



ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์สำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากเอทานอล  
Heterogeneous Catalyst for Biodiesel Production from Ethanol

อัจฉรา สีม่วง  
Autchara Seemuang

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Chemical Engineering  
Prince of Songkla University

2552

๑

เลขหมู่	TP 159. C3 ๑๖๒ 2552 ๑๖.๒
Bib Key	31384๐
	A-9 ก.พ 2553

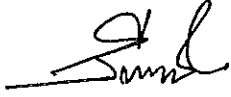
(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์    ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์สำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากเอทานอล

ผู้เขียน            นางสาวอัจฉรา สีม่วง

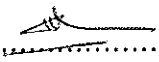
สาขาวิชา         วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก



.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนะวิไล)

คณะกรรมการสอบ



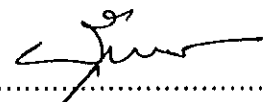
.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)



.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนะวิไล)



.....กรรมการ

(ดร.ธีระยุทธ หลีวิจิตร)



.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี



.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์สำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากเอทานอล
ผู้เขียน	นางสาวอังฉรา สีม่วง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2552

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันพลังงานทดแทนเป็นพลังงานที่มีความสำคัญ โดยเฉพาะ ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่ง โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตที่มีความสำคัญในประเทศไทยคือ น้ำมันปาล์มดิบ ในงานวิจัยทำการผลิตเอทิลเอสเทอร์แบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ที่มีลักษณะเป็นของแข็ง โดยในขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนการลดกรดไขมันอิสระให้ต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรดคือ กรดซัลฟิวริกบนอะลูมินา ถ่านกัมมันต์ และแอมเบอร์ลิสต์ 15 จากนั้นนำน้ำมันจากขั้นตอนแรกเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันซึ่งใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนอะลูมินา ถ่านกัมมันต์ และแอมเบอร์ลิสต์ 15 โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปทดสอบคุณสมบัติด้วย XRD, FT-IR, SEM และ BET โดยปัจจัยการศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์ คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา ( $H_2SO_4$ , KOH) บนตัวรองรับ ( $Al_2O_3$ , Activated carbon, Amberlyst 15) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา  $40\%H_2SO_4/Activated\ carbon$  มีประสิทธิภาพสูงในการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน โดยให้เปอร์เซ็นต์ Conversion ของกรดไขมันอิสระ 92% หรือเหลือกรดไขมันอิสระ 0.56 wt.% ที่สภาวะดังนี้ ตัวเร่งปฏิกิริยา  $40\%H_2SO_4/Activated\ carbon$  ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับน้ำมันปาล์มดิบ อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันสภาวะที่เหมาะสม คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา  $25\%KOH/Al_2O_3$  ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับน้ำมันปาล์มดิบ อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:9 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที โดยให้ Ethyl Ester 91.5 %

**Thesis Title**                    Heterogeneous Catalyst for Biodiesel Production from Ethanol  
**Author**                            Miss Autchara Seemuang  
**Major Program**                Chemical Engineering  
**Academic Year**                 2009

### ABSTRACT

Nowadays, renewable energy is important, especially biodiesel. The most of raw material is crude palm oil (CPO). In this work, the production of ethyl ester from CPO with two step was studied in a heterogeneous system. The first step of the process for reducing the free fatty acid (FFA) content of CPO less than 1 wt.% by esterification using Sulfuric acid support on Alumina, Activated carbon and Amberlyst 15 as solid acid catalyst. In the second step convert the product of first step to ethyl ester and glycerin by transesterification using Potassium hydroxide support on Alumina, Activated carbon and Amberlyst 15 as solid base catalyst. The catalyst was characterized by XRD, FT-IR, SEM and BET. The reaction variables used were different percent by weight of catalyst ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , KOH) on supporter ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Activated carbon, Amberlyst 15), catalyst amount, molar ratio of CPO to ethanol, reaction temperature and reaction time. The results showed that 40% $\text{H}_2\text{SO}_4$ /Activated carbon had high activity to catalyze the esterification of free fatty acids with ethanol. The conversion rate of FFA reached 92% or FFA consist 0.56 wt.% at 40% $\text{H}_2\text{SO}_4$ /Activated carbon amount of catalyst to CPO is 20 wt.%, molar ratio of CPO to ethanol is 1:20, reaction temperature at 60 °C and reaction time is 60 minutes and transesterification was performed at 60 °C for 120 minutes in a reaction system containing 25%KOH/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  amount of catalyst to CPO is 25 wt.% and molar ratio of CPO to ethanol is 1:9. The final product with ethyl ester was 91.5 %, obtained after the two step process.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนวิไล ประธานกรรมการ  
ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมทั้งให้กำลังใจและวิธีการแก้ปัญหาในการทำ  
วิทยานิพนธ์ ตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.พิมพ์พรณ มายเออร์ กรรมการที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์  
ดร.ชาคริต ทองอุไร รองศาสตราจารย์ ดร.จรัญ บุญกาญจน์ และ ดร.ธีระยุทธ หลีวิจิตร กรรมการ  
ผู้แทนคณะวิศวกรรมศาสตร์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ กรรมการผู้แทนบัณฑิต  
วิทยาลัยที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย ที่จัดสรรเงินทุนในการ  
วิจัย รวมทั้งศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์  
ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวไว้  
ณ ที่นี้ ที่มีส่วนให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับ  
นี้เสร็จสมบูรณ์

อัจฉรา สีม่วง

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำค้นเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	4
2.1 ส่วนประกอบของน้ำมันปาล์มดิบ	4
2.2 การผลิตเอทิลเอสเทอร์	6
2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)	10
2.4 ตัวรองรับ (Supporter)	12
2.5 เอทานอล	13
2.6 ซ็อดี-ซ็อดียของไบ โอดีเซล	14
2.7งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
2.8 การหาร้อยละการเปลี่ยน (%Conversion)	18
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	19
3.1 วัสดุ	19
3.2 อุปกรณ์	19
3.3 วิธีการศึกษา	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	30
4.1 ลักษณะและคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา	30
4.2 การผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบ	35
4.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน	36
4.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน	48
4.5 สมบัติของเอทิลเอสเทอร์ตามมาตรฐานต่างๆ	55
4.6 ซ็อดีและซ็อดียของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ในการผลิตเอทิลเอสเทอร์	56
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	58
	(6)

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
5.1 คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา	58
5.2 การศึกษาปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน	58
5.3 การศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน	59
5.4 สมบัติของเอทิลเอสเตอ์	59
5.5 ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์	66
ภาคผนวก ข ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอ์ ของกรดไขมัน	82
ภาคผนวก ค ข้อมูลดิบ	87
ภาคผนวก ง การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน	102
ประวัติผู้แต่ง	107

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1 สูตร โครงสร้างของกรดไขมัน	5
2 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม	6
3 ข้อเปรียบเทียบระหว่างการผลิตไบโอดีเซลจากเอทานอลและเมทานอล	9
4 ข้อเปรียบเทียบระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์	10
5 แสดงตารางการทดลองปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน	26
6 แสดงพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด	34
7 สรุปผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRD และ FT-IR	35
8 องค์ประกอบน้ำมันปาล์มดิบจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TLC	36
9 แสดงสถานะที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดจากปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน	45
10 แสดงสถานะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเทียบกับงานวิจัยต่างๆ	55
11 แสดงสมบัติของเอทิลเอสเทอร์เปรียบเทียบกับมาตรฐานต่างๆ	56



## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1 แสดงลักษณะตัวรองรับแต่ละชนิด (a) อะลูมินา, (b) ถ่านกัมมันต์ และ (c) แอมเบอร์ลิสต์ 15	13
2 แสดงอุปกรณ์การทดลอง	21
3 แสดงเป้าอัดตัวเร่งปฏิกิริยา	22
4 แสดงเครื่องอัดไฮดรอลิก	23
5 แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค SEM กำลังขยาย x 500 (a) Pure Activated carbon, (b) 40% $H_2SO_4$ /Activated carbon และ (c) 35%KOH/Activated carbon	31
6 แสดง XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Activated carbon, 10% $H_2SO_4$ /Activated carbon, 20% $H_2SO_4$ /Activated carbon และ 30% $H_2SO_4$ /Activated carbon	32
7 แสดง XRD ของ Pure Activated carbon, KOH, 35%KOH/Activated carbon, 35%KOH/Amberlyst 15 และ 25%KOH/ $Al_2O_3$	33
8 แสดงหมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค FT-IR Spectroscopy ของตัวเร่งปฏิกิริยา $H_2SO_4$ /Activated carbon ที่แต่ละความเข้มข้น	34
9 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับชนิดของตัวรองรับแต่ละชนิด ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมล CPO:ethanol 1:20 อุณหภูมิ 60 °C และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที	37
10 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 20% $H_2SO_4$ / $Al_2O_3$ อัตราส่วนเชิงโมล CPO:ethanol 1:20 อุณหภูมิ 60 °C และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที	38
11 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับอัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมัน ปาล์มดิบต่อเอทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 20% $H_2SO_4$ / $Al_2O_3$ ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO อุณหภูมิ 60 °C และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที	39
12 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับเปอร์เซ็นต์โหลด $H_2SO_4$ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมล CPO:ethanol 1:20 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที (a) $\blacklozenge$ $H_2SO_4$ / $Al_2O_3$ , (b) $\blacksquare$ $H_2SO_4$ /Activated carbon และ (c) $\blacktriangle$ $H_2SO_4$ /Amberlyst 15	40
13 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับปริมาณร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยา	41

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
<p>เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมล CPO:ethanol 1:20 อุณหภูมิ 60 °C และ เวลา ในการทำปฏิกิริยา 60 นาที (a) ♦ 42%<math>H_2SO_4/Al_2O_3</math>, (b) ■ 40%<math>H_2SO_4/Activated\ carbon</math> และ (c) ▲ 30%<math>H_2SO_4/Amberlyst\ 15</math></p>	
<p>14 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับอัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบ ต่อเอทานอล อุณหภูมิ 60 °C และ เวลาในการ ทำปฏิกิริยา 60 นาที (a) ♦ 42%<math>H_2SO_4/Al_2O_3</math> ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO, (b) ■ 40%<math>H_2SO_4/Activated\ carbon</math> ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO และ (c) ▲ 30%<math>H_2SO_4/Amberlyst\ 15</math> ปริมาณ 25 wt.% เทียบกับCPO</p>	42
<p>15 แสดง % Conversion ของกรดไขมันอิสระกับอุณหภูมิ อัตราส่วนเชิงโมล CPO:ethanol 1:20 เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที (a) ♦ 42%<math>H_2SO_4/Al_2O_3</math> ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO, (b) ■ 40%<math>H_2SO_4/Activated\ carbon</math> ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO และ (c) ▲ 30%<math>H_2SO_4/Amberlyst\ 15</math> ปริมาณ 25 wt.% เทียบกับCPO</p>	43
<p>16 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับเวลา อัตราส่วนเชิงโมล CPO:ethanol 1:20 (a) ♦ 42%<math>H_2SO_4/Al_2O_3</math> ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO อุณหภูมิ 80 °C (b) ■ 40%<math>H_2SO_4/Activated\ carbon</math> ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO อุณหภูมิ 60 °C (c) ▲ 30%<math>H_2SO_4/Amberlyst\ 15</math> ปริมาณ 25 wt.% เทียบกับCPO อุณหภูมิ 60 °C</p>	44
<p>17 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับจำนวนครั้งการใช้ซ้ำ ที่อัตราส่วนเชิง โมล CPO:ethanol 1:20 เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที (a) ♦ 42%<math>H_2SO_4/Al_2O_3</math> ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO อุณหภูมิ 80 °C, (b) ■ 40%<math>H_2SO_4/Activated\ carbon</math> ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO อุณหภูมิ 60 °C และ (c) ▲ 35%<math>H_2SO_4/Amberlyst\ 15</math> ปริมาณ 25 wt.% เทียบกับCPO อุณหภูมิ 60 °C</p>	46
<p>18 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับชนิดของแอลกอฮอล์ระหว่าง เอทานอลและเมทานอล ที่ 40% <math>H_2SO_4/Activated\ carbon</math> ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิง โมล CPO:ethanol 1:20 ที่อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที</p>	47
<p>19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเทอร์กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนเชิง โมล CPO:Ethanol 1:9 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาการทำปฏิกิริยา 120 นาที</p>	49

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเทอร์กับอัตราส่วนเชิง โมลของ น้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 30wt.% เทียบกับCPO อุณหภูมิ 60°C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที	50
21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเทอร์กับอุณหภูมิ ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 35%KOH/Activated carbon ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPOอัตราส่วนเชิง โมล CPO:Ethanol 1:9 และเวลาการทำปฏิกิริยา 120 นาที	50
22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเทอร์กับปริมาณต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 35%KOH/Activated carbon ที่อัตราส่วนเชิง โมล CPO:Ethanol 1:9 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที	51
23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเทอร์กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 25%KOH/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ที่อัตราส่วนเชิง โมลCPO:Ethanol 1:9 อุณหภูมิ 60°C และเวลา การทำปฏิกิริยา120 นาที	53
24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเทอร์กับชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนเชิง โมล CPO:Ethanol 1:9 อุณหภูมิ 60°C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt.% เทียบกับCPO	54

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำตามเรื่อง

ปัจจุบันพบว่าราคาน้ำมันมีการปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไม่มีแนวโน้มที่จะลดลง อีกทั้งความต้องการเสริมสร้างความมั่นคงในด้านพลังงานของประเทศ รวมถึงความต้องการลดมลพิษ เพื่อให้สิ่งแวดล้อมดีขึ้น ทำให้มีหลายหน่วยงานได้ทำการวิจัยเรื่องพลังงานทดแทน ซึ่งในปัจจุบัน ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทดแทนประเภทหนึ่งที่ได้รับความสนใจ ที่สามารถผลิตได้จากน้ำมันพืช หรือไขมันสัตว์ การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดมลพิษทางอากาศและลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก การเผาไหม้จะสมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซลซึ่งนำไปสู่การลดเขม่าและควันดำ การลดปริมาณสารไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด การลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ และการลดสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Amish และคณะ 2008) สำหรับวัตถุดิบหลักในประเทศไทยที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล คือ ปาล์มน้ำมัน เนื่องจากปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีศักยภาพในการแข่งขันสูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่น ทั้งด้านการผลิตและการตลาด คือ มีต้นทุนการผลิตและราคาต่ำกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น นอกจากนี้ปาล์มน้ำมันยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลายทั้งในสินค้าอุปโภคและบริโภค (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2547)

ไบโอดีเซลเป็นสารประกอบเอสเทอร์ ซึ่งนิยมใช้เมทิลแอลกอฮอล์หรือเอทิลแอลกอฮอล์ได้เป็นเมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ ตามลำดับ แต่ในกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ โดยทั่วไปต้องใช้เมทานอลในปริมาณมากเกินพอที่ใช้ในปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ได้ผลผลิตสูง ทำให้มีเมทานอลเหลือจากปฏิกิริยาจำนวนหนึ่ง โดยบางส่วนจะติดไปกับน้ำล้างในขั้นตอนการล้างเมทิลเอสเทอร์ บางส่วนติดไปกับเมทิลเอสเทอร์ซึ่งถูกนำไปประเหยออกเพื่อให้ได้เมทิลเอสเทอร์ที่บริสุทธิ์ ซึ่งปัญหาดังกล่าวจะเกิดกับโรงงานที่ไม่มีการลงทุนในระบบการจัดการหรือป้องกันการปล่อยสารเมทานอลสู่สิ่งแวดล้อมทั้งในรูปของไอระเหย หรือน้ำทิ้ง เนื่องจากต้องการลดต้นทุนการผลิต หรือเป็นโรงงานขนาดเล็กที่ผู้ประกอบการขาดความรู้ความเข้าใจเรื่องสิ่งแวดล้อม ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจำเป็นต้องดูแลควบคุมตั้งแต่ขั้นตอนการอนุญาตตั้งโรงงาน และตรวจสอบการปล่อยสารเมทานอลที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ หากร่างกายได้รับสารเมทานอลเข้าไปเป็นจำนวนมาก หรือสะสมในร่างกายเป็นเวลานาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ต้องการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จึงเลือกใช้เอทานอลแทนการใช้เมทานอลในกระบวนการผลิต

ไบโอดีเซลซึ่งเป็นสารที่ไม่อันตราย เนื่องจากผลิตได้จากพืชประเภทแป้งหรือน้ำตาล ทำให้ได้ไบโอดีเซลชนิดเอทิลเอสเตอร์ เช่นเดียวกับงานทดลองผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิง ในโครงการส่วนพระองค์ สวนจิตรลดาที่ได้ผลิตและใช้เอทิลเอสเตอร์ อีกทั้งการส่งเสริมให้ใช้เอทานอลมาผลิตเอทิลเอสเตอร์ ช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศจากการนำเข้ามาทานอล รวมทั้งยังมีส่วนช่วยสร้างความมั่นคงด้านพลังงานและส่งเสริมภาคการเกษตรของประเทศให้มีความยั่งยืนด้วย (ฐานเศรษฐกิจ, 2549)

ในการผลิตเอทิลเอสเตอร์ถ้าหากน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) มากกว่า 1 % โดยน้ำหนัก การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบสทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระจะได้สบู่เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งสบู่ที่ได้จะไปยับยั้งการแยกชั้นระหว่างเอทิลเอสเตอร์กับกลีเซอริน และยับยั้งการเกิดเอทิลเอสเตอร์ ยิ่งไปกว่านั้นขั้นตอนทำความสะอาดเอทิลเอสเตอร์ต้องใช้น้ำเป็นตัวทำความสะอาด ซึ่งจะทำให้เกิดน้ำเสียเป็นจำนวนมาก และยากต่อการแยกกลีเซอรินออกจากเอทิลเอสเตอร์ จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการลดกรดไขมันอิสระให้ต่ำกว่า 1% โดยน้ำหนัก โดยมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตเป็น 2 ขั้นตอนซึ่งขั้นตอนแรกเป็นการลดกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่า 1% โดยน้ำหนัก ด้วยปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนแรกเข้าสู่ขั้นตอนที่สอง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Wang และคณะ 2007) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมทั้งปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันต้องมีลักษณะเป็นของแข็ง โดยส่วนใหญ่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst) ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็ง สามารถนำออกจากปฏิกิริยาได้ง่าย ทำให้การตกค้างของสารพิษมีน้อยลง ช่วยลดการกัดกร่อน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยายังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ซึ่งเป็นทางหนึ่งที่สามารถลดต้นทุนได้ (Dossin และคณะ 2006)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาหาวิธีการผลิตเอทิลเอสเตอร์ เพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันทางด้านราคากับดีเซลที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยการเลือกวัตถุดิบที่มีราคาต่ำ คือ น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil) ซึ่งเป็นน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระสูง (น้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระสูงกว่า 1 % โดยน้ำหนัก) มาผลิตเอทิลเอสเตอร์แบบสองขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนแรกเป็นการลดกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่า 1% โดยน้ำหนัก ด้วยปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันใช้  $H_2SO_4/Al_2O_3$ ,  $H_2SO_4/Activated\ carbon$  และ  $H_2SO_4/Amberlyst\ 15$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และขั้นตอนที่สองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $KOH/Al_2O_3$ ,  $KOH/Activated\ carbon$  และ  $KOH/Amberlyst\ 15$  ในกระบวนการ ทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน โดยทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ในการผลิตเอทิลเอสเตอร์จากน้ำมันปาล์มดิบด้วย

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ซึ่งสามารถกำจัดออกจากปฏิกิริยาได้ง่าย ทำให้การตกค้างของสารพิษมีน้อยลง อีกทั้งยังลดจำนวนน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนการทำความสะอาดเอทิลเอสเทอร์ได้อีกด้วย นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยายังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้จึงมีความเป็นไปได้ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ในกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์

## 1.2 วัตถุประสงค์

- (1) ศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์
- (2) ศึกษาการใช้เอทานอลในการผลิต ไบโอดีเซล
- (3) ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของเอทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน

## 1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- (1) ทราบปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดเอทิลเอสเทอร์
- (2) ทราบถึงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันและปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน
- (3) ทราบคุณสมบัติของเอทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์
- (4) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการปรับปรุงวิธีการผลิตเอทิลเอสเทอร์ให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้น

## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร

ปาล์มน้ำมันมีต้นกำเนิดอยู่ทางตะวันตกและตอนกลางของทวีปอเมริกา ต่อมาได้แพร่เข้าไปในทวีปอเมริกาใต้โดยสันนิษฐานว่าเกิดขึ้นในยุคล่าอาณานิคม ปาล์มน้ำมันจัดอยู่ในตระกูล *Palme* หรือ *Palmaceae* เป็นตระกูลย่อยเดียวกันกับมะพร้าว คือ *Eliaes* ปาล์มน้ำมันแบ่งออกเป็น 3 สายพันธุ์ คือ *Eliaes guineensis*, *Eliaes oleifera* และ *Eliaes odora* สำหรับสองสายพันธุ์หลังไม่นิยมปลูกเนื่องจากเติบโตช้าและให้ผลเล็ก พันธุ์ที่นิยมปลูกเชิงเศรษฐกิจในปัจจุบัน คือ *Eliaes guineensis* ปาล์มน้ำมันออกผลเป็นทะลาย ส่วนของผลมีเปลือกชั้นนอก (*Exocarp*) และชั้นกลาง (*Mesocarp*) ที่ประกอบด้วยเนื้อเยื่อไขมัน ซึ่งเมื่อคั้นออกมาได้ผลผลิต เรียกว่า น้ำมันปาล์มดิบ (*Crude Palm Oil, CPO*) โดยมีไขมันรวมประมาณ 73.2% โดยน้ำหนัก สำหรับชั้นในของผล (*Endocarp*) จะหุ้มด้วยกะลา ภายในประกอบด้วยเนื้อซึ่งสามารถนำมาผลิตน้ำมัน โดยมีคุณสมบัติแตกต่างจากน้ำมันที่ได้จากเปลือกนอก เมื่อคั้นออกมาเรียกผลผลิตส่วนนี้ว่า น้ำมันเมล็ดใน (*Kernel oil*) (กิตติภูมิ, 2548)

#### 2.1 ส่วนประกอบของน้ำมันปาล์มดิบ (*Crude Palm Oil, CPO*)

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจทางภาคใต้ของประเทศไทย กระบวนการผลิตเริ่มจากการหีบผลปาล์มสุกเพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มดิบแล้วกลั่นเป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์หรือน้ำมันปาล์มรีไฟน์ (*Refined Palm Oil*) จากนั้นจึงผ่านกระบวนการแยกลำดับส่วน (*Fractionation*) เพื่อแยกสเตอริน (*Stearin*) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีจุดหลอมเหลวสูงออกจากโอเลอิน (*Olein*) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่ำ สเตอรินเป็นส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลง โดยมีส่วนประกอบเป็นจำนวนมากเป็นกรดไขมันอิ่มตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดปาล์มมิติก (*Palmitic, C16:0*) โอเลอินเป็นส่วนของเหลวที่เหลือจากการตกผลึกของสเตอริน ซึ่งมีส่วนประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงกว่า เช่น กรดโอเลอิก (*Oleic, C18:1*) และลิโนเลอิก (*Linoleic, C18:2*) (Cornilius, 1973) โดยตารางที่ 1 แสดงสูตรโครงสร้าง ชื่อทางวิทยาศาสตร์ของกรดไขมันทั่วไป ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม

ตารางที่ 1 สูตรโครงสร้างของกรดไขมัน

Fatty acid	Systematic name	Structure <sup>a</sup>	Formula
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-Octadecanoic	18:1	$C_{18}H_{34}O_2$
Linoleic	cis-9,cis-12-Octadecadienoic	18:2	$C_{18}H_{32}O_2$
Linolenic	cis-9,cis-12,cis-15-Octadecatrienoic	18:3	$C_{18}H_{30}O_2$
Erucic	cis-13-docosenoic	22:1	$C_{22}H_{42}O_2$

<sup>a</sup> x:y x แทนด้วยจำนวนคาร์บอนในกรดไขมัน y แทนด้วยจำนวนพันธะคู่ในกรดไขมัน

ที่มา : Barnwal และ Sharma (2004)



ตารางที่ 2 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม

กรดไขมัน	สูตรโครงสร้าง	น้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil)	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Palm Kernel Oil)
กรดไขมันอิ่มตัว		50%	82%
Caproic	6:0	-	0.1-0.5
Caprylic	8:0	-	3.4-5.9
Capric	10:0	-	3.3-4.4
Lauric	12:0	0.1-0.4	46.3-51
Myristic	14:0	1.0-1.4	14.3-16.8
Palmitic	16:0	40.9-47.5	6.5-8.9
Stearic	18:0	3.8-4.8	1.6-2.6
Arachidic	20:0	0-0.8	-
กรดไขมันไม่อิ่มตัว		50%	18%
Palmitoleic	C16:1	0-0.6	-
Oleic	C18:1	36.4-41.2	13.2-16.4
Linoleic	C18:2	9.2-11.6	2.2-3.4
Linolenic	C18:3	0-0.5	-
	Others	-	0.0.9

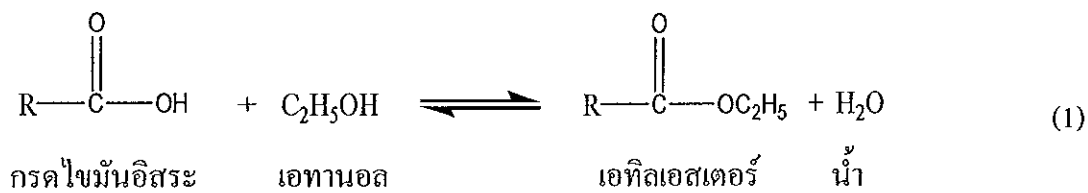
ที่มา : <http://it.doa.go.th/palm/index.html>

## 2.2 การผลิตเอทิลเอสเตอร์

เอทิลเอสเตอร์สามารถผลิตได้จากน้ำมันพืช ไขมันสัตว์หรือแม้กระทั่งน้ำมันพืชใช้แล้ว ถ้าหากน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีปริมาณกรดไขมันอิสระมากกว่า 1 % โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นเบสทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระจะได้สบู่เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งสบู่ที่ได้จะไปยับยั้งการเกิดเอทิลเอสเตอร์ จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการลดกรดไขมันอิสระให้ต่ำกว่า 1%

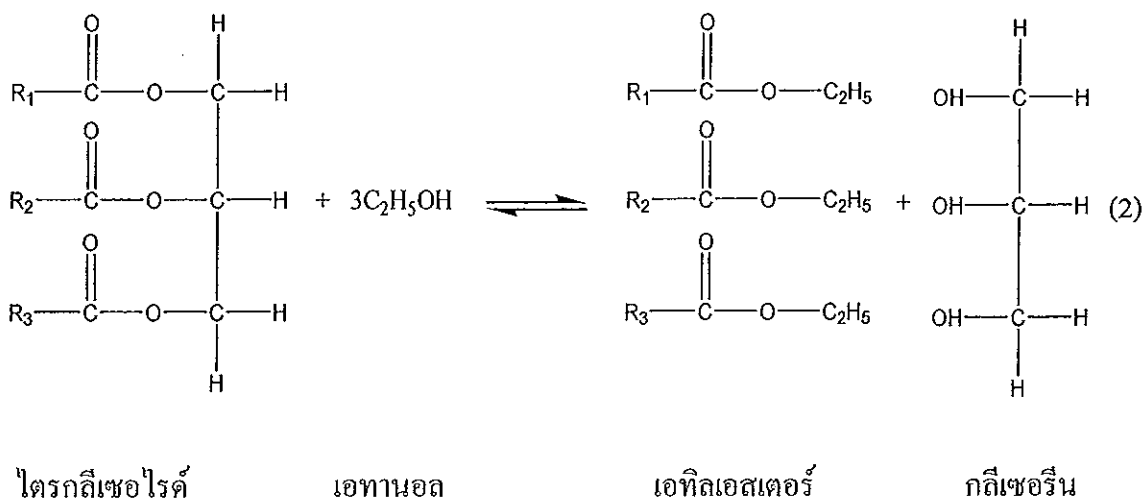
โดยน้ำหนัก โดยได้มีการพัฒนาการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากขั้นตอนเดียวเป็นแบบ 2 ขั้นตอนโดยขั้นตอนแรกเป็นปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน (Esterification) จากนั้นนำผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนแรกเข้าสู่ขั้นตอนที่สอง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification)

(1) ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนแรกจะทำเพื่อลดกรดไขมันอิสระให้เหลือน้อยกว่า 1% โดยน้ำหนัก ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันแสดงได้ดังสมการ ที่ 1

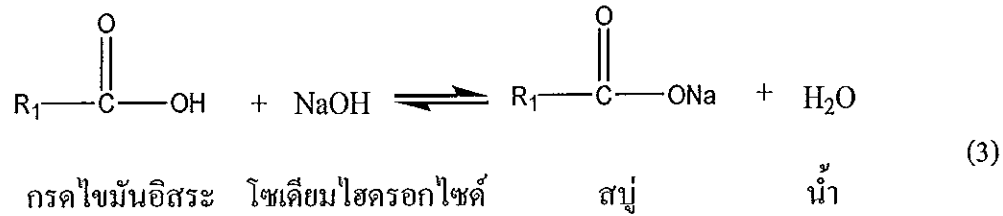


(2) ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ซึ่งนิยมใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและมีปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification) เกิดขึ้นด้วย ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นสบู่ ดังสมการที่ 3

การผลิตเอทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเกิดจากไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้กลีเซอรินกับเอทิลเอสเทอร์ ดังสมการที่ 2



สมการที่ 3 แสดงปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน



ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อผลที่ได้ในกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์มี 5 ปัจจัย ได้แก่

- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ดี
- อัตราส่วนระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์
- ชนิดและความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยา
- การผสมสารตั้งต้น
- ความบริสุทธิ์ของสารทำปฏิกิริยา

โดยปกติการผลิตไบโอดีเซลนิยมใช้เมทานอลทำปฏิกิริยากับน้ำมันพืชได้เป็นเมทิลเอสเทอร์ แต่ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากเอทานอลหรือเรียกว่าเอทิลเอสเทอร์ โดยข้อดีข้อด้อยของแอลกอฮอล์แต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อเปรียบเทียบระหว่างการผลิตไบโอดีเซลจากเอทานอลและเมทานอล

