

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง  
การลดครดไขมันอิสระในน้ำมันพืชด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน



ขฟ.  
ก๕๒๕ก  
๒๕๔๙

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 72157  
วัน,เดือน,ปี..... 11 ส.ย. 2550

b..... 117 b415b  
i.....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DEACIFICATION OF FREE FATTY ACID IN VEGETABLE OIL  
BY ESTERIFICATION**



**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR IN ENGINEERING (CHEMICAL ENGINEERING)  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2006**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน  
จัดทำโดย นางสาว กาญจนา กรันทก เลขประจำตัว 46010032  
นางสาว วัชรารธรรม วิชาญวัตติ เลขประจำตัว 46010686  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา)

.....กรรมการ  
(ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์บุญชัย โชติวิริยาณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ปริญญานิพนธ์เรื่อง** การลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน  
**จัดทำโดย** นางสาว กาญจนา กรันทก เลขประจำตัว 46010032  
 นางสาว วัชรารรรณ วิชานูวัตติ เลขประจำตัว 46010686  
**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา  
**ปริญญานิพนธ์** วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี  
 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาของลดกรดไขมันอิสระของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่มีความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ก่อนที่จะนำน้ำมันพืชที่ผ่านการลดกรดแล้วไปผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ในปริญญานิพนธ์นี้เปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 180 และ 200 องศาเซลเซียส อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช 10.87 : 1 และ 16.23 : 1 จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่าปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยามูลฐานที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังนี้  $-r_{FFA} = kC_{FFA}C_{GL}$  กรัมโมลกรดไขมันอิสระ/ลิตร-ชั่วโมง เมื่อค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 1.95 มิลลิลิตร/โมล-ชั่วโมง และยังพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาถูกจำกัดด้วยการถ่ายเทมวลระหว่างวัฏภาคของน้ำมันกับกลีเซอรอล ซึ่งไม่ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำให้อุณหภูมิมีผลต่ออัตราการกำจัดกรดไขมันอิสระน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

**Report Title** Deacidification of free fatty acid in vegetable oil by esterification  
**By** Miss Kanjana Karanthok ID.NO. 46010032  
Miss Watcharawan Witchayanuwat ID.NO. 46010686  
**Advisor** Assoc. Prof. Dr. Prakob Kitchaiya  
**Report for** Bachelor Degree of Engineering (Chemical Engineering)  
Department of Chemical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

### Abstract

This is the kinetics study of free fatty acid (5%) in vegetable oil by esterification. This reaction reduces free fatty acid in vegetable oil, which will be used later in a biodiesel production. Two variables that effect rate of reaction, reaction temperatures (180 and 200 °C) and molar ratios of glycerol to free fatty acid in vegetable oil (10.87:1 and 16.23:1) were studied. The experimental data was analyzed based on an assumption that the reaction is of elementary reaction :  $-r_{FFA} = kC_{FFA}C_{GL}$  gmol free fatty acid/L-h, and k was found to be 1.95 mL/mole-h. Temperature had a minor effect on these reaction rates, the rates of reaction as observed from this study were limited by a mass transfer between two phases of reactants.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี จากความช่วยเหลือของบุคคลหลายท่านและ  
ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษา  
แนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของปริญญาานิพนธ์ ผู้ศึกษารัฐศึกษาซึ่งในความอนุเคราะห์  
จากท่าน

ขอขอบพระคุณ ดร.อภิรักษ์ นัมคณิศร และ อาจารย์บุญชัย โชควิทยาวณิช  
กรรมการสอบ ตรวจสอบปริญญาานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อเสนอแนะ จนทำให้  
ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลง ได้

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความ  
ช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ตลอดจนการดำเนิน โครงการงาน

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือด้านต่างๆ โดยตลอด  
คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ศึกษาขอบแต่ผู้มีพระคุณ  
ทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้ศึกษาอภัยไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
สัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1.1 กรดไขมัน.....	3
2.1.2 น้ำมันปาล์ม.....	5
2.1.3 กลีเซอรอล.....	6
2.1.4 สารประกอบกลีเซอไรด์.....	8
2.1.5 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมัน.....	8
2.1.6 จลนพลศาสตร์เคมี.....	9
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	20
3.1 การทำปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ.....	20
3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดทั้งหมด.....	21
3.3 การวิเคราะห์ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่เหลืออยู่.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	23
4.1 ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระในปฏิกิริยาเอสเทอร์ที่เค้นที่เวลาและอุณหภูมิ การทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน.....	23
4.2 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ที่เค้น ของกรดไขมันอิสระ.....	29
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	31
เอกสารอ้างอิง.....	32
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	34
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรอล.....	36
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระในไขมัน.....	38
ภาคผนวก ง การหาปริมาณกรดไขมันอิสระในไขมัน.....	39
ภาคผนวก จ การหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	40

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างกรดไขมันที่พบในธรรมชาติ.....	3
2.2 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม.....	5
2.3 สมบัติของน้ำมันปาล์ม.....	5
2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอล.....	7
4.1 ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน.....	23
4.2 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำมันพืชหลังจากผ่านการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ.....	24
4.3 ค่าคอนเวอร์ชันของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ.....	29
4.4 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ.....	30
ง.1 น้ำหนักตัวอย่างน้ำมัน ปริมาตรของแอลกอฮอล์ และความเข้มข้นของด่างต้องใช้กับปริมาณกรดไขมันอิสระในช่วงต่างๆ.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สูตร โครงสร้างของกลีเซอรอล.....	6
2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.....	14
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิ 180 °C ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันพืช เท่ากับ 10.87 : 1.....	25
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิ 200 °C ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันพืช เท่ากับ 10.87 : 1.....	25
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิ 180 °C ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันพืช เท่ากับ 16.23 : 1.....	26
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิ 200 °C ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันพืช เท่ากับ 16.23 : 1.....	26
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันพืช เท่ากับ 10.87 : 1 ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ.....	27
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันพืช เท่ากับ 16.23 : 1 ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ.....	27
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิ 180 °C และ 200 °C ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันพืช เท่ากับ 10.87 : 1 และ 16.23 : 1.....	28
ก.1 เครื่องปั่นกวนชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน.....	34
ก.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.....	34
ก.3 เครื่องควบคุม.....	35
ก.4 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

จ.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับ  $\frac{1}{(\Theta_{GL} - 1)C_{FFA0}} \ln \left[ \frac{(\Theta_{GL} - x)}{\Theta_{GL}(1-x)} \right]$

ที่อุณหภูมิ 180 °C ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันพืช เท่ากับ 10.87 : 1...40

จ.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับ  $\frac{1}{(\Theta_{GL} - 1)C_{FFA0}} \ln \left[ \frac{(\Theta_{GL} - x)}{\Theta_{GL}(1-x)} \right]$

ที่อุณหภูมิ 200 °C ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันพืช เท่ากับ 10.87 : 1...41

จ.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับ  $\frac{1}{(\Theta_{GL} - 1)C_{FFA0}} \ln \left[ \frac{(\Theta_{GL} - x)}{\Theta_{GL}(1-x)} \right]$

ที่อุณหภูมิ 180 °C ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันพืช เท่ากับ 16.23 : 1.....41

จ.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับ  $\frac{1}{(\Theta_{GL} - 1)C_{FFA0}} \ln \left[ \frac{(\Theta_{GL} - x)}{\Theta_{GL}(1-x)} \right]$

ที่อุณหภูมิ 200 °C ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อน้ำมันพืช เท่ากับ 16.23 : 1...42

## สัญลักษณ์

$A$	ตัวคูณข้างหน้าเอกโพแนนเชียล
$C_A$	ความเข้มข้นของสาร $A$ , โมล/ลิตร
$C_B$	ความเข้มข้นของสาร $B$ , โมล/ลิตร
$C_{FFA}^I$	ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระ, โมล/ลิตร
$C_{GL}$	ความเข้มข้นของกลีเซอรอล, โมล/ลิตร
$E_a$	พลังงานกระตุ้น, จูล/โมล
$F_{A0}$	อัตราการไหลเชิงโมลของสาร $A$ ที่เวลาเริ่มต้น, โมล/นาที่
$F_A$	อัตราการไหลเชิงโมลของสาร $A$ ที่เวลาใดๆ, โมล/นาที่
$G_A$	อัตราการเกิดของสาร $A$ ที่เวลาใดๆ, โมล/นาที่
$k_A$	ค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาอันดับสอง, ลิตร/โมล-ชั่วโมง
$n$	อันดับรวมของปฏิกิริยา
$N_{A0}$	จำนวน โมลของสาร $A$ ภายในระบบที่เวลาเริ่มต้น, โมล
$N_A$	จำนวน โมลของสาร $A$ ภายในระบบที่เวลาใดๆ, โมล
$r_A$	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร $A$ , โมล/ลิตร-นาที่
$r_{FFA}$	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกรดไขมันอิสระ, โมล/ลิตร-ชั่วโมง
$R$	ค่าคงที่ของก๊าซ, 8.314 จูล/โมล-เคลวิน
$t$	เวลา, นาที่
$T$	อุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน
$V$	ปริมาตร, ลิตร
$X_A$	ค่าการเปลี่ยนของสาร $A$
$\alpha$	อันดับปฏิกิริยาเทียบกับความเข้มข้นของสาร $A$
$\beta$	อันดับปฏิกิริยาเทียบกับความเข้มข้นของสาร $B$
$\Theta_B$	อัตราส่วนโดยโมลของสาร $B$ เทียบกับสาร $A$ ที่เวลาเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีความต้องการใช้พลังงานเชื้อเพลิงปริมาณมากและมีแนวโน้มจะปรับตัวสูงขึ้นในอนาคต เนื่องจากประชากรในโลกมีอัตราการเจริญเติบโตที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ปริมาณน้ำมันสำรองมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องจัดหาแหล่งพลังงานทดแทนใหม่เพื่อทดแทนพลังงานจากปิโตรเลียมที่กำลังจะหมดไป [1] น้ำมันดีเซลชีวภาพจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสม เนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม แต่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า เพราะไม่มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ และลดปริมาณเขม่า คาร์บอนได้เป็นอย่างดี

แต่เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่สามารถนำน้ำมันดีเซลชีวภาพมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้ทั้งหมด เพราะน้ำมันดีเซลชีวภาพมีต้นทุนในการผลิตสูง ซึ่งน้ำมันพืชบริสุทธิ์ที่เป็นสารตั้งต้นในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพมีราคาสูง จึงมีการศึกษาการนำน้ำมันพืชที่มีราคาต่ำเช่น น้ำมันพืชใช้แล้ว มาใช้แทนน้ำมันพืชบริสุทธิ์เพื่อลดต้นทุนในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพลง แต่อย่างไรก็ตามน้ำมันพืชใช้แล้วอาจมีกรดไขมันอิสระอยู่สูง ก่อนจะนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาผลิตเป็นน้ำมันดีเซลชีวภาพควรจะต้องผ่านการกำจัดกรดไขมันอิสระที่มีอยู่เสียก่อน [2] เพราะหากมีกรดไขมันอิสระอยู่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสบู่ไปขัดขวางการแยกชั้นของน้ำมันดีเซลชีวภาพกับกลีเซอรอลในกระบวนการผลิตได้ [3] ซึ่งกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้วสามารถกำจัดได้ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนจำนวน โมลระหว่าง กลีเซอรอลกับกรดไขมันอิสระน้ำมันพืช

ปริญญานิพนธ์นี้จึงเป็นการศึกษาการนำกลีเซอรอลที่ได้จากการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ มาใช้ในการกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เพื่อนำน้ำมันพืชไปผลิตเป็นน้ำมันดีเซลชีวภาพต่อไป และยังทำการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับกลีเซอรอลที่อุณหภูมิและอัตราส่วนจำนวน โมลระหว่างกลีเซอรอลกับกรดไขมันอิสระน้ำมันพืชต่างๆ กัน

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรคือ อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่มีความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับกลีเซอรอล

1.2.2 ทำการทดลองและวิเคราะห์หาข้อมูลพื้นฐานทางจลนพลศาสตร์ในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับกลีเซอรอล

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ทำการทดลองหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับกลีเซอรอล โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาคือ 180 และ 200 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่มีกรดไขมันอิสระ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คือ 10.87 : 1 และ 16.23 : 1

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ออกแบบการทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้

1.4.3 ประกอบและติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

1.4.4 ทำการทดลองเพื่อวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับกลีเซอรอล

1.4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองและหาค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับกลีเซอรอล

1.4.6 สรุปผลการทดลอง

1.4.7 จัดทำรายงานปริณญาณิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบข้อมูลพื้นฐานทางจลนพลศาสตร์ในสมการการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับกลีเซอรอล

1.5.2 ทราบถึงปัจจัยที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับกลีเซอรอล

1.5.3 ทราบข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็น เพื่อนำไปพัฒนากระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1.1 กรดไขมัน (Fatty acid) [4,5]

กรดไขมันเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนอะตอมเกาะกันเป็นเส้นตรงไม่ค่อม พบกรดไขมันเป็นอิสระ ส่วนใหญ่พบเป็นส่วนประกอบของไขมันหลายชนิดเช่น ไตรกลีเซอไรด์ ฟอสโฟกลีเซอไรด์ ในธรรมชาติมักพบกรดไขมันมีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นจำนวนคู่ ระหว่าง 4-24 อะตอม ที่พบมากมีจำนวนคาร์บอน 16 และ 18 อะตอมมีสูตรทั่วไปคือ  $\text{RCOOH}$  มี 2 ประเภท ดังนี้

#### ก. กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid)

กรดไขมันที่โมเลกุลมีความอิ่มตัว มีหมู่คาร์บอกซิลิก ( $-\text{COOH}$ ) 1 หมู่ ต่ออยู่กับไฮโดรคาร์บอนที่เป็นสายยาว ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีแต่พันธะเดี่ยวอย่างเดียว เช่น กรดพาล์มิติก มีคาร์บอน 16 ตัวเป็นกรดไขมันอิ่มตัวมากที่มีมากในธรรมชาติและพบในร่างกาย

#### ข. กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid)

กรดไขมันที่มีทั้งพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ มีหมู่คาร์บอกซิลิก ( $-\text{COOH}$ ) 1 หมู่ ต่ออยู่กับไฮโดรคาร์บอนที่มีพันธะคู่รวมอยู่ด้วย อาจมีตั้งแต่ 1 พันธะคู่ เรียกกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว และ 2 พันธะคู่ขึ้นไป เรียกกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน ทั้งนี้พันธะคู่ในกรดไขมันต้องอยู่ห่างกัน 3 คาร์บอน ดังนี้  $-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-$  เสมอ

ตัวอย่างกรดไขมันที่พบในธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างกรดไขมันที่พบในธรรมชาติ [4]

ชื่อสามัญ	ชื่อตามระบบ	รหัสและจำนวนพันธะคู่ (ถ้ามี)	สูตร	แหล่งที่พบ
<b>กรดไขมันอิ่มตัว</b>				
Capric	n-Decanoic	10:0	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_2$	เนยเหลว น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันปาล์ม
Lauric	n-Dodecanoic	12:0	$\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_2$	น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างกรดไขมันที่พบในธรรมชาติ (ต่อ)[4]

ชื่อสามัญ	ชื่อตามระบบ	รหัสและจำนวนพันธะคู่ (ถ้ามี)	สูตร	แหล่งที่พบ
<b>กรดไขมันอิ่มตัว</b>				
Myristic	n-Tetradecanoic	14:0	$C_{14}H_{28}O_2$	น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันหมู
Palmitic	n-Hexadecanoic	16:0	$C_{16}H_{32}O_2$	ไขพืชและสัตว์
Stearic	n-Octadecanoic	18:0	$C_{18}H_{36}O_2$	ไขพืชและสัตว์
Arachidic	n-Eicosanoic	20:0	$C_{20}H_{40}O_2$	น้ำมันถั่วลิสง
Linoceric	n-Tetracosanoic	24:0	$C_{24}H_{48}O_2$	น้ำมันถั่วลิสง
<b>กรดไขมันไม่อิ่มตัว</b>				
Palmitoleic	Hexadecenoic	16:1	$C_{16}H_{30}O_2$	น้ำมันปาล์ม
Oleic	Octadecenoic	18:1	$C_{18}H_{32}O_2$	ไขมัน น้ำมันส่วนใหญ่
Linoleic	Octadecadienoic	18:2	$C_{18}H_{30}O_2$	น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันดอกทานตะวัน
Linolenic	Octadecatrienoic	18:3	$C_{18}H_{28}O_2$	น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันช็อกแห่งอื่นๆ
Arachidonic	Eicosatetraenoic	20:4	$C_{20}H_{26}O_2$	เนื้อเยื่อของสัตว์ น้ำมันข้าวโพด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 น้ำมันปาล์ม (Palm oil) [6]

ในประเทศไทยมีการเพาะปลูกพืชน้ำมันหลายชนิดเพื่อใช้ในการบริโภค เช่น ถั่วเหลือง ปาล์มน้ำมัน ถั่วลิสง มะพร้าว ละหุ่ง งาม เป็นต้น แต่ละชนิดนั้นมีศักยภาพในการนำมาผลิตไบโอดีเซลในระดับอุตสาหกรรมที่แตกต่างกัน โดยต้องคำนึงถึงกำลังการผลิตที่ต้องมีพอเพียงและสม่ำเสมอ รวมถึงต้องมีราคาถูก เนื่องจากต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับราคาน้ำมันวัตถุดิบ ในบรรดาพืชน้ำมันทั้งหมด ปาล์มน้ำมันมีปริมาณผลผลิตสูงและราคาถูก จึงเหมาะสมในการนำมาผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปาล์มน้ำมันนั้นจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติต่างๆ เพื่อให้สามารถผลิตไบโอดีเซลได้ในปริมาณที่สูง

น้ำมันปาล์มประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว โดยมีกรดปาล์มมิติกและกรดโอเลอิกเป็นองค์ประกอบหลัก และมีกรดลิโนเลอิก กรดสเตียริกในปริมาณเพียงเล็กน้อยดังตารางที่ 2.2 และมีสมบัติของน้ำมันปาล์มดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม [6]

ชนิดของกรดไขมัน	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
Myristic	0.5-5.9
Palmitic	32-51
Stearic	2.8
Oleic	38-52
Linoleic	5-11

ตารางที่ 2.3 สมบัติของน้ำมันปาล์ม [6]

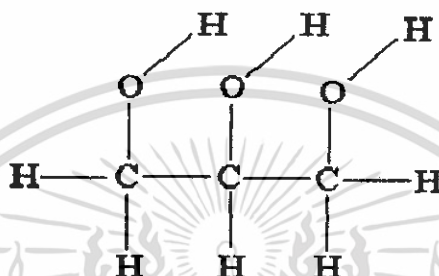
Characteristic	Weiss	Maiti et al.
Specific gravity	0.882-0.887a	0.921-0.925b
Refractive index	1.4508a	1.453-1.458b
Melting point (°C)	25-30	27-50
Titer (°C)	40-45	-
Unsaponifiable matter (%)	0.2-0.6	0.2-0.8
Iodine value	53	44-58
Saponification value	198	195-205

หมายเหตุ : a ที่ 60 องศาเซลเซียส และ b ที่ 40 องศาเซลเซียส

### 2.1.3 กลีเซอรอล (Glycerol) [7,8]

#### ก. ความหมายของกลีเซอรอล

กลีเซอริน (Glycerine หรือ Glycerin) เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กลีเซอรอล (Glycerol) หมายถึง สารจำพวกโพลีไฮดรอลิกแอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohol) ที่มีสูตรทางเคมี  $C_3H_8O_3$  มีชื่อทางเคมีว่า 1,2,3-โพรเพนไตรออล (1,2,3-Propanetriol) เป็นแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลสามหมู่ มีสูตรโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของกลีเซอรอล [7, 8]

กลีเซอรอลถูกค้นพบครั้งแรกในปีค.ศ. 1779 โดย Scheele ซึ่งได้จากปฏิกิริยาการเกิดสบู่ (Saponification) ระหว่างน้ำมันมะกอก (Olive oil) กับ Lead oxide ต่อมาในปีค.ศ. 1813 Chevreul ได้พบว่ากลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบในไขมัน (Fats) โดยอยู่ในรูปของ กลีเซอรอลเอสเทอร์ (Glycerol ester) ของกรดไขมันจึงได้ตั้งชื่อว่า “กลีเซอรอล” ซึ่งมาจากคำในภาษากรีกที่มีความหมายว่า มีรสหวาน

กลีเซอรอลถูกใช้ในทางอุตสาหกรรมเป็นครั้งแรกในปีค.ศ. 1866 เมื่อ Alfred Noble ได้ทำการผลิตไดนาไมต์ หรือ ไนโตรกลีเซอรอล (Nitroglycerine) ในระยะแรกกลีเซอรอลผลิตจากพืชและสัตว์ สำหรับอุตสาหกรรมการสังเคราะห์กลีเซอรอลที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ การผลิตโดยใช้โพรเพนเป็นสารตั้งต้น ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในช่วงปลายทศวรรษที่ 1930 โดย I.G. Farben ในประเทศเยอรมันและโดยบริษัทเชลล์ในประเทศสหรัฐอเมริกา

#### ข. คุณสมบัติของกลีเซอรอล

##### - คุณสมบัติทางกายภาพ

เป็นของเหลวใส หนืด มีรสหวาน กลีเซอรอลมีจุดเดือด 290 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ กลีเซอรอลสามารถละลายน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดี ละลายได้เล็กน้อยในไดเอทิลอีเทอร์ เอทิลอีเทอร์ และไดออกเซน (Dioxane) กลีเซอรอลไม่ละลายในไฮโดรคาร์บอน แอลกอฮอล์ที่มีโซ่ยาว น้ำมันจากพืชและสัตว์ ตัวทำละลายอินทรีย์ประเภทเฮโลเจน เช่น คลอโรฟอร์ม ดังนั้น

กลีเซอรอลจึงเป็นตัวทำละลายที่มีประโยชน์ต่อสารหลายชนิด แสดงค่าคุณสมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอลดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอล [7]

Property	Value
mp, °C	18.17
bp, °C	
at 101.3 kPa <sup>a</sup>	290
sp gr, 25/25°C	
in vacuum	1.2617
100% glycerol in air	1.2620
n <sup>20</sup>	1.47399
vapor pressure, Pa <sup>b</sup>	
at 50°C	0.33
at 100°C	26
viscosity at 20°C, mPa.s(=cP)	1499
heat of vaporization, J/mol <sup>c</sup>	
at 55°C	88.12
at 195°C	76.02
heat of solution to infinite dilution, kJ/mol <sup>c</sup>	5.778
heat of formation, kJ/mol <sup>c</sup>	667.8
thermal conductivity, W/(m.K)	0.28
Fire point, °C	204

#### - คุณสมบัติทางเคมี

กลีเซอรอลเกิดปฏิกิริยาได้เหมือนแอลกอฮอล์ทั่วไป โดยที่หมู่ไฮดรอกซีด้านนอกมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหมู่ไฮดรอกซีตรงกลางภายใต้สภาวะเป็นกลางหรือด่าง กลีเซอรอลสามารถทนความร้อนได้ถึง 275 องศาเซลเซียส โดยไม่เกิดอะโครลีน (Acrolein) ในทางกลับกันในสภาวะกรดจะเกิดอะโครลีนที่ 160 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อะโครลีนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นปฏิกิริยาของกลีเซอรอลจึงควรทำในสภาวะที่เป็นกลางหรือด่างที่อุณหภูมิห้องกลีเซอรอลจะดูดซับน้ำอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ กลีเซอรอลยังถูก

ออกซิไดส์ได้ง่าย โดยที่คาร์บอนอะตอมนอกจะถูกออกซิไดส์เกิดเป็นหมู่คาร์บอกซิล ส่วนคาร์บอนอะตอมกลางจะเกิดเป็นหมู่คาร์บอนิล

#### 2.1.4 สารประกอบกลีเซอไรด์ [9]

ลิพิดที่มีกรดไขมันจับกับกลีเซอรอลด้วยพันธะเอสเทอร์อาจเรียก เอสลิกลีเซอรอล ส่วนกรดไขมันเรียกว่า หมู่เอซิล แบ่งได้ตามจำนวนกรดไขมันที่มีอยู่ใน โมเลกุล ดังนี้

##### ก. โมโนกลีเซอไรด์

มีหมู่เอซิล 1 หมู่ที่จับกับกลีเซอรอลทั้งนี้กรดไขมันอาจจะเกิดพันธะเอสเทอร์กับหมู่แอลกอฮอล์ของกลีเซอรอลได้ที่คาร์บอนตำแหน่ง 1 หรือ 2 อย่างใดอย่างหนึ่งจะได้ 1-โมโนกลีเซอไรด์ หรือ 2-โมโนกลีเซอไรด์

