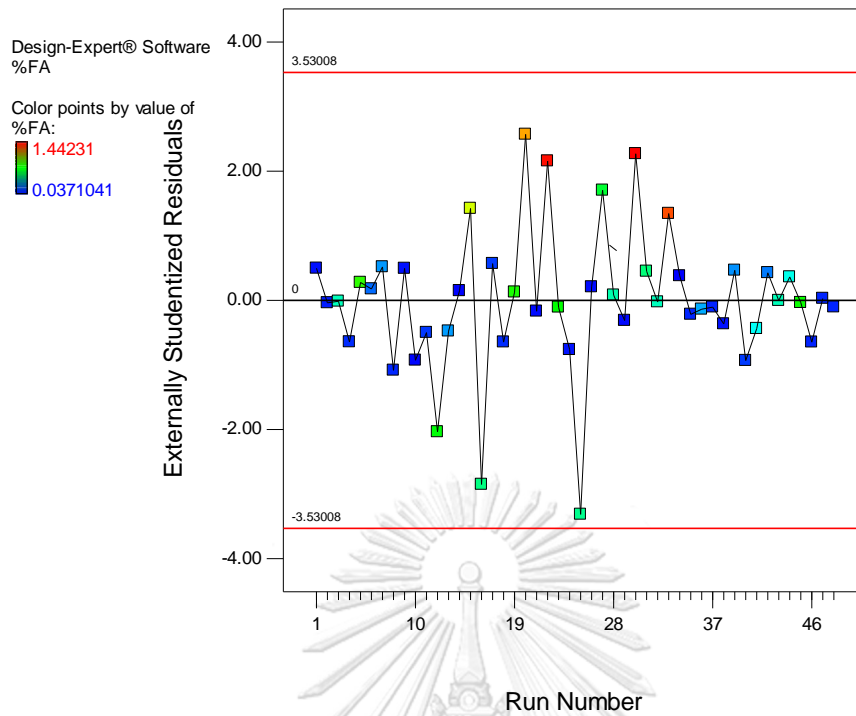
รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ลำดับเก็บข้อมูลกับส่วนตกค้างของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละไตรกลีเซอไรด์



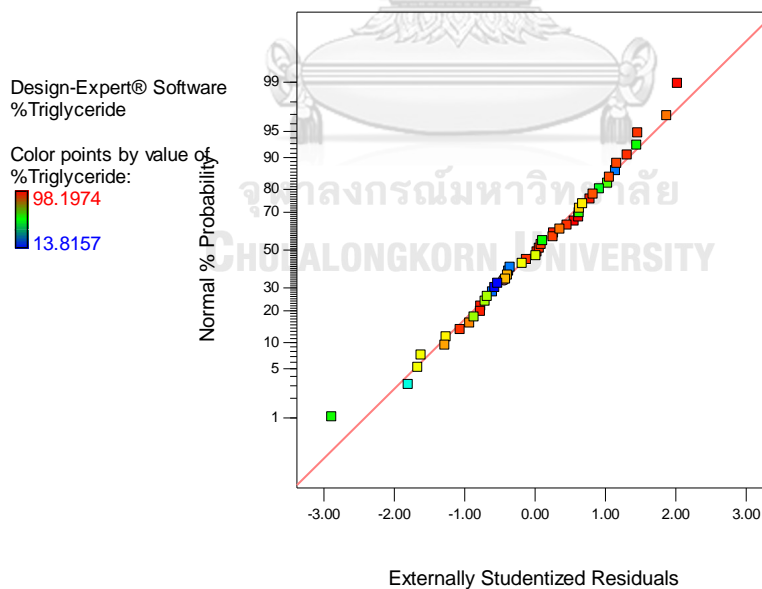
รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นแบบปกติของสมการถดถอยที่ใช้ทำนาย  
ค่าร้อยละกรดไขมัน



