

จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์

KINETICS MODELING OF HYDROLYSIS REACTION OF TRIGLYCERIDES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2557

KMITL-2014-EN-M-220-119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KINETICS MODELING OF HYDROLYSIS REACTION OF TRIGLYCERIDES



PATT SRIBENJALUK

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

KMITL-2014-EN-M-220-119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2014

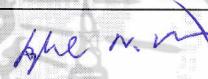
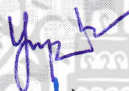



FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

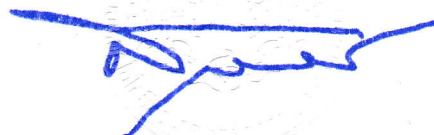
หัวข้อวิทยานิพนธ์ จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์
Thesis Title Kinetics Modeling of Hydrolysis Reaction of Triglycerides
นักศึกษา นางสาวปัทม์ ศรีเบญจลักษณ์
รหัสประจำตัว 56601341
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-220-119

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ดวงกมล	ณ ระนอง	
ดร.ญาณิพร	พัชรพรโชติ	
ผศ.ดร.สมหมาย	ผิวสอาด	
ดร.ธีรพร	สุธีวงศ์	
ดร.ธนวรรณ	พิณรัตน์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร CCA ชั้น 4 ห้องประชุมสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุช์วีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์
นักศึกษา	นางสาวปัทม์ ศรีเบญจลักษณ์
รหัสประจำตัว	56601341
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร. ธนวรรณ พิณรัตน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงวิธีการผลิตกรดไขมันอิสระจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์มโดยใช้ อุณหภูมิต่ำในการทำปฏิกิริยาที่ช่วง 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส การใช้กรดโอเลอิกในการช่วยทำ ปฏิกิริยาโดยเป็นการเร่งปฏิกิริยาแบบ Auto-Catalysis นั้น เมื่อกรดไขมันก่อนเริ่มทำปฏิกิริยามี ปริมาณมากขึ้น (20 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์) จะให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้นจาก 8 เปอร์เซ็นต์เป็น 18 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณน้ำเริ่มต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยามีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์ผลผลิต ของกรดไขมัน โดยถ้าปริมาณน้ำมากเกินไปโดยมากกว่าอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันกับน้ำ 1:4 จะ ทำให้ปริมาณกรดไขมันที่ได้ลดลง นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ของน้ำมันปาล์ม โดยมีการทำนายโดยใช้แบบจำลองสองแบบจำลองคือ

$$\frac{dC_{TG}}{dt} = -k_1 C_{TG} C_W + k_{-1} C_{FFA} C_G$$
 และ
$$\frac{dC_{TG}}{dt} = -k_1 C_{TG}^n C_W C_{FFA}^m$$
 ซึ่งแบบจำลองที่ 1 ให้ค่า พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่ากับ 12.48 กิโลจูลต่อโมลและปฏิกิริยาย้อนกลับเท่ากับ 3.21 กิโลจูลต่อโมล และแบบจำลองที่ 2 ได้ค่าพลังงานกระตุ้น 18.57 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งแบบจำลอง ทั้ง 2 สามารถใช้ในการทำนายการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ มีการศึกษา การลดอิทธิพลของการแพร่ของสารตั้งต้นโดยการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยใช้ สเปน 60 เป็นสารอิมัลซิฟายเออร์ ระยะเวลา 180 นาที โดยมีการปั่น กวน 200 รอบต่อนาที โดยให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน 8.31 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใกล้เคียงกับการ ทำปฏิกิริยาที่ไม่ใช้สารอิมัลซิฟายเออร์ ดังนั้น อิมัลซิฟายเออร์ไม่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาในสถานะที่ ศึกษา

Thesis	Kinetics Modeling of Hydrolysis Reaction of Triglycerides
Student	Ms. Patt Sribenjaluk
Student ID.	56601341
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Dr. Tanawan Pinnarat

ABSTRACT

This work studied the fatty acid production from hydrolysis of palm oil using moderate temperature of 50 to 90 °C. The fatty acid was used as Auto-catalysis. The yield of fatty acid increased from 8% to 18% if initial fatty acid was increased from 20% to 50% by weight oil. The amount of initial water also effect to the yield of fatty acid. If initial water exceed 1:4 by weight, oil:water, the amount of fatty acid product will decrease. In addition, two kinetics models of the palm oil hydrolysis were studied. The first model is $\frac{dC_{TG}}{dt} = -k_1 C_{TG} C_W + k_{-1} C_{FFA} C_G$ and the second model is $\frac{dC_{TG}}{dt} = -k_1 C_{TG}^n C_w C_{FFA}^m$. The first model gave the value of forward activation energy of 12.48 kJ/mol and reverse activation energy of 3.21 kJ/mol. The second model gave the value of activation energy of 18.57 kJ/mol. Both models were used to predict the experimental value and gave acceptable results. Moreover, the attempt to reduce the diffusion limit was studied. The hydrolysis of palm oil at 120 °C with span 60 as emulsifier for 180 min gave percent yield of fatty acid of 8.31%, which is very close to the value obtain without the use of emulsifier. Therefore, the chosen emulsifier at condition studied did not increase the reaction conversion.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ธนวรรณ พิณรัตน์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา และตรวจสอบแก้ไข ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่าน ที่ช่วยให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านเอกสาร อุปกรณ์ และเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ และหนังสือต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนถึงอำนวยความสะดวกต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และผู้มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวนาม ตลอดจนรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง ที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่องตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน และหากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ปัทม์ ศรีเบญจลักษณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ III อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	IX
สัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acids).....	3
2.2 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส.....	6
2.2.1 การทำปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	7
2.2.2 การทำปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	8
2.2.3 การทำปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้กรดไขมันเป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	8
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกริยาไฮโดรไลซิส.....	9
2.3.1 อุณหภูมิและความดัน.....	9
2.3.2 อิทธิพลของการแพร่.....	9
2.3.3 ลักษณะของไตรกลีเซอไรด์.....	10
2.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกริยาไฮโดรไลซิส.....	10
2.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch Reactor).....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	15
3.1 สารเคมี.....	15
3.2 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวิเคราะห์.....	15
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	17
3.3.1 การทำปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมสารอิมัลซิฟายเออร์.....	17
3.3.2 การทำปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยการเติมกรดไขมันเป็นตัวเร่งปฏิกริยา.....	17
3.4 การวิเคราะห์กรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้น.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.1 เพอร์เซ็นต์กรดไขมันที่เกิดขึ้น.....	19
3.4.2 เพอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน.....	19
3.4.3 ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์.....	19
3.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	20
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	23
4.1 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมสารอิมัลซิฟายเออร์	23
4.2 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดไขมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	24
4.2.1 อิทธิพลของการเติมกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	24
4.2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำ	25
4.2.3 อิทธิพลของปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	26
4.2.4 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	28
4.3 การศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	30
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	41
5.1 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมสารอิมัลซิฟายเออร์.....	41
5.2 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดไขมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	41
5.2.1 อิทธิพลของการเติมกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	41
5.2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำ	41
5.2.3 อิทธิพลของปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	42
5.2.4 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	42
5.3 การศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	42
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	42
เอกสารอ้างอิง	44
ภาคผนวก.....	47
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ	48
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	58
ภาคผนวก ค ผลงานทางวิชาการ	62
ประวัติผู้เขียน.....	65

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	กรดไขมันที่พบมากในธรรมชาติ4
2.2	ปริมาณของกรดไขมันที่มีอยู่ในไขมันและน้ำมันบางชนิด5
2.3	องค์ประกอบหลักในไขมันของจุลสาหร่าย.....5
2.4	สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส6
2.5	ประโยชน์ของกรดไขมันชนิดต่างๆเมื่อใช้เป็นสารตั้งต้น6
3.1	ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการแพร่ต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส..... 17
3.2	ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมกรดไขมันต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 18
3.3	ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำใน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 18
3.4	ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณกรดไขมันต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 18
3.5	ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส..... 19
4.1	อิทธิพลของการแพร่ต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสและ อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:0.4 โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที 23
4.2	อิทธิพลของการเติมกรดไขมัน 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้นต่อปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิสอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและมีการปั่นกวน 750 รอบต่อนาทีโดยใช้อัตราส่วน โดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 24
4.3	อิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 60 องศา เซลเซียสและมีการปั่นกวน 750 รอบต่อนาทีโดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ของน้ำมันเริ่มต้น ใช้เวลาทำปฏิกิริยา 120 นาที 26
4.4	อิทธิพลของปริมาณการเติมกรดโอเลอิกต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 60 องศา เซลเซียสและมีการปั่นกวน 750 รอบต่อนาทีโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้เวลาทำปฏิกิริยา 120 นาที..... 27
4.5	อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที และเติม กรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้น 28
4.6	ค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าและค่าคงที่อัตราย้อนกลับของปฏิกิริยาโดยใช้แบบจำลองที่ 1 30
4.7	ค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองที่ 1 35
4.8	อันดับปฏิกิริยาของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 36
4.9	ค่าพลังงานกระตุ้นและค่าคงที่อาร์เรเนียสของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 36
4.10	ค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าที่อุณหภูมิต่างๆ..... 36
4.11	ค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองที่ 1..... 40

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.1 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที.....	49
ก.2 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยไม่เติมกรดโอเลอิกตอนเริ่มต้นอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที.....	49
ก.3 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:0.2 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้น ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที	50
ก.4 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:2 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้น ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที	50
ก.5 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้น ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที	51
ก.6 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:6 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้น ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที	51
ก.7 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:8 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้น ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที	52
ก.8 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดโอเลอิก 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที.....	52
ก.9 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดโอเลอิก 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที.....	53
ก.10 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดโอเลอิก 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที.....	53

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.11 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยเติมกรดโอเลอิก 30เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นและใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที.....	54
ก.12 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยเติมกรดโอเลอิก 30เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นและใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที.....	55
ก.13 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยเติมกรดโอเลอิก 30เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นและใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที.....	56
ก.14 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส โดยเติมกรดโอเลอิก 30เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นและใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที.....	57



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

กรดไขมันอิสระ หรือ Free Fatty Acid (FFA) นิยมนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น การผลิตเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมซักล้าง อุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุตสาหกรรมโพลิเอสเตอร์ซึ่งหมายถึง สารเคมีอุตสาหกรรมที่ผลิตจากไขมันและน้ำมันจากพืชน้ำมัน ซึ่งมีองค์ประกอบคล้ายคลึงกับสารเคมีอุตสาหกรรมที่มาจากปิโตรเคมียกตัวอย่างเช่น เป็นสารตั้งต้นในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมัน เป็นต้น จากประโยชน์ของกรดไขมันอิสระที่ได้กล่าวมา จึงทำให้อุตสาหกรรมต่างๆในปัจจุบันมีความต้องการกรดไขมันอิสระมากขึ้น

การผลิตกรดไขมันอิสระทำได้โดยการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับน้ำ โดยจากการศึกษาของงานวิจัยต่าง ๆ ได้มีการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [1, 2, 3] หลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นต้องมีการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ออกจากสารผลิตภัณฑ์ จึงจำเป็นต้องมีหน่วยที่ทำให้เป็นกลาง ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ค่าใช้จ่ายและสารเคมีที่ต้องใช้ในการทำให้เป็นกลางในหน่วยนี้ อีกกรณีหนึ่งคือการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีการศึกษาอย่างมากในปัจจุบันแต่เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างช้าและค่าใช้จ่ายของเอนไซม์มีราคาสูง จึงไม่เป็นที่นิยมในการทำระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังมีการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ทำที่สภาวะอุณหภูมิสูงและความดันสูง (Sub/Supercritical Condition) แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือใช้พลังงานค่อนข้างมากและยังเสี่ยงต่ออันตรายที่จะเกิดขึ้นจากอุณหภูมิและความดันที่สูง นอกจากนี้อาจจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงขึ้นเช่น ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของกรดไขมันซึ่งจะทำให้คุณสมบัติของกรดไขมันที่ได้เปลี่ยนแปลงไป [4] ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงได้เลือกศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่สภาวะอุณหภูมิและความดันไม่สูง และไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อีกกรณีหนึ่งที่ศึกษาคือการใช้สารอิมัลซิฟายเออร์มาช่วยในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากสารอิมัลซิฟายเออร์สามารถทำให้น้ำมันและน้ำละลายเข้ากันได้ดีขึ้น โดยแหล่งน้ำมันที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่น่าสนใจคือ น้ำมันจากสาหร่ายน้ำมัน เนื่องจากสาหร่ายมีอัตราการเจริญเติบโตสูง เพาะปลูกได้ง่าย ใช้พื้นที่ในการเพาะปลูกน้อยและให้ปริมาณน้ำมันต่อพื้นที่เพาะปลูกมากถึง 1,309.09 ลิตรต่อไร่ต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ เช่น เมล็ดเรพ (Rapeseed) ถั่วเหลือง และสบู่ดำ ที่ให้ปริมาณน้ำมันเพียง 254.55, 87.27 และ 436.36 ลิตรต่อไร่ต่อปี ตามลำดับ [5] แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากสาหร่ายทำได้ยาก งานวิจัยนี้จึงใช้น้ำมันปาล์มเพื่อศึกษาเบื้องต้นและกำหนดบางสภาวะให้คล้ายกับสาหร่ายและจากการงานวิจัยของ E. Minami และ S. Saka [6] ศึกษาพบว่ากรดไขมันอิสระที่ได้จากการไฮโดรไลซิสน้ำมันพืชนั้นแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเอง (Auto-Catalytic) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเติมกรดไขมันอิสระตั้งแต่ในตอนเริ่มปฏิกิริยาแทนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์มโดยใช้อิมัลซิฟายเออร์
- 1.2.2 ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์มโดยใช้กรดไขมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
- 1.2.3 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์ม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์มโดยใช้สารอิมัลซิฟายเออร์ คือ Sorbitan Monosterate (สแปน 60) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

1.3.2 ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์มโดยใช้กรดโอเลอิก 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส

1.3.3 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์มในช่วงอุณหภูมิ 50 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.3.1 สามารถวิเคราะห์และดูแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้สารอิมัลซิฟายเออร์

1.3.2 สามารถวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ (ปริมาณน้ำและปริมาณกรดไขมันที่เติมเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา)

1.3.3 สามารถวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นและค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์มในช่วงอุณหภูมิ 50 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการทำนายค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์หรือเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันได้

บทที่ 2

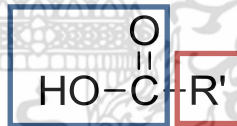
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นอกจากการใช้ประโยชน์จากกรดไขมันอิสระ (Free fatty acids, FFA) ที่นิยมนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมต่างๆแล้ว ในปัจจุบันยังมีเทคโนโลยีที่สามารถนำกรดไขมันอิสระมาทำปฏิกิริยาดีออกซิเจเนชัน (Deoxygenation) เพื่อผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีจุดเดือดอยู่ในช่วงของน้ำมันดีเซล น้ำมันเคโรซีน และน้ำมันเบนซิน ซึ่งมีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนในด้านน้ำมันอากาศยานเนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสม [7] จากที่กล่าวมานั้นจะเห็นได้ว่าในปัจจุบันมีความต้องการกรดไขมันอิสระมากขึ้นและส่งผลให้มีการเพิ่มกำลังการผลิตมากขึ้นด้วย โดยเบื้องต้นจะอธิบายถึงที่มาและความสำคัญของกรดไขมันก่อน จากนั้นจะกล่าวถึงการเกิดปฏิกิริยาเพื่อได้เป็นกรดไขมันและตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยา

2.1 กรดไขมันอิสระ (Free fatty acids)

กรดไขมัน (Fatty Acid) คือ กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic Acid) เป็นกรดอินทรีย์ ซึ่งโมเลกุลของกรดไขมันจะประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล (COOH) ซึ่งแสดงความเป็นกรดต่ออยู่กับสายของไฮโดรคาร์บอน โดยสูตรโครงสร้างของกรดไขมันแสดงดังรูปที่ 2.1 กรดไขมันจะมีคาร์บอนอะตอมอยู่ในช่วงประมาณ 4-24 อะตอม และส่วนใหญ่จะเป็นจำนวนเลขคู่ โดยที่ความยาวของคาร์บอนอะตอมหากมีความยาวน้อยกว่า 6 อะตอมจะเรียกว่า Short Chain Fatty Acid หากมีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 12 อะตอมจะเรียกว่า Long Chain Fatty Acid [8]

หมู่คาร์บอกซิลิก
Carboxyl group



สายไฮโดรคาร์บอน

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกรดไขมัน

การเรียกชื่อกรดไขมันจะเรียกตามชื่อสามัญ (Common Name) ซึ่งจะขึ้นกับจำนวนคาร์บอนและพันธะคู่ในโมเลกุลของกรดไขมัน หรือเรียกชื่อตามหลักสากล (International Union of Pure and Applied Chemistry หรือ IUPAC) ซึ่งกำหนดให้เป็นการเรียกชื่อสารเคมีโดยสากล หรือใช้สัญลักษณ์ CX:Y ซึ่ง X หมายถึง จำนวนคาร์บอน และ Y หมายถึง จำนวนพันธะคู่ ตัวอย่างเช่น C16:0 หมายถึงองค์ประกอบของโมเลกุลมีจำนวนอะตอมคาร์บอน 16 อะตอมและไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล การแบ่งประเภทของกรดไขมันสามารถแบ่งได้เป็นหลักๆสองชนิด คือ กรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัว

กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated Fatty Acid) เป็นกรดไขมันที่มีคาร์บอนอะตอมเรียงตัวกันเป็นสายยาวตรงยึดกันด้วยพันธะเดี่ยว (C-C) มีสูตรทั่วไปคือ $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{COOH}$ เมื่อ n เป็นเลขจำนวนเต็ม เช่น กรดปาล์มิติกมีคาร์บอน 16 ตัว มีสูตรเป็น $\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$ ซึ่งเป็นกรดไขมันที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติ กรดสเตียริกมีคาร์บอน 18 ตัว มีสูตรเป็น $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ เป็นต้น

กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acid) เป็นกรดไขมันที่มีคาร์บอน ต่อกันเป็นสายยาวและมีพันธะคู่ (C=C) อย่างน้อย 1 ตำแหน่งในโมเลกุล ตรงตำแหน่งพันธะคู่จะเกิดการหักมุมของเอกซาคาร์บอนเป็นเอกซาคาร์บอนที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายไฮโดรคาร์บอนประมาณ 30 องศาตรงตำแหน่งพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวจะมีโครงสร้าง 2 แบบ คือ แบบ cis และ trans โดยแบบ cis นั้น ไฮโดรเจนตรงตำแหน่งพันธะคู่จะอยู่ฝั่งเดียวกัน ส่วน trans นั้น ไฮโดรเจนตรงตำแหน่งพันธะคู่จะอยู่ตรงข้ามกัน โดยส่วนใหญ่กรดไขมันไม่อิ่มตัวจะมีพันธะคู่อยู่ในรูปแบบ cis

จากที่กล่าวมาข้างต้นกรดไขมันสามารถมีได้หลายรูปแบบโดยกรดไขมันที่พบมากในธรรมชาติ แสดงตัวอย่างดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กรดไขมันที่พบมากในธรรมชาติ [8]

Common name	IUPAC name	จำนวนคาร์บอน	จำนวนพันธะคู่	สัญลักษณ์
Caproic acid	Hexanoic acid	6	0	C6:0
Caprylic acid	Octanoic acid	8	0	C8:0
Capric acid	Decanoic acid	10	0	C10:0
Lauric acid	Dodecanoic acid	12	0	C12:0
Myristic acid	Tetradecanoic acid	14	0	C14:0
Palmitic acid	Hexadecanoic acid	16	0	C16:0
Stearic acid	Octadecanoic acid	18	0	C18:0
Oleic acid	Octadecenoic acid	18	1	C18:1
Linoleic acid	Octadecdienoic acid	18	2	C18:2