##### ข. ไดกลีเซอไรด์

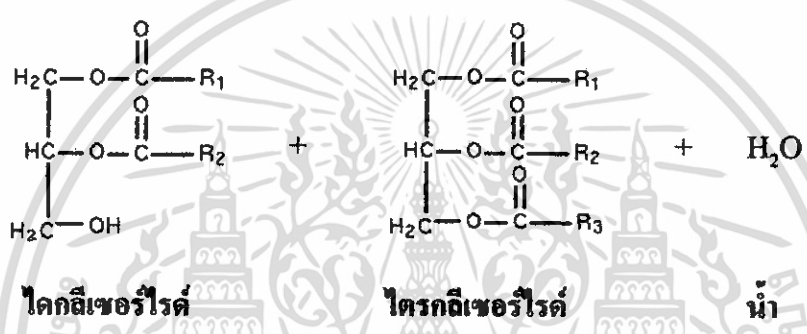
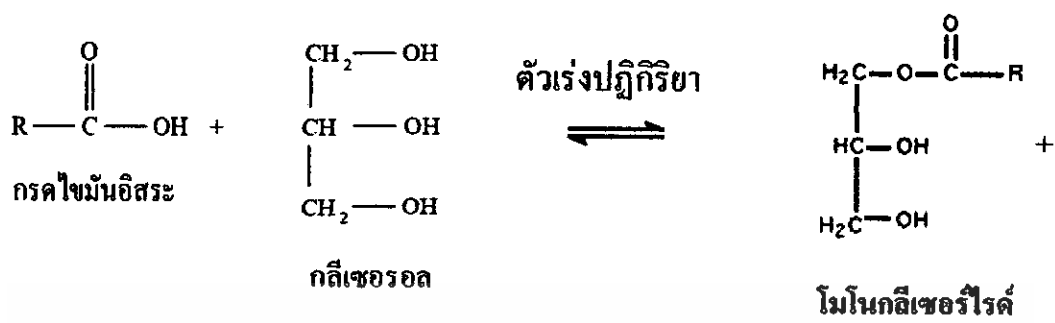
เป็นสารประกอบกลีเซอไรด์ที่มีหมู่เอซิล 2 หมู่จับกับกลีเซอรอลโดยพันธะเอสเทอร์ที่คาร์บอนตำแหน่ง 1 และ 2 หรือตำแหน่ง 1 และ 3 ของกลีเซอรอล

##### ค. ไตรกลีเซอไรด์

เป็นสารประกอบกลีเซอไรด์ที่มีมากที่สุดในธรรมชาติ เป็นเอสเทอร์ของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน 3 ตัว โดยธรรมชาติพบว่ากรดไขมันทั้ง 3 ตัวอาจเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน สารประกอบ ไตรกลีเซอไรด์บางที่เรียกไขมันกลาง หรือ ไขมันแท้ อาจเป็นของแข็งเรียกไขมันหรือเป็นของเหลวเรียกน้ำมัน

#### 2.1.5 ปฏิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ [10]

ปฏิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ ซึ่งจัดเป็นกรดคาร์บอกซิลิกชนิดหนึ่ง เป็นปฏิริยาเคมีระหว่างกรดไขมันอิสระกับกลีเซอรอล ได้ผลิตภัณฑ์เป็น โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์และน้ำ ปฏิริยาจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและตัวเร่งปฏิริยา ดังสมการเคมีต่อไปนี้



2.1.6 จลนพลศาสตร์เคมี (Chemical kinetics) [11]

จลนพลศาสตร์เคมีเป็นสาขาหนึ่งของวิชาเคมีที่ว่าด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาและกลไกของการเกิดปฏิกิริยาเคมี อัตราการเกิดปฏิกิริยาบอกให้ทราบว่าสารตั้งต้นของปฏิกิริยาถูกใช้ไปและมีสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยานั้นเกิดขึ้นแล้วมากน้อยเพียงใด การวัดอัตราเร็วของปฏิกิริยานั้นโดยมากวัดเป็นความเข้มข้นของสารใดสารหนึ่งที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งถ้าสารตั้งต้นหรือสารผลิตภัณฑ์ที่ทำปฏิกิริยากันเป็นแก๊สอาจวัดเป็นความดันย่อยของสารที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยเวลาได้ จลนพลศาสตร์เคมีอธิบายให้ทราบถึงอิทธิพลปัจจัยต่างๆ ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาซึ่งได้แก่ สมบัติของสารตั้งต้น ความเข้มข้นของสารตั้งต้น อุณหภูมิของระบบ ความดันของระบบ ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี และจำนวนวัฏภาคของระบบ เป็นต้น

ปฏิกิริยาเคมีสามารถจำแนกตามลักษณะต่างๆ ได้ดังนี้

1. จำนวนวัฏภาคที่เกี่ยวข้องในการทำปฏิกิริยา
  - 1.1 ปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous reaction) เกิดขึ้นภายในระบบที่มีเพียงหนึ่งวัฏภาค
  - 1.2 ปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous reaction) เกิดขึ้นภายในระบบที่มีหลายวัฏภาค โดยปฏิกิริยาที่เกิดจะดำเนิน ณ รอยต่อของวัฏภาค หรือบริเวณใกล้เคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การดำเนินไปของปฏิกิริยา

2.1 ปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ (Irreversible reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในทิศทางเดียว และดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งหมดไปจากระบบ

2.2 ปฏิกิริยาผันกลับได้ (Reversible reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งในทิศทางไปข้างหน้าและทิศทางย้อนกลับ โดยทิศทางของการดำเนินของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ภายในระบบและค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา

### ก. กฎอัตรา (Rate law)



ในการพิจารณาปฏิกิริยาเคมี เราจะเลือกสารตั้งต้นที่เป็นตัวกำหนดปฏิกิริยา (Limiting reactant) มาเป็นบรรทัดฐานในการคำนวณและพิจารณาสารอื่นที่เหลือโดยสร้างความสัมพันธ์เทียบกับสารดังกล่าว เพื่อความสะดวกเราจะเลือกสาร A เป็นบรรทัดฐานในการคำนวณและกำหนดให้อัตราการหายไปของสาร A (Rate of disappearance of A) เนื่องจากการทำปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ  $-r_A$

อัตราการหายไปของสาร A ( $-r_A$ ) มีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสัดส่วนองค์ประกอบของสารภายในระบบ โดยทั่วไปจะเขียนได้ในรูปของผลคูณของค่าคงที่อัตรา (Reaction rate constant,  $k$ ) กับความเข้มข้น (หรือ Activity) ของสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2.1

$$-r_A = [k_A(T)] [f'(C_A, C_B, \dots)] \quad (2.1)$$

เราเรียกสมการพีชคณิตที่แสดงความสัมพันธ์ของ  $-r_A$  กับความเข้มข้นของสารประกอบว่า กฎอัตรา (Rate law) นอกจากนี้โดยทั่วไปค่าคงที่อัตราที่ปรากฏอยู่ในกฎอัตรา ก็จะต้องเป็นค่าที่คิดเทียบเท่ากับสารใดสารหนึ่งในระบบเสมอ เช่น ค่าคงที่อัตราที่คิดเทียบเท่ากับสาร A ( $k_A$ )

ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารที่เกี่ยวข้องในการทำปฏิกิริยาจะหาได้จากการทดลองเท่านั้น แม้บางครั้งเราอาจใช้ทฤษฎีมาทำนายได้แต่ยังไม่มีทฤษฎีใดที่สามารถยืนยันได้ว่าความสัมพันธ์ที่ได้ถูกต้องเสมอ ดังนั้นการทำนายโดยใช้ทฤษฎีก็จำเป็นต้องทำการทดลองเพื่อยืนยันก่อนนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้งานเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปมักเขียนความสัมพันธ์ในรูปของ กฎอัตรา (Rate law) ตามสมการที่ (2.2) ซึ่งเป็นผลคูณของค่าคงที่อัตรากับความเข้มข้นของสารต่างๆ ที่ทำปฏิกิริยากัน โดยตัวเลขยกกำลังที่กำกับกับความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดจะบ่งชี้ว่าความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดนั้นมีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างไร

$$-r_A = k_A C_A^\alpha C_B^\beta \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$n = \alpha + \beta$$

เราเรียกตัวเลขยกกำลังดังกล่าวว่า **อันดับปฏิกิริยา (Order of a reaction)**

และเมื่อปฏิกิริยาอยู่ในวัฏภาคของเหลวจะได้

$$\begin{aligned} C_A &= C_{A0} (1 - X_A) \\ C_B &= C_{A0} (\Theta_B - X_A) \end{aligned}$$

#### ข. ค่าคงที่อัตรา (Reaction rate constant)

ค่าคงที่อัตรา ( $k$ ) เป็นค่าคงที่ซึ่งไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยาเคมี แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ของ Arrhenius ดังสมการที่ 2.3

$$k_A(T) = A e^{-E_a/RT} \quad (2.3)$$

เมื่อค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) คือพลังงานขั้นต่ำซึ่งโมเลกุลของสารตั้งต้นจะต้องมี เพื่อให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อพิจารณาจากทฤษฎีทางจลนพลศาสตร์ของแก๊สจะพบว่า  $e^{-E_a/RT}$  คือสัดส่วนจำนวนครั้งการชนกันระหว่างโมเลกุลที่มีระดับพลังงานสูงกว่าหรือเท่ากับระดับพลังงานขั้นต่ำ พลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) หากพิจารณาอย่างละเอียดอาจพบว่า

1. สำหรับปฏิกิริยาในวัฏภาคแก๊ส ค่าคงที่อัตราอาจมีค่าขึ้นกับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้ และความดันรวมของระบบ
2. สำหรับปฏิกิริยาในวัฏภาคของเหลว ค่าคงที่อัตราอาจมีค่าขึ้นกับความดันรวมของระบบ และชนิดของตัวทำละลาย

การหาค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาทำได้โดยแปลงสมการที่ (2.3) ให้อยู่ใน  
 เทอม Logarithm และจัดรูปดังสมการที่ (2.4) จากนั้นทำการทดลองเพื่อหาค่าคงที่อัตรา  $k_A$  อุณหภูมิ  
 ต่างๆ และนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k_A$  กับ  $1/T$  จะได้เป็น  
 กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $-E_a/R$

$$\ln k_A = \ln A - \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยามีค่าสูง อุณหภูมิจะมีผลต่อค่าคงที่อัตรามากขึ้น  
 ตามไปด้วย กล่าวคือ สำหรับปฏิกิริยาที่มีค่าพลังงานกระตุ้นสูง ค่าคงที่อัตราอาจเพิ่มสูงขึ้นมาก  
 แม้ว่าอุณหภูมิสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยก็ตาม ในทางกลับกันหากปฏิกิริยาที่มีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำมาก  
 ค่าคงที่อัตราอาจไม่เปลี่ยนแปลงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงกว้างก็ตาม

ในกรณีที่ทราบค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาและค่าคงที่ของปฏิกิริยา ณ  
 อุณหภูมิหนึ่ง ( $T_1$ ) และต้องการหาค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาเดียวกันที่อุณหภูมิใดๆ ( $T_2$ ) สามารถทำได้  
 โดยการเขียนสมการ (2.4) สำหรับอุณหภูมิ  $T_1$  และ  $T_2$  จากนั้นนำสมการทั้งสองมาลบกันและจัดให้  
 อยู่ในรูปสมการ (2.5)

$$\text{ที่อุณหภูมิ } T_1; \quad \ln k_{A,T_1} = \ln A - \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T_1} \right) \quad (a)$$

$$\text{ที่อุณหภูมิ } T_2; \quad \ln k_{A,T_2} = \ln A - \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T_2} \right) \quad (b)$$

$$\ln \frac{k_{A,T_2}}{k_{A,T_1}} = -\frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (2.5)$$

ค. สมการดุลโมลในรูปทั่วไปและสมการสำหรับออกแบบ  
เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

การทำดุล โมลของระบบในขั้นแรกจะต้องกำหนดขอบเขตของระบบที่ต้องการศึกษาปริมาณที่อยู่ภายในขอบเขตนั้นก็จะเป็นปริมาณของระบบสำหรับการคำนวณ ในที่นี้จะทำการดุล โมลของสาร A ในปริมาณของระบบ โดยที่สาร A จะเป็นตัวแทนของสารเคมีที่สนใจศึกษาจากสมการดุล โมลของสารที่เวลาใดๆ

$$\left| \begin{array}{l} \text{อัตราการไหล} \\ \text{ของสาร A} \\ \text{เข้าสู่ระบบ} \end{array} \right| - \left| \begin{array}{l} \text{อัตราการไหล} \\ \text{ของสาร A} \\ \text{ออกจากระบบ} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{อัตราการเกิดของสาร} \\ \text{A จากปฏิกิริยาเคมี} \\ \text{ภายในระบบ} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{อัตราการสะสม} \\ \text{ของสาร A} \\ \text{ภายในระบบ} \end{array} \right| \quad (2.6)$$