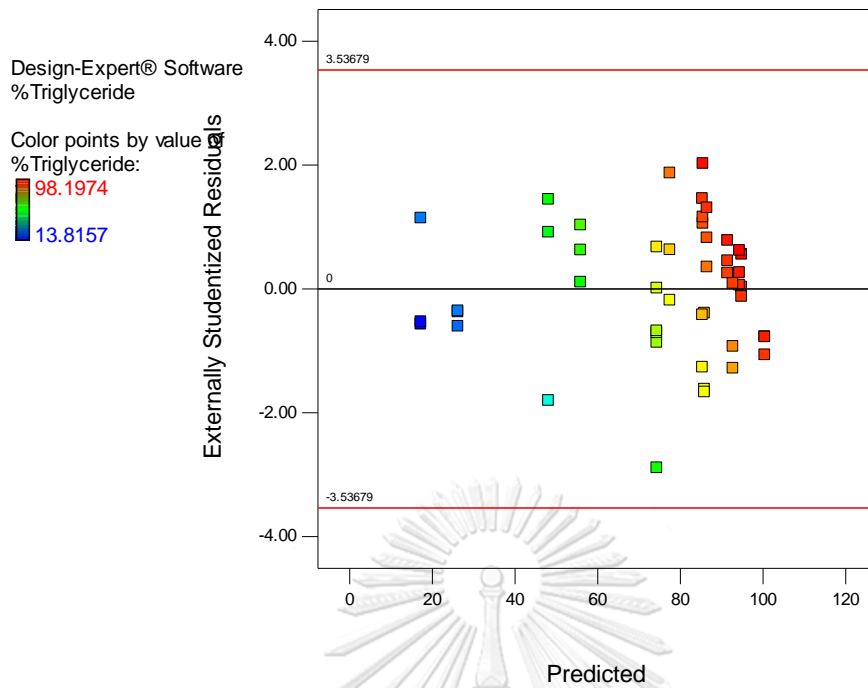
รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายจากสมการถดถอยกับส่วนตกค้างของสมการถดถอยที่ใช้  
ทำนายค่าร้อยละกรดไขมัน



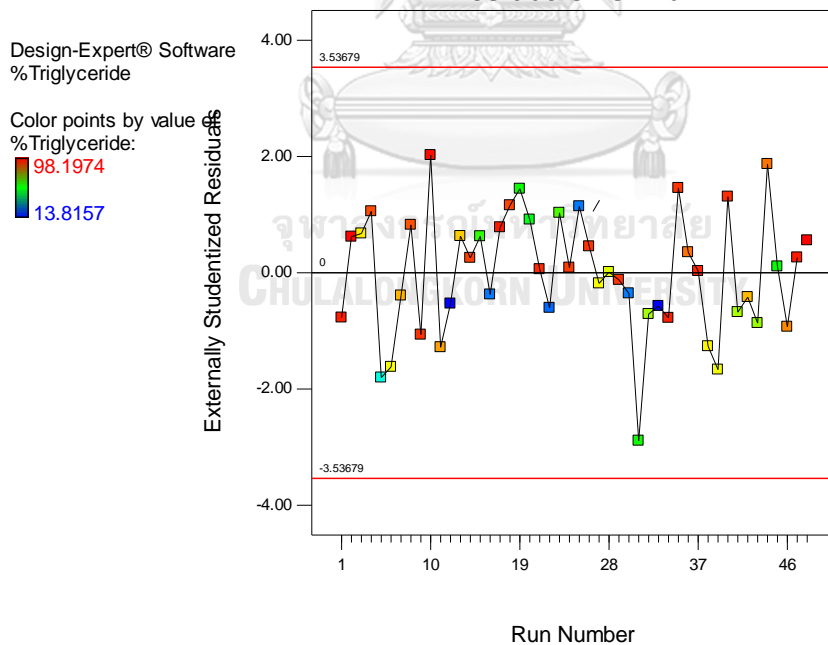
รูปที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ลำดับเก็บข้อมูลกับส่วนตกค้างของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่า ร้อยละกรดไขมัน



รูปที่ ข.10 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นแบบปกติของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละไตรกลีเซอไรด์



รูปที่ ข.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายจากสมการถดถอยกับส่วนตกค้างของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละไตรกลีเซอไรด์



