

การเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบวิวิธพันธุ์ของน้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันมะพร้าว



นางสาวศิตา เบ็ญจพรกุลพงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3726-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I ๑๑๔38816

HETEROGENEOUS CATALYTIC TRANSESTERIFICATION OF PALM KERNEL OIL AND  
COCONUT OIL

Miss Sita Benjapornkulaphong

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-3726-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแบบวิวิธพันธุ์ของน้ำมัน เมล็ดในปาล์มและน้ำมันมะพร้าว
โดย	นางสาวศิตา เบ็ญจพรกุลพงศ์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ กัญจนา บุญเกียรติ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย

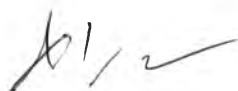
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



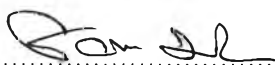
.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตตานนท์)



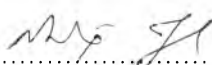
.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ กัญจนา บุญเกียรติ )



.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร. ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)



.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสุสิทธิ์)



.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชาคกริต ทองอุไร)

ศิดา เบ็ญจพรกุลพงศ์: การเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแบบวิวิธพันธุ์ของน้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันมะพร้าว (HETEROGENEOUS CATALYTIC TRANSESTERIFICATION OF PALM KERNEL OIL AND COCONUT OIL) อ.ที่ปรึกษา: รศ. กัญจนา บุญเกียรติ, อ.ที่ปรึกษาร่วม: ดร. ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย, 100 หน้า ISBN 974-17-3726-2

ศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันมะพร้าวกับเมทานอล ซึ่งเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยวิวิธพันธุ์ชนิดเบสที่เตรียมขึ้นโดยนำเกลือโลหะฝังลงบนตัวรองรับ โดยเลือกเกลือโลหะ 3 กลุ่มคือ เกลือไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต และไนเตรตของโลหะหมู่ 1 และ 2 รวม 15 ชนิด ได้แก่ NaOH KOH  $Mg(OH)_2$   $Ca(OH)_2$   $Ba(OH)_2$   $Li_2CO_3$   $Na_2CO_3$   $K_2CO_3$   $MgCO_3$   $CaCO_3$   $BaCO_3$   $LiNO_3$   $NaNO_3$   $Mg(NO_3)_2$  และ  $Ca(NO_3)_2$  และตัวรองรับ 5 ชนิดที่มีสมบัติแตกต่างกัน ได้แก่  $Al_2O_3$   $SiO_2-Al_2O_3$   $MgO$  hydrotalcite และ activated carbon พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเหมาะสม คือ  $Ca(NO_3)_2/Al_2O_3$  โดยมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก สามารถเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงถึง 93.73 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก สามารถเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันมะพร้าว ได้ร้อยละเมทิลเอสเทอร์สูงถึง 91.23 ที่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันพืชเป็น 65 ต่อ 1 อุณหภูมิ  $60^{\circ}C$  ในเวลา 3 ชั่วโมง โดยปัจจัยที่มีผลต่อการทำหน้าที่ของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ แคลไซน์ และหาภาวะการทดลองที่เหมาะสมด้วยวิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  โดยศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลตอบสนองคือ ร้อยละเมทิลเอสเทอร์ นอกจากนี้ได้วิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานไบโอดีเซล และน้ำมันดีเซล พบว่ามีสมบัติใกล้เคียงกัน

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....ศิดา เบ็ญจพรกุลพงศ์.....  
 สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา.....2548.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4772496223: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORDS: VEGETABLE OIL, BIODIESEL, TRANSESTERIFICATION, HETEROGENEOUS CATALYST

SITA BENJAPORNKULAPHONG: HETEROGENEOUS CATALYTIC TRANSESTERIFICATION OF PALM KERNEL OIL AND COCONUT OIL. THESIS ADVISOR :ASSOC.PROF.KUNCHANA BUNYAKIAT, THESIS CO-ADVISOR : CHAWALIT NGAMCHARUSSRIVICHAI, 100 pp. ISBN 974-17-3726-2

