

เชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันมะพร้าวโดยการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาบน HZSM-5



นางสาวปิยนุช ธนวรานิซ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIQUID FUEL FROM COCONUT OIL BY CATALYTIC CRACKING OVER HZSM-5



Miss Piyanuch Thanavaranitich

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

เชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันมะพร้าวโดยการแตกตัวเชิงเร่ง  
ปฏิกิริยาบน HZSM-5

โดย

นางสาวปิยนุช ธนวรรณิช


สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

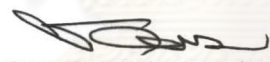
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรศานต์

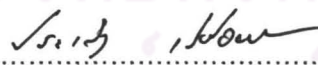
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

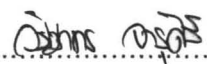
  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรศานต์)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร.วิชากร จารุศิริ)

ปิยบุษ ธนวรานิช : เชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันมะพร้าวโดยการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาบน HZSM-5. (LIQUID FUEL FROM COCONUT OIL BY CATALYTIC CRACKING OVER HZSM-5) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์, 112 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันมะพร้าวโดยใช้ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด ออกแบบการทดลองเป็นแบบ  $2^k$  แฟกทอเรียล ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิ 360-410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.05-0.5 โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-3 บาร์ การคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 พบว่าภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมากที่สุด 69.58 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส 21.87 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง 8.55 โดยน้ำหนัก เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาวิเคราะห์หาการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น พบว่ามีปริมาณ แนฟทา เครโซลีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์ และกากน้ำมันหนัก ร้อยละ 21.93 11.49 27.07 2.54 6.56 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และมีค่าร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนัก 91.83 โดยน้ำหนัก เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันคล้ายกันกับในน้ำมันแก๊โซลีน ออกเทน 91

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต..... ปิยบุษ ชหวนไพธ.....  
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา .....2553.....

## 5172602123 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORDS : CATALYTIC CRACKING / COCONUT OIL / HZSM-5

PIYANUCH THANAVARANITCH: LIQUID FUEL FROM COCONUT OIL BY  
 CATALYTIC CRACKING OVER HZSM-5. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.  
 THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., 112 pp.

The aimed of this research was to study the catalytic cracking of coconut oil to liquid fuel over HZSM-5 in a small-reactor and to study the effects of parameters on liquid oil yield and product components by using  $2^k$  factorial of experimental design methodology. The studied parameters were temperature range of 360-410 °C, residence time 30-60 min, amounts of HZSM-5 0.05-0.5 % by weight and initial hydrogen pressure 1-3 bar. The calculation from Design-Expert 6.0.10 program, the optimum condition was found that the temperature 391.10 °C, residence time 30 min, amount of HZSM-5 0.5 % by weight and initial hydrogen pressure 1 bar were obtained for the maximum yield of liquid fuels 69.58 % by weight, 21.87 % by weight of gas yield and 8.55 % by weight of solid yield. Liquid products were analyzed by simulated distillation gas chromatograph. The products distribution were composed of naphtha, kerosene, light gas oil, gas oil and long residue 21.93, 11.49, 27.07, 2.54, 6.56 % by weight respectively and the conversion of long residue was 91.83 % by weight. The produced oil was analyzed by fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) which shown the structure similar to gasoline octane 91.

Department : ..Chemical Technology..... Student's Signature : ..*Piyanuch Thanavararitch*..  
 Field of Study : ..Chemical Technology....Advisor's Signature : ..*T. Vitidsant*.....  
 Academic Year : ..2010.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำการทำวิจัย ตลอดจนคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยมาตลอด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และอาจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณการสนับสนุนด้านเงินทุนจากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียมปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ หจก. กาญจนไกรพาณิชย์ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ที่เอื้อเฟื้อน้ำมันมะพร้าวสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและกรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ และขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                  | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                               | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                  | ฉ    |
| สารบัญ.....   | ช    |
| สารบัญตาราง.....                                      | ฎ    |
| สารบัญรูป.....  | ฐ    |
| บทที่   |      |
| 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....               | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                      | 2    |
| 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                    | 2    |
| 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....                           | 2    |
| 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                  | 3    |
| 2.1 น้ำมันพืช.....                                    | 3    |
| 2.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันพืช.....                     | 3    |
| 2.1.2 พืชน้ำมัน.....                                  | 5    |
| 2.2 มะพร้าว.....                                      | 6    |
| 2.2.1 ประเภทของน้ำมันมะพร้าว.....                     | 7    |
| 2.2.2 องค์ประกอบของน้ำมันมะพร้าว.....                 | 8    |
| 2.3 ซีโอไลต์.....                                     | 8    |
| 2.3.1 ประวัติซีโอไลต์.....                            | 10   |
| 2.3.2 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง..... | 11   |
| 2.3.3 ประโยชน์ของซีโอไลต์.....                        | 20   |
| 2.3.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....                         | 20   |
| 2.3.3.2 ตัวแลกเปลี่ยนประจุ.....                       | 21   |
| 2.3.3.3 ตัวดูดซับ.....                                | 21   |
| 2.3.4 ซีโอไลต์ ZSM-5.....                             | 22   |
| 2.4 กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน.....                  | 23   |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.5   | การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....  | 25 |
| 2.6   | การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม.....  | 27 |
| 2.7   | การวิเคราะห์หาคุณภาพของน้ำมัน.....  | 28 |
| 2.8   | งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 29 |
| 3     | เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....  | 34 |
| 3.1   | เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....   | 34 |
| 3.2   | สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้.....   | 38 |
| 3.3   | การดำเนินงานวิจัย.....  | 39 |
| 3.4   | ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....   | 40 |
| 4     | ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....   | 43 |
| 4.1   | การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น.....  | 43 |
| 4.2   | การออกแบบการทดลองแบบ 2 <sup>k</sup> แฟกทอเรียล.....   | 46 |
| 4.3   | การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน<br>จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด<br>HZSM-5..... | 47 |
| 4.3.1 | ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....   | 52 |
| 4.3.2 | ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....   | 53 |
| 4.4   | การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อร้อยละผลได้ของแอฟทาจาก<br>ปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5.....              | 54 |
| 4.4.1 | ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของแอฟทา.....  | 59 |
| 4.4.2 | ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแอฟทา.....  | 59 |
| 4.4.3 | ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา<br>ต่อร้อยละผลได้ของแอฟทา.....   | 60 |
| 4.5   | การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อร้อยละผลได้ของดีเซลจากปฏิกิริยา<br>การแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5.....              | 61 |
| 4.5.1 | ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของดีเซล.....  | 64 |
| 4.5.2 | ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซล.....  | 65 |
| 4.5.3 | ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา<br>ต่อร้อยละผลได้ของดีเซล.....   | 66 |



|  |     |
|--|-----|
| 4.6 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนจากน้ำมันหนัก จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5..... | 67  |
| 4.6.1 ผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนจากน้ำมันหนัก.....  | 72  |
| 4.6.2 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนจากน้ำมันหนัก.....  | 73  |
| 4.7 การหาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 .....  | 74  |
| 4.7.1 การเปรียบเทียบผลการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %Fe/Ac .....                                    | 76  |
| 4.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....  | 79  |
| 4.8.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....  | 79  |
| 4.8.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....  | 81  |
| 4.8.3 การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....   | 84  |
| 4.9 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส.....  | 85  |
| 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....   | 86  |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง.....  | 86  |
| 5.2 ข้อเสนอแนะข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในระดับต่อไป.....  | 88  |
| รายการอ้างอิง.....   | 89  |
| ภาคผนวก.....   | 93  |
| ภาคผนวก ก .....  | 94  |
| ภาคผนวก ข .....  | 98  |
| ภาคผนวก ค .....  | 105 |
| ภาคผนวก ง .....  | 106 |
| ภาคผนวก จ.....   | 107 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....  | 112 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|------|
| 2.1      | 4    |
| 2.2      | 6    |
| 3.1      | 40   |
| 4.1      | 44   |
| 4.2      | 45   |
| 4.3      | 46   |
| 4.4      | 48   |
| 4.5      | 50   |
| 4.6      | 55   |
| 4.7      | 57   |
| 4.8      | 62   |
| 4.9      | 68   |
| 4.10     | 70   |
| 4.11     | 75   |
| 4.12     | 76   |
| 4.13     | 76   |
| 4.14     | 81   |
| 4.15     | 83   |
| 4.16     | 84   |
| 4.17     | 85   |

| ตารางที่ |   | ๘<br>หน้า |
|----------|---|-----------|
| ก1       | ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ.....  | 94        |
| ก2       | ผลการทดลองเปรียบเทียบผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ที่สภาวะที่เหมาะสม.....                                      | 97        |
| ข1       | สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา.....  | 98        |
| ข2       | ผลการคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....                          | 101       |
| ข3       | ผลการคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละผลได้ของเนฟทา.....                                 | 102       |
| ข4       | ผลการคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละผลได้ของดีเซล.....                                 | 103       |
| ข5       | ผลการคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนัก.....                       | 104       |
| ง2       | ธาตุองค์ประกอบบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5.....  | 106       |
| จ1       | ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass spectrometry)..... | 108       |
| จ2       | ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography).....                          | 110       |

## สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|------|
| 2.1    | 4    |
| 2.2    | 9    |
| 2.3    | 11   |
| 2.4    | 11   |
| 2.5    | 12   |
| 2.6    | 12   |
| 2.7    | 13   |
| 2.8    | 14   |
| 2.9    | 14   |
| 2.10   | 15   |
| 2.11   | 16   |
| 2.12   | 16   |
| 2.13   | 17   |
| 2.14   | 18   |
| 2.15   | 19   |
| 2.16   | 19   |
| 2.17   | 22   |
| 2.18   | 22   |
| 2.19   | 23   |
| 3.1    | 34   |
| 3.2    | 35   |
| 3.3    | 35   |

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น.....  | 36   |
| 3.5 เครื่องวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวรูพรุน.....   | 37   |
| 3.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี.....   | 37   |
| 3.7 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์.....  | 38   |
| 3.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....   | 38   |
| 3.9 น้ำมันมะพร้าว.....   | 39   |
| 4.1 โครมาโทแกรมขององค์ประกอบต่าง ๆ ของน้ำมันมะพร้าว.....   | 45   |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์ห่าปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....   | 47   |
| 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal % Probability กับส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....   | 51   |
| 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....   | 51   |
| 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 360 ถึง 410 องศาเซลเซียส.....  | 52   |
| 4.6 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 ถึง 60 นาที.....                        | 53   |
| 4.7 ผลการวิเคราะห์ห่าปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา.....  | 54   |
| 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal % Probability กับส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ของแนฟทา.....  | 58   |
| 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของร้อยละผลได้ของแนฟทา.....  | 58   |
| 4.10 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่อุณหภูมิ 360 ถึง 410 องศาเซลเซียส.....  | 59   |
| 4.11 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 ถึง 60 นาที.....                              | 60   |
| 4.12 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิ 360 ถึง 410 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 ถึง 60 นาที ต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา..... | 61   |
| 4.13 ผลการวิเคราะห์ห่าปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซล.....   | 62   |
| 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal % Probability กับส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ของดีเซล.....   | 63   |
| 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของร้อยละผลได้ของดีเซล....  | 64   |
| 4.16 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่อุณหภูมิ 360 ถึง 410 องศาเซลเซียส.....  | 65   |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| รูปที่ |  |    |
| 4.17   | ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 ถึง 60 นาที.....   | 66 |
| 4.18   | ผลของอินตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิ 360 ถึง 410 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 ถึง 60 นาที ต่อร้อยละผลได้ของดีเซล.....  | 67 |
| 4.19   | ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนกาน้ำมันหนัก.....  | 68 |
| 4.20   | ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal % Probability กับส่วนตกค้างของร้อยละการเปลี่ยนกาน้ำมันหนัก.....   | 71 |
| 4.21   | ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของร้อยละการเปลี่ยนกาน้ำมันหนัก.....   | 72 |
| 4.22   | ผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนกาน้ำมันหนักที่อุณหภูมิ 360 ถึง 410 องศาเซลเซียส.....   | 73 |
| 4.23   | ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนกาน้ำมันหนักที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 ถึง 60 นาที.....   | 74 |
| 4.24   | ผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์.....  | 77 |
| 4.25   | ผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์..... | 79 |
| 4.26   | FT-IR สเปกตรัมจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์.....           | 80 |
| 4.27   | FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันแก๊สไลน์ ออกเทน 91.....   | 81 |
| 4.28   | โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์.....              | 83 |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีความต้องการใช้น้ำมันปิโตรเลียมสูงและปริมาณน้ำมันสำรองของโลกได้ลดลง ทำให้ราคาน้ำมันส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นอย่างมาก ในขณะที่ประเทศไทยจึงต้องพึ่งพาแหล่งพลังงานจากต่างประเทศในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะการนำเข้าน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซลเพื่อใช้ในภาคคมนาคมและขนส่ง จึงได้พยายามที่จะพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อนำพลังงานรูปแบบอื่นมาทดแทนปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในอนาคต หรือในภาวะที่น้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาสูงมาก ในปัจจุบันพบว่าวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันได้เกิดขึ้นทั่วโลก ทำให้การหาพลังงานทดแทนอื่นมาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิงจากฟอสซิลจึงเป็นเรื่องที่จำเป็น เช่นการนำน้ำมันพืชมาแปรรูปให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับคามนิยมอยู่ในขณะนี้

น้ำมันพืชเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) มีโครงสร้างเป็น  $-C_3H_5$  เชื่อมต่อกับกรดไขมัน ที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 10 ถึง 30 ตัว ในน้ำมันพืชมีกรดไขมันหลากหลายชนิดเป็นองค์ประกอบ โดยมีปริมาณของกรดไขมันอยู่ในโครงสร้างถึงร้อยละ 94-96 ของน้ำหนักโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ ทำให้สมบัติของน้ำมันแต่ละชนิด (ทั้งทางเคมีและกายภาพ) แตกต่างกันไปตามสมบัติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ พืชน้ำมันที่นิยมปลูกในปัจจุบันได้แก่ มะพร้าว ถั่วเหลือง ฝ้าย ถั่วลิสง ทานตะวัน สนุ่นดำ และปาล์มน้ำมัน ซึ่งมะพร้าวสามารถปลูกได้ทุกภาคของประเทศไทย แต่ปัจจุบันการแปรรูปน้ำมันมะพร้าวยังไม่ค่อยกว้างขวาง อีกทั้งการใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นพลังงานทางเลือกยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร ทำให้เกษตรกรปลูกแล้วไม่คุ้มกับต้นทุน ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันมะพร้าวจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจที่สามารถเพิ่มมูลค่าได้ในเชิงเศรษฐกิจ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาจากน้ำมันมะพร้าวเพื่อให้ได้ร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวมากที่สุด โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ประเภทกรด เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้อย่างหลากหลายในอุตสาหกรรมโดยเฉพาะในปิโตรเลียมและปิโตรเคมี ซึ่งมีส่วนช่วยในการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุล

ไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่ยาวให้มีขนาดเล็ก และจัดโครงสร้างเหมาะสมมีสมบัติของโมเลกุล ไฮโดรคาร์บอนใกล้เคียงน้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นต้นแบบสำหรับการ ขยายส่วนการผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำ ปฏิกริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยา และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าว ผ่านกระบวนการแตกตัวเชิงเร่ง ปฏิกริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก เพื่อให้ร้อยละเชื้อเพลิงเหลวมากที่สุด

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกริยาของน้ำมันมะพร้าวให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว
2. ได้เชื้อเพลิงเหลวที่มีสมบัติใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปิโตรเลียม

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมวัตถุดิบ สารเคมีและเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ใช้ในงานวิจัย
3. วิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันมะพร้าวก่อนทำการทดลอง
4. วิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกริยาด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว
5. ออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ร้อยละเชื้อเพลิงเหลวที่มากที่สุด โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยา และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น
6. วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลอง การกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatograph)
7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์



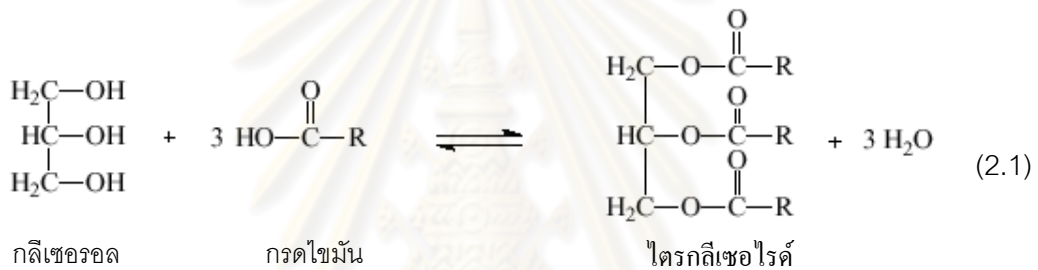
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำมันพืช [1, 2]

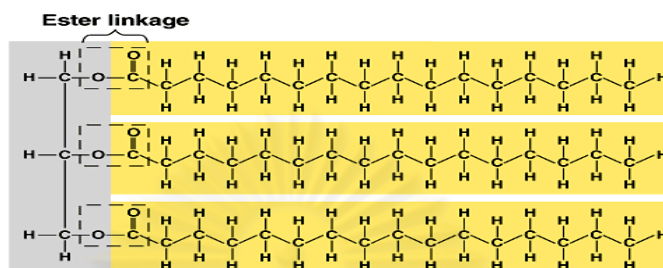
##### 2.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันพืช

น้ำมันพืชเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอลกับกรดไขมันแสดงดังสมการที่ 2.1



โมเลกุลของกลีเซอรอลมีตำแหน่งที่กรดไขมันจะเข้าทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันได้ 3 ตำแหน่ง ทำให้สามารถได้ไตรกลีเซอไรด์หลายชนิดแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ที่ประกอบด้วยกรดไขมันชนิดเดียวกันทั้ง 3 ตำแหน่งเรียกว่า ไตรกลีเซอไรด์ชนิดเดียว (Simple triglycerides) และโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ที่ประกอบด้วยกรดไขมันต่างชนิดกันเรียกว่า ไตรกลีเซอไรด์ชนิดผสม (Mixed triglycerides) ไตรกลีเซอไรด์ชนิดเดียวพบได้น้อยมากในธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะเป็นไตรกลีเซอไรด์ชนิดผสม โดยสามารถจำแนกชนิดของกรดไขมันได้เป็น 2 ชนิด คือ กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวและกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวจะมีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนอะตอม 1 แห่ง เรียกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว 1 พันธะ (Monounsaturated fatty acid) หากมีมากกว่า 1 แห่งเรียกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายพันธะ (Polyunsaturated fatty acid) กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่พบมากในธรรมชาติคือ กรดปาล์มิติก (C16:0) ซึ่งสามารถพบได้ในไขมันและน้ำมันเกือบทุกชนิด ส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่พบมากคือ กรดโอเลอิก (C18:1) ซึ่งไขมันและน้ำมันแต่ละชนิดจะมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพแตกต่างกันตามสมบัติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ เช่น น้ำมันมะพร้าวมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวโมเลกุลสายสั้นจำนวนมาก และมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวจำนวนน้อย จึงมีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้มีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ส่วนไขวัวมีกรดไขมันชนิด

อิมัลชันโมเลกุลสายยาวจำนวนมากเป็นองค์ประกอบ จึงมีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูง ปริมาณสัดส่วนของกรดไขมันทั้งสองชนิดที่แตกต่างกันทำให้สมบัติของน้ำมันพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ [3]

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันพืชและไขมันสัตว์บางชนิด [4]

| Oil or Fat               | Fatty Acid Composition (% wt.) |         |          |         |           |           |        |       |
|--------------------------|--------------------------------|---------|----------|---------|-----------|-----------|--------|-------|
|                          | 12:0                           | 14:0    | 16:0     | 18:0    | 18:1      | 18:2      | 18:3   | 22:1  |
| Babassu                  | 44-45                          | 15-17   | 5.8-9    | 2.5-5.5 | 12-16     | 1.4-3     |        |       |
| Canola                   |                                |         | 4-5      | 1-2     | 55-63     | 20-31     | 9-10   | 1-2   |
| Coconut                  | 44-51                          | 13-18.5 | 7.5-10.5 | 1-3     | 5-8.2     | 1.0-2.6   |        |       |
| Corn                     |                                |         | 7-13     | 2.5-3   | 30.5-43   | 39-52     | 1      |       |
| Cottonseed               |                                | 0.8-1.5 | 22-24    | 2.6-5   | 19        | 50-52.5   |        |       |
| Linseed                  |                                |         | 6        | 3.2-4   | 13-37     | 5-23      | 26-60  |       |
| Olive                    |                                | 1.3     | 7-18.3   | 1.4-3.3 | 55.5-84.5 | 4-19      |        |       |
| Palm                     |                                | 0.6-2.4 | 32-46.3  | 4-6.3   | 37-53     | 6-12      |        |       |
| Peanut                   |                                | 0.5     | 6-12.5   | 2.5-6   | 37-61     | 13-41     |        | 1     |
| Rapeseed                 |                                | 1.5     | 1-4.7    | 1-3.5   | 13-38     | 9.5-22    | 1-10   | 40-64 |
| Safflower                |                                |         | 6.4-7.0  | 2.4-29  | 9.7-13.8  | 75.3-80.5 |        |       |
| Safflower,<br>High-oleic |                                |         | 4-8      | 2.3-8   | 73.6-79   | 11-19     |        |       |
| Sesame                   |                                |         | 7.2-9.2  | 5.8-7.7 | 35-46     | 35-48     |        |       |
| Soybean                  |                                |         | 2.3-11   | 2.4-6   | 22-30.8   | 49-53     | 2-10.5 |       |
| Sunflower                |                                |         | 3.5-6.5  | 1.3-5.6 | 14-43     | 44-68.7   |        |       |
| Tallow (beef)            |                                | 3.6     | 25-37    | 14-29   | 26-50     | 1-2.5     |        |       |

### 2.1.2 พืชน้ำมัน [5]

พืชบางชนิดมีส่วนที่สะสมน้ำมันหรือไขมัน เช่น มะพร้าว ปาล์มน้ำมัน มะกอก และถั่ว เมล็ดแห้งบางชนิด โดยสามารถแบ่งพืชน้ำมันออกเป็น 2 กลุ่มตามลักษณะการดำรงชีวิต คือ กลุ่มพืชล้มลุก เช่น ทานตะวัน ดอกคำฝอย ถั่วเหลือง ถั่วลิสง และกลุ่มพืชยืนต้น เช่น มะพร้าว ปาล์มน้ำมัน โกโก้ นอกจากนี้ยังสามารถสกัดน้ำมันจากรำข้าว ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว เมล็ดนุ่น เมล็ดฝ้าย และสามารถแบ่งกลุ่มของพืชน้ำมันชนิดต่าง ๆ ตามประเภทของกรดไขมันที่มีอยู่เป็นส่วนใหญ่ได้ดังนี้คือ

- น้ำมันที่มีกรดลอริก (Lauric acid) เช่น น้ำมันจากเนื้อในเมล็ดปาล์ม (Palm kernel) และน้ำมันมะพร้าว น้ำมันในกลุ่มนี้มีกรดลอริก ซึ่งเป็นกรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acids) ปริมาณค่อนข้างมาก และมีกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Polyunsaturated fatty acids, PUFA) ปริมาณน้อย

- น้ำมันที่คล้ายเนย (Vegetable butter) ได้จากเมล็ดของพืชยืนต้น เช่น โกโก้ ซึ่งเป็นไขมันที่มีช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลวแคบ มีกรดไขมันอิ่มตัวมากกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว

- น้ำมันที่มีกรดโอเลอิก (Oleic acid) มาก เช่น น้ำมันมะกอก (Olive) น้ำมันคาโนลา (canola) น้ำมันข้าวโพด น้ำมันเมล็ดฝ้าย น้ำมันเมล็ดดอกคำฝอย และน้ำมันจากผลปาล์ม (Palm mesocarp) ที่ผ่านกระบวนการแยกส่วน (Fractionation) ให้มีสัดส่วนของไขมันที่มีกรดโอเลอิกมากขึ้น ซึ่งเรียกน้ำมันปาล์มโอลีอีน นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเนื่องจากไม่มีกลิ่นเฉพาะตัวของน้ำมันเหมือนกับน้ำมันจากพืชอื่น

- น้ำมันที่มีกรดลิโนเลอิก (Linoleic acid) มาก ได้แก่ น้ำมันจากข้าวโพด เมล็ดฝ้าย เมล็ดดอกคำฝอย เป็นต้น

- น้ำมันที่มีกรดลิโนเลอิก (Linoleic acid) และกรดแอลฟาไลโนเลนิก (Alpha-linolenic acid) มาก ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งมีกรดไขมันจำเป็น (Essential fatty acids) ในสัดส่วนสูง น้ำมันถั่วเหลืองนิยมใช้สำหรับการปรุงอาหารในครัวเรือน

ในประเทศไทยทำการเพาะปลูกพืชน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจ 8 ชนิด คือ ถั่วเหลือง ปาล์ม-น้ำมัน ถั่วลิสง มะพร้าว ทานตะวัน ละหุ่ง สบู่ดำ และงา ตามรายงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ในพืชน้ำมัน 8 ชนิดนี้ ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีรายงานปริมาณผลผลิตในแต่ปีสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ น้ำมันมะพร้าว แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการผลิตพืชน้ำมันของประเทศ (พันตัน) [6]

| ปี พ.ศ. | ปาล์มน้ำมัน | มะพร้าว | ถั่วเหลือง | ถั่วลิสง | ทานตะวัน | ละหุ่ง | งา |
|---------|-------------|---------|------------|----------|----------|--------|----|
| 2540    | 2,578       | 1,864   | 338        | 126      | -        | 6      | 35 |
| 2541    | 2,523       | 1,853   | 321        | 135      | -        | 7      | 36 |
| 2542    | 3,413       | 1,986   | 319        | 138      | -        | 7      | 37 |
| 2543    | 3,343       | 1,795   | 312        | 132      | 51       | 9      | 39 |
| 2544    | 4,097       | 1,935   | 261        | 107      | 32       | 9      | 39 |
| 2545    | 4,001       | 2,037   | 260        | 112      | 29       | 10     | 40 |
| 2546    | 4,903       | 2,117   | 231        | 76       | 32       | 10     | 40 |
| 2547    | 5,182       | 2,126   | 318        | 65       | 49       | 10     | 41 |
| 2548    | 5,003       | 1,940   | 226        | 67       | 38       | 10     | 42 |
| 2549    | 6,715       | 1,815   | 215        | 65       | 24       | 10     | 41 |
| 2550    | 6,389       | 1,721   | 204        | 53       | 23       | 10     | 43 |
| 2551    | 9,270       | 1,483   | 186        | 53       | 19       | 11     | 44 |
| 2552    | 8,162       | 1,380   | 187        | 49       | 22       | 11     | 46 |
| 2553    | 9,229       | 1,180   | 191        | 49       | 23       | 12     | 47 |