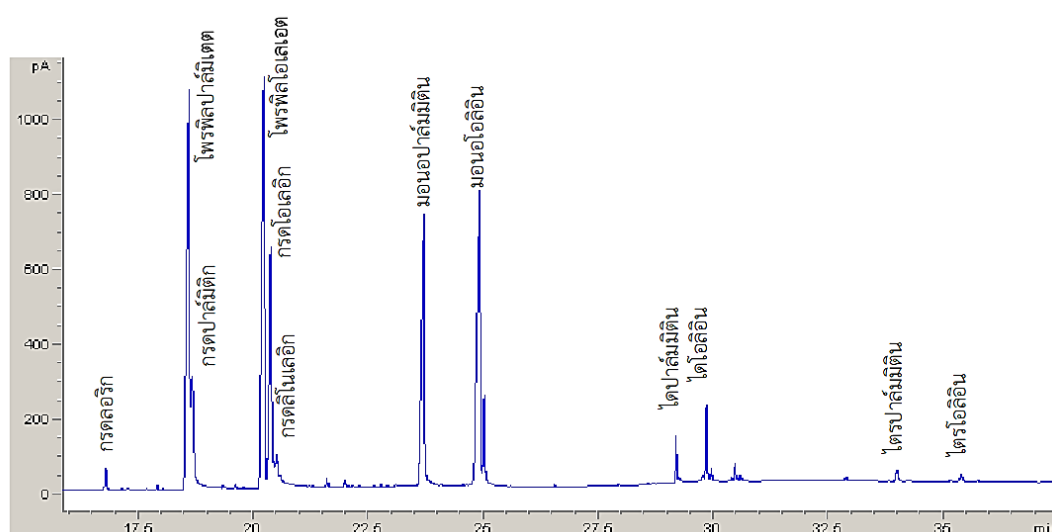
รูปที่ ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ลำดับเก็บข้อมูลกับส่วนตกค้างของสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าร้อยละไตรกลีเซอไรด์

## ภาคผนวก ค

### การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

#### การวิเคราะห์ชนิดของผลิตภัณฑ์

ในการวิเคราะห์หาชนิดของผลิตภัณฑ์สามารถวิเคราะห์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ ซึ่งพิจารณาจากโครมาโทแกรมโดยเทียบกับ Retention time ของสารแต่ละชนิด โดยตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 โครมาโทแกรมของสารมาตรฐานแต่ละชนิดที่ Retention time ที่แตกต่างกัน

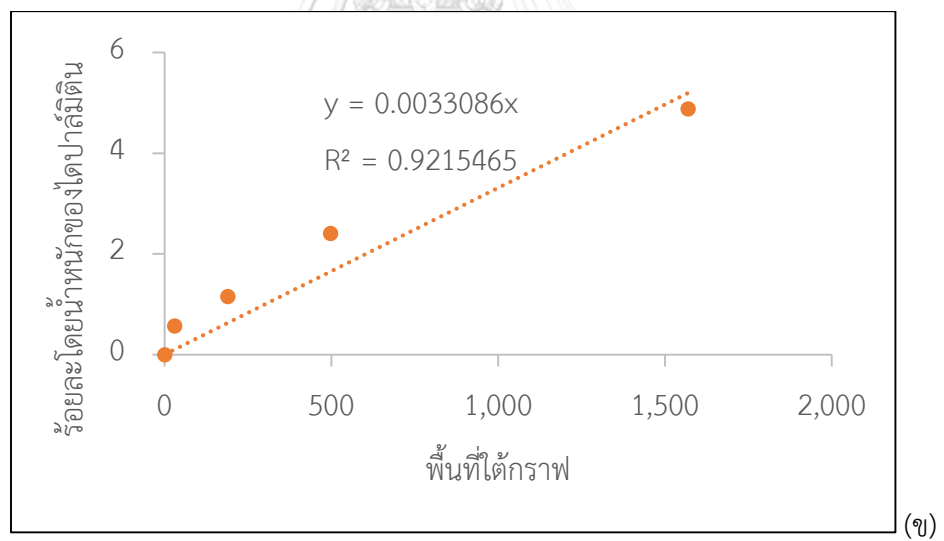
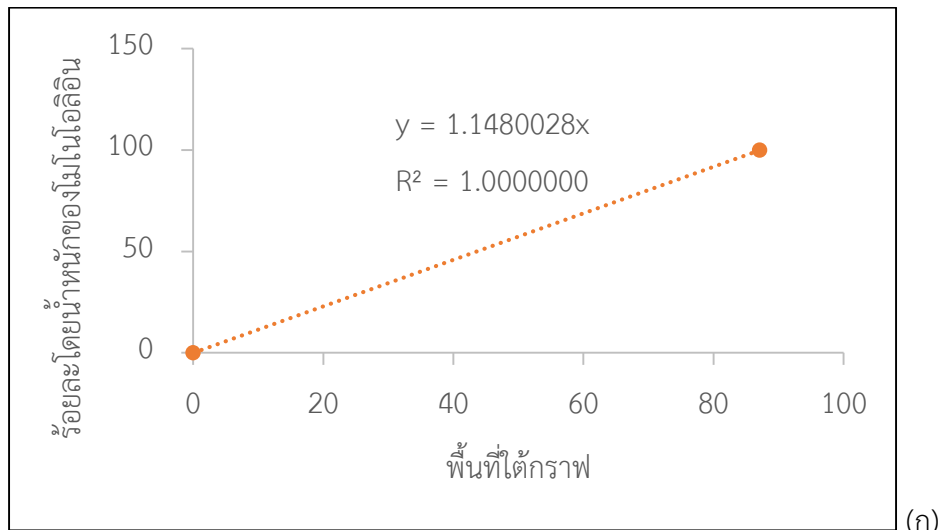
#### กราฟมาตรฐาน

