

ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันอิสระและเมทานอล
ESTERIFICATION OF FREE FATTY ACID AND METHANOL



นายบุญพัฒน์ ธนพัฒนรุ่งเรือง
นายธนรัช ทองแทน

2/11/2550
16522
9550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 83213
วัน,เดือน,ปี - 6 ส.ค. 2551

b. 119 62367
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ESTERIFICATION OF FREE FATTY ACID AND METHANOL



**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING**

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT ' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง ปฏิบัติงานเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันอิสระและเมทานอล
จัดทำโดย นายบุญญพัฒน์ รัตนพัฒน์รุ่งเรือง
นายธนรัช ทองแทน
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. ประกอบ กิจไชยา)

กรรมการ

(รศ. ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)

กรรมการ

(ดร. สันติ วัฒนานูสรณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรินญาณินพณ์รื่อง ปรุกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระและเมทานอล
 จัดทำโดย นายปญญาพัฒน์ รัตนันธุ์รื่อง
 นายธนรัช ทองแทน
 อาจารย์ที่ปรุกิษา รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา
 ปรินญาณินพณ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงงานนี้ศึกษาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มและข้อมูลพื้นฐานทาง
 จลนพลศาสตร์ โดยการทำให้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุระหว่าง
 น้ำมันปาล์มและเมทานอลด้วยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำมันปาล์มที่ใช้มี
 ปริมาณกรดไขมันอิสระ 5% โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มและเมทานอล
 10:1, 10:2, และ 10:3 อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 และ
 60 นาที เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยมวลระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอล อุณหภูมิ และเวลาในการ
 ทำปฏิกิริยาจะได้เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของกรดไขมันอิสระมีค่าสูงขึ้น จากสภาวะการทดลองที่
 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วน โดยน้ำหนักระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอล 10:3 เวลาใน
 การทำปฏิกิริยา 60 นาที ได้ค่าคอนเวอร์ชันของกรดไขมันอิสระ 97 % และเหลือกรดไขมันอิสระ
 0.16 % โดยมวล เมื่อนำน้ำมันปาล์มที่ผ่านลดกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันมา
 ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันจะได้น้ำมันดีเซลชีวภาพประมาณ 83 % ซึ่งได้ปริมาณสูงกว่า
 น้ำมันปาล์มที่ยังไม่ได้ลดกรดไขมันอิสระ จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเมื่อให้ปฏิกิริยาเป็น
 ปฏิกิริยามูลฐาน $-r_{FFA} = k_{FFA} C_{FFA} C_{MeOH}$ มิลลิโมลกรดไขมันอิสระ/ลิตร·นาที จะได้ค่าคงที่อัตรา
 (k) เท่ากับ $2.16 \times 10^5 \exp\left[\frac{-6,144}{T}\right]$ มิลลิลิตร/โมล·นาที

Report Title Esterification of Free Fatty Acid and Methanol

By Mr. Puntapat Thanapatrungruang
Mr. Tanatat Tongtan

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 project studied the reduction of free fatty acid in palm oil and basic kinetic parameters. The esterification reaction was carried out using a packed-bed reactor with ion-exchange resin catalyst. The amount of free fatty acid in palm oil was 5 % by weight. The experiments were performed at the mass ratio of palm oil: methanol 10:1, 10:2, and 10:3, reaction temperature of 60, 70, and 80 °C, and space time of 30 and 60 minutes. The results show that when mass ratio of palm oil: methanol, temperature, and space time increase, the conversion of free fatty acid increases. At the mass ratio of palm oil: methanol 10:3, reaction temperature at 80 °C and space time of 60 minutes, the conversion of free fatty acid was about 97 % and free fatty acid of 0.16 % by weight was remained. After the esterification reaction, palm oil was experimented in the transesterification. The biodiesel of about 83% was obtained, which was higher than that from the palm oil with higher free fatty acid. The experimental data was analyzed based on the assumption of the elementary reaction: $-r_{FFA} = k_{FFA} C_{FFA} C_{MeOH}$ mmol free fatty acid/L·min. The rate constant was found to be $k = 2.16 \times 10^5 \exp \left[\frac{-6,144}{T} \right]$ mL/mol·min.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้สร้างเครื่องปฏิกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ และดร. สันติ วัฒนานุสรณ์ กรรมการสอบและตรวจสอบปริญญานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำตลอดจนข้อเสนอแนะ จนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและสร้างอุปกรณ์การทดลอง

หากมีสิ่งผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขออภัยและขออภัยมา ณ ที่นี้



ปัญญาพัฒน์ ชนพัฒน์รุ่งเรือง
ธนรัช ทองแทน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
สัญลักษณ์.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎี.....	4
2.1.1 กระบวนการเอสเทอร์รีฟิเคชัน.....	4
2.1.2 ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชัน.....	5
2.1.3 กรดไขมันอิสระ.....	5
2.1.4 น้ำมันพืช.....	6
2.1.5 จลนพลศาสตร์เคมี.....	8
2.1.6 การวิเคราะห์ความถดถอย.....	12
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	18
3.1 อุปกรณ์.....	18
3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ.....	18
3.2 การทดลอง.....	19
3.2.1 การทำปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันอิสระและเมทานอล.....	19
3.2.2 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	22
4.1 ผลการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระที่สภาวะต่างๆ.....	22
4.2 การหาคอนเวอร์ชันของกรดไขมันอิสระ.....	23
4.3 ปฏิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มหลังการทำปฏิริยา เอสเทอร์ริฟิเคชัน.....	24
4.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ของปฏิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างกรด ไขมันอิสระและเมทานอล.....	25
4.4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่อัตราเร็วการเกิดปฏิริยา.....	25
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	29
เอกสารอ้างอิง.....	30
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	32
ภาคผนวก ข การหาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม.....	34
ภาคผนวก ค การหาร้อยละผลได้ของน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กรดไขมันอิสระชนิดต่างๆ.....	7
3.1 ข้อมูลจำเพาะของเรซิน GF 101.....	19
4.1 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือในน้ำมันปาล์มหลังจากทำปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันที่ สภาวะต่างๆ.....	22
4.2 ค่าคอนเวอร์ชันของกรดไขมันอิสระที่สภาวะต่างๆ.....	23
4.3 ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาไปข้างหน้าที่อุณหภูมิต่างๆ.....	27
ข.1 น้ำหนักตัวอย่างน้ำมันปาล์ม ปริมาตรแอลกอฮอล์ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ที่ต้องใช้กับปริมาณกรดไขมันอิสระในช่วงต่างๆ.....	34
ข.2 ข้อมูลการหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระที่สภาวะต่างๆ ครั้งที่ 1.....	36
ข.3 ข้อมูลการหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระที่สภาวะต่างๆ ครั้งที่ 2.....	37
ข.4 องค์ประกอบเฉลี่ยกรดไขมันของน้ำมันพืชก่อนและหลังการใช้ประกอบอาหาร.....	38
ค.1 ร้อยละผลได้ของน้ำมันดีเซลชีวภาพ.....	39



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชัน.....	5
2.2 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส.....	8
3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบคบรรจุ.....	18
4.1 เปรียบเทียบการแยกชั้นระหว่างน้ำมันดีเซลชีวภาพและกลีเซอริน.....	24
4.2 ความสัมพันธ์อาร์เรเนียสของปฏิกริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ.....	28
ก.1 อุปกรณ์ในการทดลอง.....	32
ก.2 ชุดป้อนน้ำมันปาล์มและเมทานอล.....	32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ **VII** เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

a	ค่าประมาณการของ β_0
A	ตัวคูณข้างหน้าเอ็กซ์โพเนนเชียล
b	ค่าประมาณการของ β_1
C_A	ความเข้มข้นของสาร A, โมล/ลิตร
C_B	ความเข้มข้นของสาร B, โมล/ลิตร
C_{FFA}	ความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระ, โมล/ลิตร
C_{MeOH}	ความเข้มข้นของเมทานอล, โมล/ลิตร
e_i	ค่าความคลาดเคลื่อน
E_a	พลังงานกระตุ้น, จูล/โมล
F_{FFA}	อัตราการไหลเชิงโมลของกรดไขมันอิสระ
h	ขนาดพื้นที่ใช้ในการคำนวณ
k	ค่าคงที่อัตรา, จำนวนตัวแปรอิสระในสมการถดถอย
k_A	ค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาไปข้างหน้าของสาร A, มิลลิลิตร/โมล-นาที่
K	ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาผันกลับได้
n	อันดับปฏิกิริยารวม, จำนวนข้อมูลที่ทำการศึกษา
r_A	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร A, โมล/ลิตร-นาที่
r_{FFA}	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของกรดไขมันอิสระ, โมล/ลิตร-นาที่
R	ค่าคงที่ของก๊าซ, 8.314 จูล/โมล-เคลวิน
R^2	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
$\overline{R^2}$	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าเฉลี่ย
S_E	ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน
S_{EE}	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ
S_T	ความแปรปรวนของค่าตัวแปรที่ต้องการทำนายทั้งหมด
t	เวลา, นาที่
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน
V	ปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์, ลิตร
X_A	ค่าคอนเวอร์ชันของสาร A
X_{eq}	ค่าคอนเวอร์ชันที่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ VIII เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ (ต่อ)

y_i	ค่าตัวแปรที่ต้องการทำนาย
$y_{predict}$	ค่าตัวแปรที่ได้จากการทำนาย
\bar{y}_i	ค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่ต้องการทำนาย
α	อันดับปฏิกิริยาเทียบกับความเข้มข้นของสาร A
β	อันดับปฏิกิริยาเทียบกับความเข้มข้นของสาร B
β_0	จุดตัดบนแกน y
β_1	ความชันของกราฟ
ε	ส่วนคลาดเคลื่อน
Θ_B	สัดส่วนจำนวนโมลของสาร B เทียบกับสาร A ในสารป้อนที่เวลาเริ่มต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ **IX** เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความต้องการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมในปัจจุบันมีปริมาณมากและมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่แหล่งทรัพยากรจากพลังงานเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมมีปริมาณจำกัด ทำให้ราคาสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่เพื่อทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมที่กำลังจะหมดไปจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ น้ำมันดีเซลชีวภาพ (Biodiesel) เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมและส่งผลกระทบท่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า

การใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องยนต์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ [1] เนื่องจากน้ำมันดีเซลชีวภาพมีออกซิเจนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 10 ทำให้การผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จึงช่วยเพิ่มอัตราส่วนโดยปริมาตรของอากาศต่อน้ำมันได้ ทำให้การเผาไหม้น้ำมันดีเซลชีวภาพในกระบอกสูบของเครื่องยนต์เกิดได้อย่างสมบูรณ์ และให้ค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 7.5 ค่ากำลังเพิ่มขึ้นร้อยละ 12 เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม

การใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพสามารถลดมลพิษในอากาศจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ กรมอุทกศาสตร์เรือได้ทำการทดลองใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพกับเครื่องยนต์ดีเซล พบว่ารถที่ใช้ใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพสามารถลดควันดำได้มากกว่าร้อยละ 50 และสามารถลดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ร้อยละ 20 ลดฝุ่นละอองได้ร้อยละ 39 ลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ร้อยละ 99 นอกจากนี้การใช้น้ำมันดีเซลชีวภาพทดแทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมนั้นสามารถลดวงจรชีวิตของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 78 ซึ่งเป็นผลให้ลดภาวะโลกร้อน [1]

น้ำมันดีเซลชีวภาพ คือ เมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ของน้ำมันหรือไขมันของพืชหรือสัตว์ (ไตรกลีเซอไรด์) ซึ่งสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) ของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอลหรือเอทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรด ค่าง หรือเอนไซม์

วัตถุดิบสำหรับการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพประเภทน้ำมันพืชบริสุทธิ์ เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง มีปริมาณไม่เพียงพอในการผลิตระดับอุตสาหกรรม จึงมีการนำน้ำมันพืชที่มีราคาต่ำ เช่น น้ำมันพืชที่ใช้แล้วมาทดแทนน้ำมันพืชบริสุทธิ์เพื่อลดต้นทุนในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพลง น้ำมันพืชที่ใช้แล้วเป็นสิ่งที่เหลือจากการใช้ประกอบอาหาร เช่น การทอด จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2] พบว่าสามารถนำน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมาผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้ แต่อย่างไรก็ตามน้ำมันที่ใช้

แล้วมีบางองค์ประกอบที่เป็นปัญหาต่อการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ คือ มีกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid : FFA) สูง ดังนั้นก่อนนำน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมาผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจะต้องกำจัดกรดไขมันอิสระก่อน เพราะหากน้ำมันพืชมีกรดไขมันอิสระในปริมาณสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสaponification ในระหว่างการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพและเกิดสบู่ ซึ่งสบู่เป็นสารอิมัลซิฟายเออร์จึงขัดขวางการแยกชั้นระหว่างกลีเซอรินและน้ำมันดีเซลชีวภาพ [3] การกำจัดกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่ใช้แล้วนั้นสามารถกำจัดได้โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Esterification) คือการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรดไขมันอิสระและเมทานอลโดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการพื้นฐานที่ใช้ในการลดกรดไขมันอิสระก่อนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพนั้น ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบกะและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ที่มีฤทธิ์เป็นกรดแต่ก็พบว่ามีปัญหาด้านการกัดกร่อนและการแยกกรดออกจากผลิตภัณฑ์

งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาและพัฒนากระบวนการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบต่อเนื่องโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ และจะทดสอบการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันปาล์มที่ลดปริมาณกรดไขมันอิสระแล้วเทียบกับน้ำมันปาล์มที่ไม่ได้ลดปริมาณกรดไขมันอิสระ นอกจากนี้ยังศึกษาอันดับของปฏิกิริยาและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกรดไขมันอิสระและเมทานอลที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส และอัตราส่วน โดยมวลของระหว่างกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชต่อเมทานอล 10:1, 10:2 และ 10:3

1.2 วัตถุประสงค์ของปริิญญานิพนธ์

1.2.1 ศึกษาวิธีการลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันแบบต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ

1.2.2 วิเคราะห์หาข้อมูลพื้นฐานทางจลนพลศาสตร์ในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระและเมทานอล

1.3 ขอบเขตของปริิญญานิพนธ์

1.3.1 ศึกษาหลักการทำงานและสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ

1.3.2 ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราส่วน โดยมวลของสารตั้งต้น อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา และเวลาในการทำปฏิกิริยา (Space time) ที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระและเมทานอล

1.3.3 หาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับเมทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.4.3 ออกแบบการทดลองและเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

1.4.4 ทดสอบผลของอัตราส่วน โดยมวลของกรดไขมันอิสระต่อเมทานอล อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันอิสระและเมทานอล

1.4.5 วิเคราะห์ค่าคงที่อัตราของการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับเมทานอล

1.4.6 สรุปผลการทดลองและจัดทำปริญาานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มโดยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุที่สร้างขึ้น

1.5.2 ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.5.3 เครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มกำลังการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้

1.5.4 สามารถนำข้อมูลพื้นฐานทางจลนพลศาสตร์ในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันอิสระและเมทานอล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุไปประยุกต์ใช้ในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

น้ำมันดีเซลชีวภาพ [4] คือ น้ำมันที่ผลิตได้จากการนำน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำมันจากพืช น้ำมัน น้ำมันพืชบริสุทธิ์ หรือน้ำมันที่ใช้ปรุงอาหารแล้วมาแปรสภาพโดยผ่านการทำปฏิกิริยาเคมีกับแอลกอฮอล์ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เมทานอลเนื่องจากเมทานอลมีราคาถูกกว่าแอลกอฮอล์ชนิดอื่น น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากการทำปฏิกิริยากับเมทานอลเรียกว่า fatty acid methyl esters (FAME) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีทั้งกรด ต่าง ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธีพันธู์ และเอนไซม์ ตัวอย่างกรดที่ใช้ ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก ซึ่งมักใช้ในกรณีที่น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่นำมาผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง ในกรณีที่ใช้ต่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์จะต้องไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ปฏิกิริยาที่ใช้ผลิตสารเอสเทอร์ส่วนใหญ่ ได้แก่ กระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน และทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อผลที่ได้ในกระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่

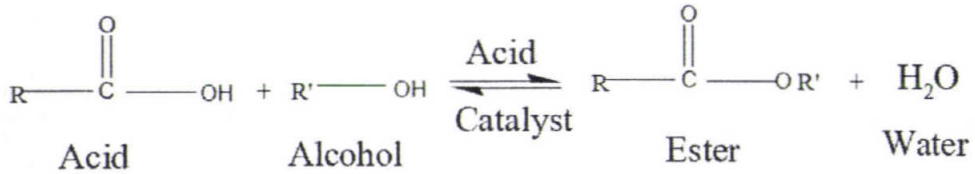
1. ความบริสุทธิ์ของสารตั้งต้น
2. อัตราส่วนระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์
3. ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา
4. อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

2.1.1 กระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification process) [2]

เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันอิสระและเมทานอลที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถใช้ได้กับวัตถุดิบทุกชนิดและค่ากรดไขมันอิสระทุกระดับ แต่ข้อจำกัด คือ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน และใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูง มักใช้ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันในการลดกรดไขมันอิสระจากน้ำมันพืชก่อนนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

2.1.2 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน

ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันคือเอสเทอร์และน้ำ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน [2]

โดยทั่วไปจะใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ดังนั้นต้องดึงน้ำออกเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและเกิดผลได้ (Yield) ของเอสเทอร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสูง

2.1.3 กรดไขมันอิสระ [5-6]

กรดไขมันอิสระเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีอะตอมของคาร์บอนเกาะกันเป็นเส้นตรง กรดไขมันอิสระในธรรมชาติมักมีอะตอมของคาร์บอนเป็นจำนวนคู่ระหว่าง 4-24 อะตอม ที่พบมากที่สุดคือ 16 และ 18 อะตอม มีสูตรทั่วไปคือ RCOOH มี 2 ประเภทดังนี้

ก. กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid)

กรดไขมันอิ่มตัว มีหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) 1 หมู่ต่ออยู่กับไฮโดรคาร์บอนที่เป็นสายยาว ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีแต่พันธะเดี่ยวอย่างเดียว เช่น กรดปาล์มมีติกมีคาร์บอน 16 ตัว เป็นกรดไขมันอิ่มตัวที่มีมากในธรรมชาติและพบในร่างกาย

ข. กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid)

กรดไขมันไม่อิ่มตัวมีทั้งพันธะคู่และพันธะเดี่ยวในสายไฮโดรคาร์บอน มีหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) 1 หมู่ต่ออยู่กับไฮโดรคาร์บอนที่มีพันธะคู่รวมอยู่ด้วย อาจมีตั้งแต่ 1 พันธะคู่ เรียกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว และ 2 พันธะคู่ขึ้นไป เรียกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน พันธะคู่ในกรดไขมันต้องอยู่ห่างกัน 2 คาร์บอน ดังนี้ -CH=CH-CH=CH- เสมอ