Catalytic transesterification of palm kernel oil and coconut oil with methanol was studied over various heterogeneous base catalysts. Catalysts were prepared by impregnating metal salts loaded on supports. Three groups of alkali and alkali earth metal salts were used; carbonate, hydroxide and nitrate. Fifteen types of metal salts i.e. NaOH, KOH,  $Mg(OH)_2$ ,  $Ca(OH)_2$ ,  $Ba(OH)_2$ ,  $Li_2CO_3$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $K_2CO_3$ ,  $MgCO_3$ ,  $CaCO_3$ ,  $BaCO_3$ ,  $LiNO_3$ ,  $NaNO_3$ ,  $Mg(NO_3)_2$  and  $Ca(NO_3)_2$  and five types of supports, i.e.  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2-Al_2O_3$ , MgO, hydrotalcite and activated carbon were used.  $Ca(NO_3)_2/Al_2O_3$  exhibited the highest activity for transesterification, Ten % of the catalyst was needed for palm kernel oil and fifteen % for coconut oil to catalyze the reaction and resulted in methyl esters content is 93.73 % and 90.38 %, respectively. The optimal conditions were; the molar ratio of methanol to oil is 65:1, temperature 60 °C, atmospheric pressure and 3 hour reaction time. The effect of calcination temperature on catalytic activity was also studied. Biodiesel products were tested and found to meet the specification of ASTM biodiesel and local diesel standards.

Department.....Chemical Technology.....Student's signature.....*Sita Benjapornkulaphong*  
 Field of study.....Chemical Technology.....Advisor's signature.....*K. Bunyakiat*  
 Academic year.....2005.....Co-advisor's signature.....*Chawalit Ngamcharussrivichai*

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ภัฏจนา บุญเกียรติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม คณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยมาตลอด

ขอขอบคุณ บริษัทชุมพรปาล์มอุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำมันเมล็ดในปาล์ม และบริษัทมิตซูชิ แอนด์คัมปนี (ไทยแลนด์) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรทัลไซด์ มาใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในอุปกรณ์ เครื่องมือ และเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิงภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์วิจัยปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัยตลอดการศึกษา

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ญาติพี่น้องที่เป็นกำลังใจเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	3
1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4. ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1. แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.2. วัตถุประสงค์สำหรับการผลิตไบโอดีเซล.....	11
2.3. น้ำมันพืช.....	18
2.4. การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงทดแทน.....	19
2.5. กสิเชอร์รอล.....	25
2.6. ปฏิกริยาเชิงเร่ง.....	26
2.7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	39
3.1. รูปแบบการศึกษา.....	39
3.2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	39
3.3. สารที่ใช้ในการทดลอง.....	46
3.4. ขั้นตอนการวิจัย.....	48

บทที่	หน้า
3.5 การดำเนินการทดลอง.....	48
3.6 การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์.....	50
3.7 การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์.....	51
4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	52
4.1 สมบัติของน้ำมันพืช.....	52
4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิธพันธ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	54
4.3 ลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาวิธพันธ์.....	57
4.4 ผลการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม.....	62
4.5 ผลการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันมะพร้าว.....	84
4.6 สมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล.....	85
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	88
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
5.3 ข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นประโยชน์ในงานวิจัยขั้นต่อไป.....	88
รายการอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	92
ภาคผนวก ข.....	93
ภาคผนวก ค.....	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	100