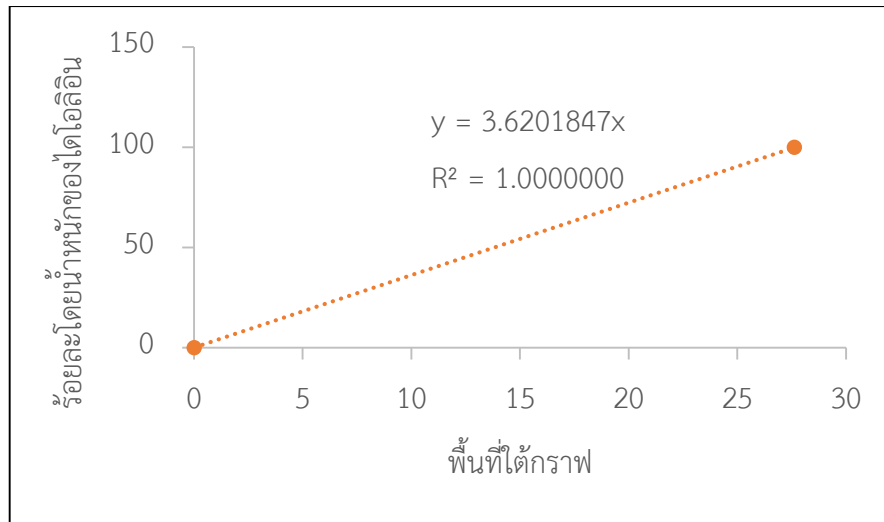
การวิเคราะห์ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ และกรดไขมัน สามารถคำนวณได้จากการพลอตพื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area) กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเพื่อนำมาสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) โดยให้แกน X เป็นพื้นที่ใต้กราฟ และแกน Y เป็นความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน ซึ่งจะได้เส้นความสัมพันธ์ของกราฟเป็นเส้นตรง โดยผ่านจุดกำเนิด หลังจากนั้นแทนค่าที่ได้จากการทดลองลงในสมการของกราฟมาตรฐาน เพื่อหาปริมาณต่อไป แสดงดังสมการ ค.1



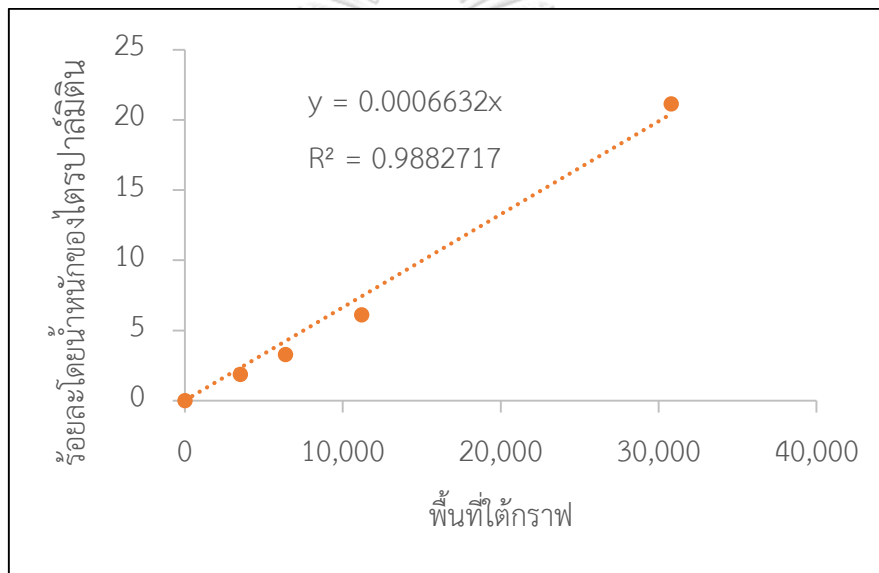
$$y = mx \quad (\text{ค1})$$

- เมื่อ  $y$  คือ ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)  
 $m$  คือ ความชันของกราฟ (ค่าคงที่)  
 $x$  คือ พื้นที่ใต้กราฟ