จะได้สมการดุล โมลของสาร A ในปริมาณของระบบที่เวลาใดๆ คือ

$$F_{A0} - F_A + G_A = \frac{dN_A}{dt} \quad (2.7)$$

ถ้าตัวแปรต่างๆ ของระบบ ได้แก่ อุณหภูมิ การเคลื่อนที่ของตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารเคมี มีรูปแบบเหมือนกันทั่วทั้งปริมาณของระบบ จะได้อัตราการเกิดของสาร A ในปริมาณของระบบที่เวลาใดๆ

$$G_A = r_A V \quad (2.8)$$

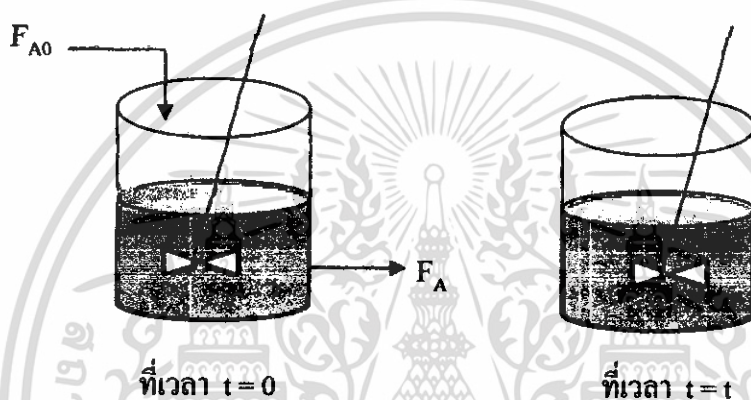
แต่ถ้าอัตราการเกิดของสาร j ที่เวลาใดๆ เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งในปริมาณของระบบนั้นจะทำให้เกิดความแตกต่างของอัตราการเกิดปฏิกิริยาในปริมาณของระบบจะได้อัตราการเกิดของสาร A ในปริมาณของระบบที่เวลาใดๆ

$$G_A = \int_V r_A dV \quad (2.9)$$

เมื่อนำอัตราการเกิดของสาร A ในปริมาตรของระบบที่เวลาใดๆ ในสมการที่ (2.9) แทนค่าในสมการที่ (2.7) จะได้สมการดุล โมลในรูปทั่วไป (General mole balance equation) ของสาร A คือ

$$F_{A0} - F_A + \int_V r_A dV = \frac{dN_A}{dt} \quad (2.10)$$

ในกระบวนการที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะจะไม่มีทั้งสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ออกไปในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

นั่นคือที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาใดๆ

$$F_{A0} = 0 \quad (2.11)$$

$$F_A = 0 \quad (2.12)$$

จะได้สมการดุล โมลรูปทั่วไปของสาร A สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

$$\int_V r_A dV = \frac{dN_A}{dt} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสารในเครื่องปฏิกรณ์ผสมกันเป็นอย่างดี อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าเท่ากันทุกจุดในเครื่องปฏิกรณ์ จะได้สมการดุลโมลของสาร A ในรูปทั่วไปสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะเป็น

$$r_A V = \frac{dN_A}{dt} \quad (2.14)$$

ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะส่วนใหญ่ การที่สารตั้งต้นจะเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ จนกว่าจะถึงสมดุลของปฏิกิริยาหรือสารตั้งต้นหมด ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น (Conversion) โดยที่จำนวนโมลของสาร A ที่ทำปฏิกิริยาไปหลังจากเวลาใดๆ เท่ากับ  $N_{A0} X_A$  เพราะฉะนั้นจำนวนโมลของสาร A ที่เหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลาใดๆ จะเป็น

$$N_A = N_{A0}(1 - X_A) \quad (2.15)$$

เมื่อนำจำนวนโมลของสาร A ที่เหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลาใดๆ ในสมการที่ (2.15) แทนในสมการที่ (2.14) จะได้สมการสำหรับออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Design equation) เป็น

$$-r_A V = N_{A0} \frac{dX_A}{dt} \quad (2.16)$$

เนื่องจากจำนวนโมลของสาร A ที่เวลาเริ่มต้นหาได้จาก

$$N_{A0} = C_{A0} V_0 \quad (2.17)$$

แทนค่า  $N_{A0}$  จากสมการ(2.17) ลงในสมการ (2.16)

$$-r_A V = C_{A0} V_0 \frac{dX_A}{dt} \quad (2.18)$$

เมื่อ ระบบมีปริมาตรคงที่ ;  $V = V_0$

จากสมการ(2.2) เมื่อเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง

$$-r_A = kC_{A0}^2(1 - X_A)(\Theta_B - X_A) \quad (2.19)$$

แทนค่า  $-r_A$  จากสมการ(2.19) ลงในสมการ (2.18)

$$\frac{dX_A}{dt} = k_A C_{A0} (1 - X_A)(\Theta_B - X_A) \quad (2.20)$$

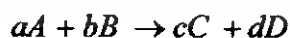
จึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยา ( $t$ ) กับค่าการเปลี่ยนแปลงของสาร A ( $X_A$ ) ได้ดังสมการ

$$k_A t = \frac{1}{(\Theta_B - 1)C_{A0}} \ln \left( \frac{\Theta_B - X_A}{\Theta_B(1 - X_A)} \right) \quad (2.21)$$

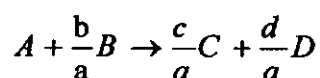
### ง. ค่าคอนเวอร์ชัน (Conversion, $X_A$ หรือ $X$ )

ในการพิจารณาค่าคอนเวอร์ชัน จะต้องเลือกสารตั้งต้นขึ้นมาหนึ่งชนิดเพื่อใช้เป็นบรรทัดฐานในการคำนวณ (Basis of calculation) และพิจารณาสารอื่นที่เหลือโดยสร้างความสัมพันธ์เทียบกับสารตั้งต้นดังกล่าว ซึ่งโดยทั่วไปควรเลือกสารตั้งต้นที่ถูกใช้หมดไปก่อนเมื่อปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินจนสิ้นสุด สารตั้งต้นที่เป็นตัวกำหนดปฏิกิริยา (Limiting reactant) เป็นบรรทัดฐานในการคำนวณ ในการพิจารณาว่าสารตั้งต้นชนิดใดเป็นสารตั้งต้นที่เป็นตัวกำหนดปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยพิจารณาสัดส่วนของสารตั้งต้นที่ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เทียบกับเลขดุลสมการ (Stoichiometric ratio)

สำหรับปฏิกิริยาเคมีทั่วไป



เมื่อเลือกสาร A เป็นบรรทัดฐานในการคำนวณ เราจะคำนวณค่าต่างๆ เทียบกับเมื่อสาร A ถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาไป 1 โมล ดังนั้นเพื่อความสะดวกเราจึงเขียนสมการเคมีใหม่ในรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคอนเวอร์ชันของสาร A ( $X_A$ ) เป็นค่าที่บอกว่าปฏิกิริยาดำเนินไปได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งนิยามได้ดังสมการ

$$X_A = \frac{\text{moles of A reacted}}{\text{moles of A fed}} \quad (2.22)$$

สำหรับปฏิกิริยาแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible reaction) ปฏิกิริยาจะหยุดลงเมื่อสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งหมดไป ดังนั้นค่าคอนเวอร์ชันสูงสุดที่จะเป็นไปได้คือ 1

สำหรับปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ (Reversible reaction) ปฏิกิริยาจะดำเนินไปจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นค่าคอนเวอร์ชันสูงสุดที่จะเป็นไปได้คือค่าคอนเวอร์ชันที่สมดุล (Equilibrium conversion,  $X_{eq}$ )

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมัน Mahua ที่มีกรดไขมันอิสระสูง [12]

งานวิจัยนี้ศึกษาการลดปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมัน Mahua ก่อนที่จะนำไปผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพต่อไป เทคนิคในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมัน Mahua ที่มีกรดไขมันอิสระสูง (คิดเป็นปริมาณกรดไขมันอิสระ 19 เปอร์เซ็นต์) ได้ถูกพัฒนามาเรื่อยๆ น้ำมัน Mahua ที่มีระดับกรดไขมันอิสระสูงนั้นจะถูกลดให้เหลือน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ โดยกระบวนการบำบัดขั้นต้นสองขั้นตอน แต่ละขั้นตอนจะทดลองโดยใช้เมทานอลเข้มข้น 0.30 - 0.35 โดยปริมาตร มีกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส หลังจากการเกิดปฏิกิริยาจะปล่อยให้เกิดการแยกชั้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งน้ำและเมทานอลจะอยู่ส่วนบนและถูกแยกออกไปได้ ในขั้นตอนที่สองจะนำผลิตภัณฑ์ที่อยู่ส่วนล่างไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับเมทานอลเข้มข้น 0.25 โดยปริมาตร และใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้นี้เปรียบได้กับน้ำมันดีเซลสอดคล้องกับมาตรฐานของอเมริกาและยุโรป

### การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันและไขมันที่มีกรดไขมันอิสระสูง [13]

งานวิจัยนี้ศึกษาการลดปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันพืชโดยการกำจัดกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่มีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อน แล้วนำไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่มีด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทดลองจะเตรียมน้ำมันจากกรดปาล์มมิติกโคโยให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ระหว่าง 20 - 40 เปอร์เซ็นต์ ศึกษาตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ ชนิดของแอลกอฮอล์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดและปริมาณกรดไขมันอิสระ ในการทดลองใช้สารตั้งต้นที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง ได้แก่ เกล็ดโลกรีช (Yellow grease) มีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ 12 เปอร์เซ็นต์ และบราวน์กริช (Brown grease) มีปริมาณกรดไขมันอิสระอยู่ 33 เปอร์เซ็นต์ พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในสารตั้งต้นนี้สามารถลดลงจนเหลือน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจึงนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่างทำให้ได้น้ำมันดีเซลชีวภาพ

### การผลิตโมโนกลีเซอไรด์โดยปฏิกิริยากลิเซอโรไลซิสของปาล์มสเตียรีนกับกลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ [14]

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลดิบที่ได้จากการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพกับปาล์มสเตียรีน โดยตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลดิบต่อปาล์มสเตียรีน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์คือ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลดิบต่อปาล์มสเตียรีนเท่ากับ 2.5 : 1 และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กลีเซอรอลบริสุทธิ์ทำปฏิกิริยา พบว่าให้ผลผลิตเป็นโมโน กลีเซอไรด์ในปริมาณใกล้เคียงกัน

### การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันเมล็ดยางที่มีกรดไขมันอิสระสูง [15]

Ramadhaz และคณะ ได้ศึกษาวิธีการผลิตน้ำมันเมล็ดยางที่มีกรดไขมันอิสระอยู่ 17 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีวิธีการทดลองอยู่ 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันเมล็ดยางออกก่อนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนขั้นตอนที่ 2 เป็นการนำน้ำมันเมล็ดยางที่กำจัดกรดไขมันอิสระแล้วมาผลิตเป็นน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันเมล็ดยางออกจะใช้เมทานอล และใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ภายใต้ความดันคงที่ 1 บรรยากาศ และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 - 30 นาที ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาคือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดยาง ปริมาณกรดซัลฟิวริก และอุณหภูมิในการทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยา ซึ่งจากการทดลองพบว่า สภาพที่ทำให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้น (Conversion efficiency) ดีที่สุดคือ อัตราส่วน โดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดยางเท่ากับ 6 : 1 ปริมาณกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา  $45 \pm 5$  องศาเซลเซียส

จะเห็นได้ว่า ในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชจะใช้กรดแก่ เช่น กรดซัลฟิวริก เร่งปฏิกิริยาและได้น้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนกับเครื่องปฏิกรณ์ได้ ปริมาณอินทรีย์นี้จึงต้องการศึกษาการลดกรดไขมันอิสระโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์สร้างเครื่องปฏิกรณ์ในการลดกรดไขมันอิสระในระดับ กิ่งอุตสาหกรรมต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 3.1 การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ
2. เครื่องปั่นกวนชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน
3. เครื่องควบแน่น
4. สายยาง
5. เทอร์โมมิเตอร์
6. ขาดังพร้อมที่จับ
7. ปีเปตพร้อมลูกยาง
8. ขวดรูปชมพู่
9. บีกเกอร์
10. กระจกคดง
11. หลอดหยด
12. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า
13. นาฬิกาจับเวลา

#### สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จากซูเปอร์สโตร
2. ไบโพลัมที่มีกรดไขมันอิสระประมาณ 85 % โดยน้ำหนัก
3. กลีเซอรอลจากกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ
4. เอทานอล 95 % (Commercial grade) ที่ทำให้มีฤทธิ์เป็นกลางแล้ว
5. กรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร
6. ก๊าซไนโตรเจน 99.5 %

#### วิธีการทดลอง

1. ตัดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ ก.4 ในภาคผนวก ก.
2. เตรียมกลีเซอรอลที่ผ่านการกำจัดเมทานอลและน้ำแล้ว ซึ่งกลีเซอรอลมีปริมาณ