## 2.2 มะพร้าว [7, 8]

มะพร้าวเป็นพืชยืนต้น ใบเลี้ยงเดี่ยวในตระกูลปาล์มชนิดหนึ่ง มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Cocos nucifera L.* มีถิ่นอยู่มากมายในบริเวณเขตร้อน และกระจายอยู่ทั่วไปในบริเวณทวีปเอเชีย แปซิฟิก ริมชายฝั่งทะเลที่มีน้ำทะเลเข้าถึงและมีปริมาณน้ำฝนมากพอ การใช้ประโยชน์ของมะพร้าวสามารถกล่าวได้ว่าเกือบทุกส่วนของต้นมะพร้าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งสิ้น เช่น

- ไม้มะพร้าว นำมาใช้ในการก่อสร้างบ้านเรือน เช่น เป็นไม้ปูพื้นจำพวกไม้ปาร์เก้ ไม้ฝาบ้าน รั้ว โครงหลังคา วงกบประตูและหน้าต่าง เป็นต้น
- กาบและเส้นใยมะพร้าว นำมาใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น เชือก พรมเช็ดเท้า พรมปูพื้น เยื่อกระดาษ เป็นต้น
- เนื้อมะพร้าว ใช้ทำเป็นแป้งมะพร้าวสำหรับป้อนโรงงานผลิตอาหาร เช่น โรงงานขนมปัง โรงงานไอศกรีม เป็นต้น

- น้ำมันมะพร้าว ได้มาจากการหีบเนื้อมะพร้าว สามารถนำไปทำเป็นน้ำมันสำหรับบริโภค นอกจากนี้ยังนำมาทำเป็นส่วนผสมทำเนยเทียม นมข้น เป็นต้น รวมทั้งการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ เช่น สบู่ ผงซักฟอก เครื่องสำอาง ใช้ทำเป็นเชื้อเพลิงเดินเครื่องยนต์ เป็นต้น

- กากมะพร้าว นิยมนำมาใช้ทำเป็นอาหารสัตว์
- กะลามะพร้าว สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงและผลิตเป็นตัวดูดซับชนิดถ่าน

### 2.2.1 ประเภทของน้ำมันมะพร้าว

น้ำมันมะพร้าวแบ่งได้เป็น 2 ชนิดหลัก ๆ ตามกระบวนการผลิตได้แก่ น้ำมันมะพร้าวสกัดร้อน และน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น ดังนี้

1. น้ำมันมะพร้าวสกัดร้อน หรือเรียกว่าน้ำมันมะพร้าวทั่วไป (RBD Coconut Oil) เป็นน้ำมันมะพร้าวที่ผลิตจากเนื้อมะพร้าวแห้ง (Copra) น้ำมันที่สกัดได้จะผ่านขบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Refined) การฟอกสี (Bleached) และการกำจัดกลิ่น (Deodorized) ก่อนที่จะนำไปบริโภค น้ำมันมะพร้าวชนิดนี้บางครั้งจะถูกกล่าวว่าเป็น “น้ำมันมะพร้าวธรรมชาติ” (Natural Coconut Oil น้ำมันมะพร้าวชนิด RBD (Refined, Bleached, Deodorized) จะมีความหนืดและมีสีเหลืองอ่อนขึ้นตอนการผลิตเริ่มจาก นำเนื้อมะพร้าวทำให้แห้งโดยการตาก เพื่อให้น้ำในเนื้อมะพร้าวลดลงจากประมาณร้อยละ 50 เหลือร้อยละ 3.5 จากนั้นเนื้อมะพร้าวแห้งจะถูกบดและนำไปผสมกับน้ำเดือด ก่อนที่จะนำไปผ่านเครื่องนวด เพื่อกันน้ำมันออกมาให้ได้มากที่สุด หลังจากแยกกากออกส่วนผสมที่ได้จะถูกเคียวซ้ำ ๆ ด้วยความร้อนต่ำเพื่อให้น้ำระเหยออกไป น้ำมันที่ได้จะผ่านการกรองและนำไปต้มเป็นเวลาหลายชั่วโมงเพื่อขจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์

2. น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็น หรือเรียกว่าน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ (Virgin Coconut Oil) มีขบวนการผลิตที่พิถีพิถันมากกว่าเรียกว่า Cold Process เพราะไม่มีการใช้ความร้อนทำให้ได้น้ำมันที่มีคุณภาพพิเศษ มีกลิ่นหอม รสชาติดี อุดมด้วยวิตามินอี และสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (Anti-Oxidant) ซึ่งมีประโยชน์ต่อสุขภาพ โดยขั้นตอนการผลิตจะทำการคัดมะพร้าวคุณภาพดี นำเนื้อมะพร้าวสดไป “ขูด” หรือ “บด” โดยใช้เครื่องขูด/บดมะพร้าวจากนั้นเนื้อมะพร้าวที่ขูดแล้วจะถูกนำไปใส่ถุงตาข่ายพิเศษ และคั้นน้ำกะทิออกด้วยมือหรือเครื่องอัดแบบใช้มือ (Manual Press) น้ำกะทิที่ได้จะถูกนำไปผสมกับน้ำมะพร้าวและปล่อยให้ทิ้งไว้ให้แยกตัว (Culturing) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 20 ชั่วโมง ส่วนผสมจะแยกตัวออกเป็น 3 ชั้น ชั้นบนจะเป็นส่วนของโปรตีน ชั้นกลางจะเป็นน้ำมันมะพร้าว และชั้นล่างสุดจะเป็นน้ำ น้ำมันที่ได้จะถูกแยกออกมารองและแยกส่วนน้ำทิ้งไป แล้วปล่อยให้ทิ้งไว้ให้แยกตัว (Resting) ขบวนการที่ปล่อยให้ทิ้งไว้ให้แยกตัว (Resting) ตามด้วยการ

แยกตัวและแยกน้ำออก (Decanting) และกรอง (Filtering) เรียกว่า “Curing” หรือ การบ่ม น้ำมัน ที่ได้จะเป็นน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์

## 2.2.2 องค์ประกอบของน้ำมันมะพร้าว

องค์ประกอบที่สำคัญในน้ำมันมะพร้าวมี ดังนี้

### 1. กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acids)

น้ำมันมะพร้าวประกอบด้วยกรดไขมันชนิดอิ่มตัวกว่าร้อยละ 90 โดยกรดไขมันชนิดอิ่มตัว ในน้ำมันมะพร้าวส่วนใหญ่จะมีจำนวนอะตอมของคาร์บอน 8 – 14 ตัว ซึ่งกรดไขมันที่สำคัญได้แก่ กรดคาปริก (Capric acid –  $C_{10}$ ) กรดลอริก (Lauric acid –  $C_{12}$ ) และกรดไมริสติก (Myristic acid –  $C_{14}$ ) เป็นโมเลกุลที่มีความยาวขนาดปานกลาง

นอกจากนี้ น้ำมันมะพร้าวประกอบด้วยกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) ประมาณร้อยละ 9 สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (Monounsaturated fatty acid) คือ กรดไขมันที่มีพันธะคู่ (Double bond) เพียงหนึ่งคู่

กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (Polyunsaturated fatty acid) คือ กรดไขมันที่มีพันธะคู่ มากกว่า 1 คู่ ส่วนใหญ่กรดไขมันไม่อิ่มตัวจะมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนมาก จึงทำให้โมเลกุลมีความยาวมาก เช่น กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid –  $C_{18}$ )

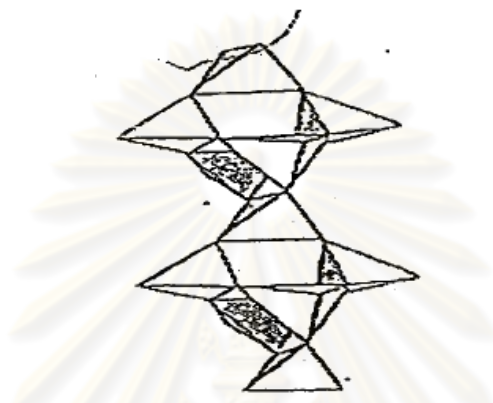
### 2. กรดลอริก (Lauric acid)

น้ำมันมะพร้าวเป็นน้ำมันจากพืชที่มีกรดลอริกอยู่ในปริมาณที่สูงมากประมาณร้อยละ 48 – 53 และกรดลอริกทำให้น้ำมันมะพร้าวมีคุณสมบัติพิเศษในการเสริมสุขภาพและความงาม แต่ในน้ำมันมะพร้าวยังมีกรดคาปริก (Capric acid) ซึ่งแม้ว่าจะมีน้อยกว่ากรด ลอริก คือ มีเพียง ร้อยละ 6-7 แต่ก็ช่วยในการเสริมประสิทธิภาพของกรดลอริก

## 2.3 ซีโอไลต์ (Zeolite) [9, 10, 11]

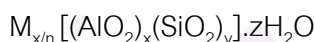
ซีโอไลต์ มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก zein แปลว่า to boil และ lithos แปลว่า stone รวม ความหมายก็คือ boiling stone หรือหินเดือด เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนแก่ซีโอไลต์ธรรมชาติแล้ว สามารถเห็นการระเหยของน้ำได้ชัดเจน ซีโอไลต์เป็นสารที่มีความเป็นผลึกมีรูพรุนขนาดเล็กเป็น ระเบียบ เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตของธาตุแอลคาไล หรือแอลคาไลน์เอิร์ธ โดยธาตุที่พบ มากได้แก่ โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สตรอนเชียม (Sr) และแบเรียม (Ba) ซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นตาข่าย (Framework structure) 3 มิติ มีรูปร่างและขนาด

โพรงแตกต่างกันตามชนิดของซีโอไลต์ โครงสร้างดังกล่าวเกิดจากการต่อกันของโครงสร้างเทระอีตรอนของซิลิกอนเทระออกไซด์ ( $\text{SiO}_4$ )<sup>4-</sup> และอะลูมิเนียมเทระออกไซด์ ( $\text{AlO}_4$ )<sup>5-</sup> โดยใช้ ออกซิเจนร่วมกัน ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแต่ละหน่วยแทนหน่วยเทระอีตรอน เส้นที่เชื่อมจุดตัดไม่ใช่พันธะเคมีแต่เป็นการแสดงระยะห่างระหว่างศูนย์กลางหน่วยเทระอีตรอน



รูปที่ 2.2 การต่อหน่วยเทระอีตรอนในโครงสร้างซีโอไลต์ [9]

คุณสมบัติที่น่าสนใจของซีโอไลต์นั้นอยู่ที่ลักษณะที่เป็นรูพรุน (Porous) ที่ประกอบไปด้วยโพรง (Cavities) ช่องทาง (Channel) และช่องเปิด (Pore opening) ซึ่งรูปร่าง ลักษณะ และขนาดของคุณลักษณะดังกล่าวจะมีความแน่นอน แต่แตกต่างกันไปตามชนิดซีโอไลต์ ช่องเปิดของซีโอไลต์ส่วนใหญ่จะถูกกำหนดขนาดและลักษณะโดยออกซิเจนในวงแหวน (Ring) ที่ต่อกันเป็นทรงสี่หน้า ซึ่งอาจมีจำนวนอะตอมออกซิเจนเป็น 6,8,10 หรือ 12 ในวงแหวน สูตรทั่วไปทางเคมีสำหรับซีโอไลต์ คือ



เมื่อ M คือ ชนิดไอออนประจุบวก โดยทั่วไปมักเป็นโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท (Alkali earth metal)

n คือ ประจุหรือเลขออกซิเดชันของไอออนบวก

z คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างภายในโครงสร้างซีโอไลต์

x+y คือ จำนวนรูปทรงสี่หน้าทั้งหมดของหน่วยเซลล์

y/x มักมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 5 โดยขึ้นกับโครงสร้าง

### 2.3.1 ประวัติซีโอไลต์ [11, 12, 13, 14]

ในปี 1840 ได้ค้นคว้าพบว่าเมื่อผลึกซีโอไลต์ที่มีน้ำอยู่ในโครงผลึก (Hydrated zeolite) จะสูญเสียน้ำจากการดีไฮเดรชัน (Dehydration) แล้วจะทำให้ได้ซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ (Spongy-framework) ซึ่งสามารถดูดซับแอมโมเนีย เบนซีน คลอโรฟอร์ม คาร์บอนไดออกไซด์ และปรอทได้ จากนั้นในปี 1845 ได้ทำการทดลองแล้วพบว่าดินสามารถดูดซับเกลือแอมโมเนียได้เมื่อเทสารละลายเกลือแอมโมเนียผ่านลงไปบนดิน และเมื่อทำการกรองจะได้สารละลายของแคลเซียมผ่านลงมา ส่วนเกลือแอมโมเนียจะถูกดินดูดซับเอาไว้ ต่อมา J.T. Way ได้แสดงให้เห็นว่าซิลิเกตที่มีน้ำในผลึกในดินนี้เป็นตัวทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้น

ในปี 1909 ได้ทำการทดลองการดูดซับแก๊สของซีโอไลต์ชนิดหนึ่งคือ Chabazite พบว่าสามารถดูดซับแก๊สแอมโมเนีย อากาศ ไฮโดรเจน ไอโอดีน คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และโบรมีนที่อุณหภูมิสูงได้แม้แต่ไอของปรอทก็อาจถูกดูดซับได้ และในปี 1925 ค้นพบว่าซีโอไลต์มีสมบัติในการดูดซับสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ๆ และปล่อยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ๆ ออกมา ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดย Mcbain ในปีค.ศ.1932 โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า "Molecular sieving" ซึ่งในปีดังกล่าวได้ตรวจสอบโครงสร้างของซีโอไลต์ที่ชื่อ Chabazite พบว่าเป็นผลึกที่มีโครงสร้างเรียงตัวแบบมีลักษณะเฉพาะตัว (Framework) ต่อมา Union Carbide Corporation ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับซีโอไลต์ซึ่งนับเป็นอุตสาหกรรมแรกและได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ A ปี 1956 ได้มีรายงานเกี่ยวกับโครงสร้างที่เป็นรูปทรงเหลี่ยมลูกบาศก์ Faujasite ซึ่งเกิดในธรรมชาติ และซีโอไลต์ A ที่สังเคราะห์ขึ้น

ในยุคแรกการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะทำภายใต้ที่ใช้ความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้ได้ซีโอไลต์ชนิดเดียวกันกับที่พบในหินบะซอลต์ ต่อมา Miton และคณะทำงาน (1959) ของบริษัท Union Carbide ได้พัฒนาเทคนิคใหม่ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้สารที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูงทำปฏิกิริยาในภาชนะปิดหรือระบบปิด ซึ่งกระบวนการและเทคนิคนี้ได้ถูกพัฒนาขยายออกไปมากขึ้นเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

เป็นที่น่าสังเกตว่าตั้งแต่ปี 1948 จนถึงปี 1972 นั้นพบว่ามียุคงานวิจัยที่เกี่ยวกับด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของซีโอไลต์ A เกิดขึ้นกว่า 7,000 เรื่อง นอกจากนี้ยังมีเอกสารสิทธิบัตรอีกกว่า 2,000 ฉบับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของซีโอไลต์ในการนำไปใช้ประโยชน์อุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ นอกจากนี้มีรายงานว่า การสังเคราะห์ซีโอไลต์ทำได้ตั้งแต่ปี 1862 แต่ Berck (1862) ได้ให้ความเห็นว่าสารที่สังเคราะห์ได้นั้นไม่สามารถสร้างแบบจำลองที่แน่นอนได้

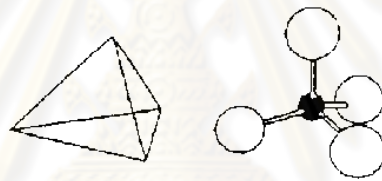


ด้วย ดังนั้นเขาจึงเชื่อว่าการสังเคราะห์ครั้งแรกที่สามารถพิสูจน์ได้นั้น เป็นการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด Analcime โดย Barrer (1951)

ปี 1980 ได้มีการค้นพบซีโอไลต์ในธรรมชาติกว่า 40 ชนิด และซีโอไลต์กว่า 100 ชนิด ได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นมา ในขณะที่มีความต้องการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์อย่างมากในเชิงพาณิชย์ แต่ความต้องการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติยังคงมีอยู่อย่างจำกัด กล่าวคือจะมีการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติก็ต่อเมื่อการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ในพื้นที่นั้นไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ทั้งในด้านการทดลองและในด้านการผลิตทางอุตสาหกรรม

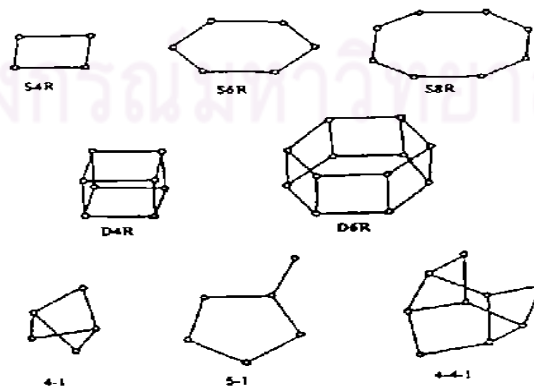
### 2.3.2 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง [12, 13, 14]

1. หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary building units) เป็นหน่วยที่เล็กที่สุด มีรูปร่างเป็น tetrahedron ของซิลิกอน tetrahedron ออกไซด์ ( $\text{SiO}_4$ )<sup>4-</sup> หรืออะลูมิเนียม tetrahedron ออกไซด์ ( $\text{AlO}_4$ )<sup>5-</sup> ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์ [9]

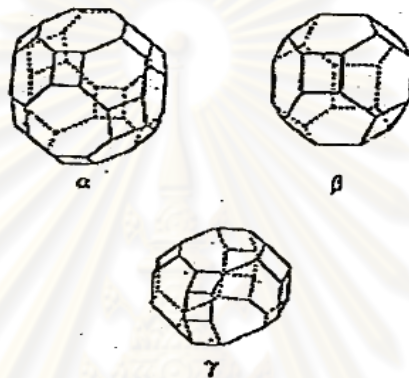
2. หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building units) เกิดจากโครงสร้างปฐมภูมิต่อกันเป็นวงรูปเหลี่ยมต่าง ๆ เป็นวงเดี่ยว เช่น  $\text{S}_4\text{R}$ ,  $\text{S}_6\text{R}$  หรือต่อเป็นวงคู่ เช่น  $\text{D}_4\text{R}$ ,  $\text{D}_6\text{R}$  ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ [9]

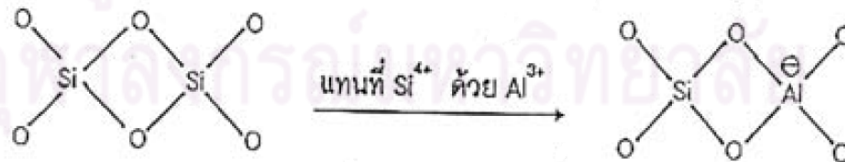
3. หน่วยโครงสร้างรูปหลายหน้า (Polyhedral units) จากโครงสร้างปฐมภูมิหลายโครงสร้างต่อกันเป็นทรงที่สลับซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น

- รูปทรงเหลี่ยมแปดหน้า หรือ  $\beta$  (truncated octahedral type)
- รูปทรงยี่สิบหกหน้า หรือ  $\alpha$  (truncated cubo-octahedron)
- รูปทรงสิบแปดหน้า หรือ  $\gamma$  (18-hedron)
- รูปทรงสิบเอ็ดหน้า หรือ  $\epsilon$  (11-hedron) แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าของซีโอไลต์ [9]

เมื่อพิจารณาหน่วยปฐมภูมิเทอร์อะฮีดรอน พบว่าถ้าทุกหน่วยเป็น  $(\text{SiO}_4)^{4-}$  สูตรเคมีของสารนี้คือ  $\text{SiO}_2$  นั่นเอง ซึ่งมีสภาพเป็นกลาง แต่ถ้าแทนที่  $(\text{SiO}_4)^{4-}$  ด้วย  $(\text{AlO}_4)^{5-}$  จะได้สูตรเคมีคือ  $(\text{AlO}_2)^-$  ดังนั้นจึงมีประจุลบสำหรับทุกหน่วยของ  $(\text{AlO}_2)^-$  หรือ  $(\text{AlO}_4)^{5-}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.6



การต่อกันของหน่วย  $(\text{SiO}_4)^{4-}$   
ไม่มีประจุลบเกิดขึ้น

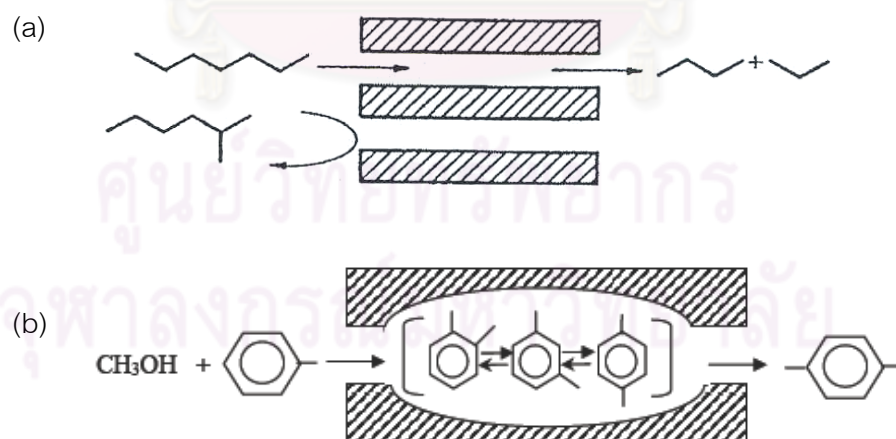
การต่อกันของหน่วย  $(\text{SiO}_4)^{4-}$   
และ  $(\text{AlO}_4)^{5-}$  ที่มีประจุลบเกิดขึ้น

รูปที่ 2.6 ประจุในโครงสร้างตาข่ายซีโอไลต์ [9]

ตำแหน่งประจุลบที่เกิดขึ้นจะอยู่บริเวณรอบ  $(\text{AlO}_2)^-$  หรือ  $(\text{AlO}_4)^{5-}$  ซึ่งเป็นที่อยู่ของแคตไอออนโดยยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงคูลอมบิก (Coulombic force) เพื่อให้เกิดสมดุลทางประจุ ดังนั้นจำนวนแคตไอออนที่พบในซีโอไลต์จะขึ้นกับจำนวนของหน่วย  $(\text{AlO}_4)^{5-}$  และเลขออกซิเดชันของแคตไอออน ดังนั้นซีโอไลต์จึงมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้

แคตไอออนและโมเลกุลของน้ำเป็นส่วนที่อยู่นอกโครงสร้างตาข่ายของซีโอไลต์ โดยปกติการแลกเปลี่ยนแคตไอออน หรือการกำจัดน้ำออกจากซีโอไลต์จะไม่ทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ซีโอไลต์สามารถดูดซับโมเลกุลชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเล็กกว่าปากโพรงนั้น ๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโมเลกุลที่มีขั้ว (Polar molecule) ภายในโครงสร้างซีโอไลต์ประกอบด้วยโพรงขนาดต่าง ๆ กัน มีทางให้โมเลกุลของสารอื่นผ่านเข้าออกได้เรียกว่า ปากโพรง (Aperture) โมเลกุลที่มีรูปร่างพอเหมาะเข้าโพรงและปากโพรงเท่านั้นจึงจะสามารถผ่านเข้าหรือออกจากโพรงของซีโอไลต์ได้ ทำให้ซีโอไลต์มีความเลือกจำเพาะต่อขนาดและรูปร่าง (Shape and size selectivity) ของโมเลกุลที่ผ่านเข้าออกโพรงซีโอไลต์ ดังรูปที่ 2.7 นอกเหนือจากความสามารถในการแยกโมเลกุลได้ (Molecular sieve) ตามปกติของสารที่มีรูพรุนทั่วไป

นอกจากซีโอไลต์บางชนิดยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เช่น ซีโอไลต์ ZSM-5 และ HY ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแตกตัวของน้ำมัน (Oil cracking) ซึ่งเป็นขั้นตอนในการทำให้ความยาวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนมีสายสั้นลง ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิง



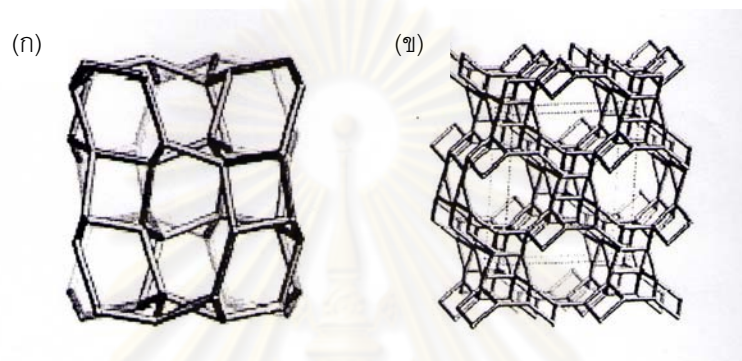
รูปที่ 2.7 (a) การเร่งปฏิกิริยาโดยการคัดเลือกขนาดของสารตั้งต้น  
ที่เข้าทำปฏิกิริยาในโพรงซีโอไลต์

(b) การคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาภายในโพรงซีโอไลต์ [9]

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งซีโอไลต์ออกอีกได้เป็น 9 ชนิด ตามลักษณะของโครงสร้างแบบ  
โครงตาข่ายดังต่อไปนี้คือ

### 1. Analcite Group

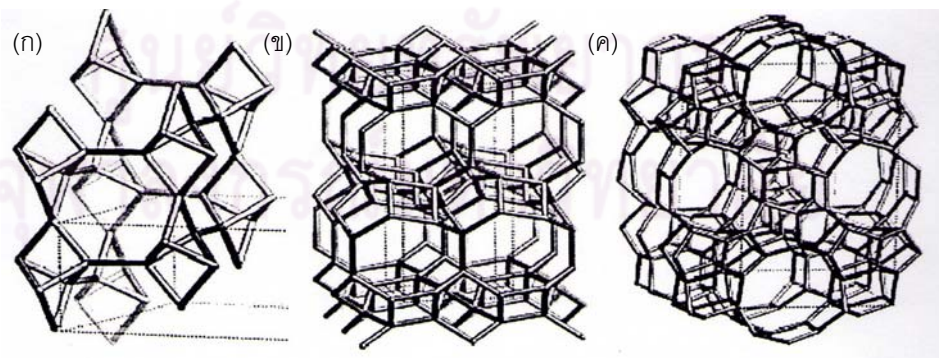
โครงสร้างเกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring กับ 6-ring และมี 2 รูปแบบคือ analcite  
และ laumontite ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะในโครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ (ก) analcite (ข) laumontite [14]