2.1.4 น้ำมันพืช (Fat & Oil) [2]

องค์ประกอบหลักของน้ำมันพืช คือ ไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งประกอบด้วยกลีเซอรินและเอสเทอร์ของกรดไขมัน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กรดไขมันอิ่มตัว และกรดไขมันไม่อิ่มตัว ในปริมาณที่แตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของน้ำมันพืชแต่ละชนิด มีความแตกต่างกัน ซึ่งกรดไขมันที่พบในน้ำมันพืชส่วนใหญ่จะเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยทั่วไปกรดไขมันจะมีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลเป็นเลขคู่เสมอ ซึ่งมีความยาวตั้งแต่ 12 ถึง 24 โมเลกุล แต่ที่พบเป็นจำนวนมากจะมีจำนวนคาร์บอน 16 และ 18 ดังตารางที่ 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

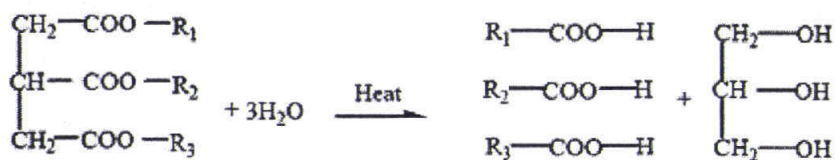
ตารางที่ 2.1 กรดไขมันอิสระชนิดต่างๆ [2]

ชนิดของกรดไขมัน	ชื่อเรียก	โครงสร้าง ^a	สูตรเคมี
Lauric	Dodecanoic	12:0	$C_{12}H_{24}O_2$
Myristic	Tetradecanoic	14:0	$C_{14}H_{28}O_2$
Palmitic	Hexadecanoic	16:0	$C_{16}H_{32}O_2$
Stearic	Octadecanoic	18:0	$C_{18}H_{36}O_2$
Arachidic	Eicosanoic	20:0	$C_{20}H_{40}O_2$
Behenic	Docosanoic	22:0	$C_{22}H_{44}O_2$
Lignoceric	Tetracosanoic	24:0	$C_{24}H_{48}O_2$
Oleic	cis-9-Octa	18:1	$C_{18}H_{34}O_2$
Linoleic	Decadienoic	18:2	$C_{18}H_{32}O_2$
Linolenic	cis-9, cis-12, eis-15-Octadecatrienoic	18:3	$C_{18}H_{30}O_2$
Erucic	cis-13-Docosenoic	22:1	$C_{22}H_{42}O_2$

^axx:y เลข xx คือ จำนวนคาร์บอนในโครงสร้างของกรดไขมันอิสระ และ y คือ จำนวนพันธะคู่

ไขมันและน้ำมันเมื่อแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระจะมีสมบัติเป็นกรด ซึ่งทำให้น้ำมันพืชที่ใช้แล้วมีความเป็นกรดมากกว่าน้ำมันพืชที่ยังไม่ได้ใช้ เพราะน้ำมันพืชที่ใช้แล้วหรือผ่านการให้ความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระขึ้น ดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส [3]

ดังนั้นในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจึงจำเป็นต้องทราบปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อจะได้ทราบปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาต่างที่ต้องใช้ ในการหาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชนั้นจะใช้วิธีการไทเทรตน้ำมันพืชด้วยสารละลายด่างโดยใช้ฟีนอล์ฟทาลินเป็นอินดิเคเตอร์

2.1.5 จลนพลศาสตร์เคมี (Chemical kinetics) [7]

จลนพลศาสตร์เคมีเป็นสาขาหนึ่งของวิชาเคมีที่วัดอัตราการเกิดปฏิกริยาและกลไกของการเกิดปฏิกริยาเคมี อัตราการเกิดปฏิกริยาบอกให้ทราบว่าสารตั้งต้นของปฏิกริยาถูกใช้ไปและมีสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกริยานั้นเกิดขึ้นแล้วมากน้อยเพียงใด การวัดอัตราการเกิดปฏิกริยานั้นโดยมากวัดจากความเข้มข้นของสารใดสารหนึ่งที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งถ้าสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ที่นำปฏิกริยากันเป็นแก๊สอาจวัดเป็นความดันย่อยของสารที่เปลี่ยนแปลงไปต่อหน่วยเวลา จลนพลศาสตร์เคมีอธิบายให้ทราบถึงอิทธิพลปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกริยาซึ่งได้แก่ สมบัติของสารตั้งต้น ปริมาณของสารตั้งต้น อุณหภูมิและความดันของระบบ ตัวเร่งปฏิกริยา และจํานวนวัฏภาคของระบบ เป็นต้น

ปฏิกริยาเคมีสามารถจำแนกตามลักษณะต่างๆ ได้ดังนี้

1. จํานวนวัฏภาคที่เกี่ยวข้องในการทำปฏิกริยา

1.1 ปฏิกริยาเอกพันธ์ (Homogeneous reaction) เกิดขึ้นภายในระบบที่มีหนึ่งวัฏภาค

1.2 ปฏิกริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous reaction) เกิดขึ้นภายในระบบที่มีหลายวัฏภาค

โดยปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะดำเนิน ทรอยต่อของวัฏภาคหรือบริเวณใกล้เคียง

2. การดำเนินไปของปฏิกริยา

2.1 ปฏิกริยาผันกลับไม่ได้ (Irreversible reaction) เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในทิศทางเดียวและดำเนินต่อเรื่อยๆ จนกระทั่งสารตัวใดตัวหนึ่งหมดไป

2.2 ปฏิกริยาผันกลับได้ (Reversible reaction) เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นทั้งในทิศทางไปข้างหน้าและย้อนกลับ โดยทิศทางการดำเนินของปฏิกริยาจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ภายในระบบและค่าคงที่สมดุลของปฏิกริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. กฎอัตรา (Rate law)



ในการพิจารณาปฏิกิริยาเคมีจะเลือกสารตั้งต้นที่เป็นตัวกำหนดปฏิกิริยา (Limiting reactant) มาเป็นบรรทัดฐานในการคำนวณและพิจารณาสารอื่นที่เหลือโดยเทียบกับสารดังกล่าว เพื่อความสะดวกถ้าเลือกสาร A เป็นตัวกำหนดปฏิกิริยาในการคำนวณ และกำหนดให้อัตราการหายไปของสาร A (Rate of disappearance of A) เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ $-r_A$

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

$$-r_A = k_A (T) [f^a(c_A, c_B, \dots)] \quad (2.1)$$

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของ $-r_A$ กับความเข้มข้นของสารประกอบคือกฎอัตรา (Rate law) โดยทั่วไปค่าคงที่อัตราที่ปรากฏอยู่ในกฎอัตราจะเป็นค่าที่คิดเทียบกับสารใดสารหนึ่งของระบบเสมอ ค่าคงที่อัตราที่คิดเทียบกับสาร A คือ k_A

ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารที่เกี่ยวข้องในการทำปฏิกิริยาจะหาค่าจากการทดลองเท่านั้น แม้บางครั้งอาจใช้ทฤษฎีมาทำนายแต่ยังไม่มีทฤษฎีใดที่สามารถยืนยันได้ว่าความสัมพันธ์ที่ได้นั้นถูกต้องเสมอ ดังนั้นการทำนายโดยใช้ทฤษฎีก็จำเป็นต้องทำการทดลองเพื่อยืนยันก่อนนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้งานเสมอ

โดยทั่วไปมักเขียนความสัมพันธ์ในรูปของ กฎอัตราตามสมการที่ 2.2 ซึ่งเป็นผลคูณของค่าคงที่อัตรากับความเข้มข้นของสารต่างๆ ที่ทำปฏิกิริยากัน ตัวเลขยกกำลังที่กำกับกับความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดจะบ่งชี้ว่าความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดนั้นมีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างไร

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

เมื่อ $n = \alpha + \beta$

เรียกตัวเลขยกกำลังว่า อันดับปฏิกิริยา (Reaction order) n คือ อันดับปฏิกิริยารวม และอันดับปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับสาร A และ B คือ α และ β ตามลำดับ

เมื่อปฏิกิริยาอยู่ในวัฏภาคของเหลวจะได้ว่าความเข้มข้นของสาร A และ B คือ C_A และ C_B และได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_A = C_{A0}(1 - X_A) \quad (2.3)$$

$$C_B = C_{A0}(\Theta_B - X_A) \quad (2.4)$$

เมื่อ C_{A0} คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร A

Θ_B คือ สัดส่วนจำนวน โมลของสาร B เทียบกับสาร A ในสารป้อนหรือที่เวลาเริ่มต้น

X_A คือ ค่าคอนเวอร์ชันของสาร A

ข. ค่าคงที่อัตรา (Reaction rate constant)

ค่าคงที่อัตราไม่ขึ้นกับค่าความเข้มข้นของสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยาเคมี แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส ดังสมการที่ 2.5

$$k(T) = Ae^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (2.5)$$

เมื่อค่าพลังงานกระตุ้น E_a คือ พลังงานขั้นต่ำซึ่งโมเลกุลของสารตั้งต้นจะต้องมีเพื่อปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อพิจารณาทฤษฎีการชนกันทางจลนพลศาสตร์ของแก๊สจะพบว่า $e^{\frac{-E_a}{RT}}$ คือ สัดส่วนจำนวนครั้งของการชนกันระหว่างโมเลกุลที่มีระดับพลังงานสูงกว่าหรือเท่ากับระดับพลังงานขั้นต่ำของพลังงานกระตุ้น E_a พบว่า