โปรแทสเซียม โอลิเอตอยู่ 17.46 %

3. เตรียมน้ำมันพืชที่มีกรดไขมันอิสระ 5 % โดยน้ำหนักด้วยการผสมน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับไขมันในอัตราส่วนที่ทำให้ไขมันปาล์มมีปริมาณกรดไขมันอิสระตามต้องการ
4. ใส่กลีเซอรอลที่เตรียมได้จากข้อ 2 และน้ำมันพืชที่เตรียมได้จากข้อ 3 ในอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชเท่ากับ 10.87 : 1 และ 16.23 : 1 ตามลำดับลงในเครื่องปฏิกรณ์
5. ใส่แท่งกวนแม่เหล็กลงในเครื่องปฏิกรณ์แล้วกวนผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า ปรับความเร็วในการกวนเป็น 500 รอบต่อนาที รอจนภายในเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิเท่ากับ 180 และ 200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
6. เก็บสารละลายตัวอย่างในข้อ 5 มา 4 มิลลิลิตร แบ่งสารละลายตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน โดยแต่ละส่วนจะเจือจางในเอทานอลที่มีฤทธิ์เป็นกลางปริมาตร 25 มิลลิลิตรและเติมกรดไฮโดรคลอริกปริมาตร 25 มิลลิลิตร ส่วนแรกนำไปวิเคราะห์หาปริมาณกรดทั้งหมดในน้ำมันพืช อีกส่วนหนึ่งนำไปวิเคราะห์หาปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่เหลืออยู่ในสารละลายผสม ซึ่งจะหาปริมาณกรดไขมันอิสระได้จากผลต่างระหว่างปริมาณกรดทั้งหมดและกรดไฮโดรคลอริกที่เหลืออยู่
7. เก็บสารละลายตัวอย่าง ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ โดยเก็บมาครั้งละ 4 มิลลิลิตร แล้วนำมาวิเคราะห์เหมือนวิธีการในข้อ 6

### 3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดทั้งหมด

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. บิวเรต
2. ขวดรูปชมพู่
3. หลอดหยด
4. ขาคั่งพร้อมที่จับ
5. กรวย
6. ปีกเกอร์

#### สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้นประมาณ 0.1 โมล/ลิตร
2. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน เข้มข้น 1 กรัมในเอทานอล 100 มิลลิลิตร

#### วิธีการทดลอง

1. ใส่สารละลายตัวอย่าง จากข้อ 6 ในการทดลองที่ 3.1 ลงในขวดรูปชมพู่
2. หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีนลงในสารละลายตัวอย่างจะใสไม่มีสี

3. นำไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่จุดยุติสารละลายตัวอย่างจะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีชมพู
4. บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต
5. คำนวณปริมาณกรดทั้งหมด

### 3.3 การวิเคราะห์ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่เหลืออยู่

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. บิวเรต
2. ขวดรูปชมพู่
3. หลอดหยด
4. ขาคั่งพร้อมที่จับ
5. กรวย
6. ปีกเกอร์

#### สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้นประมาณ 0.1 โมล/ลิตร
2. สารละลายโบรโมฟีนอลบลู เข้มข้น 1 กรัมในเอทานอล 100 มิลลิลิตร

#### วิธีการทดลอง

1. ใส่น้ำสารละลายตัวอย่าง จากข้อ 6 ในการทดลองที่ 3.1 ลงในขวดรูปชมพู่
2. หยดสารละลายโบรโมฟีนอลบลูลงในสารละลายตัวอย่างจะมีสีเหลือง
3. นำไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่จุดยุติสารละลายตัวอย่างจะเปลี่ยน

จากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงิน

4. บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต
5. คำนวณปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่เหลืออยู่

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน

จากการทดลองทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ หาความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระและปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำมันพืชหลังจากผ่านการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ และความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระที่เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.1 - 4.4 ซึ่งจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชเดียวกันแล้วจะทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 - 4.6 และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิและอัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชลดลงทั้งสองอัตราส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เท่ากับ 16.23 : 1 จะทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชลดลงมากกว่าที่อัตราส่วน 10.87 : 1

#### ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระ (โมล/ลิตร)			
	อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอล ต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เท่ากับ 10.87 : 1		อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอล ต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เท่ากับ 16.23 : 1	
	อุณหภูมิ 180 °C	อุณหภูมิ 200 °C	อุณหภูมิ 180 °C	อุณหภูมิ 200 °C
0	0.256	0.260	0.276	0.280
1	0.240	0.232	0.240	0.220
2	0.220	0.196	0.212	0.196
3	0.208	0.188	0.180	0.164
4	0.200	0.172	0.172	0.160

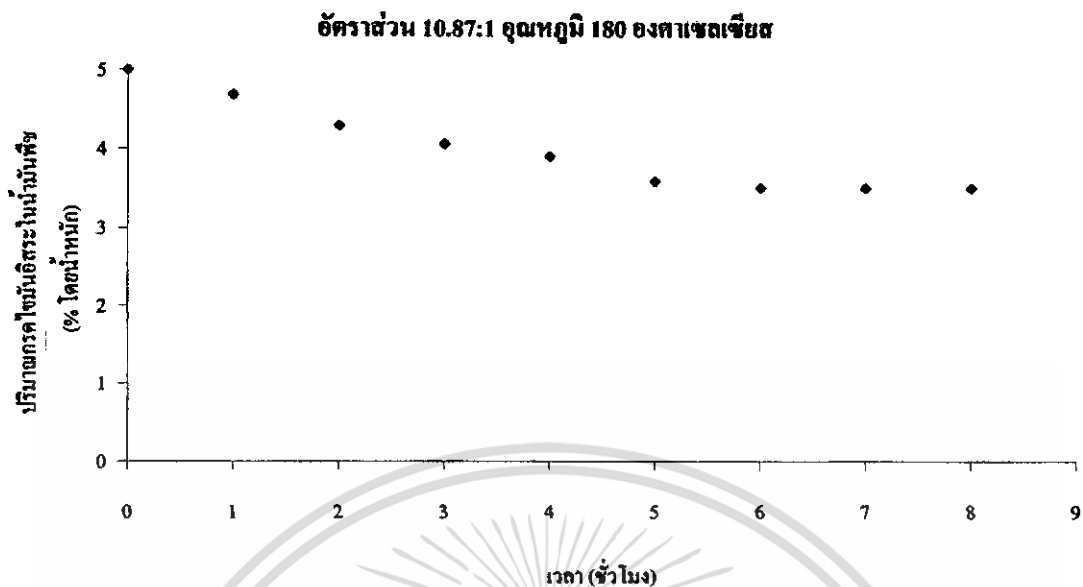
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน (ต่อ)

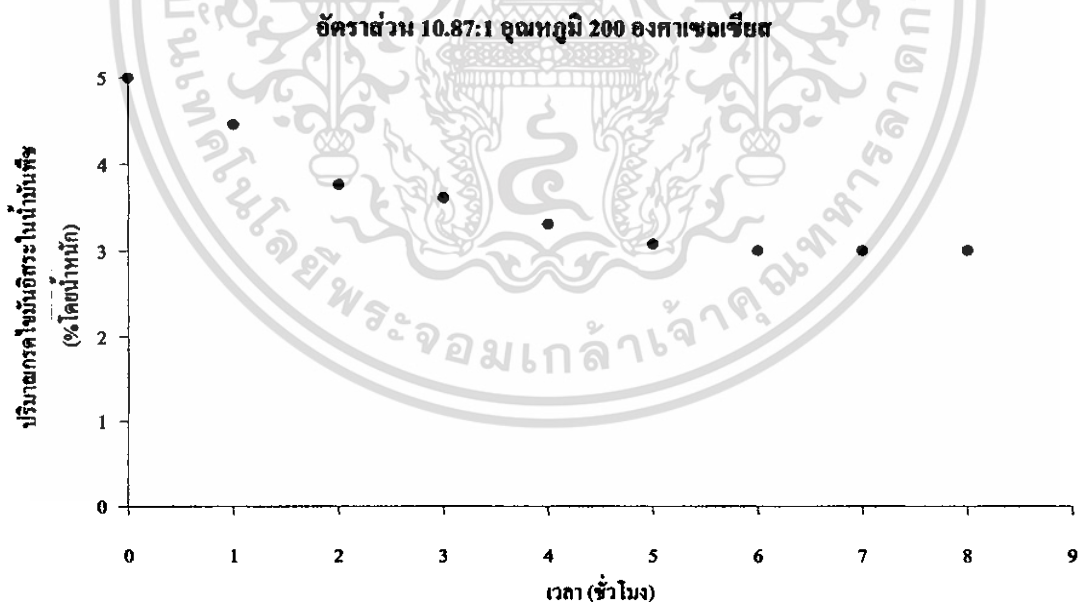
เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระ (โมล/ลิตร)			
	อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอล ต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เท่ากับ 10.87 : 1		อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอล ต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เท่ากับ 16.23 : 1	
	อุณหภูมิ 180 °C	อุณหภูมิ 200 °C	อุณหภูมิ 180 °C	อุณหภูมิ 200 °C
5	0.184	0.160	0.168	0.152
6	0.180	0.156	0.160	0.144
7	0.180	0.156	0.156	0.144
8	0.180	0.156	0.156	0.144

ตารางที่ 4.2 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำมันพืชหลังจากผ่านการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ

เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำมันพืช (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)			
	อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอล ต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เท่ากับ 10.87 : 1		อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอล ต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เท่ากับ 16.23 : 1	
	อุณหภูมิ 180 °C	อุณหภูมิ 200 °C	อุณหภูมิ 180 °C	อุณหภูมิ 200 °C
0	5.000	5.000	5.000	5.000
1	4.688	4.462	4.348	3.929
2	4.297	3.769	3.841	3.500
3	4.063	3.615	3.261	2.929
4	3.906	3.308	3.116	2.857
5	3.594	3.077	3.043	2.714
6	3.516	3.000	2.899	2.571
7	3.516	3.000	2.826	2.571
8	3.516	3.000	2.826	2.571



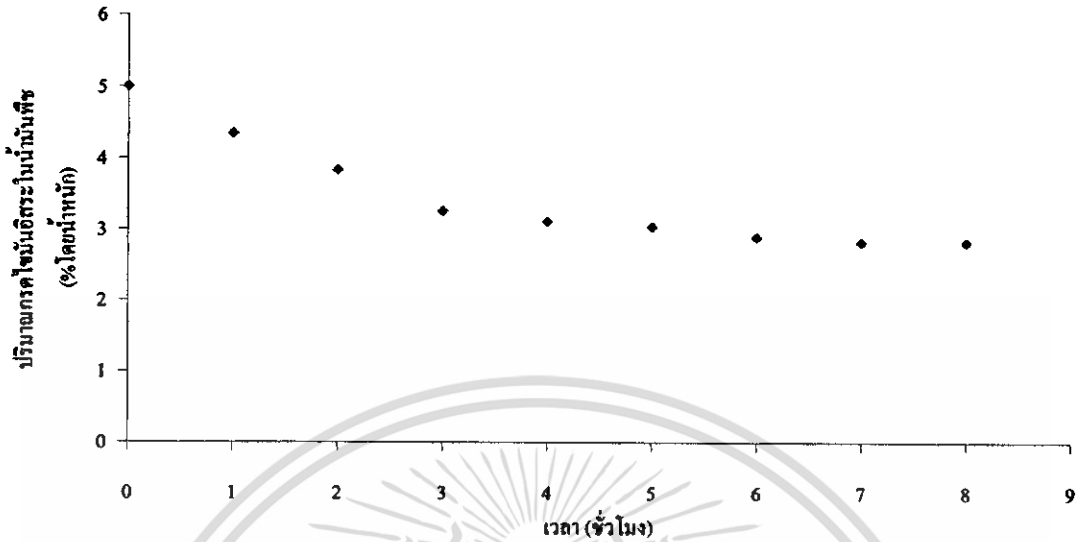
**รูปที่ 4.1** ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เท่ากับ 10.87 : 1



**รูปที่ 4.2** ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เท่ากับ 10.87 : 1

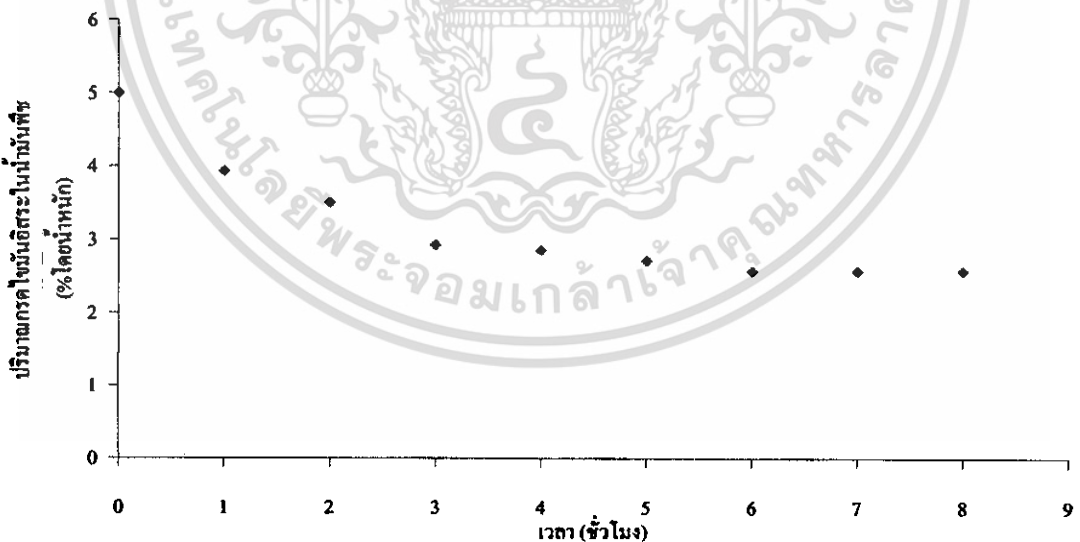
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน 16.23:1 อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส



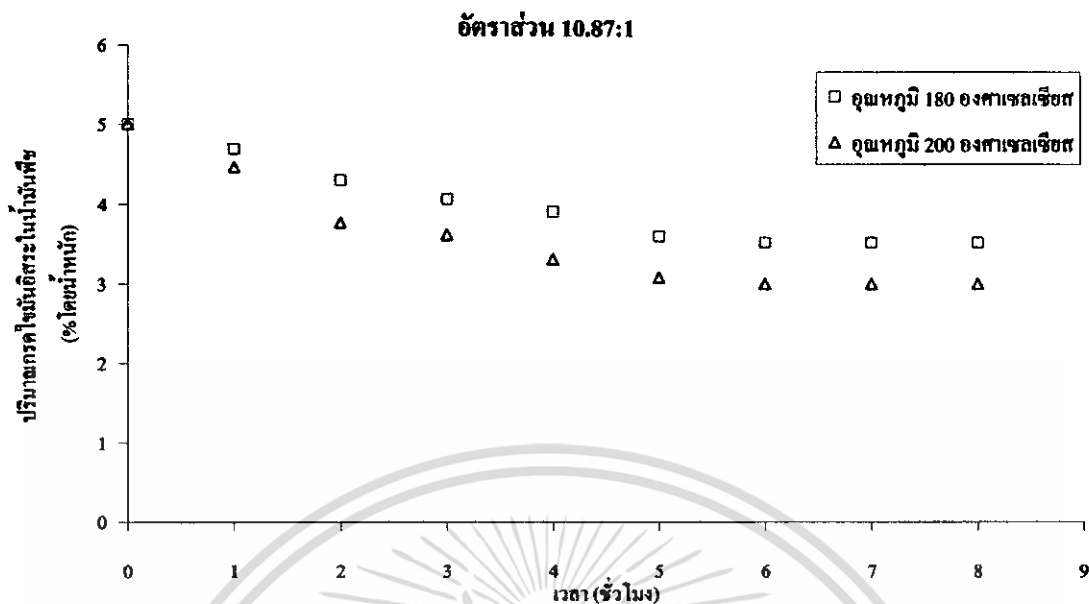
**รูปที่ 4.3** ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เท่ากับ 16.23 : 1

อัตราส่วน 16.23:1 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

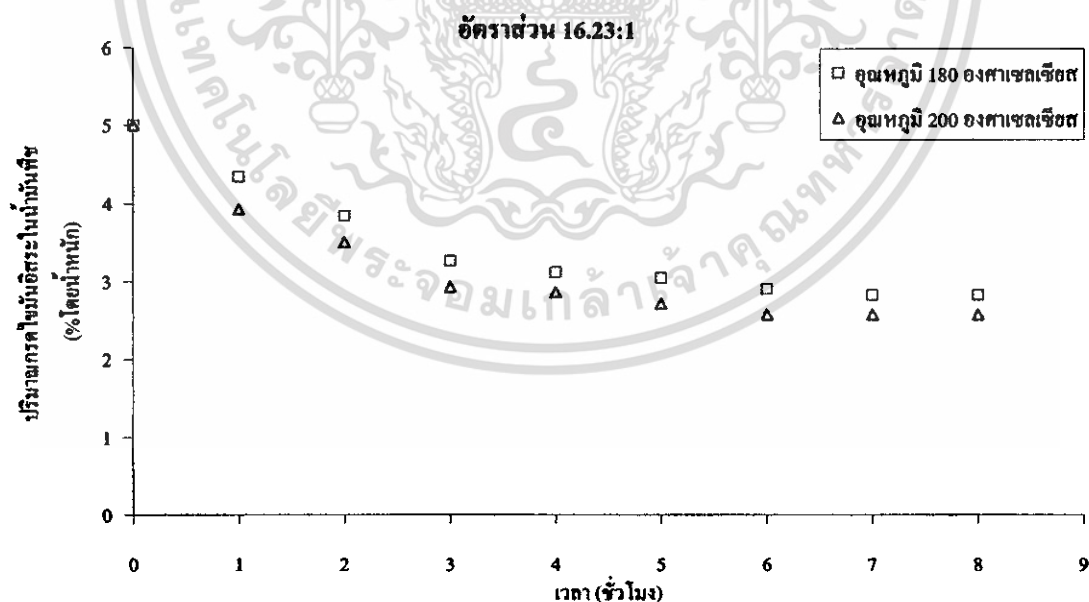


**รูปที่ 4.4** ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เท่ากับ 16.23:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

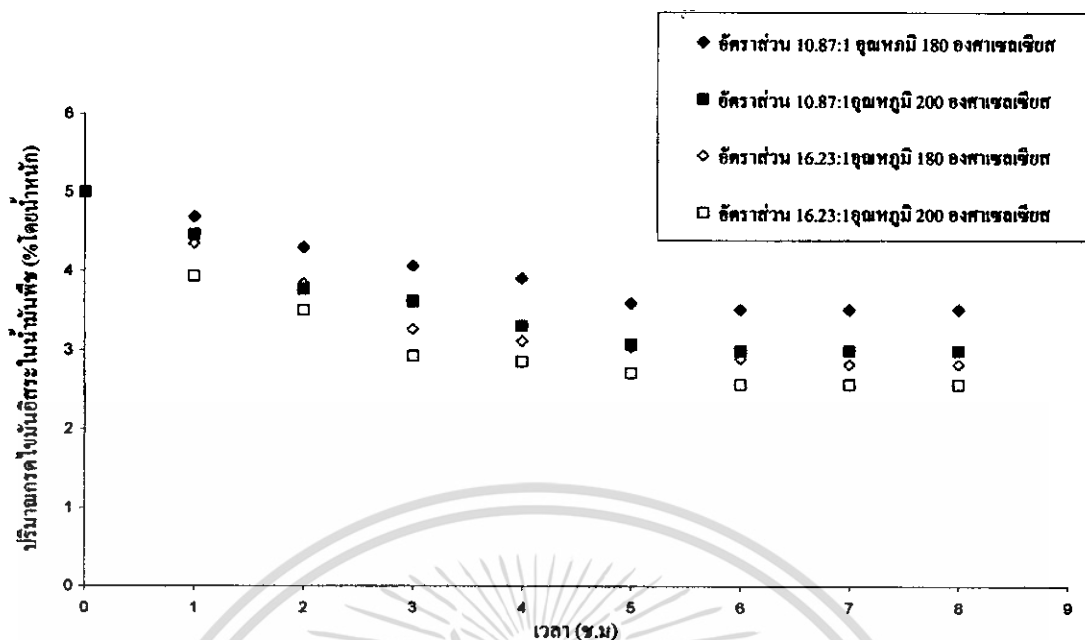


**รูปที่ 4.5** ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เท่ากับ 10.87 : 1 ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ

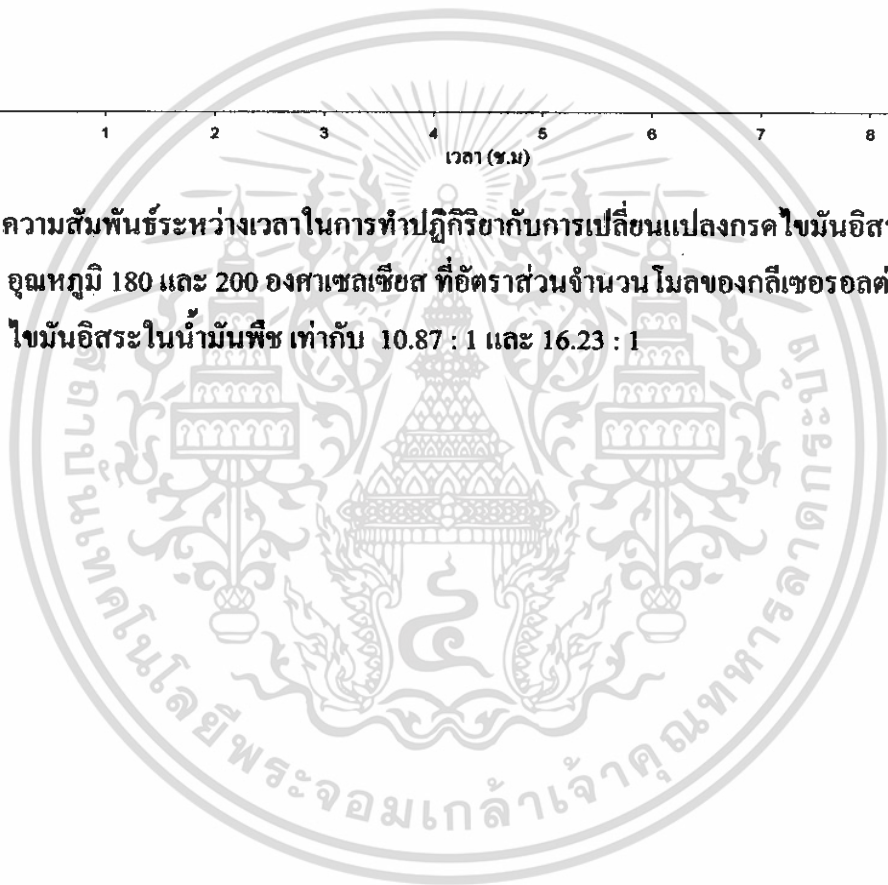


**รูปที่ 4.6** ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เท่ากับ 16.23 : 1 ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.7** ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิ 180 และ 200 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนจำนวนโมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช เท่ากับ 10.87 : 1 และ 16.23 : 1



## 4.2 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ

### 4.2.1 ค่าคอนเวอร์ชันที่เกิดขึ้นของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

ค่าคอนเวอร์ชันที่เกิดขึ้นของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.22) แสดงผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าคอนเวอร์ชันของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าคอนเวอร์ชันของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ (X)			
	อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชเท่ากับ 10.87 : 1		อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชเท่ากับ 16.23 : 1	
	อุณหภูมิ 180 °C	อุณหภูมิ 200 °C	อุณหภูมิ 180 °C	อุณหภูมิ 200 °C
1	0.062	0.108	0.130	0.214
2	0.141	0.246	0.232	0.300
3	0.188	0.277	0.348	0.414
4	0.219	0.338	0.377	0.429
5	0.281	0.385	0.391	0.457
6	0.297	0.400	0.420	0.486
7	0.297	0.400	0.435	0.486
8	0.297	0.400	0.435	0.486

จากการคำนวณค่าคอนเวอร์ชันที่ได้จากการทดลอง ที่เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช พบว่าค่าคอนเวอร์ชันจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและอัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชเพิ่มขึ้น และจากตารางที่ 4.3 ยังพบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสและอัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชเท่ากับ 16.23 : 1 จะให้ค่าคอนเวอร์ชันสูงสุดเท่ากับ 48.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากปฏิกิริยานี้

#### 4.2.2 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k)

ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระสามารถหาได้จากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่างค่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (t) กับ

$$\frac{1}{(C_{GL} - 1)C_{FFAO}} \ln \left[ \frac{(C_{GL} - x)}{C_{GL}(1 - x)} \right]$$
 ซึ่งได้มาจากสมการที่ (2.21) ที่พิจารณาอัตราส่วนจำนวนโมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน ซึ่งค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแสดงดังรูปที่ จ.1-จ.4 ในภาคผนวก จ. และเมื่อพิจารณาตารางที่ 4.4 พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันแม้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนจำนวนโมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละปฏิกิริยาจะมีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้น

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอล ต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืช	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (ลิตร/โมล*ชั่วโมง)	$k_{obs} * 10^3$
180	10.87 : 1	0.0014	1.55
	16.23 : 1	0.0017	
200	10.87 : 1	0.0024	2.35
	16.23 : 1	0.0023	