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 มาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลตามมาตรฐาน DIN EN 14214 ของสหภาพยุโรป.....	6
ตารางที่ 2.2 มาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลมาตรฐาน DIN E 51606 ของประเทศเยอรมนี.....	7
ตารางที่ 2.3 มาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลมาตรฐาน ASTM D 6751 ของประเทศสหรัฐอเมริกา.....	8
ตารางที่ 2.4 มาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลมาตรฐานของประเทศไทย.....	9
ตารางที่ 2.5 ปริมาณการผลิตพืชน้ำมันของประเทศไทย.....	11
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ.....	12
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ.....	13
ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบปัจจัยในการเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และวิวิธพันธ์.....	27
ตารางที่ 3.1 ภาวะในการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์.....	42
ตารางที่ 4.1 สมบัติของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม และน้ำมันมะพร้าว.....	52
ตารางที่ 4.2 ชนิดและองค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันพืชตัวอย่าง.....	53
ตารางที่ 4.3 สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืชตัวอย่างเทียบกับน้ำมันดีเซล.....	54
ตารางที่ 4.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	55
ตารางที่ 4.5 สมบัติความเป็นกรด-เบส ของตัวรองรับ.....	57
ตารางที่ 4.6 สมบัติการละลายน้ำของเกลือโลหะ.....	57
ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิการสลายตัวและการหลอมเหลวของเกลือไนเตรตของโลหะหมู่ 1 และ 2.....	58
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์การวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยวิธีบีอีที (BET).....	58
ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (2.6-550-2) ด้วยเทคนิค XRF.....	59
ตารางที่ 4.10 ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา Na(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (2.6-550-4) ด้วยเทคนิค XRF.....	59
ตารางที่ 4.11 ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (2.6-450-4) ด้วยเทคนิค XRF.....	60
ตารางที่ 4.12 ผลของการวิเคราะห์ปริมาณโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (2.6-450-4) อุณหภูมิการอบ 120 <sup>0</sup> ซ และอุณหภูมิการแคลไซน์ 450 550 650 และ 850 <sup>0</sup> ซ ด้วยเทคนิค XRF.....	60

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.13 ผลของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ของเกลือโลหะคาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ของโลหะหมู่ 1 และ 2 บนตัวรองรับอะลูมินา.....	63
ตารางที่ 4.14 ผลของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากเกลือโลหะของแข็งและตัวรองรับ.....	64
ตารางที่ 4.15 ผลของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากเกลือโลหะชนิดอื่นบนตัวรองรับอะลูมินา...	65
ตารางที่ 4.16 ผลของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จาก 3%K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /support (2.6-550-4).....	69
ตารางที่ 4.17 ผลของการเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของเกลือไนเตรตบนตัวรองรับ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .	73
ตารางที่ 4.19 ผลของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> บนตัวรองรับที่มีสมบัติต่างกัน.....	75
ตารางที่ 4.20 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์.....	77
ตารางที่ 4.21 การศึกษาปัจจัยหลัก 4 ปัจจัย โดย 2 <sup>4</sup> factorial design.....	78
ตารางที่ 4.22 ค่าร้อยละเมทิลเอสเทอร์ของการทดลองแบบ 2 <sup>4</sup> factorial design 16 การทดลอง.....	78
ตารางที่ 4.23 การศึกษาปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย โดย 2 <sup>3</sup> factorial design.....	80
ตารางที่ 4.24 ค่าร้อยละเมทิลเอสเทอร์ของการทดลองแบบ 2 <sup>3</sup> factorial design 8 การทดลอง.....	80
ตารางที่ 4.25 ผลของการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันมะพร้าว ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (2.6-550-2).....	84
ตารางที่ 4.26 ผลของการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันมะพร้าว ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (2.6-450-4).....	85
ตารางที่ 4.27 มาตรฐานน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซล.....	85
ตารางที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์ทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการเร่ง ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (2.6-450-4).....	86
ตารางที่ 5.1 ผลร้อยละเมทิลเอสเทอร์ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ของน้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันมะพร้าวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (2.6-450-4).....	88
ตารางที่ ก.1 การคำนวณปริมาณของเกลือโลหะ 2.6 มิลลิโมลเทียบกับอะลูมินา 1 กรัม.....	92

