



246991

กรณีศึกษาการยอมรับด้านกลิ่นน้ำหอมที่เป็นหัวใจสู่ผู้บริโภคชาวจีนสำหรับ
กระบวนการเอสเอสอีพีเคเอ็นเอ็นเอ็นปัดมโนโดยเอทานอลภายใต้สภาวะแบบคง

นางสาวนภวรรณ นีป๊ะกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
วิทยานิพนธ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



246991

กรดซัลฟิวริกบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งสำหรับ
กระบวนการเอสเทอริฟิเคชันน้ำมันปาล์มโดยเอทานอลภายใต้สภาวะแบบกะ

นางสาวนภาพรรณ นิปะกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 2 7 1 4 8 9 5 2 1

SULFURIC ACID SUPPORTED ON ACTIVATED CARBON AS SOLID CATALYST
FOR ESTERIFICATION PALM OIL BY ETHANOL UNDER BATCH CONDITION



Miss Napawan Nipakakul

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กรดซัลฟิวริกบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งสำหรับกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันน้ำมันปาล์มโดยเอทานอลภายใต้สภาวะแบบกะ
โดย	นางสาวนาถวรรณ นิปะกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เหมื่อนเดือน พิศาลพงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรร มงคลศรี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เหมื่อนเดือน พิศาลพงศ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด จงสมจิตร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.เมตตา เจริญพานิช)

นภาพรรณ นิปกะกุล : กรดซัลฟิวริกบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งสำหรับกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันน้ำมันปาล์มโดยเอทานอลภายใต้สภาวะแบบกะ (SULFURIC ACID SUPPORTED ON ACTIVATED CARBON AS SOLID CATALYST FOR ESTERIFICATION PALM OIL BY ETHANOL UNDER BATCH CONDITION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์, 99 หน้า.

246991

จากการศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดโอเลอิกที่ละลายในน้ำมันปาล์มเชิงพาณิชย์กับเอทานอลโดยใช้กรดซัลฟิวริกที่ดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งภายใต้สภาวะแบบกะ โดยตรวจสอบผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายกรดที่ดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของกรดไขมันอิสระ อุณหภูมิ และ เวลา จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการลดลงของค่าความเป็นกรดมีค่าสูงสุดถึง 89.5% ภายใน 5 ชั่วโมง ณ สภาวะ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเอทานอล/น้ำมันเชิงโมล 9:1 โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารละลายที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันตั้งต้น โดยพบว่าผลกระทบจากน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้ค่าการเปลี่ยนของกรดไขมันอิสระหลังจากเวลา 5 ชั่วโมงมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าอัตราส่วนการเกิดเอสเทอร์ยังคงเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันด้วยกรด โดยมีค่าอัตราการเกิดเอสเทอร์สูงสุดถึง 49.2 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 9 ชั่วโมง ณ สภาวะการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

ปีการศึกษา....2553.....

ลายมือชื่อนิสิต.....นภาพรรณ นิปกะกุล.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5271489521 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ETHANOL / PALM OIL / ESTERIFICATION / SOLID CATALYST /
ACTIVATED CARBON

NAPAWAN NIPAKAKUL: SULFURIC ACID SUPPORTED ON ACTIVATED
CARBON AS SOLID CATALYST FOR ESTERIFICATION PALM OIL BY
ETHANOL UNDER BATCH CONDITION ADVISOR: ASSOC. PROF.
MUENDUEN PHISALAPHONG, Ph.D., 99 pp.

246891

The esterification of oleic acid ($C_{18}H_{34}O_2$) dissolved in commercial palm oil with ethanol in the presence of sulfuric acid supported on activated carbon as solid catalyst was studied under batch condition. The effect of concentration of acid solution loading on activated carbon, amount of catalyst, amount of FFA, temperature, and time were investigated. The results demonstrated that the maximum acid value reduction of 89.5% was achieved within 5 hours at 80°C with the ethanol/oil mole ratio of 9:1 by using an activated carbon loaded with 20% (by weight of solution) of sulfuric acid at 10% (wt of catalyst /wt of initial oil). It was found that the effect of the water that occurred during esterification affected the reversible reaction causing the decreased conversion of FFA after 5 hours, while the ester yield continues to increase. Due to acid catalyzed-transesterification, the ester yield up to 49.2 percent was obtained within 9 hours at the appropriate reaction conditions.

