การแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ และ HZSM-5

นางสาวมารีนา มงคล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4551-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# CATALYTIC CRACKING OF USED VEGETABLE OIL TO LIQUID FUEL USING Fe/ACTIVE CARBON AND HZSM-5

Miss Marina Mongkol

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4551-6

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ และ HZSM-5 |
| โดย | นางสาวมารีนา มงคล |
| สาขาวิชา | เคมีเทคนิค |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | อาจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงษ์สถาบดี |

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงษ์สถาบดี)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สุชญา นิติวัฒนานนท์)

มารีนา มงคล : การแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ และ HZSM-5. (CATALYTIC CRACKING OF USED VEGETABLE OIL TO LIQUID FUEL USING Fe/ACTIVE CARBON AND HZSM-5) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ.ดร. สงบทิพย์ พงษ์สถาบดี, 101 หน้า. ISBN 974-17-4551-6.

งานวิจัยนี้มุ่งที่จะศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด โดยใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ 400-430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 45-60 นาที และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีตัวแปร คือ น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5-2.0 กรัม ภายใต้ความดันบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10-30 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 น้ำหนัก 0.05-0.2 กรัม ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10-20 บาร์ กรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา และน้ำหนักของเหล็กบนถ่านกัมมันต์เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (GC Simulated Distillation) พบว่าภาวะที่ส่งผลต่อการเกิดปริมาณแนฟทาสูงสุดคือ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม ได้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 79.74 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีปริมาณร้อยละผลได้ของแนฟทา 28.14 เคโรซีน 16.56 แก๊สออยล์เบา 21.86 แก๊สออยล์ 3.26 และกากน้ำมันหนัก 9.91 กรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาHZSM-5 อุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ โดยภาวะการทดลองที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และ HZSM-5 0.05 กรัม ได้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 83.60 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของแนฟทา 26.75 เคโรซีน 13.79 แก๊สออยล์เบา 22.99 แก๊สออยล์ 3.76 และกากน้ำมันหนัก 16.30 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาจากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดโดยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี (3000MicroGC) พบว่าประกอบด้วย ร้อยละผลได้โดยโมลของมีเทนอยู่ในช่วง 13-22 อีเทน 12-16 โพรเพน 6-8 บิวเทน 1-3 และคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึงร้อยละ 54-65

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต มารีนา มงคล

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2546 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

## 4572439323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: CATALYTIC CRACKING / HZSM-5

MARINA MONGKOL : CATALYTIC CRACKING OF USED VEGETABLE OIL TO LIQUID FUEL USING Fe/ACTIVE CARBON AND HZSM-5. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. THARAPONG VITIDSANT, THESIS CO-ADVISOR : Dr. SANGOBTIP PONGSATABADEE, 101 pp. ISBN: 974-17-4551-6.

The main objective of this research was aimed to study the catalytic cracking of used vegetable oil to liquid fuel by using Fe/active carbon and HZSM-5 in a micro reactor by varied operating condition as reaction temperature range of 400–430 $^{0}$C, reaction time 45–60 min mass of Fe/active carbon 0.5–2.0 g with initial hydrogen pressure 10–30 bars and mass of HZSM-5 0.05–0.2 g with initial hydrogen pressure 10–20 bars. The two level factorial experimental design was performed to investigate the effect of variables of oil yield. From the results, it was found that reaction temperature, reaction time and weight of Fe/active carbon catalyst were significantly affected to oil yield. The analyzed oil product from Gas Chromatography (GC Simulated Distillation) was found that reaction temperature of 430 $^{o}$C, initial hydrogen pressure 10 bars, reaction time 60 min by using 0.5 g Fe/active carbon was the best condition that gave the highest yields of naphtha. The oil yield was 79.74 % by weight, 28.14 % Naphtha, 16.56 % Kerosene, 21.86 % Light gas oil, 3.26 % Gas oil and 9.91 % Long residues. In case of using HZSM-5. From the results, it was found that reaction temperature and reaction time were significantly affected to oil yield. The analyzed oil product was found that reaction temperature of 430 $^{o}$C, initial hydrogen pressure 10 bars, reaction time 60 min by using 0.05 g HZSM-5 was the best condition. The oil yield was 83.60 % by weight, 26.75 % Naphtha, 13.79 % Kerosene, 22.99 % Light gas oil, 3.76 % Gas oil and 16.30 % Long residues. The component of gases product from Micro Gas Chromatography show the percentage by mole of 13-22 % Methane, 12-16 % Ethane, 6-8% Propane, 1-3 % Butane and 54-65 % Carbon dioxide.