กรดไขมันทั้งประเภทอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวจะมีจุดหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนคาร์บอนอะตอม หรือมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้น และกรดไขมันที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเท่ากัน แต่มีจำนวนพันธะคู่ต่างกัน จำนวนพันธะคู่ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้จุดหลอมเหลวลดลง กรดไขมันส่วนมากในธรรมชาติมักไม่พบกรดไขมันในรูปของกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) แต่พบกรดไขมันเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) หรือไตรเอซิลกลีเซอรอล (Triacylglycerol) อยู่ในน้ำมัน (Oil) และไขมัน (Fat) ทั้งจากพืชและสัตว์ โดยน้ำมันพืชและไขมันสัตว์แต่ละชนิดจะประกอบด้วยปริมาณและประเภทของกรดไขมันที่แตกต่างกันไป แสดงองค์ประกอบดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณของกรดไขมันที่มีอยู่ในไขมันและน้ำมันบางชนิด [9]

ชนิดของน้ำมัน หรือไขมัน	% ของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ				
	กรดไมริสติก (C14:0)	กรดปาล์มิติก (C16:0)	กรดสเตียริก (C18:0)	กรดโอเลอิก (C18:1)	กรดไลโนเลอิก (C18:2)
ไขมันสัตว์					
เนย	8 - 15	25 - 29	9 - 12	18 - 33	2 - 4
น้ำมันหมู	0.1 - 1	25 - 30	12 - 18	48 - 60	6 - 12
ไขมันวัว	2 - 5	24 - 34	15 - 30	35 - 45	1 - 3
น้ำมันพืช					
น้ำมันปาล์ม	1 - 2	40 - 48	4 - 5	37 - 46	9 - 11
น้ำมันมะกอก	0 - 1	5 - 15	1 - 4	67 - 84	8 - 12
น้ำมันข้าวโพด	1 - 2	7 - 11	3 - 4	25 - 35	50 - 60
น้ำมันถั่วเหลือง	1 - 2	6 - 10	2 - 4	20 - 30	50 - 58

จากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วในปัจจุบันมีการนำกรดไขมันไปใช้เป็นสารตั้งต้นในหลากหลายอุตสาหกรรมและปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับกรดไขมันนั้นมีมากมาย เช่น ปฏิกิริยาไลโปไลซิส (เป็นการแตกสลายของโมเลกุลของไขมันและน้ำมันโดยใช้เอนไซม์หรือเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนร่วมกับความชื้น) ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (เป็นการเติมไฮโดรเจนเข้าไปยังคาร์บอน ณ ตำแหน่งที่ไม่อิ่มตัวของกรดไขมันทำให้กรดไขมันเปลี่ยนจากชนิดที่ไม่อิ่มตัวมาเป็นชนิดที่อิ่มตัว) โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาในส่วนของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในการผลิตกรดไขมันอิสระซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบหลักในไขมันของจุลสาหร่ายชนิดต่างๆ [10]

กรดไขมันอิสระ	ปริมาณกรดไขมันอิสระ(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
	<i>Botryococcus</i> sp.	<i>C. vulgaris</i>	<i>Scenedesmus</i> sp.
Plamitoleic (C16:1)	4.8	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ
Margaric (C17:0)	0.8	0.1	0.7
Stearic (C18:0)	4.3	3.4	3.0
Oleic (C18:1)	55.7	16.3	57.2
Linoleic (C18:2)	34.2	79.43	6.8
Alpha Linoleic (C18:3)	0.2	0.1	2.2

ในการทำปฏิกิริยาจะใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันปาล์มต่อน้ำ 1:4 เป็นหลัก ซึ่งเทียบเท่ากับอัตราส่วนจริงของสาหร่ายที่ถูกปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำออก หรือสาหร่ายที่ผ่านการกำจัดน้ำโดยวิธีกายภาพ [11] โดยในตารางที่ 2.3 จะแสดงกรดไขมันในสาหร่ายแต่ละชนิด โดยจะพบว่าตัวสาหร่ายและน้ำมันปาล์มนั้นมีกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกันเช่น ในน้ำมันปาล์มจะมีองค์ประกอบของกรดสเตียริกประมาณ 4 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและในสาหร่ายพันธุ์ *Botryococcus* sp. มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของกรดสเตียริกประมาณ 4.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักซึ่งจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกัน หรือองค์ประกอบของกรดโอเลอิกในน้ำมันปาล์มจะมีประมาณ 37 ถึง 46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และในสาหร่ายจะมีประมาณ 55.7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นเราจึงใช้อัตราส่วนโดยมวลของ น้ำมันปาล์มต่อน้ำเทียบเท่ากับอัตราส่วนของสาหร่ายจริงได้

2.2 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส

การทำปฏิกริยาไฮโดรไลซิสจะใช้น้ำเป็นตัวทำปฏิกริยา หรือ ใช้น้ำในการย่อยสลายสาร โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงโดยมีการใช้สารตั้งต้นที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์บางตัวดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.4 สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาไฮโดรไลซิส

สารตั้งต้น	ผลิตภัณฑ์
ไตรกลีเซอไรด์	กรดไขมันและกลีเซอรอล
เอสเทอร์	กรดไขมันและแอลกอฮอล์
เอไมด์	กรดไขมันและเอมีน
คาร์โบไฮเดรต	น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว
โปรตีน	กรดอะมิโน

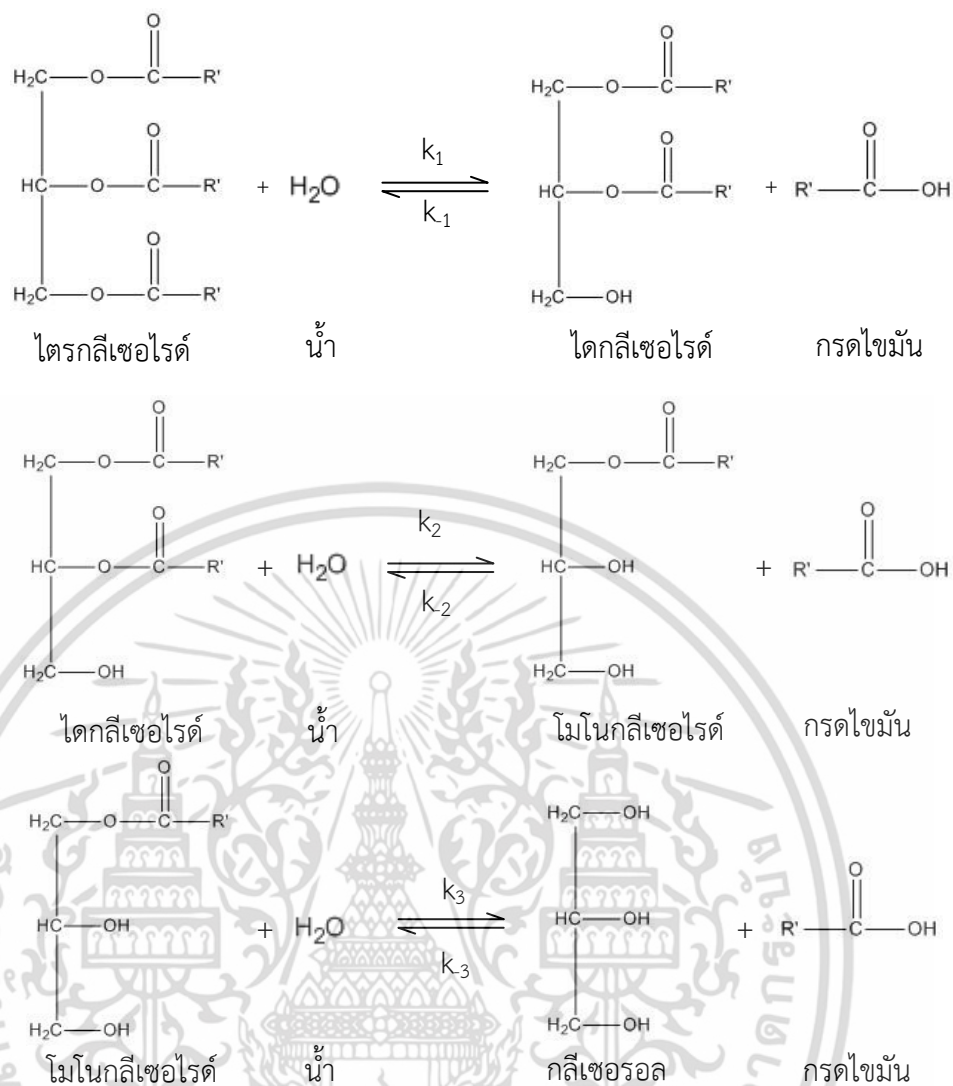
โดยปฏิกริยาไฮโดรไลซิสที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ โดยเมื่อทำปฏิกริยาแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันอิสระ และกลีเซอรอล ซึ่งกรดไขมันแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นก็มีประโยชน์ต่างกันและสามารถนำไปใช้ได้หลากหลายโดยแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.5 ประโยชน์ของกรดไขมันชนิดต่างๆ เมื่อใช้เป็นสารตั้งต้น

สารตั้งต้น	ปฏิกริยา	ผลิตภัณฑ์	อ้างอิง
กรดปาล์มมิติก	เอสเทอร์ฟิเคชัน	น้ำมันไบโอดีเซล	[9]
กรดสเตียริก	ดีออกซิจีเนชัน	น้ำมันเชื้อเพลิง	[7]
กรดลอริก	นิวทรัลไลเซชัน	สบู่	[12]
	ไม่ผ่านกระบวนการ	เครื่องสำอาง ครีมบำรุงผิว ยาฆ่าเชื้อโรค	[12]
กรดริซิโนเลอิก	ไม่ผ่านกระบวนการ	ยาระบาย ลิปสติก	[13]
กรดไลโนเลอิก	ไม่ผ่านกระบวนการ	อาหารเสริม ยาปฏิชีวนะ	[14]

ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไตรกลีเซอไรด์ (น้ำมัน) กับน้ำโดยที่ไตรกลีเซอไรด์ 1 โมเลกุลจะทำปฏิกริยากับน้ำ 3 โมเลกุลจะได้กรดไขมันอิสระ 3 โมเลกุล และกลีเซอรอล 1 โมเลกุล จากการศึกษาพบว่าปฏิกริยาเป็นแบบดูดความร้อน [15] ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงปฏิกริยาจึงเกิดได้ดี โดยปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะมี 3 ขั้นตอน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพื่อการแตกโมเลกุลสำหรับการผลิตกรดไขมันอิสระสามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้หลายประเภทดังนี้

2.2.1 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

(Acid Catalyzed Hydrolysis)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาที่ใช้โดยทั่วไปโดยกรดที่นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น กรดไฮโดรคลอริก หรือกรดซัลฟิวริก เป็นต้น [1, 2, 3] โดยงานวิจัยของ S. Babamohammadi และ I. Muhamad [3] ทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์ม คือ กรดซัลฟิวริกในช่วง 5 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสโดยพบว่า ที่ปริมาณกรดซัลฟิวริก 15 เปอร์เซ็นต์จะให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิต 38.07 เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ A. Ideris และคณะ [2] ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์มโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยปริมาณที่ใช้อยู่ในช่วง 15 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบการใช้ปริมาณกรดที่เท่ากันคือ ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์พบว่าจะให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิต 36 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าการใช้ปริมาณกรดที่เท่ากันจะส่งผลให้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบเสร็จประเมินค่าการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้ใกล้เคียงกันด้วย แต่การไฮโดรไลซ์น้ำมันโดยใช้ตัวเร่งกรดจำเป็นต้องมีการทำให้เป็นกลางหลังเสร็จสิ้นปฏิกิริยาและมีการล้างผลิตภัณฑ์เพื่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยในระหว่างขั้นตอนเหล่านี้จะก่อให้เกิดของเสีย ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำบัดและเป็นอันตรายเมื่อเกิดการรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม [16]

2.2.2 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Lipase Catalyzed Hydrolysis)

ไลเปส (Triacylglycerol Acylhydrolase, EC 3.1.1.3) เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในการไฮโดรไลซ์พันธะเอสเทอร์ของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ที่มีมักจะเป็นโมเลกุลที่มีสายโซ่คาร์บอนของกรดไขมันที่ยาวซึ่งเป็นโมเลกุลที่ไม่ละลายน้ำที่อยู่ในลักษณะอิมัลชัน โดยไลเปสจะไฮโดรไลซ์พันธะโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ได้ผลผลิตเป็นไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระโดยไลเปสจะสามารถทำปฏิกิริยาดังกล่าวได้เมื่อโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์อยู่ในสภาพตรงผิวสัมผัสระหว่างน้ำและน้ำมัน (oil-water interface) โดยแหล่งที่มาของเอนไซม์ไลเปสนั้นสามารถพบได้ทั้งใน สัตว์ พืชและจุลินทรีย์หลายชนิด เช่น ยีสต์ รา และแบคทีเรีย ถึงแม้ว่าการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำโดยอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยาคือประมาณ 30 ถึง 40 องศาเซลเซียส แต่ข้อจำกัดคือ อัตราในการเกิดปฏิกิริยานั้นค่อนข้างช้าและที่สำคัญคือ ราคาของเอนไซม์นั้นมีราคาที่สูงจึงทำให้การทำปฏิกิริยาโดยใช้เอนไซม์นั้นไม่เป็นที่นิยมในระดับอุตสาหกรรม [16] ในงานวิจัยของ V.K. Rathod และ A.B. Pandit [17] ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันละหุ่ง โดยใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วง 0.2 ถึง 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 45 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเอนไซม์มากขึ้นจะทำให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตเพิ่มมากขึ้นจาก 20 เปอร์เซ็นต์เป็น 35 เปอร์เซ็นต์ แต่ใช้เวลานานถึง 6 ชั่วโมง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ S.R. Kulkarni และ A.B. Pandit [18] ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำละหุ่งโดยใช้เอนไซม์ไลเปสเช่นเดียวกัน โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส พบว่าที่ความเข้มข้นของเอนไซม์มากขึ้นจะทำให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตมากขึ้นเช่นเดียวกัน โดยศึกษาความเข้มข้นของเอนไซม์ไลเปสในช่วง 7 ถึง 175 หน่วยของเอนไซม์ต่อกรัมน้ำมัน โดยใช้เวลาทำปฏิกิริยานานถึง 24 ชั่วโมงถึงจะได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิต 90 เปอร์เซ็นต์ จากทั้งสองงานวิจัยจะเห็นว่าการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ค่อนข้างนาน ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรม

2.2.3 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้กรดไขมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Auto-Catalytic Hydrolysis Reaction)

งานวิจัยของ E. Minami และ S. Saka [6] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันจากเมล็ดเรพที่สถานะน้ำกึ่งวิกฤต หรือ subcritical water พบว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันจะเกิดกรดไขมันอิสระขึ้น โดยกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นสามารถแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วยตัวเอง (Auto-catalysis) โดยไม่ต้องเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในช่วงเริ่มต้นการทำปฏิกิริยาจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำและเมื่อเกิดกรดไขมันอิสระในระบบขึ้นประมาณ 10% โดยน้ำหนัก จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยมีกรดไขมันที่เกิดขึ้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นแสดงดังรูปที่ 2.3 เมื่อเริ่มเกิดกรดไขมันซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ขึ้น กรดไขมันจะแตกตัวให้โปรตอนโดยโปรตอนนี้สามารถแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเร่งกรดได้ด้วยตัวเอง จากนั้นโปรตอนจะเข้าทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ทำให้ไตรกลีเซอไรด์มีประจุบวกและเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำต่อไปได้เป็นไดกลีเซอไรด์และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรดไขมันอิสระซึ่งมีประจุบวกและจะทำปฏิกิริยาต่อจนสุดท้ายจะได้เป็นกลีเซอรอลและโปรตอนจะหลุดออกทำให้ได้กรดไขมันอิสระกลับคืนมา



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยมีกรดไขมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

2.3.1 อุณหภูมิและความดัน

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่ต้องอาศัยการให้ความร้อน จากงานวิจัยของ J.K. Satyarthia [15] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ในช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 330 องศาเซลเซียส พบว่าปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีขึ้น และงานวิจัยของ T.A. Patil และคณะ [19] ศึกษาพบว่า การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 260 องศาเซลเซียส และความดันในช่วง 100 ถึง 7,000 กิโลปาสกาล ขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อน้ำได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โมเลกุลของน้ำจะได้รับพลังงานความร้อนและเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของพันธะไฮโดรเจนได้ ทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนไปโดยน้ำจะมีคุณสมบัติเหมือนตัวทำละลายอินทรีย์ที่สามารถละลายสารที่ไม่ชอบน้ำในความเข้มข้นสูงได้ และอีกอย่างหนึ่งคือ น้ำจะมีไอออนในความเข้มข้นที่สูง เช่น ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังนั้นน้ำสภาวะกึ่งวิกฤตจึงมีคุณสมบัติเหมือนตัวเร่งปฏิกิริยากรดหรือเบส (Acid or Base Catalyst) [20] และจากงานวิจัยของ R.L. Holliday และคณะ [21] ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันมะพร้าวที่สภาวะน้ำกึ่งวิกฤตเช่นเดียวกันโดยได้ศึกษาอุณหภูมิในช่วง 260 ถึง 280 องศาเซลเซียส โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียสใช้เวลาเพียง 15 นาทีเท่านั้นก็จะได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงถึง 97 เปอร์เซ็นต์ และจากงานวิจัยของ R. Alenezi และคณะ [22] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันดอกทานตะวัน ซึ่งได้ศึกษาช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันคือ 270 ถึง 350 องศาเซลเซียส โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 10 นาทีก็จะได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตสูงถึง 92.8 เปอร์เซ็นต์ จากงานวิจัยที่กล่าวมาจะพบว่า การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันสูงนี้ จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาค่อนข้างเร็วและให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่สูงอีกด้วย

2.3.2 อิทธิพลของการแพร่

การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างน้ำมันกับน้ำนั้น จะมีส่วนของอิทธิพลจากการแพร่เข้ามาเกี่ยวข้องเนื่องจากในการทำปฏิกิริยาได้จะต้องมีสารตัวหนึ่งแพร่เข้ามายังอีกตัวหนึ่งก่อนถึงจะทำปฏิกิริยากันได้ ดังนั้น วิธีในการลดอิทธิพลจากการแพร่มี 2 วิธีคือการปั่นกววนและการเติมสารอิมัลซิฟายเออร์ ในส่วนของการปั่นกววน ได้มีงานวิจัยของ N.A.Serri และคณะ [4] ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิสของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส โดยพบว่า การเพิ่มการปั่นกววนจาก 180 รอบต่อนาที เป็น 200 รอบต่อนาทีจะทำให้ค่าการแปลงผันทางเคมีเพิ่มขึ้นจาก 85 เปอร์เซ็นต์เป็น 97 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำมันและน้ำ โดยการปั่นกววนจะช่วยให้อนุภาคของน้ำมัน แตกตัวให้มีขนาดโมเลกุลของน้ำมันที่เล็กลงเพื่อให้เกิดการสัมผัสกับน้ำมากขึ้น เพราะการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันและน้ำจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างกัน ดังนั้นถ้าเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสก็เป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาด้วย

ส่วนโมเลกุลของอิมัลซิฟายเออร์นั้น มีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophillic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) โดยจะหันส่วนที่ชอบน้ำเข้าหาน้ำ และหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าหาน้ำมัน จากคุณสมบัติของอิมัลซิฟายเออร์ ที่กล่าวมาจึงทำให้สามารถเป็นตัวเชื่อมระหว่างน้ำและน้ำมันให้เกิดเป็นลักษณะของสารแขวนลอยได้ ทำให้มีการสัมผัสกันมากขึ้น ตัวอย่างเช่น เมื่อรับประทานอาหารประเภทไขมันและน้ำมันเข้าไป น้ำดีซึ่งเป็นอิมัลซิฟายเออร์ จะทำให้ไขมันและน้ำมันกลายเป็นอิมัลชัน เป็นต้น [23]