Department : Chemical Engineering

Field of Study : Chemical Engineering

Academic Year : 2010

Student's Signature

Advisor's Signature

Napawan Nipakakul
Assoc. Prof. Muendu Phisalaphong

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ เพราะความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร.เหมื่อน เตือน พิศาลพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ตลอดจนความช่วยเหลือในด้านต่างๆ รวมถึงสละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษาและตรวจแก้ไขข้อผิดพลาดในการทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ รศ.ดร.ธราธร มงคลศรี รศ.ดร.บรรเจิด จงสมจิตร และ รศ.ดร.เมตตา เจริญพานิช ที่ได้สละเวลาอันมีค่ายิ่งเพื่อเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ด้วยความรู้สึกขอบพระคุณยิ่งแก่ครูพิบูลย์ เกิดโภคทรัพย์ ที่ให้การอบรมการใช้เครื่อง GC รวมถึงการตรวจ SEM รวมถึงความช่วยเหลืออย่างยิ่งจากครูวรรณดารา อินทรปัญญา และ ครูณพวัชร์ ธีมพิพิธ ในขณะที่ทดลองวิจัย ณ ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์และห้องปฏิบัติการเคมี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้องในภาควิชาวิศวกรรมเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำข้อมูลต่างๆ ในการวิจัยในครั้งนี้

ท้ายสุดผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และน้องสาว ที่ได้ให้การสนับสนุนและคอยช่วยเหลือรวมถึงเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2. แนวคิดและทฤษฎี	6
2.1 เทคโนโลยีในการผลิตไบโอดีเซล	7
2.1.1 การใช้โดยตรงกับเครื่องยนต์ดีเซลปิโตรเลียม	7
2.1.2 การผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียม	9
2.1.3 กระบวนการไมโครอิมัลชัน	9
2.1.4 กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน	9
2.1.5 การผลิตแอลคิลเอสเทอร์โดยใช้เอนไซม์ไลเปส	10
2.1.6 กระบวนการทรานเอสเตอริฟิเคชัน	11
2.1.6.1 กระบวนการทรานเอสเตอริฟิเคชันด้วยกรด	12
2.1.6.2 กระบวนการทรานเอสเตอริฟิเคชันด้วยด่าง	13

	หน้า
2.1.7 กระบวนการ 2 ปฏิกริยา	14
2.2 วัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซล	15
2.2.1 น้ำมันเหลือทิ้ง	15
2.2.2 ไชสตร์	16
2.2.3 น้ำมันปาล์ม	17
2.2.4 น้ำมันถั่วเหลือง	20
2.2.5 น้ำมันมะพร้าว	21
2.3 ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมันและไชสตร์	22
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
2.4.1 งานวิจัยที่ใช้กรดซัลฟิวริกในการทำปฏิกริยา	25
2.4.2 งานวิจัยที่ใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวรองรับ	26
2.4.3 งานวิจัยเรื่องผลกระทบจากน้ำต่อปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	32
3.1 วิธีการดำเนินงาน	32
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	32
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	33
3.4 การเตรียมตัวเร่งปฏิกริยาที่ใช้ในการทดลอง	34
3.5 การทดลองปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ระบบแบบกะ	34
3.6 การวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	35
3.6.1 วิธีการวัดค่าความเป็นกรด	35
3.6.2 การคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ	36
3.6.3 การคำนวณค่าอัตราส่วนการเกิดเอทิลเอสเทอร์	36
3.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกริยา	37
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	38
4.1 คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกริยา	38
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ XRD	38