แอลกอฮอล์	ข้อดี	ข้อด้อย
เอทานอล	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นสารเคมีที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ผลิตเอทิลเอสเทอร์และสิ่งแวดล้อมเนื่องจากผลิตจากพืช เช่น อ้อย มันสำปะหลัง</li> <li>- เอทิลเอสเทอร์มีคุณสมบัติที่ดีกว่าในด้านของจุดขุ่นและจุดไหลเทต่ำกว่าเมทิลเอสเทอร์</li> <li>- ก्लीเซอร์ลินที่ได้จากการผลิตเอทิลเอสเทอร์ที่มีเอทานอลปนเปื้อนอยู่จะไม่ส่งผลอันตราย ถ้าหากนำไปใช้ เช่น นำไปผลิตเครื่องสำอาง</li> <li>- เสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงานและส่งเสริมภาคการเกษตรของประเทศให้มีความมั่นคง</li> <li>- ช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศจากการนำเข้าเมทานอล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เอทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้มี Conversion ต่ำกว่าเมทิลเอสเทอร์</li> <li>- หลังจากทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันสารละลายที่ได้จะรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เกิดการแยกชั้นระหว่างกลีเซอร์ลินกับเอทิลเอสเทอร์ จึงยากต่อการแยกเอทิลเอสเทอร์ออกจากกลีเซอร์ลิน</li> </ul>
เมทานอล	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เมทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้มี Conversion สูงกว่าเอทิลเอสเทอร์</li> <li>- หลังจากทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันสารละลายที่ได้เกิดการแยกชั้นระหว่างกลีเซอร์ลินและเมทิลเอสเทอร์จึงง่ายต่อการแยกเมทิลเอสเทอร์ออกจากกลีเซอร์ลิน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นสารเคมีสังเคราะห์ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพหากร่างกายได้รับเข้าไปเป็นจำนวนมาก หรือสะสมในร่างกายเป็นเวลานาน</li> <li>- ทำให้สูญเสียเงินตราจากการนำเข้าจากต่างประเทศ</li> </ul>

ที่มา: Encinar และคณะ (2007), Marchetti และคณะ (2006)

Issariyakul และคณะ (2006)

การผลิตเอทิลเอสเทอร์นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ในการเร่งปฏิกิริยา แต่ งานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ โดยข้อดีข้อด้อยของตัวเร่ง ปฏิกิริยาแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ข้อเปรียบเทียบระหว่างการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์และ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ข้อดี	ข้อด้อย
เอกพันธ์ (Homogeneous)	- ทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าแบบ Homogeneous	- ไม่สามารถแยกออกจากปฏิกิริยา ได้ - มีฤทธิ์ต่อการกัดกร่อนอุปกรณ์ - เพิ่มปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากการ ล้างเอทิลเอสเทอร์
วิวิธพันธุ์ (Heterogeneous)	- แยกออกจากปฏิกิริยาได้ง่าย - นำกลับมาใช้ซ้ำได้ - ลดการกัดกร่อนอุปกรณ์ - ลดน้ำเสียที่เกิดจากการล้าง เอทิลเอสเทอร์ - เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	- ทำปฏิกิริยาได้น้อยกว่าแบบ Homogeneous

ที่มา : Xie และคณะ (2006)

### 2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

คำว่า Catalysis มาจากภาษากรีก 2 คำ คือ คตะ (Cata) ซึ่งหมายถึง ลดลง และคำ ว่า ไลไซน์ (Lysein) ซึ่งหมายถึง แยกหักหรือแยก ความหมายที่ขอมารับกันทั่วไป คือ สารที่เพิ่มอัตรา การวิ่งเข้าหาจุดสมดุลย์ของระบบปฏิกิริยาเคมี โดยที่ตัวมันเองไม่ได้ถูกใช้ไปในกระบวนการหรือ หมายถึงสารที่ช่วยเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยลดพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy) ของ

ปฏิกิริยาให้น้อยลง เช่น แก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจนไม่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อมีแพลทินัม (Pt) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

ตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท โดยพิจารณาจากเฟสของตัวเร่งปฏิกิริยากับเฟสของสารตั้งต้น

(1) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ (Homogeneous Catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยา

(2) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยา

(3) เอนไซม์ (Enzyme) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งเกี่ยวกับปฏิกิริยาทางชีวเคมีและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่สามารถจัดรวมไว้กับ 2 กลุ่มแรกได้ เนื่องจากเอนไซม์เป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนที่มีขนาดใหญ่

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำมันปาล์มดิบซึ่งเป็นน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระสูง มาผลิตเอทิลเอสเทอร์แบบสองขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนแรกเป็นการลดกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่า 1% โดยน้ำหนัก ด้วยปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนแรกเข้าสู่ขั้นตอนที่สองซึ่งเป็นปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดแสดงได้ดังนี้

### 2.3.1 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid, $H_2SO_4$ )

กรดซัลฟิวริก มีสูตรโมเลกุลเป็น  $H_2SO_4$  มีน้ำหนักโมเลกุล 98.08 จุดเดือดประมาณ  $270^{\circ}C$  มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดคล้ายน้ำมัน ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีค่า pH 0.3 เป็นกรดแก่ที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง สามารถละลายน้ำได้ มีราคาถูกกว่ากรดชนิดอื่น

### 2.3.2 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH)

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีสูตรโมเลกุลเป็น KOH มีน้ำหนักโมเลกุล 56.11 จุดเดือดประมาณ  $1320^{\circ}C$  มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว เป็นเบสแก่ สามารถละลายน้ำได้ และสามารถนำไปเป็นส่วนผสมในการผลิต บัวย สบู่ ผงซักฟอก และ สีย้อม เป็นต้น

## 2.4 ตัวรองรับ (Supporter)

### 2.4.1 อะลูมินา (Alumina)

อะลูมินามีสูตรทั่วไปคือ  $Al_2O_3$  เป็นตัวรองรับที่นิยมใช้มากตัวหนึ่ง เนื่องจากราคาไม่แพง สามารถเตรียมให้มีขนาดอนุภาคเล็กได้ง่าย อีกทั้งในการเตรียมสามารถกำหนดพื้นที่ผิวและการกระจายของรูพรุนได้ตามต้องการ อะลูมินาที่มีจำหน่ายมีพื้นที่ผิวระหว่าง  $100-600 \text{ m}^2/\text{g}$  การที่ของแข็งที่มีความพรุนสูงทำให้มีพื้นที่ผิวภายในสูง ทำให้อนุภาคของโลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากระจายตัวได้ดีและเพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา

อะลูมินามีหลายเฟสแต่เฟสที่นิยมใช้เป็นตัวรองรับในอุตสาหกรรมคือ แกมมา อะลูมินา ซึ่งเตรียมได้จากการกำจัดน้ำจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  แกมมาอะลูมินามีความพรุน ทำให้มีพื้นที่ผิวสูง จึงเป็นที่นิยมในการใช้เป็นตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนเฟสที่เสถียรที่สุดคือแอลฟาอะลูมินา ซึ่งไม่มีรูพรุน อย่งไรก็ตามแกมมาอะลูมินามีเสถียรภาพพอสมควรเพราะที่สภาวะทั่วไปจะไม่เปลี่ยนเฟสไปเป็นแอลฟาอะลูมินา (จตุพร วิทยาศาสตร์ การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์, 2547)

### 2.4.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

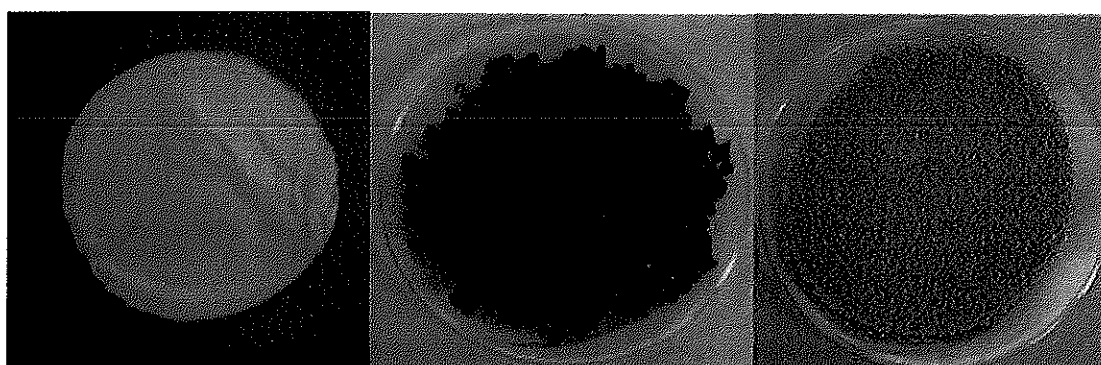
ถ่านกัมมันต์เป็นของแข็งที่ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นหลัก มีความพรุน และพื้นที่ผิวสูง สามารถผลิตได้จากชีวมวล เช่น กะลามะพร้าว ไม้ไผ่ มักมีความเป็นขั้วดำหรือไม่มีขั้ว แม้ว่าการใช้คาร์บอนในปัจจุบัน จะเป็นการนำมาเป็นตัวดูดซับ ตัวกรอง และช่วยเพิ่มความแข็งแรงของยาง และอื่น ๆ แต่ถ่านกัมมันต์ยังมีใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาอยู่บ้าง

ถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมกับการใช้เป็นตัวรองรับจะต้องอยู่ในรูปของคาร์บอนที่ไม่มีโลหะเจือปนและมีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติดังกล่าวจะมีราคาสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนหลายเท่า ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินหรือลิกไนต์มักจะนุ่มและมีสิ่งเจือปนมากเกินไป ส่วนถ่านหินที่เผาจนหมดควัน หรือ ถ่านโค้ก (Coke) ที่มีปิโตรเลียมเป็นองค์ประกอบหลักมักจะแข็งกว่าแต่มีกัมมะถัน เวนเนเดียม และนิกเกิลปนอยู่เล็กน้อย ถ่านกัมมันต์ที่แข็ง มีความบริสุทธิ์ มีคุณภาพดีสามารถเตรียมได้จากกะลามะพร้าว หรือกะลาปาล์มซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้ง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวสูงถึง  $1200-1400 \text{ m}^2/\text{g}$  (จตุพร วิทยาศาสตร์ การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์, 2547)

### 2.4.3 แอมเบอร์ลิสต์ 15 (Amberlyst 15)

จัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในกลุ่มของโพลีเมอร์และ ion exchange resins ได้มีการใช้แอมเบอร์ลิสต์ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของกรดไขมัน ได้แก่ Caprylic acid, Capric acid, Lauric acid, Palmitic acid, Stearic acid, Oleic acid, linoleic acid และ Erucid acid กระบวนการผลิต Phenol Alkylate และปฏิกิริยา Etherification

เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันจำเป็นต้องใช้กรดในการเกิดปฏิกิริยาและเมื่อนำแอมเบอร์ลิสต์แช่ในน้ำ ทำให้ค่า pH ของน้ำลดลงเหลือ 2-3 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการใช้แอมเบอร์ลิสต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



(a)

(b)

(c)

ภาพประกอบที่ 1 แสดงลักษณะของตัวรองรับแต่ละชนิด (a) อะลูมินา, (b) ถ่านกัมมันต์ และ (c) แอมเบอร์ลิสต์ 15

### 2.5 เอทานอล

เอทานอล (Ethanol) หรือเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) เป็นสารอินทรีย์ที่มีสูตรโมเลกุล  $C_2H_5OH$  มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 46.07 จุดเดือดประมาณ  $78^\circ C$  เป็นของเหลวใสไม่มีสี ติดไฟง่าย ให้เปลวไฟสีน้ำเงินที่ไม่มีควัน โดยปกติเอทานอลสามารถรวมตัวกับน้ำ อีเทอร์ หรือ คลอโรฟอร์มได้ทุกส่วน



เอทานอลถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น ใช้เป็นเครื่องต้ม แอลกอฮอล์ ใช้ในอุตสาหกรรมยา ใช้เป็นตัวทำละลายในผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรม เช่น สี แล็กเกอร์ ใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมันเบนซิน ที่เรียกว่าแก๊ส โซฮอล์ ใช้ผลิตเป็นอาหาร เช่น น้ำส้มสายชู เจลาติน ใช้ทางการแพทย์ เช่น ใช้เช็ดแผล ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ใช้เป็นตัวรีเอเจนต์ในห้องปฏิบัติการ หรือแม้กระทั่งสามารถนำมาผลิตไบโอดีเซลได้ซึ่งจะได้ไบโอดีเซล ชนิดเอทิลเอสเทอร์

เอทานอลสามารถผลิตได้จากผลผลิตทางการเกษตรและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ทุกส่วนของพืชสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเอทานอลได้ เช่น มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวโพด กากน้ำตาล เป็นต้น

เนื่องจากเอทานอลเป็นแอลกอฮอล์ที่ผลิตได้จากพืชโดยส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นสารไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแทนการใช้เมทานอล เนื่องจากเมทานอลเป็นสารเคมีสังเคราะห์ ที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ หากร่างกายได้รับเข้าไปเป็นจำนวนมาก หรือสะสมในร่างกายเป็นเวลานาน อีกทั้งการส่งเสริมให้ใช้เอทานอลมาผลิตเอทิลเอสเทอร์ช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศจากการนำเข้าเมทานอล รวมทั้งยังมีส่วนช่วยสร้างความมั่นคงด้านพลังงานและส่งเสริมภาคการเกษตรของประเทศให้มีความยั่งยืนด้วย

## 2.6 ข้อดี-ข้อด้อยของไบโอดีเซล

ในการผลิตไบโอดีเซลเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนน้ำมันดีเซลมีทั้งข้อดีและข้อด้อย ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

### 2.6.1 ข้อดีของไบโอดีเซล

#### (1) ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซลด้านสิ่งแวดล้อม

การใช้ไบโอดีเซลสามารถลดมลพิษในอากาศอันเนื่องมาจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สมบูรณ์ กรมอุทกหารเรือได้ทำการทดลองใช้น้ำมันไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซล พบว่ารถที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงสามารถลดควันดำได้มากกว่าร้อยละ 50 และสามารถลดแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ได้ร้อยละ 20 ลดฝุ่นละออง ได้ร้อยละ 39 ลดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ได้ร้อยละ 99 นอกจากนี้การใช้ไบโอดีเซลทดแทนน้ำมันดีเซลนั้นสามารถลดวงจรชีวิต (Life-Cycle) ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ได้ร้อยละ 78 ซึ่งเป็นผลให้ลดภาวะโลกร้อน

### (2) ประโยชน์การใช้ไบโอดีเซลด้านสมรรถนะเครื่องยนต์

การใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ เนื่องจากไบโอดีเซลมีออกซิเจนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 10 ทำให้การผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเป็นการเพิ่มอัตราส่วนปริมาตรของอากาศต่อน้ำมันได้เป็นอย่างดี (คณะกรรมการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร, 2545) จึงทำให้การเผาไหม้ในกระบอกสูบเป็นไปอย่างสมบูรณ์

### (3) ประโยชน์การใช้ไบโอดีเซลด้านเศรษฐศาสตร์

ช่วยสร้างงานในชนบทด้วยการสร้างตลาดพลังงานไว้รองรับผลผลิตทางการเกษตรที่เหลือจากการบริโภค การใช้ไบโอดีเซลสามารถช่วยลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศได้บางส่วน ซึ่งในแต่ละปีประเทศไทยสูญเสียเงินตราต่างประเทศเพื่อการนำเข้าน้ำมันดิบกว่า 300,000 ล้านบาท

### (4) ประโยชน์การใช้ไบโอดีเซลด้านการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงในประเทศ

ประเทศไทยมีสัดส่วนการใช้น้ำมันดีเซลสูงกว่าน้ำมันเบนซินมาก ตลาดน้ำมันดีเซลในประเทศไทยมีมูลค่ามากกว่าน้ำมันเบนซินกว่า 2 เท่า และในอนาคตมีแนวโน้มที่โรงกลั่นอาจจะผลิตน้ำมันดีเซลไม่เพียงพอต่อการใช้ภายในประเทศ ดังนั้นการใช้ไบโอดีเซลจึงช่วยลดความไม่สมดุลของการผลิตของโรงกลั่นได้ การผสมน้ำมันไบโอดีเซลในอัตราส่วนร้อยละ 1-2 สามารถเพิ่มความหล่อลื่นในน้ำมันดีเซลได้ โดยเฉพาะกรณีที่จะมีการลดปริมาณกำมะถันในน้ำมันดีเซล

## 2.6.2 ข้อดีของไบโอดีเซล

- (1) มีจุดขุ่นและจุดไหลเทสูงกว่าน้ำมันดีเซล
- (2) ปลอดภัยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์สูงกว่าน้ำมันดีเซล
- (3) ขึ้นส่วนจากยางปืมน้ำมันจะเสื่อมคุณภาพเร็ว
- (4) ค่าพลังงานความร้อนต่ำกว่าน้ำมันดีเซลร้อยละ 10

การแก้ไขข้อดีเหล่านี้อาจกระทำด้วยการผสมกับน้ำมันดีเซล เช่น การผสมน้ำมันดีเซลร้อยละ 80 กับไบโอดีเซลร้อยละ 20 (<http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th>)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Marchetti และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันพืชใช้แล้วที่มีกรดไขมันอิสระสูง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการศึกษา คือ Dowex monosphere 550 A resin น้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบประกอบด้วยกรดไขมันอิสระ (FFA) ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าเรซินเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท Dowex monosphere 550 A resin ให้ทั้ง Conversion และอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ดี สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ Conversion สูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันอิสระ และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ไม่ได้ส่งผลมากนักต่อ Conversion ส่วนการเพิ่มอัตราส่วนเชิงโมลระหว่างเอทานอลต่อน้ำมัน จะส่งผลให้ Conversion เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 45 °C อัตราส่วนเชิงโมลระหว่างเอทานอลต่อน้ำมัน คือ 6.13:1 ปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้น 10.68 wt.% และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2.27 wt.% ของน้ำมัน ซึ่งได้ Conversion ประมาณ 80 % และถ้าหากนำเรซินที่ใช้แล้วถูกนำกลับมาใช้อีก จะส่งผลให้ได้ Conversion น้อยกว่า 25 % ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการดังนั้นถ้าต้องการเพิ่ม Conversion จะต้องนำเรซินมา regenerate หลังจากแต่ละการทดลอง

Wang และคณะ (2007) ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (WCO) ด้วยกระบวนการสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการลดกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่า 0.5 wt.% ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอริกซัลเฟต ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ โดยมีประสิทธิภาพที่ดีต่อกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว เมื่อเปรียบเทียบกับกรดซัลฟิวริก พบว่าเฟอริกซัลเฟตง่ายในการแยกออกจากปฏิกิริยา เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และไม่ต้องการอุปกรณ์ที่มีราคาสูงในการป้องกันการกัดกร่อน จากการทดลองพบว่าในขั้นตอนแรก สภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 95 °C ปริมาณเฟอริกซัลเฟต 2 wt.% อัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ คือ 1:1 หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนแรกเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอัตราส่วนเชิงโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเท่ากับ 6:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 wt.% ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 65 °C ได้ Conversion ของกรดไขมันอิสระ 97 % ซึ่งข้อดีของการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบสองขั้นตอน คือ มีประสิทธิภาพสูง และสามารถลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ที่ใช้ น้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระสูงเป็นวัตถุดิบ

Issariyakul และคณะ (2006) ศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของ Waste fryer grease (WFG) ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 1% โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนเชิงโมลของเอทานอลต่อน้ำมัน คือ 6:1 และศึกษาที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่าหลังจากทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่เกิดการแยกชั้นระหว่างเอทิลเอสเทอร์กับกลีเซอริน ดังนั้นจึงได้แยกกลีเซอรินออกจากเฟสเอทิลเอสเทอร์โดยมีการเติมกลีเซอรินบริสุทธิ์ลงไป 1-2 กรัม แล้วกวนเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้กลีเซอรินบริสุทธิ์ไปเหนี่ยวนำให้กลีเซอรินที่อยู่ในเฟสเอทิลเอสเทอร์ตกลงมา หลังจากนั้น เอทิลเอสเทอร์จะถูกล้างด้วยน้ำร้อนเพื่อกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาในส่วนของแอลกอฮอล์และน้ำที่ปนเปื้อนอยู่จะถูกกำจัดด้วย BUCHI rotavapor ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง

Noiroj และคณะ (2008) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนตัวรองรับ 2 ชนิด คือ อะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) และ ซีโอไลต์ชนิด Y (NaY) จากงานวิจัยพบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ 25%KOH/ $Al_2O_3$  และ 10%KOH/NaY โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็น 3 wt.% และ 6 wt.% เทียบกับน้ำมันปาล์ม ตามลำดับ อัตราส่วนของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:15 ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์สูงถึง 91.07 %

การผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยน้ำมันปาล์มดิบ ต้องมีปัจจัยต่างๆที่ทำให้คุณสมบัติของเอทิลเอสเทอร์มีคุณภาพ จากงานวิจัย Marchetti และคณะ (2007) ทำให้ทราบถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตเอทิลเอสเทอร์ เช่น การเพิ่มอุณหภูมิและอัตราส่วนเชิงโมลระหว่างเอทานอลต่อน้ำมัน ทำให้ %Conversion เพิ่มสูงขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้ส่งผลมากนักต่อ %Conversion และจากงานวิจัย Noiroj และคณะ (2008) พบว่า สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์มาใช้ในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ได้เช่นกัน เนื่องจากการใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นสารตั้งต้นมีกรดไขมันอิสระสูง จึงศึกษาของ Wang และคณะ (2007) ซึ่งเป็นการผลิตเมทิลเอสเทอร์แบบสองขั้นตอน และปัญหาที่พบจากการผลิตเอทิลเอสเทอร์ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่เกิดการแยกชั้นระหว่างเอทิลเอสเทอร์กับกลีเซอริน ดังนั้นจึงศึกษาของ Issariyakul และคณะ (2006) ในการแก้ปัญหาการแยกกลีเซอริน ออกจากเอทิลเอสเทอร์มาใช้ในการทดลอง ซึ่งจากการศึกษาของวิจัยข้างต้นคาดว่าสามารถนำข้อมูลและหลักการมาประยุกต์ใช้ในการทดลองต่อไป

## 2.8 การหาร้อยละการเปลี่ยน (%Conversion)

ในทางปฏิบัติหรือในทางอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมี จะพบว่าปฏิกิริยาไม่ได้ถูกดำเนินไปจนกระทั่งสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาได้ถูกใช้ไปอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจึงมีเกณฑ์กำหนดว่าปฏิกิริยานั้น ๆ มีการเปลี่ยนแปลงเท่าใด โดยจะใช้ร้อยละการเปลี่ยน หรือ %Conversion เป็นตัวกำหนด ในงานวิจัยนี้จะใช้ %Conversion ของกรดไขมันอิสระ (FFA) เป็นตัวกำหนด ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \text{\%Conversion ของ FFA} &= \frac{\text{จำนวน โมลของ FFA ที่ทำปฏิกิริยา}}{\text{จำนวน โมลของ FFA ที่ป้อนเข้า}} \times 100 \quad (4) \\ \text{หรือ} & \end{aligned}$$

$$\text{\%Conversion ของ FFA} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ  $n_1$  คือ จำนวน โมลของ FFA ที่เข้าระบบ

$n_2$  คือ จำนวน โมลของ FFA ที่ออกจากระบบ

## บทที่ 3

### วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

#### 3.1 วัสดุ

3.1.1 วัสดุคืบ คือ น้ำมันปาล์มคืบ นำมาจากสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ โดยลักษณะภายนอก มีสีส้มและมีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง

#### 3.1.2 สารเคมี

- (1) เอทานอล ( $C_2H_5OH$ ) commercial grade.
- (2) กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) A.R., code no. 1.00731, Merck.
- (3) โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) A.R., code no. 3162-19, J.T.Baker.
- (4) แอมเบอร์ลิส 15 (Amberlyst 15) A.R., code no. 53702, Fluka.
- (5) อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) Riedel-de Haen AG-30926 seelze.
- (6) ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) commercial grade.

#### 3.2 อุปกรณ์

##### 3.2.1 เครื่องมือวิเคราะห์

(1) เครื่องมือวิเคราะห์ Thin Layer Chromatography/Hydrogen Flame Ionization Detection (TLC/FID), Iatroscan Model MK-6s เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้สำหรับแยกองค์ประกอบของสารเนื้อเดียวที่มีองค์ประกอบของสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ละลายในของเหลวเดียวกัน โดยอาศัยหลักการว่า สารแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายต่างกัน และมีสมบัติในการซึมผ่านตัวดูดซับบางชนิดต่างกัน ดังนั้นเครื่องมือวิเคราะห์ TLC/FID จึงประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ตัวดูดซับและตัวทำละลาย การใช้ TLC/FID แยกสารเนื้อเดียวชนิดเดียวกัน แต่ใช้ตัวดูดซับหรือตัวทำละลายต่างกัน อาจทำให้ผลที่ได้ต่างไปด้วย ซึ่งสารที่ถูกดูดซับได้น้อยจะ

เคลื่อนที่ไปได้ไกล สารที่ถูกดูดซับได้มากจะเคลื่อนที่ไปได้ใกล้ โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ TLC/FID ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(2) เครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในสารตัวอย่าง (Karl Fisher) เป็นเครื่องวัดปริมาณน้ำตัวอย่าง โดยฉีดสารตัวอย่างลงไปบนสารละลายไอโอไดด์ ทำให้ไอโอไดด์เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนให้แก่สารละลายแคลโทไลต์ ซึ่งในสารละลายแคลโทไลต์จะมีไฮโดรเจนไอออนอยู่ ทำให้เมื่อไฮโดรเจนไอออนรับอิเล็กตรอนจะกลายเป็นแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งเครื่อง Karl Fisher นี้จะวัดปริมาณน้ำจากปริมาณอิเล็กตรอนที่ไอโอไดด์สูญเสียไป โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ Karl Fisher ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

### 3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาแสดงดังภาพประกอบที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย

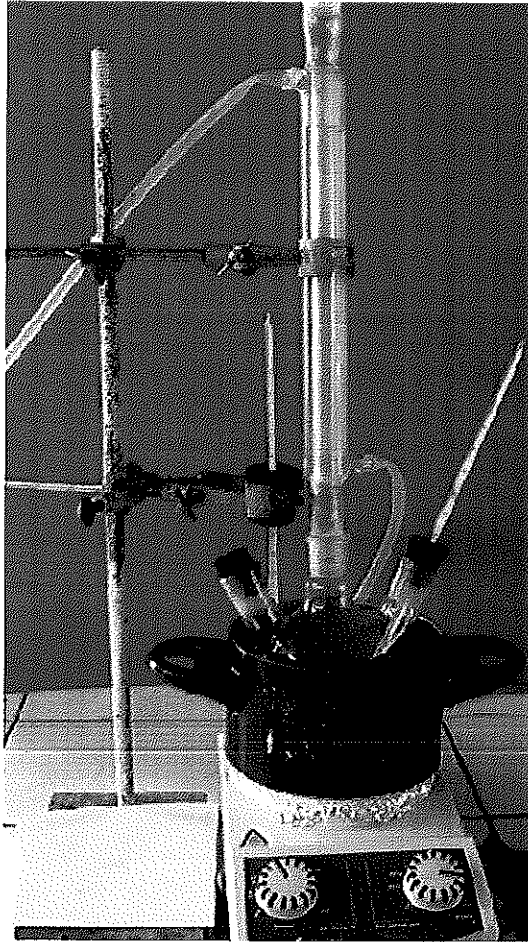
- (1) Reactor (ขวดสามคอ) ขนาด 500 ml ใช้สำหรับรองรับสารที่จะทำปฏิกิริยา
- (2) Reflux Condenser ใช้สำหรับให้เอทานอลที่ระเหยควบแน่นกลับไปยัง

Reactor

- (3) เทอร์โมมิเตอร์ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิใน Reactor
- (4) Magnetic bar
- (5) ขาตั้ง ใช้สำหรับยึดจับ Reflux Condenser
- (6) Hot plate

### 3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

- (1) บิวเรต
- (2) หลอดหยด
- (3) ปีกเกอร์
- (4) ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask)
- (5) จานเพาะเชื้อ
- (6) ช้อนตักสาร
- (8) แท่งแก้วคน
- (9) โถดูดความชื้น (Desiccators)



ภาพประกอบที่ 2 แสดงอุปกรณ์การทดลอง

### 3.3 วิธีการศึกษา

#### 3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

- (1) นำ  $Al_2O_3$  ไปอบไว้ที่ อุณหภูมิ  $70\text{ }^{\circ}C$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วนำมาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น จนกระทั่งสารเย็นตัว
- (2) นำ  $Al_2O_3$  ไปหา Wetness Point โดยทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย
- (3) ทำการคำนวณหาปริมาณของสารละลายที่ต้องใช้ต่อสารทั้งหมด ที่เปอร์เซ็นต์  $H_2SO_4$  ต่าง ๆ กัน โดยการทดลองนี้ใช้ที่ 10%, 20%, 30%, 40%, 45% และ 50%  $H_2SO_4/Al_2O_3$  โดยน้ำหนัก



(4) เตรียมสารละลาย  $H_2SO_4$  ที่แต่ละ %  $H_2SO_4$  ซึ่งมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรที่ Wetness Point ของแต่ละ %  $H_2SO_4$  นั้น ๆ

(5) ทำการหยดสารละลาย  $H_2SO_4$  ลงบน  $Al_2O_3$  ตาม %  $H_2SO_4$  ที่กำหนดไว้

(6) นำไปอบที่  $70\text{ }^{\circ}C$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(7) เก็บสารตัวอย่างไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อป้องกันความชื้น

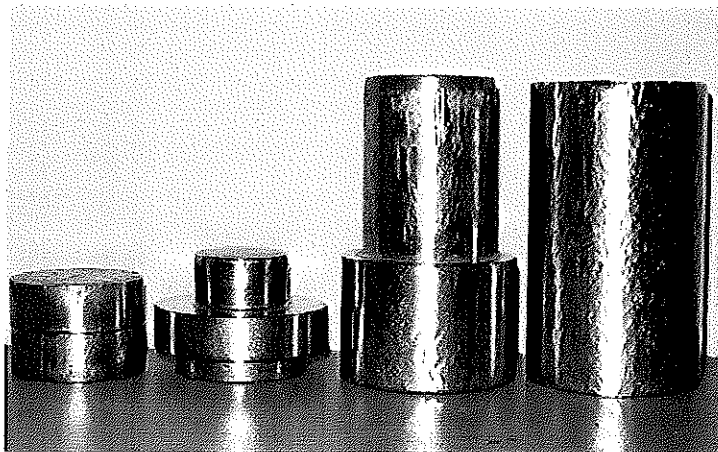
(8) นำตัวเร่งปฏิกิริยาไปอัด

(9) นำสารตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วย XRD, FT-IR, SEM และ BET

สำหรับ  $H_2SO_4$ /Activated Carbon,  $H_2SO_4$ /Amberlyst 15, KOH/Activated Carbon และ KOH/Amberlyst 15 ทำการหาจุด Wetness Point และทำการเตรียม เช่นเดียวกับ  $H_2SO_4/Al_2O_3$  แต่ไม่ผ่านการอัดเนื่องจาก Activated Carbon เป็นผงถ่านมีลักษณะเป็นอนุภาคเล็กๆ และ Amberlyst 15 เป็นเรซินอนุภาคเล็กๆ ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็ง