งานวิจัยนี้ได้เลือกการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์มโดยคาดหวังว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นดีจากการลดอิทธิพลของการแปรโดยการใช้อิมัลซิฟายเออร์ โดยที่สารอิมัลซิฟายเออร์ที่เลือกใช้คือ สแปน 60 (Sorbitan Monostearate) เนื่องจากระบบที่ใช้เป็นระบบลักษณะน้ำมันในน้ำซึ่ง สแปน 60 สามารถใช้กับระบบนี้ได้ดี และสองการใช้กรดไขมันอิสระ (Auto-Catalytic) ช่วยในการทำปฏิกิริยา กรดไขมันที่เลือกใช้คือกรดโอเลอิกเนื่องจากในน้ำมันที่นำมาทำปฏิกิริยามีองค์ประกอบของกรดโอเลอิกเป็นจำนวนมากถึง 46 เปอร์เซ็นต์ [9]

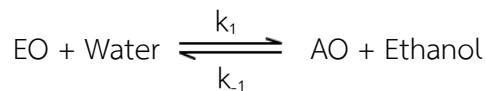
2.3.3 ลักษณะของไตรกลีเซอไรด์

น้ำมันแต่ละชนิดที่นำมาเป็นสารตั้งต้นจะมีโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์และองค์ประกอบของกรดไขมันที่แตกต่างกัน จากการศึกษาของ V.K. Rathod และ A.B. Pandit [17] ได้ศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันสามชนิดคือ น้ำมันละหุ่ง น้ำมันมะกอกและน้ำมันมะพร้าวที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้น้ำมันละหุ่งให้เปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิสมากที่สุดตามด้วยน้ำมันมะกอกและน้ำมันมะพร้าว โดยให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิต 48 เปอร์เซ็นต์ 43 เปอร์เซ็นต์ และ 39.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากถ้าในน้ำมันมีองค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่มากก็จะส่งผลให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น โดยน้ำมันละหุ่งมีองค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากที่สุด (97%) ตามด้วยน้ำมันมะกอก (82.4%) และน้ำมันมะพร้าว (15.8%) โดยงานวิจัยนี้ให้ผลคล้ายคลึงกันกับงานวิจัยของ H.T. Khor และคณะ [24] ที่ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันข้าวโพด น้ำมันปาล์ม และน้ำมันถั่วลิสง ที่อุณหภูมิศึกษาเดียวกันคือ 40 องศาเซลเซียส พบว่าน้ำมันถั่วลิสงมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำมันที่เหลือ เนื่องจากมีองค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากที่สุด

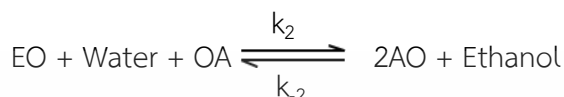
2.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ในการศึกษาทางด้านจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสนั้นได้มีงานวิจัยมากมายที่ได้ศึกษาดังนี้

งานวิจัยของ S. Changi และคณะ [25] ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอทิลโอเลตในช่วงอุณหภูมิ 240 ถึง 300°C เป็นเวลา 0 ถึง 180 นาที โดยได้ศึกษาในสองปฏิกิริยา คือการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอทิลโอเลต (EO) ได้เป็นกรดโอเลอิก (AO) และเอทานอล



และอีกปฏิกิริยาหนึ่งคือ การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอทิลโอเลต (EO) โดยมีการเติมกรดโอเลอิกในตอนเริ่มต้น



โดยได้ศึกษาศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นของสองปฏิกิริยาพบว่า ในปฏิกิริยาแรกนั้นจะได้ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่ากับ 86.7 กิโลจูลต่อโมลและย้อนกลับเท่ากับ 123.6 กิโลจูลต่อโมลและในปฏิกิริยาที่สองที่มีการเติมกรดโอเลอิกในตอนเริ่มต้นนั้นจะได้ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่ากับ 51.1 กิโลจูลต่อโมลและย้อนกลับเท่ากับ 87.9 กิโลจูลต่อโมลโดยเมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากทั้งสองปฏิกิริยาพบว่า ในกรณีที่มีการเติมกรดโอเลอิกจะช่วยทำให้ค่าพลังงานกระตุ้นทั้งไปข้างหน้าและย้อนกลับลดลง เนื่องจากกรดโอเลอิกสามารถแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Auto-Catalysis) ซึ่งจะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น

งานวิจัยของ R. Alenezi และคณะ [22] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำมันดอกทานตะวันในกรณีน้ำสถานะกึ่งวิกฤติโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ในช่วงอุณหภูมิ 270 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความดัน 20 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที โดยได้ศึกษาค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าและย้อนกลับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นทั้งสามขั้นตอนรวมถึงค่าพลังงานกระตุ้นในช่วงอุณหภูมิ 270 ถึง 350 องศาของปฏิกิริยาทั้งสามขั้นตอนเช่นเดียวกัน และจากการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าสูงขึ้นด้วย แต่ในกรณีของค่าคงที่อัตราย้อนกลับ R. Alenezi และคณะพบว่า มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ดังนั้นจึงละในส่วนของปฏิกิริยาย้อนกลับ และคิดค่าพลังงานกระตุ้นในส่วนของปฏิกิริยาไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว โดยค่าพลังงานกระตุ้นทั้งสามขั้นตอนมีค่าเท่ากับ 98.38 และ 90 กิโลจูลต่อโมลตามลำดับ โดยค่าพลังงานกระตุ้นของขั้นตอนแรกมากที่สุด เนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสต้องใช้พลังงานในช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยาค่อนข้างมากเพื่อใช้ในการแตกพันธะที่ค่อนข้างยาวของสารตั้งต้น ดังนั้นจึงใช้พลังงานมากกว่าในขั้นตอนอื่นๆ

งานวิจัยของ A.L. Milliren และคณะ [26] ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันถั่วเหลืองในกรณีน้ำสถานะกึ่งวิกฤติในช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส โดยได้ศึกษาในสองปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์โดยมีการเติมกรดไขมันในตอนเริ่มต้นและไม่มีการเติมกรดไขมันในตอนเริ่มต้น โดยในงานวิจัยได้ศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นของทั้งกรณีเพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน จากผลงานวิจัยพบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไปข้างหน้าในกรณีที่ไม่มีการเติมกรดไขมันและมีการเติมกรดไขมันคือ 90.29 และ 26.77 กิโลจูลต่อโมลตามลำดับ โดยจะเห็นว่าค่าพลังงานกระตุ้นในกรณีที่มีการเติมกรดไขมันในตอนเริ่มต้นนั้นมีค่าที่น้อยกว่ามาก เนื่องจากการเติมกรดไขมันนั้นสามารถแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Auto-Catalysis) ซึ่งจะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น และในกรณีของค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาย้อนกลับก็เช่นเดียวกัน ในการเติมกรดไขมันในตอนเริ่มต้นจะช่วยลดค่าพลังงานกระตุ้นลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยข้างต้นที่กล่าวมาจะพบว่างานวิจัยของ R. Alenezi และคณะ และงานวิจัยของ A.L. Milliren และคณะ ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ช่วงอุณหภูมิใกล้เคียงกันแต่ใช้น้ำมันที่เป็นสารตั้งต้นแตกต่างกัน เมื่อนำค่าพลังงานกระตุ้นของทั้งสองงานวิจัยมาเปรียบเทียบจะเห็นว่าให้ค่าพลังงานกระตุ้นที่ใกล้เคียงกัน แต่ในงานวิจัยของ A.L. Milliren และคณะได้ศึกษาเพิ่มเติมในกรณีที่มีการเติมกรดไขมันในตอนเริ่มต้น ซึ่งจากผลงานวิจัยจะเห็นว่าช่วยให้ค่าพลังงานกระตุ้นลดลงจาก 90.29 เป็น 26.77 กิโลจูลต่อโมล โดยเหตุผลมาจากการเติมกรดไขมันสามารถแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้และทำให้ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาลดลง

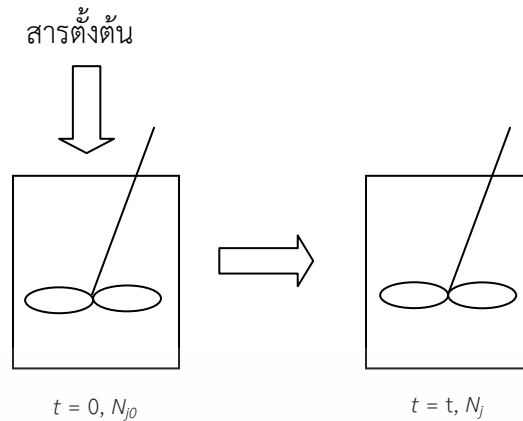
งานวิจัยทางด้านจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ โดยส่วนมากจะนิยมศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง แต่มีงานวิจัยของ L.D. Silva และคณะ [1] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 ถึง 250 องศาเซลเซียส โดยได้ศึกษาค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทั้งสามขั้นตอนและค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาแรกนั้นมีค่ามากที่สุดคือ 89.3 kJ/mol ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ R. Alenezi และคณะ [22] พบว่าได้มีการรายงานเหมือนกันว่าในขั้นตอนแรกในการทำปฏิกิริยาจะให้ค่าพลังงานกระตุ้นที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับขั้นตอนอื่น เนื่องจากต้องใช้พลังงานในการแตกพันธะที่ค่อนข้างยาวของสารตั้งต้น

จากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้กล่าวมาจะเห็นว่าการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะอยู่ในช่วง 200 ถึง 350 องศาเซลเซียส และศึกษาถึงผลกระทบในการเติมกรดไขมันเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Auto-catalysis) ในช่วงอุณหภูมินี้เช่นกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิต่ำ (50 ถึง 90) เพื่อพิสูจน์ว่าการเติมกรดไขมันเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Auto-catalysis) จะสามารถใช้ได้ในกรณีที่อุณหภูมิต่ำหรือไม่และทำการทดลองเพื่อหาค่าคงที่อัตราไปข้างหน้า ค่าคงที่อัตราย้อนกลับ และค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) โดยนิยามและสมการที่จำเป็นของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะจะกล่าวไปหัวข้อต่อไป

2.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่นิยมใช้เมื่อต้องการผลิตสารปริมาณน้อยๆ เช่น ในขั้นทดสอบเบื้องต้นระหว่างการพัฒนากระบวนการใหม่ และการผลิตสารราคาแพง นอกจากนี้ยังถูกนำไปใช้ในกระบวนการที่ไม่สามารถปรับปรุงให้ดำเนินการแบบต่อเนื่องได้ [27]

เครื่องปฏิกรณ์แบบกะมีข้อดีที่สำคัญ คือ สามารถเพิ่มค่าการแปลงผันทางเคมีของสารตั้งต้นได้ด้วยวิธีง่ายๆ คือ เพียงปล่อยให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้น แต่มีข้อเสียที่สำคัญคือ มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานแต่ละครั้งสูง การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะทั่วไป ซึ่งใช้งานโดยบรรจุสารตั้งต้นลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลาเริ่มต้น ($t=0$) และกวนสารตั้งต้นให้ผสมกัน จากนั้นปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ แล้วนำผลิตภัณฑ์ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ตอนสุดท้ายที่เวลา t ดังนั้นเราจึงสามารถพิจารณาได้ว่าในระหว่างการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์แบบกะเป็นระบบปิด เพราะไม่มีการเติม หรือ ดึงสารใดๆ ออกจากระบบในขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินอยู่

เมื่อสมมติให้ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะอุดมคติ (Ideal batch reactor) เกิดการผสมอย่างสมบูรณ์ (Perfect mixing) จะได้ว่าคุณสมบัติต่างๆ ของสารทุกชนิด และอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร j มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งภายในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้น

$$\int^V r_j dV = r_j V \quad (2.1)$$

สมการดุลโมลของสาร j รอบเครื่องปฏิกรณ์แบบกะอุดมคติ จึงมีรูปแบบสมการ

$$\frac{dN_j}{dt} = r_j V \quad (2.2)$$

สมการดุลโมลของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะปริมาตรคงที่ในรูปของความเข้มข้นของสาร j เขียนได้ดังสมการ

$$r_j = \frac{1}{V} \frac{dN_j}{dt} = \frac{d(N_j/V)}{dt}$$

$$R_j = \frac{dC_j}{dt} \quad (2.3)$$

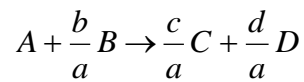
สมการดุลโมลของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะความดันคงที่ในรูปของความเข้มข้นของสาร j เขียนได้ดังสมการ

$$r_j = \frac{1}{V} \frac{dN_j}{dt} = \frac{1}{V} \frac{d(C_j V)}{dt} = \frac{dC_j}{dt} + \frac{C_j}{V} \frac{dV}{dt}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_j = \frac{dC_j}{dt} + C_j \frac{d \ln V}{dt} \quad (2.4)$$

พิจารณาปฏิกิริยา



เมื่อกำหนดให้จำนวนโมลของสารตั้งต้น A ตอนเริ่มต้น ($t=0$) มีค่าเท่ากับ N_{A0} จะได้ว่า จำนวนโมลของสาร A ที่ถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยาเมื่อเวลาผ่านไป t มีค่าเท่ากับ $N_{A0}X$ ดังสมการ

$$[\text{โมลของสาร A ที่ถูกใช้ไป}] = [\text{โมลของสาร A เริ่มต้น}] \times \frac{\text{โมลของสาร A ที่ใช้ในปฏิกิริยา}}{\text{โมลของสาร A เริ่มต้น}}$$

$$N_{A0} - N_A = [N_{A0}] \cdot [X]$$

$$N_A = N_{A0} - N_{A0}X$$

$$N_A = N_{A0}(1 - X) \quad (2.5)$$

เมื่อแทนค่า N_A ลงในสมการที่ (2.2) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแปลงผันทางเคมีกับเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ ดังสมการ

$$N_{A0} \frac{dX}{dt} = (-r_A)V \quad (2.6)$$

เราเรียกสมการดังกล่าวว่า สมการสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ สามารถนำไปใช้คำนวณเวลาที่สารตั้งต้นต้องใช้ในการทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์จนได้ค่าการแปลงผันทางเคมีตามต้องการ นอกจากนี้ยังมักถูกใช้ในการวิเคราะห์หาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจากการทดลอง และใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของเครื่องปฏิกรณ์เมื่อมีอิทธิพลของความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึง สารเคมี อุปกรณ์ วิธีการทดลอง เครื่องมือและวิธีการในการวิเคราะห์ผล และแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 สารเคมี

1. น้ำมันปาล์มยี่ห้อมรกต
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.09 โมลาร์ จากบริษัท Sigma Aldrich
3. กรดโอเลอิก
4. น้ำกลั่น
5. ฟีนอล์ฟทาลีน 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
6. เอทานอล ความบริสุทธิ์ 85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากบริษัท Sigma Aldrich

3.2 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวิเคราะห์

1. ชุดเครื่องปฏิกรณ์ทนความดันและอุณหภูมิสูง (Autoclave) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องปฏิกรณ์ทนความดันและอุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชุดเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (Hot Plate Stirrer) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน

3. ชุดเครื่องมือสำหรับการไทเทรตหาปริมาณกรดไขมันอิสระ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดเครื่องมือสำหรับการไทเทรตกรดไขมันอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมสารอิมัลซิไฟเออร์

จากที่กล่าวมาเบื้องต้นว่าในการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันและน้ำจะมีอิทธิพลของการแพร่เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยวิธีในการลดอิทธิพลของการแพร่มีสองวิธี คือ การปั่นกววนและการเติมสารอิมัลซิไฟเออร์ ซึ่งขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1. ชั่งน้ำมันปาล์มและน้ำกลั่นในอัตราส่วนโดยโมล 1:0.4 กรดโอเลอิก 0.1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันเริ่มต้น และสารอิมัลซิไฟเออร์ (สแปน 60) 5 เปอร์เซ็นต์ของสารตั้งต้นทั้งหมด
 2. นำสารตั้งต้นทั้งหมดใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและความดันสูง ดังรูปที่ 3.1
 3. ตั้งค่าอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการจึงเปิดการปั่นกววนและเริ่มจับเวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที
 4. เมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จ รอให้อุณหภูมิลดลงจนถึงประมาณ 30 องศาเซลเซียสจึงนำสารออกจากเครื่องปฏิกรณ์และตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้น
- การทำปฏิกิริยาในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการแพร่ต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

การทดลองที่	อัตราการปั่นกววน (รอบต่อนาที)	เติมสารอิมัลซิไฟเออร์ (สแปน60)
1	200	-
2	200	5 เปอร์เซ็นต์ของสารตั้งต้นทั้งหมด
3	-	5 เปอร์เซ็นต์ของสารตั้งต้นทั้งหมด

3.3.2 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดไขมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Auto-Catalysis)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแนะนำว่า กรดไขมันสามารถแตกตัวให้โปรตอนซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ดังนั้นเราจึงศึกษาอิทธิพลของการเติมกรดไขมัน ซึ่งขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1. ชั่งน้ำมันปาล์ม น้ำกลั่น กรดโอเลอิกตามอัตราส่วนที่ต้องการตามตารางที่ 3.2 ถึง 3.5
2. นำสารตั้งต้นทั้งหมดใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตั้งค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการ เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการจึงเปิดการปั่นกวนและเริ่มจับเวลาในการทำปฏิกิริยาตามที่ต้องการ
4. เมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จ นำมาตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยก
5. ปีเปตสารชั้นบนซึ่งเป็นส่วนผสมของกรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาออกเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าปริมาณกรดไขมันตามวิธีในหัวข้อที่ 3.3.4

ตารางที่ 3.2 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมกรดไขมันต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	
อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ	1:20
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	60
อัตราการปั่นกวน (รอบต่อนาที)	750
ตัวแปรที่ศึกษา	
กรดโอเลอิก	- เติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้น - ไม่เติมกรดโอเลอิก

ตารางที่ 3.3 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	60
อัตราการปั่นกวน (รอบต่อนาที)	750
ปริมาณกรดโอเลอิก	30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้น
ตัวแปรที่ศึกษา	
อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ	1:0.2 1:2 1:4 1:6 และ 1:8

ตารางที่ 3.4 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณกรดไขมันต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	
อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ	1:4
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	60
อัตราการปั่นกวน (รอบต่อนาที)	750
ตัวแปรที่ศึกษา	
ปริมาณกรดโอเลอิก	20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ชุดการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	
อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ	1:4
อัตราการปั่นกววน (รอบต่อนาที)	750
ปริมาณกรดโอเลอิก	30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้น
ตัวแปรที่ศึกษา	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	50 60 70 80 และ 90

3.4 การวิเคราะห์กรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้น

1. หลังเสร็จสิ้นการทำปฏิกิริยานำสารทั้งหมดออกจากเครื่องปฏิกรณ์และตั้งไว้ให้เกิดการแยกชั้นที่อุณหภูมิห้อง

2. นำสารที่อยู่ชั้นบนซึ่งคือ กรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยามาทำการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.09 โมลาร์ โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีน 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นอินดิเคเตอร์

3. คำนวณปริมาณกรดไขมันที่เกิดขึ้นได้จากสมการที่ 3.1 เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันตั้งสมการที่ 3.2 และค่าการแปลงผันทางเคมีตั้งสมการที่ 3.3

3.4.1 เปอร์เซ็นต์กรดไขมันที่เกิดขึ้น

%FFA

$$= \frac{\text{สารละลายต่างที่ใช้ไป} \times \text{ความเข้มข้นของสารละลายต่าง} \times \text{โมเลกุลของกรดไขมัน}}{\text{น้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง}} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ สารละลายต่างที่ใช้ไป = ค่าสิ้นสุดของไตเตรท-ค่าเริ่มต้นของไตเตรท (มิลลิลิตร)

ความเข้มข้นของสารละลายต่าง = 0.09 โมลาร์ (โมล/ลิตร)

โมเลกุลของกรดไขมัน = น้ำหนักกรดไขมัน (กรัม/โมล)

(มวลโมเลกุลของกรดโอเลอิก = 282.46 กรัม/โมล)

น้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง = ปิเปตสารตัวอย่างชั้นบนออกมา (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข

3.4.2 เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

$$\text{เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน} = \frac{\text{กรัมกรดไขมันที่เกิดขึ้น}}{\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.2)$$

ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข

3.4.3 ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์

เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์

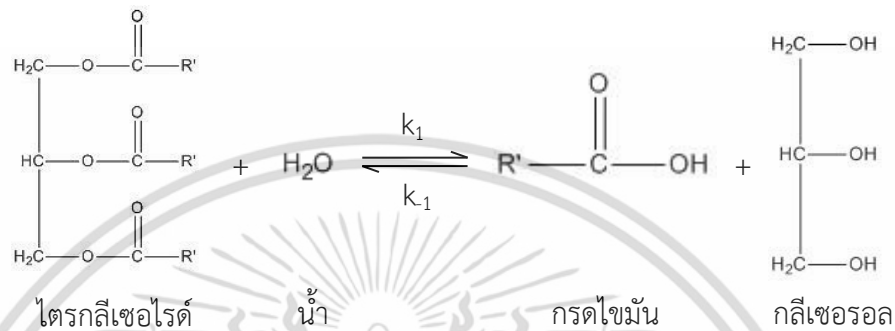
$$= \frac{\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น} - \text{กรัมไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย}}{\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.3)$$

ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

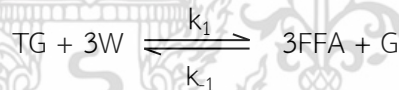
ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเลือกศึกษาในกรณีที่มีการเติมกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเอง เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่จะศึกษาในช่วงที่อุณหภูมิสูงประมาณ 200 องศาเซลเซียสขึ้นไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับในช่วงอุณหภูมิต่ำ (50 ถึง 90 องศาเซลเซียส) และได้เลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะในการทำปฏิกิริยา โดยสมการรวมของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์เขียนได้เป็น



ในงานวิจัยนี้ได้เสนอแบบจำลองในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์ม 2 แบบจำลอง ดังนี้

แบบจำลองที่ 1

แบบจำลองที่ 1 จะศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบผันกลับได้ โดยจะศึกษาหาค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าและย้อนกลับของปฏิกิริยา รวมถึงค่าพลังงานกระตุ้นและค่าคงที่อาร์เรเนียสของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วย โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสข้างต้นสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็นดังนี้



เริ่มจากสมการออกแบบสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะปริมาตรคงที่และสมมติให้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งโดยเขียนได้เป็น

$$\frac{dC_{\text{TG}}}{dt} = r_{\text{TG}} \quad (3.4)$$

$$\frac{dC_{\text{TG}}}{dt} = -k_1 C_{\text{TG}} C_{\text{W}} + k_{-1} C_{\text{FFA}} C_{\text{G}} \quad (3.5)$$

โดยที่ C_{i0} , k_1 และ k_{-1} เป็นความเข้มข้นของแต่ละสาร ค่าคงที่ปฏิกิริยาไปข้างหน้าและค่าคงที่ปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ตามลำดับ จากนั้นเขียนในเทอมของค่าการแปลงผันทางเคมีจะได้เป็น

$$C_i = C_{\text{TG}0} \left(\frac{C_{i0}}{C_{\text{TG}0}} + \nu_i X \right) \quad (3.6)$$

โดยที่ $C_{\text{TG}0}$ และ C_{i0} เป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของไตรกลีเซอไรด์และแต่ละสาร ตามลำดับ และ ν_i คือเลขสมมูลโมลของแต่ละสารโดยจะมีค่าเป็นบวกสำหรับผลิตภัณฑ์และค่าเป็นลบสำหรับสารตั้งต้น

เอกสารนี้ เมื่อแทนสมการที่ (3.6) ลงในสมการที่ (3.5) และจัดรูปจะได้เป็น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dX}{dt} = k_1 C_{TG0} \left[\theta_w - \left(\frac{k_{-1}}{k_1} \theta_{FFA} + \theta_w + 3 \right) X + \left(3 - 3 \frac{k_{-1}}{k_1} \right) X^2 \right] \quad (3.7)$$

โดยที่ θ_w คือ $\frac{C_{w0}}{C_{TG0}}$ และ θ_{FFA} คือ $\frac{C_{FFA0}}{C_{TG0}}$

คำตอบในรูปทั่วไปของสมการที่ (3.7) เขียนได้เป็น

$$X_{cal} = \frac{p(1 - \exp(Z))}{1 - \left(\frac{p}{q} \right) \exp(Z)} \quad (3.8)$$

โดยที่

$$Z = C_{TG0} t (3k_1 - 3k_{-1})(p - q) \quad (3.9)$$

และ

$$p, q = \frac{(k_{-1}\theta_{FFA} + k_1\theta_w + 3k_1) / k_1 \pm \sqrt{\left(\frac{k_{-1}\theta_{FFA} + k_1\theta_w + 3k_1}{k_1} \right)^2 - 4\theta_w \left(\frac{3k_1 - 3k_{-1}}{k_1} \right)}}{2 \left(\frac{3k_1 - 3k_{-1}}{k_1} \right)} \quad (3.10)$$

จากนั้นจะใช้วิธีการหาค่าผลรวมของความเบี่ยงเบนกำลังสองระหว่างค่าการแปลงผันที่ได้จากการทดลองและค่าการแปลงผันที่ได้จากการคำนวณที่อุณหภูมิ 50 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส ดังสมการที่(3.11)

$$\sum (X_{cal} - X_{exp})^2 = 0 \quad (3.11)$$

โดยจะทำการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าโดยใช้ฟังก์ชัน Solver ในโปรแกรม Excel จนกระทั่งทำให้ค่าผลรวมของความเบี่ยงเบนกำลังสองระหว่างค่าการแปลงผันที่ได้จากการทดลองและการคำนวณมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ดังสมการที่ (3.11)

ค่าคงที่อัตรา เป็นค่าคงที่ซึ่งไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารต่างๆที่เกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยาเคมีตามความสัมพันธ์ของ Arrhenius ดังสมการที่ (3.12)

$$k(T) = A e^{-E_a/RT} \quad (3.12)$$

การหาค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาทำได้โดยแปลงสมการที่ (3.12) ให้อยู่ในรูป logarithm และจัดรูปได้เป็นสมการที่ (3.13)

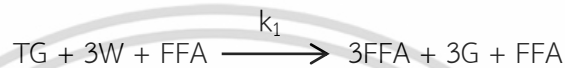
$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการทดลองเพื่อหาค่าคงที่อัตรา ฏ อุณหภูมิต่างๆ และนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ และ $\frac{1}{T}$ ได้เป็นกราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $-\frac{E_a}{R}$ และจุดตัดแกน y คือ $\ln A$

แบบจำลองที่ 2

แบบจำลองที่ 2 จะศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบผันกลับไม่ได้ โดยมีการคำนึงถึงอันดับปฏิกิริยาของสารตั้งต้นแต่ละตัว โดยจะศึกษาหาค่าคงที่อัตรา ค่าพลังงานกระตุ้นและค่าคงที่อาร์เรเนียสของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วย โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสข้างต้นสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็นดังนี้ซึ่งจะมีส่วนของกรดไขมันที่เติมในตอนเริ่มต้นด้วย



เริ่มจากสมการออกแบบสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะปริมาตรคงที่โดยเขียนได้เป็น

$$\frac{dC_{TG}}{dt} = r_{TG} \quad (3.14)$$

$$\frac{dC_{TG}}{dt} = k_1 C_{TG}^n C_W C_{FFA}^m \quad (3.15)$$

โดยเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแปลงผันทางเคมีกับเวลาได้เป็น

$$\frac{dX}{dt} = k_1 C_{TG0}^n (1 - X_{TG})^n (\theta_W - 3X_{TG}) C_{TG0}^m (\theta_{FFA} - X_{TG})^m \quad (3.16)$$

จากนั้นจะใช้แก้สมการอนุพันธ์โดยวิธีของออยเลอร์ (Euler's Method) และใช้ฟังก์ชัน Solver ใน โปรแกรม Excel จนกระทั่งทำให้ค่าผลรวมของความเบี่ยงเบนกำลังสองระหว่างค่าการแปลงผันที่ได้จากการทดลองและการคำนวณมีค่าเท่ากับหรือเข้าใกล้ศูนย์ดังสมการที่ (3.17)

$$\sum (X_{cal} - X_{exp})^2 = 0 \quad (3.17)$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมสารอิมัลซิไฟเออร์

จากที่ได้กล่าวมาเบื้องต้น ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างน้ำมันและน้ำนั้น จะมีส่วนของอิทธิพลจากการแพร่เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยวิธีที่สามารถลดอิทธิพลจากการแพร่มี 2 วิธี คือ การปั่นกวและ การเติมสารอิมัลซิฟายเออร์ จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 จะพบว่า เมื่อเปรียบเทียบผลจากการไม่ใช้แลใช้สารอิมัลซิฟายเออร์ในการทดลองที่ 1 และ 2 จะพบว่าให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของในการทำปฏิกิริยาที่มีการปั่นกวและไม่มีกปั่นกวในการทดลองที่ 2 และ 3 จะพบว่าเมื่อมีการปั่นกวจะทำให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีการปั่นกวประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ โดยจะเห็นว่าการลดอิทธิพลของการแพร่โดยใช้วิธีการปั่นกวจะให้ผลที่ดีกว่าการเติมสารอิมัลซิฟายเออร์ อาจเนื่องมาจากในกรณีที่เติมสารอิมัลซิฟายเออร์ สภาวะในการทดลองอาจจะไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมหรือสารอิมัลซิฟายเออร์นี้อาจไม่ใช่ตัวที่เหมาะสมกับระบบที่ทำการทดลองจึงส่งผลให้เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างน้ำมันและน้ำก็เป็นได้

ตารางที่ 4.1 อิทธิพลของการแพร่ต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสและอัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:0.4 โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 180 นาที

การทดลองที่	อัตราการปั่นกว (รอบต่อนาที)	เติมสารอิมัลซิฟายเออร์ (สเปน 60)	เปอร์เซ็นต์ผลผลิต ของกรดไขมัน
1	200	-	8.03
2	200	5 เปอร์เซ็นต์ของสารตั้งต้นทั้งหมด	8.31
3	-	5 เปอร์เซ็นต์ของสารตั้งต้นทั้งหมด	2.04

การศึกษาในส่วนของ การเติมสารอิมัลซิฟายเออร์ ในความจริงแล้วอาจจะมีการเติมสารอิมัลซิฟายเออร์บางตัวที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก็เป็นได้ แต่เมื่อทบทวนดูอีกครั้งพบว่า ถ้านำไปใช้ระดับภาคอุตสาหกรรมจะทำให้ส่วนของการแยกสารอิมัลซิฟายเออร์ออกจากผลิตภัณฑ์นั้นจะทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากสารอิมัลซิฟายเออร์ละลายรวมอยู่ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจจะต้องใช้เทคนิคในการแยกที่ยากขึ้นและทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายหรือพลังงานในส่วนของ การแยกสารอิมัลซิฟายเออร์ออกมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยจึงไม่ได้ทำการศึกษาต่อในกรณีของการเติมสารอิมัลซิฟายเออร์

4.2 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดไขมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Auto-Catalysis)

4.2.1 อิทธิพลของการเติมกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Auto-Catalysis)

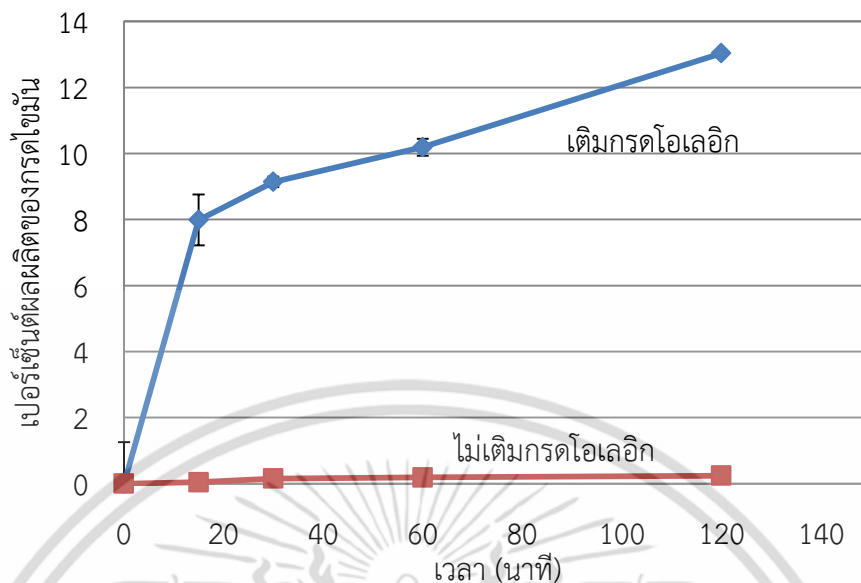
การทำปฏิกิริยาโดยไม่เติมกรดไขมันอิสระในตอนเริ่มต้น จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จะสังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีนั้นเพิ่มขึ้นน้อยมากอาจเนื่องมาจากอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยานั้นไม่สูงมากที่ 60 องศาเซลเซียสซึ่งจำกัดการทำปฏิกิริยาเพราะปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสนั้นเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์กรดไขมันที่ได้ค่อนข้างน้อย

การทำปฏิกิริยาโดยเติมกรดไขมันอิสระในตอนเริ่มต้น จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้นประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์โดยมีค่าสูงกว่าในกรณีแรกที่ไม่เติมกรดไขมันในตอนเริ่มต้น (เพิ่มขึ้นประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์) ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากันคือ 60 นาที อาจเนื่องจากการเติมกรดไขมันในตอนเริ่มต้นจะสามารถแตกตัวให้โปรตอนโดยแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบได้ด้วยตัวเอง ดังนั้นจึงส่งผลให้กรดไขมันที่ต้องการเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปเปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีจะเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 อิทธิพลของการเติมกรดไขมัน 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้นต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและมีการปั่นกวน 750 รอบต่อนาทีโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน	
	ไม่เติมกรดไขมัน	เติมกรดไขมัน
0	0	0
15	0.04	9.08
30	0.15	9.83
60	0.18	11.64
120	0.24	13.07

เมื่อนำทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบกันเป็นกราฟเพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนจะได้ดังรูปที่ 4.1 ดังนั้น จึงเป็นการสนับสนุนสมมติฐานที่ว่ากรดไขมันสามารถแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ (Auto-Catalysis)



รูปที่ 4.1 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดไขมัน 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้นและไม่เติมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำคือ 1:4
 หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือ 0.66 เปอร์เซ็นต์
 : โดยที่เส้นที่อยู่ในกราฟเป็นเพียงเส้นต่อจุดเพื่อทำให้ง่ายต่อการมองเห็นเท่านั้น ไม่ได้เป็นการคำนวณจากแบบจำลองใดๆ

4.2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำ

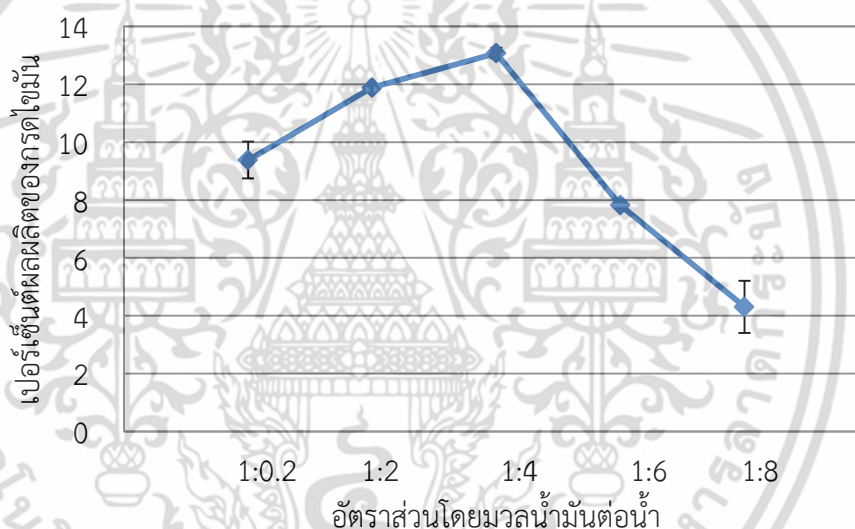
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมีเลขสมดุลโมลของน้ำมันต่อน้ำคือหนึ่งต่อสามตามสมการสมดุลปฏิกิริยา ดังนั้นในการทดลองจึงให้มีปริมาณน้ำที่มากเกินไปเพื่อให้เพียงพอในการทำปฏิกิริยา โดยจากผลการทดลองจะเห็นว่าที่ปริมาณน้ำที่มากขึ้นในช่วงอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำเป็น 1:0.2 ถึง 1:4 (คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลคือ 1:10 ถึง 440) จะส่งผลให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้นมากกว่า 1:4 จะทำให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันลดลง อาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะเป็นการเจือจางกรดไขมันเริ่มต้นที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบทำให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาลดลง แสดงดังตารางที่ 4.3

เนื่องจากข้อมูลจากงานวิจัยกล่าวว่า ปริมาณน้ำในสารถ่ายหลังการปั่นแห้ง (ทางกายภาพ) จะมีปริมาณน้ำมันต่อน้ำโดยมวลประมาณ 1:4 [11] ดังนั้นจะเห็นว่าเป็นปริมาณที่เหมาะสม ไม่จำเป็นต้องมีการระเหยน้ำออกหรือเติมน้ำเข้า เพียงแค่มีการให้ความร้อนก็จะสามารถผลิตกรดไขมันอิสระได้

ตารางที่ 4.3 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและมีการปั่นกวน 750 รอบต่อนาทีโดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้น ใช้เวลาทำปฏิกิริยา 120 นาที

อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ	เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน
1:0.2	9.38
1:2	11.88
1:4	13.07
1:6	7.82
1:8	4.31

เมื่อนำทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบกันเป็นกราฟเพื่อให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนจะได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ 60 องศาเซลเซียสและมีการปั่นกวน 750 รอบต่อนาที โดยเติมกรดไขมัน 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมันในตอนเริ่มต้น เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที

หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือ 0.90 เปอร์เซ็นต์

: โดยที่เส้นที่อยู่ในกราฟเป็นเพียงเส้นต่อจุดเพื่อทำให้ง่ายต่อการมองเห็นเท่านั้น ไม่ได้เป็นการคำนวณจากแบบจำลองใดๆ

4.2.3 อิทธิพลของปริมาณการเติมกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

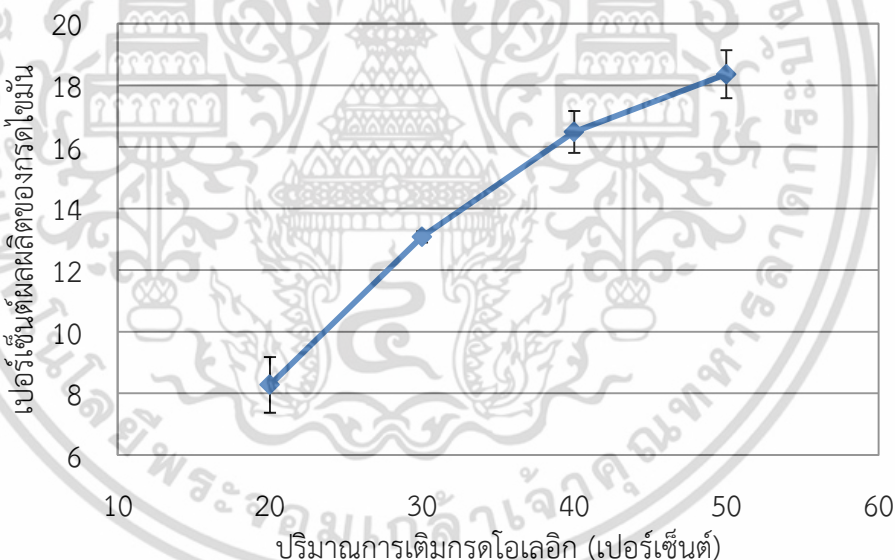
จากการทดลองโดยปรับเปลี่ยนปริมาณของกรดไขมันอิสระ (กรดโอเลอิก) ในตอนเริ่มต้น โดยเติมกรดโอเลอิก 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมันในตอนเริ่มต้น ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของกรดไขมันในตอนเริ่มต้นก่อนทำปฏิกิริยามากขึ้น จะทำ