	หน้า
4.1.2 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีการดูดซับด้วยก๊าซไนโตรเจน	39
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ SEM	42
4.2 ผลของตัวแปรต่อปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน	44
4.2.1 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ถูก ดูดซับบนถ่านกัมมันต์	44
4.2.2 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	46
4.2.3 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	48
4.2.4 ผลกระทบจากเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	50
4.2.5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กับไม่ใช้ตัวรองรับ	52
4.2.6 ผลกระทบจากปริมาณกรดไขมันอิสระเริ่มต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	54
4.2.7 การใช้ซ้ำ	58
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	60
5.1 สรุปผลการวิจัย และอภิปรายผล	60
5.2 ข้อเสนอแนะ	61
รายการอ้างอิง	63
ภาคผนวก	67
ภาคผนวก ก ข้อมูลจากการทดลอง	68
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการดูดซับด้วย ก๊าซไนโตรเจน	78
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ ค่าพลังงานกระตุ้น และอัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	99

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 1	แสดงมาตรฐาน ASTM (The American Society for Testing and Materials) ของดีเซลปิโตรเลียมและไบโอดีเซล.....	6
ตารางที่ 2	แสดงปัญหา สาเหตุที่อาจเป็นไปได้ และสารละลายในสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการนำน้ำมันพืชไปใช้โดยตรงทดแทนไบโอดีเซล.....	8
ตารางที่ 3	ข้อมูลส่วนประกอบน้ำมันจากการแตกตัวด้วยความร้อน.....	10
ตารางที่ 4	แสดงส่วนประกอบของกรดไขมันและน้ำหนักโมเลกุล (MW) ของน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านการทอดอาหารแล้ว.....	15
ตารางที่ 5	คุณสมบัติและส่วนประกอบของไขวัวดิบ.....	16
ตารางที่ 6	ส่วนประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม.....	18
ตารางที่ 7	สิ่งเจือปนในน้ำมันปาล์มดิบ (CPO).....	20
ตารางที่ 8	ส่วนประกอบของกรดไขมันในน้ำมันมะพร้าว.....	22
ตารางที่ 9	คุณสมบัติทางฟิสิกส์บางตัวของน้ำมันมะพร้าวดิบ.....	22
ตารางที่ 10	แสดงส่วนประกอบของกรดไขมันในน้ำมันชนิดต่างๆ.....	24
ตารางที่ 11	คุณสมบัติน้ำมันเชื้อเพลิงไบโอดีเซลที่องค์ประกอบกรดไขมันแตกต่างกัน	24
ตารางที่ 12	แสดงคุณสมบัติเริ่มต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลองของ GAN Mengyu	26
ตารางที่ 13	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรด.....	28

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 14	แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดเฉลี่ยของรูพรุนของ ตัวเร่งปฏิกิริยา AC และ H_2SO_4/AC ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรด ซัลฟิวริกที่ใช้ในการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ต่างๆ โดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วย ก๊าซไนโตรเจน..... 39
ตารางที่ 15	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ (conversion FFA) ค่าความ เป็นกรด (Acid value) และค่าอัตราการเกิดเอสเทอร์ (The ester yield) เป็น ฟังก์ชันกับเวลา เมื่อใช้น้ำมันตั้งต้นต่างๆ (10%w/w oleic acid +90%w/w palm oil, 100%w/w palm oil, 100%w/w oleic acid)..... 57
ตารางที่ ก-1	ช่วงเวลาในการเกิดพีคของสารกลุ่มเอทิลเอสเทอร์เมื่อวิเคราะห์ด้วย Gas Chromatogram..... 69
ตารางที่ ก-2	พื้นที่ใต้กราฟของสารมาตรฐานที่วัดโดย Gas Chromatogram..... 69
ตารางที่ ก-3	ข้อมูลค่าความเป็นกรด (acid value) จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความ เข้มข้นของสารละลายที่ใช้ดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ณ อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ 70
ตารางที่ ก-4	ข้อมูลค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ (Conversion FFA) จากการ ทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ดูดซับบนถ่านกัม มันต์ ณ อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ 70

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ก-5 ข้อมูลค่าอัตราส่วนการเกิดเอสเทอร์ (the ester yield) จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ณ อุณหภูมิ 60°C.....	71
ตารางที่ก-6 ข้อมูลค่าความเป็นกรด (acid value) จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ณ อุณหภูมิ 70°C....	71
ตารางที่ก-7 ข้อมูลค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ (Conversion FFA) จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ณ อุณหภูมิ 70°C.....	72
ตารางที่ก-8 ข้อมูลค่าอัตราส่วนการเกิดเอสเทอร์ (the ester yield) จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ณ อุณหภูมิ 70°C.....	72
ตารางที่ก-9 ข้อมูลค่าความเป็นกรด (acid value) จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ณ อุณหภูมิ 80°C	73
ตารางที่ก-10 ข้อมูลค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ (Conversion FFA) จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ณ อุณหภูมิ 80°C.....	73