1. สำหรับปฏิกิริยาในวัฏภาคแก๊ส ค่าคงที่อัตราขึ้นกับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและความดันของระบบ
2. สำหรับปฏิกิริยาในวัฏภาคของเหลว ค่าคงที่อัตราขึ้นกับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและชนิดตัวทำละลาย

การหาค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาทำได้โดยแปลงสมการที่ 2.5 ให้อยู่ในรูปของ Logarithm และจัดรูปดังสมการที่ 2.6 จากนั้นทำการทดลองเพื่อหาค่าคงที่อัตราที่อุณหภูมิต่างๆ และนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_A$ กับ $1/T$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $-\frac{E_a}{R}$

$$\ln k_A = \ln A - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (2.6)$$

เมื่อพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยามีค่าสูง อุณหภูมิจะมีผลต่อค่าคงที่อัตรามากขึ้น กล่าวคือ สำหรับปฏิกิริยาที่มีค่าพลังงานกระตุ้นสูง ค่าคงที่อัตราอาจเพิ่มสูงขึ้นมากแม้ว่าอุณหภูมิสูงขึ้นเพียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กน้อย ในทางกลับกันหากปฏิกิริยาที่มีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำมาก ๆ ค่าคงที่อัตราอาจไม่เปลี่ยนแปลงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงกว้างก็ตาม

ในกรณีที่ทราบค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาและค่าคงที่อัตราที่อุณหภูมิหนึ่ง (T_1) และต้องการหาค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาเดียวกันที่อุณหภูมิใดๆ (T_2) สามารถทำได้โดยการเขียนสมการที่ 2.6 สำหรับอุณหภูมิ T_1 และ T_2 จากนั้นนำสมการทั้งสองมาลบกันและจัดให้อยู่ในรูปสมการที่ 2.7

$$\begin{aligned} \text{ที่อุณหภูมิที่ } T_1 & \ln k_{A,T_1} = \ln A - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} \right) \\ \text{ที่อุณหภูมิที่ } T_2 & \ln k_{A,T_2} = \ln A - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} \right) \\ \ln \frac{k_{A,T_2}}{k_{A,T_1}} & = - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

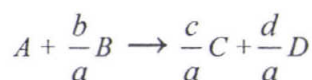
ค. ค่าคอนเวอร์ชัน (Conversion, X_A หรือ X)

ในการพิจารณาค่าคอนเวอร์ชัน จะต้องเลือกสารตั้งต้นขึ้นมาหนึ่งชนิดเพื่อใช้เป็นบรรทัดฐานในการคำนวณ และพิจารณาสารอื่นที่เหลือ โดยเทียบกับสารตั้งต้นดังกล่าว ซึ่งโดยทั่วไปจะเลือกสารตั้งต้นที่ถูกใช้ไปหมดก่อนเป็นสารตั้งต้นที่เป็นตัวกำหนดปฏิกิริยา ในการพิจารณาว่าสารตั้งต้นชนิดใดเป็นสารตั้งต้นที่เป็นตัวกำหนดปฏิกิริยาทำได้โดยพิจารณาสัดส่วนของสารตั้งต้นที่ถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์เทียบกับเลขดุลสมการ

สำหรับปฏิกิริยาเคมีทั่วไป



เมื่อเลือกสาร A เป็นสารตั้งต้นที่เป็นตัวกำหนดปฏิกิริยา และจะคำนวณค่าต่างๆ เทียบกับสาร A ที่ถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยา 1 โมล ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงเขียนสมการในรูปแบบใหม่



ค่าคอนเวอร์ชันของสาร A (X_A) เป็นค่าที่บอกว่าสาร A เกิดการเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเพียงใด นิยามได้ดังสมการที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_A = \frac{\text{moles of A reacted}}{\text{moles of A fed}} \quad (2.8)$$

สำหรับปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ ปฏิกิริยาจะหยุดลงเมื่อสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งหมดไป ดังนั้นค่าคอนเวอร์ชันสูงสุดที่จะเป็นไปได้คือ 1

สำหรับปฏิกิริยาผันกลับได้ ปฏิกิริยาจะดำเนินไปจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของปฏิกิริยา ดังนั้นค่าคอนเวอร์ชันสูงสุดที่จะเป็นไปได้คือค่าคอนเวอร์ชันที่สมดุล (Equilibrium conversion, X_{eq})

2.1.6 การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression analysis) [8-9]

การวิเคราะห์ความถดถอยเป็นวิธีการทางสถิติสำหรับหาตัวแปรที่เหมาะสมและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป โดยการหาค่าของตัวแปร y จากตัวแปร x ต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์หรือมีผลต่อตัวแปรที่ต้องการหาค่า โดยจะต้องมีการกำหนดหรือทราบค่าตัวแปร x ก่อนล่วงหน้า

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ความถดถอย คือ

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่และมีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด ถ้าตัวแปร x และ y มีความสัมพันธ์กันมาก แสดงว่าเมื่อ x มีค่าเปลี่ยนแปลงไป จะมีผลกระทบต่อค่า y อย่างมาก แต่ถ้าตัวแปร x และ y มีความสัมพันธ์กันน้อย แสดงว่าถ้า x มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลกระทบต่อค่า y น้อย

2. หาค่าความสัมพันธ์สำหรับทำนายหรือประมาณค่าตัวแปรในอนาคต เมื่อกำหนดค่าของตัวแปร x ให้

การหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง x และ y นั้น ขั้นแรกให้นำข้อมูลของตัวแปรทั้งสองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ ซึ่งเรียกว่าแผนภาพกระจาย (Scatter diagram) ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองจากแผนภาพการกระจายที่ได้ อาจอยู่ในรูปใดรูปหนึ่ง เช่น เส้นตรง พาราโบลา เอ็กซ์โพเนนเชียล เป็นต้น

การวิเคราะห์ความถดถอยแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

- ก. การวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย (Simple regression analysis)
- ข. การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อน (Multiple regression analysis)

ก. การวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม y 1 ตัวแปร กับตัวแปรอิสระ x 1 ตัวแปร สมมติความสัมพันธ์ระหว่าง y กับ x ในรูปเชิงเส้น ซึ่งมีสมการถดถอย ดังสมการที่ 2.9

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad (2.9)$$

ในความเป็นจริงอาจไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ จึงต้องใช้การสุ่มตัวอย่างในการสร้างสมการถดถอย จึงได้สมการถดถอยจากการประมาณ ดังสมการที่ 2.10

$$y_{predict} = a + bx_i \quad (2.10)$$

จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเป็น

$$e_i = y_i - y_{predict} \quad (2.11)$$

การประมาณค่าจากสมการถดถอยที่ดี ควรทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด วิธีที่นิยมใช้ คือ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) ที่กำหนดให้ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (Error sum square : S_E) คือ ผลบวกกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อน หรือผลต่างระหว่าง y_i และ $y_{predict}$ ให้มีค่าน้อยที่สุด ดังสมการที่ 2.12

$$S_E = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{predict})^2 \quad (2.12)$$

ข. การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อน

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม y 1 ตัวแปร กับตัวแปรอิสระ x ตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป โดยที่รูปแบบและการศึกษาจะทำเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย

เนื่องจากวัตถุประสงค์ที่สำคัญของการสร้างสมการถดถอยก็เพื่อประมาณหรือทำนายตัวแปร ดังนั้นเพื่อความมั่นใจว่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมานั้นสามารถนำไปประมาณหรือทำนายตัวแปรได้จริง ต้องมีการทดสอบโดยอาศัยค่าสถิติต่างๆ ได้แก่

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination : R^2) หมายถึง สัดส่วนตัวแปรอื่นๆ ที่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่ต้องการทำนายได้มากน้อยได้แค่ไหน หรือ

สัดส่วนของความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบที่เหมาะสม ดังสมการที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R^2 = \frac{S_T - S_E}{S_T} \quad (2.13)$$

เมื่อความแปรปรวนของค่าตัวแปรที่ต้องการทำนายทั้งหมด (Total sum of square : S_T) คือ ผลบวกกำลังสองของผลต่างระหว่าง y_i และ \bar{y}_i ดังสมการที่ 2.14

$$S_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (2.14)$$

ถ้าค่า R^2 มีค่ามาก แสดงว่าตัวแปรอื่นๆ และตัวแปรที่ต้องการทำนายมีความสัมพันธ์กันมาก หรือเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปรอื่นๆ สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรที่ต้องการทำนายได้มาก แต่ถ้า R^2 มีค่าน้อย แสดงว่าตัวแปรอื่นๆ และตัวแปรที่ต้องการทำนายมีความสัมพันธ์กันน้อย หรือเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปรอื่นๆ สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรที่ต้องการทำนายได้น้อย ค่า R^2 ไม่มีหน่วยและมีค่าระหว่าง 0-1 การประมาณค่าฟังก์ชันที่ดี $R^2 = 1$

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (Adjusted coefficient of determination : \bar{R}^2) ในกรณีที่ข้อมูลที่น่ามาศึกษามีจำนวนน้อย อาจทำให้ค่า R^2 ที่คำนวณได้สูงเกินไป ดังนั้นจึงนำค่า R^2 มาปรับค่าใหม่ ซึ่งในทางปฏิบัติมักนำเสนอทั้งค่า R^2 และ \bar{R}^2

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{(n - k - 1)} \quad (2.15)$$

ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณ (Standard error of estimate : S_{EE}) เป็นค่าที่แสดงว่าค่าตัวแปรที่ได้จากการทำนาย ($y_{predict}$) กับค่าตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจริง (y) มีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณยังมีค่าน้อยแสดงว่าค่า y กับ $y_{predict}$ มีค่าใกล้เคียงกันมาก ความน่าเชื่อถือของสมการถดถอยก็ยิ่งมากขึ้น

$$S_{EE} = \sqrt{\frac{S_E}{(n - k - 1)}} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Berrios และคณะ [10] ศึกษาข้อมูลพื้นฐานทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างกรดไขมันอิสระในน้ำมันดอกทานตะวันและเมทานอล โดยมีกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวลของปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและกรดโอเลอิกที่ใช้ตั้งแต่ 10:1 ถึง 80:1 จากผลการทดลองพบว่าอันดับปฏิกิริยาของปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับ คือ 1 และ 2 ตามลำดับความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อค่าคงที่อัตราได้จากกราฟความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส พลังงานกระตุ้นปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไปข้างหน้าที่คำนวณได้ลดลงจาก 50, 745 เป็น 44, 559 จูลต่อโมล เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลและกรดโอเลอิกที่ 60:1 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริก 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าความเป็นกรด (Acid value) ต่ำกว่า 1 mg KOH/g oil การลดลงของกรดไขมันอิสระนี้ช่วยให้ความเยิ้มระหว่างน้ำมันดีเซลชีวภาพและกลีเซอรินดีขึ้นในขั้นตอนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

Naomi Shibusaki-Kitakawa และคณะ [11] ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของไตรโอเลอีนกับเอทานอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่องโดยใช้ ion-exchange resin หลายชนิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนเอทิลโอเลเอตเป็นน้ำมันดีเซลชีวภาพ พบว่า anion-exchange resin มีประสิทธิภาพมากกว่า cation-exchange resin และมีความหนาแน่นของ cross-linking ต่ำกว่า และขนาดของอนุภาคเล็กกว่า ทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าคอนเวอร์ชันสูง และจากการรีเจนเนอเรชัน 3 ขั้นตอน สามารถนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันแบบกะได้ โดยไม่มีการสูญเสียแอกติวิตีของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะแบบต่อเนื่องสามารถผลิตเอทิลโอเลเอตได้ต่อเนื่องและมีค่าคอนเวอร์ชันสูง

J.M. Marchetti และคณะ [12] ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและเอทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ สามารถลดกรดไขมันอิสระได้ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ก่อนการนำไปผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ทั้งนี้กรดไขมันอิสระสามารถเปลี่ยนเป็นน้ำมันดีเซลชีวภาพได้ พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันคือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเอทานอลและน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ในงานวิจัยนี้ได้ค่าคอนเวอร์ชัน 80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Young-Moo Park และคณะ [13] พัฒนากระบวนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันพืชบริสุทธิ์กับเมทานอลในกระบวนการแบบต่อเนื่อง กรดไขมันอิสระที่อยู่ในน้ำมันพืชซึ่งเป็นปัญหาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันสามารถเปลี่ยนไปเป็นเมทิลเอสเทอร์ก่อนการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ และเปรียบเทียบแอกติวิตีของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์หลายชนิด พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา WO_3 บนตัวรองรับ ZrO_2 มีแอกติวิตีสูงและมีค่าคอนเวอร์ชันของกรดไขมันอิสระ 70 % ในระหว่างการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 140 ชั่วโมง

กาญจนา กรันทก และ วัชรารวรรณ วิษยานูวัตติ [2] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชบริสุทธิ์ที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 5% โดยน้ำหนัก ก่อนนำไปผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพ ในงานวิจัยนี้ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรินต่อกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชเท่ากับ 10.9:1 และ 16.2:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 180 และ 200 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยามูลฐานที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ $-r_{FFA} = kC_{FFA}C_{GL}$ กรัมโมลกรดไขมันอิสระ/ลิตร·ชั่วโมง ค่าคงที่อัตราเท่ากับ 1.95 มิลลิลิตร/โมล·ชั่วโมง และยังพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาถูกจำกัดด้วยการถ่ายเทมวลระหว่างวัฏภาคของกรดไขมันอิสระกับกลีเซอรินซึ่งไม่ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้อุณหภูมิมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

จิระนุช สืบสุข และ นรนา สวมแก้ว [3] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระ ในน้ำมันพืชใช้แล้วกับเมทานอลในสภาวะที่มีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์ และน้ำ ในงานวิจัยนี้ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อกรดไขมันอิสระ 1:1, 3:1, 6:1 และ 10:1 ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้วร้อยละ 10, 30, 50 และ 80 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยโมลของกรดซัลฟิวริกต่อกรดไขมันอิสระ 0.016:1, 0.032:1, 0.064:1 และ 0.128:1 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยามูลฐานจะได้

$$-r_{FFA} = k \times C_{H_2SO_4}^{0.223} \left(C_{FFA} C_{MeOH} - \frac{C_{ME} C_{H_2O}}{K} \right) \text{ กรัมโมลกรดไขมันอิสระต่อลิตร·นาที่ และมี}$$

$$\text{ค่าคงที่อัตรา } k = 4.62 \times 10^3 \exp \left[5107 \left(\frac{1}{313} - \frac{1}{T} \right) \right] \text{ และ } K = 6.154 \exp \left[-743 \left(\frac{1}{313} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

ประชาสันติ ไตรยสุทธิ และคณะ [14] หาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากเมล็ดคางพารา เพื่อให้ได้น้ำมันดีเซลชีวภาพปริมาณมากที่สุดต่อหนึ่งรอบการผลิต โดยมีวิธีการผลิต 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการลดกรดไขมันอิสระและขั้นตอนการทำน้ำมันดีเซลชีวภาพด้วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยให้ความร้อนน้ำมันดิบที่สกัดได้จากเมล็ดขางพาราที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เพื่อไล่น้ำออก จากนั้นทำการลดกรดไขมันอิสระโดยเติมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2.5% โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลและกรดไขมันอิสระเท่ากับ 6:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันกับเมทานอลในอัตราส่วน โดยโมลของน้ำมันจากเมล็ดขางพาราและเมทานอลเท่ากับ 3:1 และใช้โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ผลิตได้มากที่สุดคือ 89 % และจากการนำน้ำดีเซลชีวภาพที่ได้ไปทดสอบกับเครื่องยนต์หนึ่งกระบอกสูบที่ภาระสูงสุดคือ ความเร็วรอบ 1,300–2,300 รอบต่อนาที พบว่าเครื่องยนต์สามารถเดินได้ปกติไม่สะดุด สมรรถนะของน้ำมันดีเซลชีวภาพมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมาตรฐาน โดยค่าแรงบิดและค่าควันดำของน้ำมันดีเซลชีวภาพต่ำกว่าน้ำมันดีเซลมาตรฐานประมาณ 15 % ของกำลังม้า และ 22.13 % ตามลำดับ แต่การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลชีวภาพสูงกว่าประมาณ 22 %

ธีรวุฒิ สักคิฎกา และ ทิมพันธ์ แยมพรอย [15] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบและเมทานอลในกระบวนการแบบกะและใช้ HSiW ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งที่มีฤทธิ์เป็นกรดบนอะลูมินาออกไซด์ โดยศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม สัดส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเมทานอล อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาบนอะลูมินาออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ 4 กรัม ต่อ 25 กรัมของน้ำมันปาล์มดิบ สัดส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มดิบกับเมทานอล 1:20 ที่ 10% HSiW/Al₂O₃ และอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่ากับ 934 และค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาย้อนกลับเท่ากับ 4.1×10^{-5} อันดับปฏิกิริยาของกรดไขมันอิสระ คือ 4.3 อันดับปฏิกิริยาของเมทิลเอสเทอร์ คือ 3.7 อันดับปฏิกิริยาของน้ำ คือ 2.6

83213

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบคบรรจ

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบคบรรจ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ยาว 2 ฟุต ปริมาตร 304 มิลลิลิตร ติดตั้งในตู้อบควบคุมอุณหภูมิด้วยขาตั้งพร้อมที่จับ ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ต่อกับ static mixer เพื่อผสมเมทานอลและน้ำมันที่ถูกป้อนเข้ามาโดยปั๊มให้เข้ากันได้ดีก่อนป้อนสารทั้งสองเข้าด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบคบรรจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดลอง

3.2.1 การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันอิสระและเมทานอล

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดเครื่องอุปกรณ์แบบเบคบริจ
2. ชุดควบคุมอุณหภูมิ
3. ป้อนปรับอัตราการไหลได้
4. บีกเกอร์
5. กระจกดวง
6. นาฬิกาจับเวลา
7. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง
8. ขวดรูปชมพู่
9. เรซิน GF 101 ซึ่งมีข้อมูลจำเพาะ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของเรซิน GF 101

รูปแบบไอออน	H ⁺
กลุ่มฟังก์ชัน	กรดซัลโฟนิก
โครงสร้าง	สุพรรณแบบมาโครพอร์
ขนาดของเม็ด	0.4-1.25 มิลลิเมตร

สารเคมี

1. น้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
2. เมทานอล 99.5 เปอร์เซ็นต์