| | | |
|---|---|---|
| Department | Chemical Technology | Student's signature Marina Mongkol |
| Field of study | Chemical Technology | Advisor's signature T. Vitidsant |
| Academic year | 2003 | Co-advisor's signature Sangobtip Pongsatabadee |

# กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อ.ดร.สงบทิพย์ พงษ์สถาบดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค

ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ และ อ.ดร.สุชญา นิติวัฒนานนท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความเห็น คำแนะนำ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านเงินทุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี รวมถึงทุนบัณฑิตวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ และให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เลี้ยงดูอบรมสั่งสอน ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบัญ.....ช

สารบัญตาราง.....ญ

สารบัญภาพ.....ฏ

บทที่

1 บทนำ.....1

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3

2.1 น้ำมันพืช.....3

2.1.1 กรดไขมัน.....4

2.2 ปฏิกิริยาคะตะไลซิส.....5

2.2.1.ปฏิกิริยาคะตะไลซิสแบบเอกพันธุ์.....5

2.2.2 ปฏิกิริยาคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธุ์.....5

2.2.3 ปฏิกิริยาคะตะไลซิสแบบเอมไซม์.....5

2.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....6

2.3.1.วิธีการตกตะกอน.....6

2.3.2 วิธีการฝังตัว.....6

2.4 ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา.....7

2.5 ถ่านกัมมันต์.....7

2.5.1 โครงสร้างของเคมีของผิวถ่านกัมมันต์.....7

2.5.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....8

2.5.3 ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์.....9

2.5.4 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์.....10

2.6 ซีโอไลต์.....10

2.6.1 ประวัติซีโอไลต์.....12

2.6.2 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง.....13

2.6.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์.....21

| บทที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| | 2.6.4 ประโยชน์ของซีโอไลต์ | 23 |
| | 2.7 การแตกตัวด้วยความร้อน | 23 |
| | 2.8 การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา | 24 |
| | 2.9 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม | 26 |
| | 2.10 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันดิบ | 27 |
| | 2.11 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 28 |
| 3 | เครื่องมือและวิธีการทดลอง | 32 |
| | 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ | 32 |
| | 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี | 35 |
| | 3.3 การดำเนินการวิจัย | 35 |
| | 3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย | 37 |
| 4 | ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง | 39 |
| | 4.1 การวิเคราะห์สมบัติสารตั้งต้น | 39 |
| | 4.2 ผลการทดลองจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ | 40 |
| | 4.2.1 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน | 40 |
| | 4.2.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมันตามจุดเดือด | 45 |
| | 4.2.3 การวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ | 58 |
| | 4.3 ผลการทดลองจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 | 61 |
| | 4.3.1 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน | 61 |
| | 4.3.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมันตามจุดเดือด | 65 |
| | 4.3.3 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊ส | 77 |
| | 4.4 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน | 80 |
| 5 | สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 81 |
| | 5.1 สรุปผลการทดลอง | 81 |

บทที่ หน้า

5.2 ข้อเสนอแนะ ..... 82

รายการอ้างอิง ..... 83

ภาคผนวก ..... 86

ภาคผนวก ก ..... 87

ภาคผนวก ข ..... 89

ภาคผนวก ค ..... 90

ภาคผนวก ง ..... 97

ภาคผนวก จ ..... 99

ภาคผนวก ฉ ..... 100

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 101

# สารบัญตาราง




ตารางที่ หน้า

2.1 องค์ประกอบโดยเฉลี่ยไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวของน้ำมันพืชหลักที่บริโภคในประเทศไทย ..... 3

3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ..... 36

3.2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ..... 36

4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันพืชใช้แล้ว ..... 39

4.2 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ..... 41

4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ..... 42

4.4 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ..... 62

4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ..... 63

4.6 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน ..... 80

ก1 ผลการทดลองจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ที่ภาวะการทดลองต่าง ๆ ..... 87

ก2 ผลการทดลองจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ภาวะการทดลองต่าง ๆ ..... 88

ข1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สที่ภาวะการทดลองต่าง ๆ จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ..... 89

ข2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สที่ภาวะการทดลองต่าง ๆ จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ..... 89

ค1 สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา ..... 91

ค2 ค่าสัมประสิทธิ์ของอิทธิพลต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน ..... 93

ค3 ภาวะของตัวแปร และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ..... 94

ตารางที่ หน้า

ค4 ผลการคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ..... 95
ค5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ..... 96
ฉ1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ..... 100