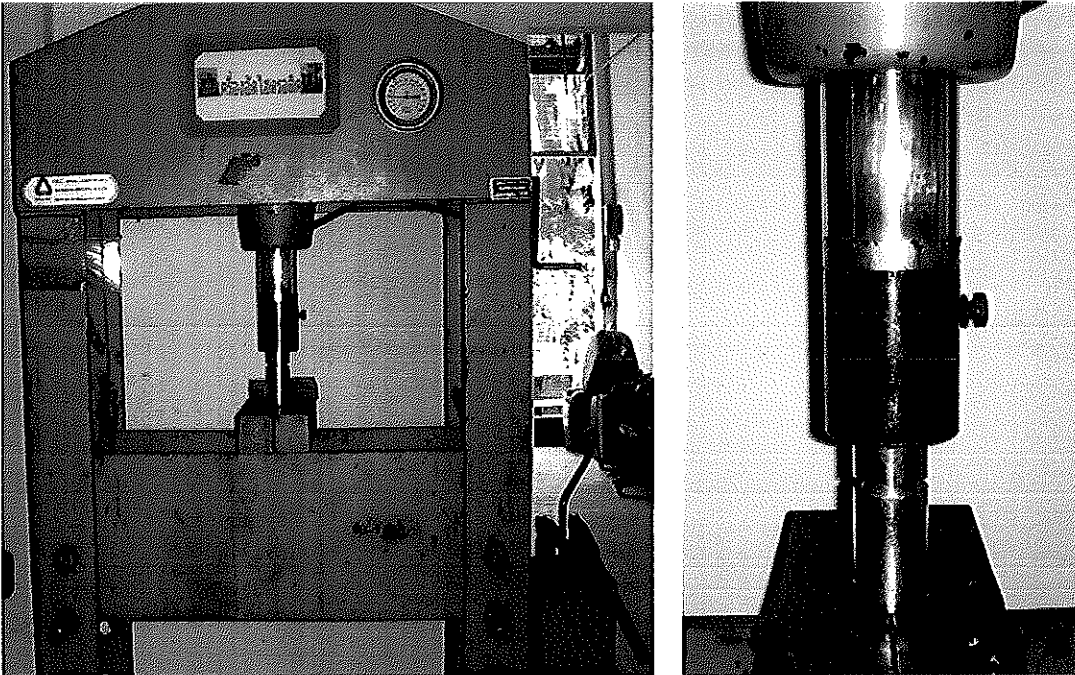
### 3.3.2 ขั้นตอนการอัดตัวเร่งปฏิกิริยา

(1) นำผงตัวเร่งปฏิกิริยาใส่ในเบ้าอัด แล้วปิดฝา ดังภาพประกอบที่ 3



ภาพประกอบที่ 3 แสดงเบ้าอัดตัวเร่งปฏิกิริยา

(2) อัดด้วยความดันประมาณ  $50\text{ Ton/in}^2$  ให้ตกลงที่เบ้าอัด โดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic Press) ใช้เวลาในการอัดประมาณ 30 นาที



ภาพประกอบที่ 4 แสดงเครื่องอัดไฮดรอลิก

(3) นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแผ่นออกจากเบ้าอัด แล้วทำให้แตก

(4) นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกไปร่อนตะแกรง (20/42 Mesh) จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเท่า ๆ กันขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\bar{D}_{pi} = \frac{D_{pi} + D_{pi+1}}{2}$$

เมื่อ

$D_{pi}$  = ขนาดรูเปิดของตะแกรงที่  $i$  = 0.833 mm (20 Mesh)

$D_{pi+1}$  = ขนาดรูเปิดของตะแกรงที่  $i+1$  = 0.351 mm (42 Mesh)

$\bar{D}_{pi}$  = ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคที่ผ่านตะแกรง  $i+1$  แต่ค้างอยู่บนตะแกรง  $i$

$$\bar{D}_{pi} = \frac{0.833 + 0.351}{2} = 0.592 \text{ mm}$$

ดังนั้น ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคที่ใช้ เท่ากับ 0.592 มิลลิเมตร

### 3.3.3 ศึกษาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคต่างๆ

(1) เครื่องมือวิเคราะห์ X-Ray Diffraction (XRD) PW 3710 mpd control wide anglegeniometer, Ni-filtered Cu K radiation at 30 kV and 25 MA, Philips, Amello, Netherland. เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้รังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบอนุภาค หรือวัตถุที่มุมต่างๆ กัน โดยมี Detector เป็นตัวรับข้อมูล ซึ่งสารที่ต่างชนิดกันทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีต่างกันที่มุมองศาต่างกัน ทำให้ทราบรูปแบบ โครงสร้างของผลึก อีกทั้งยังสามารถหาขนาดอนุภาคอย่างคร่าวๆ ได้ โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ XRD ที่ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(2) เครื่องมือวิเคราะห์ Scanning Electron Microscope (SEM) JEOL JSM-5800LV, Highvacuum mode เป็นกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้ในการศึกษาลักษณะ โครงสร้าง หรือองค์ประกอบของพื้นผิวโดยอาศัยการกวาดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิววัสดุแทนการใช้แสงธรรมดา ซึ่งจะทำให้มีกำลังขยายสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ธรรมดา โดยสามารถขยายภาพได้มากกว่า 1,000 เท่า จนถึงระดับ 100,000 เท่าขึ้นไป โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ SEM ที่ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(3) เครื่องมือวิเคราะห์ Fourier-transformed infrared spectrophotometer (FT-IR) Pellet (KBr), EQUINOX55, Bruker, Germany เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารประกอบ เป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันคร่าวๆ ในสารที่ไม่ทราบว่าเป็นสารอะไร เช่นสารที่วิเคราะห์นี้อาจจะมี หมู่ hydroxly(-OH) methyl (-CH<sub>3</sub>) หรือ carbonly (-CO) แต่ถ้าจะใช้เทคนิคนี้ในการระบุว่าเป็นสารชนิดใด ต้องนำผลที่ได้ซึ่งเป็นสเปกตรัม (spectrum) ของสารนั้นไปเทียบกับสเปกตรัมของสารที่ทราบอยู่แล้ว (reference) ถ้ามีสเปกตรัมเหมือนกันก็จะเป็นสารเดียวกัน โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ FT-IR ที่ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(4) เครื่องมือวิเคราะห์ Brunauer-Emmett-Teller Method (BET) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน หลักการคือใช้อินเนอร์ตแก๊ส เช่น ไนโตรเจนเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวบนผิวตัวอย่างที่ทดสอบโดยการจัดเรียงของโมเลกุลของไนโตรเจนเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) ซึ่งการอัดไนโตรเจนเข้าไปบนพื้นที่ผิวของตัวอย่างที่ทดสอบนั้น คือขั้นตอนการสร้างไอโซเทิร์ม (Isotherm table) จนกระทั่งสัดส่วนระหว่างความดันของไนโตรเจนในหลอดตัวอย่างกับในหลอดอ้างอิง ( $P/P_0$ ) = 0.2 โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ BET ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

### 3.3.4 ศึกษาปัจจัยในการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

(1) ศึกษา %Conversion ของ FFA ที่ทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มดิบกับเอทานอลในสภาวะต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกที่อยู่บนตัวรองรับต่าง ๆ อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยา

(2) ศึกษาปัจจัยที่มีต่อการลด FFA จากน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน โดยนำน้ำมันปาล์มดิบ ตัวเร่งปฏิกิริยาและเอทานอลที่จะทำการศึกษาใส่ลงในขวดก้นกลมต่อเข้ากับชุดการทดลอง ให้ความร้อนและมีการกวนตลอดการทดลอง

(3) นำปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา  $H_2SO_4/Al_2O_3$ ,  $H_2SO_4/Activated\ carbon$  และ  $H_2SO_4/Amberlyst\ 15$  มาทำการใช้ซ้ำเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ใหม่

### 3.3.5 ศึกษาปัจจัยในการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

(1) นำน้ำมันปาล์มดิบที่มี FFA < 1 wt.% จากปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันเข้าสู่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

(2) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อ %Ethyl Ester และ %Yield ของเอทิลเอสเทอร์ที่ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มดิบกับเอทานอลในสภาวะต่าง ๆ

### 3.3.6 สภาวะที่ใช้ในปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

(1) เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกบนตัวรองรับต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน 6 ค่า คือ 10%, 20%, 30%, 40%, 45% และ 50 wt.%

(2) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 ค่า คือ 20%, 25%, 30%, 35% และ 40% โดยน้ำหนักของปริมาณน้ำมันปาล์มดิบ

(3) อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบ (CPO) ต่อเอทานอล ที่แตกต่างกัน 5 ค่า โดยใช้อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลเป็น 1:6, 1:10, 1:15, 1:20 และ 1:30

(4) อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3 ค่า คือ 60 °C, 70 °C และ 80 °C

(5) เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ค่า คือ 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที

ในการทดลองเริ่มต้น ทำการทดลองเพื่อหาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกบนตัวรองรับที่เหมาะสม โดยกำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาให้มีค่าคงที่และทำการเปลี่ยน

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกบนตัวรองรับ เมื่อได้เปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมแล้วจะทำการศึกษาผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา กำหนดให้อัตราส่วนเชิง โมลของน้ำมันปาล์มดิบ ต่อเอทานอล อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา และเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกบนตัวรองรับคงที่ ทำการเปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นทำการทดลองเพื่อดูผลของอัตราส่วนเชิง โมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล โดยใช้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกบนตัวรองรับ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทดลองที่ผ่านมา โดยใช้อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา คงที่ ทำการทดลอง โดยเปลี่ยนอัตราส่วนเชิง โมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล หลังจากนั้นทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา โดยจะใช้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกบนตัวรองรับ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนเชิง โมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล ในการทดลองที่ผ่านมา โดยให้เวลาในการทำปฏิกิริยาคงที่ ทำการทดลอง โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เมื่อได้อุณหภูมิที่เหมาะสมแล้วก็จะทำการทดลองขั้นต่อไป คือ ทำการศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยจะใช้ข้อมูลจากผลการทดลองที่ผ่านมาทำการเปลี่ยนเวลาในการทดลอง ซึ่งกระบวนการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 5

นำสภาวะที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยา  $H_2SO_4/Al_2O_3$ ,  $H_2SO_4/Activated\ carbon$  และ  $H_2SO_4/Amberlyst\ 15$  มาทำการ ใช้ซ้ำเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ซ้ำ

ตารางที่ 5 แสดงตารางการทดลองปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

ระยะเวลาในการ ทำปฏิกิริยา(นาที)	อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา (°C)	อัตราส่วนเชิง โมล (CPO/Ethanol)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt.%CPO)	กรดซัลฟิวริก/ ตัวรองรับ (%)
60	60	1:20	20	10
60	60	1:20	20	20
60	60	1:20	20	30
60	60	1:20	20	40
60	60	1:20	20	42*
60	60	1:20	20	45
60	60	1:20	20	50

หมายเหตุ \* จุดสูงสุดของ  $H_2SO_4$  ที่สามารถไหลคบน  $Al_2O_3$

$X_1 = \%H_2SO_4/ตัวรองรับ$

ระยะเวลาในการ ทำปฏิกิริยา(นาที)	อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา (°C)	อัตราส่วนเชิง โมล (CPO/Ethanol)	กรดซัลฟิวริก/ ตัวรองรับ (%)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt.%CPO)
60	60	1:20	X <sub>1</sub>	20
60	60	1:20	X <sub>1</sub>	25
60	60	1:20	X <sub>1</sub>	30
60	60	1:20	X <sub>1</sub>	35
60	60	1:20	X <sub>1</sub>	40

X<sub>2</sub> = ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%CPO) ที่เหมาะสม

ระยะเวลาในการ ทำปฏิกิริยา(นาที)	อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา (°C)	กรดซัลฟิวริก/ ตัวรองรับ (%)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt.%CPO)	อัตราส่วนเชิง โมล (CPO/Ethanol)
60	60	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	1:6
60	60	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	1:10
60	60	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	1:15
60	60	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	1:20
60	60	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	1:30

X<sub>3</sub> = อัตราส่วนเชิง โมล (CPO/Ethanol)

ระยะเวลาในการ ทำปฏิกิริยา(นาที)	กรดซัลฟิวริก/ ตัวรองรับ (%)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt.%CPO)	อัตราส่วนเชิง โมล (CPO/Ethanol)	อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา (°C)
60	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	60
60	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	70
60	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	80

X<sub>4</sub> = อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา(°C)

กรดซัลฟิวริก/ ตัวรองรับ (%)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt.%CPO)	อัตราส่วนเชิง โมล (CPO/Ethanol)	อุณหภูมิ ในการ ทำปฏิกิริยา (°C)	ระยะเวลาในการ ทำปฏิกิริยา(นาที)
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	30
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	60
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	90
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	120
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	150

X<sub>5</sub> = ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)

สถานะที่เหมาะสมจากปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

กรดซัลฟิวริก/ ตัวรองรับ (%)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (wt.%CPO)	อัตราส่วนเชิง โมล (CPO/Ethanol)	อุณหภูมิในการ ทำปฏิกิริยา (°C)	ระยะเวลาในการ ทำปฏิกิริยา(นาที)
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>

### 3.3.7 สถานะที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

- (1) ศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ไหลคบนถ่านกัมมันต์
- (2) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ค่า คือ 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนักของปริมาณน้ำมันปาล์มดิบ
- (3) อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลที่แตกต่างกัน 3 ค่า โดยใช้ อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลเป็น 1:6, 1:9 และ 1:12
- (4) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C
- (5) เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที

ในการทดลองเริ่มต้น ทำการทดลองเพื่อหาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม โดยกำหนดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบ (CPO) ต่อเอทานอล อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยา ให้มีค่าคงที่ และทำการเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ไหลคบน

ถ่านกัมมันต์ เมื่อได้เปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมแล้วจะทำการศึกษาผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา กำหนดให้อัตราส่วนเชิง โมลของน้ำมันปาล์มดิบ (CPO) ต่อเอทานอล 1:9 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที (Noiroj และคณะ 2008) ในแต่ละการทดลอง



## บทที่ 4

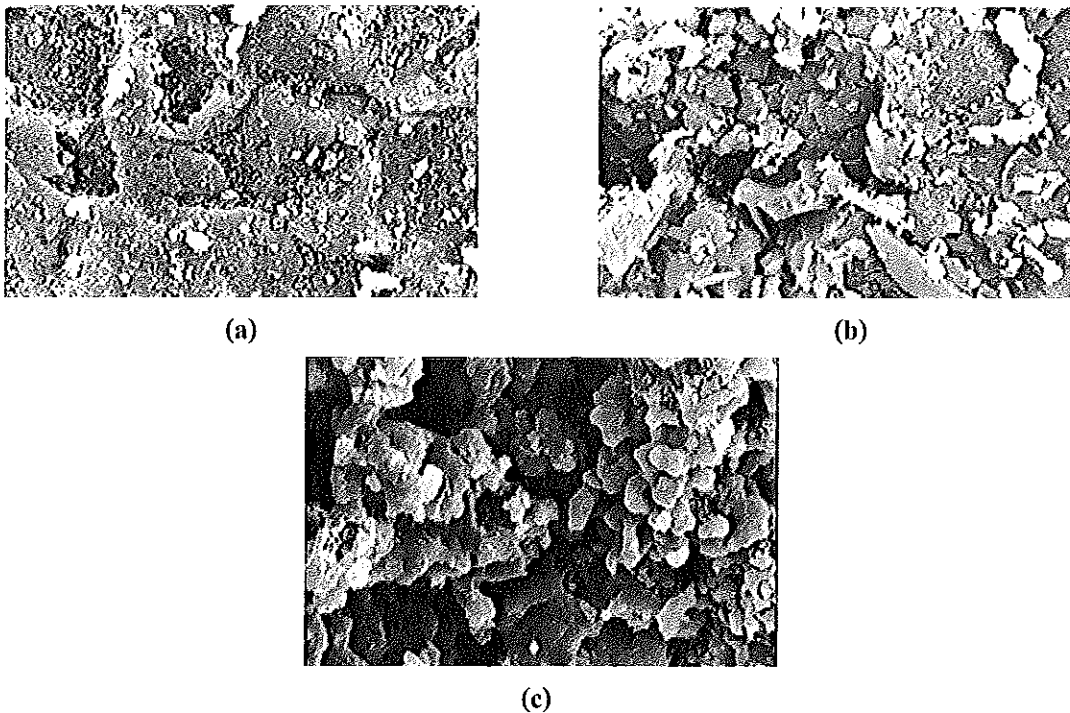
### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 ลักษณะและคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบ (Crude Palm Oil) ซึ่งมีกรดไขมันอิสระประมาณ 6 wt.% โดยวิธีการผลิตแบบสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการลดกรดไขมันอิสระให้มีค่าน้อยกว่า 1 wt.% ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้  $H_2SO_4/Al_2O_3$ ,  $H_2SO_4/Activated\ carbon$  และ  $H_2SO_4/Amberlyst\ 15$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งใช้ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกระหว่าง 10-50 wt.% เทียบกับตัวรองรับ และขั้นตอนที่สองเป็นการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้  $KOH/Al_2O_3$ ,  $KOH/Activated\ carbon$  และ  $KOH/Amberlyst\ 15$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งใช้ความเข้มข้นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ระหว่าง 25-35 wt.% เทียบกับตัวรองรับ โดยตัวเร่งปฏิกิริยามีวิวัฒนาการที่ใช้ใน 2 ขั้นตอน ทดสอบโดยเทคนิค SEM, XRD, FT-IR และ BET เพื่อศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดสารประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา หมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาและหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาทดสอบเลือกเฉพาะบางตัวเท่านั้น เนื่องจากในงานวิจัยมีตัวเร่งปฏิกิริยาหลายตัวจึงเป็นการลดค่าใช้จ่าย สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเลือกวิเคราะห์เฉพาะ  $H_2SO_4/Activated\ carbon$  เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอื่น ๆ (สามารถดูรายละเอียดจากหัวข้อ 4.2.2) ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 ลักษณะพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

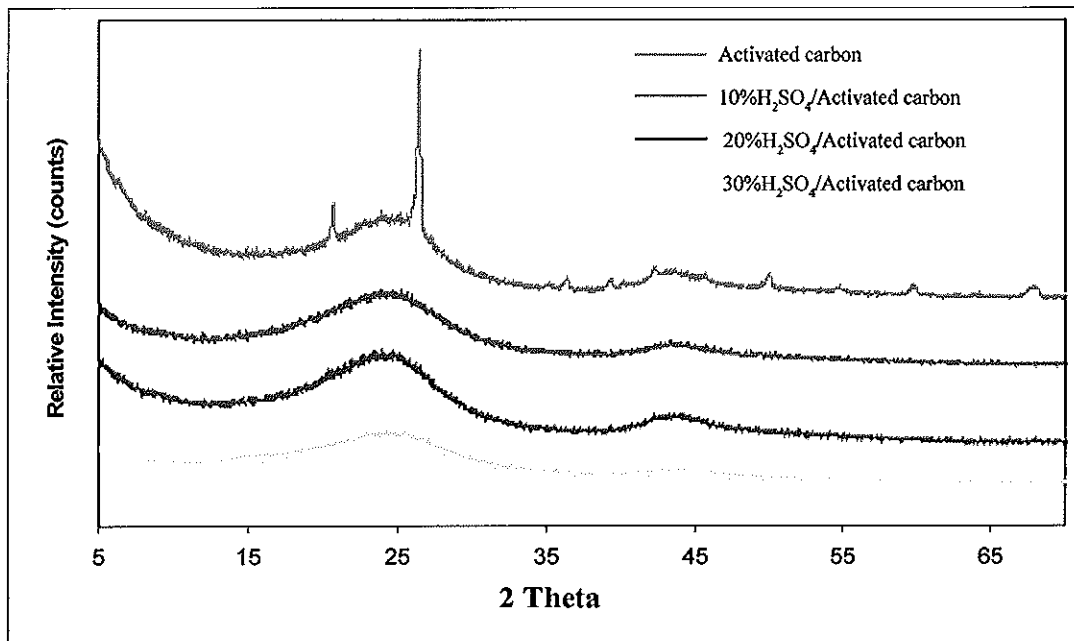
Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นเทคนิคการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของสาร โดยทำการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิดคือ 40% $H_2SO_4/Activated\ carbon$  สำหรับปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันและ 35% $KOH/Activated\ carbon$  สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ผลแสดงคังภาพประกอบที่ 5 พบว่า มีอนุภาคขนาดเล็กมาเกาะบนอนุภาคของถ่านกัมมันต์ จึงคาดว่าน่าจะเป็นอนุภาคของ  $H_2SO_4$  และ  $KOH$  ตามลำดับ อย่างไรก็ตามต้องตรวจสอบยืนยันผลเพิ่มเติมด้วยวิธี XRD ในหัวข้อถัดไป



ภาพประกอบที่ 5 แสดงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค SEM กำลังขยาย x 500  
 (a) Pure Activated carbon, (b) 40% $H_2SO_4$ /Activated carbon และ (c) 35%KOH/Activated carbon

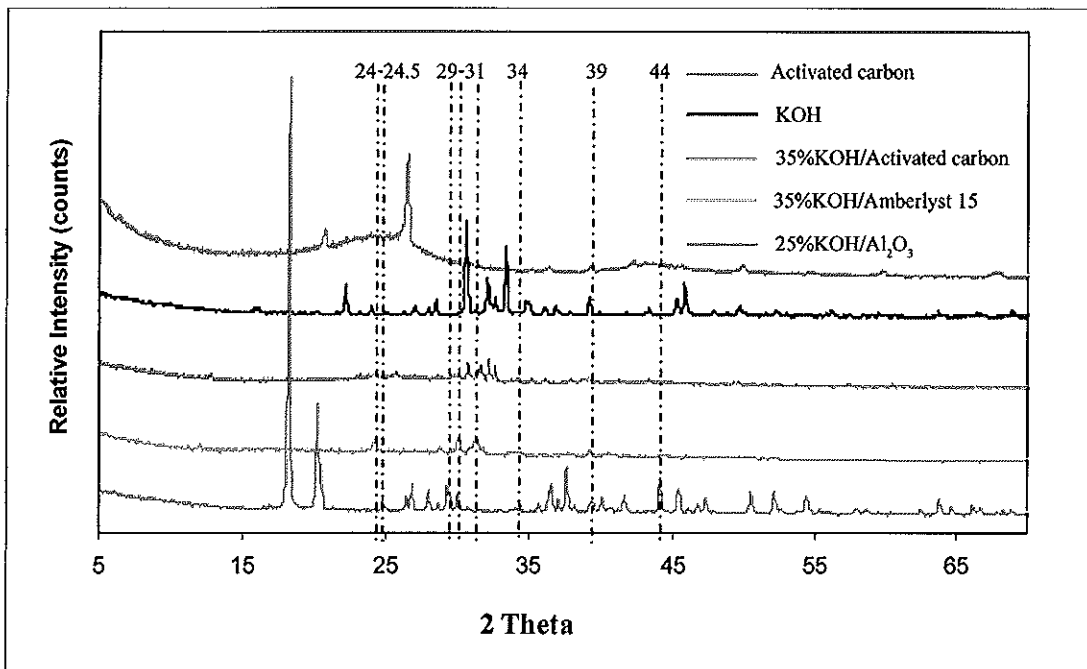
#### 4.1.2 ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา

X-Ray Diffraction (XRD) เป็นการศึกษาชนิดของสารประกอบ จากการทดลองศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา  $H_2SO_4$ /Activated carbon ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกระหว่าง 10-30 wt.% สำหรับปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 6 พบว่า ลักษณะกราฟ (Fingerprint) ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10% $H_2SO_4$ /Activated carbon, 20% $H_2SO_4$ /Activated carbon และ 30% $H_2SO_4$ /Activated carbon ไม่ปรากฏจุดสูงสุดที่มุมองศา ( $2\theta$ ) เนื่องจากกรดซัลฟิวริกมีลักษณะเป็นของเหลว ไม่เป็นผลึก ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นวัสดุอสัณฐาน ซึ่งไม่สามารถยืนยันได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยสารชนิดใดด้วยเทคนิค XRD ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยวิธี Fourier-Transformed Infrared Spectroscopy (FT-IR) (สามารถดูรายละเอียดจากหัวข้อ 4.1.3)



ภาพประกอบที่ 6 แสดง XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Activated carbon, 10% $H_2SO_4$ /Activated carbon, 20% $H_2SO_4$ /Activated carbon และ 30% $H_2SO_4$ /Activated carbon

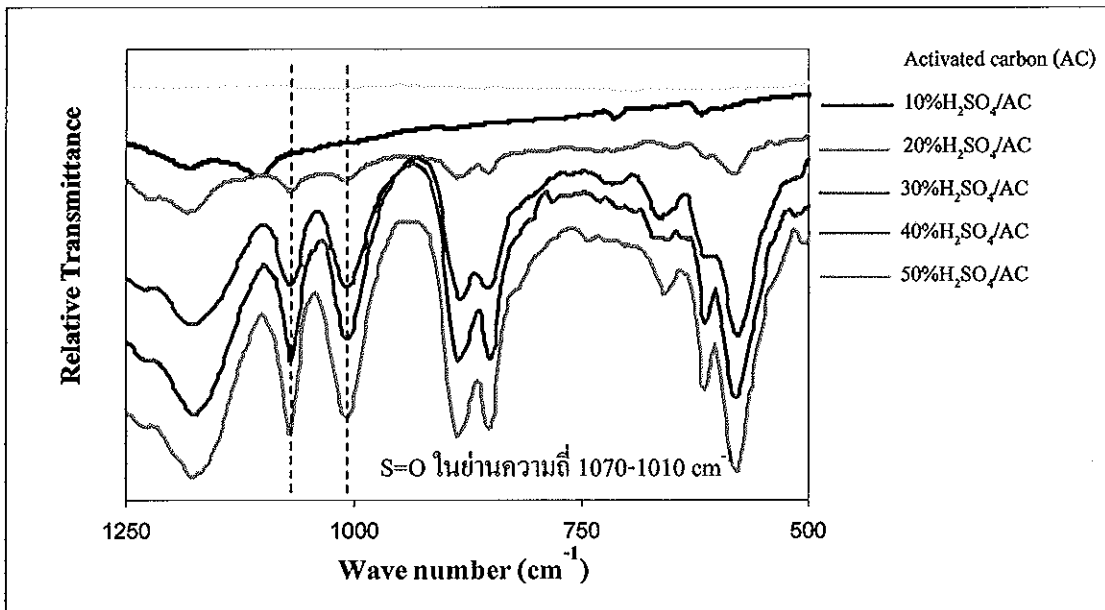
จากการศึกษา XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา KOH, 35%KOH/Activated carbon, 35%KOH/Amberlyst 15 และ 25%KOH/ $Al_2O_3$  สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 7 พบว่า ลักษณะกราฟ (Fingerprint) ของ 35%KOH/Activated carbon, 35%KOH/Amberlyst 15 และ 25%KOH/ $Al_2O_3$  ปรากฏจุดสูงสุดที่มุมองศา ( $2\theta$ ) ไม่ตรงกับ KOH อาจเป็นไปได้ว่า KOH บนตัวรองรับแต่ละชนิดได้เปลี่ยนรูปไปเป็นสารชนิดอื่น ซึ่งผลการทดลองจาก XRD ปรากฏว่า ลักษณะกราฟของ 35%KOH/Activated carbon และ 35%KOH/Amberlyst 15 ที่มุมองศา ( $2\theta$ ) ประมาณ  $24^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $31^\circ$  และ  $39^\circ$  ซึ่งเป็น Fingerprint ของโพแทสเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $KHCO_3$ ) ที่มีคุณสมบัติละลายน้ำแต่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์และมีค่า pH ประมาณ 8-9 ส่วนลักษณะกราฟของ 25%KOH/ $Al_2O_3$  ที่มุมองศา ( $2\theta$ ) ประมาณ  $24.5^\circ$ ,  $29^\circ$ ,  $34^\circ$  และ  $44^\circ$  เป็น Fingerprint ของโพแทสเซียมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ออกไซด์ [ $K_2(Al_2O(OH)_2)$ ] ที่มีค่า pH ประมาณ 13 (สามารถดูรายละเอียดจากภาคผนวก ค)



ภาพประกอบที่ 7 แสดง XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา Pure Activated carbon, KOH, 35%KOH/Activated carbon, 35%KOH/Amberlyst 15 และ 25%KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

#### 4.1.3 หมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา

เนื่องจาก H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Activated carbon ไม่สามารถระบุชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วยเทคนิค XRD จึงต้องใช้วิธี Fourier-Transformed Infrared Spectroscopy (FT-IR) เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวเร่งปฏิกิริยา H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Activated carbon โดยศึกษาในช่วงความถี่ 500-1250 cm<sup>-1</sup> ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพประกอบที่ 8 พบว่า เลขคลื่นในช่วง 1070-1010 cm<sup>-1</sup> แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของพันธะ S=O ของซัลเฟต (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) สอดคล้องกับงานวิจัย Li และคณะ (2008) ศึกษาการกัดกร่อน Cold rolled steel (CRS) ในสารละลาย 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> โดยพบพันธะ S=O ของ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ที่เลขคลื่น 1032 cm<sup>-1</sup> จากการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค FTIR สามารถยืนยันการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Activated carbon ได้ นั่นคือ เมื่อเปอร์เซ็นต์ของ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Activated carbon มากขึ้นจะปรากฏจุดยอดดังกล่าวชัดเจนมากยิ่งขึ้น ซึ่งคาดว่ามีการเพิ่มขึ้นของซัลเฟตเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบที่ 8 แสดงหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค FT-IR Spectroscopy ของตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Activated carbon}$  ที่แต่ละความเข้มข้น

#### 4.1.4 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ BET

หลังจากนำตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Activated carbon}$  ทั้งหมดไปวัดพื้นที่ผิวโดยใช้เทคนิค BET ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 6 พบว่า พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ลดลงเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก เนื่องจากปริมาณกรดซัลฟิวริกที่เพิ่มขึ้นไปทำลายโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ทำให้พื้นที่ผิวไมโครพอร์ (Micropore) ลดลง จึงส่งผลให้พื้นที่ผิวรวมลดลง

ตารางที่ 6 แสดงพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวรวม ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	พื้นที่ผิว (Micropore) ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
Activated carbon	1278	222
10% $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Activated carbon}$	397	123
20% $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Activated carbon}$	117	49.3
30% $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Activated carbon}$	25	20.3
40% $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Activated carbon}$	9	9.4

จากการศึกษาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด สามารถสรุปดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สรุปผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRD และ FT-IR