### 2. Natrolite Group

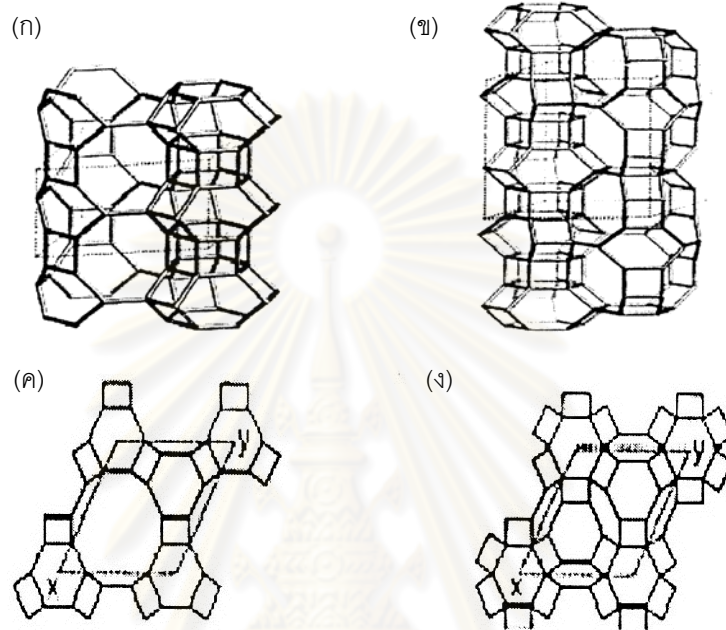
โครงสร้างมีลักษณะต่อกันเป็นสายโซ่ของ 4-ring unit จำนวน 4 วง โดยการเชื่อมต่อกัน มี  
3 รูปแบบคือ natrolite, edingtonite และ thosonite ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างของ (ก) natrolite (ข) brewsterite (ค) ZSM-5 [14]

### 3. Chabazite Group

โครงสร้างประกอบด้วย 6-ring ต่อขนานกัน ซึ่งการเชื่อมต่อกันมีมากมายหลายรูปแบบ เช่น offretite และ erionite ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างของ offretite และ erionite

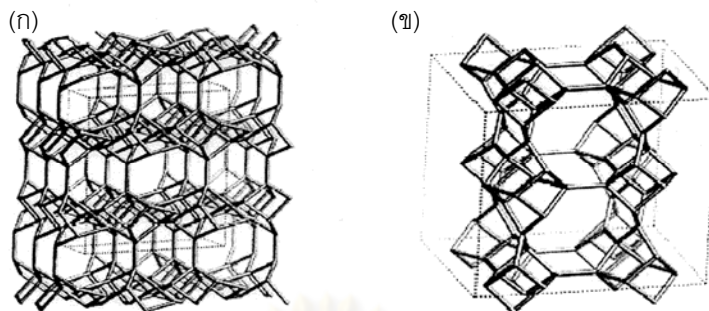
(ก) offretite (ข) erionite (ค) c-project of offretite (ง) c-project of erionite [14]

### 4. Phillipsite Group

โครงสร้างประกอบด้วย 4-ring ที่ต่อขนานกันแบบ U (Up) และ D (Down) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบคือ UUDD, UDUD, UDUU

### 5. Heulandite Group

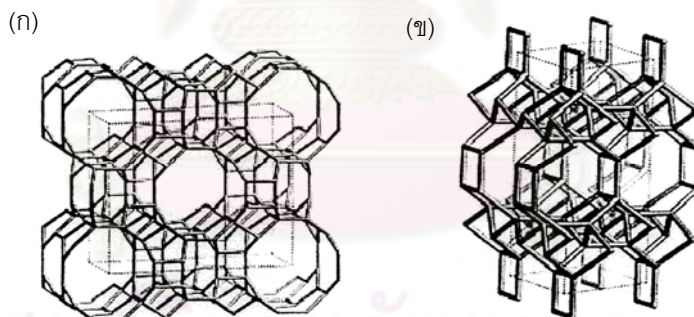
โครงสร้างประกอบด้วย 5-ring จำนวน 4 วงและ 4-ring จำนวน 2 วง ซึ่งเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่มเชื่อมต่อกัน โดยรูปแบบพันธะที่เชื่อมโยงกันนี้จะทำให้ได้แบบ brewsterite ดังรูป 2.9 (ข) และการเชื่อมต่อกันของ block ในแนวตั้งโดยผ่านโครงสร้างกลางในแนวตั้งจะทำให้ได้โครงสร้างซึ่งเป็นส่วนประกอบของ heulandite และ stilbite ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะมีโครงสร้างที่เป็น 5-ring ในบางส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.11



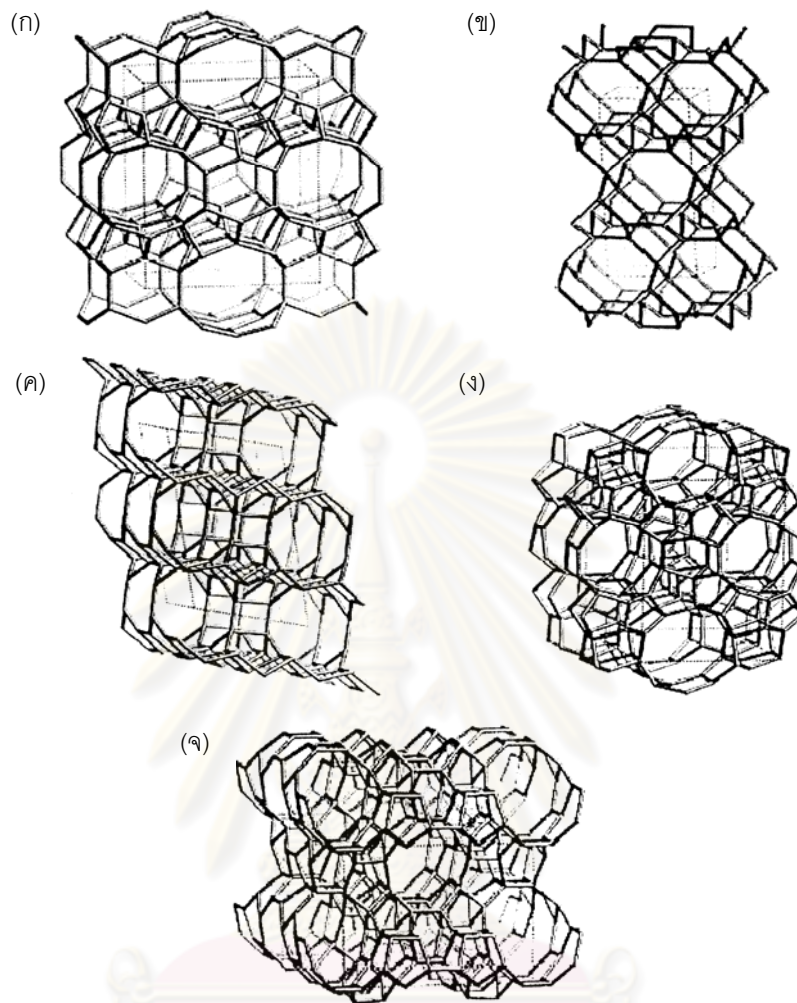
รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างของ (ก) heulandite (ข) stilbite [14]

#### 6. Mordenite Group

โครงสร้างประกอบด้วย 5-ring จำนวน 4 วงเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม ซึ่งมีรูปแบบทั้งหมด 7 รูปแบบ คือ mordenite, epstilbite (แสดงในรูปที่ 2.12), ferrierite, bikitaite, dachiardite, ZSM-5, ZSM-11 (แสดงในรูปที่ 2.13)



รูปที่ 2.12 ลักษณะโครงสร้างของ (ก) mordenite (ข) epstilbite [14]

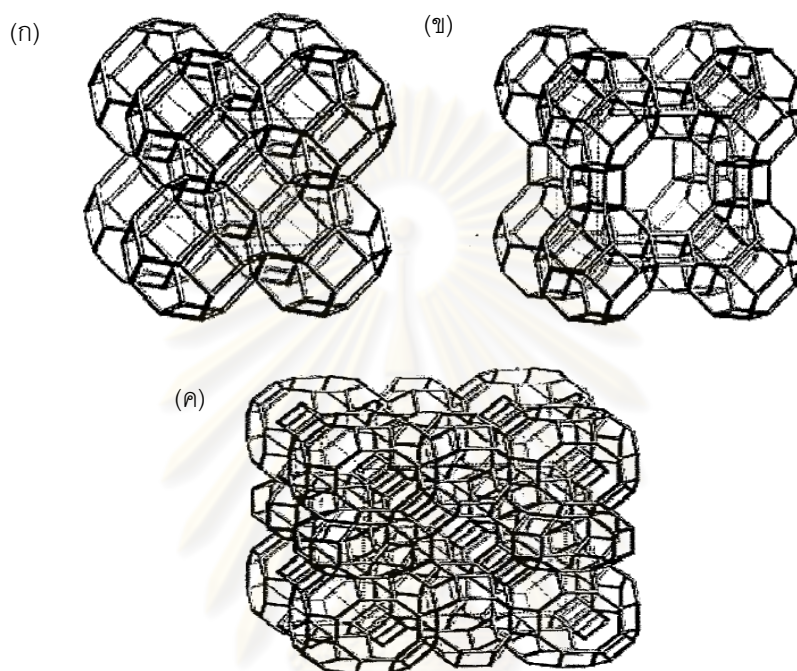


รูปที่ 2.13 ลักษณะโครงสร้างของ (ก) ferrierite (ข) bikitaite  
(ค) dachiardite (ง) ZSM-5 (จ) ZSM-11 [14]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 7. Faujasite Group

ซีโอไลต์กลุ่มนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ sodalite, A และ ZK-5 ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะโครงสร้างของ (ก) sodalite (ข) A (ค) ZK-5 [14]

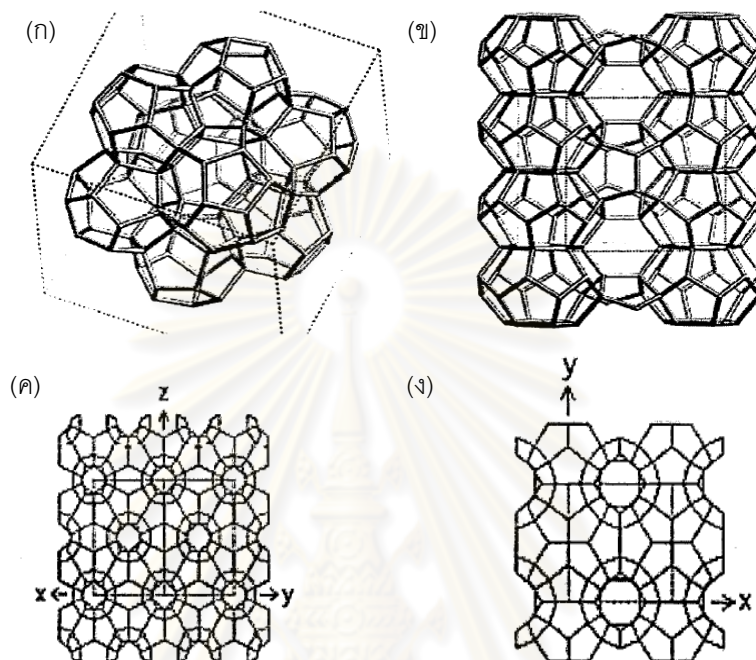
### 8. Melanophlogite Group

ในกลุ่มนี้ประกอบไปด้วย ZEM-39 และ melanophlogite ซึ่งแต่ละหน่วยที่ประกอบเป็น ZSM-39 และ melanophlogite แสดงในรูปที่ 2.15 จะมีหลายแบบเช่น 12-hedron, 14-hedron, 15-hedron และ 16-hedron



## 9. Lovdarite Group

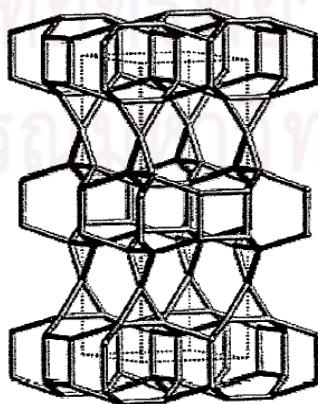
เป็นซีโอไลต์ที่โครงสร้างเกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring และ 8-ring ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 ลักษณะโครงสร้างของ ZSM-39 และ melanophlogite

(ก) ZSM-39 (ข) melanophlogite

(ค) ZSM-39 : c-projection (ง) melanophlogite : c-projection [14]



รูปที่ 2.16 ลักษณะโครงสร้างของ lovdarite [14]

### 2.3.3 ประโยชน์ของซีโอไลต์ [9, 12, 15]

ด้วยสมบัติของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างได้แก่

- สามารถเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ในปริมาณมาก
- มีความหนาแน่นต่ำและมีปริมาตรช่องว่างมากเมื่อถูกดึงน้ำออกจากโครงสร้าง
- มีความเสถียรเมื่อน้ำถูกดึงออกจากโครงสร้าง
- สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้
- มีขนาดช่องว่างที่เท่ากันสม่ำเสมอเมื่อถูกดึงน้ำออกจากโครงสร้าง
- สามารถดูดซับแก๊สและไอได้
- มีสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ส่งผลให้มีการนำซีโอไลต์ไปใช้ประโยชน์ที่หลากหลายแตกต่างกันออกไป โดยการนำประโยชน์จากซีโอไลต์ประกอบด้วย 3 ด้านหลัก ๆ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ตัวแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) และตัวดูดซับ (adsorbent)

#### 2.3.3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา

เนื่องจากซีโอไลต์มีจุดหลอมเหลวสูง มีความคงทน และสามารถนำกลับมาใช้ได้ง่ายกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปของเหลว หรือแก๊ส ทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน ส่งผลให้ซีโอไลต์มีความสำคัญในอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมีเป็นอย่างมาก โดยปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่

- การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) เป็นการแตกพันธะของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวในน้ำมันดิบให้เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่สั้นลงและมีมูลค่าสูงขึ้นเช่น แก๊สลิ้น
- การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking) เป็นการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็กลง โดยการแตกพันธะคาร์บอนคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนช่วย
- รีฟอร์มมิง (Reforming) ทำการเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลิฟาติกให้เป็นแอโรมาติก
- การเปลี่ยนไอโซเมอร์ของ  $C_5$  และ  $C_6$  ( $C_5/C_6$  isomerization) เป็นการเปลี่ยนเฮกเซนและเพนเทนที่มีค่าออกเทนต่ำให้เป็นไอโซเพนเทน และไดเมทิลบิวเทนซึ่งมีค่าออกเทนที่สูงกว่าการกำจัดไขในน้ำมัน (Dewaxing)
- การเติมหมู่แอลคิลในเบนซีน (Benzene alkylation) เช่นการผลิตเอทิลเบนซีนจากเอทิลีนและเบนซีน หรือการผลิตคิวมีนจากเบนซีนและโพรพิลีน เป็นต้น

- การเปลี่ยนไอโซเมอร์ของไซลีน (Xylene isomerization) เป็นการเปลี่ยนไอโซเมอร์ของ o-Xylene ให้เป็น p-Xylene ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมกรด Terephthalic เพื่อผลิตพอลิเอสเตอร์ (Polyester)

### 2.3.3.2 ตัวแลกเปลี่ยนประจุ

จากประจุบวกของโลหะที่เกาะกับซีโอไลต์อย่างหลวม ๆ พร้อมทั้งจะแลกเปลี่ยนประจุกับโลหะอื่นเมื่ออยู่ในสารละลายได้ ด้วยหลักการนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้กับการลดความกระด้างของน้ำเนื่องจากน้ำที่ไม่กระด้าง หรือน้ำอ่อนนั้น เมื่อเติมสารซักฟอกลงไปก็จะเกิดฟองในปริมาณมาก โดยโลหะแอลคาไลน์เช่น โซเดียม หรือ โพแทสเซียมที่เกาะกับซีโอไลต์ จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออน ซึ่งเป็นประจุของโลหะในน้ำที่เป็นสาเหตุของน้ำกระด้าง และมีการนำซีโอไลต์มาใช้ลดความกระด้างของน้ำแทนฟอสเฟตในผงซักฟอก เนื่องจากฟอสเฟตที่ผสมในผงซักฟอก ถ้าใช้ในปริมาณมากเกินไปจะทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมได้กล่าวคือ ฟอสเฟตจะทำให้พีชน้ำ หรือสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดปัญหาในการกำจัดและเมื่อมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้น้ำเสียได้

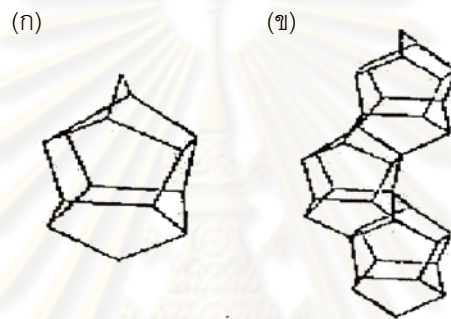
จากหลักการแลกเปลี่ยนประจุนี้ทำให้สามารถใช้ซีโอไลต์ในการกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำเสีย โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแอมโมเนียมไอออนกับโซเดียมไอออนที่อยู่ในโพรงซีโอไลต์

### 2.3.3.3 ตัวดูดซับ

จากลักษณะพิเศษของโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้ดูดซับสารต่าง ๆ ได้ตามขนาดและโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด ซึ่งสามารถใช้ทั้งในกระบวนการดึงน้ำออก (Dehydration) การทำให้บริสุทธิ์ (Purification) และการแยกสาร (Separation) ซึ่งซีโอไลต์นั้นมีสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่าง เป็นหลักการพื้นฐานของการดูดซับโมเลกุลโดยสามารถเลือกให้มีการเลือกดูดซับเฉพาะบางโมเลกุล ส่วนการดึงน้ำออกนั้น เนื่องจากซีโอไลต์ที่มีประจุบวกสามารถดูดน้ำได้ดีเป็นพิเศษ และสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้กล่าวคือ เมื่อมีการให้ความร้อนน้ำก็จะระเหยออกไปหมด แต่เมื่อซีโอไลต์เหล่านี้สัมผัสกับน้ำอีกครั้งก็สามารถดูดซับน้ำได้อีก หรืออาจนำไปใช้ดูดซับสารอื่นแทนเช่น ก๊าซไฮโดรเจน ตะกั่ว หรือ แอมโมเนีย

### 2.3.4 ซีโอไลต์ ZSM-5 [11, 16]

ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นซีโอไลต์ในตระกูลเพนตะซิล (pentasil) ลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยโครงสร้างย่อย (building unit) เป็นวงแหวนห้าเหลี่ยม (five-membered ring) จำนวนแปดวง ที่เชื่อมทรงสี่หน้าของซิลิกาและอะลูมินาเข้าด้วยกัน (รูปที่ 2.17 ก) หน่วยของโครงสร้างย่อยในซีโอไลต์ ZSM-5 จะต่อเรียงกันตรงบริเวณขอบต่อเรียงกันเป็นสายโซ่ (รูปที่ 2.17 ข) ซึ่งสายโซ่เหล่านี้ได้เชื่อมโยงต่อกันเป็นแผ่นและมีการเชื่อมโยงจากแผ่นไปเป็นโครงสร้างสามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.18

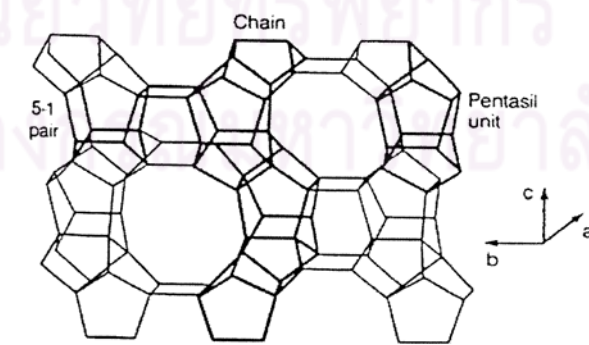


รูปที่ 2.17 โครงสร้างย่อยของซีโอไลต์ ZSM-5

(ก) วงแหวนห้าเหลี่ยมโครงสร้างย่อยของซีโอไลต์ ZSM-5

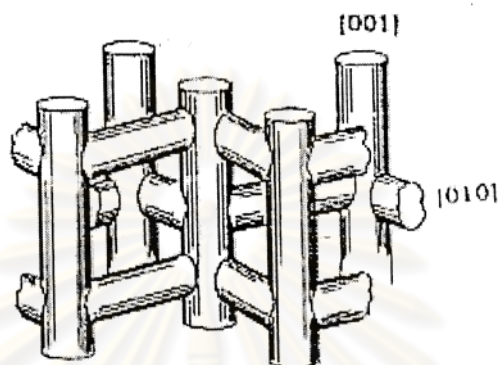
(ข) ลักษณะการเชื่อมต่อดวงแหวนห้าเหลี่ยมเป็นโครงสร้างย่อยของซีโอไลต์ ZSM-5

ในระนาบ [001] [16]



รูปที่ 2.18 ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่เป็นระนาบ [100] [16]

โครงสร้างซีโอไลต์ ZSM-5 ประกอบไปด้วยช่องว่างสองระบบเชื่อมต่อกัน (Intersection) โดยช่องว่างหนึ่งจะมีลักษณะเป็น sinusoidal ซึ่งวางตัวอยู่ในทิศ [001] และช่องว่างอีกระบบหนึ่งมีลักษณะเป็นท่อตรงในทิศ [010] ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ลักษณะช่องว่างทั้งสองระบบในซีโอไลต์ ZSM-5 [16]

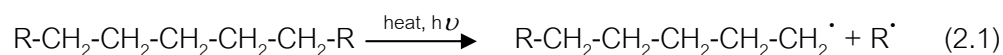
การสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 มักใช้อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาในช่วงตั้งแต่ 20 ขึ้นไป จนถึงการใช้ซิลิกาบริสุทธิ์ ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = \infty$ ) ซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ได้ในกรณีหลังมีชื่อเรียกว่า ซิลิกาไลต์ (Silicalite) และมีการใช้สารก่อโครงร่างซึ่งเป็นไอออนบวกของสารอินทรีย์ โดยสารโครงร่างนี้จะช่วยการละลายของอะลูมินेटและซิลิเกตไอออน และช่วยจัดเรียงโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวของผลึกให้เกิดซีโอไลต์ตามชนิดที่ต้องการ

#### 2.4 กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) [17, 18, 19]

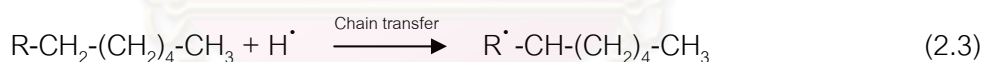
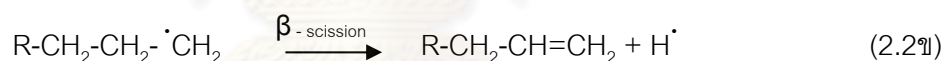
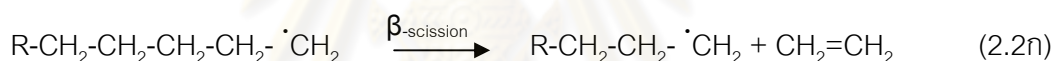
การแตกตัวด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง โดยหากควบคุมให้มีการแตกตัวเป็นไปได้อย่างพอดี จะมีการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เนื่องจากการให้ความร้อนเกินพอดีจะทำให้เกิดการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กเกินไปจนอยู่ในรูปแก๊ส  $\text{C}_1\text{-C}_4$  ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการเพราะนำมาใช้ประโยชน์ได้ยาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนจะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาโดยเฉพาะส่วนที่มีแขนโอเลฟิน (Olefin) และไดโอเลฟิน (Diolen) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากันเองต่อไป

กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (Free radical) และแบบห่วงโซ่ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน

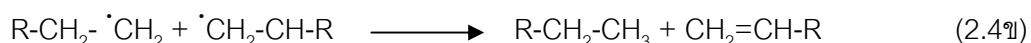
1. ขั้นเริ่มต้น (Initiation Step) เป็นขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระ เกิดจากความร้อนไปสลายสายโซ่ทำให้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขาดออกจากกัน เกิดเป็นอนุมูลอิสระดังสมการ 2.1 ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยาในขั้นต่อไป



2. ขั้นการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (Propagation step) เกิดจากอนุมูลอิสระในขั้นเริ่มต้นทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง การแตกตัวจะเริ่มจากอนุมูลอิสระเข้าไปยังพันธะคาร์บอนที่ตำแหน่ง  $\beta$  เกิดอนุมูลอิสระขึ้นใหม่ ( $\beta$ -fission) ซึ่งทำให้ในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเกิดความไม่เสถียร ดังสมการ 2.2ก – 2.2ข ส่งผลให้เกิดขั้นตอนการถ่ายโอนไฮโดรเจน (Chain transfer) ดังสมการ 2.3 เพื่อทำให้โมเลกุลเกิดความเสถียร จึงเกิดเป็นสารต่าง ๆ ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงจากเดิม พร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นต่อเพื่อทำปฏิกิริยาเกิดต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ



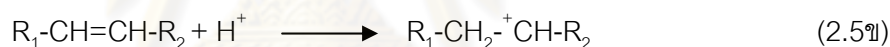
3. ขั้นหยุดปฏิกิริยา (Termination step) คือขั้นตอนที่อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่องโดยทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น โดยอาจเกิดเป็นโมเลกุลใหญ่เพียงโมเลกุลเดียว หรือเกิดเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุลดังสมการ 2.4ก และ 2.4ข



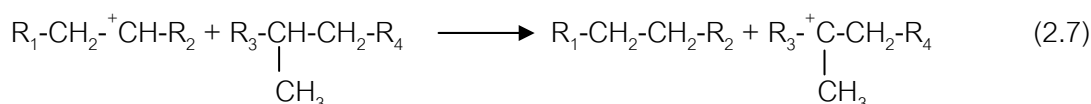
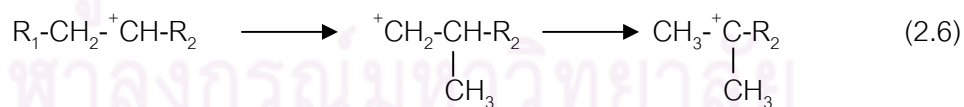
## 2.5 การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) [17, 18, 19]

การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามามีบทบาทในการช่วยแตกสลายโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้เล็กลงให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสม คุณภาพดีสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ได้ตามต้องการ กลไกของการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย

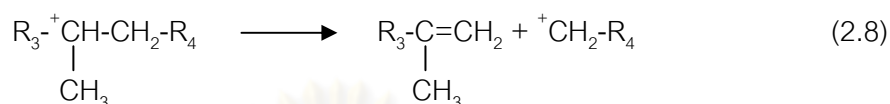
1. ปฏิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation) และปฏิริยาการเกิดคาร์บอนเนียมไอออน (Carbonium ion) ซึ่งเกิดจากการที่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮไดรด์ไอออน (Hydride ion) ที่มีประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด ทำให้คาร์บอนเนียมไอออนมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า โดยคาร์บอนเนียมที่เกิดขึ้นจะมีเสถียรภาพแตกต่างกันตามโครงสร้างของไอออน โดย Tertiary ion จะมีเสถียรภาพมากกว่า Secondary ion และ Primary ion ตามลำดับ ดังสมการ 2.5ก และ 2.5ข



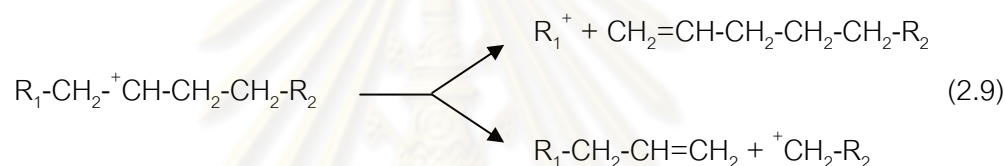
การเกิดปฏิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลของคาร์บอนเนียมไอออน ซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้างของคาร์บอนเนียมไอออนมีเสถียรภาพต่างกัันดังสมการ 2.6 และเกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ (Hydride transfer) โดยเกิดปฏิริยาระหว่างคาร์บอนเนียมไอออนกับโมเลกุลของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนดังสมการ 2.7



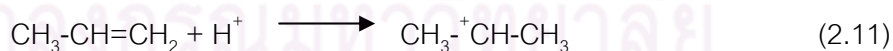
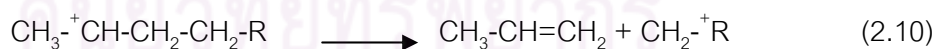
สำหรับคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยา  $\beta$  - fission หรือการแตกตัวที่ตำแหน่ง  $\beta$  นับจากจุดที่มีประจุบวก ซึ่งจะให้สารประกอบโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดเล็กลงโดยมักจะเป็น Primary carbonium ion ดังสมการ 2.8



ในบางกรณีคาร์บอนเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 รูปแบบ เช่นในตัวอย่างของ Secondary carbonium ion ดังสมการที่ 2.9



ถ้า  $\text{R}_1$  คือ H การเกิด  $\beta$  - fission จะสามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียวดังสมการ 2.10 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ โพรพีนจะเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนและอยู่ในรูปคาร์บอนเนียมไอออนซึ่งไม่สามารถเกิด  $\beta$  - fission ต่อไปได้ดังสมการ 2.11 โดย Isopropyl carbonium ion จะเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรด์กับโมเลกุลประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรเพนหรืออาจเกิดการสูญเสียโปรตอน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพีน

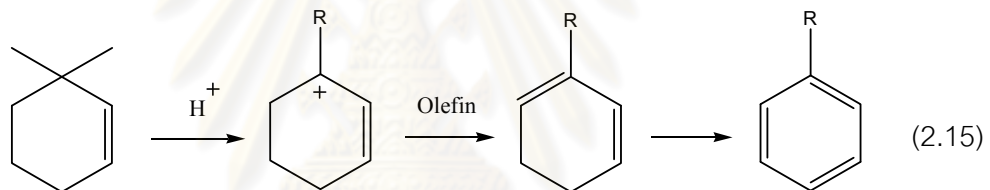
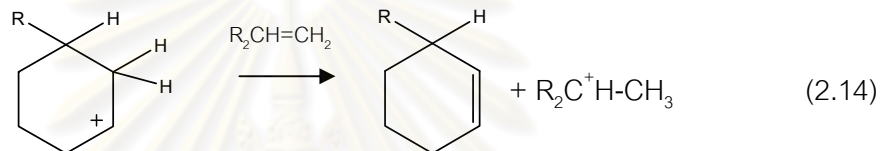
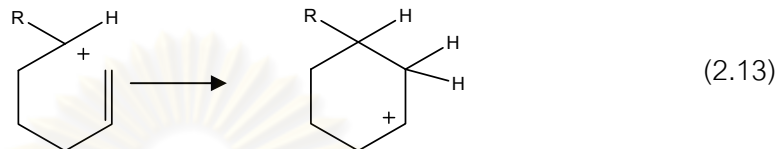
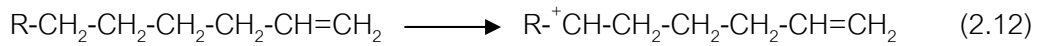


(Isopropyl carbonium ion)

ในการเกิดวงแหวนแอโรแมติกจากปฏิกิริยาดีไฮโดรไซคลิกเซชัน (Dehydrocyclization) โอลิฟินเกิดเป็นคาร์บอนเนียมไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยา  $\beta$  - fission ได้สารประกอบโอเลฟินคาร์บอนเนียมไอออน (Olefin carbonium ion) ที่มีลักษณะเป็นวงแหวน จากนั้นเกิดปฏิกิริยากับโอเลฟินเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ไอออน จากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะได้ Allylic



carbonium ion ที่มีเสถียรภาพและเกิดการรับโปรตอนจาก Cyclohexadine ซึ่งในขั้นสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแอโรแมติกดังกล่าวดังตามสมการที่ 2.12-2.15

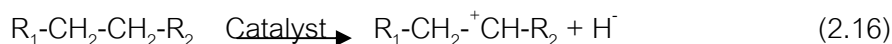


ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยแก๊สที่มีโอเลฟินสูง และองค์ประกอบของเบนซีนที่มีค่าออกเทนสูงเนื่องจากมีสารจำพวกแอโรแมติกและโอเลฟินมาก องค์ประกอบของน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กากน้ำมันชนิดใส และ ค็อก (Coke) ที่จะเกาะติดอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้พื้นที่ผิว รูพรุน และความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงจนเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

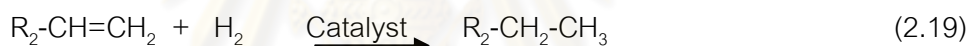
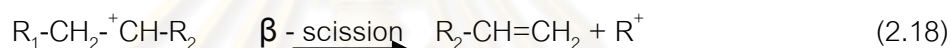
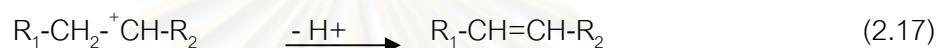
## 2.6 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking) [17, 18, 19]

การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่รวมระหว่างการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและการเติมไฮโดรเจน ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีแขนแตกแขนงจำนวนมาก เกิดเป็นพาราฟินและแนฟทีน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นประเภท 2 หน้าที่ (Dual function) คือ ช่วยในการแตกพันธะคาร์บอน-คาร์บอนของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนและช่วยเติมไฮโดรเจน กระบวนการจึงมักประกอบด้วยสารซิลิกา-อลูมินา ที่สามารถช่วยในการแตกพันธะคาร์บอนได้พร้อม ๆ กับการเติม

ไฮโดรเจน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเริ่มต้นจากการเกิดคาร์บอนเนียมไอออนตรงบริเวณที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาดังสมการ 2.16



คาร์บอนเนียมไอออนอาจมีการจัดเรียงตัวใหม่โดยการกำจัดโปรตอนได้โอเลฟินหรือเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่ง  $\beta$  ( $\beta$  - scission) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนตัวใหม่ จากนั้นเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนและการดึงไฮโดรเจน โอเลฟินที่ผ่านการเติมไฮโดรเจน จะเกิดเป็นสารประกอบประเภทพาราฟิน ดังกลไกตามสมการ 2.17-2.19



นอกจากนี้การเติมไฮโดรเจนบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะช่วยทำความสะอาดให้กับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไปพร้อม ๆ กันด้วย เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนช่วยกำจัดโค้กที่เกิดขึ้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาออกไป กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการเพิ่มของอุณหภูมิเป็นอย่างดี เพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโค้ก และทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความสามารถไป หรือทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหาย รวมทั้งไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ

## 2.7 การวิเคราะห์หาคุณภาพของน้ำมัน (Crude oil evaluation) [17, 20]

เป็นการวิเคราะห์หาคุณค่าของน้ำมันดิบอย่างละเอียด เพื่อหาองค์ประกอบและสมบัติของส่วนต่าง ๆ ในน้ำมันดิบเริ่มต้นเพื่อหาปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สที่มีอยู่โดยวิธี Gas chromatography แล้วนำน้ำมันมากลั่นแยกเป็นส่วนตามคาบจุดเดือด (Boiling range) อย่างละเอียด โดยแบ่งเป็นส่วนแคบ ๆ ชนิดคาบจุดเดือดเพียง 5-10 องศาเซลเซียส แต่มีค่าใช้จ่ายที่แพง

มากและใช้เวลานานจึงไม่นิยมทำกัน ปัจจุบันจึงใช้วิธีแยกน้ำมันดิบออกตามคาบจุดเดือดกว้าง ๆ ให้พอดีกับที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตน้ำมันสำเร็จรูป กล่าวอย่างหยาบสามารถแบ่งได้เป็น

1. พวกที่มีคาบจุดเดือดตั้งแต่ IBP (Initial boiling point) จนถึง 200 องศาเซลเซียส เรียกว่าส่วนของแนฟทา (Naphtha fraction) มักใช้ในการผลิตน้ำมันเบนซิน
2. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 200-250 องศาเซลเซียส เรียกว่าส่วนน้ำมันก๊าด (Kerosene fraction) มักใช้ในน้ำมันก๊าดที่ให้แสงสว่าง ถ้าจุดเกิดควันไม่ต่ำจนเกินไป น้ำมันก๊าดที่มีคุณภาพที่ดี และมีจุดเยือกแข็งต่ำจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงอากาศยานไอพ่นได้ซึ่งต้องขึ้นกับสมบัติอื่น ๆ ด้วย
3. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 250 – 350 องศาเซลเซียส เราเรียกว่าส่วนของแก๊ส ออยล์ชนิดเบา (Light gas oil fraction) เหมาะในการนำมาใช้เป็นน้ำมันเครื่องยนต์
4. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 350 – 370 องศาเซลเซียส เราเรียกว่าส่วนของแก๊ส ออยล์ (Gas oil fraction) เหมาะในการนำมาใช้เป็นน้ำมันเครื่องยนต์ดีเซล
5. พวกที่มีคาบจุดเดือดเหนือกว่า 370 องศาเซลเซียส เรียกว่า กากน้ำมัน (Residue) อาจนำไปใช้ได้หลายอย่างแล้วแต่สมบัติของกากน้ำมัน เช่น นำมาใช้เป็นน้ำมันเตา หรือนำไปผลิตเป็นยางมะตอย หรือผลิตเป็นน้ำมันเครื่องหรือนำมาเป็นสารป้อน (Feed stock)

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันพืช น้ำมันหล่อลื่น และวัสดุเหลือทิ้งจากพลาสติกเช่นพอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE) พอลิพรอพิลีน (Polypropylene: PP) พอลิสไตรีน (Polystyrene: PS) รวมถึงการผสมองค์ประกอบดังกล่าวเข้าด้วยกัน โดยมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ที่ภาวะต่าง ๆ กัน

**มารีนา มงคล [21]** ศึกษากระบวนการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก โดยใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลของระดับศึกษา อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ 400-430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 45-60 นาที และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีตัวแปรคือน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5-2.0 กรัม ภายใต้ความดันบรรยากาศแก๊ส ไฮโดรเจนเริ่มต้น 10-30 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 น้ำหนัก 0.05-0.2 กรัม ที่ความดันแก๊ส ไฮโดรเจนเริ่มต้น 10-20 บาร์ กรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา และน้ำหนักเหล็กบนถ่านกัมมันต์เป็นตัวแปรที่ผลอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำการวิเคราะห์

ผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่าภาวะที่ส่งผลต่อการเกิดปริมาณแฉะสูงที่สุดคืออุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม ได้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 79.74 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีปริมาณร้อยละผลได้ของแฉะ 28.14 เคโรซีน 16.56 แก๊สออยล์เบา 21.86 แก๊สออยล์ 3.26 และกากน้ำมันหนัก 9.91 โดยน้ำหนัก กรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 อุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ โดยภาวะการทดลองที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และ HZSM-5 0.05 กรัม ได้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 83.60 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีปริมาณร้อยละผลได้ของแฉะ 26.75 เคโรซีน 13.79 แก๊สออยล์เบา 22.99 แก๊สออยล์ 3.76 และกากน้ำมันหนัก 16.30 โดยน้ำหนัก

**ประชากรต้น แต่ภักดี [22]** ศึกษากระบวนการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ขนาด 70 มิลลิลิตร กระบวนการแตกตัวกระทำการศึกษาถึงเปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ อัตราส่วนพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีน อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นต่อพลาสติก อุณหภูมิ 390-450 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 45-105 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-10 บาร์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.1-1.5 กรัม ปริมาณสารตั้งต้นจำนวน 15 กรัม โดยภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ดังนี้ เปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ คือ 5 % อัตราส่วนพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีน คือ 70:30 อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นต่อพลาสติก คือ 60:40 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 75 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยา 0.8 กรัม ซึ่งในภาวะการทดลองข้างต้นจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 75.65 % ผลิตภัณฑ์แก๊ส 17.37 % และของแข็งที่ไม่ทำปฏิกิริยา 6.98 % เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาวิเคราะห์หาการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ พบว่ามีปริมาณของแก๊สไฮโดรคาร์บอน 61.25 % เคโรซีน 13.25 % แก๊สออยล์เบา 15.84 % แก๊สออยล์ 3.65 % และกากน้ำมันหนัก 6.01 %

**นิตา วิสุทธิรังสีอุไร [23]** ศึกษากระบวนการแตกตัวของพอลิสไตรีน และน้ำมันพืชใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ 350-600 องศาเซลเซียส, อัตราส่วนระหว่างน้ำมันพืชใช้แล้วและพอลิสไตรีน 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 โดย

น้ำหนัก และอัตราการไหลเข้า 4.14, 9.04, 15.49 กรัมต่อนาที และทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น พบว่าภาวะที่ส่งผลต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันพีซีใช้แล้วที่ทำให้เกิดปริมาณร้อยละเนฟตามากที่สุดคือ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 9.04 กรัมต่อนาที ได้ปริมาณเนฟทาร์้อยละ 41.15 เคโรซีนร้อยละ 8.72 แก๊สออยล์เบาร้อยละ 28.26 แก๊สออยล์หนักร้อยละ 9.92 กากน้ำมันร้อยละ 11.12 โดยน้ำหนัก และพบว่าภาวะที่ส่งผลต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิสไตรีนและน้ำมันพีซีใช้แล้วที่ทำให้เกิดปริมาณร้อยละของเนฟตามากที่สุด คือ อัตราส่วนของน้ำมันพีซีใช้แล้วและพอลิสไตรีน 60:40 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 9.04 กรัมต่อนาที ได้ปริมาณเนฟทาร์้อยละ 70.38 เคโรซีนร้อยละ 6.26 แก๊สออยล์เบาร้อยละ 14.49 แก๊สออยล์ร้อยละ 3.33 กากน้ำมันร้อยละ 3.43 โดยน้ำหนัก เมื่อทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยเครื่อง FT-IR พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันหลักเป็นแอมโรแมติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับหมู่ฟังก์ชันหลักในน้ำมันเบนซินออกเทน 95 แล้วพบว่ามีหมู่แอมโรแมติกไฮโดรคาร์บอนที่คล้ายคลึงกัน

**อราดา วงศ์ศุภลักษณ์ [24]** ศึกษาการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 เหล็กบนถ่านกัมมันต์และ Co-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 70 มิลลิลิตร โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคืออุณหภูมิ 350-400 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 60-180 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ ปริมาณของ HZSM-5 0.1-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เหล็กบนถ่านกัมมันต์ และ Co-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด โดยได้ทำการออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียลสองระดับภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 คือ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 90 นาที ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 88.3 โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยแกโซลีน เคโรซีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์ และกากน้ำมัน ร้อยละ 28, 3, 40, 3 และ 26 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ คือ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 120 นาที ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 88.7 โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยแกโซลีน เคโรซีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์ และกากน้ำมัน ร้อยละ 24, 1, 45, 2 และ 28 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> คือ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 90 นาที ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 91.2 โดยน้ำหนัก ประกอบด้วย

แก๊สไฮโดรเจน แก๊สออกซิเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และกากน้ำมัน ร้อยละ 33, 40, 1 และ 26 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

Li et al [25] ศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันเมล็ดฝ้ายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง-ฟลูอิดไรซ์เบด (Fixed-fluidized bed) ที่ความดันบรรยากาศ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ (400-500 องศาเซลเซียส) อัตราส่วนของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมัน (6-10 กรัมต่อกรัม) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (50-90 วินาที) เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมากที่สุด พบว่าอุณหภูมิ 462.2 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมัน 7.8 กรัมต่อกรัม และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 50.2 วินาที ได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมากที่สุดร้อยละ 33.7 โดยน้ำหนัก

Tamunaidu et al [26] ศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์แบบทรานสปอร์ตไรเซอร์ (Transport riser reactor) ที่ความดันบรรยากาศ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ (400-500 องศาเซลเซียส) อัตราส่วนของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมัน (5-10 กรัมต่อกรัม) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (10-30 วินาที) เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมากที่สุด พบว่าอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมัน 5 กรัมต่อกรัม และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที ได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมากที่สุดร้อยละ 33.5 โดยน้ำหนัก

Ooi et al [27] ศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของกากของกรดไขมันที่ได้จากโรงงานน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กแบบเบดนิ่ง (Fixed-bed microreactor) ที่ความดันบรรยากาศ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ (400-450 องศาเซลเซียส) อัตราส่วนของน้ำหนักกากของกรดไขมันต่อน้ำมันตัวเร่งปฏิกิริยา (6-10 กรัมต่อกรัม) อัตราการป้อนของน้ำหนักกากของกรดไขมันต่อน้ำมันตัวเร่งปฏิกิริยา (2.5-4.5 ชั่วโมง<sup>-1</sup>) เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมากที่สุด พบว่าอุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของน้ำหนักน้ำมันต่อน้ำมันตัวเร่งปฏิกิริยา 9.64 กรัมต่อกรัม และอัตราการป้อนของน้ำหนักกากของกรดไขมันต่อน้ำมันตัวเร่งปฏิกิริยา 3.66 ชั่วโมง<sup>-1</sup> ได้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมากที่สุดร้อยละ 44.4 โดยน้ำหนัก

Lima et al [28] ศึกษาการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันพืช 3 ชนิด คือ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม และน้ำมันละหุ่ง โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 350-400 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (Batch reactor) ขนาด 5 ลิตร ผลการศึกษาพบว่า เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากน้ำมันทั้ง 3 ชนิด มีองค์ประกอบของโอเลฟิน พาราฟิน กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) และแอลดีไฮด์ (Aldehyde) และมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่ใช้งานจริง

โดยเชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันละหุ่งมีองค์ประกอบของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ยาวกว่าเชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันปาล์ม

Angyal et al [29] ศึกษาการแตกตัวของวัสดุเหลือทิ้งจากพลาสติก (พอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีน) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ (Tube reactor) โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 510-520 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 15-30 นาที และปริมาณพอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีน ผลการศึกษาพบว่าปริมาณพอลิสไตรีนมีผลต่อปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมัน เมื่อปริมาณพอลิสไตรีนมากขึ้นจะช่วยเพิ่มอัตราการสลายของพอลิพรอพิลีน ทำให้ปริมาณในส่วนของแนฟทาที่มีปริมาณแอมโรมาติกมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้เหมาะแก่การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือเป็นสารป้อนในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี



คุรุวิทยุทยทรัพยากร  
จุพาลงกรณัฒหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (Micro-reactor) รูปทรงกระบอก ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ทำจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม SS 316 โดยด้านบนมีชุดฝาปิดทำจากสแตนเลส มีชุดอุปกรณ์สำหรับอัดแก๊ส และวาล์วনিรภัย สามารถทำการทดลองภายใต้ภาวะที่ทนความร้อนได้ถึง 500 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะพาสคาล มีเทอร์โมคัปเปิลเปิดทางด้านบนสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างทำการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ปริมาตร 250 มิลลิลิตร (Micro-reactor)

3.1.2 ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Temperature controller) ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังขดลวดความร้อนและตัวจ่ายกระแสเมื่อได้อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ มีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิได้ในระดับ  $\pm 10$  องศาเซลเซียส

3.1.3 ขดลวดความร้อนแบบ Injection แรงดัน 230 โวลต์ กำลัง 400 วัตต์



3.1.4 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ ชนิดเค (K-type) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร

3.1.5 ชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยมีมอเตอร์เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนแกนหมุนให้เครื่องปฏิกรณ์เกิดการแกว่ง สามารถปรับความเร็วรอบการเขย่าได้จากชุดควบคุมความเร็วดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดทดลองประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอลและเครื่องเขย่า

3.1.6 ชุดกรองสุญญากาศ ประกอบด้วยชุดเครื่องแก้วต่อกับเครื่องดูดอากาศ เพื่อทำการกรองแยกแบบสุญญากาศ สำหรับแยกส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็ง โดยผ่านการกรองโดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดกรองสุญญากาศและกระดาษกรองใยแก้ว

- 3.1.7 เครื่องชั่งสารความละเอียด 2 ตำแหน่ง
- 3.1.8 เครื่องชั่งสารความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 3.1.9 นาฬิกาจับเวลา
- 3.1.10 ตู้อบ (Dry oven)
- 3.1.11 เครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน (Centrifuge) ยี่ห้อ Kubota รุ่น KC-25
- 3.1.12 เครื่องแก้ว ประกอบด้วย ปีกเกอร์ ขวดแก้วเพื่อใส่สารตัวอย่าง หลอดหยด
- 3.1.13 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) ยี่ห้อ Varian รุ่น CP-3800 และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation) พร้อมดีเทคเตอร์ชนิดเปลวไอออไนเซชัน (Flame ionization detector, FID) และคอลัมน์ CP-SIL 5 CB สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวตามจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887 [30] แสดงดังรูปที่ 3.4
- 3.1.14 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface area and porosity analyzer) ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP 2020 แสดงดังรูปที่ 3.5
- 3.1.15 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2010 แสดงดังรูปที่ 3.6
- 3.1.16 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fouriertransform infrared spectrometer, FT-IR) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Spectrum One แสดงดังรูปที่ 3.7
- 3.1.17 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) ยี่ห้อ Shimadzu GC-2014 แสดงดังรูปที่ 3.8
- 3.1.18 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมัน ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC4A โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์เครื่องมือต่าง ๆ แสดงดัง ภาคผนวก จ



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น  
(Simulated Distillation Gas Chromatograph)



รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวรูพรุน  
(BET surface area)



รูปที่ 3.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี  
(Gas Chromatography-Mass spectrometry)



รูปที่ 3.7 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์  
(Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR)



รูปที่ 3.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี  
(Gas Chromatograph)

### 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้

3.2.1 น้ำมันมะพร้าว จากห้างหุ้นส่วนจำกัดกาญจนไกรพาณิชย์ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์  
บรรจุในภาชนะที่บดแสงเพื่อป้องกันการออกซิไดซ์ แสดงดังรูปที่ 3.9

3.2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ทางการค้าชนิด HZSM-5 ซึ่งมีอัตราส่วน Si/Al เท่ากับ 18

3.2.3 แก๊สไฮโดรเจน 99.99% บรรจุในถังเก็บแบบ High pressure ขนาด 6 ลูกบาศก์เมตร จากบริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.2.4 สารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ ( $CS_2$ ) 99% (Analyze Grade) จากบริษัท Merck

3.2.5 สารละลายโทลูอีน 99% จากบริษัท Fisher Chemicals



รูปที่ 3.9 น้ำมันมะพร้าว

### 3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันมะพร้าว

3.3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันมะพร้าวก่อนการทดลองด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟแบบจำลองการกลั่น ตามมาตรฐาน ASTM D-2887

3.3.3 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันมะพร้าวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ-แมสสเปกโตรเมทรี

3.3.4 วิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง BET surface area

3.3.5 วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค X-ray Fluorescence, XRF

3.3.6 ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial design) เป็นการออกแบบให้แต่ละตัวแปร มีสองระดับ เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 โดยวางรูปแบบการทดลองเป็น  $2^4$  แฟกทอเรียล ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการ

ทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และใช้การคำนวณจากโปรแกรม Design-Expert เวอร์ชัน 6.0.10 ในการหาภาวะที่เหมาะสม

3.3.7 วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันหลังจากเกิดปฏิกิริยาด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น

3.3.8 เปรียบเทียบผลการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 กับตัวเร่งปฏิกิริยา 10% Fe/Ac

3.3.9 วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากภาวะที่เหมาะสม เปรียบเทียบกับน้ำมันเบนซิน

3.3.10 การตรวจสอบคุณภาพน้ำมัน

- ค่าความหนืด (ASTM D445)
- การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (ASTM D130)
- ค่าความร่อน (ASTM D2015)

**ตารางที่ 3.1** ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาน้ำมันตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

| ตัวแปร  | ระดับต่ำ (-) | ระดับสูง (+) |
|---|--------------|--------------|
| อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), A                                      | 360          | 410          |
| ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที), B                              | 30           | 60           |
| ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 (ร้อยละโดยน้ำหนัก), C | 0.05         | 0.5          |
| ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์), D                           | 1            | 3            |

### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 ชั่งน้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นนำน้ำมันมะพร้าว 20 กรัมลงในเครื่องปฏิกรณ์

3.4.2 ชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาตามสัดส่วนที่กำหนดด้วยด้วยเครื่องชั่งสารความละเอียด 4 ตำแหน่ง ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาลงในเครื่องปฏิกรณ์แล้วประกอบเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับส่วนประกอบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.1

3.4.3 นำเครื่องปฏิกรณ์ใส่อากาศออกโดยการผ่านแก๊สไนโตรเจน จากนั้นทำการอัดแก๊สไฮโดรเจนจนได้ความดันที่กำหนด ทำการตรวจสอบรอยรั่วของแก๊สด้วยใช้น้ำสบู่ฉีดตามข้อต่อต่าง ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์

3.4.4 นำเครื่องปฏิกรณ์ต่อเข้ากับชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ เทอร์โมคัปเปิล และอุปกรณ์ขดลวดความร้อน จากนั้นหุ้มด้วยฉนวน เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง

3.4.5 ทำการทดลองตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด เมื่อครบกำหนดแล้วนำฉนวนและขดลวดความร้อนออก ใช้พัดลมเป่าเครื่องปฏิกรณ์จนมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ปลดปล่อยแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ออก แล้วนำเครื่องปฏิกรณ์พร้อมทั้งน้ำมันที่เหลืออยู่ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อหาร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส

3.4.6 กรองผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยอุปกรณ์การกรองแบบสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว เพื่อแยกส่วนที่เป็นของเหลวใสหลอดทดลอง นำไปปั่นเหวี่ยงตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอนให้ของเหลวที่ได้ไม่แยกชั้นหลังจากนั้นเก็บไว้ในขวดแก้วเพื่อรอการวิเคราะห์

3.4.7 ล้างเครื่องปฏิกรณ์ด้วยสารละลายโทลูอีน เช็ดทำความสะอาดด้วยกระดาษซับที่ได้ชั่งน้ำหนักไว้แล้ว จากนั้นนำส่วนที่เป็นของแข็งและกระดาษซับไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งเพื่อหาร้อยละผลได้ของแข็งที่เกิดขึ้น

3.4.8 นำผลิตภัณฑ์น้ำมันไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatography, DGC) เพื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดและวิเคราะห์องค์ประกอบของสารเคมีที่เกิดขึ้น

3.4.9 นำผลการวิเคราะห์การกระจายขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันมาคำนวณเพื่อหาร้อยละผลได้ของแนฟทา ร้อยละผลได้ของดีเซล และร้อยละการเปลี่ยนของกากน้ำมันตามลำดับ

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (\% Yield of gas)} = \left[ \frac{(W_1 + W_2 + W_3) - W_4}{W_2} \right] \times 100$$

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง (\% Yield of solid)} = \left[ \frac{W_5}{W_2} \right] \times 100$$

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน (\% Yield of liquid)} = 100 - \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส} - \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง}$$

$$\begin{aligned}
 \text{โดย } W_1 &= \text{น้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์} \\
 W_2 &= \text{น้ำหนักน้ำมันมะพร้าว} \\
 W_3 &= \text{น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา} \\
 W_4 &= \text{น้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์และผลิตภัณฑ์ที่เหลืออยู่หลังจากที่} \\
 &\quad \text{ทำการปล่อยแก๊สออก} \\
 W_5 &= \text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ของแข็งที่เกิดขึ้น}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละผลได้เนฟทาทั้งหมด (\% Overall naphtha yield)} &= \\
 \frac{\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน} \times \text{ร้อยละผลได้ของเนฟทา}}{100}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละผลได้เนฟทาทั้งหมด (\% Overall diesel yield)} &= \\
 \frac{\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน} \times \text{ร้อยละผลได้ของดีเซล}}{100}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละการเปลี่ยนของกาน้ำมันหนัก} &= \\
 \frac{(\text{ปริมาณกาน้ำมันหนักก่อนเกิดปฏิกิริยา} - \text{ปริมาณกาน้ำมันหนักหลังเกิดปฏิกิริยา}) \times 100}{\text{ปริมาณกาน้ำมันหนักก่อนเกิดปฏิกิริยา}}
 \end{aligned}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการ โดยออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  แฟกทอเรียล ( $2^k$  factorial design) และหาภาวะที่เหมาะสมของการทดลองทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น ผลิตภัณฑ์ของเหลวนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น เพื่อเป็นประโยชน์ในการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนการใช้้ำมันในอนาคตต่อไป และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้เปรียบเทียบกับน้ำมันแก๊สไลน์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งสามารถบอกถึงหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันเชื้อเพลิง

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น

##### 4.1.1 สมบัติทางกายภาพของน้ำมันมะพร้าว

- วิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันมะพร้าว ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1
- วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันมะพร้าวก่อนการทดลองด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.2
- วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันมะพร้าวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรสโกปีผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.3

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันมะพร้าวที่ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ทำให้เห็นว่าในน้ำมันมะพร้าวมีองค์ประกอบของกรดลอริกเป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 34.00 โดยน้ำหนักและเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันมะพร้าวจะเห็นว่าน้ำมันมะพร้าวมีร้อยละกรดไขมันอิ่มตัวรวม 76.95 โดยน้ำหนัก จะประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัว 2 ชนิดแรกคือ กรดลอริก (C12:0) และกรดไมริสติก (C14:0)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันมะพร้าว

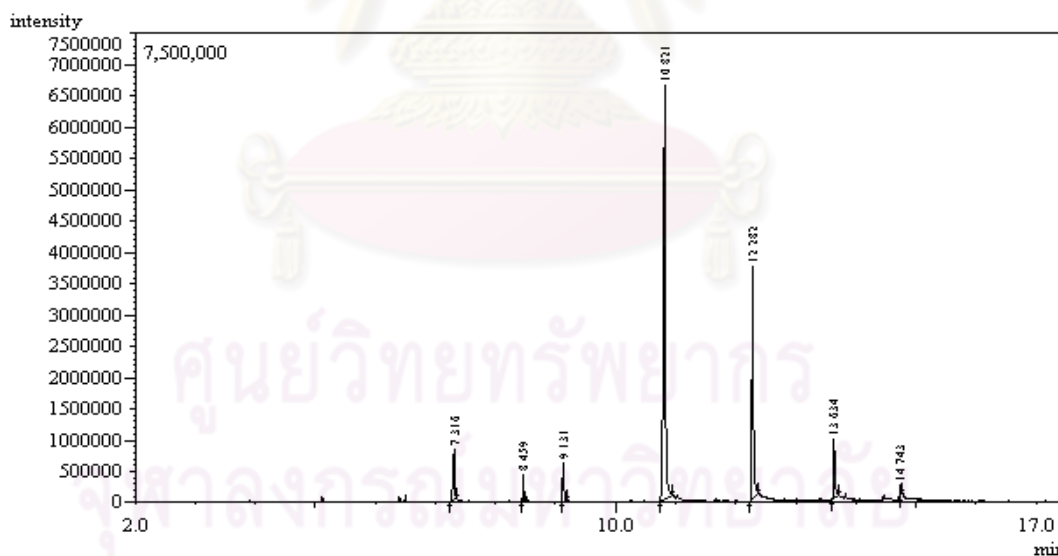
| Fatty acid composition            |           |   | Percentage (%) |
|-----------------------------------|-----------|---|----------------|
| Caprylic acid                     | C8:0      | = | 3.78           |
| Capric acid                       | C10:0     | = | 3.27           |
| Lauric acid                       | C12:0     | = | 34.00          |
| Myristic acid                     | C14:0     | = | 19.33          |
| Pentadecanoic acid                | C15:0     | = | 0.02           |
| Palmitic acid                     | C16:0     | = | 14.63          |
| Palmitoleic acid                  | C16:1 n-7 | = | 0.05           |
| Heptadecanoic acid                | C17:0     | = | 0.02           |
| Stearic acid                      | C18:0     | = | 1.72           |
| Cis-9-Octadecenoic acid           | C18:1 n-9 | = | 15.99          |
| Cis-9,12-Octadecadienoic acid     | C18:2 n-6 | = | 6.61           |
| Cis-9,12,15-Octadecatrienoic acid | C18:3 n-3 | = | 0.02           |
| Arachidic acid                    | C20:0     | = | 0.09           |
| Cis-11-Eicosenoic acid            | C20:1 n-9 | = | 0.12           |
| Behenic acid                      | C22:0     | = | 0.03           |
| Lignoceric acid                   | C24:0     | = | 0.06           |
| Unidentified peak                 |           | = | 0.26           |
| Total fatty acid                  |           | = | 100.00         |

ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น ตามวิธี ASTM D2887 สามารถหาองค์ประกอบเทียบเคียงกับผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าน้ำมันมะพร้าวมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกาน้ำมันหนักร้อยละ 80.22 โดยน้ำหนักและมีปริมาณของแนฟทาเพียงร้อยละ 1.09 โดยน้ำหนัก ซึ่งแนฟทาเป็นผลิตภัณฑ์หลักของงานวิจัยนี้ที่ต้องการสังเคราะห์ขึ้น เนื่องจากแนฟทาเป็นวัตถุดิบสำคัญสำหรับการผลิตเป็นน้ำมันแกโซลีน อีกทั้งเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตโอเลฟินและสารแอมโรแมติกต่าง ๆ

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของน้ำมันมะพร้าวตามจุดเดือด

| องค์ประกอบ    | Product distribution, % wt. |
|---------------|-----------------------------|
| Naphtha       | 1.09                        |
| Kerosene      | 0.22                        |
| Light gas oil | 17.92                       |
| Gas oil       | 0.55                        |
| Long residue  | 80.22                       |

จากรูปที่ 4.1 แสดงโครมาโตแกรมขององค์ประกอบต่าง ๆ ในน้ำมันมะพร้าวโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรสโกปี (Gas Chromatography-Mass Spectroscopy) พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของน้ำมันมะพร้าวเป็นกรดไขมันประเภทกรดลอริก และกรดไมริสติก ดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.1 โครมาโตแกรมของน้ำมันมะพร้าว

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของน้ำมันมะพร้าวโดย GC/MS

| พีค | เวลา R.T. (min) | องค์ประกอบ    | ร้อยละพื้นที่ |
|-----|-----------------|---------------|---------------|
| 1   | 7.316           | Caprylic acid | 7.04          |
| 2   | 8.459           | 2-Undecanone  | 1.49          |
| 3   | 9.131           | Capric acid   | 3.55          |
| 4   | 10.821          | Lauric acid   | 59.16         |
| 5   | 12.282          | Myristic acid | 22.23         |
| 6   | 13.634          | Palmitic acid | 5.77          |
| 7   | 14.743          | Oleic acid    | 0.76          |

#### 4.2 การออกแบบการทดลองแบบ $2^k$ แฟกทอเรียล [31, 32]

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ตาม ASTM D 2887 ของแนฟทา (Naphtha) และดีเซล (Diesel) และร้อยละการเปลี่ยนจากน้ำมันหนัก (Conversion of long residue) จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันมะพร้าวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 โดยออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  แฟกทอเรียล ( $2^k$  factorial) เป็นการศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนองของปัจจัยที่ต้องการศึกษา เพื่อลดจำนวนการทดลอง ซึ่งแต่ละตัวแปรที่ทำการศึกษามี 2 ระดับ คือ ระดับต่ำและระดับสูง ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย 4 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น โดยออกแบบการทดลองเป็น  $2^4$  แฟกทอเรียล 2 เพรพิกเกต (Replicate) โดยกำหนดให้

A คืออุณหภูมิค่าต่ำสุดที่ 360 องศาเซลเซียส (-) ค่าสูงสุดที่ 410 องศาเซลเซียส (+)

B คือระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาค่าต่ำสุดที่ 30 นาที (-) ค่าสูงสุดที่ 60 นาที (+)

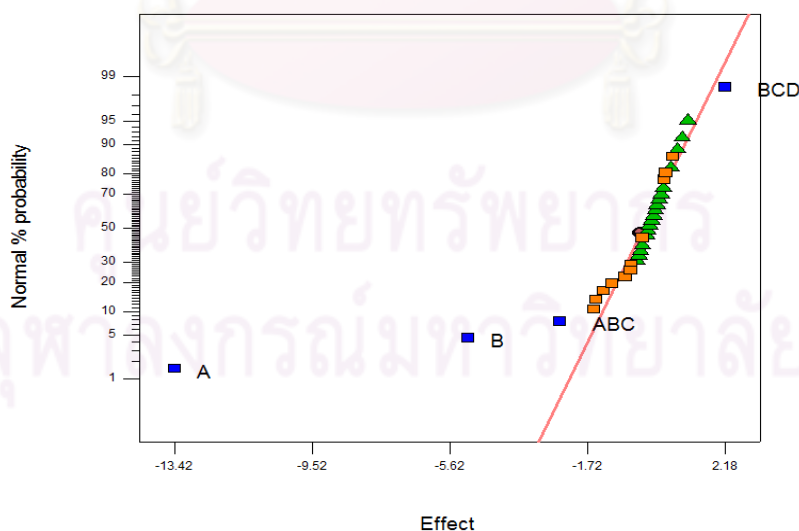
C คือปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก (-) ค่าสูงสุดที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก (+)

D คือความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นค่าต่ำสุดที่ 1 บาร์ (-) ค่าสูงสุดที่ 3 บาร์ (+)

จากการออกแบบการทดลองจะต้องทำทั้งหมด 32 การทดลอง และทำการทดลองที่ค่ากลาง (0) 3 ครั้งของตัวแปรคือ ที่ A = 385 องศาเซลเซียส B = 45 นาที C = ร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก D = 2 บาร์ เพื่อเป็นการตรวจสอบความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูล

#### 4.3 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

ปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 โดยออกแบบการทดลองเป็น  $2^4$  แฟกทอเรียล 2 เรพลิเคต และทำการทดลองที่ค่ากลาง 3 ครั้ง จากผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าค่าร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วง 54.67 – 79.72 โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.2 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ นำมาสร้างเป็น Normal probability plot พบว่าตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ (A) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (B) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ABC) และอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (BCD) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน

(Normal probability plot)

ตารางที่ 4.4 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันมะพร้าวบนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

| Run | Factors              |               |                     |                                  | Yield of liquid (% wt.) |
|-----|----------------------|---------------|---------------------|----------------------------------|-------------------------|
|     | Teemperature (°C), A | Time (min), B | Catalyst (% wt.), C | H <sub>2</sub> pressure (Bar), D |                         |
| 1   | 360                  | 30            | 0.05                | 1                                | 75.15                   |
| 2   |                      |               |                     |                                  | 79.72                   |
| 3   | 410                  | 30            | 0.05                | 1                                | 62.24                   |
| 4   |                      |               |                     |                                  | 65.25                   |
| 5   | 360                  | 60            | 0.05                | 1                                | 71.86                   |
| 6   |                      |               |                     |                                  | 75.11                   |
| 7   | 410                  | 60            | 0.05                | 1                                | 62.51                   |
| 8   |                      |               |                     |                                  | 64.57                   |
| 9   | 360                  | 30            | 0.5                 | 1                                | 78.01                   |
| 10  |                      |               |                     |                                  | 76.13                   |
| 11  | 410                  | 30            | 0.5                 | 1                                | 65.59                   |
| 12  |                      |               |                     |                                  | 67.39                   |
| 13  | 360                  | 60            | 0.5                 | 1                                | 75.04                   |
| 14  |                      |               |                     |                                  | 72.87                   |
| 15  | 410                  | 60            | 0.5                 | 1                                | 59.23                   |
| 16  |                      |               |                     |                                  | 54.67                   |
| 17  | 360                  | 30            | 0.05                | 3                                | 77.39                   |
| 18  |                      |               |                     |                                  | 78.65                   |
| 19  | 410                  | 30            | 0.05                | 3                                | 66.22                   |
| 20  |                      |               |                     |                                  | 69.28                   |
| 21  | 360                  | 60            | 0.05                | 3                                | 67.75                   |
| 22  |                      |               |                     |                                  | 73.35                   |

**ตารางที่ 4.4 (ต่อ) ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันมะพร้าวบนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5**

| Run | Factors              |               |                     |                                  | Yield of liquid (% wt.) |
|-----|----------------------|---------------|---------------------|----------------------------------|-------------------------|
|     | Teemperature (°C), A | Time (min), B | Catalyst (% wt.), C | H <sub>2</sub> pressure (Bar), D |                         |
| 23  | 410                  | 60            | 0.05                | 3                                | 60.38                   |
| 24  |                      |               |                     |                                  | 57.14                   |
| 25  | 360                  | 30            | 0.5                 | 3                                | 75.51                   |
| 26  |                      |               |                     |                                  | 76.50                   |
| 27  | 410                  | 30            | 0.5                 | 3                                | 66.31                   |
| 28  |                      |               |                     |                                  | 62.93                   |
| 29  | 360                  | 60            | 0.5                 | 3                                | 79.44                   |
| 30  |                      |               |                     |                                  | 76.17                   |
| 31  | 410                  | 60            | 0.5                 | 3                                | 57.05                   |
| 32  |                      |               |                     |                                  | 56.89                   |
| 33  | 385                  | 45            | 0.27                | 2                                | 70.68                   |
| 34  |                      |               |                     |                                  | 71.73                   |
| 35  |                      |               |                     |                                  | 72.85                   |

ในการทดลองนี้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจะพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % หรือระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 หมายความว่าตัวแปรนั้นทำให้ผลตอบสนองเบี่ยงเบนไปจากสมมุติฐานที่กำหนดไว้ใน การทดลอง หรืออีกนัยหนึ่งคือมีผลกระทบต่อการศึกษาอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน

| Source   | Sum of Squares | Degree of Freedom | Mean Square | F Value | P Value  |
|----------|----------------|-------------------|-------------|---------|----------|
| Model    | 1669.00        | 4                 | 417.25      | 72.62   | < 0.0001 |
| A        | 1391.09        | 1                 | 1391.09     | 242.10  | < 0.0001 |
| B        | 191.30         | 1                 | 191.30      | 33.29   | < 0.0001 |
| ABC      | 40.95          | 1                 | 40.95       | 7.13    | 0.0121   |
| BCD      | 45.65          | 1                 | 45.65       | 7.94    | 0.0085   |
| Residual | 172.38         | 30                | 5.75        |         |          |
| Total    | 1841.38        | 34                |             |         |          |

ตารางที่ 4.5 พบว่าค่า P-value ของตัวแปร A, B, ABC, BCD มีค่าน้อยกว่า 0.05 พบว่า อุณหภูมิ (A) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (B) อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ABC) และอัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (BCD) เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regression model) ได้ดังสมการที่ 4.1

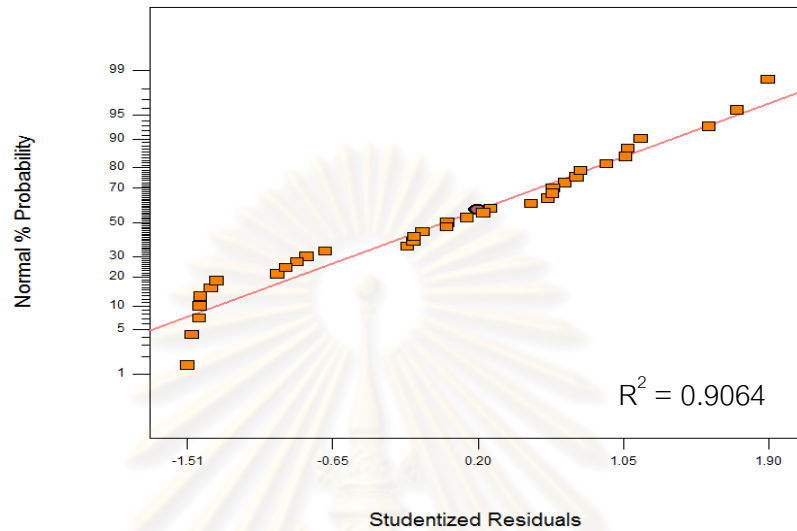
$$Yield\ of\ liquid = 69.19 - 6.59A - 2.45B - 1.13ABC + 1.19BCD \quad (4.1)$$

(โดยตัวแปร A, B, C และ D เป็นตัวแปรที่มีการเข้ารหัสอยู่ระหว่าง -1 และ 1 ค่าต่ำแทนด้วย -1 ค่าสูงแทนด้วย 1)

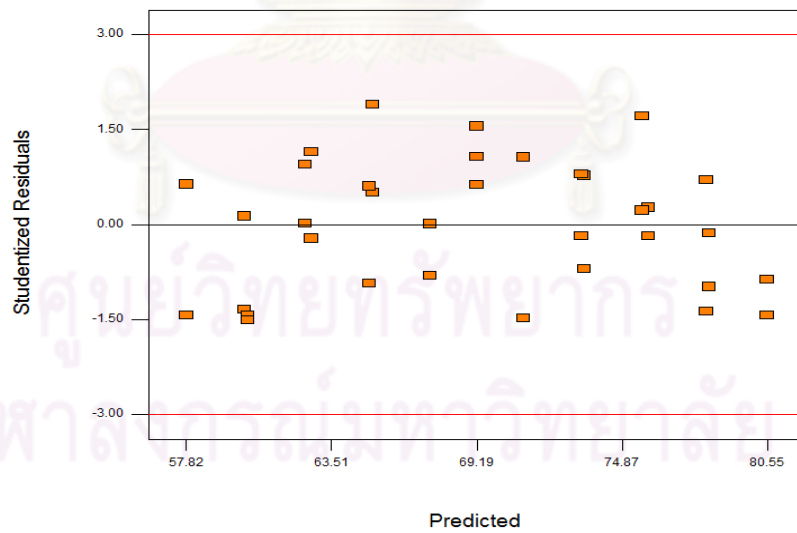
เมื่อนำแบบจำลองการถดถอยไปพล็อตกราฟเพื่อศึกษาการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน รูปที่ 4.3 แสดงกราฟ Normal % Probability ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 4.1 พบว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมีค่า  $R^2 = 0.9064$  มีค่าใกล้เคียง 1 แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบอิสระและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ เมื่อพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่ามีการ



กระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบแน่นอนและการกระจายตัวมีค่าคงที่ หมายความว่า การแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นตัวแทนข้อมูลได้อย่างเหมาะสม



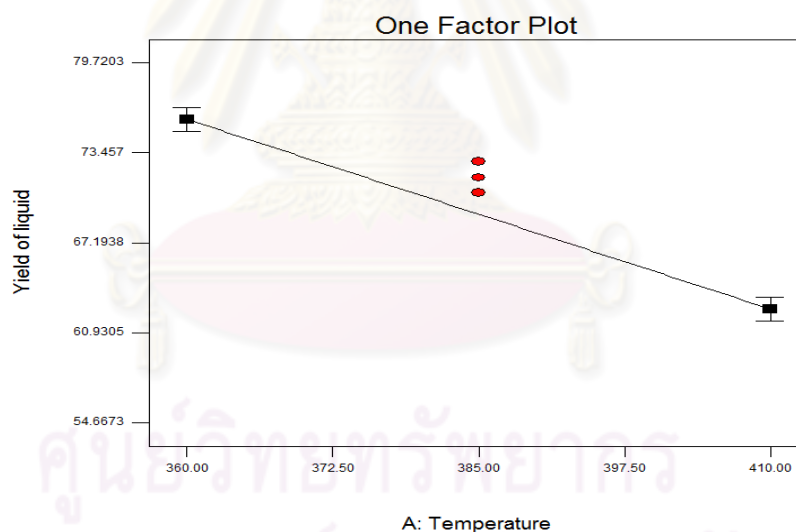
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal % Probability กับส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน

#### 4.3.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน

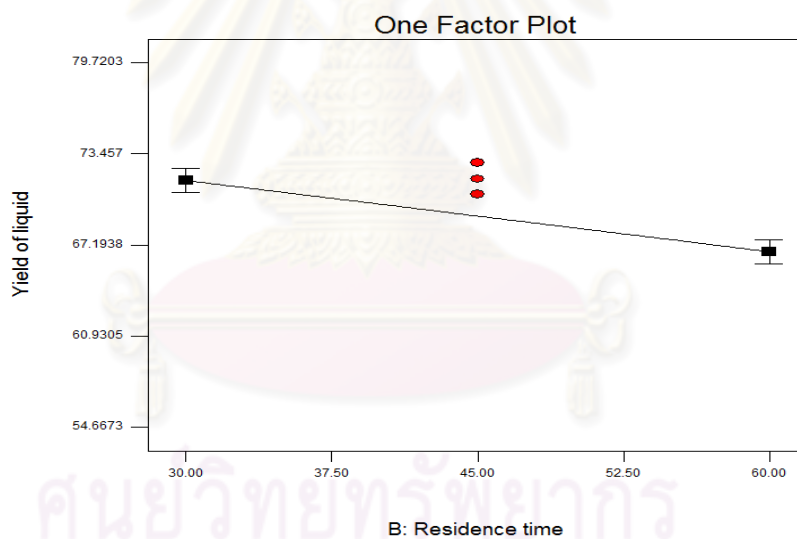
การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 360 องศาเซลเซียสจนถึง 410 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์ จะทำให้อัตราผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 75.78 เป็น 62.59 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการให้ความร้อนแก่ระบบในช่วงแรก อิทธิพลของอุณหภูมิจึงมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวด้วยความร้อน (thermal cracking) ทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก และการได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องจะทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็กแตกตัวไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น ส่งผลให้ที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแก๊สไฮโดรคาร์บอน ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส จึงมีปริมาณน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 360 ถึง 410 องศาเซลเซียส (● แสดงค่ากลางของข้อมูลที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์)

#### 4.3.2 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน

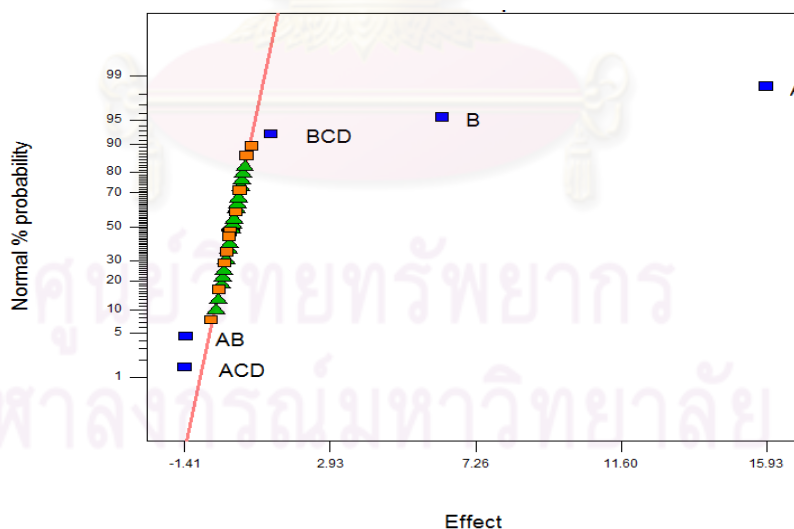
การศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที ถึง 60 นาที ที่อุณหภูมิ 385 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์ จะทำให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 71.63 เป็น 66.74 โดยน้ำหนัก เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงการแตกตัวด้วยความร้อนจะมีอิทธิพลอย่างมาก ทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่แตกตัวไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก และเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นปฏิกิริยาเคมีสามารถเกิดได้อย่างทั่วถึงทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กเกิดการแตกตัวต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน จึงพบว่าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแก๊สไฮโดรคาร์บอน ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที จึงน้อยกว่าที่ 30 นาที



รูปที่ 4.6 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 ถึง 60 นาที (● แสดงค่ากลางของข้อมูลที่อุณหภูมิ 385 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์)

#### 4.4 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

ปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 โดยออกแบบการทดลองเป็น  $2^4$  แฟกทอเรียล 2 เรพลิเคต และทำการทดลองที่ค่ากลาง 3 ครั้ง แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าค่าร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วง 54.67 – 79.72 โดยน้ำหนัก นำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น ซึ่งจะได้ร้อยละผลได้ของแนฟทาดังตารางที่ 4.6 พบว่าค่าร้อยละผลได้ของแนฟทาอยู่ในช่วง 6.34 – 30.90 โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.7 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ นำมาสร้างเป็น Normal probability plot พบว่าตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ (A) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (B) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (AB) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (ACD) และอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (BCD) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา (Normal probability plot)