# สารบัญภาพ


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.1 | ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดบนผิวของถ่านกัมมันต์ | 9 |
| 2.2 | หมู่ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันที่เป็นด่างบนผิวของถ่านกัมมันต์ | 10 |
| 2.3 | การต่อหน่วยเททระฮีดรอนในโครงสร้างซีโอไลต์ | 10 |
| 2.4 | หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์ | 13 |
| 2.5 | หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ | 13 |
| 2.6 | หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าของซีโอไลต์ | 14 |
| 2.7 | ประจุในโครงสร้างตาข่ายซีโอไลต์ | 14 |
| 2.8a | การเร่งปฏิกิริยาโดยการคัดเลือกขนาดของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาในโพรงซีโอไลต์ | 15 |
| 2.8b | การคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาภายในโพรงซีโอไลต์ | 15 |
| 2.9 | แสดงลักษณะในโครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกัน | 17 |
| 2.10 | แสดงลักษณะสายโซ่ | 17 |
| 2.11 | แสดงลักษณะโครงสร้างของ Offretite และ Erionite | 18 |
| 2.12 | แสดงสายโซ่ทั้ง 3 แบบ คือ UUDD, UDUD และ UDUU | 18 |
| 2.13 | แสดงหน่วยทุติยภูมิ | 18 |
| 2.14 | แสดงลักษณะโครงสร้างตามแนวโปรเจคชันหลัก | 19 |
| 2.15 | แสดงลักษณะโครงสร้างของ ZSM-5 | 19 |
| 2.16 | แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของ ZK-5 | 20 |
| 2.17 | แสดงลักษณะโครงสร้างของ ZSM-39 | 20 |
| 2.18 | แสดงลักษณะโครงสร้างของ melanophlogite | 20 |
| 2.19 | แสดงลักษณะโครงสร้างของ Lovdarite | 21 |
| 3.1 | เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กขนาด 70 มิลลิลิตร (Microreactor) | 32 |
| 3.2 | ชุดทดลองประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตัล และเครื่องเขย่า | 33 |
| 3.3 | ชุดกรองสุญญากาศ และกระดาษกรองใยแก้ว | 33 |
| 3.4 | เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น | 34 |
| 3.5 | เครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟ | 35 |
| 4.1 | Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ | 42 |

รูปที่ หน้า

4.2 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ความดัน 10 บาร์ เวลา 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ .....43

4.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ความดัน 10 บาร์ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ .....44

4.4 ผลของน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ต่อร้อยละผลได้ ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ และเวลา 60 นาที.....45

4.5 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม .....47

4.6 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม .....47

4.7 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 2.0 กรัม .....48

4.8 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 2.0 กรัม .....48

4.9 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม .....49

4.10 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม .....49

4.11 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่ความดัน 10 บาร์ เวลาในการ ทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม.....51

4.12 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ความดัน 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม.....51

รูปที่ หน้า

4.13 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่ความดัน 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 2.0 กรัม.....52

4.14 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ความดัน 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 2.0 กรัม .....52

4.15 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม.....54

4.16 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อการกระจายตัวของสัดส่วน ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม.....54

4.17 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 2.0 กรัม.....55

4.18 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อการกระจายตัวของสัดส่วน ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 2.0 กรัม.....55

4.19 ผลของของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ต่อร้อยละผลได้ ผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที.....57

4.20 ผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ต่อการกระจายตัว ของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที .....57

4.21 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม.....59

4.22 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่ความดัน 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม.....60

รูปที่ หน้า

4.23 ผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ต่อการกระจายตัว ของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที .....60

4.24 Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....63

4.25 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ความดัน 10 บาร์ เวลา 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 .....64

4.26 ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ความดัน 10 บาร์ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 .....65

4.27 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ HZSM-5 0.05 กรัม .....67

4.28 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ HZSM-5 0.05 กรัม .....67

4.29 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ HZSM-5 0.2 กรัม .....68

4.30 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ HZSM-5 0.2 กรัม .....68

4.31 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่ความดัน 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.05 กรัม .....70

4.32 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ความดัน 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.05 กรัม .....70

4.33 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่ความดัน 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.2 กรัม .....71

4.34 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ความดัน 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.2 กรัม .....71

รูปที่ หน้า

4.35 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.05 กรัม ....73

4.36 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.05 กรัม ....73

4.37 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.2 กรัม ....74

4.38 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.2 กรัม ....74

4.39 ผลของของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ....76

4.40 ผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ....76

4.41 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.5 กรัม ....78

4.42 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่ความดัน 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.5 กรัม ....79

4.43 ผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ....79

ค1 Normal Probability Plot ของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ....96

รูปที่ หน้า

ง1 ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามคาบจุดเดือดขององค์ประกอบ
ผลิตภัณฑ์น้ำมันจาก Simulated Distillation Gas Chromatography .....98