ตัวเร่งปฏิกิริยา	XRD	FT-IR
ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน 10%H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /Activated carbon	ไม่สามารถยืนยันผลได้เนื่องจาก เป็นวัสดุอสัณฐาน	เลขคลื่นในช่วง 1070- 1010 cm <sup>-1</sup> แสดงหมู่ ฟังก์ชัน S=O ของ ซัลเฟต
20%H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /Activated carbon		
30%H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /Activated carbon		
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน KOH	KOH*	ไม่ได้ทำการศึกษา
35%KOH/Activated carbon	KOH เปลี่ยนรูปไปเป็น KHCO <sub>3</sub> **	
35%KOH/Amberlyst 15	KOH เปลี่ยนรูปไปเป็น KHCO <sub>3</sub>	
25%KOH/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	KOH เปลี่ยนรูปไปเป็น [K <sub>2</sub> (Al <sub>2</sub> O(OH) <sub>2</sub> )]***	

หมายเหตุ \*KOH, pH = 14    \*\*KHCO<sub>3</sub>, pH = 8    \*\*\*[K<sub>2</sub>(Al<sub>2</sub>O(OH)<sub>2</sub>)], pH = 13

#### 4.2 การผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบ

##### 4.2.1 การศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ในการผลิตเอทิลเอสเทอร์

ทำการศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบ โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค

Thin Layer Chromatography (TLC) ผลการวิเคราะห์ที่แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 องค์ประกอบน้ำมันปาล์มดิบจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TLC

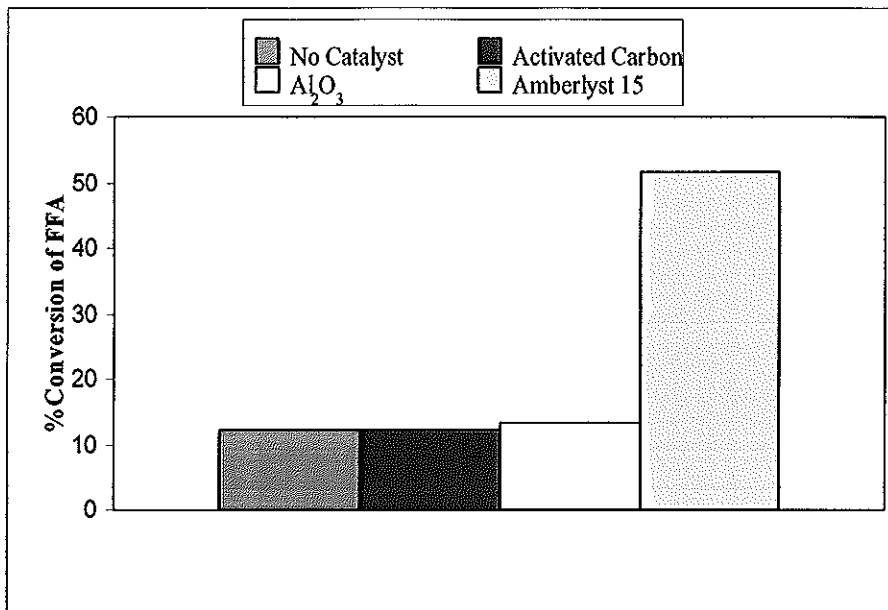
องค์ประกอบน้ำมันปาล์มดิบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	จากการทดลอง	ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมัน สุราษฎร์ธานี
กรดไขมันอิสระ	5.19	3-5
โมนอกลิเซอไรด์	0.82	} 95
ไดกลิเซอไรด์	2.04	
ไตรกลิเซอไรด์	91.95	

#### 4.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

เป็นการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อ %Conversion ของกรดไขมันอิสระ (FFA) ในปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

##### (1) ผลของตัวรองรับ

ทำการทดลองเพื่อทดสอบผลของตัวรองรับแต่ละชนิดในการทำปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่สภาวะเดียวกัน ที่ปริมาณตัวรองรับ 20 wt.% เทียบกับ CPO อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 9 จากการทดลองพบว่า ตัวรองรับ  $Al_2O_3$  และ Activated carbon มีผลในการเร่งปฏิกิริยาน้อยมาก เนื่องจาก %Conversion ของกรดไขมันอิสระ ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทำปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ตัวรองรับ ส่วนตัวรองรับ Amberlyst 15 ให้ % Conversion ของกรดไขมันอิสระประมาณ 55 % เนื่องจาก Amberlyst 15 มีฤทธิ์เป็นกรดจึงส่งผลให้ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันเกิดเพิ่มมากขึ้น

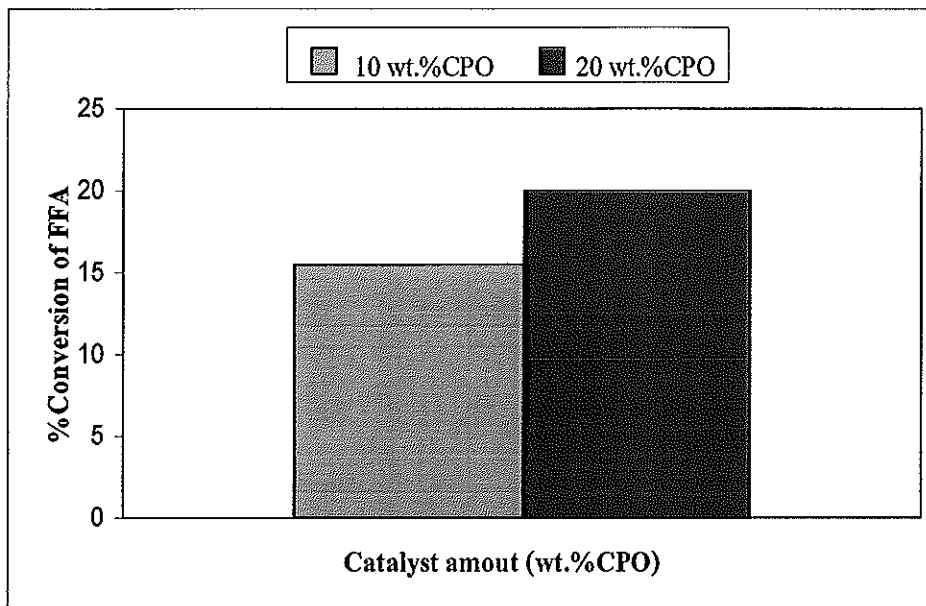


ภาพประกอบที่ 9 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับตัวรองรับแต่ละชนิด ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิง โมล CPO:ethanol ที่ 1:20 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

## (2) ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (การทดลองเบื้องต้น)

เนื่องจากในตอนเริ่มแรกไม่ทราบปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการทดลอง จึงทำการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบื้องต้น สภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา 20%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อัตราส่วนเชิง โมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาคือ 10 wt.% และ 20 wt.% เทียบกับCPO ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 10 จากการทดลองพบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt.% เทียบกับCPO ให้ %Conversion ของกรดไขมันอิสระมากกว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 wt.% เทียบกับCPO ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 20 wt.% เทียบกับ CPO ในการทดลองต่อไป

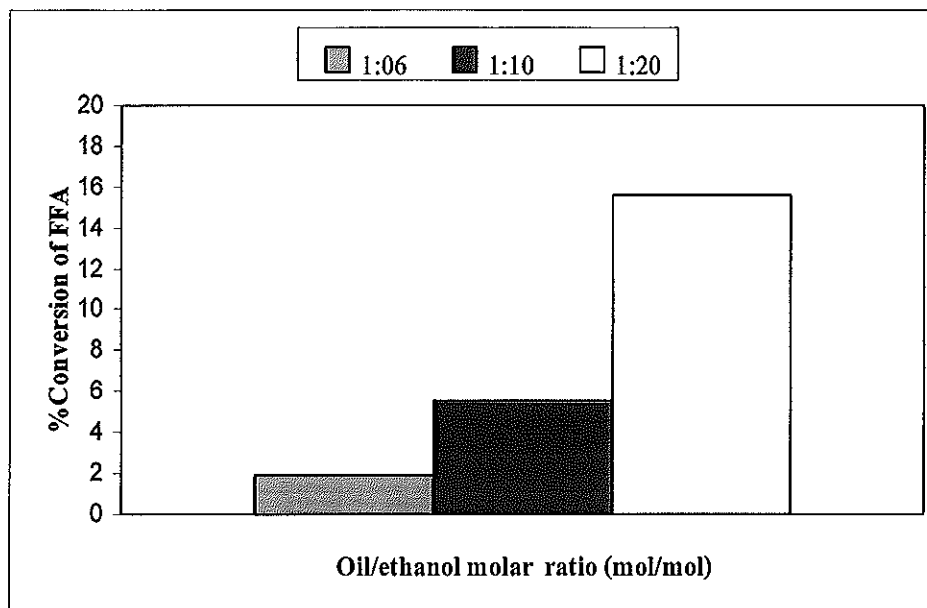




ภาพประกอบที่ 10 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 20% $H_2SO_4/Al_2O_3$ , อัตราส่วนเชิง โมล CPO:ethanol 1:20 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

(3) ผลของอัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล (การทดลองเบื้องต้น)

ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาอัตราส่วนเชิง โมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลที่ 1:6, 1:10 และ 1:20 ด้วย 20% $H_2SO_4/Al_2O_3$  ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt.% เทียบกับ CPO อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 11 จากการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนเชิง โมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลเป็น 1:20 สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้มากที่สุด ดังนั้นอัตราส่วนเชิง โมลที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลองในขั้นตอนต่อไป คือ อัตราส่วนเชิง โมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20

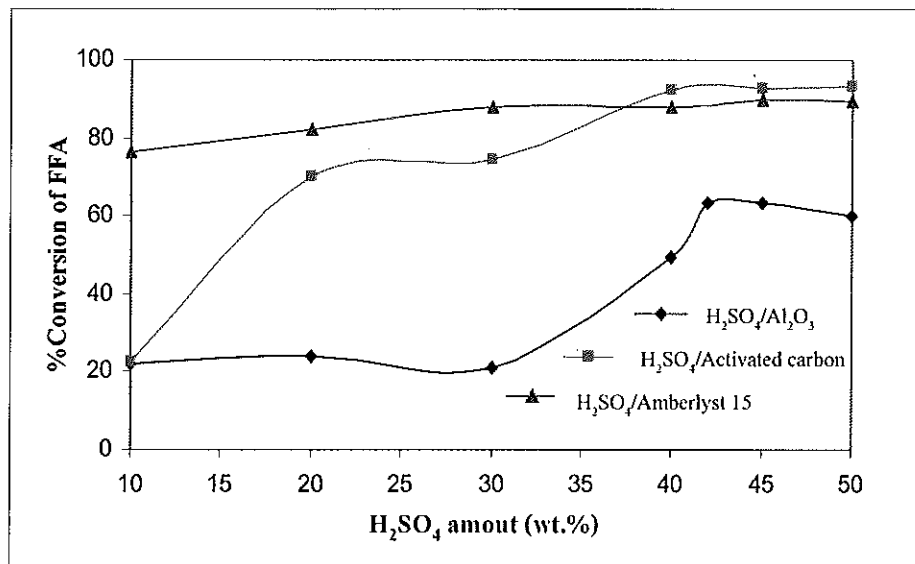


ภาพประกอบที่ 11 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับอัตราส่วนเชิง โมลของน้ำมันปาล์ม ดิบต่อเอทานอล ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา  $20\% \text{H}_2\text{SO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$  ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับ CPO อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

#### (4) ผลของปริมาณการไหล $\text{H}_2\text{SO}_4$ บน ตัวรองรับแต่ละชนิดต่อ %Conversion ของ FFA

การทดลองเบื้องต้นเพื่อออกแบบการทดลอง ซึ่งสนใจในส่วนของเปอร์เซ็นต์  $\text{H}_2\text{SO}_4$  บน  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Activated carbon และ Amberlyst 15 โดยศึกษาปริมาณ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ระหว่าง 10-50 wt.% เทียบกับตัวรองรับแต่ละชนิด ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 12 จากการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Activated carbon}$  และ  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Amberlyst 15}$  เมื่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  เพิ่มขึ้น % Conversion ของกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นด้วย แต่สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$  เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  มากกว่า 42 พบว่าให้ %Conversion ของกรดไขมันอิสระลดลง อาจเนื่องจากปริมาณ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ที่มากเกินไปทำลายโครงสร้างรูพรุนของอะลูมินาทำให้พื้นที่ผิวบางส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง จึงส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพลดลงเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xie และ Li (2006) ที่ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันจากน้ำมันพืชและเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไอโอไดด์บนอะลูมินา ( $\text{KI}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) พบว่า เมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ KI มากกว่า 35 ทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงเช่นกัน ดังนั้นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  บนตัวรองรับต่างๆ ที่เหมาะสมที่จะนำไปทำการทดลอง

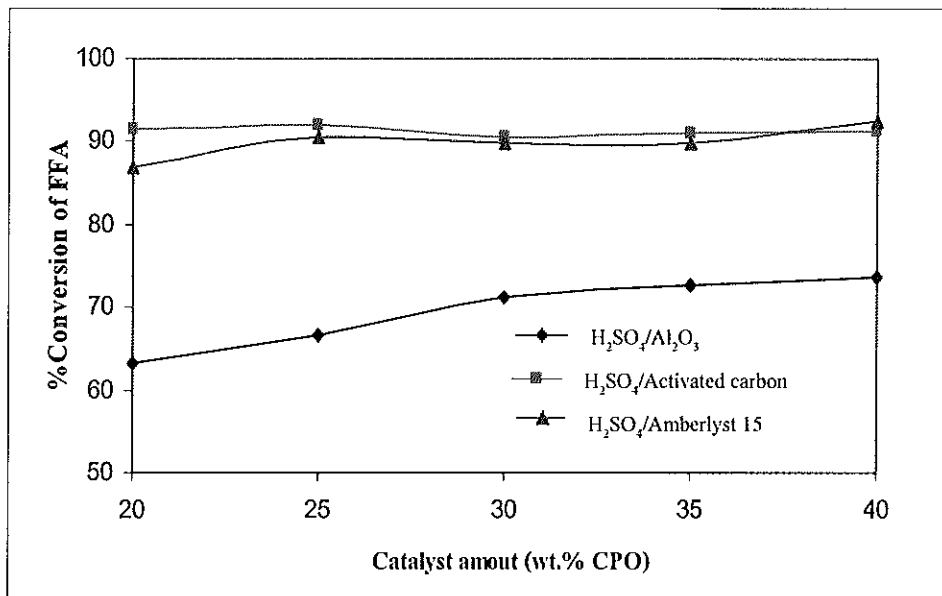
ขั้นตอนต่อไปคือ 42% $H_2SO_4/Al_2O_3$ , 40% $H_2SO_4/Activated\ carbon$  และ 30% $H_2SO_4/Amberlyst\ 15$  โดยประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา 40% $H_2SO_4/Activated\ carbon$  ใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยา 30% $H_2SO_4/Amberlyst\ 15$



ภาพประกอบที่ 12 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับเปอร์เซ็นต์โพลด  $H_2SO_4$ , ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมล CPO:ethanol 1:20 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที (a)  $\blacklozenge$   $H_2SO_4/Al_2O_3$ , (b)  $\blacksquare$   $H_2SO_4/Activated\ carbon$  และ (c)  $\blacktriangle$   $H_2SO_4/Amberlyst\ 15$

#### (5) ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ %Conversion ของ FFA

ศึกษาน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วง 20-40 wt.% เทียบกับCPO ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 13 พบว่า การเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 42% $H_2SO_4/Al_2O_3$  มากกว่า 30 wt.% เทียบกับCPO ส่งผลต่อ %Conversion น้อยมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้น้อยลงจึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 42% $H_2SO_4/Al_2O_3$  ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO ในการทดลองต่อไป ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา 40% $H_2SO_4/Activated\ carbon$  และ 30% $H_2SO_4/Amberlyst\ 15$  พบว่า การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้ช่วยเพิ่ม %Conversion ของกรดไขมันอิสระอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 40% $H_2SO_4/Activated\ carbon$  และ 30% $H_2SO_4/Amberlyst\ 15$  ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO และ 25 wt.% เทียบกับCPO ตามลำดับ ในการทดลองต่อไป

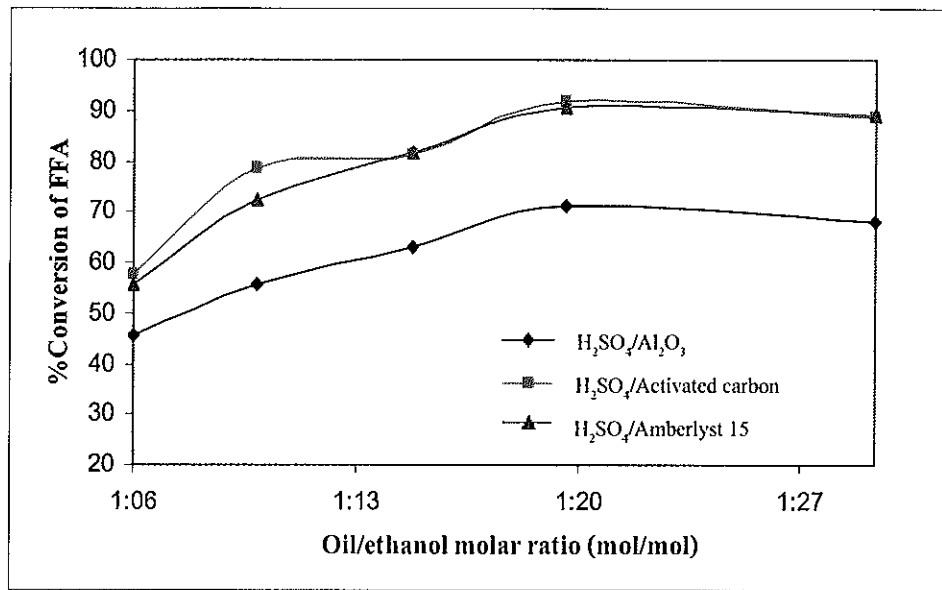


ภาพประกอบที่ 13 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับปริมาณร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาเทียบกับ CPO อัตราส่วนเชิงโมล CPO:ethanol 1:20 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C และ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที (a) ♦ 42%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (b) ■ 40%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Activated carbon และ (c) ▲ 30%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Amberlyst 15

#### (6) ผลของอัตราส่วนเชิงโมลต่อ %Conversion ของ FFA

จากการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนเชิงโมลที่เหมาะสม ซึ่งทำการทดลองที่อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลเป็น 1:6, 1:10, 1:15, 1:20 และ 1:30 ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 14 พบว่า การเพิ่มปริมาณเอทานอลส่งผลให้ %Conversion ของกรดไขมันอิสระเพิ่มสูงขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด ที่อัตราส่วนเชิงโมลระหว่างน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้มากที่สุด ดังนั้นอัตราส่วนเชิงโมลที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป คือ อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20

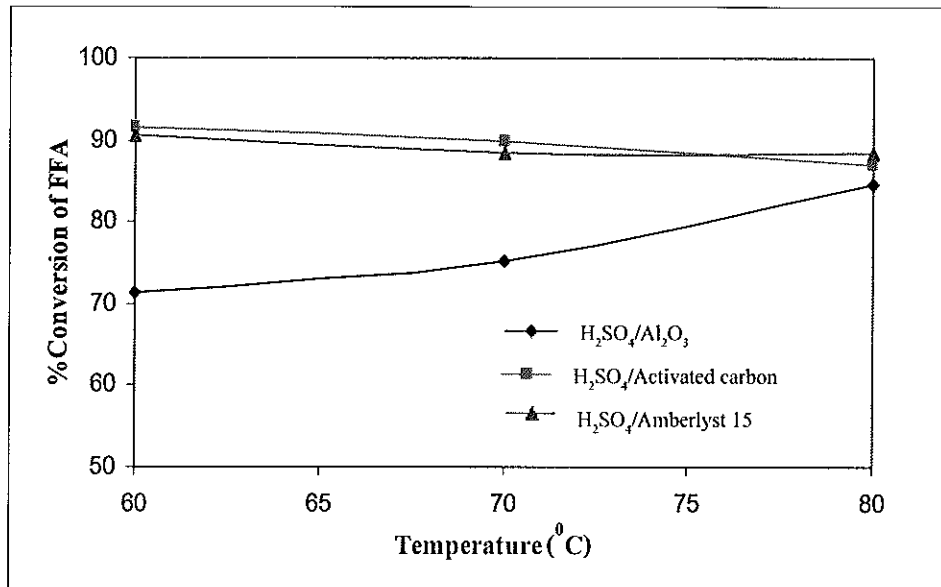
จากผลของอัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันกับเอทานอล สอดคล้องกับการทดลองของ Marchetti และคณะ (2007) ที่ทำการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันพืชใช้แล้ว ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Dowex monosphere 550 A resin พบว่า การเพิ่มเอทานอลส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบที่ 14 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับอัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที (a) ♦ 42% $H_2SO_4/Al_2O_3$  ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO, (b) ■ 40% $H_2SO_4/Activated\ carbon$  ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO และ (c) ▲ 30% $H_2SO_4/Amberlyst\ 15$  ปริมาณ 25 wt.% เทียบกับCPO

#### (7) ผลของอุณหภูมิต่อ %Conversion ของ FFA

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ทำการทดลองที่ 60 °C, 70 °C และ 80 °C ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 15 จากผลการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา 42% $H_2SO_4/Al_2O_3$  ที่อุณหภูมิ 80 °C สามารถลดกรดไขมันอิสระได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 60 °C และ 70 °C ดังนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิ 80 °C ในการทดลองต่อไป ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา 40% $H_2SO_4/Activated\ carbon$  และ 30% $H_2SO_4/Amberlyst\ 15$  พบว่า อุณหภูมิที่ทำให้ได้ %Conversion ของกรดไขมันอิสระดีที่สุด คือ 60 °C แต่การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ %Conversion ของกรดไขมันอิสระลดลงเล็กน้อย ดังนั้นจึงเลือกอุณหภูมิ 60 °C ในการทดลองต่อไป

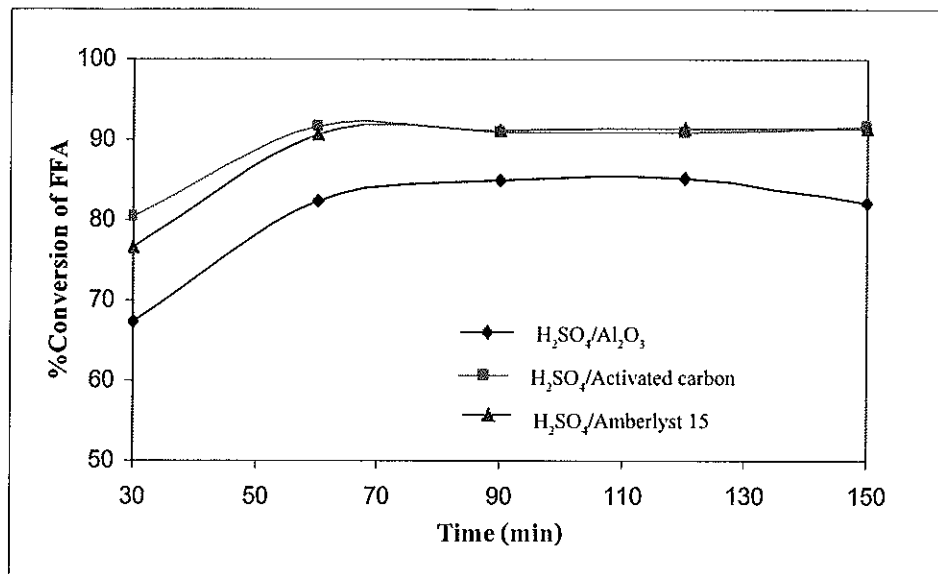


ภาพประกอบที่ 15 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับอุณหภูมิอัตราส่วนเชิงโมล CPO:ethanol 1:20 เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที (a) ♦ 42%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับ CPO, (b) ■ 40%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Activated carbon ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับ CPO และ (c) ▲ 30%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Amberlyst 15 ปริมาณ 25 wt.% เทียบกับ CPO

#### (8) ผลของเวลาต่อ %Conversion ของ FFA

จากการทดลองเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา ศึกษาที่เวลา 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 16 จากการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้ม %Conversion ของกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 30 ถึง 60 นาที และมีแนวโน้มคงที่หลังจาก 60 นาทีเป็นต้นไป ดังนั้นจึงใช้เวลา 60 นาทีในการทำปฏิกิริยาเพื่อลดกรดไขมันอิสระให้ได้น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดลองเวลาที่มีผลต่อ %Conversion ของกรดไขมันอิสระ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chung และ Park (2009) ซึ่งศึกษาปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองจากเมทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ที่อุณหภูมิ 60 °C เวลาในการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน คือ 15, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที พบว่า %Conversion ของกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 15-60 นาที และหลังจาก 60 นาทีเป็นต้นไป %Conversion ของกรดไขมันอิสระมีแนวโน้มคงที่



ภาพประกอบที่ 16 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับเวลาอัตราส่วนเชิงโมล CPO:ethanol 1:20 (a) ♦ 42% $H_2SO_4/Al_2O_3$  ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO อุณหภูมิ 80 °C, (b) ■ 40% $H_2SO_4/Activated\ carbon$  ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO อุณหภูมิ 60 °C และ (c) ▲ 30% $H_2SO_4/Amberlyst\ 15$  ปริมาณ 25 wt.% เทียบกับCPO อุณหภูมิ 60 °C

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดกรดไขมันอิสระของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริก โพลดบนตัวรองรับต่าง ๆ พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงสถานะที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดจากปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	%load H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.%CPO)	อัตราส่วนแข็ง โมล (CPO/Ethanol)	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที)	%conversion of FFA	FFA (wt.%)
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42	30	1:20	80	60	85	0.81
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /Activated carbon	40	20	1:20	60	60	92	0.56
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /Amberlyst 15	30	25	1:20	60	60	91	0.73
Amberlyst 15*	-	20	1:6	80	120	88	0.3
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> **	-	2.3	1:6	55	120	96	0.54

\* ศึกษาปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันจากน้ำมันถั่วเหลืองและเมทานอล (Park *et al.*, 2009)

\*\* ศึกษาปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันจากน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันและเมทานอล (Marcheetti and Errazu, 2008)

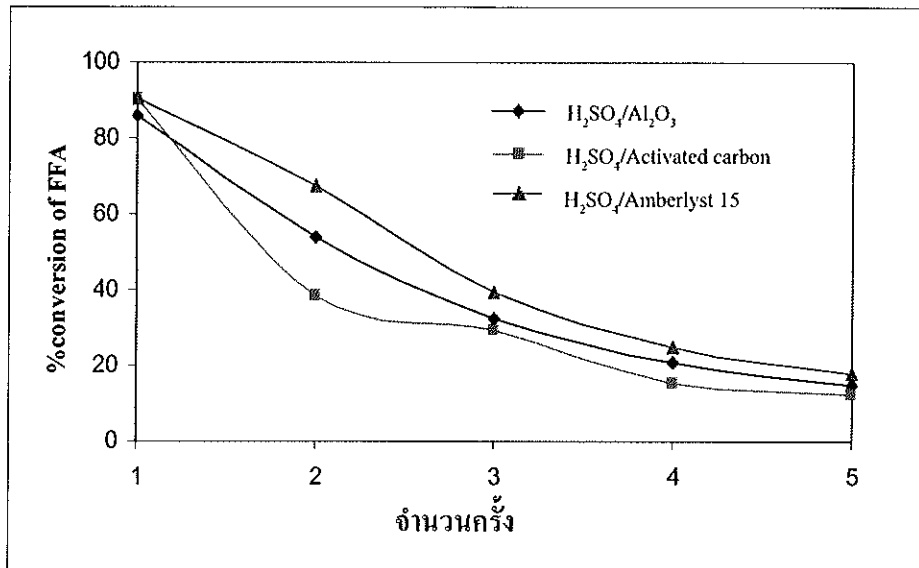
### (9) ประสิทธิภาพของการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำ

ทำการศึกษานำตัวเร่งปฏิกิริยา 42%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 40%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Activated carbon และ 30%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Amberlyst 15 มาใช้ซ้ำ โดยนำสภาวะการทดลองที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดจากปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันมาทำการใช้ซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง ผลแสดงคังภาพประกอบที่ 17 จากการทดลองพบว่า %Conversion ของกรดไขมันอิสระมีแนวโน้มลดลง ตัวอย่าง ตัวเร่งปฏิกิริยา 40%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Activated carbon การทดลองครั้งแรกให้ %Conversion ของกรดไขมันอิสระสูงถึง 92% และลดลงเหลือ 39%, 30%, 15% และ 13% ตามลำดับ สาเหตุของประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง คาดว่าเกิดจากการยึดเกาะทางพันธะเคมีระหว่าง H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และตัวรองรับแต่ละชนิดมีน้อย ทำให้ในการใช้ครั้งถัดไปมีปริมาณ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ในตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงจึงส่งผลให้ %Conversion ของกรดไขมันอิสระลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alonso และคณะ (2007) ซึ่งได้ผลิตเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันด้วยน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมบนอะลูมินา (K/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) พบว่า เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ซ้ำ 4 ครั้ง ทำให้ FAME Yield(%) ลดลงจาก 99 wt.% ในครั้งแรกเหลือ 33 wt.%, 6.5 wt.% และ 3.8 wt.% ตามลำดับ เนื่องจากเกิดการหลุดของโพแทสเซียมไปยังเฟสของเหลว ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ ICP-AES ของตัวเร่งปฏิกิริยา K/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาเริ่มต้น (Fresh) มีปริมาณ K



8.16 wt.% และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ซ้ำครั้งที่ 2 และครั้งที่ 4 พบว่าเหลือปริมาณ K เท่ากับ 2.79 wt.% และ 1.23 wt.% ตามลำดับ

สำหรับการศึกษาการยืดเกาะทางพันธะเคมีระหว่าง  $H_2SO_4$  และตัวรองรับในงานวิจัยไม่ได้ทำการทดลอง ดังนั้นควรทำการศึกษาให้ละเอียดเพิ่มขึ้นเพื่อทำการยืนยันผลต่อไป