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่มีความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ทำการศึกษาด้วยการเก็บข้อมูลจากผลการทดลองแล้วหาค่าทางพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ และพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยามูลฐาน จึงได้  $-r_{FFA} = kC_{FFA}C_{GL}$  กรัมโมลกรดไขมันอิสระ/ลิตร\*ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น 20 องศาเซลเซียส ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 1.55 มิลลิลิตร/โมล\*ชั่วโมง เป็น 2.35 มิลลิลิตร/โมล\*ชั่วโมง ซึ่งคิดเป็น 51.6 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ซึ่งโดยปกติแล้วตามความสัมพันธ์ของ Arrhenius จะพบว่าค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเป็นหนึ่งเท่าตัวเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเพียง 10 องศาเซลเซียส ดังนั้นอาจเนื่องมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาถูกจำกัดด้วยการถ่ายเทมวลระหว่างวัฏภาคของน้ำมันกับกลีเซอรอล ซึ่งไม่ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำให้อุณหภูมิมิมีผลต่ออัตราการกำจัดกรดไขมันอิสระน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

สถานะที่ดีที่สุดที่ได้จากปริญญานิพนธ์นี้ในการลดปริมาณกรดไขมันอิสระคือ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชเท่ากับ 16.23 : 1 และใช้เวลาในการทดลองประมาณ 6 ชั่วโมง สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระลงได้มากที่สุด คือเหลือเพียง 2.57 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่อย่างไรก็ตามปริมาณกรดไขมันอิสระที่ลดลงจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในปริญญานิพนธ์ครั้งนี้ยังมากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยังมีผลทำให้เกิดการแยกชั้นในกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในขั้นตอนต่อไปได้ ดังนั้นในการทดลองที่ต้องศึกษาในอนาคตอาจมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นค่าลงไป ซึ่งเป็นปัจจัยที่น่าจะมีการศึกษาในอนาคต

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Selhan K. "Hydrothermal upgrading of biomass: Effect of  $K_2CO_3$  concentration and biomass/water ratio on products distribution." **Bioresource Technology**. 97(2006) : 90-98.
- [2] Qian Y.et al. "Structural analysis of bio-oils from sub-and supercritical water liquefaction of woody biomass." **Energy**. December 2005.
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ,สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. "ศักขรูปชีวมวลในประเทศไทย."
- [4] รศ.ดร.ดาววัลย์ ฉิมภู. "ชีวเคมี เล่ม 1 โมเลกุลชีวภาพ." พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพ : สำนักพิมพ์ประกายพริก.2538.
- [5] อุษณีย์ วณิชเขตกำนวม. "คู่มือเรียนชีวเคมี โดย E-learning." เชียงใหม่. : โรงพิมพ์ดาวคอมกราฟฟิค.2548.
- [6] Salunkhe D.k.,Chavan J.K. "World oilseeds." **Chemistry,Technology and Utilization**. New York. 1992. Pp.217-242.
- [7] Kirk Othmer. **Encyclopedia of Chemical Technology**. New York : John Wiley & Sons. 1997. vol. 12. pp. 681-694.
- [8] Barbara E .et. al. 1994. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemical**. 5<sup>th</sup> Ed. Germany : VCH. 1994. vol. A12. pp. 477-489.
- [9] อุษณีย์ วณิชเขตกำนวม. "คู่มือเรียนชีวเคมี โดย E-learning." เชียงใหม่. : โรงพิมพ์ดาวคอมกราฟฟิค.2548.
- [10] ชัยวัฒน์ เจนวานิช. 2536. **หลักเคมี 2**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- [11] Fogler, H.S. 1999. **Element of Chemical Reaction Engineering**. 3<sup>rd</sup> ed. New Jersey:Prentice Hall.
- [12] Shashikant Vilas Ghadge, Hifjur Raheman, V. 2005. "Biodiesel production from mahua (Madhuca indica) oil havinghigh free fatty acids". **Biomass and Bioenergy**. 28 (2005):601-605
- [13] Canakci, M., Gerpen, V. 2001. "Biodiesel Production From Oils and Fats with High Free Fatty Acids". **Transaction of the ASAE**. 44(6):1429-1436.
- [14] Pakamas, C., Jeerapong, R., Charun, B., Chakrit, T., Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University.
- [15] Ramadhas, A.S., Jayaraj, S. and Muraleedharan, C. 2005. "Biodiesel Production From High FFA Rubber Seed Oil". **Fuel**. 84:335-340.

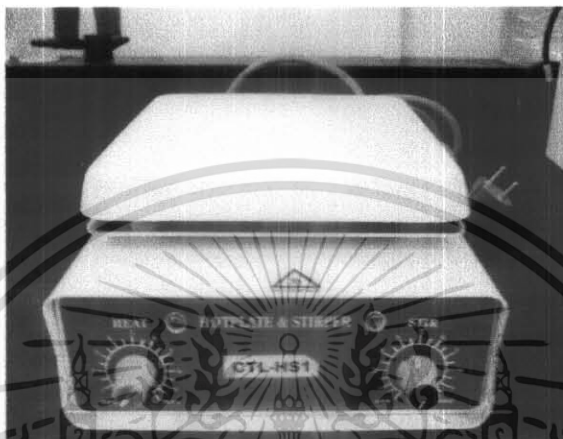
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] BS 5711 Part 3 : Determination of glycerol content, British Standard Method, 1979
- [17] AOCS., Official and Tentative Method of American Oil Chemist's Soc., 3<sup>rd</sup> ed.,  
Champaign, Illinois, 1964
- [18] AOCS, Ca 5a-40: Free Fatty Acids. In: Official Methods and Recommended Practice of  
the AOCS, 5<sup>th</sup> ed, Illinois, 1997



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.  
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



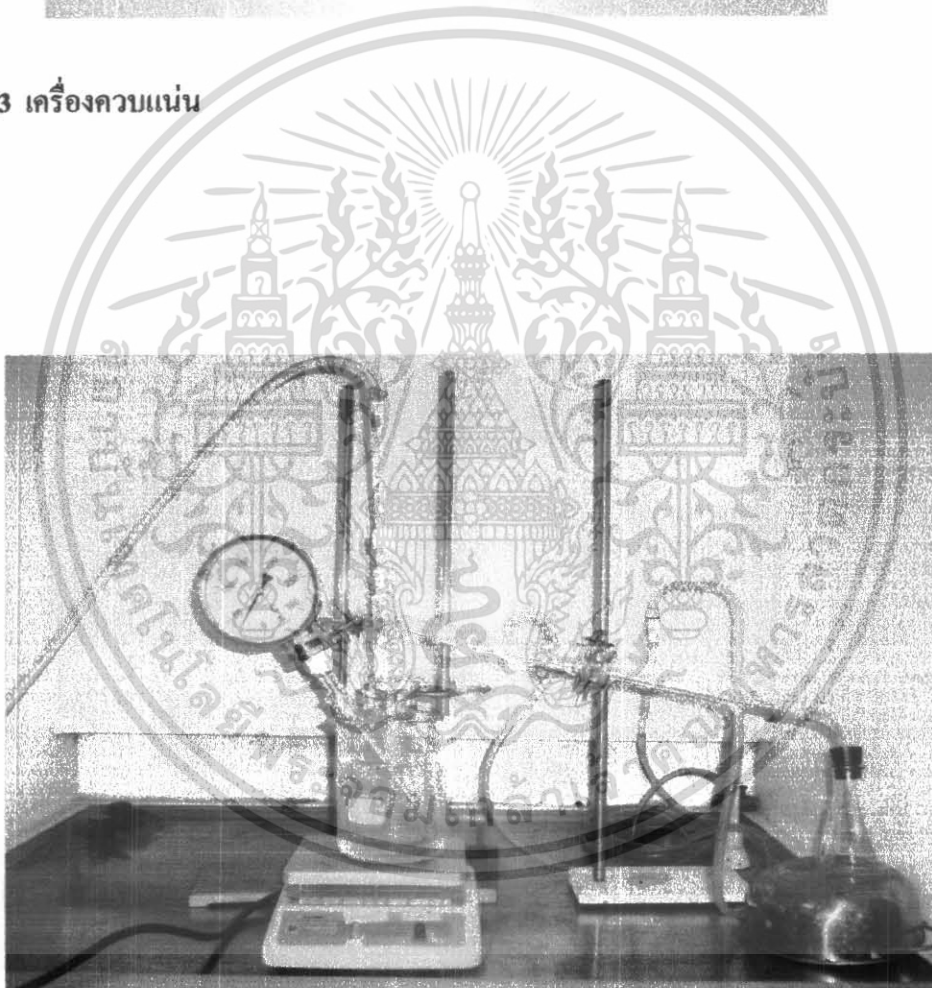
รูปที่ ก.1 เครื่องปั่นกวนชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน

รูปที่ ก.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ ก.3** เครื่องควบแน่น



**รูปที่ ก.4** การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## การวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรอล [16]

## สารเคมีและการเตรียมสารเคมี

1. โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์
2. สารละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดต เตรียมโดยละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดต 60 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ จำนวน 120 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร ละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดต โดยไม่ต้องใช้ความร้อน ถ้าสารละลายขุ่นให้กรองด้วยซินเตอร์กลาสครุชิลที่มีขนาดช่อง 15 ถึง 40 ไมโครเมตร ถ่ายใส่ขวดแก้วสีน้ำตาลพร้อมจุกแก้วปิดสนิท แล้วเก็บไว้ที่มืด
3. สารละลายอิเทนไดออกไซด์ ผสมอิเทนไดออกไซด์ที่เป็นกลางและปราศจากกลีเซอรอลกับน้ำในอัตราส่วน 1 : 1
4. สารละลายมาตรฐานบิฟเฟอไรต์สำหรับเทียบมาตรฐานกับเครื่องวัดความเป็นกรดและด่าง เตรียมโดยการชั่งโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์จากข้อ 1 จำนวน 10.21 กรัม ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร เขย่าให้ละลาย สารละลายนี้จะมีความเป็นกรดและด่าง 4.0 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
5. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปราศจากคาร์บอนเนตความเข้มข้น 0.125 โมลาร์
6. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์
7. สารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.2 โมลาร์
8. โบรโมไทมอลบูลอินดิเคเตอร์ เตรียมโดยละลายโบรโมไทมอลบูลที่แห้ง 0.1 กรัม ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.01 โมลาร์จำนวน 16 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

## วิธีการเตรียมตัวอย่าง

อุ่นตัวอย่างแล้วทำให้เข้ากันก่อนนำไปวิเคราะห์ และให้ระวังการดูดซึมน้ำและการสูญเสีย น้ำของตัวอย่าง

## วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างให้ได้ระหว่าง  $\frac{41 \pm 9}{P}$  เมื่อ  $P$  คือค่าร้อยละของปริมาณกลีเซอรอลที่คาดว่า จะมีในตัวอย่าง แต่ถ้าไม่ทราบปริมาณกลีเซอรอลให้คำนวณจากค่า  $P$  เท่ากับ 100 ก่อน หลังจากได้ผลการวิเคราะห์จึงเลือกขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมต่อไป

2. ถ่ายตัวอย่างลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรประมาณ 50 มิลลิลิตร หยดโบรโม-ไทมอลบูลอินดิเคเตอร์ 5 - 7 หยด แล้วทำให้เป็นกรดด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก 0.1 โมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำสารละลายให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลาร์ อย่างระมัดระวังจนได้สารละลายสีฟ้าซึ่งไม่มีสีเขียวปนอยู่เลย ถ้าใส่สารละลายไปรบกวนการเปลี่ยนสีอินดิเคเตอร์หรือในตัวอย่างมีสารที่มีบัฟเฟอร์อยู่มาก ให้วัดด้วยเครื่องวัดความเป็นกรดและด่าง แล้วปรับความเป็นกรดและด่างให้ได้  $8.1 \pm 0.1$

4. ทำแบลนด์โดยใช้น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรแทนตัวอย่าง แล้วปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 2 และข้อ 3 โดยใช้อินดิเคเตอร์ปรับความเป็นกรด-ด่าง ก่อนที่จะเติมสารละลายโซเดียมเปอร์ไอโอดีด

5. ใช้ปิเปตดูดสารละลายโซเดียมเปอร์ไอโอดีดมาครั้งละ 50 มิลลิลิตร ใสลงในสารละลายตัวอย่างละแบลนด์ แก้วบีกเกอร์เบาๆ แล้วปิดด้วยกระดาษฟิคาตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง (ไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 30 นาที เติมสารละลายอิเทนไดออกไซด์ 10 มิลลิลิตร แก้วบีกเกอร์เบาๆ แล้วตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที

6. เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 300 มิลลิลิตร นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (0.125 โมลาร์) โดยใช้เครื่องมือวัดความเป็นกรด-ด่าง ช่วยในการหาจุดยุติซึ่งมีความเป็นกรด-ด่าง  $6.5 \pm 0.1$  สำหรับแบลนด์ และ  $8.1 \pm 0.1$  สำหรับสารละลายตัวอย่าง แล้วบันทึกปริมาตรสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้

#### วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณกลีเซอรอล ร้อยละของน้ำหนัก} = \frac{9.209 \times M(T_1 - T_2)}{W}$$

เมื่อ M คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเท่ากับ 0.125 โมลาร์