การเตรียมสารเคมี

เตรียมน้ำมันปาล์มที่มีกรดไขมันอิสระ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยการผสมน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ตรา Tesco กับกรดไขมันปาล์มในอัตราส่วนที่ทำให้น้ำมันปาล์มมีปริมาณกรดไขมันอิสระตามต้องการ (อัตราส่วนโดยประมาณน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ 1 ลิตร ต่กรดไขมันปาล์ม 90 กรัม และไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ เพื่อหาอัตราส่วนที่แน่นอน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ ก.1-ก.2
2. ปรับชุดควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
3. ปรับอัตราส่วนโดยมวลระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอลเท่ากับ 10:1 โดยน้ำหนัก (ใช้เมทานอลที่มากเกินไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว) และปรับอัตราการไหลของของผสมให้มี space time เท่ากับ 30 นาที
4. บันทึกปริมาณน้ำมันปาล์มและเมทานอลที่ป้อนออกมาทุกๆ 10 นาที เพื่อตรวจสอบความคงที่ของอัตราส่วนระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอล
5. เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ออกมาทุกๆ 1 ชั่วโมง อย่างน้อย 7 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 50 มิลลิลิตร
6. นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไปบีกเกอร์และให้ความร้อนด้วยสอตเพลทเพื่อระเหยเมทานอลออก และนำไปวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ
7. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 ถึง 6 ที่ space time 1 ชั่วโมง
8. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 ถึง 7 ที่อุณหภูมิ 70 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
9. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1 ถึงข้อ 8 โดยปรับอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอลเป็น 10:2 และ 10:3

อัตราส่วน โดย โมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอลใช้ค่าที่ใกล้เคียงเท่ากับการศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของกรดไขมันอิสระและเมทานอล 1:10 ถึง 1:80 สำหรับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันค่าเบื้องต้นที่กำหนดอาศัยข้อมูลจาก จิระนุช สืบสุข และ นรา สอนแก้ว [3]

3.2.2 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. บิวเรต
2. ขวดรูปชมพู่
3. หลอดหยด
4. ขาดั่งพร้อมที่จับ
5. กรวย
6. บีกเกอร์
7. ปีเปต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นประมาณ 0.1 โมลต่อลิตร
2. สารละลายฟีนอล์ฟทาליน ความเข้มข้น 1 กรัมในเอทานอล 100 มิลลิลิตร
3. เอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์

วิธีการทดลอง

1. ปิเปิดน้ำมันที่ระเหยเมทานอลออกแล้วจากข้อ 6 ในการทดลอง 3.2.1 ปริมาณ 20 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่
2. ละลายน้ำมันปาล์มที่ลดกรดไขมันอิสระแล้วด้วยตัวทำละลายเอทานอล แล้วเติมสารละลายฟีนอล์ฟทาליน 2-3 หยด
3. คำนวณหาปริมาณกรดไขมันอิสระจากปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ที่ใช้ไทเทรตเพื่อหาจุดยุติคือเมื่อสีของสารละลายเปลี่ยนเป็นชมพูอ่อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระที่สภาวะต่างๆ

ค่าความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระหลังจากที่ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันที่สภาวะต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1 การคำนวณแสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.1 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือในน้ำมันปาล์มหลังจากทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันที่สภาวะต่างๆ

สภาวะที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของน้ำมันและ เมทานอล	เวลาในการ ทำปฏิกิริยา (นาที)	กรดไขมันอิสระที่ เหลืออยู่ (%โดยน้ำหนัก)
1	60	10/1	30	2.60
2	60	10/1	60	2.20
3	60	10/3	30	1.70
4	60	10/3	60	0.35
5	70	10/1	30	2.30
6	70	10/2	45	1.10
7	70	10/3	30	1.30
8	80	10/1	30	1.40
9	80	10/1	60	0.48
10	80	10/3	30	0.40
11	80	10/3	60	0.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การหาคอนเวอร์ชันของกรดไขมันอิสระ

ค่าคอนเวอร์ชันของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันคำนวณโดยสมการที่ 2.8 ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าคอนเวอร์ชันของกรดไขมันอิสระที่สภาวะต่างๆ

สภาวะ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของน้ำมันปาล์มและ เมทานอล	เวลาในการ ทำปฏิกิริยา (นาที)	คอนเวอร์ชัน (เปอร์เซ็นต์)
1	60	10/1	30	48
2	60	10/1	60	56
3	60	10/3	30	66
4	60	10/3	60	93
5	70	10/1	30	54
6	70	10/2	45	78
7	70	10/3	30	74
8	80	10/1	30	72
9	80	10/1	60	90
10	80	10/3	30	92
11	80	10/3	60	97

จากการคำนวณที่ได้จากการทดลองที่สภาวะต่างๆ พบว่าค่าคอนเวอร์ชันจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยมวลระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอล อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น จากตารางที่ 4.2 พบว่าที่ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มและเมทานอล 10:3 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ได้ค่าคอนเวอร์ชัน 97 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มหลังการทำปฏิกริยา

เอสเทอร์ริฟิเคชัน

ผลที่ได้จากการทำปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มที่ลดปริมาณกรดไขมันอิสระแล้วด้วยปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 5 % โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.1 ส่วนบนของกรวยแยกคือปริมาณน้ำมันดีเซลชีวภาพ (เมทิลเอสเทอร์) ส่วนล่างคือปริมาณกลีเซอริน ผลได้ของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือ 0.16 % โดยน้ำหนัก จากการทำปฏิกริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันที่ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอลเท่ากับ 10:3 อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกริยา 80 องศาเซลเซียส และ 60 นาที ประมาณ 83% โดยน้ำหนัก ส่วนผลได้ของน้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 5% ประมาณ 68% โดยน้ำหนัก (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ค)

สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันคืออัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มกับเมทานอลเท่ากับ 10:2 ใช้ไปแคตลิสซึมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 75 นาที [14]

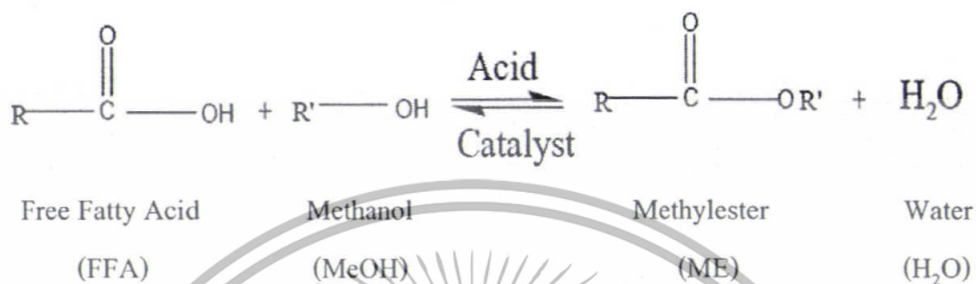


รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบการแยกชั้นระหว่างน้ำมันดีเซลชีวภาพและกลีเซอริน A คือ น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อย B คือ น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 5 %

4.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดไขมันอิสระและเมทานอล

4.4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่อัตรา

จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดไขมันอิสระ (FFA) และเมทานอล (MeOH) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์ (ME) และน้ำ (H₂O) ดังสมการ



ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาในถังกวนของเหลวเขียนในรูป

$$\frac{dF_{FFA}}{dV} = -\frac{dC_{FFA}}{dt} = -r_{FFA} = k_{FFA} C_{FFA}^\alpha C_{MeOH}^\beta - k_{FFA} C_{ME}^\gamma C_{H_2O}^\theta \quad (4.1)$$

เมื่อ F_{FFA} คือ อัตราการไหลเชิงโมลของกรดไขมันอิสระ

V คือ ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์

t คือ space time

เมื่อพิจารณาว่าการเติมเมทานอลที่มากเกินไป จึงไม่คิดว่ามีปฏิกิริยาย้อนกลับของเมทิลเอสเทอร์ทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดขึ้นมากนัก สามารถอนุมานได้ว่าปฏิกิริยาดำเนินไปทางขวาแบบจำลองปฏิกิริยาเคมีเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 เมื่อเทียบกับสารตั้งต้นแต่ละชนิด จึงลดรูปสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$-\frac{dC_{FFA}}{dt} = -r_{FFA} = k_{FFA} C_{FFA} C_{MeOH} \quad (4.2)$$

จากสมการที่ 2.3 และ 2.4 จะได้

$$C_{FFA} = C_{FFA0}(1 - X) \quad (4.3)$$

$$C_{MeOH} = C_{FFA0}(\Theta_{MeOH} - X) \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\frac{dC_{FFA0}(1-X)}{dt} = -r_{FFA} = k_{FFA} C_{FFA0}(1-X)C_{MeOH}(\Theta_{MeOH} - X) \quad (4.5)$$

$$dX = -r_{FFA} = k_{FFA} (1-X)C_{FFA0}(\Theta_{MeOH} - X)dt \quad (4.6)$$

เมื่อทำการอินทิเกรต จะได้ว่า

$$t = \frac{1}{k_{FFA} C_{FFA0}} \left[\frac{1}{\Theta_{MeOH} - 1} \ln \frac{\Theta_{MeOH} - X}{\Theta_{MeOH} (1-X)} \right] \quad (4.7)$$

$$tk_{FFA} C_{FFA0} (\Theta_{MeOH} - 1) = \ln \frac{\Theta_{MeOH} - X}{\Theta_{MeOH} (1-X)} \quad (4.8)$$

$$e^{tk_{FFA} C_{FFA0} (\Theta_{MeOH} - 1)} = \frac{\Theta_{MeOH} - X}{\Theta_{MeOH} (1-X)} \quad (4.9)$$