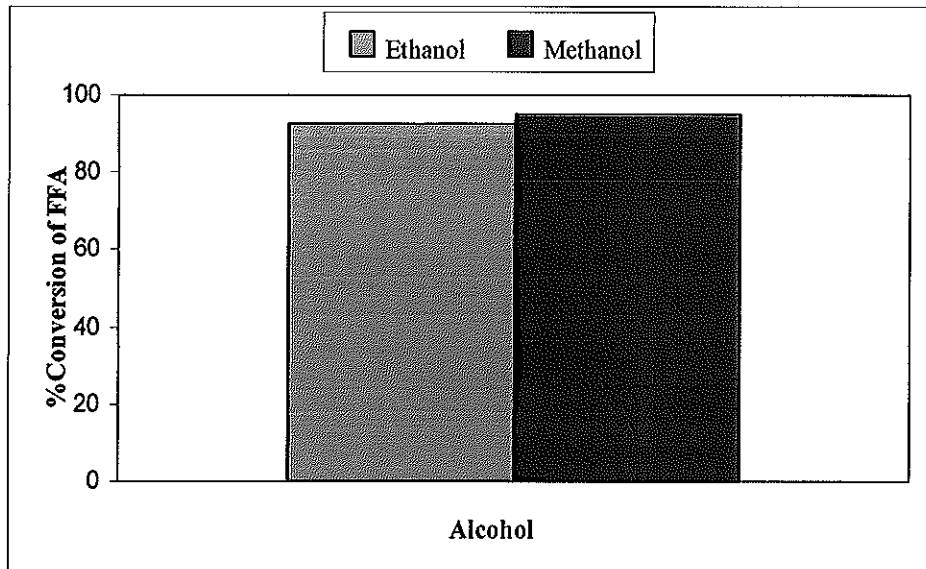


ภาพประกอบที่ 17 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับจำนวนครั้งการใช้ซ้ำที่ อัตราส่วนเชิงโมล CPO:ethanol 1:20 เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที (a)  $\blacklozenge$  42% $H_2SO_4/Al_2O_3$  ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO อุณหภูมิ 80 °C, (b)  $\blacksquare$  40% $H_2SO_4/Activated\ carbon$  ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO อุณหภูมิ 60 °C และ (c)  $\blacktriangle$  35% $H_2SO_4/Amberlyst\ 15$  ปริมาณ 25 wt.% เทียบกับCPO อุณหภูมิ 60 °C

#### (10) ผลของชนิดของแอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน

เมื่อทำการศึกษาชนิดของแอลกอฮอล์ระหว่างเอทานอลและเมทานอล ในการทำปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันด้วยน้ำมันปาล์มดิบที่สถานะเดียวกัน คือ 40% $H_2SO_4/Activated\ carbon$  ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อแอลกอฮอล์ 1:20 ที่อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 18 พบว่า %Conversion ของกรดไขมันอิสระที่ได้จากเอทานอลและเมทานอล คือ 92% และ 95% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hanh และคณะ (2009) ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันของ Triolein ด้วยเมทานอลและเอทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH ภายใต้ระบบ

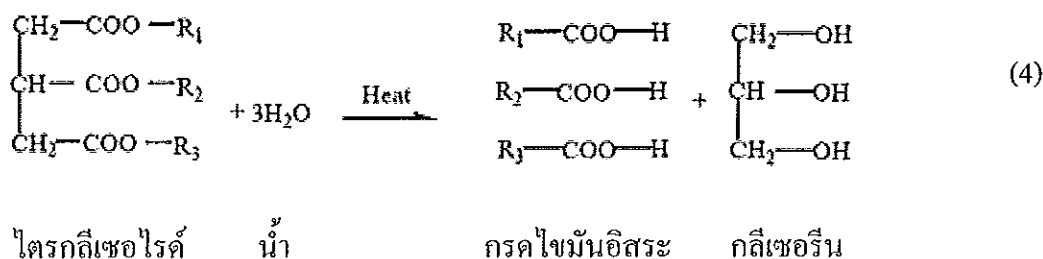
Ultrasonic irradiation พบว่า เมทิลเอสเทอร์และเอทิลเอสเทอร์ให้ Yield (%) เท่ากับ 91 wt.% และ 89 wt.% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพประกอบที่ 18 แสดง %Conversion ของกรดไขมันอิสระกับชนิดของแอลกอฮอล์ระหว่างเอทานอลและเมทานอล ที่ 40% $H_2SO_4$ /Activated carbon ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt.% เทียบกับ CPO อัตราส่วนเชิง โมล CPO:ethanol 1:20 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

#### (11) ผลของปฏิกิริยา Hydrolysis ที่มีต่อ %Conversion ของ FFA

จากการศึกษาการลดกรดไขมันอิสระของน้ำมันปาล์มดิบด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน คาดว่าเกิดปฏิกิริยา Hydrolysis ที่ทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์และน้ำ ได้เป็นกรดไขมันอิสระ เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง เนื่องจากในระหว่างทำปฏิกิริยามีน้ำเกิดขึ้น ดังนั้นน่าจะเกิดปฏิกิริยา Hydrolysis และส่งผลให้ปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นได้ ปฏิกิริยา Hydrolysis แสดงได้ดังสมการที่ 4



#### 4.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน

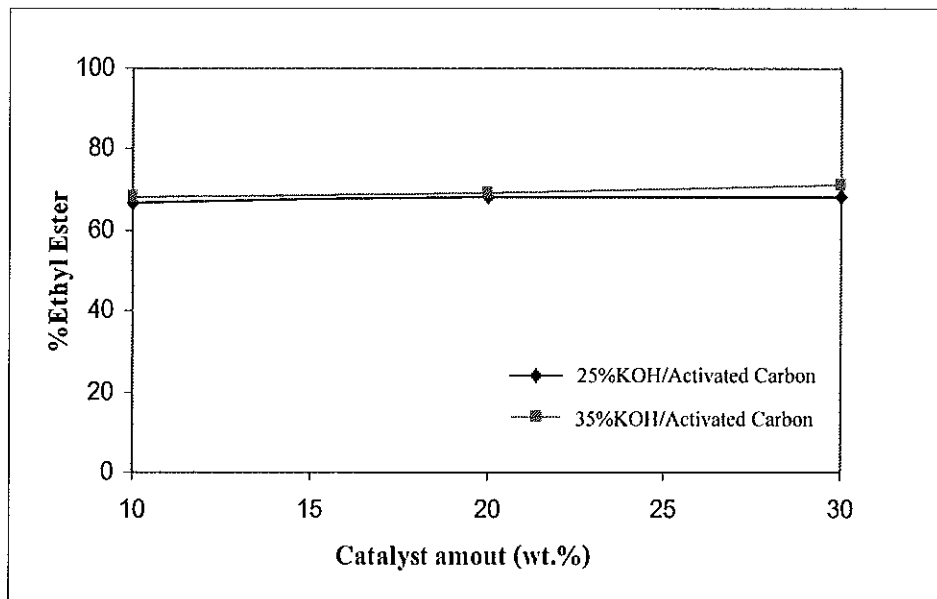
ในกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันจะทำการศึกษาผลของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนตัวรองรับ และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ %Ethyl Ester โดยกำหนดสภาวะการทดลองที่เหมาะสมจากงานวิจัยของ Noiroj และคณะ (2008) ได้แก่ อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:9 อุณหภูมิ 60 °C เวลา 120 นาที ในแต่ละการทดลอง โดยทดสอบ %Ethyl Ester ด้วยวิธีทดสอบแบบกะประมาณ

##### 4.4.1 ศึกษาผลของการใช้ KOH/Activated carbon เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ทำการศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนถ่านกัมมันต์ 2 ค่า คือ 25%KOH/Activated carbon และ 35%KOH/Activated carbon

##### (1) ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ %Ethyl Ester

ศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วง 10-30 wt.% เทียบกับCPO ของตัวเร่งปฏิกิริยา 25%KOH/Activated carbon และ 35%KOH/Activated carbon ที่สภาวะดังนี้ อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลเป็น 1:9 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 19 จากการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดส่งผลต่อ %Ethyl Ester น้อยมาก แต่ตัวเร่งปฏิกิริยา 35%KOH/Activated carbon ให้ %Ethyl Ester สูงกว่าเล็กน้อย ดังนั้นจึงเลือก ตัวเร่งปฏิกิริยา 35%KOH/Activated carbon ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO ในการทดลองต่อไป



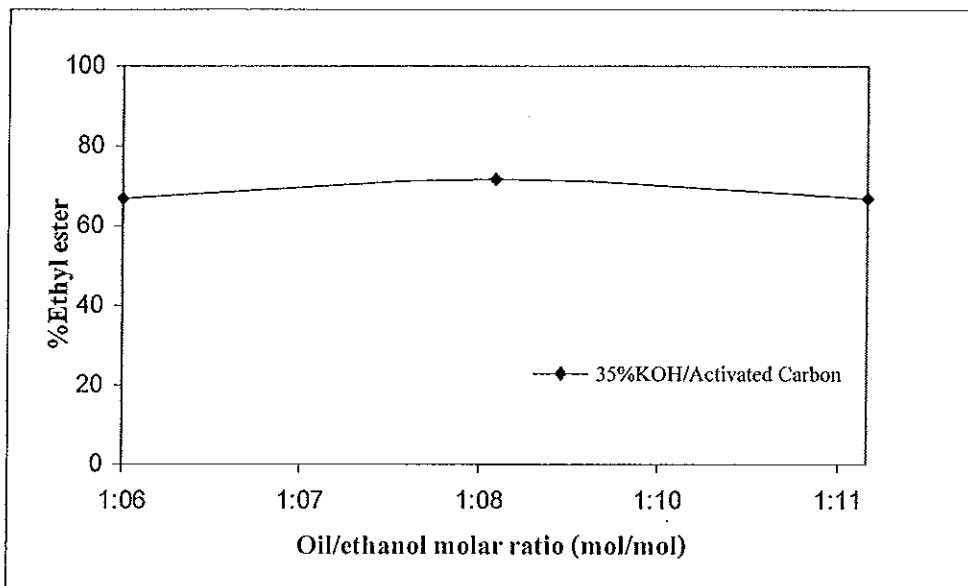
ภาพประกอบที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเทอร์กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนเชิงโมล CPO:Ethanol 1:9 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาการทำปฏิกิริยา 120 นาที

### (2) ผลของอัตราส่วนเชิงโมลต่อ %Ethyl Ester

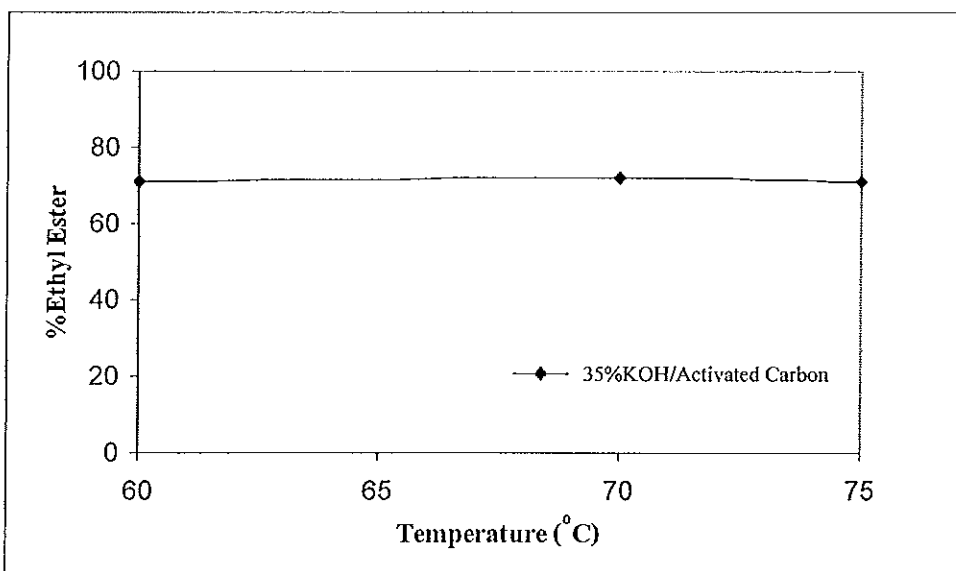
จากการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนเชิงโมลที่เหมาะสม ซึ่งทำการทดลองที่อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลเป็น 1:6, 1:9 และ 1:12 เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาบนถ่านกัมมันต์ คือ 35%KOH/Activated carbon ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO ที่อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 20 พบว่า ที่อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:9 ให้ %Ethyl Ester มากที่สุด ดังนั้นอัตราส่วนเชิงโมลที่จะนำมาใช้ในการทดลองต่อไป คือ อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลเป็น 1:9

### (3) ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อ %Ethyl Ester

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C, 70 °C และ 75 °C ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 35%KOH/Activated carbon ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO ที่อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลเป็น 1:9 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 21 จากการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลต่อ %Ethyl Ester น้อยมาก เนื่องจากในแต่ละอุณหภูมิให้ค่า %Ethyl Ester ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงเลือกอุณหภูมิ 60 °C ในการทดลองต่อไป



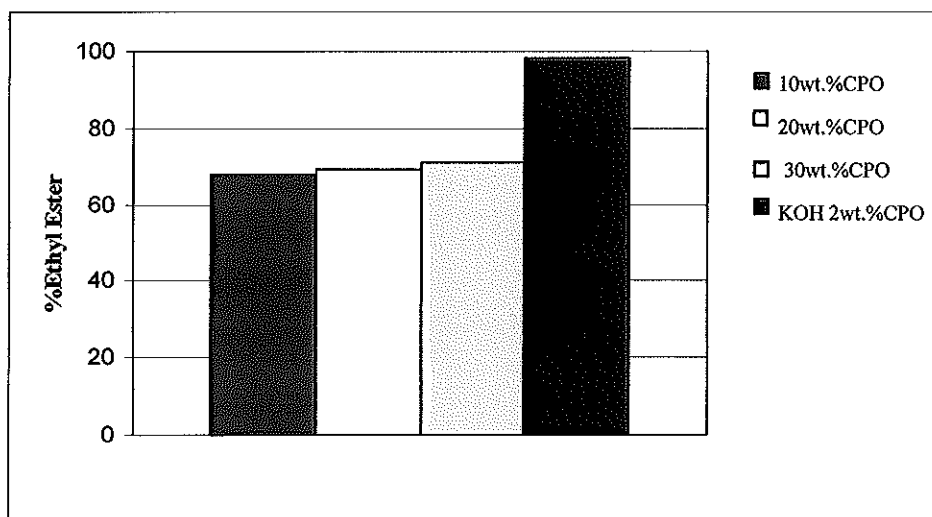
ภาพประกอบที่ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเทอร์กับอัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt.% เทียบกับCPO อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที



ภาพประกอบที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเทอร์กับอุณหภูมิ ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 35% KOH/Activated carbon ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมล CPO:Ethanol 1:9 และเวลาการทำปฏิกิริยา 120 นาที

#### (4) ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์

ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ ซึ่งศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา KOH ปริมาณ 2 wt.% เทียบกับ CPO เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ ซึ่งศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา 35%KOH/Activated carbon ที่ปริมาณต่างๆ ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ที่สภาวะ อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลเป็น 1:9 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 22 จากการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอกพันธ์ มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยให้ %Ethyl Ester สูงถึง 99 % เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ให้ % Ethyl ester ประมาณ 72% ซึ่งแสดงว่าที่สภาวะการทดลองเดียวกัน ตัวเร่งปฏิกิริยา 35%KOH/Activated carbon มีประสิทธิภาพต่ำกว่าเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา KOH 2 wt.% เทียบกับ CPO จากการนำตัวเร่งปฏิกิริยา 35%KOH/Activated carbon ไปวิเคราะห์ด้วย XRD สามารถยืนยันได้ว่า KOH ที่ไหลบนถ่านกัมมันต์ได้เปลี่ยนไปเป็น  $\text{KHCO}_3$  ซึ่งมีคุณสมบัติละลายน้ำแต่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์จึงอาจส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีผลในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่มีแอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้น รวมทั้ง  $\text{KHCO}_3$  มีค่า pH ประมาณ 8-9 ซึ่งถือว่าเป็นเบสอ่อน ดังนั้นจึงส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพต่ำ และมีผลต่อการศึกษาปัจจัยอื่น ๆ คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก KOH บนถ่านกัมมันต์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา



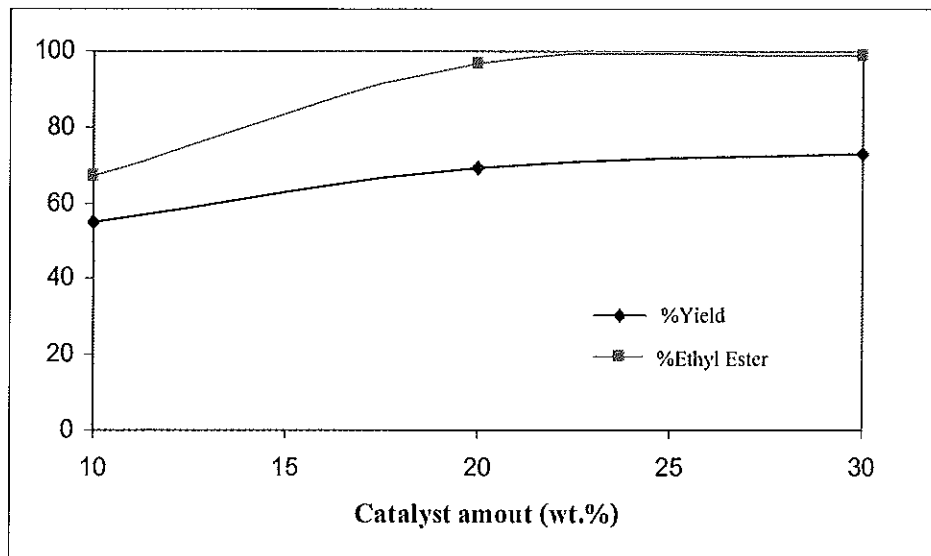
ภาพประกอบที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเตอริฟิเคชันกับปริมาณต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 35%KOH/Activated carbon ที่อัตราส่วนเชิงโมล CPO:Ethanol 1:9 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที

#### 4.4.2 ผลของการใช้ KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากงานวิจัยของ Noiroj และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันด้วยน้ำมันปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์บนอะลูมินา ซึ่งพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ 25% KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิง โมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล 1:15 ที่อุณหภูมิ 60 °C ให้ผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ 99% ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาดัชนีตัวเร่งปฏิกิริยา 25%KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

##### (1) ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ %Ethyl Ester

ศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วง 10-30 wt.% เทียบกับCPO โดยใช้อัตราส่วนเชิง โมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลเป็น 1:9 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที โดยใช้ 25%KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 23 จากการทดลองพบว่า สภาวะ อัตราส่วนเชิง โมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:9 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 25%KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> สูงถึง 20 wt.% เทียบกับCPO ส่งผลให้ %Ethyl Ester เพิ่มขึ้นถึง 99% แต่ให้ Yield 69 % เนื่องจากปัญหาการแยกชั้นระหว่างเอทิลเอสเทอร์และกลีเซอริน การที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 25%KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเนื่องจาก KOH บนอะลูมินา ที่เปลี่ยนเป็น [K<sub>2</sub>(Al<sub>2</sub>O(OH)<sub>2</sub>)] ที่มีความเป็นเบสสูง คือมีค่า pH ประมาณ 13 นอกจากนั้น ยังมีหมู่ ฟังก์ชัน OH ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทดสอบ FT-IR เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันต่อไป แสดงว่า KOH บนอะลูมินามีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Noiroj และคณะ (2008) ดังนั้น จึงเลือกตัวเร่งปฏิกิริยา 25%KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO ในการทดลองต่อไป

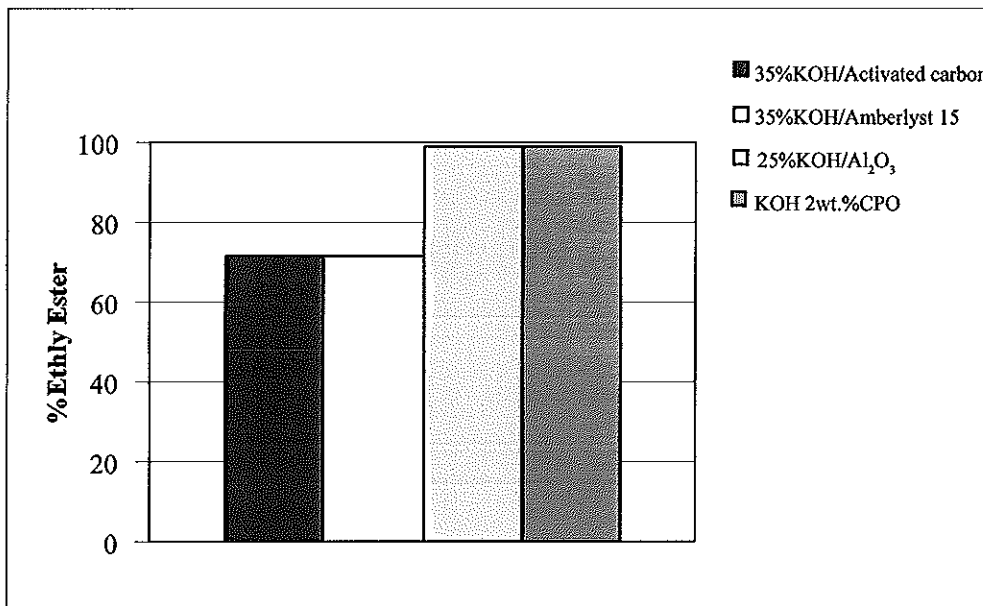


ภาพประกอบที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเทอร์กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 25%KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่อัตราส่วนเชิงโมล CPO:Ethanol 1:9 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาการทำปฏิกิริยา 120 นาที

#### 4.4.3 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ %Ethyl Ester

เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ KOH 2 wt.% และตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ 35%KOH/Activated carbon, 35%KOH/Amberlyst 15 และ 25%KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ที่สภาวะปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด 30 wt.% เทียบกับ CPO อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลเป็น 1:9 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที ผลแสดงดังภาพประกอบที่ 24 จากการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา 35%KOH/Activated carbon และ 35%KOH/Amberlyst 15 ให้ %Ethyl Ester เพียง 72% จากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่า KOH บนตัวรองรับทั้งสองชนิด เปลี่ยนเป็น KHCO<sub>3</sub> ที่มีคุณสมบัติละลายน้ำแต่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์จึงส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่มีแอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้น จึงส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพต่ำ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา 25%KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เปลี่ยนเป็น [K<sub>2</sub>(Al<sub>2</sub>O(OH)<sub>5</sub>)] มีหมู่ฟังก์ชัน OH ในการทำปฏิกิริยา ให้ %Ethyl Ester สูงถึง 99% ซึ่งใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยา KOH จากการศึกษาความเป็นเบสพบว่า KHCO<sub>3</sub>, [K<sub>2</sub>(Al<sub>2</sub>O(OH)<sub>5</sub>)] และ KOH มีค่า pH เท่ากับ 8, 13, 14 ตามลำดับ แสดงว่า KHCO<sub>3</sub> เป็นเบสอ่อน จึงมีผลต่อปฏิกิริยาน้อยสุดเมื่อเทียบกับ [K<sub>2</sub>(Al<sub>2</sub>O(OH)<sub>5</sub>)] และ KOH ที่เป็นเบสแก่





ภาพประกอบที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเทอร์กับชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนเชิงโมล CPO:Ethanol 1:9 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt.% เทียบกับCPO

การที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 25%KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยา KOH เนื่องจากน่าจะเกิดการหลุดของ [K<sub>2</sub>(Al<sub>2</sub>O(OH)<sub>2</sub>)] จากอะลูมินาไปยังเฟสของเหลวจึงทำให้เป็นการเร่งปฏิกิริยาแบบ Homogeneous เป็นบางส่วน โดยให้ %Ethyl Ester สูงถึง 99

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา 25%KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลเป็น 1:9 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที ให้ %Ethyl Ester สูงถึง 99% และ Yield 69 % ซึ่งสภาวะการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยหลายงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 10 พบว่าปัจจัยการผลิตเอทิลเอสเทอร์และเมทิลเอสเทอร์มีความใกล้เคียงกัน แต่ต่างกันที่เอทิลเอสเทอร์ให้ % Yield ต่ำกว่า เนื่องจากมีเอทิลเอสเทอร์บางส่วนละลายอยู่ในกลีเซอรินที่ไม่สามารถแยกออกมาได้

จากการศึกษาการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา 25%KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> พบว่า หลังจากทดลองครั้งแรกไม่สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกมาได้ เนื่องจากอะลูมินาได้ละลายอยู่ในเฟสกลีเซอรินที่มีลักษณะเป็น slurry ดังนั้นจึงไม่สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนกลับมาใช้ซ้ำได้

ตารางที่ 10 แสดงสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเทียบกับงานวิจัยต่าง ๆ

งานวิจัย	วัตถุดิบ	ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	อัตราส่วนน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ (mol/mol)	Biodiesel Yield (%)
จากการทดลอง	น้ำมันปาล์มดิบ	25%KOH/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ปริมาณ 20wt.%	60	120	1:9 (เอทานอล)	69
Alamu และคณะ 2007	น้ำมันเมล็ดปาล์มใน	KOH 1wt.%	60	120	เอทานอล 20 wt.%Oil	96
Prafulla และคณะ 2009	เมล็ดสุปุด้า	KOH 2wt.%	60	120	1:9 (เมทานอล)	95
Noiroj และคณะ 2008	น้ำมันปาล์ม	25%KOH/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ปริมาณ 3wt.%	60	120	1:15 (เมทานอล)	91.1
Kim และคณะ 2004	น้ำมันพืช	Na/NaOH/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ปริมาณ 1wt.%	60	120	1:9 (เมทานอล)	94

#### 4.5 สมบัติของเอทิลเอสเทอร์ตามมาตรฐานต่างๆ

เนื่องจากไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีการผลิตจากน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ กัน และปัจจัยในการผลิตต่างมีผลต่อไบโอดีเซลทั้งสิ้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมั่นใจและปลอดภัยต่อชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในเครื่องยนต์ จึงได้มีการกำหนดคุณภาพไบโอดีเซลเป็นมาตรฐานการใช้งานในประเทศผู้ผลิต และส่วนใหญ่จะมีมาตรฐานค่อนข้างใกล้เคียงกัน สำหรับประเทศไทยได้มีการกำหนดมาตรฐานไบโอดีเซลโดยกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน เป็น 2 ประเภท คือ มาตรฐานไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์เกษตร และมาตรฐานไบโอดีเซลเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน เพื่อให้ผู้บริโภคไบโอดีเซลสามารถเลือกใช้งานได้ตามความเหมาะสมของเครื่องยนต์ ในขณะที่มาตรฐานต่างๆ ส่วนใหญ่เป็นมาตรฐานของเมทิลเอสเทอร์ แต่ในงานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์ และได้นำคุณสมบัติต่างๆมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบแบบกระบวนการต่อเนื่องของ Suppalakpanya และคณะ (2008) รวมทั้งเปรียบเทียบกับมาตรฐานต่างๆ ซึ่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 แสดงคุณสมบัติของเอทิลเอสเทอร์เปรียบเทียบกับมาตรฐานต่างๆ

Item	Properties, unit	งานวิจัยนี้	Suppalakpanya (2008)	*Europe	*Germany	*USA	*กรมธุรกิจ พลังงาน
	Specification			EN 14214	DIN V 51606	ASTM D 6751	
1	Methyl Ester, wt.%	91.5	97	96.5	-	-	96.5
2	Density at 15 °C, g/cm <sup>3</sup>	0.869	0.879	0.86-0.90	0.875-0.90	-	0.86-0.90
3	Viscosity at 4 °C, cSt.	5.67	5.57	3.5-5.0	3.5-5.0	1.9-6.0	3.5-5.0
4	Flash point, °C	155	160	120 min	110 min	130 min	120min
5	Water content, %wt.	0.045	0.03	0.05 max	0.03 max	0.05 max	0.05max
6	Copper strip corrosion, number	1	1	1 max	1 max	1 max	1max
7	Cloud point, °C	7	8	-	-	-	-
8	Pour point, °C	4	6	-	-	-	-
9	Distillation, °C	90%, 337	90%, 337	-	-	90%, 360	-

\* มาตรฐานของเมทิลเอสเทอร์

#### 4.6 ข้อดีและข้อด้อยของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ในการผลิตเอทิลเอสเทอร์

##### ข้อดี

- การนำเอทานอลมาผลิตเอทิลเอสเทอร์ ช่วยส่งเสริมความมั่นคงด้านพลังงานและภาคการเกษตรของประเทศไทย และเอทานอลเป็นสารเคมีที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม
- การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์สามารถแยกออกจากปฏิกิริยาได้ง่าย ลดปริมาณน้ำเสียจากการล้างเอทิลเอสเทอร์

##### ข้อด้อย

- ตัวเร่งปฏิกิริยา 42% $H_2SO_4/Al_2O_3$ , 40% $H_2SO_4/Activated Carbon$  และ 30% $H_2SO_4/Amberlyst 15$  สำหรับปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันมีประสิทธิภาพต่ำในการกลับมาใช้ซ้ำ
- หลังจากทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน ไม่เกิดการแยกชั้นระหว่างเอทิลเอสเทอร์และกลีเซอริน จึงทำให้ %Yield ของเอทิลเอสเทอร์บางส่วนหายไป

- ตัวเร่งปฏิกิริยา  $35\%H_2SO_4$ /Activated carbon และ  $35\%H_2SO_4$ /Amberlyst 15 มีประสิทธิภาพต่ำสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน เนื่องจาก KOH บนตัวรองรับทั้งสองเปลี่ยนไปเป็น  $KHCO_3$
- ตัวเร่งปฏิกิริยา  $25\%KOH/Al_2O_3$  ไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ เนื่องจากอะลูมินาได้ละลายอยู่ในเฟสกลีเซอริน

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการศึกษาการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกบนถ่านกัมมันต์ สามารถยืนยันได้จากลักษณะทางกายภาพ โดยใช้เทคนิค FT-IR โดยพบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์การโหลด (% Loading)  $H_2SO_4$  บน Activated carbon สูงขึ้นจะพบพันธะ S=O ของซัลเฟต ( $SO_4^{2-}$ ) มากขึ้น และเมื่อศึกษาพื้นที่ผิวด้วย BET พบว่า พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ  $H_2SO_4$  ส่วนการนำตัวเร่งปฏิกิริยา  $H_2SO_4$ /Activated carbon ไปทดสอบ XRD ผลแสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นวัสดุอสัณฐาน เนื่องจาก  $H_2SO_4$  มีลักษณะเป็นของเหลว ไม่มีรูปร่างเป็นผลึก ดังนั้นจึงไม่สามารถหาองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/Activated carbon และ KOH/Amberlyst 15 เมื่อทดสอบด้วย XRD ปรากฏว่า KOH บนตัวรองรับทั้งสองชนิดได้เปลี่ยนไปเป็น  $KHCO_3$  ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำในการเร่งปฏิกิริยาเนื่องจาก  $KHCO_3$  เป็นเบสอ่อนมีค่า pH ประมาณ 8 และไม่สามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์จึงส่งผลต่อการผลิตเอทิลเอสเทอร์ที่มีแอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้น ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/ $Al_2O_3$  เมื่อทดสอบด้วย XRD ปรากฏว่า KOH บนอะลูมินาเปลี่ยนเป็น  $[K_2(Al_2O(OH)_2)]$  เป็นเบสแก่มีค่า pH ประมาณ 13 และมีหมู่ฟังก์ชัน OH ในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทดสอบ FTIR เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันต่อไป