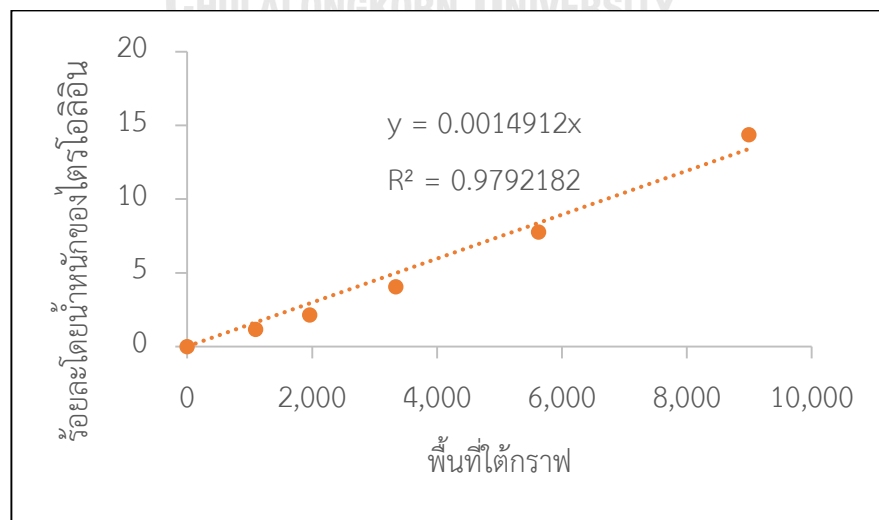




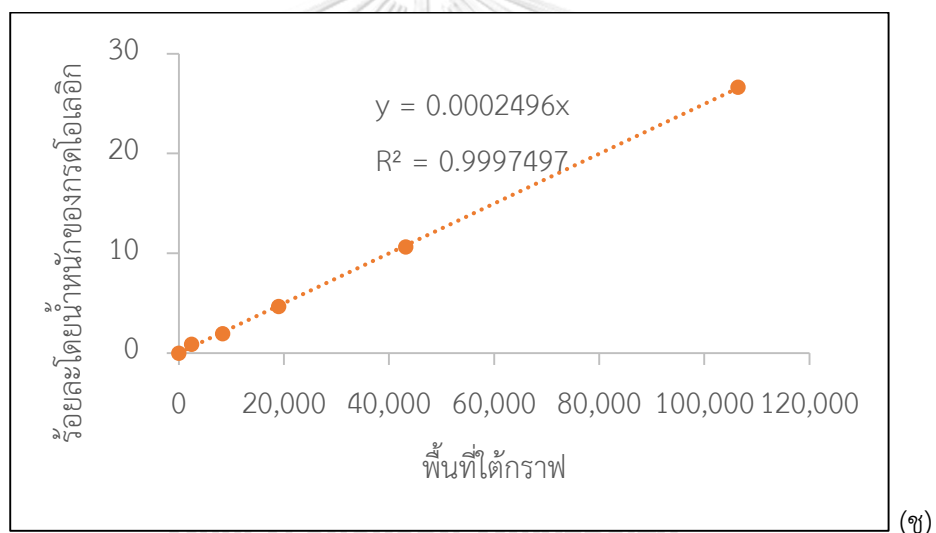
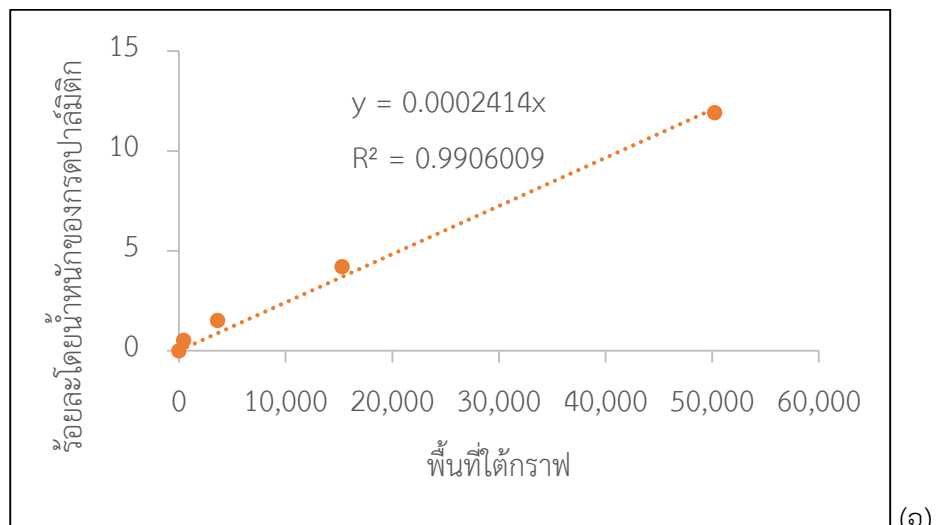
(ค)