ตารางที่ 4.6 ร้อยละผลได้ของเนฟทาและดีเซลจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันมะพร้าวบนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

| Run | Factors             |               |                     |                                  | Yield of Naptha, (% wt.) | Yield of Diesel, (% wt.) |
|-----|---------------------|---------------|---------------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
|     | Temperature (°C), A | Time (min), B | Catalyst (% wt.), C | H <sub>2</sub> pressure (Bar), D |                          |                          |
| 1   | 360                 | 30            | 0.05                | 1                                | 7.21                     | 48.11                    |
| 2   |                     |               |                     |                                  | 6.79                     | 50.29                    |
| 3   | 410                 | 30            | 0.05                | 1                                | 24.03                    | 22.01                    |
| 4   |                     |               |                     |                                  | 24.74                    | 24.01                    |
| 5   | 360                 | 60            | 0.05                | 1                                | 15.49                    | 34.04                    |
| 6   |                     |               |                     |                                  | 15.68                    | 35.49                    |
| 7   | 410                 | 60            | 0.05                | 1                                | 29.01                    | 13.02                    |
| 8   |                     |               |                     |                                  | 29.54                    | 14.05                    |
| 9   | 360                 | 30            | 0.5                 | 1                                | 7.63                     | 48.46                    |
| 10  |                     |               |                     |                                  | 7.27                     | 49.90                    |
| 11  | 410                 | 30            | 0.5                 | 1                                | 26.13                    | 22.28                    |
| 12  |                     |               |                     |                                  | 25.61                    | 21.51                    |
| 13  | 360                 | 60            | 0.5                 | 1                                | 14.07                    | 37.94                    |
| 14  |                     |               |                     |                                  | 13.65                    | 36.51                    |
| 15  | 410                 | 60            | 0.5                 | 1                                | 30.90                    | 15.21                    |
| 16  |                     |               |                     |                                  | 30.32                    | 13.06                    |
| 17  | 360                 | 30            | 0.05                | 3                                | 6.34                     | 52.27                    |
| 18  |                     |               |                     |                                  | 8.14                     | 49.77                    |
| 19  | 410                 | 30            | 0.05                | 3                                | 24.71                    | 23.30                    |
| 20  |                     |               |                     |                                  | 27.53                    | 23.19                    |
| 21  | 360                 | 60            | 0.05                | 3                                | 12.98                    | 35.64                    |
| 22  |                     |               |                     |                                  | 14.31                    | 37.79                    |

**ตารางที่ 4.6 (ต่อ)** ร้อยละผลได้ของแนฟทาและดีเซลจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันมะพร้าวบนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 (ต่อ)

| Run | Factors             |               |                     |                                  | Yield of Naptha, (% wt.) | Yield of Diesel, (% wt.) |
|-----|---------------------|---------------|---------------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
|     | Temperature (°C), A | Time (min), B | Catalyst (% wt.), C | H <sub>2</sub> pressure (Bar), D |                          |                          |
| 23  | 410                 | 60            | 0.05                | 3                                | 29.61                    | 16.79                    |
| 24  |                     |               |                     |                                  | 28.34                    | 17.44                    |
| 25  | 360                 | 30            | 0.5                 | 3                                | 6.81                     | 49.58                    |
| 26  |                     |               |                     |                                  | 8.64                     | 51.91                    |
| 27  | 410                 | 30            | 0.5                 | 3                                | 23.00                    | 25.02                    |
| 28  |                     |               |                     |                                  | 21.59                    | 23.45                    |
| 29  | 360                 | 60            | 0.5                 | 3                                | 17.39                    | 34.46                    |
| 30  |                     |               |                     |                                  | 16.49                    | 36.46                    |
| 31  | 410                 | 60            | 0.5                 | 3                                | 30.46                    | 13.96                    |
| 32  |                     |               |                     |                                  | 28.30                    | 15.10                    |
| 33  | 385                 | 45            | 0.27                | 2                                | 18.62                    | 27.83                    |
| 34  |                     |               |                     |                                  | 19.48                    | 29.48                    |
| 35  |                     |               |                     |                                  | 22.39                    | 29.18                    |

ในการทดลองนี้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของแนฟทาจะพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % หรือระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 หมายความว่าตัวแปรนั้นทำให้ผลตอบสนองเบี่ยงเบนไปจากสมมุติฐานที่กำหนดไว้ใน การทดลอง หรืออีกนัยหนึ่งคือมีผลกระทบต่อ การทดลองอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของร้อยละผลได้ของเนฟทา

| Source   | Sum of Squares | Degree of Freedom | Mean Square | F Value | P Value  |
|----------|----------------|-------------------|-------------|---------|----------|
| Model    | 2388.27        | 5                 | 477.65      | 406.59  | < 0.0001 |
| A        | 2031.12        | 1                 | 2031.12     | 1728.96 | < 0.0001 |
| B        | 315.02         | 1                 | 315.02      | 268.16  | < 0.0001 |
| AB       | 15.30          | 1                 | 15.30       | 13.03   | 0.0011   |
| ACD      | 15.90          | 1                 | 15.90       | 13.53   | 0.0010   |
| BCD      | 10.93          | 1                 | 10.93       | 9.30    | 0.0049   |
| Residual | 34.07          | 29                | 1.17        |         |          |
| Total    | 2422.34        | 34                |             |         |          |

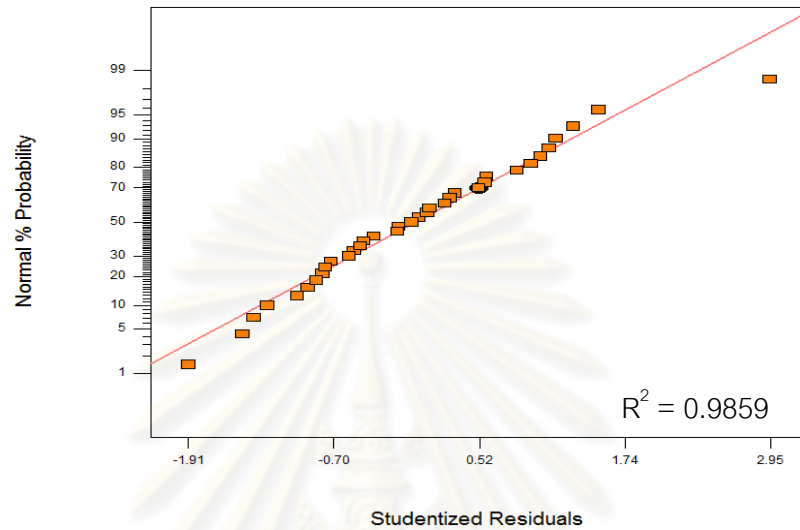
ตารางที่ 4.7 พบว่าค่า P-value ของตัวแปร A, B, AB, ACD, BCD มีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า อุณหภูมิ (A) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (B) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (AB) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (ACD) และอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (BCD) เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทา ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regression model) ได้ดังสมการที่ 4.2

$$\text{Yield of naphtha} = 19.23 + 7.97A + 3.14B - 0.69AB - 0.70ACD + 0.58BCD \quad (4.2)$$

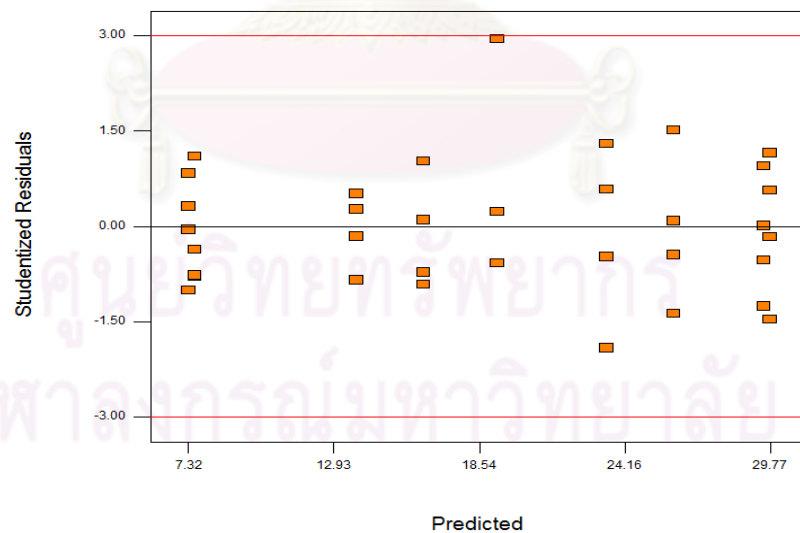
(โดยตัวแปร A, B, C และ D เป็นตัวแปรที่มีการเข้ารหัสอยู่ระหว่าง -1 และ 1 ค่าต่ำแทนด้วย -1 ค่าสูงแทนด้วย 1)

เมื่อนำแบบจำลองการถดถอยไปพล็อตกราฟเพื่อศึกษาการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน รูปที่ 4.8 แสดงกราฟ Normal % Probability ของร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 4.2 พบว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมีค่า  $R^2 = 0.9859$  มีค่าใกล้เคียง 1 แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบอิสระและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ เมื่อพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่ามีการกระจายตัว

ที่ไม่เป็นรูปแบบแน่นอนและการกระจายตัวมีค่าคงที่ หมายความว่า การแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นตัวแทนข้อมูลได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal % Probability กับส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ของเนฟทา

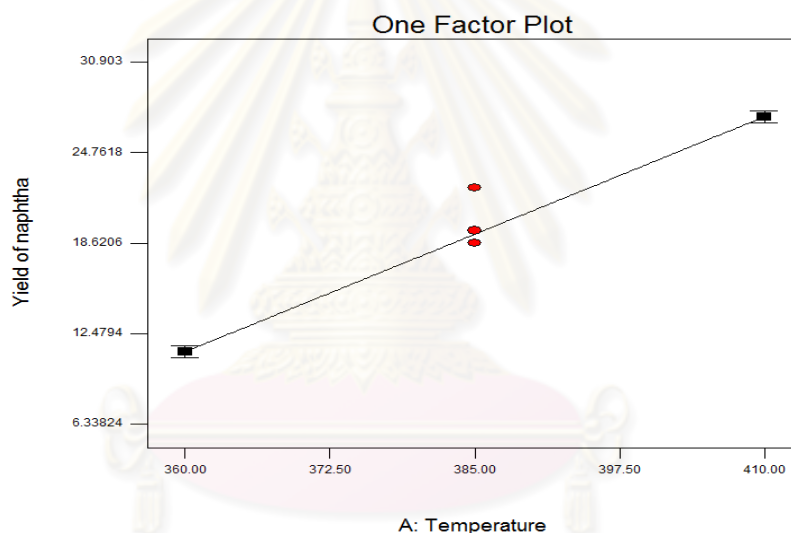


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของร้อยละผลได้ของเนฟทา



#### 4.4.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา จากรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 360 องศาเซลเซียสจนถึง 410 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์ จะทำให้อ้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 11.26 เป็น 27.20 โดยน้ำหนัก เนื่องจากในช่วงแรกอิทธิพลของอุณหภูมิมิมีผลอย่างมากต่อการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน โดยการเพิ่มอุณหภูมิภายในระบบจะทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่แตกตัวไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้ามามีบทบาทในการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ให้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจำพวกแนฟทา ส่งผลให้อ้อยละผลได้ของแนฟทามีปริมาณเพิ่มขึ้น

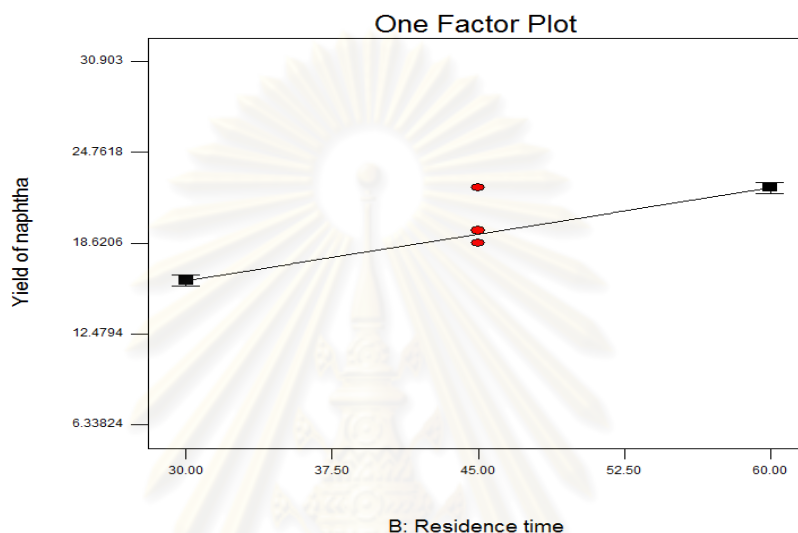


รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่อุณหภูมิ 360 ถึง 410 องศาเซลเซียส (● แสดงค่ากลางของข้อมูลที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์)

#### 4.4.2 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา

การศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาทีจนถึง 60 นาที ที่อุณหภูมิ 385 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์ ร้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 16.09 เป็น 22.37 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา จะทำให้ปฏิกิริยาภายในระบบเกิดการแตกตัวได้อย่างทั่วถึง โมเลกุล

ไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ถูกเปลี่ยนไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก และเกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่อง โดยได้รับอิทธิพลของการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในบรรยากาศของไฮโดรเจน ทำให้มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจำพวกแนฟทา ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของแนฟทามีปริมาณเพิ่มขึ้น

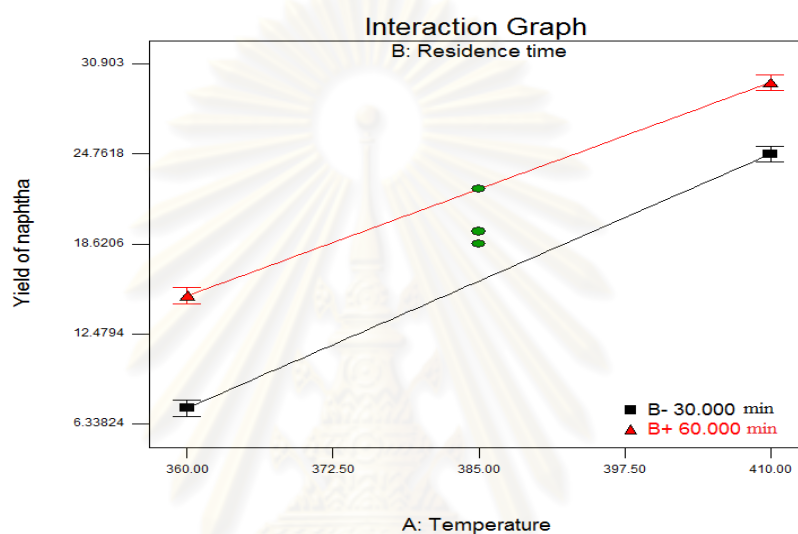


**รูปที่ 4.11** ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 ถึง 60 นาที (● แสดงค่ากลางของข้อมูลที่อุณหภูมิ 385 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์)

#### 4.4.3 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์ จากรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 360 องศาเซลเซียสถึง 410 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ร้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 7.43 เป็น 24.76 โดยน้ำหนัก และที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ร้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 15.09 เป็น 29.65 โดยน้ำหนัก แสดงว่าการเพิ่มทั้งอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลทำให้ร้อยละผลได้ของแนฟทามีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเป็นอิทธิพลของการแตกตัวด้วยความร้อน ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในระบบจะทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จำพวกโมเลกุลของ

กากน้ำมันหนัก เกิดการแตกตัวกลายเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง หลังจากนั้นเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาดำเนินต่อไปและเกิดการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในบรรยากาศของไฮโดรเจน โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางจะถูกเปลี่ยนเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กที่มีการจัดเรียงโมเลกุลให้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กที่มีความอึดตัว ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเนฟตามีปริมาณเพิ่มขึ้น

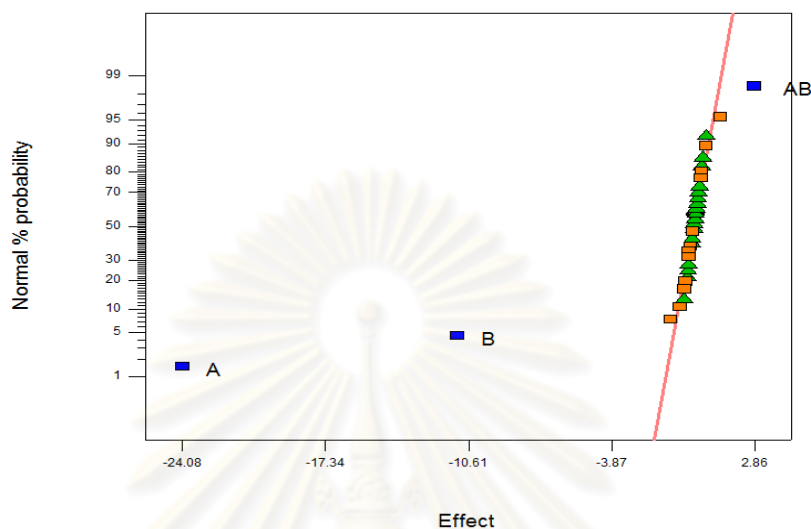


รูปที่ 4.12 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิ 360 ถึง 410 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 ถึง 60 นาที ต่อร้อยละผลได้ของเนฟตา (● แสดงค่ากลางของข้อมูลที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์)

4.5 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อร้อยละผลได้ของดีเซลจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

ปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 โดยออกแบบการทดลองเป็น  $2^4$  แฟกทอเรียล 2 เรพลิเคต และทำการทดลองที่ค่ากลาง 3 ครั้ง แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าค่าร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วง 54.67 – 79.72 โดยน้ำหนัก นำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น ซึ่งจะได้ร้อยละผลได้ของดีเซลดังตารางที่ 4.6 พบว่าค่าร้อยละผลได้ของดีเซลอยู่ในช่วง 13.02 – 52.27 โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.13 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ นำมาสร้างเป็น Normal probability plot พบว่าตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ (A) ระยะเวลาใน

การทำปฏิกิริยา (B) และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (AB) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซล



รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซล (Normal probability plot)

ในการทดลองนี้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของดีเซลจะพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % หรือระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 หมายความว่าตัวแปรนั้นทำให้ผลตอบสนองเบี่ยงเบนไปจากสมมุติฐานที่กำหนดไว้ใน การทดลอง หรืออีกนัยหนึ่งคือมีผลกระทบต่อ การทดลองอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของร้อยละผลได้ของดีเซล

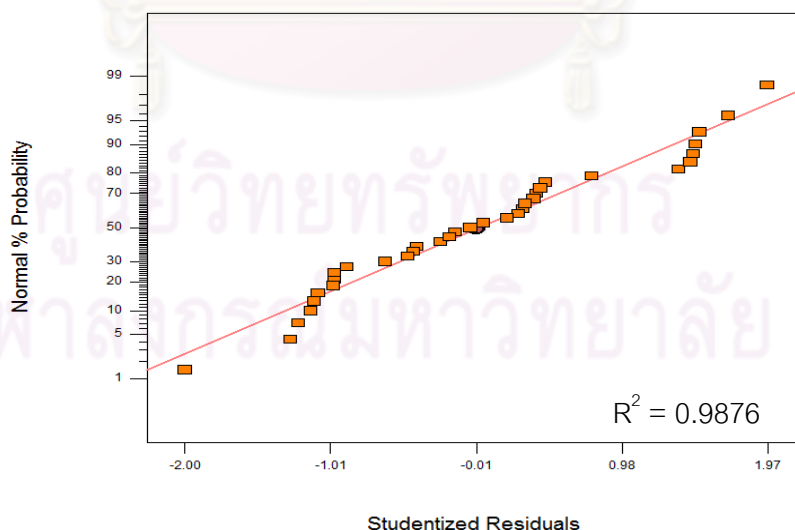
| Source   | Sum of Squares | Degree of Freedom | Mean Square | F Value | P Value  |
|----------|----------------|-------------------|-------------|---------|----------|
| Model    | 5693.71        | 3                 | 1897.90     | 825.14  | < 0.0001 |
| A        | 4637.02        | 1                 | 4637.02     | 2016.00 | < 0.0001 |
| B        | 991.09         | 1                 | 991.09      | 430.89  | < 0.0001 |
| AB       | 65.61          | 1                 | 65.61       | 28.52   | < 0.0001 |
| Residual | 71.30          | 31                | 2.30        |         |          |
| Total    | 5765.02        | 34                |             |         |          |

ตารางที่ 4.8 พบว่าค่า P-value ของตัวแปร A, B, AB มีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า คุณสมบัติ (A) และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (B) และอันตรกิริยาระหว่างคุณสมบัติ และเวลาในการทำปฏิกิริยา (AB) เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซล ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regression model) ได้ดังสมการที่ 4.3

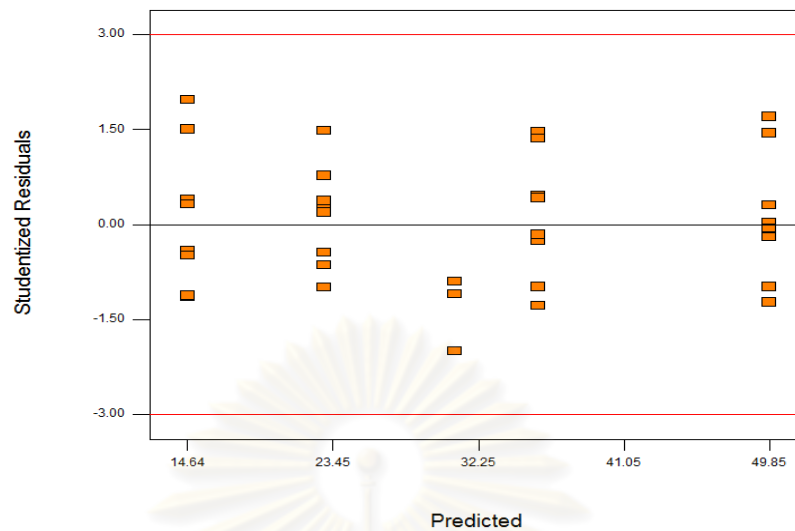
$$\text{Yield of diesel} = 30.81 - 12.04A - 5.57B + 1.43AB \quad (4.3)$$

(โดยตัวแปร A และ B เป็นตัวแปรที่มีการเข้ารหัสอยู่ระหว่าง -1 และ 1 ค่าต่ำแทนด้วย -1 ค่าสูงแทนด้วย 1)

เมื่อนำแบบจำลองการถดถอยไปพล็อตกราฟเพื่อศึกษาการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน รูปที่ 4.14 แสดงกราฟ Normal % Probability ของร้อยละผลได้ของดีเซลที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 4.3 พบว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมีค่า  $R^2 = 0.9876$  มีค่าใกล้เคียง 1 แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบอิสระและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ เมื่อพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่ามีการกระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบแน่นอนและการกระจายตัวมีค่าคงที่ หมายความว่า การแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นตัวแทนข้อมูลได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal % Probability กับส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ของดีเซล

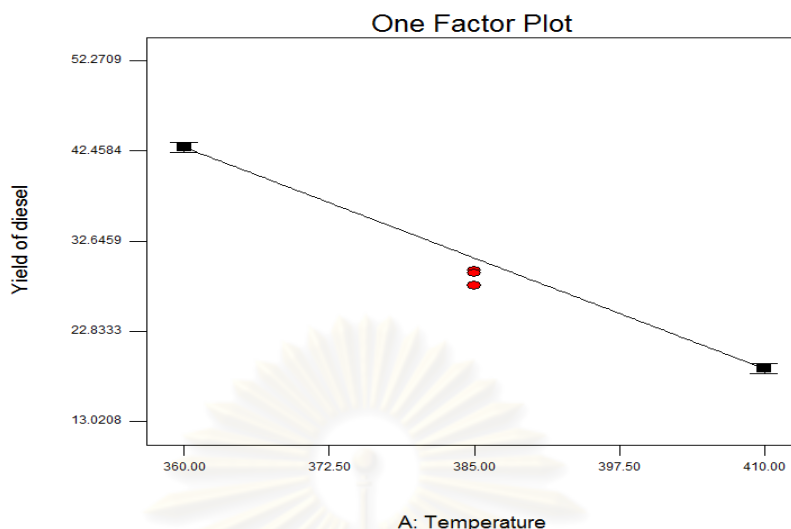


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของร้อยละผลได้ของดีเซล

#### 4.5.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของดีเซล

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของดีเซล จากรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 360 องศาเซลเซียสจนถึง 410 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์ ร้อยละผลได้ของดีเซลลดลงจาก 42.85 เป็น 18.78 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาภายในระบบเกิดการแตกตัวได้อย่างรุนแรง โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จำพวก โมเลกุลของกาน้ำมันหนักเกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก และได้รับอิทธิพลจากปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในบรรยากาศไฮโดรเจน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความอิมตัว ร้อยละผลได้ของโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าดีเซลเช่น แนฟทาจึงมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของดีเซลมีปริมาณลดลง

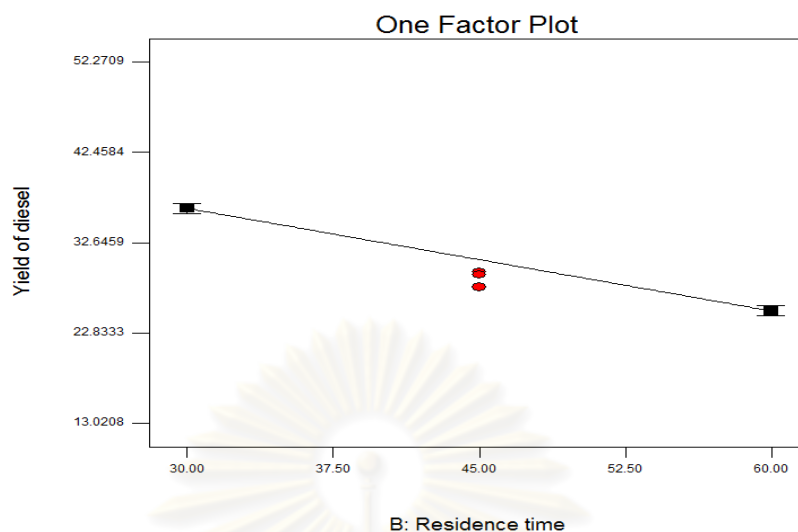
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.16 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่อุณหภูมิ 360 ถึง 410 องศาเซลเซียส (● แสดงค่ากลางของข้อมูลที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์)

#### 4.5.2 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซล

การศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซล จากรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาทีจนถึง 60 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 385 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์ ร้อยละผลได้ของดีเซลลดลงจาก 36.37 เป็น 25.25 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ปฏิกิริยาภายในระบบเกิดการแตกตัวได้อย่างทั่วถึง โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จำพวกกาน้ำมันหนักเกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง และเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในบรรยากาศไฮโดรเจนจะเข้ามามีบทบาทในการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กที่มีความอึดตัว ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าดีเซล เช่น แนฟทาที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ร้อยละผลได้ของดีเซลจึงมีปริมาณลดลง