#### 5.2 การศึกษาปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

จากการศึกษาปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับเอทานอลด้วยกรดซัลฟิวริกโหลดบนอะลูมินา ถ่านกัมมันต์ และแอมเบอร์ลิส 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดขึ้นกับสภาวะที่ต่างกัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามสามารถลดกรดไขมันอิสระให้น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จากสภาวะที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด และได้นำน้ำมันจากตัวเร่งปฏิกิริยา  $H_2SO_4$ /Activated carbon เข้าสู่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาต่ำกว่า จึงทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตโดยสภาวะที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 40%  $H_2SO_4$ /Activated carbon ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

20 wt.% เทียบกับ CPO อัตราส่วนเชิง โมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ให้ %Conversion ของกรดไขมันอิสระ 93 % หรือสามารถลดกรดไขมันอิสระเหลือร้อยละ 0.56 โดยน้ำหนัก

ตัวเร่งปฏิกิริยา  $H_2SO_4$ /Activated carbon,  $H_2SO_4/Al_2O_3$  และ  $H_2SO_4$ /Amberlyst 15 มีประสิทธิภาพต่ำในการนำกลับมาใช้ซ้ำ เพราะให้ %Conversion ของกรดไขมันอิสระลดลง

### 5.3 การศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

จากการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบ (FFA < 1wt.%) กับเอทานอลโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ไหลคบนอะลูมินา ถ่านกัมมันต์ และแอมเบอร์ลิส 15 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH บนถ่านกัมมันต์และ แอมเบอร์ลิส 15 ได้เปลี่ยนรูปไปเป็น  $KHCO_3$  ซึ่งมีคุณสมบัติละลายน้ำแต่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ จึงมีประสิทธิภาพต่ำในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันที่มีแอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้น โดยให้ %Ethyl Ester อยู่ในช่วง 67–72% ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา  $KOH/Al_2O_3$  ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าในการทำปฏิกิริยา โดยให้ %Ethyl Ester สูงถึง 99% ที่สภาวะดังนี้ 25% $KOH/Al_2O_3$  ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt.% เทียบกับ CPO อัตราส่วนเชิง โมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:9 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที

การผลิตเอทิลเอสเตอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 25% $KOH/Al_2O_3$  ให้ %Ethyl Ester สูงถึง 99% แต่ให้ %Yield เพียง 61 wt.% เนื่องจากมีเอทิลเอสเตอร์บางส่วนละลายอยู่ในกลีเซอรินที่ไม่สามารถแยกออกมาได้ดังนั้นต้องมีการปรับปรุงกระบวนการแยกกลีเซอรินให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และตัวเร่งปฏิกิริยา 25% $KOH/Al_2O_3$  ไม่สามารถแยกออกมาจากเฟสกลีเซอรินออกมาใช้ซ้ำได้

### 5.4 สมบัติของเอทิลเอสเตอร์

คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเอทิลเอสเตอร์ที่ผลิตได้ เช่น จุดวาบไฟ ค่าความถ่วงจำเพาะ อุณหภูมิการกลั่น มีค่าอยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน (เมทิลเอสเตอร์) แต่ความหนืดมีค่ามากกว่าเกณฑ์มาตรฐานเมทิลเอสเตอร์เล็กน้อย และเมื่อนำเอทิลเอสเตอร์ทดสอบด้วย GC พบว่า ให้ %Ethyl Ester เพียง 91.5% ดังนั้นควรมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตต่อไปเพื่อให้ได้เอทิลเอสเตอร์ตรงตามมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงาน

## 5.5 ข้อเสนอแนะ

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งซึ่งใช้ในงานวิจัย เมื่อทำการโหลดแล้วควรเก็บไว้ในโถสุญญากาศ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถในการดูดซับน้ำที่มีอยู่ในอากาศค่อนข้างสูง และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรมีความสามารถในการยึดเกาะอนุภาคซึ่งกันและกันสูง เพราะหากในขั้นตอนการทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันและทรานส์เอสเตอริฟิเคชันต้องใช้การกวนเพื่อให้เกิดการสัมผัสที่ดี จะทำให้มีตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนหลุดออกเป็นอนุภาคเล็กๆ แฉวนลอยในชั้นน้ำมันซึ่งจะต้องแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ด้วย

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาโหลดบนตัวรองรับต่างๆ จะต้องไม่เปลี่ยนรูปไปเป็นสารชนิดอื่น โดยสามารถทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเทคนิค XRD เพื่อเป็นการยืนยันชนิดของสารประกอบได้

หลังจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันพบว่าเอทิลเอสเตอริฟิเคชันไม่เกิดการแยกชั้นระหว่างกลีเซอริน ดังนั้นต้องหาวิธีการที่สามารถแยกเอทิลเอสเตอริฟิเคชันให้ได้มากที่สุดเพื่อเป็นการเพิ่ม %Yield

## เอกสารอ้างอิง

กิตติภูมิ ศุภลักษณ์ปัญญา. 2548. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ โดยกรรมวิธีโอโซนชั้น  
เชิงเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซัลโฟเนตวานาเดียม-ไททานเนียม และแอมเบอร์ลิสต์.  
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

จตุพร วิชาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. สมบัติของตัวรองรับ. ใน การเร่งปฏิกิริยา :  
พื้นฐานและการประยุกต์. พิมพ์ครั้งที่ 1. หน้า 136-155. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ชาคริต ทองอุไร, สันหทัย กลิ่นพิกุล, จริญญา บุญกาญจน์ และพิมพ์พรณ เกียรติชิมกุล. 2544. การ  
ผลิตไบโอดีเซลจากผลิตผลปาล์มน้ำมัน. ว. สงขลานครินทร์ วทท. ปีที่ 23 (ฉบับพิเศษ) :  
831-841.

ฉัฐมณเฑียร ถิ่นจินดา และกานติส สุดสาคร. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่ง  
ปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 15.  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บัวชุม อุดมทรัพย์, อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ และธราพงษ์ วิจิตสานต์. การสังเคราะห์  
เอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบและโซปาล์มสเตียรีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง. การประชุม  
วิชาการวิศวกรรมเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 15. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะ  
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พญาไท กรุงเทพมหานคร 10300 และภาควิชา  
วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง.

พิสิฐพงษ์ อินทรพงษ์, ผศ.ดร. อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย และนาวาเอก ดร. สมัย ใจอินทร์. 2550.  
การศึกษาการชะล้างของ KOH บน  $Al_2O_3$  และ NaY zeolite ในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้  
ปฏิกิริยา ทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย  
ครั้งที่ 17. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และกองวิจัย  
และพัฒนา กรมพัฒนาการช่าง กรมอุทกหารเรือ.



สุภาวดี เฟื่องคง. 2549. จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันสำหรับไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฟอสโฟทังสเตน แอซิด. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Alamu, O. J., Waheed, M. A. and Jekayinfa, S. O. 2008. Effect of ethanol-palm kernel oil ratio on alkali-catalyzed biodiesel yield, *Fuel*. 87 : 1529-1533.

Alonso, D. M., Mariscal, R., Tost, M. T., Poves, M. D. and Granados, M. L. 2007. Potassium leaching during triglyceride transesterification using K/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts, *Catalysis Communications*. 8 : 2074-2080.

Chongkhong, S., Tongurai, C., Chetpattananondh, P. and Bunyakan, C. 2007. Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate, *Biomass and Bioenergy*. 31 : 563-568.

Chung, K.H. and Park, B.G. 2009. Esterification of oleic acid in soybean oil on zeolite catalysts with different acidity, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 15 : 388-392.

Hanh, H. D., Dong, N. T., Okitsu, K., Nishimura, R. and Maeda, Y. 2009. Biodiesel production through transesterification of triolein with various alcohols in an ultrasonic field, *Renewable Energy*. 34 : 766-768.

Issariyakul, T., Kulkarni, M. G., Dalai, A. K. and Bakhshi, N. N. 2006. Production of biodiesel from waste fryer grease using mixed methanol/ethanol system, *Fuel Processing Technology*. 88 : 429-436.

Kim, H. J., Kang, B. S., Kim, M. J. and Park, Y. M. 2004. Transesterification of vegetable oil to biodiesel using heterogeneous base catalyst, *Catalysis Today*. 93-95 : 315-320.

Li, X., Deng, S., Fu, H., Mu, G. and Zhao, N. 2008. Synergism between rare earth cerium(IV)

- Li, X., Deng, S., Fu, H., Mu, G. and Zhao, N. 2008. Synergism between rare earth cerium(IV) ion and vanillin on the corrosion of steel in  $H_2SO_4$  solution: Weight loss, electrochemical, UV-vis, FTIR, XPS, and AFM approaches, *Applied Surface Science*. 254 : 5574-5586.
- Mangesh, G. K., Dalai, A. K. and Bakhshi, N. N. 2006. Transesterification of canola oil in mixed methanol/ethanol system and use of esters as lubricity additive, *Bioresource Technology*. 98 : 2027-2033.
- Marchetti, J. M. and Errazu, A. F. 2008. Esterification of free fatty acids using sulfuric acid as catalyst in the presence of triglycerides, *Biomass and Bioenergy*.
- Marchetti, J. M., Miguel, V. U. and Errazu, A. F. 2007. Heterogeneous esterification of oil with high amount of free fatty acids. *Fuel*. 86 : 906-910.
- Noiroj, K., Intarapong, P., Luengnaruemitchai, A. and Jai-in, S. 2008. A comparative study of  $KOH/Al_2O_3$  and  $KOH/NaY$  catalysts for biodiesel production via transesterification from palm oil, *Renewable Energy*. 34 : 1145-1150.
- Park, J. Y., Kim, D. K. and Lee, J.S. 2009. Esterification of free fatty acids using water-tolerable Amberlyst as a heterogeneous catalyst, *Bioresource Technology*.
- Suppalakpanya, K., Ratanawilai, S. and Tongurai, C. 2009. Esterification of Free Fatty Acid in Crude Palm Oil by Continuous Microwave with Ethanol, *Rerearch Cooperation Between Academies and Industries in Thailand* : 160-161.
- Wang, Y., Ou, S., Liu, P. and Zhang, Z. 2007. Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process, *Energy Conversion of Management*. 48 : 184-188.

Xie, W., Huang, X. and Li, H. Soybean oil methyl esters preparation using NaX zeolites loaded with KOH as a heterogeneous catalyst, *Bioresource Technology*. 98 : 936-939.

Xie, W. and Li, H. 2006. Alumina-supported potassium iodide as a heterogeneous catalyst for biodiesel production from soybean oil, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 255 : 1-9.

Xie, W., Peng, H. and Chen, L. 2006. Transesterification of soybean oil catalyzed by potassium loaded on alumina as a solid-base catalyst, *Applied Catalyst A: General*. 300 : 67-74.

Specialized R&D Center for Alternative Energy from Palm Oil and Oil Crops; Available online:  
<http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th> (12 July 2007)

Suratthani Oil Palm Research Center; Available online:  
<http://it.doa.go.th/palm/index.html> (3 September 2009)

# ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### 1. การหาค่า Free Fatty Acid (FFA) ของน้ำมัน

#### 1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 นอร์มอล เตรียมโดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณ 4 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร และเก็บสารละลายต่างในขวดแก้ว
3. ฟีนอล์ฟทาลีนเข้มข้นร้อยละ 1 (ละลายในแอลกอฮอล์)
4. สารละลายแอลกอฮอล์ ที่ปรับสภาพให้เป็นกลาง โดยเติมฟีนอล์ฟทาลีน 5 หยดลงในแอลกอฮอล์ 95% จำนวน 200 มิลลิลิตร แล้วหยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มอล ทีละหยดพร้อมทั้งเขย่าจน ได้สีชมพูถาวร

#### 1.2 วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างน้ำมันให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 1-10 กรัม ทศนิยมอย่างน้อย 2 ตำแหน่ง ในขวดรูปชมพูนขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายแอลกอฮอล์ที่มีสภาพเป็นกลาง จำนวน 50 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่าง เขย่าอย่างแรงให้ตัวอย่างน้ำมันละลายในสารละลายแอลกอฮอล์
3. เติมฟีนอล์ฟทาลีนประมาณ 5 หยด แล้วไทเทรตสารละลายตัวอย่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนกระทั่งได้สีชมพูถาวร
4. คำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระจากสูตร

$$\%FFA = \frac{\text{ปริมาณต่างที่ใช้ (ml)} \times \text{ความเข้มข้นต่าง (นอร์มอล)} \times 25.6}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)}}$$

## 2. การตรวจสอบคุณภาพไบโอดีเซลแบบกะประมาณ (proximate analysis) โดยใช้ไมโครเวฟ

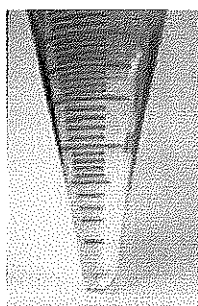
เป็นการตรวจสอบคุณภาพของไบโอดีเซล โดยการนำไบโอดีเซลทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันอีกครั้งในไมโครเวฟ โดยอาศัยหลักการที่ว่า หากในไบโอดีเซลยังมีกลีเซอไรด์ (ไตร-, ได-, โมโน-) เหลืออยู่เมื่อทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันกับเมทานอลและโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในสัดส่วนที่เหมาะสม ย่อมเกิดกลีเซอรินขึ้น ซึ่งปริมาณกลีเซอรินที่เกิดขึ้นนี้จะบ่งบอกถึงคุณภาพของไบโอดีเซลได้

### 2.1 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้

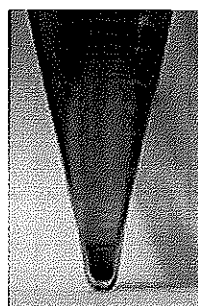
1. หลอดหยั่งรูปกรวย ซึ่งมีสเกลละเอียด 0.05 มิลลิลิตร
2. เต้าไมโครเวฟ
3. สารละลายเมทานอล+โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เตรียมได้โดยละลายโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3 กรัม ในเมทานอล 100 กรัม ใส่ขวดปิดฝาให้สนิท

### 2.2 วิธีการตรวจสอบ

1. ชั่งไบโอดีเซลใส่ขวดรูปกรวย 20 กรัม หรือประมาณ 24 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายเมทานอล+โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3 กรัม หรือประมาณ 4 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
3. นำเข้าทำปฏิกิริยา Transesterification ในไมโครเวฟ โดยใช้ความร้อนต่ำที่สุด (90 วัตต์) เวลา ประมาณ 1.5 นาที
4. ทิ้งให้เกิดการแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซล และกลีเซอริน



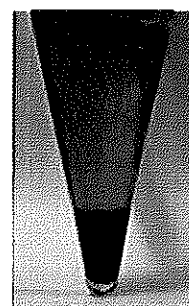
ตย. 1



ตย. 2



ตย. 3



ตย. 4

ภาพประกอบ ก.1 แสดงปริมาณกลีเซอริน

ตารางที่ ก.1 แสดงผลการตรวจสอบคุณภาพไบโอดีเซลแบบกะประมาณ โดยใช้ไมโครเวฟที่มีปริมาณกลีเซอไรด์ต่างๆ กัน

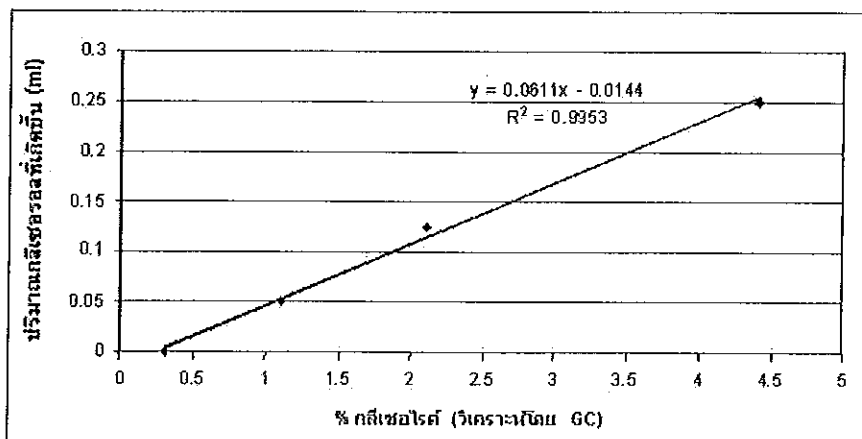
ตัวอย่าง	Glyceride จาก GC (%)	ปริมาณ Glycerin ที่เกิด (ml)
1	0.3	0
2	1.1	0.05
3	2.1	0.125
4	4.4	0.25

\*\* ลีของ ไบ โอดีเซลและกลีเซอรินต่างกันเนื่องจากตัวอย่างไบ โอดีเซลที่ได้ทำจากวัตถุดิบแตกต่างกัน

\*\* % กลีเซอไรด์วัดจากเครื่อง GC ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

### 2.3 ผลการตรวจสอบ

จากการตรวจสอบคุณภาพไบ โอดีเซลแบบกะประมาณ โดยใช้ไมโครเวฟ ที่มีปริมาณกลีเซอไรด์ต่าง ๆ กัน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1 ซึ่งสามารถสร้างกราฟมาตรฐานได้ดังภาพที่ 2



ภาพประกอบ ก.2 แสดงกราฟมาตรฐานของปริมาณกลีเซอรินที่เกิดขึ้นจากการตรวจสอบคุณภาพไบ โอดีเซลแบบกะประมาณ โดยใช้ไมโครเวฟ

หมายเหตุ ในกลีเซอรินที่เห็นไม่ได้เป็นกลีเซอรินบริสุทธิ์ แต่มีเมทานอลละลายอยู่อีกจำนวนหนึ่ง และกลีเซอรินจำนวนหนึ่งละลายใน ไบโอดีเซลได้ ดังนั้นการทดสอบนี้จึงเป็นค่าโดยประมาณ เท่านั้น แต่อาจเป็นเครื่องบ่งชี้คุณภาพที่ตรวจได้รวดเร็ว และเป็นกรกลั่นกรองก่อนส่งตรวจที่ห้องปฏิบัติการมาตรฐานอีกส่วนหนึ่งด้วย จุดเด่นคือ ตรวจสอบได้เองง่าย ๆ และราคาถูก วัสดุเร็ว (สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืช)

### 3. การวิเคราะห์เอทิลเอสเทอร์

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. สารละลายผสมของ เฮกเซน : ไดเอทิลอีเทอร์ : กรดฟอร์มิก ในอัตราส่วน 50 : 20 : 0.3 (ปริมาตรต่อปริมาตรต่อปริมาตร)
2. สารละลายผสมของ เฮกเซน : เบนซีนในอัตราส่วน 1 : 1 (ปริมาตรต่อปริมาตร)

#### 3.2 วิธีวิเคราะห์

1. дукตัวอย่างละลายเอทิลเอสเทอร์ 150 มิลลิกรัม ละลายด้วยเฮกเซน 0.75 มิลลิลิตร
2. เตรียม Quartz rods (silica gel pore coated Chromarod S-III) นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไป Blank Scan ด้วย TLC/FID Analyzer ภายใต้สภาวะ 30 วินาทีต่อสแกนอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 160 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศ 2000 มิลลิลิตรต่อนาที
3. หยดสารละลายจากข้อ (1) ลงไปประมาณ 1 ไมโครลิตร นำ Quartz rods ไปแช่ในสารละลายซึ่งประกอบด้วย เฮกเซน : ไดเอทิลอีเทอร์ : กรดฟอร์มิก ในอัตราส่วน 50 : 20 : 0.3 (ปริมาตรต่อปริมาตรต่อปริมาตร) จนกระทั่งสารละลายเคลื่อนที่สูงประมาณ 8 เซนติเมตร (ประมาณ 20 นาที) หลังจากนั้นนำไปแช่ ในสารละลายซึ่งประกอบด้วย เฮกเซน : เบนซีน ในอัตราส่วน 1 : 1 (ปริมาตรต่อปริมาตร) จนกระทั่งสารละลายเคลื่อนที่สูงประมาณ 10 เซนติเมตร (ประมาณ 30 นาที)
4. นำ Quartz rods ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาสแกนภายใต้สภาวะเดียวกันกับ Blank Scan
5. อ่านผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม ChromStar Light โดยผลการทดลองแสดง ในรูปเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่



#### 4. การวิเคราะห์ความหนาแน่น

(Standard Practice for Density, Relative Density (Specific Gravity), or API Gravity of Crude Petroleum and liquid Petroleum Products by Hydrometer Method)

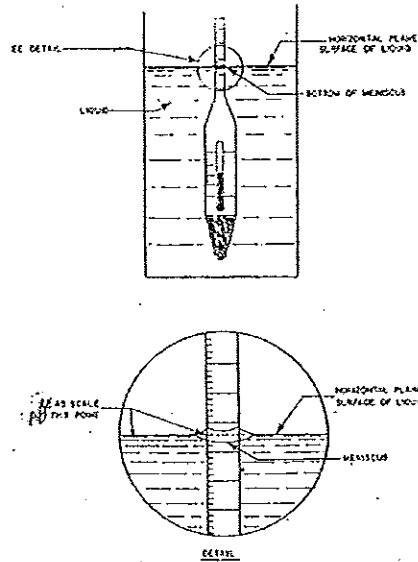
##### 4.1 อุปกรณ์

1. Hydrometer ต้องได้มาตรฐานตาม ASTM
2. เทอร์โมมิเตอร์ ต้องได้มาตรฐานตาม ASTM
3. กระจกตวง เส้นผ่าศูนย์กลางภายในอย่างน้อย 25 มม. ต้องใหญ่กว่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของ Hydrometer ที่ใช้ และมีความสูงพอเหมาะให้ Hydrometer ลอยในตัวอย่าง โดยมีระยะห่างระหว่างกันของ Hydrometer และกระจกตวงอย่างน้อย 25 มม.
4. อ่างควบคุมอุณหภูมิ

##### 4.2 วิธีการทดสอบ (ASTM D-1298)

1. ปรับอุณหภูมิของตัวอย่าง กระจกตวง และเทอร์โมมิเตอร์ ให้มีอุณหภูมิเท่ากัน
2. เทตัวอย่างลงในกระจกตวงที่สะอาดและแห้งสนิท ถ้ามีฟองที่ผิวให้ใช้กระดาษกรองและที่ผิวให้ฟองอากาศหมดไป
3. วางกระจกตวงในแนวตั้ง ต้องไม่มีกระแสมและไม้สั่นสะเทือน อุณหภูมิต้องไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการทดลอง
4. ค่อยๆ วาง Hydrometer ลงในตัวอย่าง พร้อมกับคนตัวอย่างด้วยเทอร์โมมิเตอร์บันทึกอุณหภูมิ แล้วเอาเทอร์โมมิเตอร์ออก
6. กด Hydrometer ลงในตัวอย่างประมาณสองสเกล แล้วปล่อยทันที ก้านของ Hydrometer ที่อยู่เหนือของเหลวจะต้องแห้ง และ Hydrometer จะต้องนิ่ง และลอยอย่างอิสระ ไม่สัมผัสกับกระจกตวง

## 7. อ่านค่าความหนาแน่นจาก Hydrometer

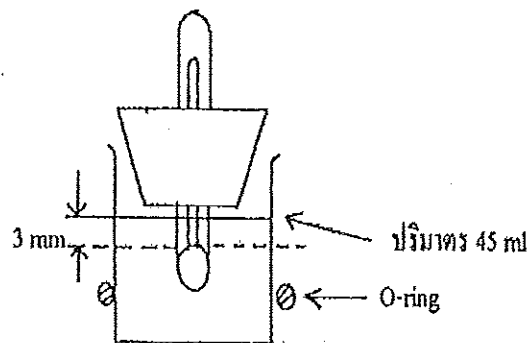


ภาพประกอบที่ ก.3 การอ่านค่าความหนาแน่นจาก Hydrometer สำหรับตัวอย่างที่มีความโปร่งใส

## 5. จุดไหลเท (Pour Point)

### 5.1 การวิเคราะห์จุดไหลเท (Pour Point ; ASTM-D97)

1. เขย่าตัวอย่างและเทใส่หลอดแก้วทดสอบเท่าขีดบอกระดับ (45 มล.) เสิบเทอร์โมมิเตอร์ 5C ดังรูป



2. อุณหภูมิตัวอย่างให้ได้อุณหภูมิ 45°C และย้ายตัวอย่างสู่อ่างน้ำ 24°C (ตั้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง)

### 3. ให้ควบคุมการลดลงของอุณหภูมิตัวอย่างดังนี้

เมื่ออุณหภูมิตัวอย่างได้	ย้ายหลอดแก้วลงตู้อ่างแอลกอฮอล์
27 °C	0 °C
9 °C	-18 °C
-6 °C	-33 °C
-24 °C	-51 °C
-42 °C	-69 °C

หมายเหตุ : การปรับอุณหภูมิจากอ่างแอลกอฮอล์ ใช้น้ำแข็งแห้งใส่ทางฝาเปิดอ่างเปิดมอเตอร์จับใบกวนให้ระดับอุณหภูมิในอ่างสม่ำเสมอ

4. เมื่ออุณหภูมิตัวอย่างได้ 9 °C เหนือจุดไหลเท (คาดการณ์) ให้ยกหลอดแก้วขึ้นจากอ่างทดสอบ เอียงหลอดแก้ว ถ้าตัวอย่างยังไหลได้ให้คืนหลอดแก้วลงตู้อ่างเหมือนเดิม (ขั้นตอนนี้ไม่เกิน 3 วินาที)

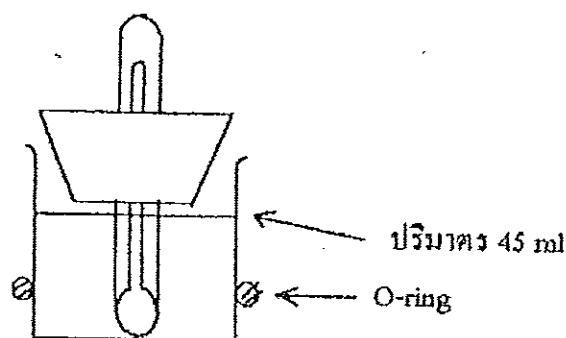
5. กระทำซ้ำเหมือนข้อ 4 ทุกๆ อุณหภูมิตัวอย่างที่ลดลง 3 °C จนกระทั่งพบว่าตัวอย่างเป็นไขแข็งตัว (100 %) ให้เอียงหลอดแก้วในแนวระนาบต่อเนื่อง 5 วินาที ถ้าตัวอย่างไม่มีการไหลตัว ให้หยุดการทดสอบ

6. รายงานผลจุดไหลเท = อุณหภูมิสุดท้ายที่ตัวอย่างเป็นไขแข็งตัว +3 °C

## 6. จุดขุ่น (Cloud Point)

### 6.1 การวิเคราะห์หาจุดขุ่น (Cloud Point ; ASTM-D 2500)

1. เขย่าตัวอย่าง และเทใส่หลอดแก้วทดสอบเท่าขีดบอกระดับ (45 มล.) เสียบเทอร์โมมิเตอร์ 5C ดังรูป



2. นำหลอดแก้วไปอุ่นในอ่างความร้อน จนกระทั่งอุณหภูมิตัวอย่างสูงกว่าจุดขุ่น (ลาดการณ์ 14 °C)

3. ให้ควบคุมการลดลงของอุณหภูมิตัวอย่าง ดังนี้

เมื่ออุณหภูมิตัวอย่างได้	ย้ายหลอดแก้วลงสู่อ่างแอลกอฮอล์
27 °C	0 °C
9 °C	-18 °C
-6 °C	-33 °C
-24 °C	-51 °C
-42 °C	-69 °C

หมายเหตุ : การปรับอุณหภูมิอ่างแอลกอฮอล์ ใช้น้ำแข็งแห้งใส่ทางฝาเปิดอ่างเปิดมอเตอร์ขับใบกวนให้ระดับอุณหภูมิในอ่างสม่ำเสมอ

4. ทุกๆ อุณหภูมิ 1°C ที่ลดลง ให้ยกหลอดแก้วขึ้นจากอ่างทดสอบในแนวตั้ง สังเกตความขุ่น (การก่อตัวของไข) จากด้านบนของหลอดแก้ว ถ้ายังไม่เต็มพื้นที่ก้นหลอดให้คืนหลอดแก้วลงอ่างเหมือนเดิม (ขั้นตอนนี้ไม่เกิน 3 วินาที)

5. ถ้าพบว่าจุดขุ่นเต็มพื้นที่ก้นหลอดแก้วแล้ว ให้บันทึกอุณหภูมินั้นไว้และรายงานผลเป็นจุดขุ่น

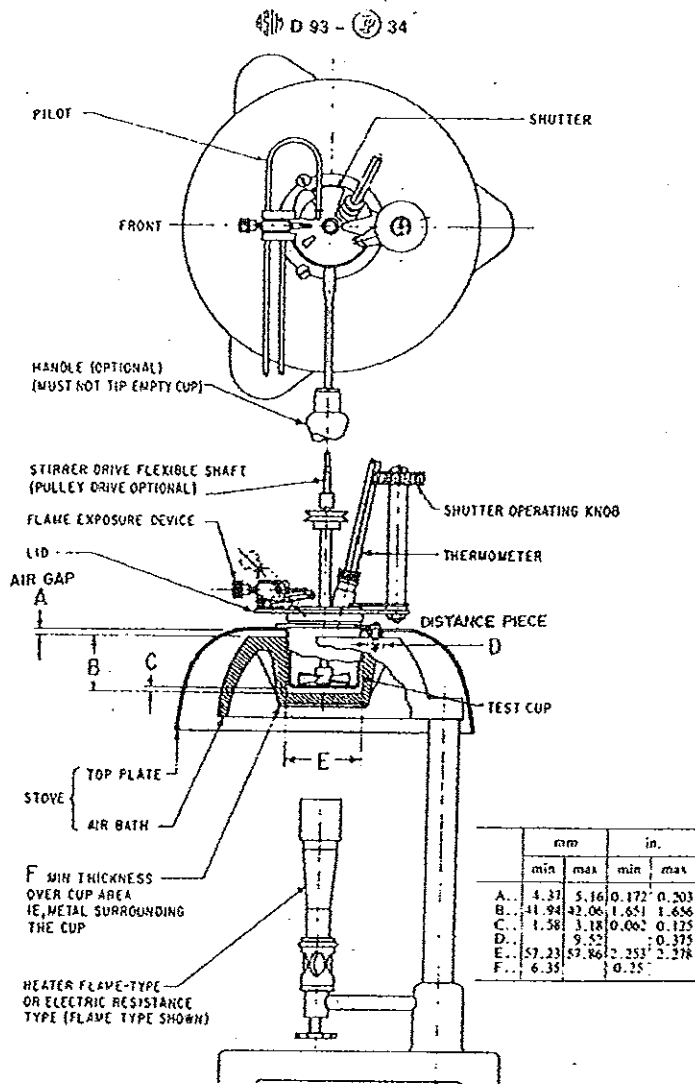
## 7. จุดวาบไฟ (Flash Point)