$T_1$  คือ ปริมาณของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

$T_2$  คือ ปริมาณของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตกับแบลนด์ (มิลลิลิตร)

W คือ ปริมาณของสารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ (กรัม)

## ภาคผนวก ค.

## การวิเคราะห์ปริมาณเกลือต่างในเกลือเซอร์อด [17]

## สารเคมี

1. สารละลายอะซิโตน เตรียมโดย ละลายอะซิโตน 2 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จนสารละลายมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. โบรโมฟินอลบลู
3. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอล

## วิธีการ

1. ละลายตัวอย่าง 5 กรัมในสารละลายอะซิโตน 100 มิลลิลิตร
2. เติมโบรโมฟินอลบลู 1 มิลลิลิตร
3. ไทเทรตด้วย กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 นอร์มอล จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสี

น้ำเงินเป็นสีเหลือง

## การคำนวณ

$$\text{ปริมาณเกลือต่าง (\% โดยน้ำหนัก)} = \frac{A \times 0.1 \times 320.56}{1000 \times W} \times 100$$

เมื่อ

A คือ ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)

W คือ ปริมาณของสารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ (กรัม)

## ภาคผนวก ง.

## การหาปริมาณกรดไขมันอิสระในไขปลาล์ม [18]

ตามมาตรฐาน AOCS Official Method Ca 5a-40 ได้กล่าวถึงการหาปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในตัวอย่าง เช่น น้ำมันพืชทั้งที่บริสุทธิ์และไม่บริสุทธิ์ น้ำมันปลา ไขมันสัตว์ไว้ดังนี้

**การเตรียมสารเคมี**

1. เตรียมสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน เข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ ในเอทานอลเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์
2. นำเอทานอลมาทำให้มีฤทธิ์เป็นกลางโดยเติมฟีนอล์ฟทาลีน 2 มิลลิลิตร แล้วค่อย ๆ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปจนเริ่มเปลี่ยนเป็นสีชมพู
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นตามตารางที่ ง.1
4. นำน้ำมันตัวอย่างมาชั่งให้ได้น้ำหนักตามตารางที่ ง.1

**ตารางที่ ง.1** น้ำหนักตัวอย่างน้ำมัน ปริมาตรของแอลกอฮอล์ และความเข้มข้นของด่างต้องใช้กับปริมาณกรดไขมันอิสระในช่วงต่าง ๆ

ปริมาณกรดไขมันอิสระ(เปอร์เซ็นต์)	น้ำหนักของน้ำมันตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาตรของแอลกอฮอล์ (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นของด่าง (นอร์มอล)
0.0-0.2	$56.4 \pm 0.2$	50	0.1
0.2-1.0	$28.2 \pm 0.2$	50	0.1
1.0-30.0	$7.05 \pm 0.05$	75	0.25
30.0-50.0	$7.05 \pm 0.05$	100	0.25 หรือ 1.0
50.0-100	$3.525 \pm 0.001$	100	1.0

**ขั้นตอนการทดสอบ**

1. นำเอทานอลที่เป็นกลางมาผสมกับไขปลาล์มตัวอย่าง แล้วเติมฟีนอล์ฟทาลีน 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันนำมาไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จนกลายเป็นสีชมพูโดยสีจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงเป็นเวลา 30 นาที บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

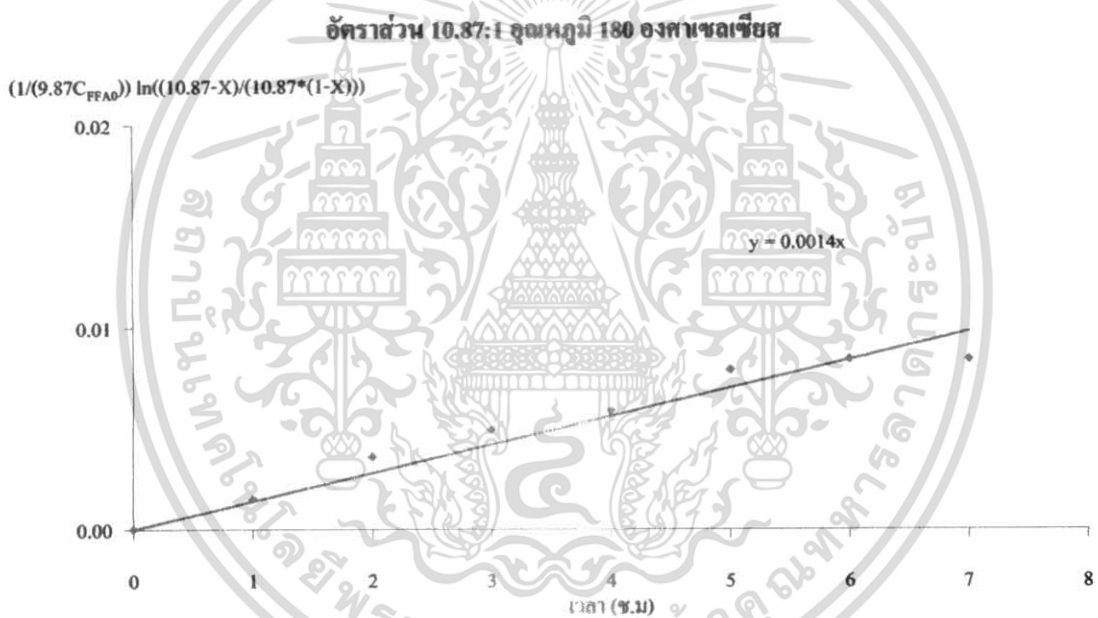
ภาคผนวก จ.

## การหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา

ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $k_A$ ) ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ สามารถหาได้จากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่างค่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (t)

กับ  $\frac{1}{(\Theta_{GL} - 1)C_{FFA0}} \ln \left[ \frac{(\Theta_{GL} - x)}{\Theta_{GL}(1-x)} \right]$  ซึ่งได้มาจากสมการที่ (2.21) ที่พิจารณาอัตราส่วนจำนวน

โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน ซึ่งค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแสดงดังรูปที่ จ.1-จ.4

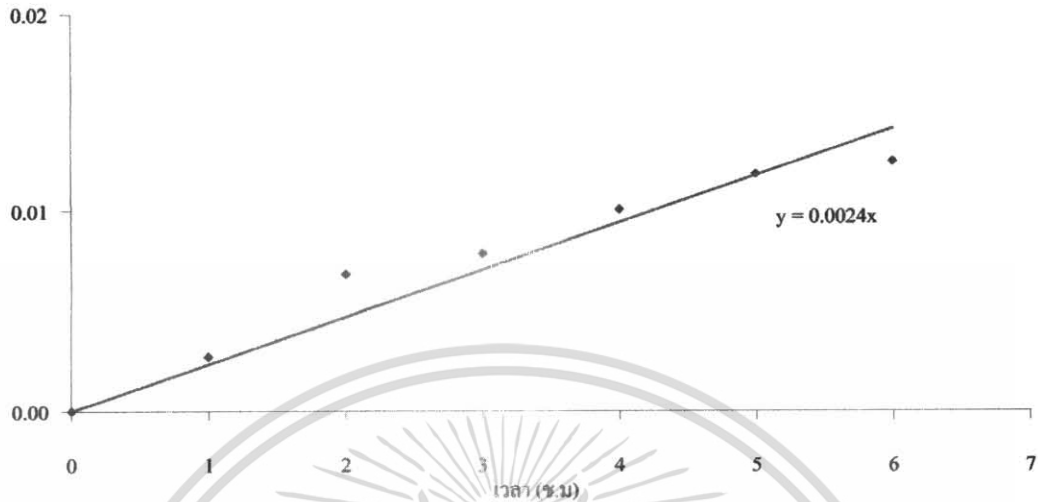


รูปที่ จ.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับ  $\frac{1}{(\Theta_{GL} - 1)C_{FFA0}} \ln \left[ \frac{(\Theta_{GL} - x)}{\Theta_{GL}(1-x)} \right]$  ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระ ในน้ำมันพืช เท่ากับ 10.87 : 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อัตราส่วน 10.87:1 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

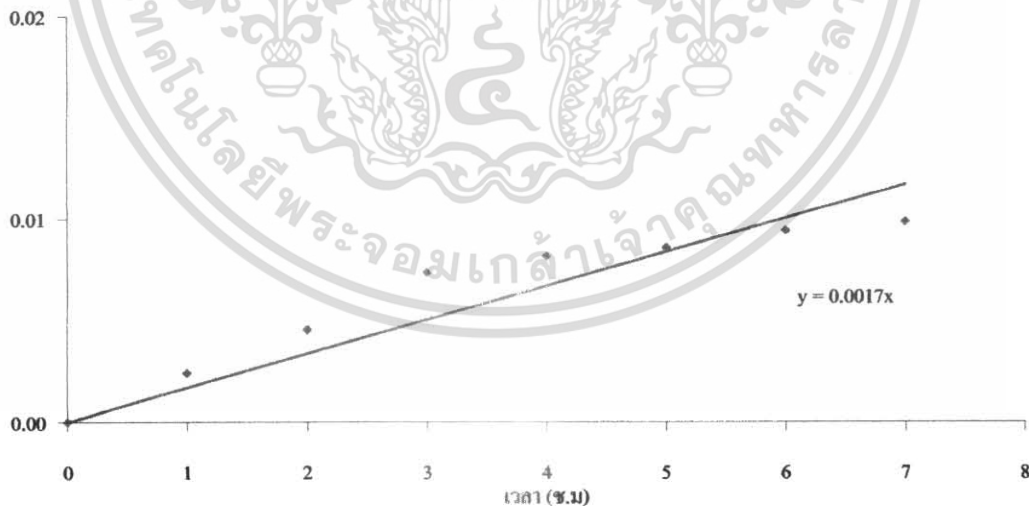
$$\left(\frac{1}{9.87C_{FFA0}}\right) \ln\left(\frac{10.87-X}{10.87(1-X)}\right)$$



**รูปที่ ๒.๒** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับ  $\frac{1}{(\Theta_{GL} - 1)C_{FFA0}} \ln \left[ \frac{(\Theta_{GL} - x)}{\Theta_{GL}(1-x)} \right]$  ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระ ในน้ำมันพืช เท่ากับ 10.87 : 1

## อัตราส่วน 16.23:1 อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

$$\left(\frac{1}{15.23C_{FFA0}}\right) \ln\left(\frac{16.23-X}{16.23(1-X)}\right)$$

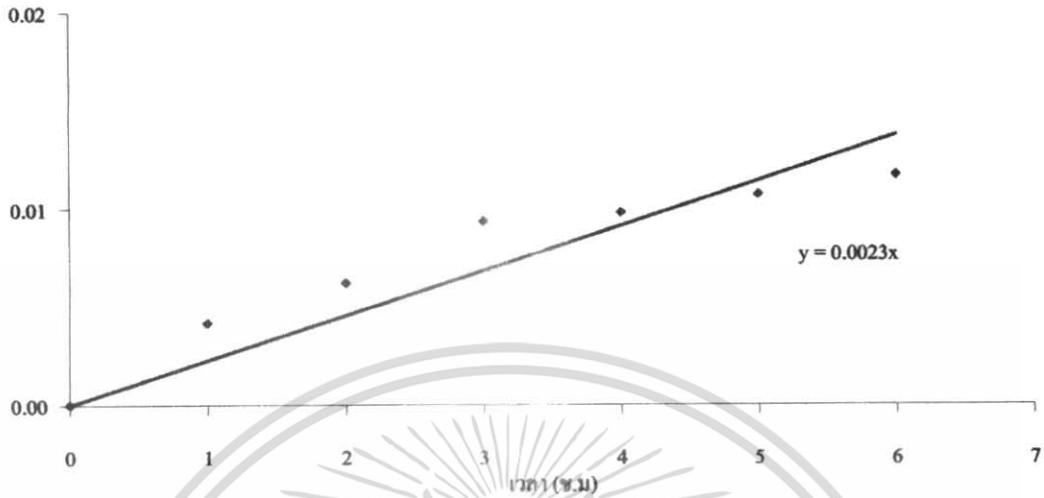


**รูปที่ ๒.๓** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับ  $\frac{1}{(\Theta_{GL} - 1)C_{FFA0}} \ln \left[ \frac{(\Theta_{GL} - x)}{\Theta_{GL}(1-x)} \right]$  ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระ ในน้ำมันพืช เท่ากับ 16.23 : 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อัตราส่วน 16.23:1 อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

$$\left(\frac{1}{15.23C_{FFA0}}\right) \ln\left(\frac{16.23-X}{16.23(1-X)}\right)$$



รูปที่ ๑.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับ  $\frac{1}{(\Theta_{GL}-1)C_{FFA0}} \ln\left[\frac{(\Theta_{GL}-x)}{\Theta_{GL}(1-x)}\right]$  ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนจำนวน โมลของกลีเซอรอลต่อกรดไขมันอิสระ ในน้ำมันพืช เท่ากับ 16.23 : 1