ตาราง	หน้า
ตารางที่ ก.2 การหาปริมาณการดูดซับตัวทำละลายของตัวรองรับ 1 กรัม.....	92
ตารางที่ ก.3 การคำนวณปริมาณของเกลือโลหะ 2.6 มิลลิโมลเทียบกับอะลูมินา 1 กรัม.....	92
ตารางที่ ข.1 สมบัติของเมล็ดในปาล์ม.....	93
ตารางที่ ข.2 สมบัติของเมทานอล.....	93
ตารางที่ ข.3 สมบัติของน้ำมันมะพร้าว.....	94
ตารางที่ ค.1 มวลโมเลกุลของสารเคมี.....	97

## สารบัญรูป

รูปประกอบที่	หน้า
รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโดยตัวเร่งปฏิกิริยาเบส.....	23
รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาในตัวเร่งปฏิกิริยากรด.....	25
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนโดยทั่วไปในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	32
รูปที่ 2.4 แผนภาพของวิธีอิมเพกเนชัน.....	34
รูปที่ 2.5 แผนภาพของวิธีตกตะกอนร่วม.....	35
รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ทดลองการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	40
รูปที่ 3.2 เทคนิค X-Ray diffraction (XRD).....	41
รูปที่ 3.3 เทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF).....	41
รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography).....	43
รูปที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ( DGC).....	43
รูปที่ 3.6 เครื่องวัดค่าความร้อน Bomb Calorimeter Model 1341.....	44
รูปที่ 3.7 เครื่องวัดความหนืดด้วย Capillary Viscometer.....	44
รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์จุดวับไฟแบบ Pensky Martens Opened Cup Tester.....	45
รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ API ( API Gravity).....	45
รูปที่ 4.1 ผลวิเคราะห์โครงสร้างของตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา (*K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ).....	61
รูปที่ 4.2 ผลวิเคราะห์โครงสร้างของตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยา (*Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ).....	62
รูปที่ 4.3 กลไกการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /support.....	66
รูปที่ 4.4 ผลของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากเกลือโลหะชนิดต่างๆ บนตัวรองรับ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	67
รูปที่ 4.5 ผลของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากปริมาณเกลือโลหะบนตัวรองรับ.....	68
รูปที่ 4.6 ผลของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากเวลาในการเปลี่ยนแปลงของ การเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	70
รูปที่ 4.7 ผลของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากปริมาณที่แตกต่างกันของ ตัวเร่งปฏิกิริยา K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	71
รูปที่ 4.8 ผลของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากความแตกต่างของ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม.....	72

รูปประกอบที่	หน้า
รูปที่ 4.9 ผลของร้อยละเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากการเร่งปฏิกิริยาด้วยเกลือไนเตรด ของโลหะหมู่ 1 และ 2 บนตัวรองรับ $Al_2O_3$ อุณหภูมิการแคลไซน์ 450 550 650 และ 850 <sup>0</sup> ซ.....	74
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Effect ของปัจจัยกับ Half Normal % probability.	79
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Effect ของปัจจัยกับ Half Normal % probability.	80
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Studentized Residuals กับ Normal% probability.....	81
รูปที่ 4.13 ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันพืช (A) สูงสุดและต่ำสุด.....	82
รูปที่ 4.14 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (B) สูงสุดและต่ำสุด.....	82
รูปที่ 4.15 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา (C) สูงสุดและต่ำสุด.....	83
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอันตรกิริยาของอัตราส่วนโดยโมลระหว่าง เมทานอลต่อน้ำมันพืชกับตัวเร่งปฏิกิริยา (AB) สูงสุดและต่ำสุด.....	83
รูปที่ ค.1 ตัวอย่างโครมาโทแกรมในการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์.....	95
รูปที่ ค.2 Calibration curve ของสารมาตรฐานเมทิลคาโพรเลต.....	98
รูปที่ ค.3 Calibration curve ของสารมาตรฐานเมทิลลอเรต.....	98
รูปที่ ค.4 Calibration curve ของสารมาตรฐานเมทิลไมริสเตต.....	99
รูปที่ ค.5 Calibration curve ของสารมาตรฐานเมทิลปาล์มิเตต.....	99