กำหนดให้

$$\beta = tk_{FFA} C_{FFA0} (\Theta_{MeOH} - 1) \quad (4.10)$$

$$e^\beta = \frac{\Theta_{MeOH} - X}{\Theta_{MeOH} (1-X)} \quad (4.11)$$

$$e^\beta \Theta_{MeOH} (1-X) = \Theta_{MeOH} - X \quad (4.12)$$

$$e^\beta \Theta_{MeOH} - e^\beta \Theta_{MeOH} X = \Theta_{MeOH} - X \quad (4.13)$$

$$e^\beta \Theta_{MeOH} X - X = e^\beta \Theta_{MeOH} - \Theta_{MeOH} \quad (4.14)$$

$$X = \frac{\Theta_{MeOH} (e^\beta - 1)}{e^\beta \Theta_{MeOH} - 1} \quad (4.14)$$

แทน $\beta = tk_{FFA} C_{FFA0} (\Theta_{MeOH} - 1)$ ลงใน สมการที่ 4.14 จะได้ว่า

$$X = \frac{\Theta_{MeOH} (e^{tk_{FFA} C_{FFA0} (\Theta_{MeOH} - 1)} - 1)}{e^{tk_{FFA} C_{FFA0} (\Theta_{MeOH} - 1)} (\Theta_{MeOH} - 1)} \quad (4.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

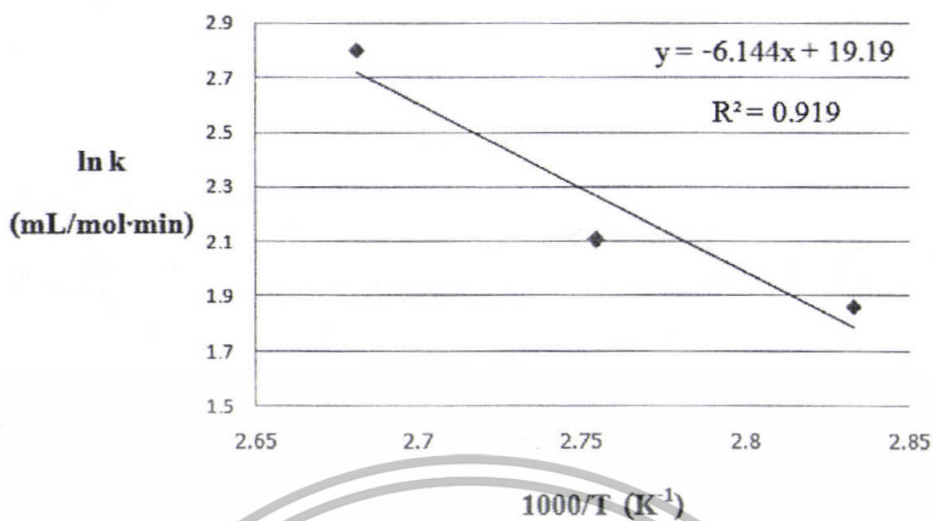
จากนั้นทำนายตัวแปรค่าคงที่ k ที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ทำให้ค่าผลต่างกำลังสองของค่าคอนเวอร์ชันคือค่าที่ทำให้ค่าความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อน หรือผลบวกกำลังสองของผลต่างระหว่างค่าคอนเวอร์ชันที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณของทุกสภาวะการทดลองมีค่าน้อยที่สุดด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) โดยใช้ฟังก์ชัน Solver ในโปรแกรม Excel ค่าคอนเวอร์ชันที่ได้จากการคำนวณเบื้องต้นจะยังติดตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ k_{FFA} จึงทำการทดลองสุ่มค่าตัวแปรที่เหมาะสม โดยการลองผิดลองถูก (Trial and error) โดยใช้เครื่องมือหาผลเฉลย (Solver) ในโปรแกรม Excel ได้ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาไปข้างหน้าที่อุณหภูมิต่างๆ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาไปข้างหน้าที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาไปข้างหน้า (มิลลิลิตร/โมล-นาท)
60	6.44
70	8.21
80	16.45

จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส k_{FFA} มีค่าเท่ากับ 16.45 มิลลิลิตร/โมล-นาท ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (S_e) หาได้จากสมการที่ 2.12 มีค่าเท่ากับ 0.0023

จากค่าคงที่อัตราที่ได้จากการทดลองในตารางที่ 4.3 เมื่อนำมาเขียนกราฟตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียสในสมการที่ 2.6 ระหว่าง $\ln k$ กับ $\frac{1}{T}$ แสดงในรูปที่ 4.2 จะได้เส้นตรงที่มีความชันคืออัตราส่วนของค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาต่อค่าคงที่ของแก๊ส จึงสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระและเมทานอลได้เท่ากับ 51,081 จูล/โมล และ ค่า A ของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 2.16×10^8 มิลลิลิตร/โมล-นาท



รูปที่ 4.2 กราฟอาร์เรเนียสของปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับเมทานอล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้ศึกษาการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มและข้อมูลพื้นฐานทางจลนพลศาสตร์ โดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอล ด้วยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุของตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำมันปาล์มมีปริมาณกรดไขมันอิสระ 5% โดยน้ำหนักของน้ำมัน ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มและเมทานอล 10:1, 10:2, และ 10:3 อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา (space time) 30 และ 60 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอล อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาจะมีผลให้เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันของกรดไขมันอิสระมีค่าสูงขึ้น สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างน้ำมันปาล์มและเมทานอล 10:3 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ได้ค่าคอนเวอร์ชันของกรดไขมันอิสระ 97% หรือมีกรดไขมันอิสระเหลือเพียง 0.16% เมื่อนำน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันแล้วมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์รีฟิเคชันพบว่าน้ำมันปาล์มที่ผ่านการลดกรดไขมันอิสระแล้วจะได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์หรือน้ำมันดีเซลชีวภาพมากกว่าน้ำมันปาล์มที่ยังไม่ได้ทำการลดกรดไขมันอิสระ และจากการวิเคราะห์ผลการทดลองเมื่อให้ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยามูลฐาน

$$-r_{FFA} = k_{FFA} C_{FFA} C_{MeOH}$$

$$k = 2.16 \times 10^5 \exp\left[\frac{-6,144}{T}\right] \text{ มิลลิโมลกรดไขมันอิสระ/ลิตร-นาที}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. [Online] Available; www.biodiesel.eng.psu.ac.th/activities/World_Smart_SMEs_2007
- [2] กาญจนา กรันทก, วัชรารธรรม วิชยานุวัตติ. 2549. “การลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน.” ปรึญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] จิระนุช สืบสุข, นรา สนวนแก้ว. 2548. “การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในน้ำมันพืชใช้แล้ว.” ปรึญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] ธนาทิพย์ อัสวคตุงสิทธิ์, นงรี เล้าหิ่ประเสริฐ, สุรญา นิตยพัฒนานนท์, ธราพงษ์ วิทิตสานต์. “ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเมทานอลโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์ (Section F) ปีที่ 3, ฉบับที่ 2 (2547/2004): 139-149
- [5] รศ.ดร. ดาวัดย์ นิยมถู่. 2538. “ชีวเคมีเล่ม 1 โมเลกุลชีวภาพ.” พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ประกานพริก.
- [6] อุยณีย์ วินิจขตคำนวณ. 2548. “คู่มือเรียนชีวเคมีเล่ม 1 โดย E-learning.” เชียงใหม่. โรงพิมพ์ดาวค้อมกราฟฟิค.
- [7] Fogler, H.S. 1999. “Elements of Chemical Reaction Engineering. 3rd ed.” New Jersey: Prentice Hall.
- [8] Chapra, S.C. and Canale, R.P. 1998. “Numerical Method for Engineers. 3rd ed.” New Jersey: Prentice Hall.
- [9] สายชล สีนสมบุรณ์ทอง. 2547. “สถิติวิศวกรรม.” กรุงเทพฯ: ภาควิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [10] Berrios, M., Sales, J., Martin, M.A. and Martin, A. 2007. “A kinetic study of the esterification of free fatty acids (FFA) in sunflower oil.” **Fuel**. 86: 2383–2388

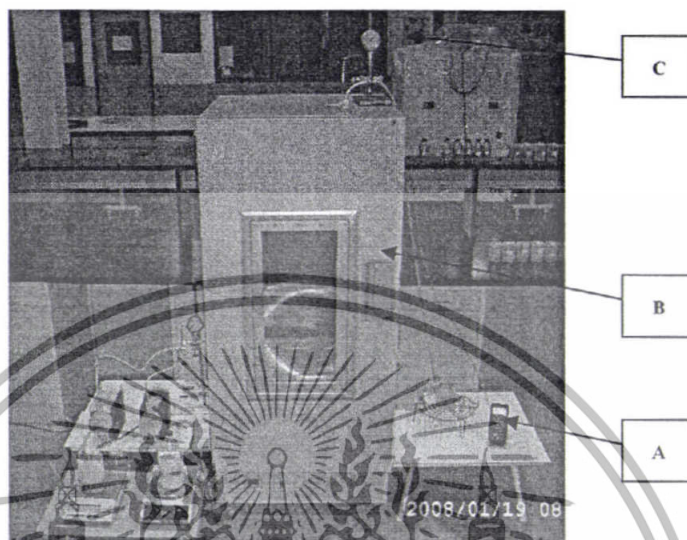
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] Naomi Shibasaki-Kitakawa, Hiroki Honda, Homare Kuribayashi, Takuji Toda, Takuya Fukumura and Toshikuni Yonemoto. 2007. "Biodiesel production using anionic ionexchange resin as heterogeneous catalyst." **Bioresource Technology**. 98: 416–421.
- [12] Marchetti, J.M., Miguel, V.U., Errazu, A.F. 2007. "Heterogeneous esterification of oil with high amount of free fatty acids." **Fuel**. 86: 906–910
- [13] Young-Moo Park, Dae-Won Lee, Deog-Keun Kim, Jin-Suck Lee and Kwan-Young Lee. 2008. "The heterogeneous catalyst system for the continuous conversion of free fatty acids in used vegetable oils for the production of biodiesel." **Catalysis Today** 131: 238–243
- [14] ประชาสันติ ไตรยสุทธี, กุลเชษฐ เพ็ชรทอง, พิสิษฐ์ เตชะรุ่งไพศาล, ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์, อธิพิณ วรพันธ์. 2549. "การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดยางพาราโดยวิธี กรด-เอสเทอร์ริฟิเคชันและด่าง-ทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน." *ปริยญานพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.*
- [15] ชีรวุฒิ ศักดิ์สุภา, ทิมพินรา เข้มพราย. 2549. "การศึกษาจลนพลศาสตร์ในกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบ." *ปริยญานพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.*
- [16] AOCS. 1997. Ca 5a-40: Free Fatty Acids. In: **Official Methods and Recommended Practices of the AOCS**. 5th ed. Illinois: American Oil Chemist's Society Press.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ก.1 อุปกรณ์ในการทดลอง