(ง)



(จ)



**รูปที่ ค.2** กราฟมาตรฐานของ และ (ก) มอนอโอเลอีน (ข) ไดพาร์ลิมิติน  
(ค) ไดโอเลอีน (ง) ไตรพาร์ลิมิติน (จ) ไตรโอเลอีน (ฉ) กรตพาร์ลิมิติก และ (ช) กรตโอเลอิก

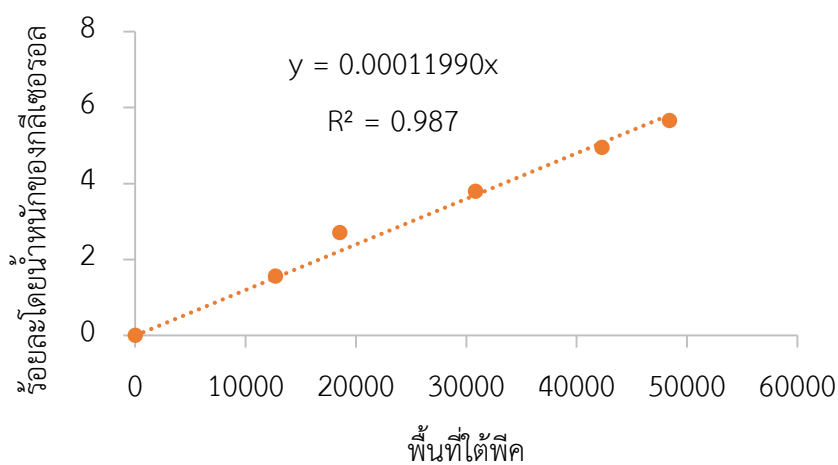
## ภาคผนวก ง

### ความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอล

ร้อยละกลีเซอรอลสามารถคำนวณได้จากการพลอตพื้นที่ใต้กราฟ (Peak Area) กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน กราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ให้แกน X เป็นพื้นที่ใต้พีค และแกน Y เป็นความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงผ่านจุดกำเนิด หลังจากนั้นแทนค่าที่ได้จากการทดลองลงในสมการของกราฟมาตรฐาน เพื่อหาปริมาณต่อไป แสดงดังสมการ ง1

$$y = mx \quad (ง1)$$

เมื่อ	y	คือ ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
	m	คือ ความชันของกราฟ (ค่าคงที่)
	x	คือ พื้นที่ใต้กราฟ



รูปที่ ง.1 กราฟมาตรฐานของกลีเซอรอล

ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแยกตามองค์ประกอบ

ตารางที่ จ.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแสดงร้อยละมอนอพาร์ลมีดิน (MP) ร้อยละมอนอโอลิอิน (MO) ร้อยละไดพาร์ลมีดิน (DP) ร้อยละไดโอลิอิน (DO) ร้อยละกรดพาร์ลมีติก (PA) และร้อยละกรดโอลิอิก (OA) (A = อุณหภูมิ หน่วยองศาเซลเซียส B = เวลาการเกิดปฏิกิริยา หน่วยนาที และ C = อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันพาร์ลมี X:5:1 )

Run	A	B	C	%MP	%MO	%DP	%DO	%TP	%TO	%PA	%OA
9	220	30	0	0.00	0.02	0.85	2.90	52.09	42.02	0.03	0.03
1	220	30	0	0.00	0.05	0.26	0.37	49.26	46.56	0.03	0.03
34	220	30	0	0.00	0.01	0.32	1.41	55.14	40.66	0.02	0.02
37	260	30	0	0.00	0.04	0.24	1.07	50.94	44.08	0.04	0.04
48	260	30	0	0.00	0.00	0.29	1.38	56.05	42.15	0.04	0.04
29	260	30	0	0.00	0.01	0.25	1.36	52.76	41.35	0.02	0.02
21	220	150	0	0.18	0.23	0.36	1.29	54.56	40.15	0.03	0.02
2	220	150	0	0.08	0.05	0.27	1.28	55.20	42.88	0.04	0.04
47	220	150	0	0.11	0.08	0.42	1.77	54.57	41.37	0.04	0.05
16	260	150	0	23.70	29.63	3.62	5.13	16.99	16.29	0.26	0.30
30	260	150	0	20.87	30.79	3.54	4.65	12.88	18.74	0.65	0.74
22	260	150	0	23.18	30.90	4.88	6.82	13.71	11.64	0.65	0.72
14	220	30	30	0.00	0.00	0.28	1.37	49.90	43.12	0.02	0.02
26	220	30	30	0.00	0.00	0.33	1.41	53.68	40.53	0.03	0.02
17	220	30	30	0.00	0.00	0.32	0.64	56.04	40.12	0.06	0.05
6	260	30	30	0.09	0.07	0.55	2.92	42.12	34.28	0.10	0.08
7	260	30	30	0.00	0.11	0.67	2.93	46.65	36.86	0.13	0.11
39	260	30	30	0.15	0.17	0.89	3.89	43.69	32.46	0.20	0.04
35	220	150	30	0.00	0.02	0.42	2.47	53.12	40.83	0.06	0.02
42	220	150	30	0.42	0.50	0.62	3.49	45.99	36.86	0.10	0.10