ให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากกรดไขมันสามารถแตกตัวให้ประจุบวกซึ่งแสดงสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วยตัวเอง จึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้นตามสมการกลไกที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2

ตารางที่ 4.4 อิทธิพลของปริมาณการเติมกรดโอเลอิกต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและมีการปั่นกววน 750 รอบต่อนาทีโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้เวลาทำปฏิกิริยา 120 นาที

ปริมาณการเติมกรดโอเลอิก (%)	เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน
20	8.27
30	13.07
40	16.48
50	18.35

เมื่อนำทั้งสองกรณีมาเปรียบเทียบกันเป็นกราฟเพื่อให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนจะได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 อิทธิพลของปริมาณกรดโอเลอิกในการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ที่ 60 องศาเซลเซียสและเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที

หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือ 0.90 เปอร์เซ็นต์

: โดยที่เส้นที่อยู่ในกราฟเป็นเพียงเส้นต่อจุดเพื่อทำให้ง่ายต่อการมองเห็นเท่านั้น ไม่ได้เป็นการคำนวณจากแบบจำลองใดๆ

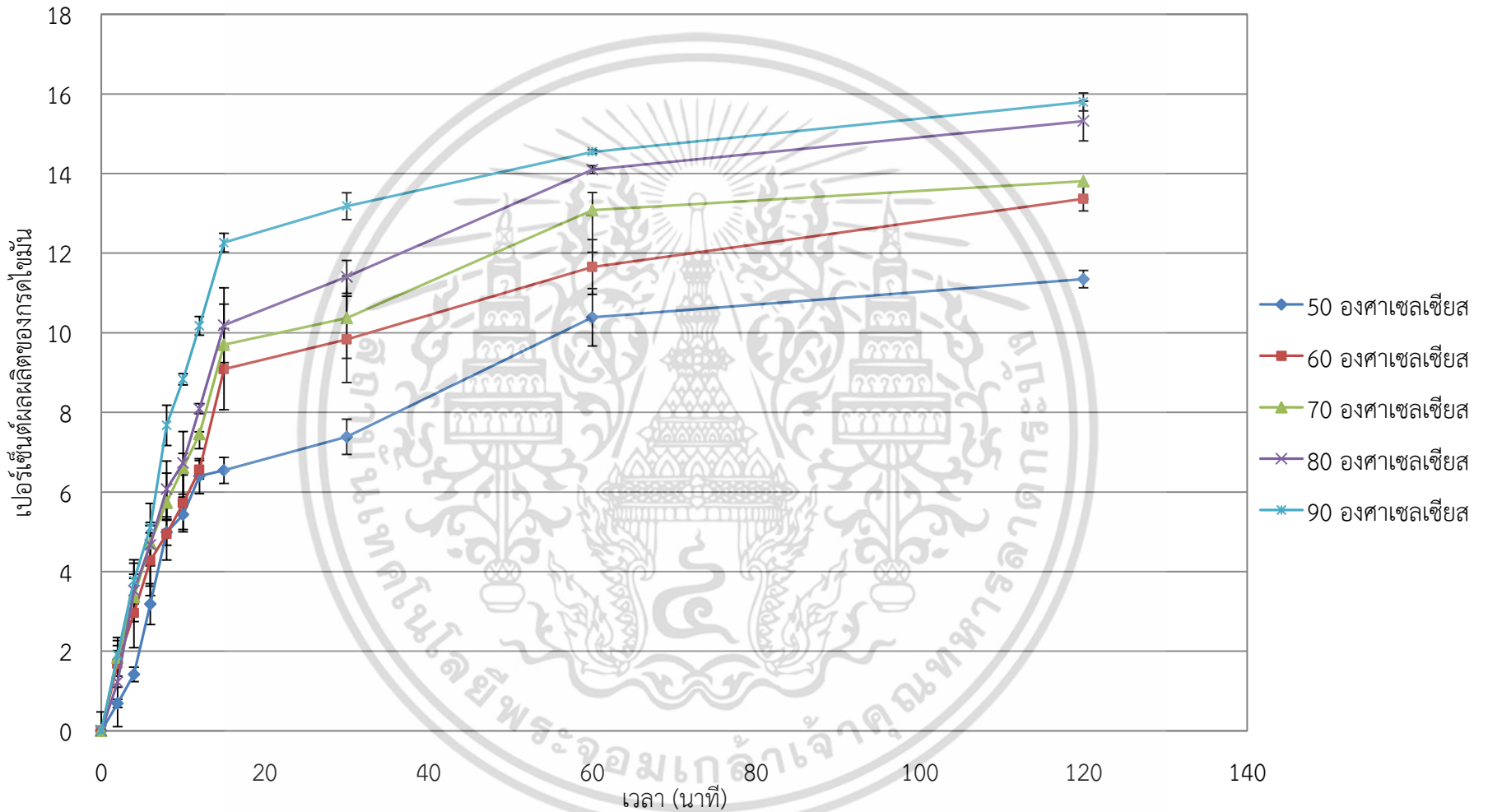
4.2.4 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

จากการทดลองปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ (50 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส) ที่เวลา 2 ถึง 120 นาที เพื่อนำไปศึกษาในส่วนของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์ม โดยผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที และเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมันเริ่มต้น

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน				
	50 องศาเซลเซียส	60 องศาเซลเซียส	70 องศาเซลเซียส	80 องศาเซลเซียส	90 องศาเซลเซียส
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.69	1.68	1.84	1.22	1.91
4	1.42	2.96	3.36	3.52	3.77
6	3.18	4.27	4.71	4.67	5.10
8	4.99	4.94	5.74	6.07	7.68
10	5.43	5.71	6.61	6.73	8.83
12	6.40	6.56	7.45	8.09	10.17
15	6.54	9.08	9.70	10.19	12.27
30	7.38	9.83	10.37	11.40	13.18
60	10.39	11.65	13.08	14.10	14.54
120	11.35	13.07	13.81	15.32	15.80

จากตารางที่ 4.5 จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสนั้นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น และที่เวลาเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อนำการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิต่าง ๆ (50 60 70 80 และ 90 องศาเซลเซียส) มาเปรียบเทียบกันจะแสดงดังกราฟรูปที่ 4.4 ซึ่งจะแสดงให้เห็นแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันที่ชัดเจนขึ้น



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เวลาต่าง ๆ โดยเติมกรดไขมัน 30 เปอร์เซ็นต์โดยใช้อัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำ 1:4
 หมายเหตุ : ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือ 1.01 เปอร์เซ็นต์
 : โดยที่เส้นที่อยู่ในกราฟเป็นเพียงเส้นต่อจุดเพื่อทำให้ง่ายต่อการมองเห็นเท่านั้น ไม่ได้เป็นการคำนวณจากแบบจำลองใดๆ

4.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

แบบจำลองที่ 1

ผลการทดลองการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์มในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาหาค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าและค่าคงที่อัตราย้อนกลับของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเริ่มจากสมการคำตอบในรูปทั่วไปดังสมการที่ (3.8)

$$X_{cal} = \frac{p(1 - \exp(Z))}{1 - \left(\frac{p}{q}\right)\exp(Z)} \quad (3.8)$$

และทำการลองผิดลองถูกในสมการที่ (3.11) โดยใช้ฟังก์ชัน Solver ในโปรแกรม Excel จนกระทั่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์โดยสรุปได้ดังตารางที่ 4.6

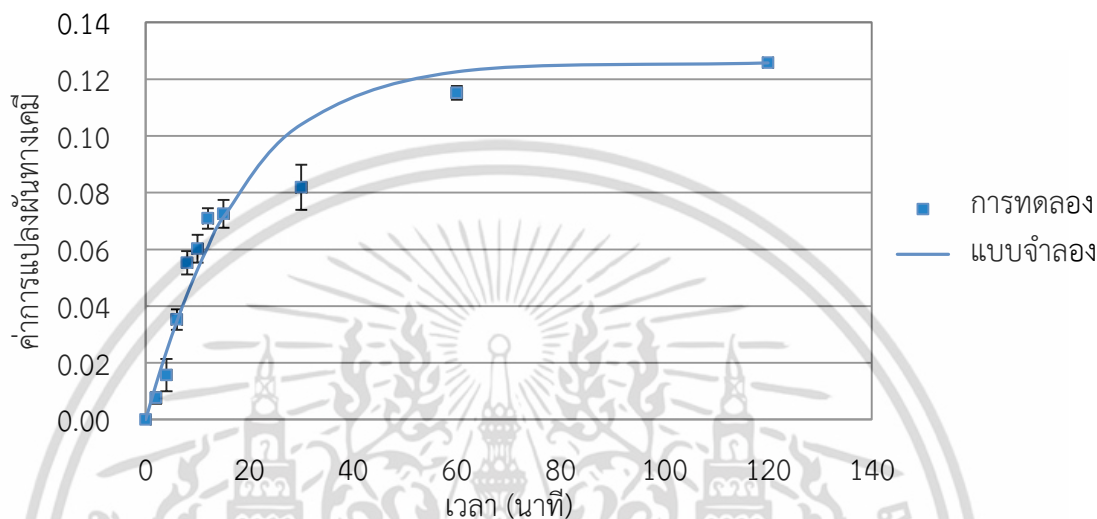
$$\sum (X_{cal} - X_{exp})^2 = 0 \quad (3.11)$$

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าและค่าคงที่อัตราย้อนกลับของปฏิกิริยาโดยใช้แบบจำลองที่ 1

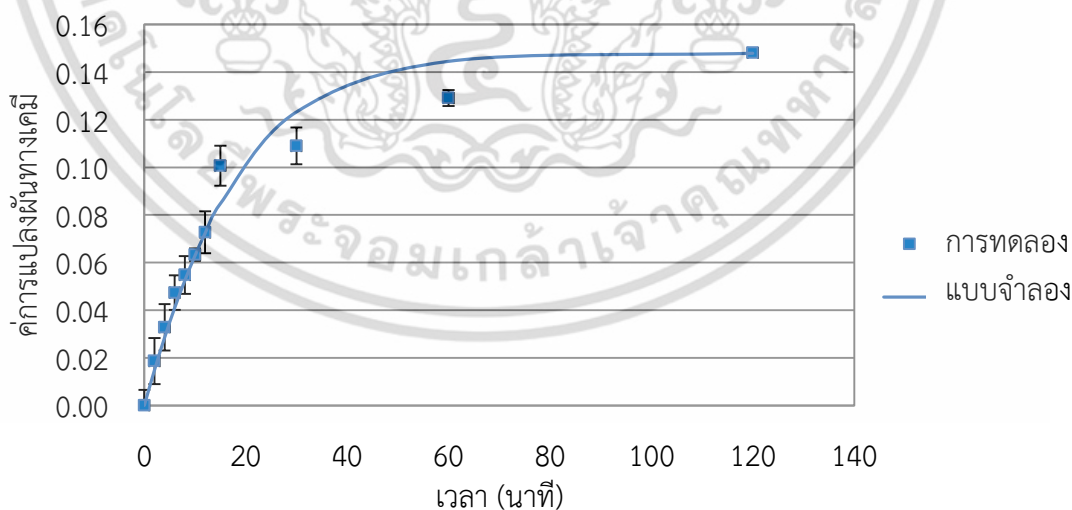
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	k_1 ($L^2/mol^2 \cdot min^{-1}$)	k_{-1} ($L^2/mol^2 \cdot min^{-1}$)
50	1.60E-04	1.45E-01
60	1.89E-04	1.49E-01
70	1.96E-04	1.50E-01
80	2.36E-04	1.55E-01
90	2.72E-04	1.69E-01

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้ค่าคงที่อัตราเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าคงที่อัตราไปข้างหน้า (k_1) และค่าคงที่อัตราย้อนกลับ (k_{-1}) สูงขึ้นด้วย ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ R. Alenezi และคณะ [21] ที่ศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันดอกทานตะวันทีสภาวะน้ำกึ่งวิกฤตอุณหภูมิในช่วง 270 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความดัน 20 เมกะปาสกาลพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่อัตราจะสูงขึ้นด้วย โดยที่อุณหภูมิ 270 และ 350 องศาเซลเซียส ค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าจะเพิ่มจาก $1.80E-03$ เป็น $3.60E-02$ โดยจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีขึ้น เมื่อเทียบกับในงานวิจัยนี้จะเห็นว่าค่าคงที่อัตราที่ได้จากแบบจำลองนี้มีค่าน้อยกว่าค่าของ R. Alenezi และคณะ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ทำการทดลองนั้นต่ำกว่าคือ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส ค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าที่ได้มีค่าน้อยกว่าซึ่งส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า

เมื่อนำค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลองที่ 1 แสดงด้วยเส้นทึบเปรียบเทียบกับค่าแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทดลอง แสดงด้วยจุดสัญลักษณ์ ในช่วงอุณหภูมิการทดลองที่อุณหภูมิ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส จะได้ดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.9 โดยทุกการทดลอง มีการเติมกรดไขมันอิสระ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 และการปั่นกวน 750 รอบต่อนาที

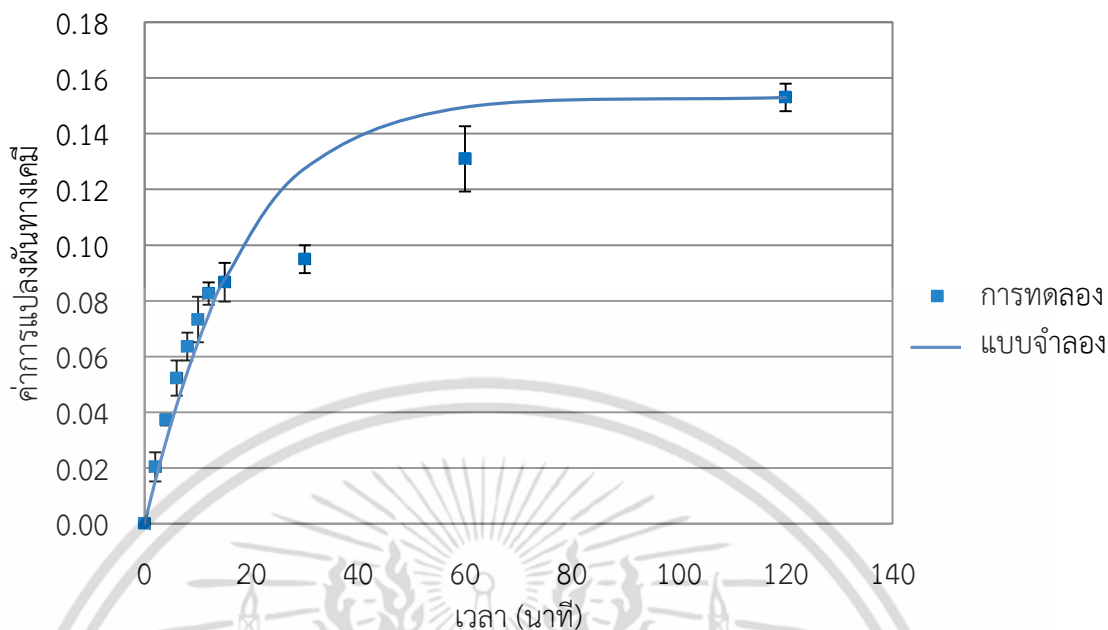


รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลองที่ 1 และจากการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
 หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือ 0.79 เปอร์เซ็นต์

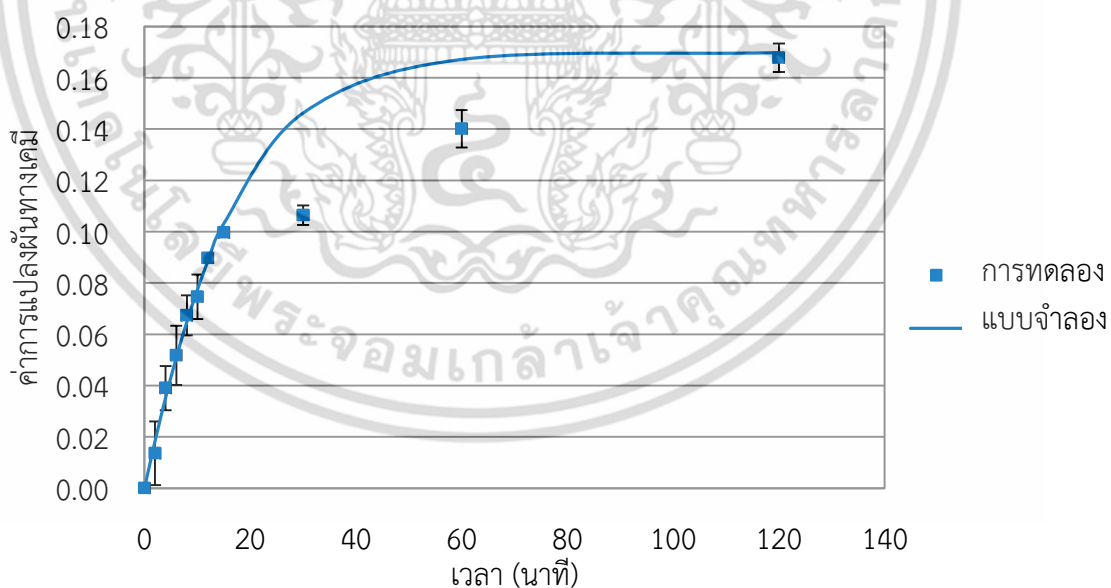


รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลองที่ 1 และจากการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
 หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือ 0.97 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

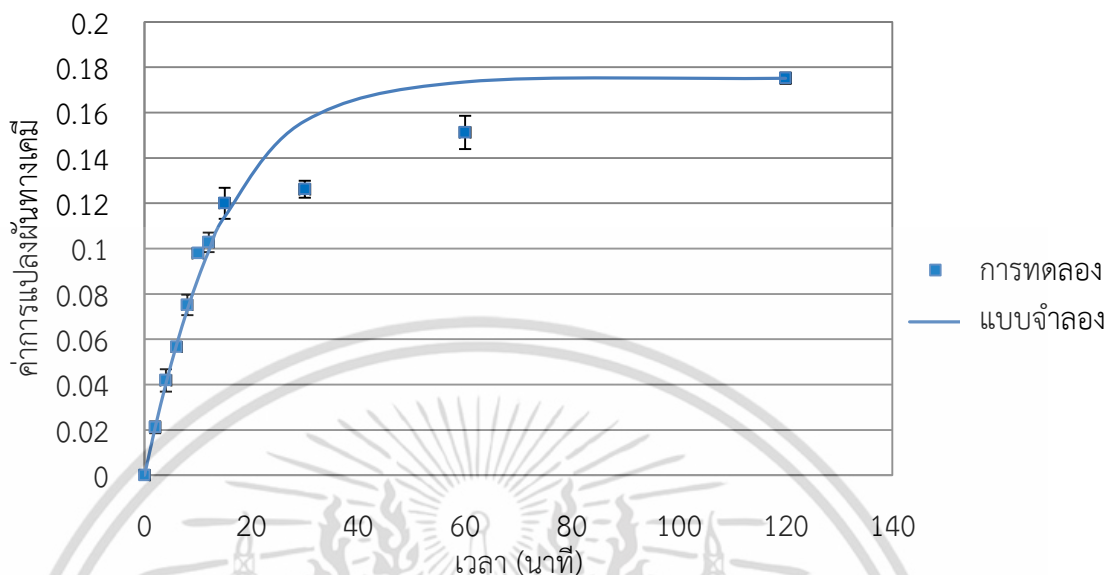


รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลองที่ 1 และจากการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส
 หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือ 0.81 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลองที่ 1 และจากการทดลองที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
 หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือ 0.87 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