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ก-11 ข้อมูลค่าอัตราส่วนการเกิดเอสเทอร์ (the ester yield) จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ณ อุณหภูมิ 80 °C.....	74
ตารางที่ก-12 ข้อมูลค่าความเป็นกรด (acid value) จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	74
ตารางที่ก-13 ข้อมูลค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ (Conversion FFA) จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	75
ตารางที่ก-14 ข้อมูลค่าอัตราส่วนการเกิดเอสเทอร์ (the ester yield) จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ณ อุณหภูมิ 80 °C.....	75
ตารางที่ก-15 ข้อมูลค่าความเป็นกรด (acid value) ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ (Conversion FFA) และค่าอัตราส่วนการเกิดเอสเทอร์ (the ester yield) จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 °C, 70 °C และ 80 °C.....	76
ตารางที่ก-16 ข้อมูลค่าความเป็นกรด (acid value) ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ (Conversion FFA) และค่าอัตราส่วนการเกิดเอสเทอร์ (the ester yield) จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดวัตถุดิบตั้งต้น ณ 80 °C.....	76

ตารางที่

หน้า

ตารางที่ ก-17	ข้อมูลค่าความเป็นกรด (acid value) ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ (Conversion FFA) และค่าอัตราส่วนการเกิดเอสเทอร์ (the ester yield) จากการทดลองการใช้ไขมัน อุณหภูมิ 80 °C.....	77
ตารางที่ ค-1	คำนวณพลังงานกระตุ้นในปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของ 10% กรดโอเลอิกที่ละลายในน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H_2SO_4/AC ซึ่งมีความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนักของสารละลายเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง.....	94

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์.....	9
รูปที่ 2 แสดงกระบวนการทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ไป เป็นเอสเทอร์กับกลีเซอรอล.....	11
รูปที่ 3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยกรดของน้ำมันพืช.....	12
รูปที่ 4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันด้วยด่างของน้ำมันพืช.....	13
รูปที่ 5 ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน.....	14
รูปที่ 6 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส.....	14
รูปที่ 7 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน.....	14
รูปที่ 8 ผลปาล์ม.....	17
รูปที่ 9 แสดงการฟอร์มตัวของไตรกลีเซอไรด์.....	17
รูปที่ 10 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส.....	19
รูปที่ 11 ถั่วเหลือง.....	20
รูปที่ 12 มะพร้าว.....	21
รูปที่ 13 แสดงส่วนประกอบแสดงกรดไขมันที่อิ่มตัวและ ไม่อิ่มของน้ำมันแต่ละชนิด...	23
รูปที่ 14 แสดงส่วนประกอบของเครื่องที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	33

รูปที่	หน้า
รูปที่ 15	แสดง XRD Pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา H_2SO_4/AC ที่ความเข้มข้นของ สารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ต่างๆ (a) AC; (b) 5 %w/w H_2SO_4/AC ; (c) 10 %w/w H_2SO_4/AC ; (d) 20 %w/w H_2SO_4/AC 38
รูปที่ 16	แสดงไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ณ ความเข้มข้นของกรด ซัลฟิวริกที่ต่างกัน..... 40
รูปที่ 17	แสดงผลพื้นที่ผิว Micropore ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับด้วยความ เข้มข้นต่างๆของ H_2SO_4 40
รูปที่ 18	กราฟแสดงการกระจายตัวของรูพรุน ซึ่งเป็นฟังก์ชันระหว่างขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยต่อพื้นที่ผิวรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยการวัดแบบ multipoint BET..... 41
รูปที่ 19	กราฟแสดงการกระจายตัวของรูพรุน ซึ่งเป็นฟังก์ชันระหว่างขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยต่อพื้นที่ผิวรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยการวัดแบบ multipoint BET ในช่วง 0-20 นาโนเมตร 41
รูปที่ 20	แสดงโครงสร้างถ่านกัมมันต์ชั้นนอก โดยใช้เทคนิค SEM กำลังขยาย 50 เท่า 42
รูปที่ 21	แสดงโครงสร้างถ่านกัมมันต์ชั้นนอกที่ผ่านการดูดซับด้วย H_2SO_4 โดยใช้ เทคนิค SEM กำลังขยาย 500 เท่า ณ ความเข้มข้นต่างๆ (a) AC, (b) 5% w/w H_2SO_4/AC (c) 10% w/w H_2SO_4/AC (d) 20% w/w H_2SO_4/AC 42