### 7.1 วิธีหาจุดวาบไฟแบบปิด (Flash Point by Pensky Martens Closed Cup ; ASTM-D 93)

1. เทตัวอย่างลงในถ้วยโลหะทดสอบ ปริมาตรเท่าขีดบอกระดับภายในถ้วย
2. วางถ้วยลงในเตาทดสอบ (ตรงตามร่องบากทั้งสาม) ประกอบฝาครอบถ้วย (ให้ร่องบากตรงกับด้ามจับ) เสียบ Thermometer 9C และสายกวนตัวอย่างเข้ากับฝาครอบถ้วย
3. เปิดแก๊สเข้าระบบ และปรับลูกไฟ Ignitor ให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มม.
4. Switch on สายกวนตัวอย่าง และหมุนปรับ Heater (การปรับจะกระทำอย่างต่อเนื่อง เพื่อควบคุมอัตราการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง 5-6 °C ต่อนาที ตลอดการทดสอบ)

5. เริ่มจุ่มลูกไฟ (สายกวานจะหยุดตัวเองอัตโนมัติ ขณะจุ่มลูกไฟ) เมื่ออุณหภูมิตัวอย่างได้ 23°C ก่อนถึงจุดวาบไฟ (คาดการณ์) ควบคุมเวลาในการจุ่มให้ได้ 1 วินาที/ครั้ง

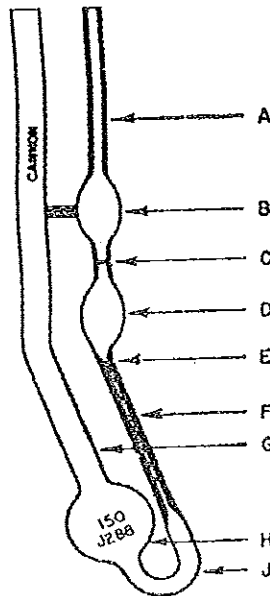
6. จุ่มลูกไฟต่อเนื่องทุกๆ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 °C กระทั่งพบจุดวาบไฟถ้าจุดวาบไฟ (จริง) อยู่ในช่วง  $\pm 5$  °C ของจุดวาบไฟ (คาดการณ์) ให้ทำการทดสอบใหม่ โดยเลือกจุดวาบไฟ (คาดการณ์) ใหม่ให้ใกล้เคียงกับจุดวาบไฟ (จริง) และรายงานผลจุดวาบไฟ ณ ความดันบรรยากาศ (760 มม.ปรอท)



ภาพประกอบที่ ก. 4 เครื่องหาจุดวาบไฟ

## 8. ความหนืด (Viscosity)

หมายถึง แรงเสียดทานหรือแรงต้านทานการไหล ความหนืดเป็นสมบัติอย่างหนึ่งของไหล ความหนืดของน้ำมันมีความสำคัญมากในการใช้งาน เพราะเป็นเครื่องบอกถึงความต้านทานการไหลตัวของน้ำมันและบอกถึงคุณสมบัติในการหล่อลื่นพื้นผิว ดังนั้น ข้อกำหนดคุณภาพของน้ำมันเครื่องบิน ไอพ่น น้ำมันดีเซลรอบสูงและรอบต่ำ น้ำมันเตาและน้ำมันหล่อลื่น จึงต้องมีข้อกำหนดความหนืดที่เหมาะสมบังคับไว้ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์สองอย่างหลัง ค่าความหนืดจะเป็นการแบ่ง Grade ของน้ำมันด้วย



ภาพประกอบที่ ก.5 รูป Cannon Fenske Routine Viscometer for Transparent Liquids

### 8.1 วิธีทดสอบ

1. ล้างวิสกอมิเตอร์ด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม แล้วทำให้แห้งโดยเป่าด้วยลมที่แห้งและสะอาด ถ้ามีสารอินทรีย์ติดอยู่ในหลอดให้กำจัดด้วยของเหลวผสมระหว่างกรดโครมิกกับกรดซัลฟิวริก
2. ถ้ามีผงฝุ่นหรือของแข็งอยู่ในตัวอย่างที่จะทดสอบ ให้กรองตัวอย่างผ่าน sintered glass หรือตะแกรงละเอียด
3. บรรจุตัวอย่างที่จะทดสอบเข้าในวิสกอมิเตอร์ โดยคว่ำหลอดวิสกอมิเตอร์ และใช้แรงดูดที่ปลายด้าน G จุ่มปลายด้าน A ลงในตัวอย่างที่จะทดสอบ ให้ตัวอย่างไหลเข้าไปจนถึงระดับ E เช็ดปลายด้าน A ให้สะอาด แล้วกลับหลอดวิสกอมิเตอร์ให้อยู่ในแนวตั้ง

4. จับวิสคอมิเตอร์ด้วย Holder แล้วจุ่มวิสคอมิเตอร์ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ให้วิสคอมิเตอร์อยู่ในแนวตั้ง
5. ทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที ในกรณีที่จะหาความหนืดที่ 40 °C (เพื่อให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิเท่ากับอ่าง) และ 15 นาที ในกรณีที่จะหาความหนืดที่ 100 °C
6. ใช้ลูกยางดูดตัวอย่างของเหลวที่ปลายด้าน A จนผิวของของเหลวที่ดูดขึ้นมาอยู่เหนือขีด C
7. จากนั้นปล่อยของเหลวให้ไหลลงไปโดยดึงลูกยางออก เริ่มจับเวลาตั้งแต่ของเหลวผ่านขีด C จนกระทั่งถึงขีด E (เวลาที่ใช้ต้องมากกว่า 200 วินาที หากเวลาน้อยกว่า 200 วินาที แสดงว่าเลือกขนาดของวิสคอมิเตอร์ไม่เหมาะสมกับตัวอย่าง ให้เปลี่ยนวิสคอมิเตอร์อันใหม่)
8. ทดสอบซ้ำ โดยทำซ้ำตามข้อ 6 และข้อ 7
9. ค่า Kinematic viscosity ในหน่วย  $\text{mm}^2/\text{s}$  (cSt) เท่ากับ เวลาในหน่วยวินาที คูณด้วย Viscometer constant

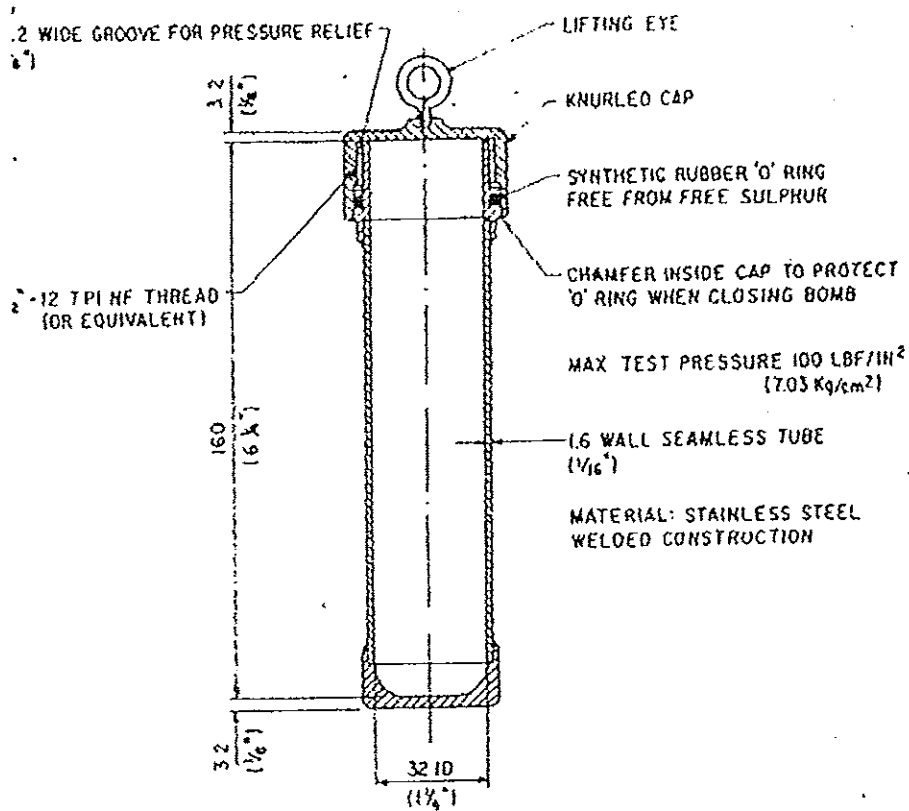
## 9. การวิเคราะห์หาการสึกกร่อนของแผ่นทองแดง (Copper Corrosion ; ASTM-D 130)

### 9.1 การเตรียมตัวอย่างและอุปกรณ์

1. Switch on อ่างควบคุมอุณหภูมิ และมอเตอร์กวนของเหลวในอ่าง
2. ปรับอุณหภูมิอ่างทดสอบ ตรงตามตารางกำหนดของแต่ละตัวอย่าง
3. ขัดแผ่นทองแดงทุกด้าน (ครบ 6 ด้าน) ด้วยกระดาษทรายละเอียด ล้างแผ่นทองแดงด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม (ขจัดคราบไขมัน) และปล่อยให้แห้ง

### 9.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. เทตัวอย่างลงในหลอดทดสอบปริมาตร 30 มล. และแช่แผ่นทองแดงลงในตัวอย่าง ดังนี้
  - 1.1 สำหรับตัวอย่างที่ระเหยยาก ให้ใช้จุกคอร์กหรือแผ่นอลูมิเนียมปิดหลอดแก้วไว้ และใช้อุปกรณ์ช่วยในการแช่หลอดแก้ว (แบบปิด) ลงในอ่าง
  - 1.2 สำหรับตัวอย่างที่ระเหยง่าย ให้บรรจุหลอดแก้วเข้าไปใน Bomb และปิดฝา Bomb ให้แน่นก่อนแช่ Bomb ลงในอ่าง



ภาพประกอบที่ ก. 6 Copper Strip Corrosion Test Bomb

2. เริ่มนับเวลาในการแช่ตัวอย่าง ตรงตามตารางกำหนดดังนี้

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชั่วโมง ± นาที)
Jet	100 ± 1	2 ± 5
Kerosine	100 ± 1	3 ± 5
NGL (Natural Gasoline)	40	3 ± 5
Gasoline	50 ± 1	3 ± 5
Diesel	50 ± 1	3 ± 5
Gasoline	50 ± 1	3 ± 5
Lube	≥ 100	Vary



3. หลังจากครบเวลาแช่ ให้นำแผ่นทองแดงออก ล้างด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม และปล่อยให้แห้ง

4. สอดแผ่นทองแดงเข้าในหลอดแก้วแบนเพื่อเทียบสีกับแผ่นมาตรฐานการสีที่กร่อนของแผ่นทองแดง และรายงานผลเท่ากับหรือเข้มกว่าเบอร์ของแผ่นมาตรฐานที่เทียบได้

## 10. การวิเคราะห์หาจุดกลั่น (Distillation ; ASTM-D 86)

### 10.1 วิธีการ

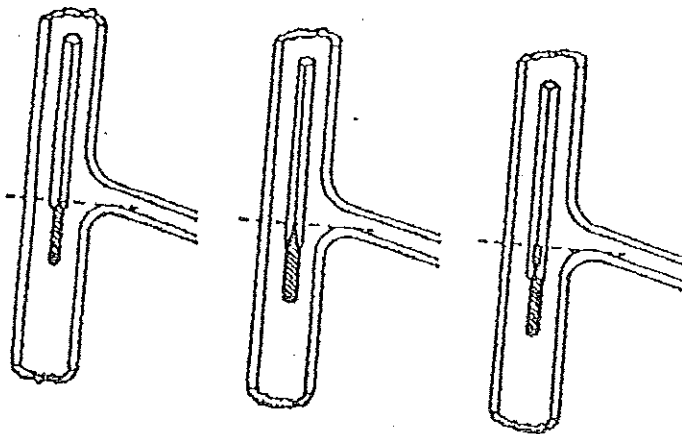
1. ก่อนกลั่นต้องทำความสะอาด Condenser ให้สะอาดและแห้ง โดยใช้ผ้าผูกติดกับหลอดลากทะเล Condenser

2. ตวงตัวอย่าง 100 มล. ลงในขวดกลั่นขนาด 125 มล. ควรใส่เม็ดแก้วเพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรง

3. เสียบเทอร์โมมิเตอร์ที่ได้มาตรฐานตาม ASTM ตามรูป

3.1 Gasoline ใช้เทอร์โมมิเตอร์ 7C

3.2 Diesel ใช้เทอร์โมมิเตอร์ 8C



4. ประกอบขวดกลั่นให้แบนสนิทกับ Condenser และก้นขวดกลั่นสนิทกับแผ่น

รองรับ

4.1 Gasoline ใช้แผ่นรองรับที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 38 มม.

4.2 Diesel ใช้แผ่นรองรับที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มม.

5. ประกอบท่อ นำแก๊สเข้ากับ Condenser

6. ปรับอุณหภูมิของ Condenser bath

6.1 Gasoline ประมาณ 0-4 °C

6.2 Diesel ประมาณ 50 °C (ใช้น้ำอุ่น)

7. เปิดสวิตช์ให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง และควบคุมสถานะการกลั่นดังนี้

หยุดแรก (IBP)	ใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที (สำหรับ Diesel) หรือ 5-10 วินาที (สำหรับ Gasoline)
5%	ใช้เวลาประมาณ 60-75 วินาที (เฉพาะ Gasoline)
10% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
20% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
30% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
40% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
50% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
60% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
70% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
80% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
90% หยุดกลั่น	ควบคุมให้ได้ประมาณ 4-5 มล./นาที
93% หยุดกลั่น	หยุดปรับความร้อน (ค้างไว้จนถึงอุณหภูมิสุดท้าย เฉพาะ Gasoline)
94% หยุดกลั่น	หยุดปรับความร้อน (ค้างไว้จนถึงอุณหภูมิสุดท้าย เฉพาะ Diesel)
95% หยุดกลั่น	ปล่อยอุณหภูมิขึ้นอย่างอิสระ
อุณหภูมิสุดท้าย (FBT,EP)	ไม่เกิน 5 นาที (นับจาก 94% เฉพาะ Diesel) หรือ ไม่เกิน 3-5 นาที (นับจาก 93% เฉพาะ Gasoline)

8. เมื่อหยุดแรกตกลง ให้อ่านอุณหภูมิทันที และอ่านอุณหภูมิทุกๆ จุดตามข้อ 7 (ยกเว้น 93% และ 94%) จนกระทั่งอุณหภูมิสุดท้าย (ถ้าไม่ต้องการอุณหภูมิสุดท้ายให้ปิดสวิตช์เครื่องทันที ณ 91% หยุดกลั่น

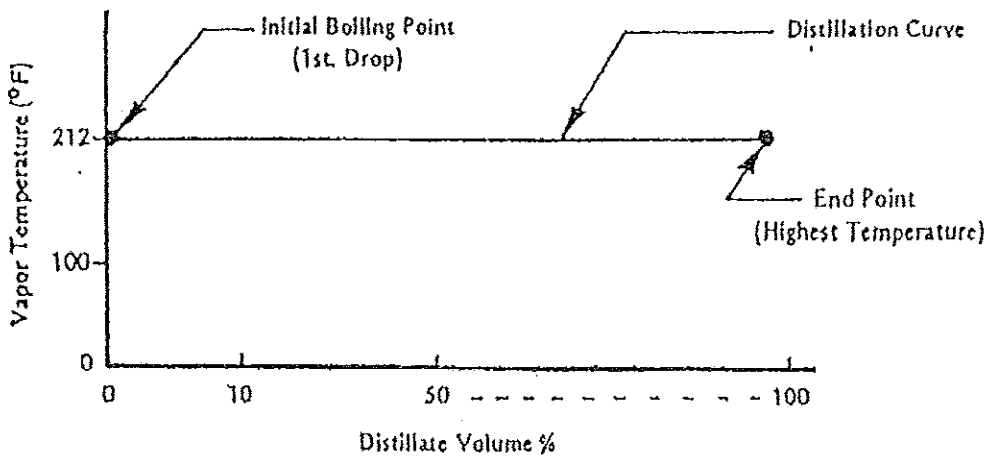
หมายเหตุ : Gasoline ก่อนและหลังกลั่น อุณหภูมิควรใกล้เคียงกันประมาณ 13-18 °C

Diesel ก่อนและหลังกลั่น อุณหภูมิควรใกล้เคียงกันประมาณอุณหภูมิห้อง

9. ถ้าต้องการทราบการสูญเสีย (loss) ให้กลั่นจนกระทั่งอุณหภูมิสุดท้าย (FBP) วัดตัวอย่างที่เหลือที่ก้นขวดกลั่น (residue) และปริมาณหยดกลั่นสะสม (recovery)

$$\% \text{ loss} = 100 - (\text{recovery} + \text{residue})$$

ปกติสารบริสุทธิ์จะมีจุดเดือดคงที่ตลอดเวลาการกลั่น ตามรูป แต่ถ้ามีสารปนเปื้อน จะทำให้มีการเบี่ยงเบนหรือเปลี่ยนไปของอุณหภูมิ

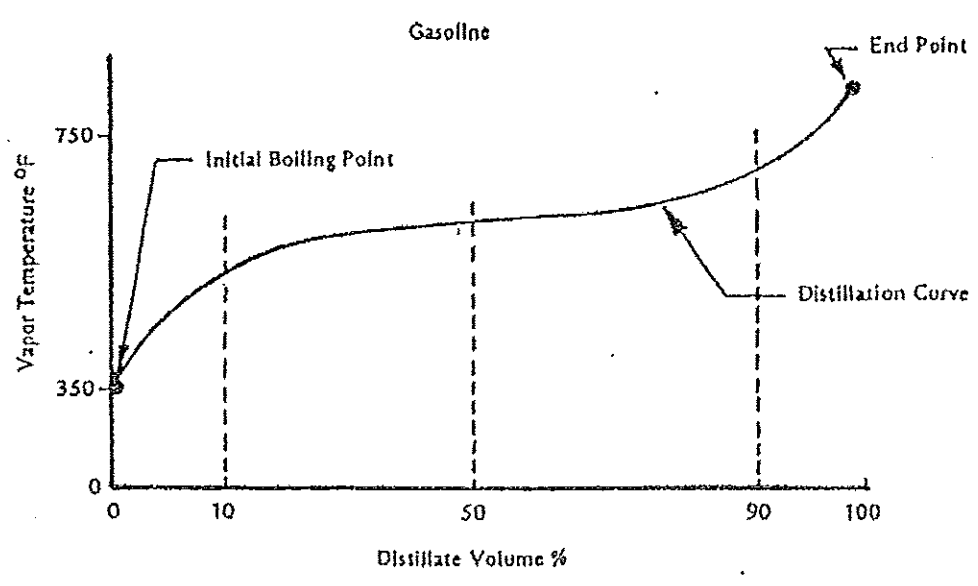


การกลั่นน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM ที่ 10, 50 และ 90% จะบอกให้ทราบถึงคุณสมบัติของน้ำมัน ดังนี้

ที่ปริมาณ 10% จะบอกถึงการสตาร์ทเครื่องยนต์

ที่ปริมาณ 50% จะบอกถึงการเดินเครื่องยนต์ และอัตราเร่ง

ที่ปริมาณ 90% จะบอกถึงการไอเสียของเครื่องยนต์ ดังแสดงในรูป



## ภาคผนวก ข

### ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน

เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2548

โดยที่ เป็นการสมควรกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันเพื่อเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในเชิงพาณิชย์ และสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้บริโภคอาเซียนตามความในมาตรา 25 วรรคหนึ่งแห่งพระราชบัญญัติการค้าน้ำมันเชื้อเพลิง พ.ศ. 2548 อธิบดีกรมธุรกิจพลังงานออกประกาศไว้ดังต่อไปนี้

ข้อ 1 ประกาศนี้เรียกว่า “ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2548”

ข้อ 2 ประกาศนี้ให้ใช้บังคับเมื่อพ้นสามสิบวันนับตั้งแต่วันประกาศในราชกิจจานุเบกษาเป็นต้นไป

ข้อ 3 ประกาศฉบับนี้มีให้ใช้บังคับกับของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่จำหน่ายหรือมีไว้เพื่อจำหน่ายไปนอกอาณาจักร โดยการขนส่งทางทะเล

ข้อ 4 ภายใต้บังคับของข้อ 5 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันให้เป็นไปตามละเอียดแนบท้ายประกาศนี้

การเติมสารเติมแต่งในไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันให้ผู้ค้าน้ำมันแจ้งขอความเห็นชอบและต้องได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมพลังงานก่อน จึงจะสามารถดำเนินการได้

ข้อ 5 ลักษณะและคุณภาพไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ผู้ค้าน้ำมันจำหน่ายหรือมีไว้เพื่อจำหน่ายดังต่อไปนี้จะไม่เป็นตามที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายประกาศนี้ ก็ได้แต่ผู้ค้าน้ำมันต้องแจ้งลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดังกล่าวเฉพาะส่วนที่ไม่เป็นไปตามที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้าย เพื่อขอความเห็นชอบและต้องได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงานก่อน

- (1) ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันสำหรับการส่งออกป้อนราชอาณาจักรนอกรอกจากการขนส่งทางทะเล
  - (2) ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันสำหรับการนำไปใช้กับยานพาหนะที่ส่งออกป้อนราชอาณาจักร
  - (3) ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันสำหรับการนำไปใช้ตามโครงการหรือ นโยบายของรัฐบาล หรืองานวิจัย
  - (4) ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่นำเข้ามาในราชอาณาจักรสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล
  - (5) ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันสำหรับการจำหน่ายให้แก่ผู้ค้าน้ำมันซึ่งเป็นผู้ผลิตไบโอดีเซล เพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล
  - (6) ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันสำหรับการจำหน่ายให้แก่ผู้ค้าน้ำมันเพื่อวัตถุประสงค์ตาม (1)
  - (7) ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันสำหรับการจำหน่ายให้แก่ผู้ผลิตไบโอดีเซลหรือผู้ค้าน้ำมันตามมาตรา 7 เพื่อวัตถุประสงค์ตาม (2) และ (3)
- ข้อ 6 การขอและการให้ความเห็นชอบตามข้อ 4 วรรคสอง และข้อ 5 ให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์วิธีการ และเงื่อนไขที่อธิบดีกรมธุรกิจพลังงานกำหนด

ประกาศ ณ วันที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2548

วิโรจน์ คลังบุญครอง

อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน

รายละเอียดแบบท้ายประกาศกรมธุรกิจพลังงาน  
เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน  
พ.ศ. 2548

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ		วิธีทดสอบ <sup>1/</sup>
1.	เมทิลเอสเทอร์, ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Methyl Ester, % wt.)	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2.	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15°C, กิโลกรัม/ ลูกบาศก์เมตร (Density at 15 °C, kg/m3)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	860  900	ASTM D 1298
3.	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C, เซนติสโตกส์ (Viscosity at 40 °C, cSt)	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	3.5  5.0	ASTM D 445
4.	จุดวาบไฟ, องศาเซลเซียส (Flash Point, °C)	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
5.	กำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 2622
6.	กากถ่าน, ร้อยละโดยน้ำหนัก (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon Residue, on 10 % distillation residue, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.30	ASTM D 4530
7.	จำนวนซีเทน (Cetane Number)	ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D 613
8.	ถ้าซัลเฟต, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulfated Ash, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงค่า		วิธีทดสอบ <sup>u</sup>
9.	น้ำ, ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Water, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.050	ASTM D 2709
10.	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด, ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Total Contaminate, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0024	ASTM D 5452
11.	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D 130
12.	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส, ชั่วโมง (Oxidation Stability at 110 °C, hours)	ไม่ต่ำกว่า	6	EN 14112
13.	ค่าความเป็นกรด, มิลลิกรัม โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม (Acid Value, mg KOH/g)	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
14.	ค่าไอโอดีน, กรัม ไอโอดีน/100 กรัม (Iodine Value, g Iodine/100 g)	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
15.	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์, ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Linolenic Acid Methyl Ester, %wt.)	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16.	เมทานอล, ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Methanol, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17.	โมโนกลีเซอไรด์, ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Monoglyceride, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.80	EN 14105
18.	ไดกลีเซอไรด์, ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Diglyceride, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105



รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงสุด		วิธีทดสอบ <sup>1/</sup>
19.	ไตรกลีเซอไรต์, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Triglyceride, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20.	กลีเซอรินอิสระ, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Free glycerin, %wt)	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105
21.	กลีเซอรินทั้งหมด, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Total glycerin, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
22.	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโปแตสเซียม), มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group I metals (Na+K) mg/kg)	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14108 และ EN 14109
	โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม), มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group II metals (Ca+Mg) mg/kg)	ไม่สูงกว่า	5.0	prEN 14538
23.	ฟอสฟอรัส, ร้อยละโดยน้ำหนัก (Phosphorus, %wt.)	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 4951
24.	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		

หมายเหตุ 1/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดใน  
รายละเอียดแนบท้ายนี้

## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลการวิเคราะห์

1. ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระและ % Conversion ของกรดไขมันอิสระด้วยการไตเตรทที่สถานะต่างๆ

#### 1.1 ศึกษาสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกบนอะลูมินา

ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกบนอะลูมินา ( $H_2SO_4/Al_2O_3$ ) ที่สถานะ: ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 อุณหภูมิ 60 °C เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

$H_2SO_4/Al_2O_3$ (wt.%)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA Conversion
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 1	ค่าเฉลี่ย	
10	4.120		-	4.120	22.09
20	4.034	4.008	-	4.021	23.96
30	4.286	4.03	-	4.158	21.37
40	2.468	2.65	2.859	2.659	49.72
42	2.084	1.704	2.032	1.94	63.31
45	1.941	1.919	-	1.929	63.52
50	2.001	2.243	-	2.122	59.87

ตารางที่ ค.2 ผลการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 42% $H_2SO_4/Al_2O_3$  เทียบกับน้ำมันปาล์มดิบที่สถานะ: อัตราส่วนเชิง โมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.% เทียบกับCPO)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Conversion
20	2.084	1.704	2.032	1.94	63.31
25	1.808	1.599	1.873	1.76	66.72
30	1.493	1.523	1.529	1.511	71.35
35	1.414	1.402	1.511	1.442	72.72
40	1.311	1.465	-	1.388	73.75

ตารางที่ ค.3 ผลการศึกษาอัตราส่วนเชิง โมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลที่สถานะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา 42% $H_2SO_4/Al_2O_3$  ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO ที่อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

อัตราส่วนเชิง โมล (CPO/Ethanol)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Conversion
1:6	2.814	2.896	-	2.855	45.44
1:10	2.401	2.271	-	2.336	55.82
1:15	1.916	1.982	-	1.949	63.14
1:20	1.493	1.523	1.529	1.515	71.35
1:30	1.686	1.759	1.629	1.691	68.02

ตารางที่ ค.4 ผลการศึกษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา  $42\%H_2SO_4/Al_2O_3$  ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA Conversion
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
60	1.493	1.523	1.529	1.515	71.35
70	1.432	1.305	1.204	1.314	75.16
80	0.735	0.831	0.873	0.813	84.63

ตารางที่ ค.5 ผลการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา  $42\%H_2SO_4/Al_2O_3$  ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80 °C

ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA Conversion
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
30	1.758	1.634	1.788	1.727	67.35
60	0.939	1.018	0.855	0.937	82.27
90	0.731	0.865	0.796	0.797	84.92
120	0.767	0.816	0.788	0.790	85.05
150	0.926	0.875	0.852	0.884	83.28

## 1.2 ศึกษาสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกบนถ่านกัมมันต์

ตารางที่ ค.6 ผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกบนถ่านกัมมันต์ ( $H_2SO_4$ /Activated carbon) ที่สถานะ: ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 อุณหภูมิ 60 °C เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

$H_2SO_4$ /Activated carbon (wt.%)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA Conversion
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
10	5.229	5.113	-	5.171	22.94
20	1.984	1.959	-	1.972	70.62
30	1.722	1.748	-	1.735	74.14
40	0.515	0.527	0.534	0.525	92.17
45	0.485	0.443	0.527	0.485	92.77
50	0.467	0.415	-	0.441	93.43

ตารางที่ ค.7 ผลการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 40% $H_2SO_4$ /Activated carbon เทียบกับน้ำมันปาล์มดิบที่สถานะ: อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt. เทียบกับCPO)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA Conversion
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
20	0.515	0.527	0.534	0.525	92.17
25	0.587	0.607	-	0.732	92.1
30	0.831	0.589	-	0.71	90.59
35	0.873	0.802	-	0.838	91.08
40	0.622	0.663	-	0.643	91.36

ตารางที่ ค.8 ผลการศึกษาอัตราส่วนเชิง โมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลที่สภาวะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา  $40\%H_2SO_4$ /Activated carbon ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO ที่อุณหภูมิ  $60\text{ }^{\circ}C$  และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

อัตราส่วนเชิง โมล (CPO/Ethanol)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Conversion
1:6	2.287	2.391	-	2.339	57.83
1:10	1.525	1.674	-	1.599	78.49
1:15	1.291	1.342	1.402	1.345	81.46
1:20	0.515	0.527	0.534	0.525	92.17
1:30	0.941	0.645	-	0.793	88.62

ตารางที่ ค.9 ผลการศึกษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา  $40\%H_2SO_4$ /Activated carbon ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิง โมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Conversion
60	0.515	0.527	0.543	0.525	92.17
70	1.143	0.706	0.784	0.878	89.9
80	0.928	1.042	0.948	0.973	89.01

ตารางที่ ค.10 ผลการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา 40% $H_2SO_4$ /Activated carbon ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60°C

ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA Conversion
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
30	1.353	1.318	-	2.012	80.57
60	0.515	0.527	0.543	0.525	92.17
90	0.602	0.598	-	0.6	91.87
120	0.583	0.564	-	0.574	91.65
150	0.575	0.542	-	0.559	91.74

### 1.3 ศึกษาสภาวะของตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกบนแอมเบอร์ลิสต์ 15

ตารางที่ ค.11 ผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกรดซัลฟิวริกบนแอมเบอร์ลิสต์ 15 ( $H_2SO_4$ /Amberlyst 15) ที่สภาวะ: ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมล น้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 อุณหภูมิ 60°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

$H_2SO_4$ /Amberlyst 15 (wt.%)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA Conversion
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
10	1.867	1.715	-	1.791	76.26
20	1.241	1.329	1.451	1.340	82.40
30	0.685	0.907	0.956	0.849	87.98
40	0.749	0.851	0.854	0.818	88.03
45	0.655	0.857	-	0.756	89.83
50	0.788	0.813	-	0.801	89.42