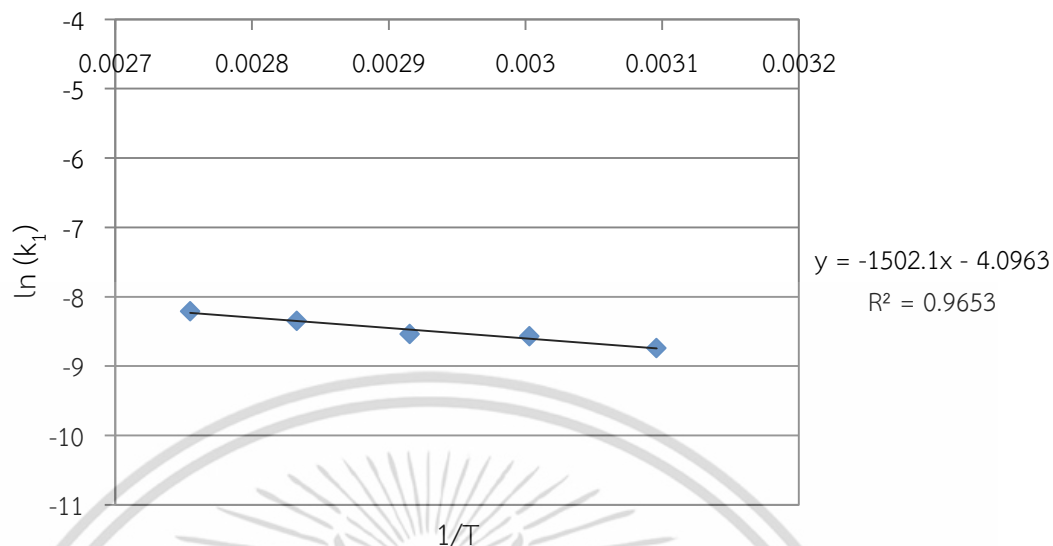


รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลองที่ 1 และจากการทดลองที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

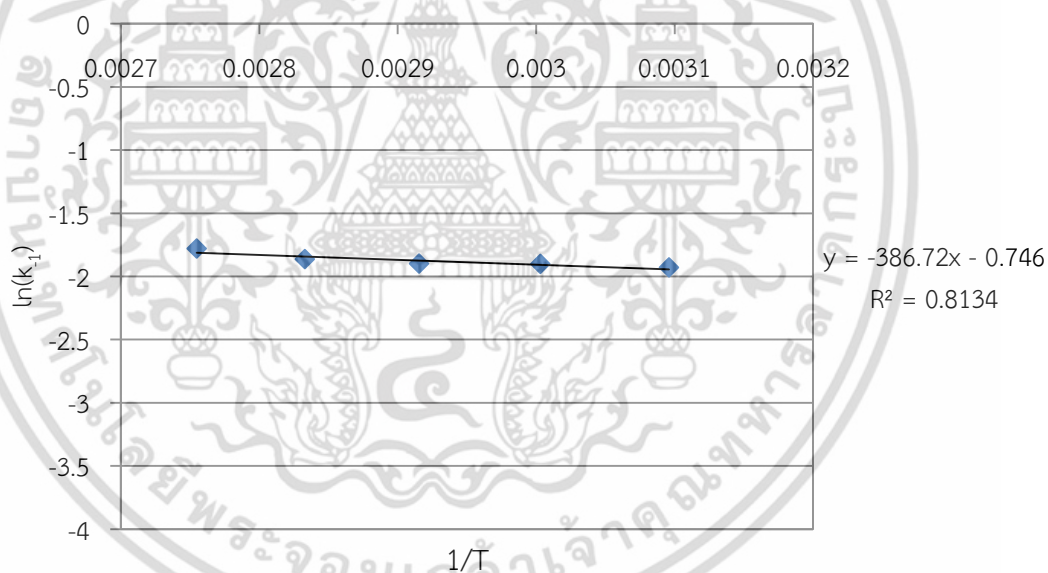
หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือ 0.73 เปอร์เซ็นต์

จากการเปรียบเทียบกับค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.9 จะพบว่าค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลองที่ 1 และค่าจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการคำนวณจะมากกว่าจากการทดลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเวลาการทำปฏิกิริยามากขึ้นหรืออุณหภูมิที่สูงขึ้น จะมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นด้วย เนื่องจากในแบบจำลองนี้ยังไม่ได้คำนึงถึงในส่วนของอิทธิพลจากการแพร่ แต่จะเห็นว่าในช่วงแรกประมาณ 0 ถึง 20 นาทีของทุกอุณหภูมิ ค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทดลองนั้นจะมีค่าที่สูงกว่าแบบจำลอง แต่ค่าการแปลงผันทางเคมีของการทดลองสามารถมีค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลอง ดังนั้นค่าการแปลงผันทางเคมีจากแบบจำลองและจากการทดลองยังอยู่ในช่วงเดียวกัน โดยรวมแล้วจะเห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นให้ผลที่ค่อนข้างดีและยอมรับได้

จากนั้นเมื่อนำค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าและย้อนกลับของปฏิกิริยาจากแบบจำลองที่ 1 ที่ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียสมาหาค่าพลังงานกระตุ้นและค่า A (คงที่อาร์เรเนียส) ของปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับ ได้ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.10 Arrhenius plot ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไปข้างหน้า



รูปที่ 4.11 Arrhenius plot ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสย้อนกลับ

โดยค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่ากับ 12.48 kJ/mol และปฏิกิริยาย้อนกลับเท่ากับ 3.21 kJ/mol เมื่อนำเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ A.L. Milliren และคณะ พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับ (26.77 kJ/mol และ 95.23 kJ/mol) มีค่าที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก อาจเนื่องมาจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นเป็นการคิดจากปฏิกิริยารวมของไฮโดรไลซิส แต่ในงานวิจัยของ A.L. Milliren และคณะนั้นคิดจากปฏิกิริยาในทั้งสามขั้นตอน จึงอาจทำให้ค่าที่ได้ออกมาแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นได้นำแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่สร้างขึ้นมานำมาทำนายค่าการแปลงผันทางเคมีที่อุณหภูมิในช่วง 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองที่ 1

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ค่าการแปลงผันทางเคมี (-)			
	จากการคำนวณ (X_{cal})	จากการทดลอง (X_{exp})	%ความคลาดเคลื่อน จากการทำนาย	%ความคลาดเคลื่อน จากการทดลอง
55	0.142	0.136	4.411	±0.042
65	0.151	0.150	0.662	±0.232
75	0.161	0.164	1.863	±0.057

หมายเหตุ: การทดลองทั้ง 3 ครั้ง มีการเติมกรดไขมันอิสระ 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมัน อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองหาจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

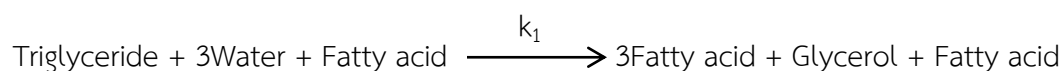
โดยการหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทำนายคือ

$$\% \text{ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย} = \frac{X_{cal} - X_{exp}}{X_{exp}} \times 100$$

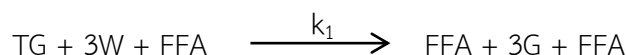
จากผลการทำนายค่าการแปลงผันทางเคมีในตารางที่ 4.9 จะเห็นว่าค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยค่าที่ทำนายมีค่าสูงกว่าค่าจากการทดลอง อาจเนื่องมาจากสมมติฐานที่เรากำหนดในแบบจำลองโดยไม่มีการรวมปัจจัยการแพร่และการกำหนดอันดับการเกิดปฏิกิริยา แต่จะเห็นว่าที่ 75 องศาเซลเซียสนั้น ค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการคำนวณ แต่เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองนั้นสามารถมีค่า ±0.057 ดังนั้น ค่าการแปลงผันที่ได้จากการคำนวณยังถือว่าอยู่ในช่วงเดียวกัน

แบบจำลองที่ 2

โดยเขียนปฏิกิริยาได้ดังนี้



จัดรูปใหม่เป็น



เริ่มจากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dC_{TG}}{dt} = r_{TG}$$

$$\frac{dC_{TG}}{dt} = -k_1 C_{TG}^n C_W C_{FFA}^m$$

โดยเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแปลงผันทางเคมีกับเวลาได้เป็น

$$\frac{dX}{dt} = k_1 C_{TG0}^n (1 - X_{TG})^n (\theta_W - 3X_{TG}) C_{TG0} (\theta_{FFA} - X_{TG})^m$$

จากนั้นแก้สมการอนุพันธ์โดยวิธีของออยเลอร์ (Euler's Method) โดยจะสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น ค่าคงที่อาร์เรเนียสและอันดับปฏิกิริยา (n และ m) ได้จากการทำ Trial Error โดยใช้ Solver ใน Excel ได้ค่าดังตารางที่ 4.8 และ 4.9 จากค่าพลังงานกระตุ้นและค่าคงที่อาร์เรเนียสสามารถหาค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 อันดับปฏิกิริยาของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

สารตั้งต้น	อันดับปฏิกิริยา
ไตรกลีเซอไรด์	1
กรดไขมัน	15

ตารางที่ 4.9 ค่าพลังงานกระตุ้นและค่าคงที่อาร์เรเนียสของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ค่าพลังงานกระตุ้น (Ea) (kJ/mol)	ค่าคงที่อาร์เรเนียส (A) (L ¹⁷ /mol ¹⁷ min ⁻¹)
18.57	1.18E-07

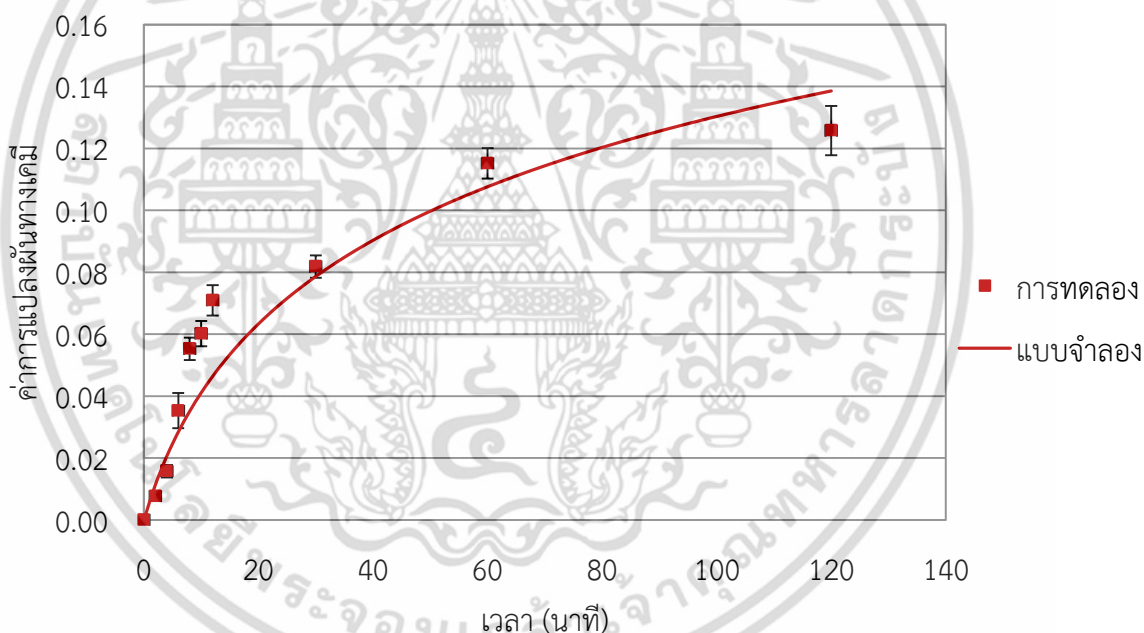
ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	k ₁ (L ¹⁷ /mol ¹⁷ min ⁻¹)
50	1.17E-07
60	1.44E-07
70	1.76E-07
80	2.11E-07
90	2.51E-07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

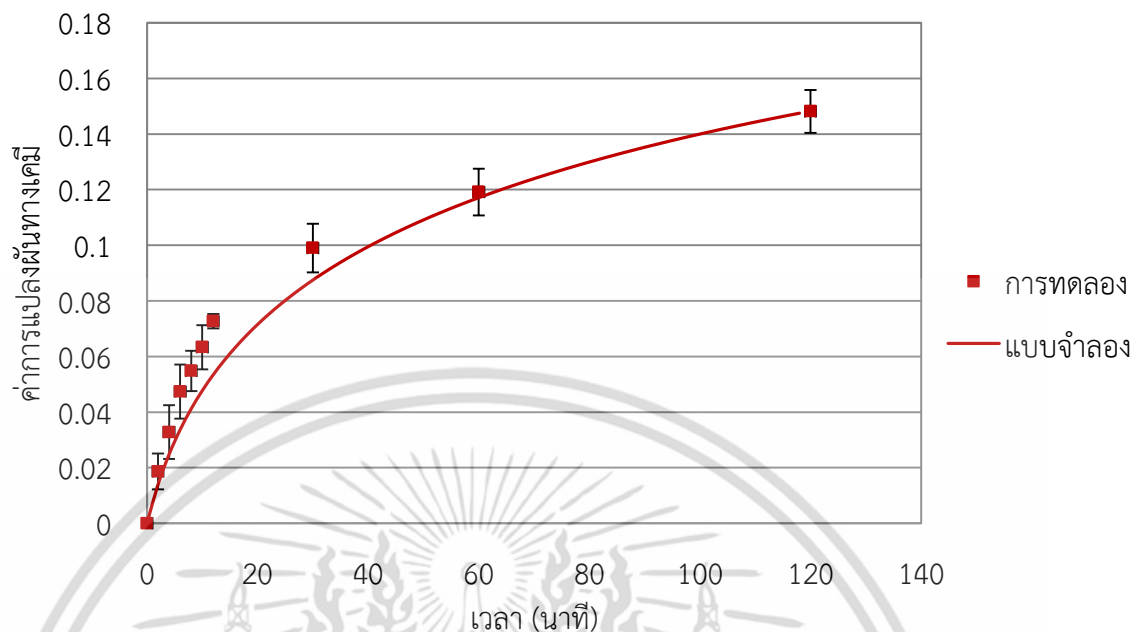
จากตารางที่ 4.10 จะพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าคงที่อัตราไปข้างหน้าสูงขึ้นด้วยซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นและมีค่าพลังงานกระตุ้นที่น้อยกว่างานวิจัยของ A.L. Milliren และคณะ (26.77 kJ/mol) ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิในช่วง 250 ถึง 300 องศาเซลเซียสซึ่งมีการเติมกรดไขมันอิสระเช่นกัน งานวิจัยของ A.L. Milliren และคณะทำการศึกษา 2 กรณีคือ การเติมและไม่เติมกรดไขมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยค่าพลังงานกระตุ้นของกรณีไม่เติมกรดไขมันคือ 90.29 kJ/mol ส่วนที่เติมกรดไขมันคือ 26.77 kJ/mol ซึ่งจะเห็นว่าค่าพลังงานกระตุ้นของระบบมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาแบบ Auto-Catalysis

เมื่อนำค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลองที่ 2 แสดงด้วยเส้นทึบเปรียบเทียบกับค่าแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทดลอง แสดงด้วยจุดสัญลักษณ์ ในช่วงอุณหภูมิการทดลองที่อุณหภูมิ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส จะได้ดังรูปที่ 4.12 ถึง 4.16 โดยทุกการทดลอง มีการเติมกรดไขมันอิสระ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของน้ำมัน อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 และการปั่นกวน 750 รอบต่อนาที



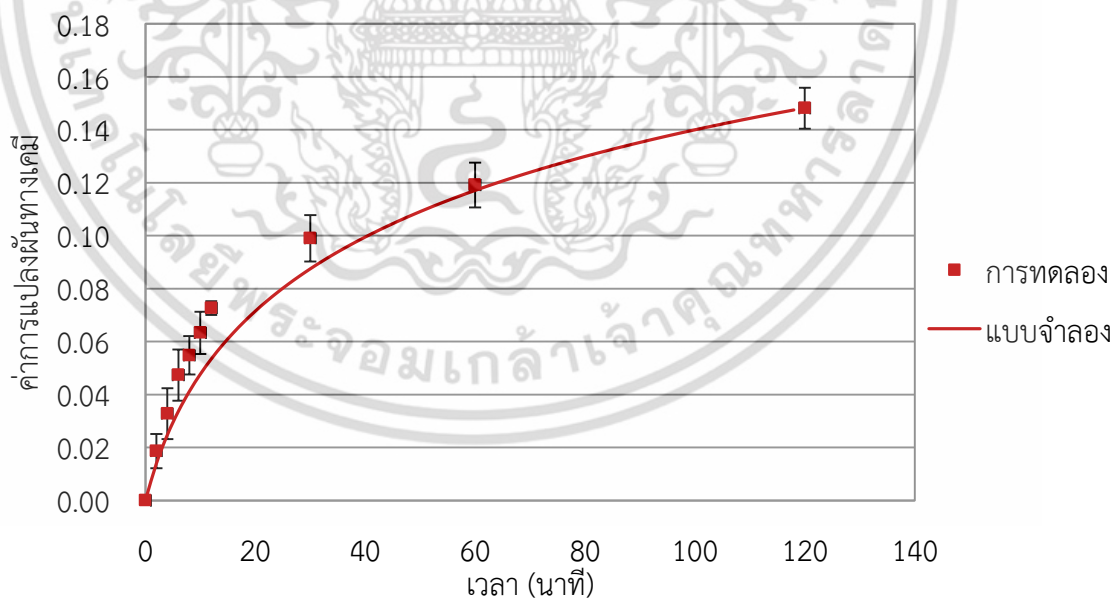
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลองที่ 2 และจากการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือ 0.79 เปอร์เซ็นต์



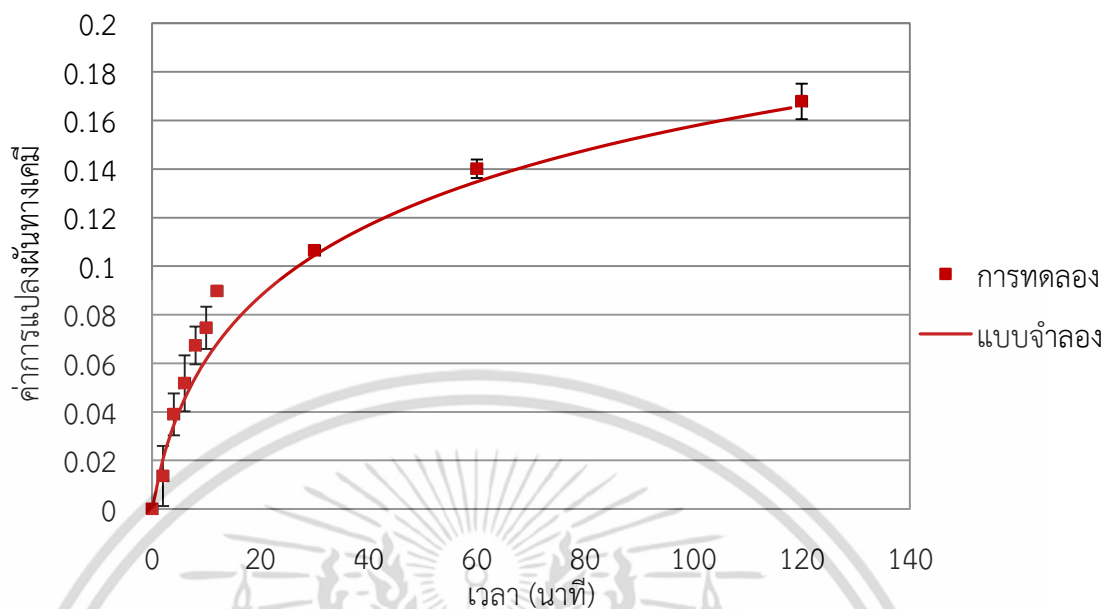
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลองที่ 2 และจากการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือ 0.97 เปอร์เซ็นต์