รูปที่	หน้า
รูปที่ 22	แสดงโครงสร้างด่างกันมันต์ชั้นนอกที่ผ่านการดูดซับด้วย H_2SO_4 โดยใช้เทคนิค SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า ณ ความเข้มข้นต่างๆ (e) 10% w/w H_2SO_4/AC (f) 20% w/w H_2SO_4/AC 43
รูปที่ 23	แสดงค่าอัตราการเกิดเอสเทอร์ (The ester yield) และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ (conversion FFA) เป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ถูกดูดซับบนด่างกันมันต์ ณ สภาวะ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80°C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10%w/w ของน้ำมัน อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:9..... 44
รูปที่ 24	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ (conversion FFA) เป็นฟังก์ชันกับเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ณ สภาวะ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80°C ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 20%w/w ของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:9..... 46
รูปที่ 25	แสดงค่าอัตราการเกิดเอสเทอร์ (The ester yield) เป็นฟังก์ชันกับเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ณ สภาวะ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80°C ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 20%w/w ของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:9..... 47

รูปที่

หน้า

รูปที่ 26

แสดงค่าอัตราการเกิดเอสเทอร์ (The ester yield) และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ (conversion FFA) เป็นฟังก์ชันกับเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ณ สภาวะ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%w/w ของน้ำมัน ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 20%w/w ของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:9.....

48

รูปที่ 27

แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ (conversion FFA) เป็นฟังก์ชันกับเวลาเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ 10% และ 20%w/wของถ่านกัมมันต์ ณ สภาวะ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80°C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10%w/w ของน้ำมัน อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:9.....

50

รูปที่ 28

แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ (conversion FFA) และค่าความเป็นกรด (Acid value) เป็นฟังก์ชันกับเวลา เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H₂SO₄ และ H₂SO₄/AC ณ สภาวะ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80°C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10%w/w ของน้ำมัน อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:9.....

52

รูปที่ 29

แสดงค่าอัตราการเกิดเอสเทอร์ (The ester yield) เป็นฟังก์ชันกับเวลา เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H₂SO₄ และ H₂SO₄/AC ณ สภาวะ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80°C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10%w/w ของน้ำมัน อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:9.....

54

รูปที่	หน้า	
รูปที่ 30	แสดงค่าอัตราการเกิดเอสเทอร์ (The ester yield) เป็นฟังก์ชันกับเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่อใช้น้ำมันตั้งต้นต่างๆ(10%w/w oleic acid +90%w/w palm oil, 100%w/w palm oil, 100%w/w oleic acid)ณ สภาวะ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80°C ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%w/w ของน้ำมัน ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 20%w/w ของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:9.....	54
รูปที่ 31	แสดงค่าอัตราการเกิดเอสเทอร์ (The ester yield) และ ค่าการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันอิสระ (conversion FFA)เป็นฟังก์ชันกับจำนวนครั้งของการใช้ทำปฏิกิริยา ณ สภาวะ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 80°C ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 10%w/w ของน้ำมัน ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก 20%w/w ของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนเชิง โมลของน้ำมันต่อเอทานอล 1:9.....	58
รูปที่ ข-1	Isotherm linear พล็อตระหว่าง Relative Pressure (P/Po) ที่เป็นฟังก์ชันกับ Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP).....	83
รูปที่ ข-2	BET Surface Area พล็อตระหว่าง Relative Pressure (P/Po) ที่เป็นฟังก์ชันกับ 1/[Q(Po/P-1)].....	83
รูปที่ ข-3	BET Surface Area พล็อตระหว่าง Relative Pressure (P/Po) ที่เป็นฟังก์ชันกับ Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP).....	84