ตารางที่ ค.12 ผลการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 30% $H_2SO_4$ /Amberlyst 15 เทียบกับน้ำมันปาล์มดิบที่สถานะ: อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt. เทียบกับCPO)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA Conversion
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
20	0.865	0.907	0.956	0.849	87.98
25	0.844	0.673	0.675	0.731	90.61
30	0.741	0.855	0.752	0.783	89.93
35	0.772	0.793	-	0.783	89.93
40	0.622	0.556	-	0.589	92.42

ตารางที่ ค.13 ผลการศึกษาอัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลที่สถานะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา 30% $H_2SO_4$ /Amberlyst 15 ปริมาณ 25 wt.% เทียบกับCPO ที่อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

อัตราส่วนเชิงโมล (CPO/Ethanol)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA Conversion
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
1:6	2.973	-	-	2.973	56.21
1:10	2.455	2.180	-	2.318	72.35
1:15	1.590	1.267	-	1.429	81.57
1:20	0.844	0.673	0.675	0.731	90.61
1:30	0.908	0.793	-	0.851	89.06



ตารางที่ ค.14 ผลการศึกษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา  $30\%H_2SO_4/Amberlyst\ 15$  ปริมาณ  $25\ wt.\%$  เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA Conversion
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
60	0.844	0.673	0.675	0.731	90.61
70	0.917	0.922	0.851	0.897	88.52
80	0.904	0.892	-	0.898	88.54

ตารางที่ ค.15 ผลการศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา  $30\%H_2SO_4/Amberlyst\ 15$  ปริมาณ  $25\ wt.\%$  เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา  $60\ ^\circ C$

ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA Conversion
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
30	1.834	-	-	1.834	76.74
60	0.844	0.673	0.675	0.731	90.62
90	0.640	0.742	-	0.691	91.29
120	0.681	0.685	-	0.863	91.43
150	0.678	0.680	-	0.679	91.40

ตารางที่ ค.16 ผลการศึกษาชนิดของแอลกอฮอล์ที่สถานะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา 40% $H_2SO_4$ /Activated carbon ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 อุณหภูมิ 60°C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

ชนิดแอลกอฮอล์	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA Conversion
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
เอทานอล	0.515	0.527	0.534	0.525	92.17
เมทานอล	0.349	0.351	0.332	0.341	95.23

#### 1.4 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ซ้ำ

ตารางที่ ค.17 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ซ้ำที่สถานะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา 42% $H_2SO_4/Al_2O_3$  ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 อุณหภูมิ 80 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

การใช้ซ้ำ (ครั้งที่)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA Conversion
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
1	1.079	1.134	-	1.107	86.12
2	3.578	3.467	-	3.527	53.97
3	4.205	4.187	-	4.196	32.26
4	5.069	5.254	-	5.157	20.97
5	6.843	6.791	-	6.817	15.25

ตารางที่ ค.18 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับมาใช้ซ้ำที่สภาวะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา 40%H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Activated carbon ปริมาณ 20 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:20 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

การใช้ซ้ำ (ครั้งที่)	ปริมาณ FFA (wt.%)				% FFA Conversion
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
1	0.643	0.637	-	0.64	90.63
2	4.549	4.581	-	4.565	38.54
3	5.632	5.723	-	5.678	29.66
4	6.854	6.901	-	6.878	15.36
5	6.367	6.403	-	6.385	12.64

2. ผลการวิเคราะห์ปริมาณ % Ethyl Ester แบบกะประมาณ (proximate analysis) โดยใช้ไมโครเวฟ ที่สภาวะต่างๆ

ตารางที่ ค.19 ผลการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 25%KOH/Activated carbon เทียบกับน้ำมันปาล์มดิบที่สภาวะ: อัตราส่วนเชิง โมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:9 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt.% เทียบกับCPO)	% Ethyl Ester			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10	67.03	67.03	-	67.03
20	68.07	68.07	-	68.07
30	68.07	68.07	-	68.07

ตารางที่ ค.20 ผลการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 35%KOH/Activated carbon เทียบกับน้ำมันปาล์มดิบที่สภาวะ: อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:9 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt. เทียบกับCPO)	% Ethyl Ester			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10	68.07	68.07	-	68.07
20	68.07	70.3	-	69.19
30	71.94	70.3	-	71.12

ตารางที่ ค.21 ผลการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 35%KOH/Amberlyst 15 เทียบกับน้ำมันปาล์มดิบที่สภาวะ: อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:9 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt. เทียบกับCPO)	% Ethyl Ester			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10	68.07	68.07	-	68.07
20	68.07	70.3	-	69.19
30	71.94	70.3	-	71.12

ตารางที่ ค.22 ผลการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 25%KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เทียบกับน้ำมันปาล์มดิบที่สภาวะ: อัตราส่วนเชิงโมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:9 อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt. เทียบกับCPO)	% Ethyl Ester			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
10	67.03	67.03	-	67.03
20	98.98	98.95	-	98.97
30	98.95	98.95	-	98.95

ตารางที่ ค.23 ผลการศึกษาอัตราส่วนเชิง โมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอลที่สภาวะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา 35%KOH/Activated carbon ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO ที่อุณหภูมิ 60 °C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที

อัตราส่วนเชิง โมล (CPO/Ethanol)	% Ethyl Ester			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1:6	67.03	-	-	67.03
1:9	71.94	70.3	-	71.12
1:12	67.03	69.19	-	68.11

ตารางที่ ค.24 ผลการศึกษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา 35%KOH/Activated carbon ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิง โมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:9 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที

อุณหภูมิ (°C)	% Ethyl Ester			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
60	71.94	70.3	-	71.12
70	71.94	71.94	-	71.94
75	70.3	71.94	-	71.12

ตารางที่ ค.25 ผลการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์เทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะ: ตัวเร่งปฏิกิริยา 35%KOH/Activated carbon ปริมาณ 30 wt.% เทียบกับCPO อัตราส่วนเชิง โมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:9 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที

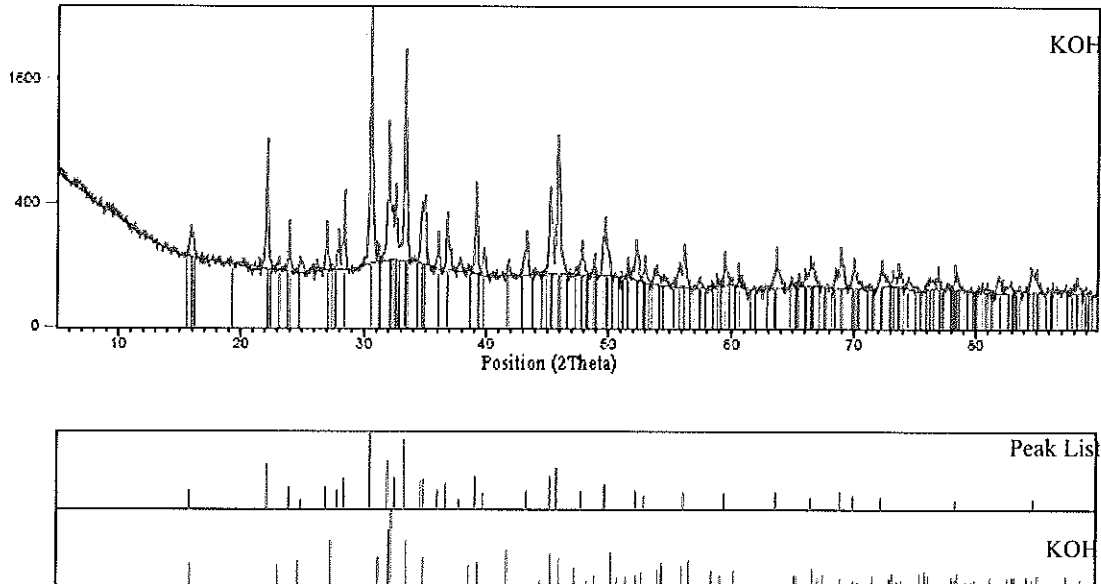
ตัวเร่งปฏิกิริยา	% Ethyl Ester			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
35%KOH/Activated Carbon (10 wt.% เทียบกับCPO)	68.07	68.07	-	68.07
35%KOH/Activated Carbon (20 wt.% เทียบกับCPO)	69.19	70.3	-	69.19
35%KOH/Activated Carbon (30 wt.% เทียบกับCPO)	71.94	70.3	-	71.12
KOH 2 wt.%เทียบกับCPO	98.13	98.13	-	98.13

ตารางที่ ค. 26 ผลการศึกษานิคตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะ: อัตราส่วนเชิง โมลน้ำมันปาล์มดิบต่อเอทานอล 1:9 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 30 wt.% เทียบกับCPO

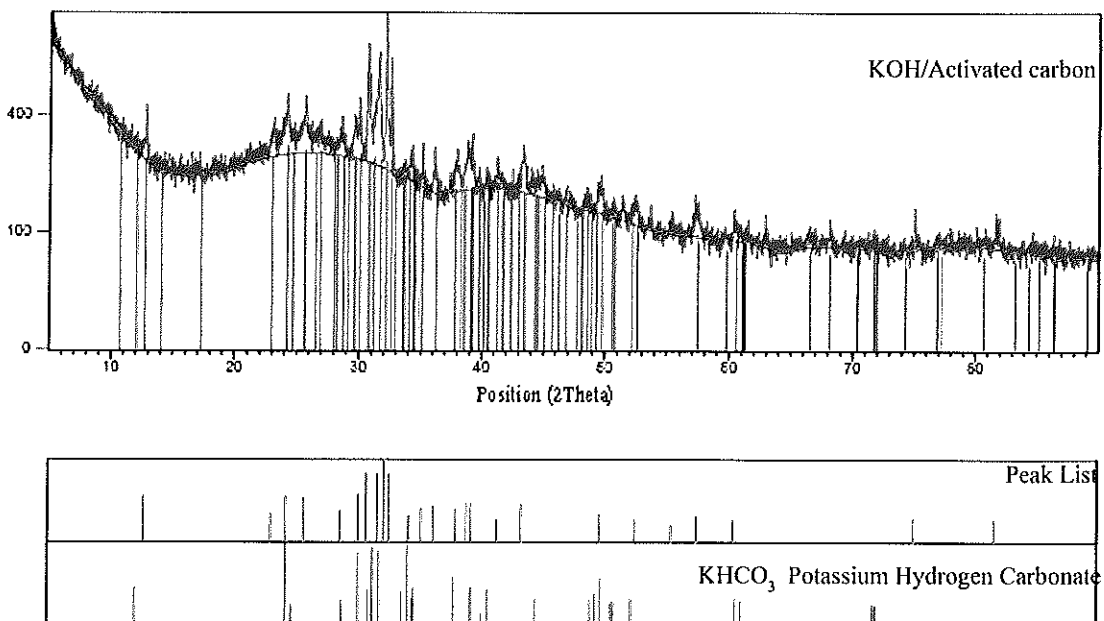
ตัวเร่งปฏิกิริยา	% Ethyl Ester			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
35%KOH/Activated carbon	71.94	70.3	-	71.12
35%KOH/Amberlyst 15	71.94	71.94	-	71.94
25%KOH/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	98.95	98.95	-	98.95

### 3. ข้อมูลวิเคราะห์ XRD

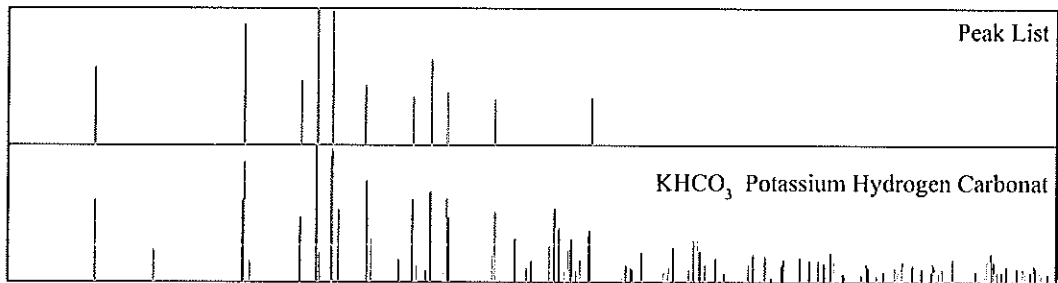
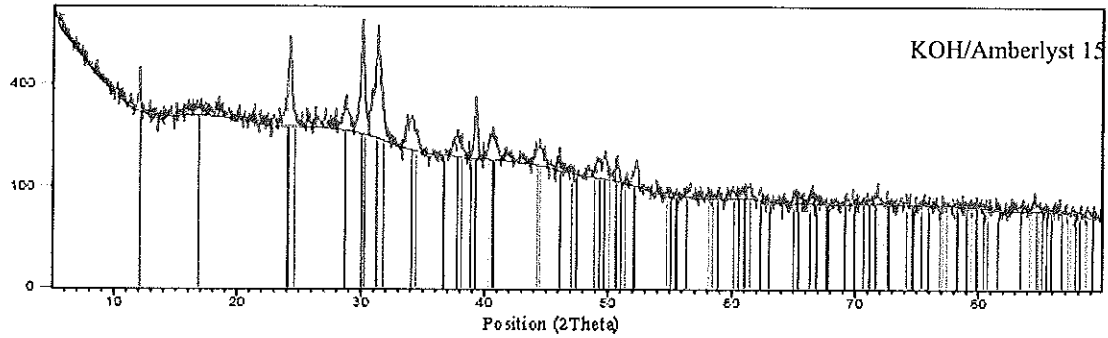
#### 3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH



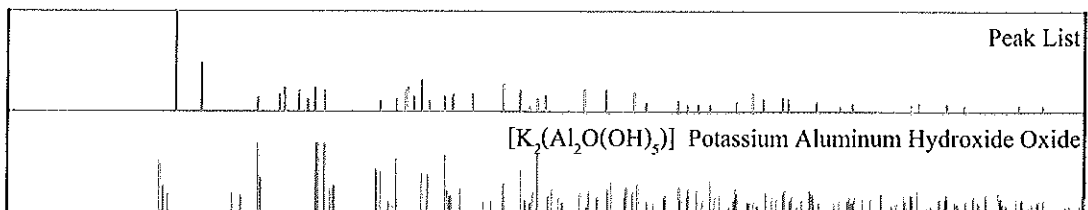
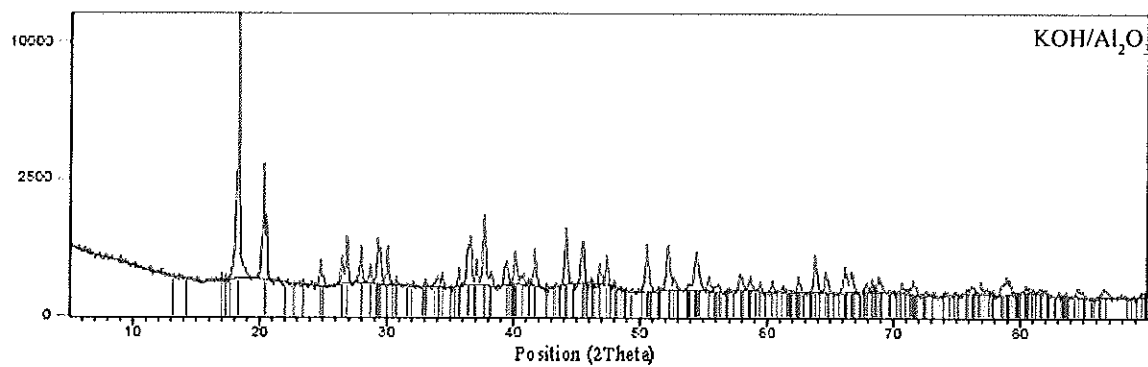
#### 3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/Activated carbon



### 3.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/Amberlyst 15



### 3.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา KOH/ $\text{Al}_2\text{O}_3$





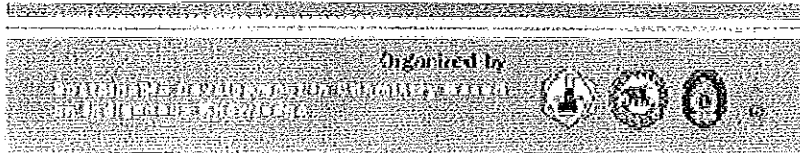
ภาคผนวก ง

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

เรื่อง Biodiesel Production from Ethanol by Sulfuric Acid Supported on Alumina



PURE AND APPLIED CHEMISTRY  
INTERNATIONAL CONFERENCE



## Biodiesel Production from Ethanol by Sulfuric Acid Supported on Alumina

A. Seemuang<sup>1</sup>, S. Ratanawilai<sup>1\*</sup> and P. Meyer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, 90112, Thailand

\*E-mail: sukritthira.b@psu.ac.th, Tel: +66-74-287305

**Abstract:** In the present time, The country is interested in renewable energy. One of choices is biodiesel that important to use worldwide for industrial and transportation. So it is necessary to study in this case. The production of fatty acid ethyl ester (FAEE), or biodiesel, from crude palm oil (CPO) having high free fatty acids (FFA) has been studied with a heterogeneous reaction in this work. Expected benefits of using the heterogeneous catalyst are a reduction in waste from the biodiesel production process and the ability to recycle the solid catalyst. In this study, sulfuric acid, supported on alumina, was used when 42% by wt of the acid was loaded, and called  $H_2SO_4/Al_2O_3$ . Moreover, the reaction conditions were varied to study the effects of catalyst amount (20%, 25%, 30%, 35% and 40% by wt of CPO), molar ratio of oil to alcohol (1:6, 1:10, 1:15, 1:20 and 1:30), temperature (60°C, 70°C and 80°C) and reaction time (30 min, 60 min, 90 min, 120 min and 150 min) on reaction conversion. The results showed that the optimum conditions were a catalyst amount of 30% by wt of CPO, a CPO to ethanol molar ratio of 1:20 (mole:mole), a reaction temperature of 80 °C for an hour of reaction time. These conditions resulted in a conversion of 84.63 %. The amount of FFA was reduced from 5.3 wt% to less than 1 wt% at the end of esterification process.

### Introduction

As supply of fossil fuels is limited whilst energy demand continues to rise, research is increasingly directed towards alternative renewable fuels. Biodiesel, as an alternative diesel fuel, is a promising non-toxic and biodegradable renewable fuel comprised of mono-alkyl esters of long chain fatty acids, which are derived from vegetable oils or animal fats [1].

The high cost of biodiesel is mainly due to the cost of virgin vegetable oil. Therefore, it is not surprising that the biodiesel produced from vegetable oil costs much more than petroleum-based diesel [2,3]. Therefore, it is necessary to explore ways to reduce production costs of biodiesel. In this sense, methods that permit to

minimize the costs of the raw material are of special interest. With low cost lipid feedstocks containing high amount of free fatty acids (FFA), biodiesel production by transesterification with alcohol using base catalyst is not appropriated. A two step process is then proposed [4-6]. The first step of the process is to reduce FFA content in waste cooking oil by esterification with methanol and acid catalyst. The second step is transesterification process, in which triglyceride (TG) portion of the oil reacts with methanol and base catalyst to form ester and glycerol [7].

Biodiesel is usually prepared in the presence of homogeneous base or acid catalysts. However, in this conventional homogeneous method removal of these catalysts after reaction is technically difficult and a large amount of wastewater was produced to separate and clean the catalyst and the products. Therefore, conventional homogeneous catalysts are expected to be replaced in the near future by environmentally friendly heterogeneous catalysts. The replacement of homogeneous catalysts by heterogeneous catalysts would have various advantages [8]. For example, a clean reaction product solution can be obtained after simple filtration, the catalyst is easy to be recovered and reused and avoidance of corrosion [9].

In this work, the direct esterification reaction of the free fatty acids present in acid oil with ethanol has been studied. Ethanol has been used as alcohol due to its less toxicity for humans and because it is safety to handle and it can be obtain from a natural source [10]. The acid catalyst is alumina loaded with sulfuric acid. Crude palm oil (CPO) contains mainly free fatty acids and consists of 5.3 wt.% FFA was used as feedstock for production of biodiesel.

### Materials and Methods

#### *Materials*

Crude palm oil (CPO) was obtained from Chumporn Palm Oil Industry public company Limited. Its consist of 5.3 wt% FFA. All chemicals including 99.95% ethanol ( $C_2H_5OH$ ), 98% sulfuric acid ( $H_2SO_4$ ), AR. alumina ( $Al_2O_3$ ) used as support had a surface area  $0.28\text{ m}^2/\text{g}$ .

### Methods

The alumina used as a support had a surface area of  $0.28\text{ m}^2/\text{g}$ . The amount of  $H_2SO_4$  was varied between 10% and 50% by weight.  $H_2SO_4$  was loaded onto alumina by an impregnation method from aqueous solution followed by drying in oven at  $70^\circ\text{C}$  for 24 h. Then, the sample were then placed inside sealed containers in a desiccator.

Esterification reaction were in a three-necked batch reactor (total volume 500 ml) equipped with a reflux condenser to avoid alcohol vaporization. The three-necked reactor was immersed in a constant temperature oil bath equipped with a temperature controller. A plate type magnetic stirrer was used to control the rate of the reaction mixture [11].

The esterification process was carried out in 500 ml three-necked bottle. CPO was firstly poured in to the bottle following by catalyst and ethanol. The bottle was immersed in oil bath at designed temperature and time. Operating parameters for esterification process including reaction temperatures in the range of  $60\text{--}80^\circ\text{C}$ , molar ratios of ethanol to CPO in the range of 30:1-6:1, loading amount of  $H_2SO_4$  supported on alumina in the range 10-50 wt.%, quantity of  $H_2SO_4/Al_2O_3$  in the range of 20-40 wt.% and reaction time in the range of 30-150 min were investigated.

## Results and Discussion

### *Effects of the amount of $H_2SO_4$ supported on $Al_2O_3$*

In order to study the effect of  $H_2SO_4$  loading amount of the catalysts on their catalytic activities, a series of  $H_2SO_4/Al_2O_3$  samples with the loading amount of  $H_2SO_4$  ranging from 10 to 50 wt.%, were prepared and employed to catalyze the esterification reaction. The results are presented in Fig.1. As seen from this figure, as the loading amount of  $H_2SO_4$  was raised from 10 to 42 wt.%, the conversion was increased and the highest conversion of 63.31% was obtained at loading  $H_2SO_4$  of 42 wt.% on  $Al_2O_3$ .

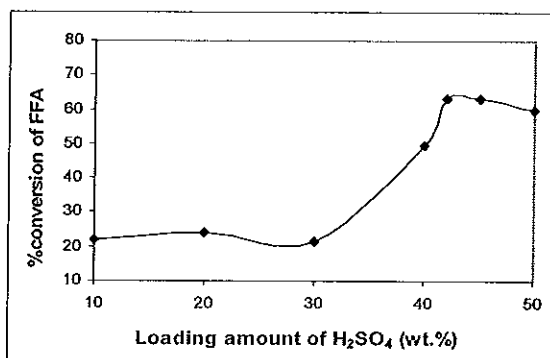


Figure 1. Influence of loading amount of  $H_2SO_4$  on the conversion. Reaction conditions: ethanol/oil molar ratio 20:1, catalyst amount 20 wt.%, temperature  $60^\circ\text{C}$ , reaction time 1h.

### *Effects of the amount of catalyst*

The effect of the amount of most active 42% $H_2SO_4/Al_2O_3$  catalyst on the conversion was investigated. The catalyst amount was varied in the range of 10-40 wt.%. As shown in Fig.2, the conversion was increased firstly with the increase of catalyst amount from 20 to 30%. An appropriate amount of catalyst was 30 wt.% as it gave optimal conversion of FFA. However, when the amount of catalyst exceeded 35 wt.%, the rate of reaction increased very lightly.

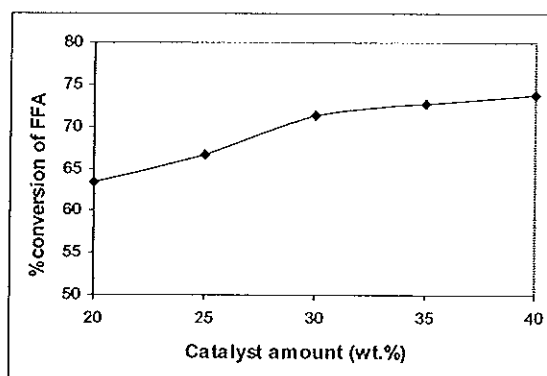


Figure 2. Influence of catalyst amount on the conversion. Reaction conditions: ethanol/oil molar ratio 20:1, temperature  $60^\circ\text{C}$ , reaction time 1h.

### *Effects of mole ratio of reactants*

An excess of ethanol is necessary for the esterification of FFA with ethanol because it can increase the rate of ethanolysis, in Fig.3, shows the effect of the mole ratio of ethanol to oil on

conversion. When the ethanol amount was increased, the conversion was increased considerably. The optimal conversion was achieved at the molar ratio of 20:1. Further increase of molar ratio did not significantly increase the conversion of FFA.

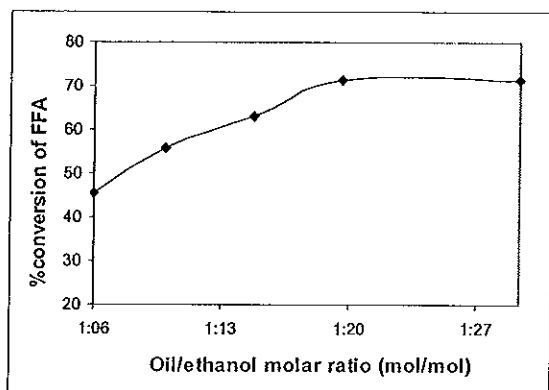


Figure 3. Influence of ethanol/oil molar ratio on the conversion. Reaction conditions: catalyst amount 30 wt.%, temperature 60 °C, reaction time 1h.

#### Effect of the temperature

The effect of temperature on conversion under otherwise similar conditions was studied in the range of 60-80°C, Fig.4, it was seen that the conversion of FFA increases with temperature. The optimal temperature had been observed at 80°C. At this temperature, the highest conversion of CPO reached 84.63%

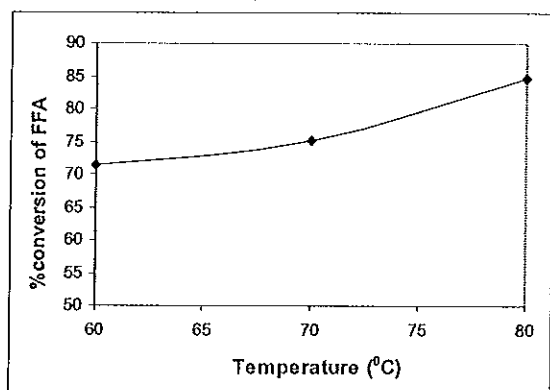


Figure 4. Influence of temperature on the conversion. Reaction conditions: ethanol/oil molar ratio 20:1, catalyst amount 30 wt.%, reaction time 1h.

#### Effect of reaction time

In Fig.5, the conversion versus reaction time is presented. It can be seen that the conversion was increase in the reaction time range between 30 and 60 min. After that the conversion rate was slower and finally reached steady state.

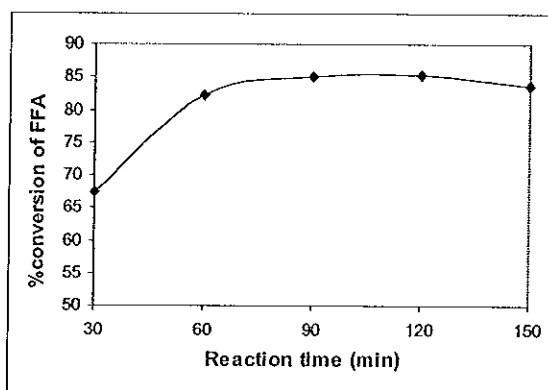


Figure 5. Influence of reaction on the conversion. Reaction conditions: ethanol/oil molar ratio 20:1, catalyst amount 30 wt.%, temperature 80°C

#### Optimal parameters of FFA conversion

The optimal parameters of sulfuric acid loaded on alumina catalysis of CPO obtained by range analysis are the following: alumina loaded with 42 wt% of sulfuric acid at 30 %(wt/wt of CPO) molar ratio of ethanol to CPO 20:1, reaction temperature 80°C, reaction time 1 h. The conversion of FFA was 84.63% when the reaction was performed under these conditions.

#### Conclusions

In this study, we intended to examine heterogeneous acid catalysts in order to develop an effective catalyst for biodiesel process. Alumina loaded with sulfuric acid was demonstrated to be a strong solid-acid catalyst for esterification of crude palm oil with ethanol, which was prepared by impregnation of powdered alumina with an aqueous solution of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. The catalyst with 42% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> loading on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was found to be the optimum catalyst. When the reaction was carried out at reflux of ethanol, with a molar ratio of ethanol to oil of 20:1 (mole:mole), temperature was 80°C, a reaction time 1 h and a catalyst amount 30 wt.% of CPO, the highest conversion of CPO reached

84.63%. and the amount of FFA was reduced from 5.3 wt% to less than 1 wt%. These results show the possibility for these catalyst being effective

heterogeneous acid catalyst for the manufacture of biodiesel.

### References

- [1] W. Xie, H. Peng and L. Chen, *Applied Catalyst A: General* **300** (2006), pp. 67–74.
- [2] B. Supple, R. Howard-Hildige, E. Gonzalez-Gomez and J.J. Leahy, *J. Am. Oil Chem. Soc.* **79** (2002), pp. 175-178.
- [3] Y. Zhang, M.A. Dube, D.D. McLean and M. Kates, *Process design and technological assessment, Bioresour. Technol* **89** (2003), pp. 1-16.
- [4] VB. Veljkovic, S. Jayaraj and C. Muraleedharan, *Fuel* **84** (2004), pp. 40-335.
- [5] Y. Wang, S. Ou, P. Liu, F. Xue and S. Tang, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* **252** (2006), pp. 12-107.
- [6] VG. Shashikant and H. Raheman, *Biomass and Bioenergy* **28** (2005), pp. 5-601.
- [7] Y. Wang, S. Ou, P. Liu and Z. Zhang, *Energy Conversion and Management* **48** (2007), pp. 184-188.
- [8] W. Xie and H. Li, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* **255** (2006), pp. 1-9.
- [9] FT. Sejidov, Y. Mansoori and N. Goodarzi, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* **240** (2005), pp. 186-190.
- [10] J.M. Marchetti, V.U. Miguel and A.F. Errazu, *Fuel* **86** (2007), pp. 906–910.
- [11] O. Nalan, O. Nuray and N. Alper, *Role of ion-exchange resins, Fuel* **87** (2006), pp. 1789–1798.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวอังฉรา สีม่วง	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5010120086	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2552

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนศึกษย์ก้นกุฎิ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Autchara Seemuang, Sukritthira Ratanawilai and Pim-phan Meyer. 2009. Biodiesel Production from Ethanol by Sulfuric Acid Supported on Alumina. Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2009), Naresuan University, Phitsanulok, Thailand, January 14-16, 2009, 680-682.