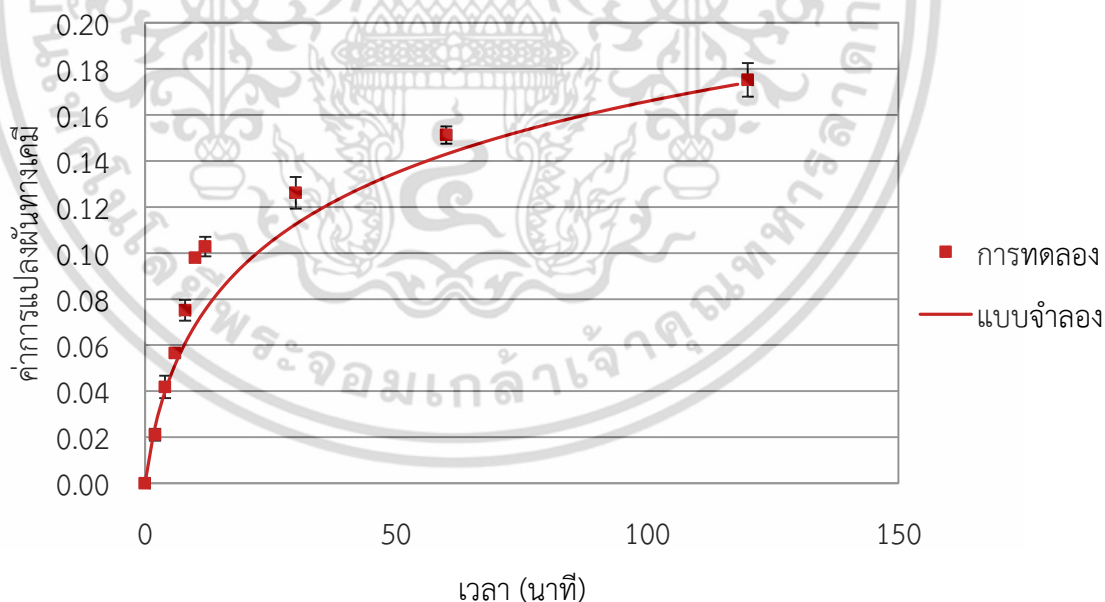


รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลองที่ 2 และจากการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือ 0.81 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลองที่ 2 และจากการทดลองที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
 หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือ 0.87 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลองที่ 2 และจากการทดลองที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส
 หมายเหตุ: ในแต่ละชุดการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองมากที่สุดคือ 0.73 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นได้นำแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่สร้างขึ้นมาทำนายค่าการแปลงผันทางเคมีที่อุณหภูมิที่อยู่ในช่วง 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทำนายโดยใช้แบบจำลองที่ 2

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ค่าการแปลงผันทางเคมี (-)			
	จากการคำนวณ (X_{cal})	จากการทดลอง (X_{exp})	%ความคลาดเคลื่อน จากการทำนาย	%ความคลาดเคลื่อน จากการทดลอง
55	0.143	0.136	5.147	± 0.042
65	0.152	0.150	1.333	± 0.232
75	0.162	0.164	1.219	± 0.057

หมายเหตุ: การทดลองทั้ง 3 ครั้ง มีการเติมกรดไขมันอิสระ 30 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมัน อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองหาจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

เมื่อนำแบบจำลองที่ 2 มาทำนายค่าการแปลงผันทางเคมี ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.9 จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองแรกมากอาจเนื่องมาจากในกรณีนี้มีการคำนึงถึงอันดับของปฏิกิริยาด้วย จึงอาจจะทำให้แบบจำลองนี้ทำนายผลได้แม่นยำมากกว่าแบบจำลองแรก แต่จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสนั้น ค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งในความเป็นจริงไม่ควรจะเป็น แต่จะเห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองนั้นสามารถมีค่า ± 0.057 ดังนั้นค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทดลองและการคำนวณยังใกล้เคียงกันจึงยอมรับได้

จากการศึกษาทางด้านจลนพลศาสตร์โดยเสนอแบบจำลอง 2 แบบ จะพบว่า สามารถทำนายค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากแบบจำลองและค่าการแปลงผันทางเคมีที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ยังไม่แม่นยำที่สุด เนื่องมาจากทั้ง 2 แบบจำลอง เราไม่ได้คำนึงถึงในส่วนของอิทธิพลของการแพร่เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย แต่ก็ยังเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็นสามส่วนหลัก คือ การศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้สารอิมัลซิฟายเออร์ การใช้กรดไขมันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Auto-Catalysis) ช่วยในการทำปฏิกิริยาและการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบผันกลับได้

5.1 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมสารอิมัลซิฟายเออร์

ผลการทดลองในการลดอิทธิพลของการแพร่ทั้ง 2 วิธีคือ การปั่นกววนและการเติมสารอิมัลซิฟายเออร์ พบว่าในกรณีที่มีการปั่นกววนจะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มสูงขึ้น 8.3 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับเมื่อไม่มีการปั่นกววนและในการเติมสารอิมัลซิฟายเออร์ หรือ สเปน 60 กับกรณีที่ไม่เติม (มีการปั่นกววนทั้งคู่) จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งสังเกตได้ว่าการเติม สเปน 60 นั้นส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่สภาวะการทดลองนี้น้อยมาก อาจเนื่องมาจากสารอิมัลซิฟายเออร์ที่ใช้ยังไม่เหมาะสมกับระบบที่ทำการทดลองหรือสภาวะการทดลองยังไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสม จึงทำให้ไม่สามารถทำให้น้ำและน้ำมันเป็นสารแขวนลอยได้ดังที่ต้องการ ดังนั้นการปั่นกววนจึงมีผลต่อการลดอิทธิพลของการแพร่มากกว่าการเติมสารอิมัลซิฟายเออร์

5.2 การทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Auto-catalysis)

5.2.1 อิทธิพลของการเติมกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Auto-catalysis)

การทำปฏิกิริยาโดยไม่เติมกรดไขมันอิสระในตอนเริ่มต้นพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยโดยเพิ่มขึ้นจาก 0.05 เปอร์เซ็นต์ 0.22 เปอร์เซ็นต์ โดยเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันที่เพิ่มขึ้นน้อยมากนี้อาจเนื่องมาจากถูกจำกัดทางด้านอุณหภูมิเพราะอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยานั้นไม่สูงมากจึงอาจจำกัดการทำปฏิกิริยาเพราะปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสนั้นเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน [15] ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันที่ได้นั้นค่อนข้างน้อย จากนั้นได้ทำปฏิกิริยาโดยมีการเติมกรดไขมันอิสระในตอนเริ่มต้นพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้นประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เติมกรดไขมันในตอนเริ่มต้น โดยเนื่องมาจากการเติมกรดไขมันในตอนเริ่มต้นนั้นกรดไขมันจะสามารถประพฤติตัวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบได้ด้วยตัวเอง ดังนั้นจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้นและส่งผลให้ผลิตภัณฑ์กรดไขมันที่ต้องการเพิ่มขึ้น

5.2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำ

ผลการทดลองพบว่าที่ปริมาณน้ำที่มากขึ้นในช่วงอัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันต่อน้ำเป็น 1:0.2 ถึง 1:4 (คิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลคือ 1:10 ถึง 440) จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การแปลงผันทางเคมีเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากกว่า 1:4 จะทำให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันลดลง เนื่องจากจากปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะเป็นการเจือจางไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันเริ่มต้นที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบทำให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 อิทธิพลของปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อเพิ่มปริมาณของกรดไขมันในตอนเริ่มต้นก่อนทำปฏิกิริยามากขึ้น จาก 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของน้ำมัน จะทำให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องมาจากกรดไขมันสามารถแตกตัวให้ประจุบวกซึ่งแสดงสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วยตัวเอง

5.2.4 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

เมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมันเพิ่มขึ้นด้วย ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น

5.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ในส่วนของการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสนั้น ได้ศึกษา 2 แบบจำลอง ในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 90 องศาเซลเซียส ทำการหาค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา โดยใช้สมการการออกแบบของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะปริมาตรคงที่ แบบจำลองที่ 1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไปข้างหน้าเท่ากับ 12.48 kJ/mol และปฏิกิริยาย้อนกลับเท่ากับ 3.21 kJ/mol สามารถเขียนสมการออกแบบได้คือ $\frac{dC_{TG}}{dt} = -k_1 C_{TG} C_w + k_{-1} C_{FFA} C_G$ โดยที่ $k_1 = 0.016 \exp\left(\frac{12.48}{RT}\right)$ และ $k_{-1} = 0.474 \exp\left(\frac{3.21}{RT}\right)$ และค่าพลังงานกระตุ้นของแบบจำลองที่ 2 คือ 18.57 kJ/mol และมีค่าอันดับเทียบกับไตรกลีเซอไรด์คือ 1 และเทียบกับกรดไขมันคือ 15 สามารถเขียนสมการออกแบบได้คือ $\frac{dC_{TG}}{dt} = -k_1 C_{TG}^1 C_w C_{FFA}^{15}$ โดยที่ $k_1 = (1.18E - 07) \exp\left(\frac{18.57}{RT}\right)$ และโมเดลทั้งสองสามารถทำนายค่าเปอร์เซ็นต์การแปลงผันทางเคมีที่อยู่ในช่วง 50 ถึง 90 องศาเซลเซียสได้เป็นที่ยอมรับได้

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 ในการศึกษาแบบจำลองทางด้านจลนพลศาสตร์เพื่อนำไปต่อยอดในการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสาหร่าย โดยในการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับสาหร่ายนั้น น้ำจะแพร่เข้าสู่เซลล์ของสาหร่ายได้ยากกว่าการที่น้ำเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันปาล์ม ดังนั้นในส่วนของการแบบจำลองจลนพลศาสตร์ควรจะต้องคิดเพิ่มในส่วนของอิทธิพลของการแพร่ด้วย

5.4.2 ควรจะศึกษาปริมาณกรดไขมันอิสระที่เติมลงไปในตอนเริ่มต้นในช่วงกว้างขึ้นเพื่อดูแนวโน้มที่เกิดขึ้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปริมาณกรดไขมันในช่วง 20 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ปริมาณกรดไขมัน 50 เปอร์เซ็นต์ให้ค่าการแปลงผันทางเคมี 20.34 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าเติมกรดไขมันมากขึ้นมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์อาจจะทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้เพราะเติมกรดไขมันก็เท่ากับเติมผลิตภัณฑ์ ดังนั้นอาจจะต้องศึกษาในช่วงที่มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์เพิ่มเติม

5.4.3 ควรจะศึกษาค่าการแปลงผันทางเคมีในกรณีที่เติมกรดไขมันในตอนเริ่มต้น 20 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ในช่วงเวลาต่างๆมากขึ้น เนื่องจากถ้านำไปคิดทางจลนพลศาสตร์ จำเป็นจะต้องทราบค่าการแปลงผันทางเคมีที่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเวลาแรก ๆ ก่อนเข้าสู่สมดุลเพื่อใช้เป็นข้อมูลที่ชี้หาตัวแปรสำคัญในแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งของแบบจำลองที่ 2 ที่

ต้องการหาอันดับปฏิกิริยาเทียบกับกรดไขมัน ดังนั้นข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันจึงมีความสำคัญเพื่อเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Laio D. Silva, Idia G. Nascimento, Rogério L. Pagano and André L. D. Ramos. “Kinetic modeling of the H₂SO₄-catalyzed soybean oil hydrolysis” [Online]. Available : <http://events.dechema.de/events/en/Events/Events+Archive/ECCE+8/>.
- [2] Asmida Ideris., Sadegh Salmanpour. and Mohammad norouzi. 2007. “Acid hydrolysis of pretreated palm oil lignocellulose Wastes.”, **IJE Transactions B: Applications**. 20(2) : 147- 151
- [3] Shervan Babamohammadi1 and Ida Idayu Muhamad. 2012. “Optimization of Glucose Production from Oil Palm Trunk through Acid Hydrolysis.” **International Conference on Biotechnology, Nanotechnology and its applications**.
- [4] N.A.Serri. A.H. Kamarudin, and S.N. Abdul Rahaman. 2008. “Preliminary Studies for Production of Fatty Acids from Hydrolysis of Cooking Palm oil Using C.rugosa Lipase.” **Journal of Physical Science**. 19 (1) : 79-88
- [5] วิชาการปาล์มน้ำมัน. “การแปรรูปปาล์มน้ำมัน”. [online]. Available: <http://www.doa.go.th/palm/linkTechnical/oil%20palm%20processing.html>.
- [6] Eiji Minami and Shiro Saka. 2006. “Kinetics of hydrolysis and methyl esterification for biodiesel production in two-step supercritical methanol process.” **Fuel**. 85 : 2479–2483
- [7] Mathias Snare, Iva Kubickova, Paivi Maki-Arvela, Kari Eranen and Dmitry Yu. Murzin. 2006. “Heterogeneous Catalytic Deoxygenation of Stearic Acid for production of Biodiesel” **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 45(16) : 5708–5715
- [8] BlackCatbiodiesel. 2007 -2008. “กรดไขมัน (Fatty acid)” [Online]. Available: <http://boy5443.tripod.com/new/what2.html>
- [9] Modhar A. Khan, Suzana Yusup and Murni M. Ahmad. 2010 “Acid esterification of a high free fatty acid crude palm oil and crude rubber seed oil blend: Optimization and parametric analysis.” **Biomassandbioenergy**. 34 : 1751-1756
- [10] Giuliano Dragone, Bruno Fernandes, António A. Vicente, and José A. Teixeira. 2010 **Formatex**. 1 : 1355-1366
- [11] Robert B. Levine, Tanawan Pinnarat, and Phillip E. Savage. 2010 “Biodiesel Production from Wet Algal Biomass through in Situ Lipid Hydrolysis and Supercritical Transesterification.”, **Energy Fuels**. 24 : 5235–5243.
- [12] ดร.ณรงค์ โฉมเฉลา. “กรดลอริก” [Online]. Available: <http://www.bloggang.com/viewdiary.php?id=kandalikecoconutoil&month=07-2010&date=30&group=1&gblog=30>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. กรีนไฮเปอร์มาร์ท สารานุกรมผลิตผลและผลิตภัณฑ์จากพืชในซูเปอร์มาร์เก็ต ฉบับคอมพิวเตอร์ [Online]. Available: www.sc.mahidol.ac.th
- [14] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. “กรดลิโนเลอิก”. [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1647/linoleic-acid>
- [15] Satyarthia J.K. i. D. and Ratnasamyb P.. 2011. “Hydrolysis of vegetable oils and fats to fatty acids over solid acid catalysts”, **Applied Catalysis A: General**. 391 : 427–435
- [16] Hee-Yong Shin., Jae-Hun Ryu, Sang-Yeob Park and Seong-Youl Bae. 2012. “Thermal stability of fatty acids in subcritical water.”, **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 98 : .250–253
- [17] Virendra K. Rathod and Anirudha B. Pandit. 2009 “Effect of various additives on enzymatic hydrolysis of castor oil” **Biochemical Engineering Journal**. 47 : 93–99
- [18] Samir R Kulkarni and Aniruddha B Pandit. 2004 “Enzymatic hydrolysis of castor oil: An approach for rate enhancement and enzyme economy”, **Indian Journal of Biotechnology**. 4 : 241-245
- [19] T. A. Patil., D. N. Butala, T. S. Raghunathan and H.S.Shankar. 1998. “Thermal hydrolysis of vegetable oils and fats. 1. Reaction Kinetics.” **Industrial&Engineering chemistry research**. 27(5) : 727–735
- [20] นางพะงา กงสิทธิ์, นที เตรียมปราบศึกและธนภร เดชชัชชนะนาถ. 2554. “การศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสน้ำมันปาล์มด้วยน้ำสภาวะกึ่งวิกฤติโดยใช้กรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” **ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.**
- [21] Russell L. Holliday, Jerry W. King, and Gary R. List. 1997. “Hydrolysis of Vegetable Oils in Sub- and Supercritical Water.” 36(3) : 932-935
- [22] Alenezi R., Leeke G.A., Santos R.C.D. and Khan A.R. 2009. “Hydrolysis kinetics of sunflower oil under subcritical water conditions.” **chemical engineering research and design**. 87 : 867-873.
- [23] ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนานนท์. “อิมัลซิไฟเออร์”. [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0303/emulsifier>
- [24] Khor H.T., Tan N.H. and C.L. Chua. 1986. “Lipase catalyzed hydrolysis of palm oil” **journal of the American Oil Chemists Society**. 63 : 538–540
- [25] Shujauddin Changi., Tanawan Pinnarat. and Phillip E.Savage. 2011 “Modeling Hydrolysis and Esterification Kinetics for Biofuel Processes.” **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 50 : 3206-3211

- [26] Amber L. Milliren, Joshua C. Wissinger, Vasudev Gottumukala and Constance A. 2013. “Kinetic of soybean oil hydrolysis in subcritical water”, **Fuel**. 108 : 277-281
- [27] ดวงกมล ณ ระนอง. 2553 “พื้นฐานวิศวกรรมปฏิกิริยาและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี”. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: อักษรสยามการพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ข้อมูลดิบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์กรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์			% ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0	14.18	14.36	14.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	22.31	21.37	20.33	9.24	7.99	6.72	10.24	8.86	7.45	1.26
30	23.00	21.92	22.15	10.02	8.61	8.78	11.11	9.55	9.73	0.76
60	23.20	23.16	23.50	10.25	10.01	10.31	11.36	11.10	11.42	0.15
120	25.81	25.98	25.66	13.18	13.19	12.73	14.61	14.62	14.12	0.25

หมายเหตุ : % ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองคิดจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

ตารางที่ ก.2 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยไม่เติมกรดโอเลอิกตอนเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์กรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์			% ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0	1.43	1.44	1.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	1.50	1.49	1.44	0.07	0.05	0.01	0.08	0.06	0.01	0.03
30	1.59	1.58	1.59	0.16	0.14	0.16	0.18	0.16	0.18	0.01
60	1.62	1.63	1.61	0.19	0.19	0.18	0.21	0.21	0.20	0.01
120	1.68	1.66	1.68	0.26	0.22	0.25	0.29	0.25	0.28	0.02

หมายเหตุ : % ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองคิดจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

ตารางที่ ก.3 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:0.2 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้น ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์กรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์			% ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0	14.29	14.29	14.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	22.05	22.40	23.15	8.83	9.22	10.08	9.79	10.23	11.18	0.63

หมายเหตุ : % ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองคิดจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

ตารางที่ ก.4 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:2 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้น ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์กรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์			% ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0	14.29	14.29	14.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	24.11	25.02	25.13	11.16	12.18	12.31	12.37	13.51	13.64	0.08

หมายเหตุ : % ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองคิดจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

ตารางที่ ก.5 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้น ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์กรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์			% ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0	14.29	14.29	14.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	25.81	25.98	25.66	13.07	13.26	12.89	14.49	14.70	14.30	0.18

หมายเหตุ : % ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองคิดจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

ตารางที่ ก.6 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:6 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้น ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์กรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์			% ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0	14.29	14.29	14.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	21.10	21.11	21.25	7.76	7.77	7.93	8.60	8.62	8.79	0.09

หมายเหตุ : % ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองคิดจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

ตารางที่ ก.7 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:8 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้น ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์กรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์			% ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0	14.29	14.29	14.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	18.98	17.58	17.62	5.35	3.76	3.81	5.93	4.17	4.22	0.90

หมายเหตุ : % ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองคิดจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

ตารางที่ ก.8 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดโอเลอิก 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์กรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์			% ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0	14.29	14.29	14.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	21.76	22.23	20.67	8.51	9.03	7.28	9.43	10.01	8.07	0.90

หมายเหตุ : % ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองคิดจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

ตารางที่ ก.9 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดโอเลอิก 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์กรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์			% ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0	14.29	14.29	14.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	29.43	28.21	28.95	17.11	15.75	16.58	18.97	17.46	18.38	0.68

หมายเหตุ : % ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองคิดจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

ตารางที่ ก.10 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสโดยเติมกรดโอเลอิก 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์กรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์			% ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0	14.29	14.29	14.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120	31.36	30.18	30.11	19.25	17.94	17.86	19.80	21.34	19.89	0.77

หมายเหตุ : % ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองคิดจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