Run	A	B	C	%MP	%MO	%DP	%DO	%TP	%TO	%PA	%OA
38	220	150	30	0.02	0.02	0.26	1.16	44.95	32.94	0.04	0.02
33	260	150	30	14.87	22.43	0.69	2.29	7.03	6.79	0.47	0.86
25	260	150	30	15.49	21.88	1.66	5.88	13.18	10.87	0.26	0.29
12	260	150	30	15.68	22.09	0.45	0.86	7.33	6.74	0.33	0.40
24	220	90	15	0.00	0.02	0.00	1.68	54.45	38.86	0.04	0.03
46	220	90	15	0.00	0.07	0.25	1.34	47.96	39.00	0.06	0.02
11	220	90	15	0.23	0.46	0.33	1.39	46.40	38.43	0.08	0.03
23	260	90	15	4.23	7.54	1.75	6.13	33.82	28.51	0.36	0.38
15	260	90	15	5.05	8.60	1.14	2.98	31.39	28.46	0.46	0.57
45	260	90	15	5.73	8.79	1.36	5.18	29.56	27.02	0.35	0.41
4	240	30	15	0.00	0.00	0.30	0.23	53.14	38.81	0.06	0.04
18	240	30	15	0.00	0.00	0.30	1.25	52.16	40.39	0.06	0.04
10	240	30	15	0.00	0.00	0.34	0.84	55.91	41.50	0.04	0.00
5	240	150	15	13.03	17.82	1.66	7.35	21.11	16.31	0.45	0.35
20	240	150	15	13.28	18.53	2.65	9.90	34.27	19.46	0.58	0.63
19	240	150	15	10.98	17.68	1.92	6.71	31.05	25.79	0.38	0.40
40	240	90	0	0.48	0.63	0.69	3.16	58.80	35.61	0.05	0.07
8	240	90	0	0.29	0.44	0.26	0.46	51.20	40.34	0.05	0.04
36	240	90	0	0.70	0.60	0.43	2.18	57.60	31.07	0.14	0.14
13	240	90	30	1.71	2.48	1.34	6.67	44.63	36.76	0.23	0.03
44	240	90	30	1.13	2.04	0.86	4.03	49.49	39.12	0.22	0.19
27	240	90	30	1.42	2.14	1.08	3.63	41.12	35.26	0.35	0.32
43	240	90	15	1.61	3.34	0.95	4.72	36.64	32.18	0.24	0.25
32	240	90	15	2.06	3.47	0.67	3.39	37.20	32.59	0.25	0.23
28	240	90	15	2.83	4.25	1.30	5.27	39.95	34.46	0.27	0.23
31	240	90	15	2.60	3.95	1.12	4.95	29.74	27.68	0.31	0.27
41	240	90	15	1.18	2.06	0.45	2.32	38.12	31.88	0.20	0.20
3	240	90	15	2.61	3.99	1.36	5.43	42.73	35.93	0.26	0.22

**ตารางที่ จ.2** ค่าเฉลี่ยผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแสดงค่า ร้อยละมอนอกลิเซอไรด์ (MG) ร้อยละไดกลีเซอไรด์ (DG) ร้อยละไตรกลีเซอไรด์ (TG) ร้อยละกรดไขมัน (FA) และร้อยละไอโซโพรพิลเอสเทอร์ (ET) (A = อุณหภูมิ หน่วยองศาเซลเซียส B = เวลาการเกิดปฏิกิริยา หน่วยนาที และ C = อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์ม X:5:1 ) จากกลีเซอรอลบริสุทธิ์ (PG) และกลีเซอรอลดิบ (CG)