รูปที่	หน้า
รูปที่ ๑-4 BET Isotherm พล็อตระหว่าง Relative Pressure (P/P_0) ที่เป็นฟังก์ชัน กับ Quantity Adsorbed ($\text{cm}^3/\text{g STP}$).....	84
รูปที่ ๑-5 Langmuir Surface Area plot พล็อตระหว่าง Pressure (mmHg) ที่เป็น ฟังก์ชันกับ P/Q ($\text{mmHg}\cdot\text{g}/\text{cm}^3 \text{ STP}$).....	85
รูปที่ ๑-6 Langmuir Surface Area plot พล็อตระหว่าง Pressure (mmHg) ที่เป็น ฟังก์ชันกับ Quantity Adsorbed ($\text{cm}^3/\text{g STP}$).....	85
รูปที่ ๑-7 BET Isotherm พล็อตระหว่าง Pressure (mmHg) ที่เป็นฟังก์ชันกับ Quantity Adsorbed ($\text{cm}^3/\text{g STP}$).....	86
รูปที่ ๑-8 t-plot report พล็อตระหว่าง Relative Pressure (P/P_0) ที่เป็นฟังก์ชัน กับ Quantity Adsorbed ($\text{cm}^3/\text{g STP}$).....	86
รูปที่ ๑-9 t-plot report พล็อตระหว่าง Relative Pressure (P/P_0) ที่เป็นฟังก์ชัน กับ Statistical Thickness (nm).....	87
รูปที่ ๑-10 BJH Distribution report พล็อตระหว่าง Average pore diameter (nm) ที่เป็นฟังก์ชันกับ BJH $dA/d \log(D)$ pore area ($\text{m}^2/\text{g}\cdot\text{nm}$).....	87
รูปที่ ๑-11 BJH Distribution report พล็อตระหว่าง Average pore diameter (nm) ที่ เป็นฟังก์ชันกับ BJH dV/dD pore volume ($\text{m}^2/\text{g}\cdot\text{nm}$).....	88
รูปที่ ๑-12 Horvath-Kawazoe Differential Pore Volume report พล็อตระหว่าง Pore Width (nm) ที่เป็นฟังก์ชันกับ dV/dw ($\text{cm}^3/\text{g}\cdot\text{nm}$).....	88

รูปที่	หน้า
รูปที่ ข-13 Tabular Report พลั๊อตระหว่ง Average Pore Hydraulic Radius (nm) ที่เป็นฟังก์ชันกัับ Differential Pore Volume (cm ³ /g·nm).....	89
รูปที่ ข-14 Tabular Report พลั๊อตระหว่ง Average Pore Hydraulic Radius (nm) ที่เป็นฟังก์ชันกัับ Incremental Pore Area (m ² /g).....	89
รูปที่ ข-15 MP-Method dV/dw Pore Volume พลั๊อตระหว่ง Pore Hydraulic Radius (nm) ที่เป็นฟังก์ชันกัับ dV/dw Pore Volume (cm ³ /g·nm).....	90
รูปที่ ข-16 MP-Method dA/dw Pore Area พลั๊อตระหว่ง Pore Hydraulic Radius (nm) ที่เป็นฟังก์ชันกัับ dA/dw Pore Area (m ² /g·nm).....	90
รูปที่ ค-1 ln(%Conversion FFA), ซึ่เป็นฟังก์ชันกัับ 1/T(1/K) สำหรัับค่านวณค่า Ea ในปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของ 10% ของกรดโอเลอิกที่ละลายในน้ำมัน ปาล์ม.....	94
รูปที่ ค-2 %Conversion FFA ที่เป็นฟังก์ชันกัับเวลา (h) สำหรัับการค่านวณค่าอัตรา การเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน.....	95
รูปที่ ค-3 %the ester yield ที่เป็นฟังก์ชันกัับเวลา (h) สำหรัับการค่านวณค่าอัตราการ เอสเทอร์ของปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน.....	96