ตารางที่ ก.11 ปฏิบัติไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นและใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์กรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์			% ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0	13.98	14.29	14.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	14.59	14.97	14.74	0.70	0.77	0.58	0.78	0.86	0.64	0.09
4	15.36	15.36	15.49	1.58	1.22	1.44	1.75	1.35	1.60	0.18
6	17.10	16.56	17.18	3.56	2.60	3.37	3.95	2.88	3.74	0.51
8	18.62	18.35	18.62	5.29	4.64	5.01	5.87	5.14	5.56	0.32
10	18.87	19.29	18.61	5.57	5.70	5.00	6.17	6.32	5.551	0.37
12	19.39	19.65	20.29	6.16	6.122	6.90	6.83	6.78	7.658	0.44
15	19.63	19.80	20.29	6.43	6.28	6.91	7.13	6.96	7.66	0.32
30	20.89	20.41	20.64	7.85	6.98	7.31	8.71	7.74	8.10	0.44
60	22.75	23.08	24.10	9.95	9.99	11.21	11.03	11.08	12.43	0.71
120	23.87	24.17	24.45	11.21	11.22	11.60	12.43	12.44	12.86	0.22

หมายเหตุ : % ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองคิดจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

ตารางที่ ก.12 ปฏิบัติไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นและใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์กรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์			% ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0	14.13	14.26	14.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	15.88	16.18	15.17	2.00	2.20	1.31	2.22	1.45	2.44	0.47
4	16.94	17.36	16.94	3.20	3.55	3.32	3.55	3.68	3.93	0.17
6	17.91	18.95	17.94	4.31	5.36	4.46	4.77	4.95	5.94	0.56
8	18.92	19.74	18.84	5.46	6.25	5.49	6.06	6.08	6.93	0.44
10	19.46	20.79	19.55	6.07	7.45	6.29	6.73	6.98	8.25	0.73
12	20.85	20.99	20.21	7.65	7.67	7.03	8.48	7.79	8.50	0.36
15	21.63	20.76	20.63	8.53	7.411	7.50	9.463	8.32	8.21	0.62
30	23.01	22.33	22.67	10.08	9.19	9.81	11.17	10.87	10.19	0.45
60	25.32	25.07	26.66	12.68	12.27	14.27	14.05	15.82	13.60	1.05
120	26.70	26.02	26.28	14.22	13.33	13.85	15.77	15.36	14.78	0.44

หมายเหตุ : % ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองคิดจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

ตารางที่ ก.13 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นและใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์กรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์			% ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0	14.12	14.11	14.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	14.21	16.15	15.40	0.09	2.33	1.23	0.10	2.59	1.37	1.11
4	16.71	17.97	17.10	2.96	4.41	3.18	3.28	4.88	3.52	0.77
6	18.47	18.96	17.39	4.96	5.53	3.51	5.50	6.13	3.89	1.03
8	19.94	19.64	18.94	6.63	6.30	5.28	7.35	6.98	5.86	0.70
10	20.75	19.95	19.55	7.55	6.65	5.98	8.37	7.38	6.63	0.78
12	21.30	21.28	21.29	8.16	8.16	7.94	9.05	9.04	8.80	0.12
15	21.96	22.12	22.16	8.912	9.11	8.93	9.87	10.10	9.90	0.10
30	23.53	23.17	23.98	10.68	10.29	10.97	11.84	11.41	12.18	0.34
60	26.58	25.65	25.66	14.11	13.07	12.88	15.63	14.49	14.27	0.65
120	27.27	27.58	28.32	14.87	15.22	15.85	16.48	16.88	17.57	0.49

หมายเหตุ : % ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองคิดจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

ตารางที่ ก.14 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส โดยเติมกรดโอเลอิก 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้นและใช้อัตราส่วนโดยมวลน้ำมันต่อน้ำ 1:4 ใช้การปั่นกวน 750 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์กรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน			เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์			% ความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
0	14.28	14.35	14.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	15.78	15.95	16.13	1.72	1.82	2.16	1.91	2.02	2.40	0.23
4	17.31	17.47	17.98	3.47	3.57	4.27	3.84	3.95	4.74	0.44
6	18.84	18.84	18.57	5.22	5.13	4.95	5.78	5.68	5.49	0.13
8	20.65	20.04	20.47	7.26	6.49	7.10	8.05	7.20	7.88	0.40
10	22.05	22.21	21.85	8.85	8.96	8.67	9.81	9.93	9.61	0.14
12	23.12	22.84	23.42	10.06	9.67	10.44	11.16	10.72	11.57	0.38
15	23.19	24.10	24.17	10.13	11.09	11.29	11.23	12.30	12.51	0.61
30	24.94	24.64	25.14	12.10	11.70	12.37	13.42	12.97	13.71	0.33
60	27.12	26.21	26.03	14.55	13.46	13.37	16.13	14.92	14.82	0.65
120	28.17	28.53	28.04	15.72	16.05	15.61	17.43	17.79	17.31	0.22

หมายเหตุ : % ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองคิดจากเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระ

การหาปริมาณกรดไขมันอิสระในสารตั้งต้นในน้ำมันปาล์ม และผลิตภัณฑ์อ้างอิงวิธีมาตรฐาน A.O.C.S. Official Method Ca 5a-40 ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม โดยมีรายละเอียดดังนี้

การคำนวณหาปริมาณของกรดไขมันอิสระในตัวอย่าง

เปอร์เซ็นต์กรดไขมัน

$$\%FFA = \frac{\text{สารละลายต่างที่ใช้ไป} \times \text{ความเข้มข้นของสารละลายต่าง} \times \text{โมเลกุลของกรดไขมัน} \times 100}{\text{น้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง}}$$

เมื่อ	สารละลายต่างที่ใช้ไป	= ค่าสิ้นสุดของการไตเตรท-ค่าเริ่มต้นของการไตเตรท (มิลลิลิตร)
	ความเข้มข้นของสารละลายต่าง	= 0.09 โมลาร์ (โมล/ลิตร)
	โมเลกุลของกรดไขมัน	= น้ำหนักกรดไขมัน (กรัม/โมล) (กรดโอเลอิก = 282.46 กรัม/โมล)
	น้ำหนักน้ำมันตัวอย่าง	= (กรัม)

โดยสมการข้างต้นนั้นสามารถพิสูจน์ได้จากจำนวนโมลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้ในการไทเทรตจะเท่ากับจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระ (FFA) ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยา

$$molNaOH = molFFA$$

$$\frac{CV}{1000} = \frac{g_{FFA}}{MW}$$

$$g_{FFA} = \frac{CV}{1000} \times MW$$

โดยที่ C คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีหน่วยเป็น โมล/ลิตร

V คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต มีหน่วยเป็น มิลลิลิตร

MW คือ มวลโมเลกุลของกรดโอเลอิก 282.46 มีหน่วยเป็น กรัม/โมล

โดยเมื่อคิดเทียบจากน้ำหนักสารตัวอย่างที่นำมาไทเทรตให้เป็นร้อยละโดยน้ำหนักจะได้เป็น

$$\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง } X \text{ กรัม มีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่} = \frac{CV}{1000} \times MW$$

ถ้าน้ำหนักสารตัวอย่าง 100 กรัมจะมีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่

$$= \frac{CV}{1000} \times MW \times 100 \times \frac{1}{X}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงการตัดหน่วยได้เป็น

$$\begin{aligned}\%FFA &= \frac{CV}{1000} \times MW \times 100 \times \frac{1}{X} \\ &= \frac{mol}{l} \times \frac{l}{1000ml} \times ml \times \frac{g}{mol} \times 100 \times \frac{1}{g}\end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณของกรดไขมันอิสระในตัวอย่าง

การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงของการทดลองครั้งที่ 1

-ดูดน้ำหนักสารตัวอย่างขึ้นมา 1.71 กรัม

-ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ คือ 0.09 โมล/ลิตร

-ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไปในการไทเทรต 15.6 มิลลิเมตร

ดังนั้นจะได้เป็น

$$\begin{aligned}\%FFA &= \frac{CV}{1000} \times MW \times 100 \times \frac{1}{X} \\ \%FFA &= \frac{0.09mol/l \times 15.6ml}{1000} \times 282.46g/mol \times 100 \times \frac{1}{1.71g} \\ &= 23.20\%\end{aligned}$$

2. เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน (%Yield of Fatty Acid)

เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน = $\frac{\text{กรัมกรดไขมันที่เกิดขึ้น}}{\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น}} \times 100$

โดยที่

-กรัมของกรดไขมันที่เกิดขึ้น

$$= (847.38/939.38) \times (\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น} - \text{กรัมไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย})$$

โดยเทียบมาจาก

มวลโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ทั้งหมด 939.38 กรัม/โมล มีกรดไขมันอยู่ 847.38 กรัม

ดังนั้น ไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น-ไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย จะมีกรดไขมันอยู่เท่ากับ

$$= \frac{847.3 \times (\text{ไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น} - \text{ไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย})}{939.38}$$

-กรัมไตรกลีเซอไรด์สุดท้ายจะหาผ่านเปอร์เซ็นต์กรดไขมันที่เกิดขึ้นจากสมการ

$$\%FFA = \frac{\text{กรัมของกรดไขมันที่เกิดขึ้น}}{\text{กรัมของกรดไขมันที่เกิดขึ้น} + \text{กรัมไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย}} \times 100$$

โดยเราจะทราบ %FFA ที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 1 จากนั้นจะย้ายข้างสมการเพื่อหากรัมไตรกลีเซอไรด์สุดท้ายได้

ตัวอย่างการคำนวณหากรัมไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย

การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ของการทดลองครั้งที่ 1
 -ได้ค่าเปอร์เซ็นต์กรดไขมันเท่ากับ 23.20%
 -กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น 16.89

$$\%FFA = \frac{\text{กรัมของกรดไขมันที่เกิดขึ้น}}{\text{กรัมของกรดไขมันที่เกิดขึ้น} + \text{กรัมไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย}} \times 100$$

$$\%FFA = \frac{(847.38/939.38) \times (\text{ไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น} - \text{ไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย})}{(847.38/939.38) \times (\text{ไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น} - \text{ไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย}) + \text{ไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย}} \times 100$$

$$23.20\% = \frac{(847.38/939.38) \times (16.89 - \text{ไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย})}{(847.38/939.38) \times (16.89 - \text{ไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย}) + \text{ไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย}} \times 100$$

กรัมไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย = 14.97 กรัม

ตัวอย่างการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน

การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
 -ไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น 16.89 กรัม
 -ไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย 14.97 กรัม

ดังนั้นจะได้เป็น

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของกรดไขมัน} &= \frac{\text{กรัมกรดไขมันที่เกิดขึ้น}}{\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น}} \times 100 \\ &= \frac{(847.38/939.38) \times (\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น} - \text{กรัมไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย})}{\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น}} \times 100 \\ &= \frac{(847.38/939.38) \times (16.89 - 14.97)}{16.89} \times 100 \\ &= 10.25\% \end{aligned}$$

3. การหาค่าการแปลงผันทางเคมี (%Conversion of Triglyceride)

เปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์ (%)

$$= \frac{\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น} - \text{กรัมไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย}}{\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณเปอร์เซ็นต์ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์

การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
 -ไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น 16.892 กรัม
 -ไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย 14.97 กรัม

ดังนั้นจะได้เป็น

ค่าการแปลงผันทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์ (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น}-\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์สุดท้าย}}{\text{กรัมไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น}} \times 100 \\
 &= \frac{16.892-14.97}{16.892} \times 100 \\
 &= 11.36\%
 \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
ผลงานทางวิชาการ

The 3rd International Thai Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference

"Step into a New Era of Alternative Energy Management and Sustainable Environment"

By
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering, Khon Kaen University
and
Thai Institute of Chemical Engineering
and Applied Chemistry, TICHE

TICHE 2013

October 17-18, 2013
Pullman Khon Kaen Raja Orchid Hotel, KHON KAEN, Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Non-catalytic Hydrolysis of Triglyceride using emulsifier and co-solvent at moderate condition

Patt Sribenjaluk¹ and Tanawan Pinnarat^{**}

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520
 E-mail: p.sribenjaluk@hotmail.com

²Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520
 E-mail: kptanawa@kmitl.ac.th

^{**}Corresponding author

Abstract— This study shows the possibility of hydrolysis of triglyceride using proper emulsifier, span 60 to reduce diffusion limit between reactants, which are triglyceride and water, to help accelerate the reaction at mild reaction condition of 120°C. The palm fatty acid distillate (PFAD) was added into the reaction for self-catalyzed. This is an alternative process that is simple and utilizes low energy consumption which might lead to low production and operation cost of the fatty acids production.

Keywords: Hydrolysis, Triglyceride, Free fatty acids, Emulsifier, Co-solvent

I. INTRODUCTION

Hydrolysis of triglyceride is an important reaction to produce fatty acid and glycerol, which are the main raw materials in many production lines [1,2]. The process usually uses acid to accelerate the reaction to produce more products [3]. However, this acid catalyst has to be separated at the end of the process producing salt waste at the end of the neutralization unit. Moreover, the process using acid catalyst faced with the corrosion problem. An alternative process without aid of catalyst is reaction at supercritical condition [4], which has a drawback of high energy consumption. Therefore, we aimed to study the possibility of hydrolysis without use of catalyst at mild condition by utilizing the emulsifier and co-solvent to facilitate with the solubility of two raw material, triglyceride and water. The emulsifier used in this study is Sorbitan monostearate (Span 60) and co-solvent is hexane. Span 60 used for emulsion between polar and nonpolar substance, which helps decrease the surface tension of the liquid that lead to an increase in specific interfacial area. Hexane is believed to improve the rate of the hydrolysis reaction by reducing the viscosity of oil resulting in emulsification that increases interfacial area between reactants lead to ease of reaction [5]. These emulsifier and co-solvents main function is to create an emulsion between reactants, which will reduce the diffusion limit

resulting in faster reaction. In addition, we added the palm distillate fatty acid, which will act as an acid catalyst as the evidence that the hydrolysis of triglyceride is an auto-catalyzed reaction [6].

II. MATERIALS AND METHODS

A. Materials

We use palm oil as a source of triglyceride, palm fatty acid distillate (PFAD) obtained from local palm distillation plant as a source of free fatty acids. We used emulsifier, span 60 and co-solvent, hexane. Span 60 and hexane are from Mildsoap&Cosmetic Company and RCI Lab scan, respectively and use as is.

B. Methods

Palm oil and water was mixed in the molar ratio of 1:20. Then PFAD was mixed in the amount of 30%w/w. The reaction was done at 120 °C for 3 hours. For the preliminary results, we tested 3 batches as follows:

Batch I: Reaction without emulsifier and co-solvent and without stirring.

Batch II : Reaction without emulsifier and co-solvent with stirring rate of 200 rpm.

BatchIII: Reaction with 5%w/w span 60 in the mixture with stirring rate of 200 rpm.

Batch IIII: Reaction with 5%w/w span 60 and hexane 10%w/w in the mixture. The stirring rate in this batches is 500 rpm.

After that, the mixture of each batch was loaded to a high temperature and pressure reactor as shown in figure 1. We then heat up the reactor to 120 °C. The reaction time started when the mixture reach the designed temperature and was left for reaction to occur in 3 hours period of time. The reaction was terminated by addition of ethanol at the end of the retention time. The non-aqueous phase of the product was tested for fatty acid by titration with sodium

hydroxide 0.09M and performed three and average values have been reported.



Figure 1. Reactor for hydrolysis reaction at high temperature and pressure

III. PRELIMINARY RESULTS AND DISCUSSION

We first would like to test the ability of span 60 and hexane as emulsifier and co-solvent for hydrolysis reaction. Table I shows percent of fatty acid produced from hydrolysis of palm oil in different batches at temperature of 120°C for 3 hours

TABLE I. HYDROLYSIS OF PALM OIL USING EMULSIFIER AND CO-SOLVENT AT TEMPERATURE OF 120°C FOR 3 HOURS REACTION TIME.

Batch	% of fatty acid
initial	32.14
I	35.86
II	37.81
III	38.01
III	33.00

All the results in table I shows low yield in all cases. This low yield might cause by the kinetics limit at low temperature. The reaction might progress more if the higher temperature is used. However this preliminary results show that without any addition of catalyst and without mechanical stir or any chemical emulsifier and co-solvent, the reaction proceed very slowly resulted in only 3 % increased in yield of fatty acid (initial compared to batch I in table I). In batch II, we try to eliminate diffusion limit by mechanical stirring. The result shows minute increase in yield as shown in table I. This observation suggests that stirring might help with mass transfer between phases but might not be enough to overcome the kinetics effect to produce more dramatic results. If we compare between reaction with and without and addition of emulsifier, span 60, it show that yield also slightly increase (Batch I and III in table I). In this preliminary test might suggest that diffusion limit can be reduced by using mechanical stirrer or chemical

emulsifier (similar yield was found in batch II and III). As we assume that the co-solvent, hexane, would help reduce the viscosity of oil that might facilitate faster reaction. However, we obtained lower yield of fatty acid in the case of hexane added compared to the one without hexane (Batch III and III in table I). This finding might due to the dilution of the reactant after hexane addition instead of accelerate the reaction, it retard the reaction.

This preliminary result only use one type of emulsifier, span 60, which is a water in oil surfactant, further study on emulsion type oil in water might give an interesting result. In addition, it is obvious that kinetics play an important role that the reaction need higher temperature if done without catalyst.

IV. CONCLUSIONS

This study shows the possibility of hydrolysis of triglyceride without use of catalyst at mild reaction conditions by using span 60 as emulsifier which can reduce the diffusion limit. The condition of 120 °C 3 hours tested in this work might not enough to produce high yield of fatty acid (only obtain 6% yield). However, this is an alternative process that is simple and does not required high energy consumption which might lead to low production and operation cost of the process production with further improvement on the condition.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Assoc. Prof. Prakob Kitchaiya for the use of equipment in the experiment.

REFERENCES

- [1] Karlheinz Hill, "Fats and oils as oleochemical raw materials," *Pure Appl. Chem.*, Vol. 72, pp. 1255-1264, 2000.
- [2] M. Olga Guerrero-Pérez, Juana M. Rosas, Jorge Bedía, José Rodríguez-Mirasol, Tomás Cordero, "Recent Inventions in Glycerol Transformations and Processing," *Recent Patents on Chemical Engineering*, vol. 2, pp 11-21, 2009
- [3] S.H.A. Rahman, J.P. Choudhury, A.L. Ahmad, A.H. Kamaruddin, "Optimization studies on acid hydrolysis of oil palm empty fruit bunch fiber for production of xylose," *Bioresource Technology* Volume 98, Issue 3, pp. 554-559, February 2007
- [4] Shiro Saka, Dadan Kusdiana and Eiji Minami, "Non-catalytic biodiesel fuel production with supercritical methanol technologies," *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 65, pp.420-425, May 2006
- [5] Virendra K. Rathod, Anirudha B. Pandit, "Effect of various additives on enzymatic hydrolysis of castor oil," *Biochemical Engineering Journal* 47, pp 93-99, 2009
- [6] Minami, E. and Saka, S. "Kinetics of hydrolysis and methyl esterification for biodiesel production in two-step supercritical methanol process," *Fuel*, vol. 85, pp. 2479-2483

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล บัณฑิต ศรีเบญจลักษณ์
 วัน เดือน ปีเกิด 8 มิถุนายน 2533
 ที่อยู่ 251/12 หมู่ 2 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110
 โทร.038-776126
 ประวัติการศึกษา 2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี (เกียรตินิยมอันดับ2)
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานทางวิชาการ

กุมภาพันธ์ พ.ศ.2556 เข้าร่วมการประชุมวิชาการนานาชาติ (Moving towards the New Chapter in Chemical Engineering amongst ASEAN Region) ครั้งที่ 5 ในหัวข้อ “Optimization of Algae Biodiesel Production by acid trans/esterification using ASPEN”
 ตุลาคม พ.ศ.2556 เข้าร่วมการประชุมวิชาการ The 3rd Thai Institute of Chemical in Engineering and Applied Chemistry Conference (TIChe) International Conference ในหัวข้อ “Non-catalytic Hydrolysis of Triglyceride using emulsifier and co-solvent at moderate condition”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้