Type	A	B	C	%MG	%DG	%TG	%FA	%ET
PG	220	30	0	0.03	2.04	95.24	0.05	0.00
	220	150	0	0.25	1.80	96.25	0.07	0.00
	220	30	30	0.00	1.45	94.46	0.07	3.20
	220	150	30	0.32	2.81	84.90	0.12	1.34
	220	90	15	0.26	1.66	88.37	0.09	1.83
	240	30	15	0.00	1.09	93.97	0.08	1.17
	240	150	15	30.44	10.06	49.33	0.93	5.74
	240	90	0	1.04	2.39	91.54	0.16	0.00
	240	90	30	3.64	5.87	82.13	0.45	4.36
	240	90	15	5.66	5.32	69.85	0.49	4.52
	260	30	0	0.02	1.53	95.78	0.07	0.00
	260	150	0	53.03	9.54	30.08	1.10	0.00
	260	30	30	0.19	3.95	78.69	0.22	2.11
	260	150	30	37.48	3.94	17.31	0.87	8.16
	260	90	15	13.32	6.18	59.59	0.84	4.33
CG	260	150	0	25.52	12.35	21.08	1.19	19.67
	260	150	30	46.58	3.61	4.96	1.05	11.37

**ภาคผนวก ฉ**  
**ผลการวิเคราะห์ร้อยละไอโซโพรพิลเอสเทอร์**

**ตารางที่ ฉ.1** ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแสดงร้อยละไอโซโพรพิลเอสเทอร์ (A = อุณหภูมิ หน่วยองศาเซลเซียส B = เวลาการเกิดปฏิกิริยา หน่วยนาที และ C = อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลิเซอรอลต่อน้ำมันปาล์ม X:5:1 ) จากกลีเซอรอลบริสุทธิ์

Run	A	B	C	%Isopropyl Ester
9	220	30	0	0.00
1	220	30	0	0.00
34	220	30	0	0.00
37	260	30	0	0.00
48	260	30	0	0.00
29	260	30	0	0.00
21	220	150	0	0.00
2	220	150	0	0.00
47	220	150	0	0.00
16	260	150	0	0.00
30	260	150	0	0.00
22	260	150	0	0.00
14	220	30	30	2.71
26	220	30	30	1.43
17	220	30	30	5.47
6	260	30	30	2.12
7	260	30	30	3.27
39	260	30	30	0.94
35	220	150	30	1.36
42	220	150	30	1.33
38	220	150	30	1.32



Run	A	B	C	%Isopropyl Ester
33	260	150	30	10.19
25	260	150	30	7.53
12	260	150	30	6.76
24	220	90	15	3.22
46	220	90	15	1.43
11	220	90	15	0.85
23	260	90	15	4.79
15	260	90	15	6.41
45	260	90	15	1.79
4	240	30	15	1.15
18	240	30	15	1.10
10	240	30	15	1.25
5	240	150	15	7.73
20	240	150	15	5.50
19	240	150	15	3.98
40	240	90	0	0.00
8	240	90	0	0.00
36	240	90	0	0.00
13	240	90	30	8.02
44	240	90	30	2.35
27	240	90	30	2.71
43	240	90	15	2.20
32	240	90	15	8.09
28	240	90	15	6.06
31	240	90	15	6.35
41	240	90	15	1.49
3	240	90	15	2.95

**ตารางที่ ๑.2** ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแสดงร้อยละไอโซโพรพิลเอสเทอร์ (A = อุณหภูมิ หน่วยองศาเซลเซียส B = เวลาการเกิดปฏิกิริยา หน่วยนาที และ C = อัตราส่วนโดยโมลของไอโซโพรพานอลต่อกลีเซอรอลต่อน้ำมันปาล์ม X:5:1 ) จากกลีเซอรอลดิบ

A	B	C	%Isopropyl Ester
260	150	0	17.05
260	150	0	21.15
260	150	0	20.81
260	150	30	15.66
260	150	30	13.56
260	150	30	18.88

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวฐิติวรดา ยิ่งยง เกิดเมื่อวันที่ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2535 ที่ระยอง สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนวัดป่าประดู่ ระยอง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ใน ปีการศึกษา 2557 และเคยนำเสนอผลงานประชุมวิชาการ The 26 th National Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Science Conference (TICChE2017) and The 7 th International Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Science Conference (ITICChE2017) เมื่อวันที่ 19-20 ตุลาคม พ.ศ. 2560