- จากรูป A คือ หน้าจอแสดงผลจากเทอร์โมคัปเปิล
B คือ ตัวควบคุมอุณหภูมิ
C คือ เกจวัดความดัน



รูปที่ ก.2 ชุดป้อนน้ำมันปาล์มและเมทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จากรูป A คือ เครื่องชั่งน้ำมันปาล์มทศนิยม 2 ตำแหน่ง
 B คือ น้ำมันปาล์มที่มีกรดไขมันอิสระ 5% โดยน้ำหนัก
 C คือ เครื่องชั่งเมทานอลทศนิยม 2 ตำแหน่ง
 D คือ เมทานอล
 E คือ เกจวัดความดัน
 F คือ ปีมแบบปรับอัตราการไหลได้สำหรับเมทานอล
 G คือ ปีมแบบปรับอัตราการไหลได้สำหรับน้ำมันปาล์ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การหาปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม [16]

ตามมาตรฐาน AOCS Official Method Ca 5a-40 [16] ได้กล่าวถึงการหาปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในตัวอย่าง เช่น น้ำมันพืชทั้งที่บริสุทธิ์และไม่บริสุทธิ์ น้ำมันปลา ไขมันสัตว์ดังนี้

การเตรียมสารเคมี

1. การเตรียมสารฟีนอล์ฟทาลิน ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ ในเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์
2. นำเอทานอลมาทำให้มีฤทธิ์เป็นกลาง โดยเติมฟีนอล์ฟทาลิน 2 มิลลิลิตร แล้วค่อยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปเรื่อยๆ จนสีของสารละลายเริ่มเปลี่ยนเป็นสีชมพู
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นตามตารางที่ ข.1
4. ชั่งน้ำมันตัวอย่างตามตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 น้ำหนักน้ำมันปาล์มตัวอย่าง ปริมาตรแอลกอฮอล์ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้กับปริมาณกรดไขมันอิสระในช่วงต่างๆ [16]

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

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ผสมเอทานอลที่ทำให้ค่าความเป็นกรดเป็นกลางกับน้ำมันปาล์มตัวอย่าง แล้วเติมสารละลายฟีนอล์ฟทาลิน 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

2. นำมาไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จนกลายเป็นสีชมพูโดยสีจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงเป็นเวลา 30 นาที บันทึกปริมาตรสารละลายของสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ [16]

1. เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระ (% Free fatty acid) ที่อยู่ในไขมันและน้ำมันส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของกรดโอเลอิก กรดไลโนเลอิก และกรดปาล์มมิติก

$$\text{ปริมาณกรดไขมันอิสระ (\%)} = \frac{V_{NaOH} \times C_{NaOH} \times 27.06}{W_{oil}} \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่ V_{NaOH} คือ ปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, มิลลิลิตร

C_{NaOH} คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, นอร์มอล

W_{oil} คือ น้ำหนักของน้ำมันปาล์ม, กรัม

ตัวอย่างการคำนวณ

1. เปอร์เซ็นต์ของกรดไขมันอิสระที่อยู่ในน้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 5% จากข้อมูลในตารางที่ ข.2

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณกรดไขมันอิสระ (\%)} &= \frac{38.2 \times 0.1 \times 27.06}{20.06} \\ &= 5.15\% \end{aligned}$$

2. ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ ข.2 และ ข.3

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลการหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระที่สภาวะต่างๆ ครั้งที่ 1

สภาวะ ที่	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราส่วนโดย น้ำหนักของ น้ำมันและ เมทานอล	เวลาในการ ทำปฏิกิริยา (นาที)	ปริมาณสาร ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ (มิลลิลิตร)	กรดไขมัน อิสระที่ เหลืออยู่ (%โดย น้ำหนัก)
1	60	10/1	30	20.03	19.2	2.59
2	60	10/1	60	20.90	17.1	2.21
3	60	10/3	30	20.62	13.0	1.71
4	60	10/3	60	17.79	2.4	0.37
5	70	10/1	30	22.10	19.2	2.35
6	70	10/2	45	20.52	8.5	1.12
7	70	10/3	30	20.10	9.5	1.28
8	80	10/1	30	20.16	10.2	1.37
9	80	10/1	60	20.07	3.6	0.49
10	80	10/3	30	20.05	2.9	0.39
11	80	10/3	60	20.01	1.2	0.16
12	น้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 5%			20.06	38.2	5.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลการหาเปอร์เซ็นต์กรดไขมันอิสระที่สภาวะต่างๆ ครั้งที่ 2

สภาวะ ที่	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราส่วนโดย น้ำหนักของ น้ำมันและ เมทานอล	เวลาในการ ทำปฏิกิริยา (นาที)	ปริมาณสาร ตัวอย่าง (กรัม)	ปริมาณ NaOH ที่ใช้ (มิลลิลิตร)	กรดไขมัน อิสระที่ เหลืออยู่ (%โดย น้ำหนัก)
1	60	10/1	30	20.30	19.5	2.60
2	60	10/1	60	20.49	16.5	2.18
3	60	10/3	30	20.15	12.6	1.69
4	60	10/3	60	20.13	2.5	0.34
5	70	10/1	30	22.51	18.7	2.25
6	70	10/2	45	20.39	8.1	1.07
7	70	10/3	30	20.00	9.7	1.31
8	80	10/1	30	20.45	10.8	1.43
9	80	10/1	60	20.72	3.6	0.47
10	80	10/3	30	20.41	3.1	0.41
11	80	10/3	60	19.07	1.1	0.16
12	น้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระ 5%			20.20	36.7	4.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 องค์ประกอบเฉลี่ยกรดไขมันของน้ำมันพืชบริสุทธิ์ก่อนและหลังการใช้ประกอบอาหาร [4]

ชนิดของกรดไขมัน	ชื่อของกรดไขมัน	ร้อยละของกรดไขมันในน้ำมันพืชบริสุทธิ์	
		ก่อนประกอบอาหาร	หลังประกอบอาหาร
C12:0	กรดลอริก (Lauric acid)	0.45	0.32
C14:0	กรดไมริสติก (Myristic acid)	0.38	0.93
C16:0	กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid)	34.13	38.37
C18:0	กรดสเตียริก (Stearic acid)	4.58	4.00
C20:0	กรดอราซิดิก (Arachidic acid)	0.34	0.34
กรดไขมันอิ่มตัว ทั้งหมด		40.38	43.97
C16:1	กรดปาล์มมิโตเลอิก (Palmitoleic acid)	1.51	0.25
C18:1	กรดโอเลอิก (Oleic acid)	42.89	45.59
C18:2	กรดไลโนเลอิก (Linoleic acid)	14.60	10.03
C18:3	กรดไลโนเลนิก (Linolenic acid)	0.62	0.16
กรดไขมันไม่อิ่มตัว ทั้งหมด		59.62	56.03

น้ำมันพืชบริสุทธิ์ก่อนนำไปประกอบอาหารมีกรดไขมันอิสระ ดังตารางที่ ข.2 ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย C16 และ C18 จากตารางสามารถคำนวณหาปริมาณกรดไขมันอิสระโดยการเฉลี่ยและได้มวลโมเลกุลของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มเป็น 270.6 g/mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การหาร้อยละผลได้ของน้ำมันดีเซลชีวภาพ

ร้อยละผลได้ของน้ำมันดีเซลชีวภาพจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มที่ทำและไม่ได้ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน คำนวณดังนี้

ร้อยละผลได้ของน้ำมันดีเซลชีวภาพหลังจากทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน

$$= (\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์/ปริมาณน้ำมันปาล์ม+เมทานอล}) \times 100 \quad (\text{ก.1})$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ร้อยละผลได้ของน้ำมันดีเซลชีวภาพน้ำมันปาล์มที่มีกรดไขมันอิสระ 0.16% โดยน้ำหนัก

$$\frac{203.51}{(201.06 + 44.00)} \times 100 = 82.90$$

ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ร้อยละผลได้ของน้ำมันดีเซลชีวภาพ

ชนิดของน้ำมันปาล์ม	สารตั้งต้น		ผลิตภัณฑ์		ร้อยละผลได้ของน้ำมันดีเซลชีวภาพ
	น้ำมันปาล์ม (กรัม)	เมทานอล (กรัม)	น้ำมันดีเซลชีวภาพ (กรัม)	กลีเซอริน (กรัม)	
น้ำมันปาล์มที่มีกรดไขมันอิสระ 0.16% โดยน้ำหนัก	201.06	44.00	203.51	37.88	82.90
น้ำมันปาล์มที่มีกรดไขมันอิสระ 5% โดยน้ำหนัก	200.00	44.00	166.41	78.46	68.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้