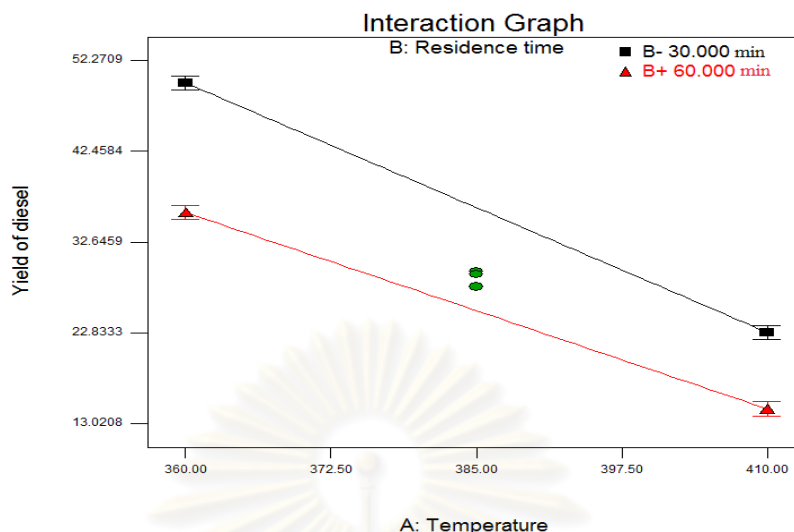


รูปที่ 4.17 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 ถึง 60 นาที (● แสดงค่ากลางของข้อมูลที่อุณหภูมิ 385 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์)

#### 4.5.3 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซล

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซล ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์ จากรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 360 องศาเซลเซียสถึง 410 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ร้อยละผลได้ของดีเซลลดลงจาก 49.84 เป็น 22.91 โดยน้ำหนัก และที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ร้อยละผลได้ของดีเซลลดลงจาก 35.85 เป็น 14.64 โดยน้ำหนัก แสดงว่าการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลทำให้ร้อยละผลได้ของดีเซลมีปริมาณลดลง เนื่องจากในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนจะมีอิทธิพลอย่างมากทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จำพวกโมเลกุลของกาน้ำมันหนักแตกตัวกลายเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง หลังจากนั้นเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาดำเนินต่อไปและการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในบรรยากาศของไฮโดรเจนจะเข้ามามีบทบาทในการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางกลายเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กที่มีความอิมตัว จึงทำให้ร้อยละผลได้ของดีเซลมีปริมาณลดลง

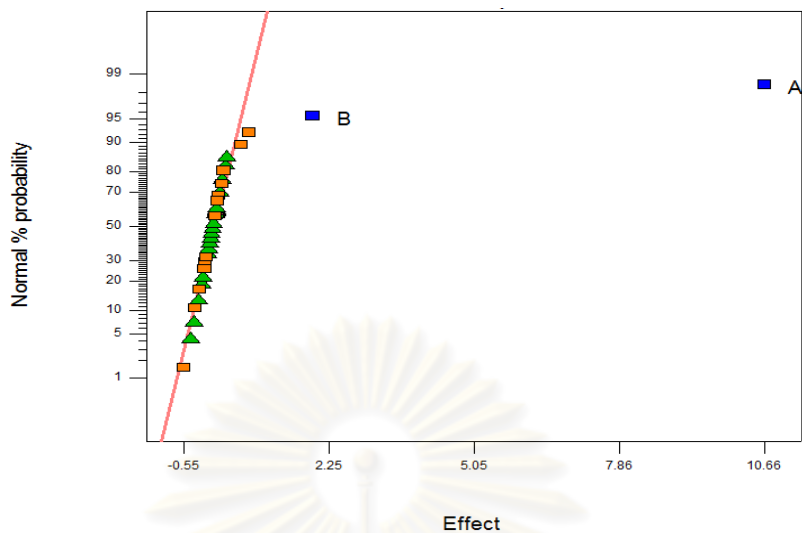




รูปที่ 4.18 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิ 360 ถึง 410 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 ถึง 60 นาที ต่อร้อยละผลได้ของดีเซล (● แสดงค่ากลางของข้อมูลที่มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์)

#### 4.6 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนัก จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

ปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 โดยออกแบบการทดลองเป็น  $2^4$  แฟกทอเรียล 2 เรพลิเคต และทำการทดลองที่ค่ากลาง 3 ครั้ง แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าค่าร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วง 54.67 – 79.72 โดยน้ำหนัก นำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น เพื่อหาปริมาณกากน้ำมันหนักที่เหลืออยู่ จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนัก จากผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนักอยู่ในช่วง 83.39 – 97.86 โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.19 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ นำมาสร้างเป็น Normal probability plot พบว่าตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ (A) และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (B) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนัก



รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนัก  
(Normal probability plot)

ตารางที่ 4.9 ร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนักจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันมะพร้าวบนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

| Run | Factors             |               |                     |                                  | Conversion of long residue (% wt.) |
|-----|---------------------|---------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------------|
|     | Temperature (°C), A | Time (min), B | Catalyst (% wt.), C | H <sub>2</sub> pressure (Bar), D |                                    |
| 1   | 360                 | 30            | 0.05                | 1                                | 85.13                              |
| 2   |                     |               |                     |                                  | 84.51                              |
| 3   | 410                 | 30            | 0.05                | 1                                | 95.43                              |
| 4   |                     |               |                     |                                  | 96.68                              |
| 5   | 360                 | 60            | 0.05                | 1                                | 86.22                              |
| 6   |                     |               |                     |                                  | 85.13                              |
| 7   | 410                 | 60            | 0.05                | 1                                | 96.85                              |
| 8   |                     |               |                     |                                  | 96.99                              |
| 9   | 360                 | 30            | 0.5                 | 1                                | 84.45                              |
| 10  |                     |               |                     |                                  | 86.02                              |

ตารางที่ 4.9 (ต่อ) ร้อยละการเปลี่ยนกาน้ำมันหนักจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันมะพร้าวบนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

| Run | Factors             |               |                     |                                  | Conversion of long residue (% wt.) |
|-----|---------------------|---------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------------|
|     | Temperature (°C), A | Time (min), B | Catalyst (% wt.), C | H <sub>2</sub> pressure (Bar), D |                                    |
| 11  | 410                 | 30            | 0.5                 | 1                                | 94.30                              |
| 12  |                     |               |                     |                                  | 94.98                              |
| 13  | 360                 | 60            | 0.5                 | 1                                | 85.03                              |
| 14  |                     |               |                     |                                  | 85.94                              |
| 15  | 410                 | 60            | 0.5                 | 1                                | 97.31                              |
| 16  |                     |               |                     |                                  | 97.86                              |
| 17  | 360                 | 30            | 0.05                | 3                                | 85.37                              |
| 18  |                     |               |                     |                                  | 83.39                              |
| 19  | 410                 | 30            | 0.05                | 3                                | 94.07                              |
| 20  |                     |               |                     |                                  | 93.71                              |
| 21  | 360                 | 60            | 0.05                | 3                                | 87.00                              |
| 22  |                     |               |                     |                                  | 85.22                              |
| 23  | 410                 | 60            | 0.05                | 3                                | 97.26                              |
| 24  |                     |               |                     |                                  | 97.40                              |
| 25  | 360                 | 30            | 0.5                 | 3                                | 84.17                              |
| 26  |                     |               |                     |                                  | 84.19                              |
| 27  | 410                 | 30            | 0.5                 | 3                                | 94.55                              |
| 28  |                     |               |                     |                                  | 94.35                              |
| 29  | 360                 | 60            | 0.5                 | 3                                | 86.99                              |
| 30  |                     |               |                     |                                  | 86.78                              |
| 31  | 410                 | 60            | 0.5                 | 3                                | 97.20                              |
| 32  |                     |               |                     |                                  | 97.13                              |

**ตารางที่ 4.9 (ต่อ)** ร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนักจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันมะพร้าวบนซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

| Run | Factors             |               |                     |                                  | Conversion of long residue (% wt.) |
|-----|---------------------|---------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------------|
|     | Temperature (°C), A | Time (min), B | Catalyst (% wt.), C | H <sub>2</sub> pressure (Bar), D |                                    |
| 33  | 385                 | 45            | 0.27                | 2                                | 93.10                              |
| 34  |                     |               |                     |                                  | 93.09                              |
| 35  |                     |               |                     |                                  | 91.43                              |

ในการทดลองนี้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนักจะพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % หรือระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 หมายความว่าตัวแปรนั้นทำให้ผลตอบสนองเบี่ยงเบนไปจากสมมุติฐานที่กำหนดไว้ในการทดลองหรืออีกนัยหนึ่งคือมีผลกระทบต่อทดลองอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.10

**ตารางที่ 4.10** การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนัก

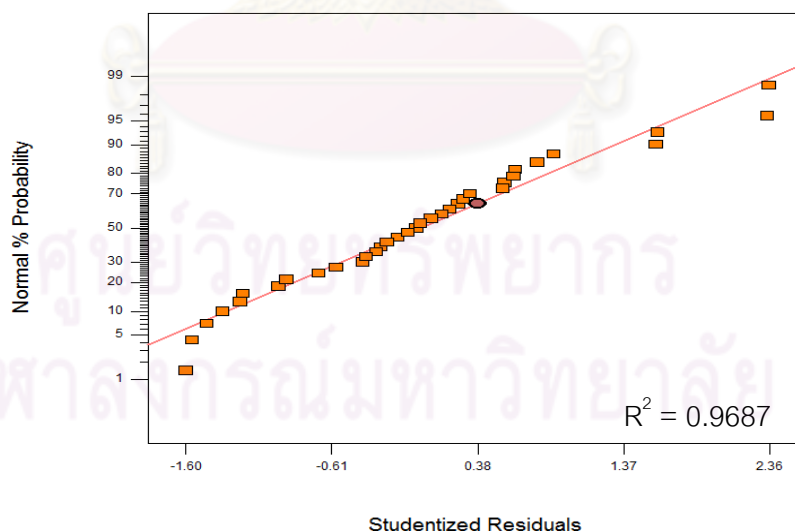
| Source   | Sum of Squares | Degree of Freedom | Mean Square | F Value | P Value  |
|----------|----------------|-------------------|-------------|---------|----------|
| Model    | 938.78         | 2                 | 469.39      | 496.00  | < 0.0001 |
| A        | 908.72         | 1                 | 908.72      | 960.24  | < 0.0001 |
| B        | 30.05          | 1                 | 30.05       | 31.76   | < 0.0001 |
| Residual | 30.28          | 32                | 0.95        |         |          |
| Total    | 969.06         | 34                |             |         |          |

ตารางที่ 4.10 พบว่าค่า P-value ของตัวแปร A, B มีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า อุณหภูมิ (A) และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (B) เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมัน ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regression model) ได้ดังสมการที่ 4.4

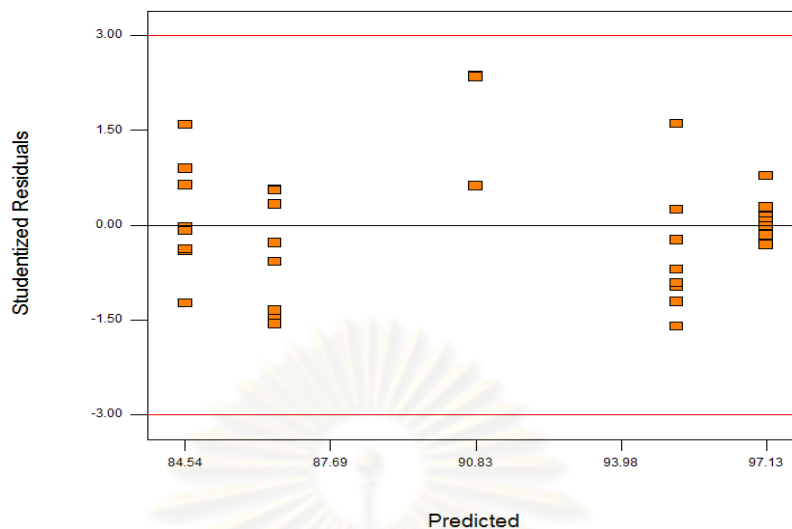
$$\text{Conversion} = 90.83 + 5.33A + 0.97B \quad (4.4)$$

(โดยตัวแปร A และ B เป็นตัวแปรที่มีการเข้ารหัสอยู่ระหว่าง -1 และ 1 ค่าต่ำแทนด้วย -1 ค่าสูงแทนด้วย 1)

เมื่อนำแบบจำลองการถดถอยไปพล็อตกราฟเพื่อศึกษาการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน รูปที่ 4.20 แสดงกราฟ Normal % Probability ของร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนักที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 4.4 พบว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมีค่า  $R^2 = 0.9687$  มีค่าใกล้เคียง 1 แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบอิสระและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ เมื่อพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายแสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าการกระจายตัวที่ไม่เป็นรูปแบบแน่นอนและการกระจายตัวมีค่าคงที่ หมายความว่า การแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นตัวแทนข้อมูลได้อย่างเหมาะสม



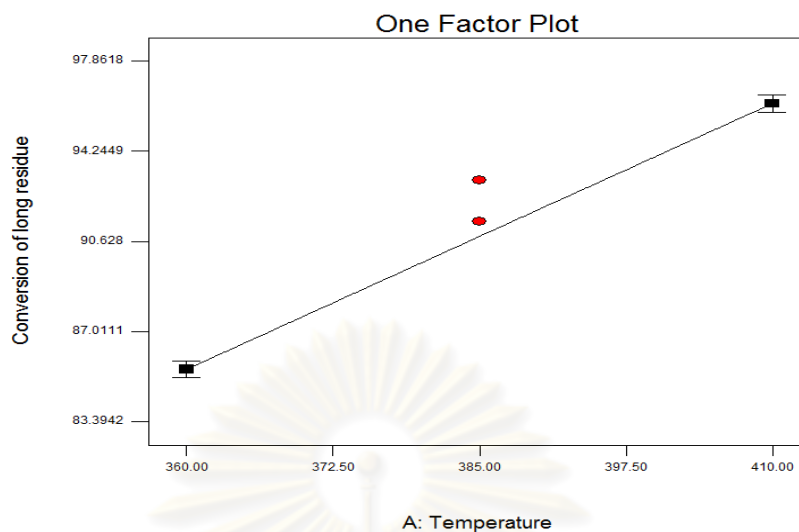
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal % Probability กับส่วนตกค้างของ ร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนัก



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของ  
ร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนัก

#### 4.6.1 ผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนัก

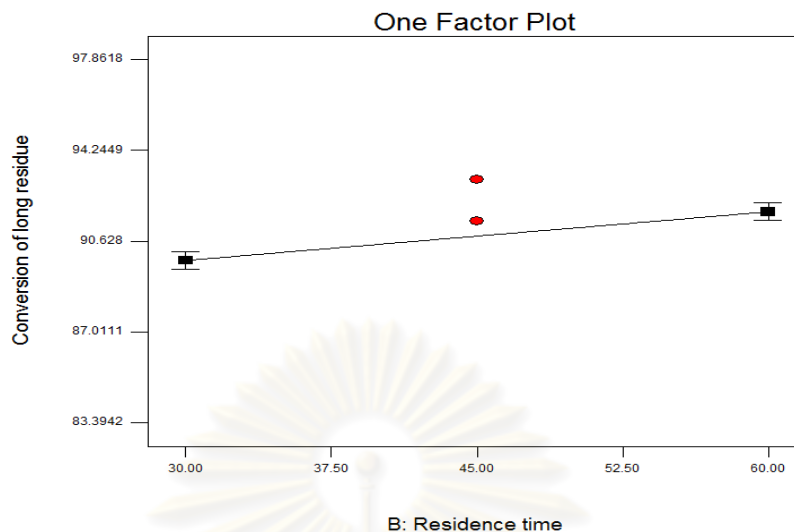
การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนัก จากรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 360 องศาเซลเซียสจนถึง 410 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์ ร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนักเพิ่มขึ้นจาก 85.50 เป็น 96.16 โดยน้ำหนัก เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาภายในระบบเกิดการแตกตัวได้อย่างรุนแรง โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จำพวกโมเลกุลกากน้ำมันหนักเกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็ก เช่น แนฟทา เคโรซีน ดีเซล ทำให้เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาโมเลกุลกากน้ำมันหนักจึงมีปริมาณลดลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณของโมเลกุลกากน้ำมันหนักน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนักที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียสมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส



**รูปที่ 4.22** ผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนักที่อุณหภูมิ 360 ถึง 410 องศาเซลเซียส (● แสดงค่ากลางของข้อมูลที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์)

#### 4.6.2 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนัก

การศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนัก จากรูปที่ 4.23 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาทีจนถึง 60 นาที ที่อุณหภูมิ 385 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์ ร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนักเพิ่มขึ้นจาก 89.86 เป็น 91.80 โดยน้ำหนัก เนื่องจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดได้อย่างทั่วถึง โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จำพวกโมเลกุลกากน้ำมันหนักจึงเกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง เช่น แนฟทา เคโรซีน ดีเซล และเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาส่งผลให้โมเลกุลของกากน้ำมันหนักที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาทีมีปริมาณน้อยกว่าที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ดังนั้นทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนกากน้ำมันหนักที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที มีค่าสูงกว่าที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



รูปที่ 4.23 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนจากน้ำมันหนักที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 ถึง 60 นาที (● แสดงค่ากลางของข้อมูลที่อุณหภูมิ 385 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2 บาร์)

#### 4.7 การหาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

การศึกษการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 โดยออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล โดยอาศัยโปรแกรม Design Expert 6.0.10 ได้มีการกำหนดขอบเขตปัจจัยที่ศึกษา เพื่อทำการหาภาวะที่เหมาะสม ซึ่งมีข้อกำหนดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.11

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.11 ขอบเขตสำหรับการหาภาวะที่เหมาะสม (A = อุณหภูมิ B = ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา C = ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา D = ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น)

| Name             | Goal        | Lower limit | Upper limit | Unit  |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| A                | Is in range | 360         | 410         | ° C   |
| B                | Is in range | 30          | 60          | min   |
| C                | Is in range | 0.05        | 0.5         | % wt. |
| D                | Is in range | 1           | 3           | bar   |
| Yield of gas     | Minimize    | 11.34       | 37.56       | % wt. |
| Yield of liquid  | Maximize    | 54.67       | 79.72       | % wt. |
| Yield of naphtha | Maximize    | 6.34        | 30.90       | % wt. |
| Yield of diesel  | Maximize    | 13.02       | 52.27       | % wt. |
| Conversion       | Maximize    | 83.39       | 97.86       | % wt. |

จากตารางที่ 4.11 จะพิจารณาค่าตอบสนองเพียง 5 ค่า คือ ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ร้อยละผลได้ของเนฟทา ร้อยละผลได้ของดีเซล และร้อยละการเปลี่ยนจากน้ำมันหนัก โดยจะพิจารณาให้มีค่าร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าน้อยที่สุด ส่วนค่าตอบสนองที่เหลือ ได้แก่ ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดของเนฟทาและดีเซล และร้อยละการเปลี่ยนจากน้ำมันหนัก พิจารณาให้มีค่ามากที่สุด โดยจะใช้โปรแกรม Design-Expert 6.0.10 ในการคำนวณหาภาวะที่เหมาะสม จากข้อกำหนดดังกล่าวจะได้ภาวะเหมาะสม คือ อุณหภูมิที่ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองจากภาวะที่เหมาะสมสำหรับการยืนยันข้อสรุปของสมการถดถอย

| Response                 | Predicted | Experimental data |
|--------------------------|-----------|-------------------|
| Yield of gas (% wt.)     | 22.30     | 21.87             |
| Yield of liquid (% wt.)  | 71.25     | 69.58             |
| Yield of naphtha (% wt.) | 18.88     | 21.93             |
| Yield of diesel (% wt.)  | 33.28     | 29.61             |
| Conversion (% wt.)       | 91.00     | 91.83             |

หลังจากนำภาวะที่เหมาะสมมาทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรม จะได้ผลการทดลองดังแสดงในตาราง 4.12 พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการถดถอยมีค่าไม่ต่างกันในทางสถิติ ทำให้สรุปได้ว่าสมการถดถอยสามารถทำนายค่าได้ดีในช่วงที่ทำการทดลอง

#### 4.7.1 การเปรียบเทียบผลการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %Fe/Ac

นำภาวะที่เหมาะสมที่ได้มาทำการเปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %Fe/Ac และกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Thermal cracking) โดยทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน แสดงดังตารางที่ 4.13

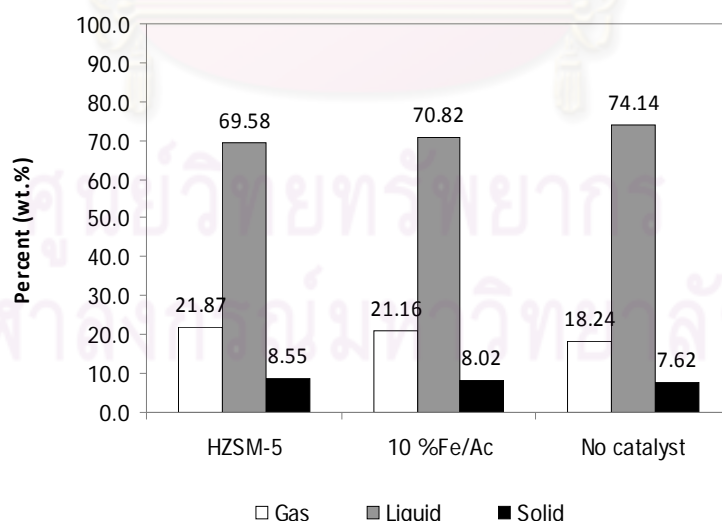
ตารางที่ 4.13 พื้นที่ผิวรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %Fe/Ac

| Catalyst  | BET surface area<br>(m <sup>2</sup> /g) | Pore volume<br>(cm <sup>3</sup> /g) | Average pore size<br>(°A) | Internal pore size<br>(°A) |
|-----------|---|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| HZSM-5    | 421.78                                  | 0.48                                | 46.01                     | 5.5 [27]                   |
| 10 %Fe/Ac | 763.91                                  | 0.41                                | 21.72                     | -                          |

\* ตัวเร่งปฏิกิริยา 13 %Fe/Ac มีขนาดรูพรุนภายใน 37 อังสตรอม [33]

จากตารางที่ 4.13 เมื่อเปรียบเทียบขนาดรูพรุนภายในของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสอง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %Fe/Ac มีพื้นที่ผิวรูพรุนมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และจากงานวิจัยของ Donald และคณะ ทำการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนภายในของตัวเร่งปฏิกิริยา 13%Fe/Ac พบว่ามีขนาดรูพรุนภายใน 37 อังสตรอม ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Fe/Ac ที่นำมาใช้ในในงานวิจัยนี้น่าจะมีขนาดรูพรุนภายในที่ใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยา 13%Fe/Ac ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 มีขนาดรูพรุนภายในอนุภาค 5.5 อังสตรอม ตามงานวิจัยของ Ooi และคณะ

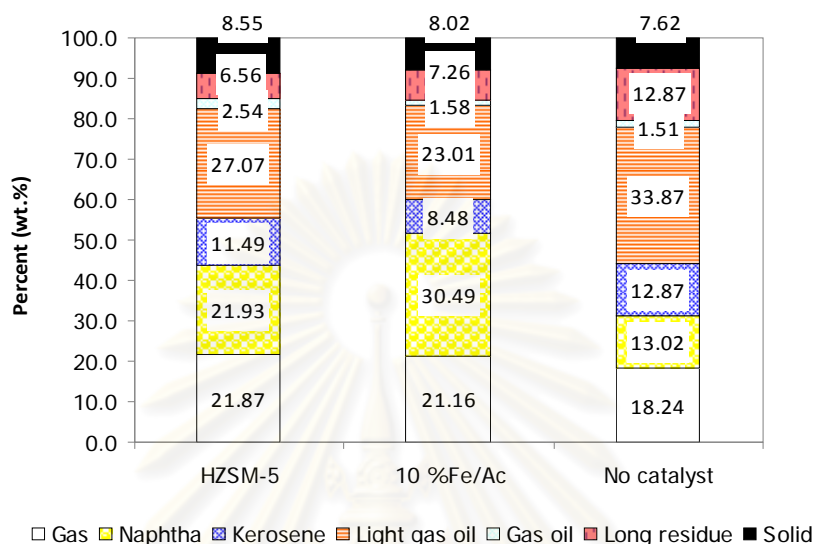
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %Fe/Ac และกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Thermal cracking) ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่ากรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มขึ้นและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีส่วนช่วยทำให้น้ำมันที่มีโมเลกุลขนาดกลางที่เกิดจากการแตกตัวด้วยความร้อน สามารถเกิดการแตกตัวต่อไปกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กจำพวกแก๊สไฮโดรคาร์บอน ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของแก๊สมีปริมาณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.24 ผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่นเพื่อหาค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือด แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.25 พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ร้อยละผลได้ของเนฟทาและแก๊สมากกว่ากรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วยจะมีกลไกของการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับผลของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ช่วยแตกโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางให้มีขนาดเล็กลง และควบคุมขนาดสายโซ่ที่เหมาะสมทำให้เกิดเป็นสัดส่วนของโมเลกุลที่มีขนาดเล็กจำพวกเนฟทามากขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %Fe/Ac พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %Fe/Ac จะให้ร้อยละผลได้ของเนฟทา 30.49 โดยน้ำหนักมากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ซึ่งให้ร้อยละผลได้ของเนฟทาเพียง 21.93 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %Fe/Ac ปฏิกิริยาการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนจะเกิดผ่านอนุมูลอิสระ (Free radical) บนผิวของถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ผลของความร้อนยังส่งผลทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระและเกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องที่ตำแหน่ง  $\beta$  ( $\beta$  - scission) ทำให้อนุมูลอิสระตัวใหม่ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลง และเหล็กซึ่งเป็นโลหะว่องไว (Active metal) จะช่วยในการดูดซับโมเลกุลของไฮโดรเจนทำให้โมเลกุลไฮโดรเจนเกิดการแตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ จากนั้นอนุมูลอิสระของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากันเอง [34] อีกทั้งขนาดรูพรุนภายในที่มากกว่าของตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %Fe/Ac จะทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางจำพวกแก๊สออยล์เกิดการแตกตัวต่อกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กจำพวกเนฟทาในปริมาณมาก ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ผลของความร้อนจะทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ หลังจากนั้นอนุมูลอิสระจะเกิดการแตกตัวให้มีขนาดเล็กลงและทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเพียงโมเลกุลเดียว (Recombination) หรือเกิดเป็นโมเลกุลย่อยสองโมเลกุล (Disproportionation) ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นพันธะเดี่ยวและสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่ ในขณะเดียวกันที่ตำแหน่งกรด Bronsted acid site ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 จะเกิดการให้โปรตอนกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่เกิดเป็นคาร์บอนเนียมไอออน และเกิดการแตกตัวของพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่ตำแหน่ง  $\beta$  ได้เป็นโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดเล็กลง [35] และเกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความอิมตัว นอกจากนี้ขนาดรูพรุนภายในของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 มีขนาดเล็กมาก ทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางเข้าไปทำปฏิกิริยาภายในรูพรุนได้ยาก ส่งผลทำให้เกิดการแตกตัวของ

โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนภายในรูพรุนได้น้อยลง ร้อยละผลได้ของแนฟทาเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 จึงมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10 %Fe/Ac



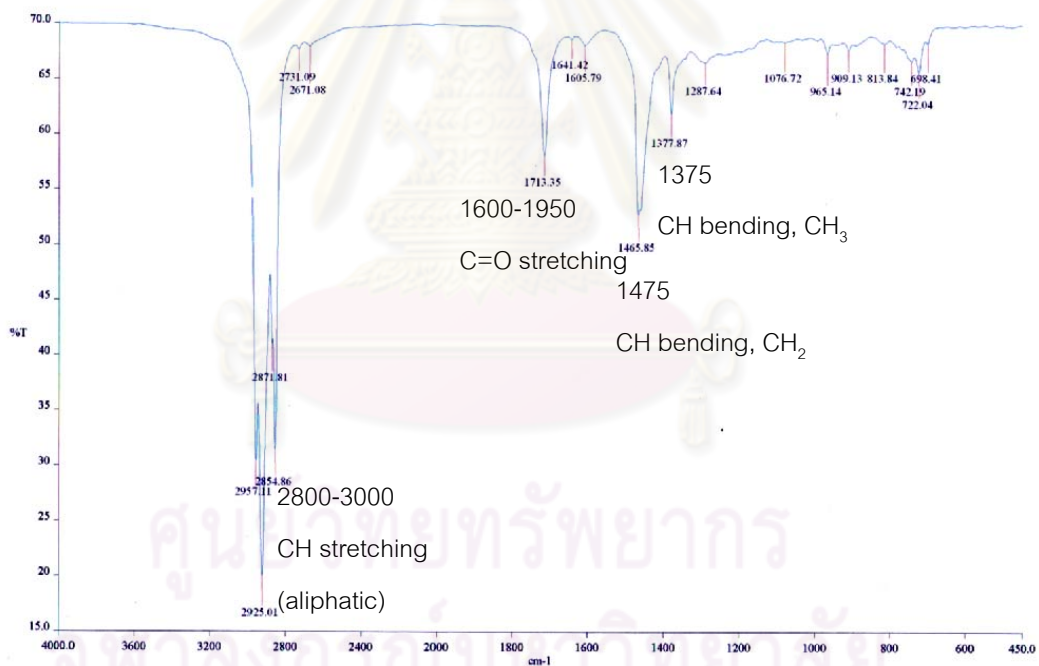
**รูปที่ 4.25** ผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

#### 4.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

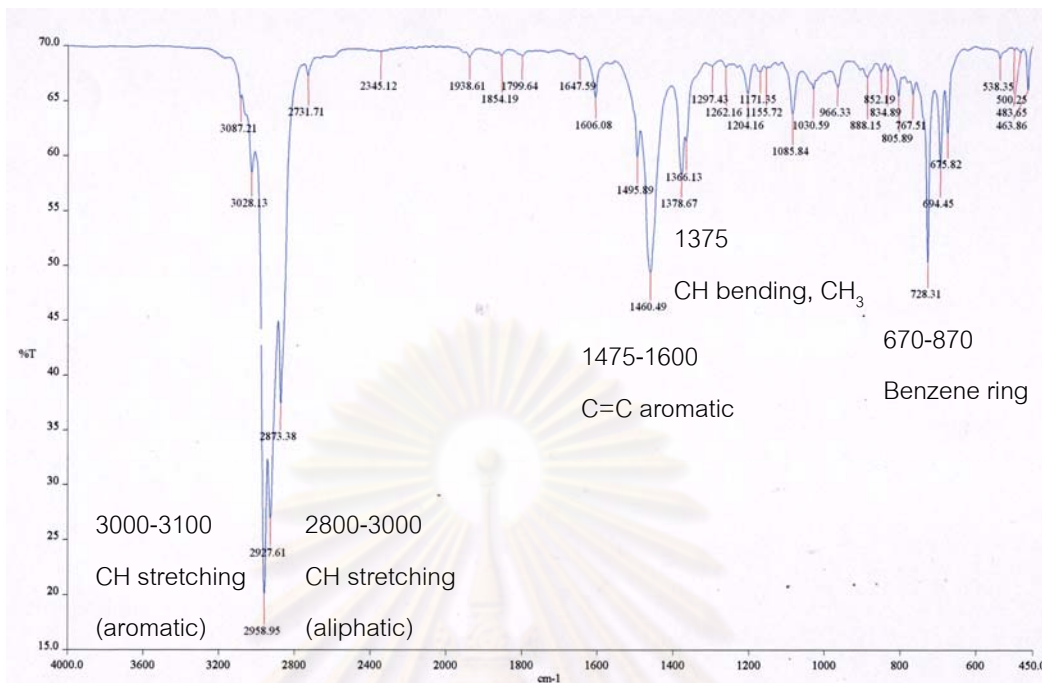
##### 4.8.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

จากการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 นำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมที่ อุณหภูมิ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ นำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared spectrometer, FT-IR) โดยทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันในช่วงจำนวนคลื่น 450-4000  $\text{cm}^{-1}$  แสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่าหมู่ฟังก์ชันหลักที่ปรากฏเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะลิฟาติก โดยพบจำนวนคลื่นสำคัญดังต่อไปนี้ จำนวนคลื่นที่ 2800-3000  $\text{cm}^{-1}$  แสดง CH (Stretching) ของสารประกอบอะลิฟาติก จำนวนคลื่นที่ 1600-1950  $\text{cm}^{-1}$  แสดงหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล จำนวนคลื่นที่ 1475  $\text{cm}^{-1}$  แสดง CH (bending) ของกลุ่มเมทิลีน และจำนวนคลื่นที่ 1375  $\text{cm}^{-1}$  แสดง CH (bending) ของกลุ่มเมทิล [36]

เมื่อนำน้ำมันแก๊ซโซลีน มาทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่าในน้ำมันแก๊ซโซลีนมีหมู่ฟังก์ชันหลักเป็น แอโรแมติกไฮโดรคาร์บอนและสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะลิฟาติก โดยพบจำนวนคลื่นดังต่อไปนี้ จำนวนคลื่นที่ 3000-3100  $\text{cm}^{-1}$  แสดง CH (Stretching) ของสารประกอบแอโรแมติก จำนวนคลื่นที่ 2800-3000  $\text{cm}^{-1}$  แสดง CH (Stretching) ของสารประกอบอะลิฟาติก จำนวนคลื่นที่ 1475-1600  $\text{cm}^{-1}$  แสดงพันธะคู่ของ C=C ในแอโรแมติก จำนวนคลื่นที่ 1375  $\text{cm}^{-1}$  แสดง CH (bending) ของกลุ่มเมทิล จำนวนคลื่นที่ 670-870  $\text{cm}^{-1}$  แสดงวงแหวนเบนซีน [36] เมื่อนำหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันและน้ำมันแก๊ซโซลีนมาทำการเปรียบเทียบพบว่า หมู่ฟังก์ชันหลักของน้ำมันทั้งสองชนิดมีลักษณะที่คล้ายกันคือเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะลิฟาติก แสดงดังตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.26 FT-IR สเปกตรัมจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์



รูปที่ 4.27 FT-IR สเปกตรัมของน้ำมันแกโซลีน ออกเทน 91

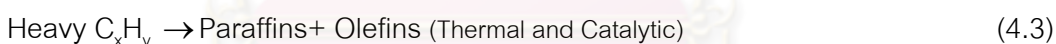
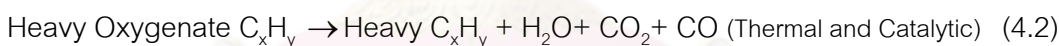
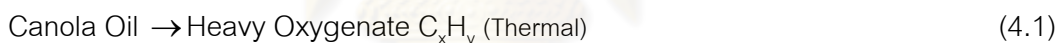
ตารางที่ 4.14 สรุปจำนวนคลื่นและหมู่ฟังก์ชันที่พบในผลิตภัณฑ์น้ำมัน

| จำนวนคลื่น (cm <sup>-1</sup> ) | หมู่ฟังก์ชัน    | ผลิตภัณฑ์น้ำมัน | น้ำมันแกโซลีน |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 3000-3100                      | CH ในแอโรเมติก  | --              | ✓             |
| 2800-3000                      | CH ในอะลิฟาติก  | ✓               | ✓             |
| 1600-1950                      | หมู่คาร์บอนิล   | ✓               | --            |
| 1475-1600                      | C=C ในแอโรเมติก | --              | ✓             |
| 1475                           | กลุ่มเมทิลีน    | ✓               | --            |
| 1375                           | กลุ่มเมทิล      | ✓               | ✓             |
| 670-870                        | วงแหวนเบนซีน    | --              | ✓             |

#### 4.8.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

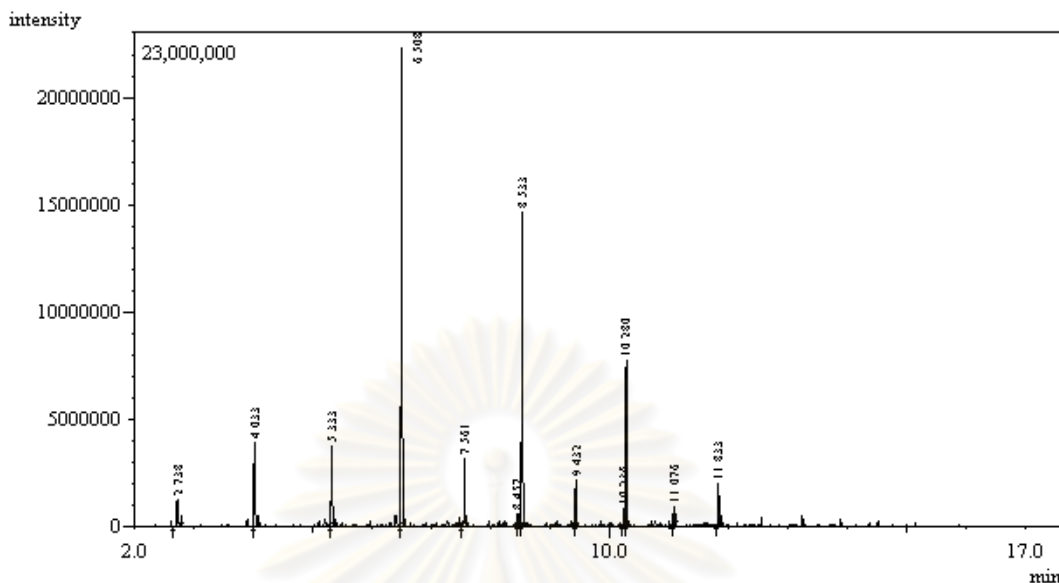
เมื่อทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบต่าง ๆ ในผลิตภัณฑ์น้ำมันจากภาวะที่เหมาะสมที่ อุณหภูมิ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรสโกปี (Gas Chromatography-Mass Spectroscopy) ซึ่งแสดงดัง

รูปที่ 4.28 และเมื่อทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากตารางที่ 4.15 กับองค์ประกอบของน้ำมันมะพร้าวก่อนการแตกตัวในตารางที่ 4.3 พบว่ากรดไขมันในน้ำมันมะพร้าวเกิดการแตกตัวกลายเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกแอลเคน ซึ่งประกอบไปด้วยอัลเดเคน ( $C_{11}H_{24}$ ), ไตรเดเคน ( $C_{13}H_{28}$ ), เพนตะเดเคน ( $C_{15}H_{32}$ ) เป็นส่วนใหญ่ และมีคีโตนบางส่วนเกิดขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนมีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่แตกตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง จากนั้นเมื่อปฏิกิริยาดำเนินต่อไปการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Cracking) จะเข้ามามีบทบาทในการแตกตัวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางโดยเลือกขนาดสายโซ่โมเลกุลจากขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความอิ่มตัว และจากงานวิจัยของ Katikaneni และคณะ [37] ทำการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันคาโนลาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 พบว่าน้ำมันคาโนลาซึ่งเป็นน้ำมันจากพืชจะเกิดการแตกตัวของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์เป็นสารประกอบประเภทออกซิเจนต เช่น คีโตนและแอลดีไฮด์ จากนั้นจะถูกดึงออกซิเจนออกเกิดเป็นโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ น้ำ คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดการแตกตัวต่อไปเป็นพาราฟินและโอเลฟินดังสมการที่ 4.1 – 4.3



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.28 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

ตารางที่ 4.15 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันมะพร้าวโดย GC/MS

| พีค | เวลา R.T. (min) | องค์ประกอบ      | ร้อยละพื้นที่ |
|-----|-----------------|-----------------|---------------|
| 1   | 2.738           | Octane          | 2.67          |
| 2   | 4.033           | Nonane          | 7.46          |
| 3   | 5.333           | Decane          | 6.61          |
| 4   | 6.508           | Undecane        | 32.91         |
| 5   | 7.561           | Dodecane        | 5.92          |
| 6   | 8.457           | 9-Heptadecanone | 0.76          |
| 7   | 8.533           | Tridecane       | 20.87         |
| 8   | 9.432           | Tetradecane     | 3.12          |
| 9   | 10.236          | 2-Tridecanone   | 1.23          |
| 10  | 10.280          | Pentadecane     | 13.79         |
| 11  | 11.076          | Hexadecane      | 1.25          |
| 12  | 11.833          | Heptadecane     | 3.42          |

#### 4.8.3 การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำมัน

เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมมาวิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่ ความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445 ค่าการกักคร่อนโลหะทองแดงตามมาตรฐาน ASTM D130-04 และค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D2015 เปรียบเทียบกับน้ำมันแกโซลีนและน้ำมันดีเซล ดังแสดงในตารางที่ 4.16 พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมมีค่าความหนืด 4.12 เซนติสโตรก มีค่าใกล้เคียงกับความหนืดของน้ำมันดีเซล (1.8-4.1 เซนติสโตรก) และมีค่าสูงกว่าความหนืดของน้ำมันแกโซลีน (0.53 เซนติสโตรก)

เมื่อวัดค่าการกักคร่อนโลหะทองแดง พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมไม่เกิดการกักคร่อนแผ่นโลหะทองแดง โดยสีของแผ่นทองแดงก่อนและหลังการทดสอบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการกักคร่อนแผ่นทองแดงแสดงถึงความสามารถในการกักคร่อนอุปกรณ์ที่ทำมาจากทองแดง หรือวัสดุที่มีส่วนผสมของทองแดงอยู่ เช่น ส่วนประกอบภายในหัวฉีดรถยนต์ และผลิตภัณฑ์น้ำมันมีค่าความร้อน 42.33 เมกะจูล/กิโลกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันแกโซลีนและน้ำมันดีเซล โดยการที่เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนสูงเวลาเผาไหม้จะให้พลังงานสูง

**ตารางที่ 4.16** ค่าความหนืด ค่าการกักคร่อนโลหะทองแดง และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากภาวะที่เหมาะสม

| ชนิดน้ำมัน                                 | ค่าความหนืด<br>(เซนติสโตรก) | ค่าการกักคร่อน<br>โลหะทองแดง     | ค่าความร้อน<br>(เมกะจูล/กิโลกรัม) |
|--|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| แกโซลีน                                    | 0.53                        | ไม่สูงกว่าหมายเลข <sup>a</sup>   | 47                                |
| ดีเซล                                      | 1.8-4.1 <sup>a</sup>        | ไม่สูงกว่าหมายเลข 1 <sup>a</sup> | 45                                |
| ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จาก<br>ภาวะที่เหมาะสม | 4.12*                       | ไม่เกิดการกักคร่อน*              | 42.33*                            |

<sup>a</sup> มาตรฐานคุณภาพน้ำมันแกโซลีนและน้ำมันดีเซล

\* ได้จากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ภาวะอุณหภูมิ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

#### 4.9 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

ในปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 จะมีผลิตภัณฑ์แก๊สเกิดขึ้นภายในระบบ ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์แก๊สของภาวะที่เหมาะสมที่อุณหภูมิ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สที่ภาวะที่เหมาะสม

| องค์ประกอบ                              | ร้อยละโดยปริมาตร |
|---|------------------|
| H <sub>2</sub>                          | 12.80            |
| CO                                      | 47.11            |
| CO <sub>2</sub>                         | 17.25            |
| CH <sub>4</sub>                         | 2.75             |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>           | 1.62             |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>           | 4.55             |
| C <sub>3</sub> <sup>+</sup> hydrocarbon | 13.92            |

พบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 47.11 และ 17.25 โดยปริมาตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการแตกตัวของปฏิกิริยาในขั้นตอนการดึงออกซิเจนตามสมการที่ 4.2 และแก๊สไฮโดรเจนที่เหลืออยู่ เป็นแก๊สที่ใส่ในระบบเพื่อช่วยในการแตกตัวร่วมของปฏิกิริยา ซึ่งอาจถูกใช้ไม่หมดจึงทำให้พบในผลิตภัณฑ์แก๊ส นอกจากนี้ยังพบแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนตั้งแต่หนึ่งอะตอมขึ้นไป ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 โดยออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิ 360-410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.05-0.5 โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-3 บาร์ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการ และคำนวณหาภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันมะพร้าวให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ผลิตภัณฑ์ของเหลวนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatography) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ คือ อุณหภูมิ (A) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (B) อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ABC) และอัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (BCD)
2. ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทาอย่างมีนัยสำคัญ คือ อุณหภูมิ (A) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (B) อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (AB) อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (ACD) และอัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (BCD)
3. ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ คือ อุณหภูมิ (A) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (B) และอัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (AB)

4. ปัจจัยหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนจากน้ำมันหนักอย่างมีนัยสำคัญ คือ อุณหภูมิ (A) และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (B)

5. ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 คือ

|                              |        |              |
|------------------------------|--------|--------------|
| อุณหภูมิ                     | 391.10 | องศาเซลเซียส |
| ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา     | 30     | นาที         |
| ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ | 0.5    | โดยน้ำหนัก   |
| ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น  | 1      | บาร์         |

โดยที่ภาวะการทดลองข้างต้นได้ ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 69.58 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส 21.87 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง 8.55 โดยน้ำหนัก เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาวิเคราะห์การกระจายตัวตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (DGC) พบว่าประกอบด้วย

|                                 |       |            |
|---------------------------------|-------|------------|
| ร้อยละผลได้ของเนฟทา             | 21.93 | โดยน้ำหนัก |
| ร้อยละผลได้ของเคโรซีน           | 11.49 | โดยน้ำหนัก |
| ร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์ชนิดเบา  | 27.07 | โดยน้ำหนัก |
| ร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์ชนิดหนัก | 2.54  | โดยน้ำหนัก |
| ร้อยละผลได้ของกากน้ำมัน         | 6.56  | โดยน้ำหนัก |

6. ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับอิทธิพลความร้อนมีส่วนช่วยในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนได้ดี อีกทั้งขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาจะควบคุมขนาดของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเนฟทาสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

7. เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันหลักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะลิฟาติกคล้ายกันกับในน้ำมันแกโซลีน

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในระดับต่อไป

1. ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ ที่เหมาะสม โดยเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถสังเคราะห์เองได้ และราคาไม่แพง รวมถึงการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่
2. ศึกษาน้ำมันพืชชนิดอื่น ๆ ที่สามารถหาได้ง่าย ราคาถูก เพื่อสามารถนำมาผลิตเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์
3. ศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และเชิงพาณิชย์ สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์ รวมทั้งศึกษาการนำมาใช้ได้จริง และการขยายขนาดให้ใหญ่ขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] นิธิยา รัตนานพนนท์. เคมีอาหาร. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์, 2545.
- [2] สุกัญญา สุนทรส และ วิเชียร ริมพลิชยกิจ. ชีวโมเลกุล. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [3] ประเภทของลิพิด [ออนไลน์]. Available from:  
<http://learners.in.th/blog/biochem/171449> [2010, February 22]
- [4] Saha, B.C. and Woodward, J. Fuel and Chemicals from Biomass. Acs. Symposium series 666, 1997.
- [5] ผลิตภัณฑ์จากพืชน้ำมัน [ออนไลน์]. Available from:  
[http://www.swu.ac.th/royal/book5/b5c3t1\\_4.html](http://www.swu.ac.th/royal/book5/b5c3t1_4.html) [2010, February 16]
- [6] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2550.
- [7] สุชาติ ไทยเพ็ชร์. การใช้ประโยชน์ต้นมะพร้าว. อนุสารไม้ัดบางนา 17, 93 (2531).
- [8] น้ำมันมะพร้าว [ออนไลน์]. Available from: <http://guru.sanook.com/pedia/spedia.php>  
[2010, February 16]
- [9] Breck, D.W. Zeolite Molecular Sieve: Structure, Chemistry and Use. New York: Wiley, 1974.
- [10] Herman, V.B., Edith M.F., Pierre, A.J. Introduction to Zeolite Science and Practice. ELSEVIER, 2001.
- [11] Szostak, R. Molecular Sieve Principle of Synthesis and Identification. New York: Nostand Reinhold, 1989.
- [12] Dyer, A. An Introduction to zeolite Molecular sieves. New York: John Wiley & Sons, 1988.
- [13] อธิชา ฉายสุวรรณ, วรินทร์ ชวศิริ และ วิมลรัตน์ ตระการพฤษ์. แคตตาลิสต์ในโพรงซีโอไลต์  
วายสำหรับการออกซิเดชันสารประกอบไฮโดรเจน. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

- [14] Baerlocher, Ch., Meier, W.M., Olson D.H. Atlas of Zeolite Framework Types. 5<sup>th</sup> ed. Zurich Switzerland: EELSEVIER, 2001.
- [15] Bhatia, S. Zeolite Catalysis: Principle and Application. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1900.
- [16] Kokotailo, G.T., Lawton, S.L., Olson, D.H. Structure of synthetic zeolite ZSM-5 Nature. Nature 272 (1978): 437-438.
- [17] ปราโมทย์ ไชยเวช และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [18] Raseev, S. Thermal and Catalytic cracking Processes in Petroleum Refining. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [19] Gary, J.H., Handwerk, G.H. Catalytic Hydrocracking and Hydroprocessing. New York: Marcel Dekker, 1984.
- [20] วีระชัย เปรมโยธิน. เชื้อเพลิงและปิโตรเคมี. ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2534.
- [21] มารีนา มงคล. การแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ และHZSM-5. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [22] ประชาธิ์ตันต์ แต้วกั๊ด. การแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [23] นิสา วิสุทธีรังสีอุไร. การแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิสไตรีนและน้ำมันพืชใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [24] อราดา วงศ์ศุภลักษณ์. การแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [25] Li, H., Shen, B., Kabalu, J.C., Nchare, M. Enhancing the production of biofuels from cottonseed oil by fixed-fluidized bed catalytic cracking. Renewable Energy 34 (2009): 1033–1039.



- [26] Tamunaidu, P., Bhatia, S. Catalytic cracking of palm oil for the production of biofuels: Optimization studies. Bioresource Technology 98 (2007): 3593–3601.
- [27] Ooi, Y., Zakaria, R., Mohamed, A., Bhatia, S. Catalytic conversion of palm oil-based fatty acid mixture to liquid fuel. Biomass and Bioenergy 27 (2004): 477 – 484.
- [28] Lima, D., Soares, V., Ribeiro, E., Carvalho, D., Cardoso, E., Rassi, F., Mundim, K., Rubim, J., Suarez, P. Diesel-like fuel obtained by pyrolysis of vegetable oil. Journal of Analytical and Apply Pyrolysis 71 (2004): 987–996.
- [29] Angyal, A., Miskolczi, N., Bartha, L. Petrochemical feedstock by thermal cracking of plastic waste. Journal of Analytical and Apply Pyrolysis 79 (2007): 409-414.
- [30] American Society for Testing and Materials D2887-93. Standard Test Method for Boiling Range Distribution of Petroleum Fractions by Gas Chromatography. Annual book of ASTM Standards. 1993.
- [31] ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2545.
- [32] Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments. 5<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [33] Donald, J., Xu, C., Hashimoto, H., Byambajav, E., Ohtsuka, Y. Novel carbon-based Ni/Fe catalysts derived from peat for hot gas ammonia decomposition in an inert helium atmosphere. Applied Catalysis A: General. 375 (2010): 124–133.
- [34] Fujimoto, K., Chang, J., Tsubaki, N. Hydrothermal cracking of residual oil. Sekiyu Gakkaishi. 43 (2000): 25-36.
- [35] Buchanan, J. S., Santiesteban, J. G., Haag, W. O. Mechanistic Considerations in Acid-Catalyzed Cracking of Olefins. JOURNAL OF CATALYSIS. 158 (1996): 279-287.
- [36] แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. Principles and Techniques of Instrumental Analysis. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

- [37] Katikaneni, S.P.R., Adjaye, J.D., Idem, R.O., Bakhshi, N.N. Catalytic conversion of canola oil over potassium-impregnated HZSM-5 catalysts: C-2-C-4 olefin production and model reaction studies. Ind. Eng. Chem. Res. 35 (1996): 3332–3346.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก1 ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ

| Run order | Factor           |            |              |                | Yield of gas (% wt.) | Yield of liquid (% wt.) | Yield of solid (% wt.) | Naphtha ((% wt.) | Kerosene (% wt.) | Light gas oil (% wt.) | Gas oil (% wt.) | Long residue (% wt.) |
|-----------|------------------|------------|--------------|----------------|----------------------|-------------------------|------------------------|------------------|------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|
|           | Temperature (°C) | Time (min) | Catalyst (g) | Pressure (bar) |                      |                         |                        |                  |                  |                       |                 |                      |
| 1         | 360              | 30         | 0.01         | 1              | 14.74                | 75.15                   | 10.11                  | 7.21             | 7.90             | 44.31                 | 3.80            | 11.93                |
| 2         | 360              | 30         | 0.01         | 1              | 11.34                | 79.72                   | 8.94                   | 6.79             | 10.22            | 46.77                 | 3.52            | 12.43                |
| 3         | 410              | 30         | 0.01         | 1              | 29.12                | 62.24                   | 8.65                   | 24.03            | 12.52            | 20.68                 | 1.33            | 3.67                 |
| 4         | 410              | 30         | 0.01         | 1              | 27.26                | 65.25                   | 7.49                   | 24.74            | 13.84            | 22.55                 | 1.46            | 2.66                 |
| 5         | 360              | 60         | 0.01         | 1              | 23.72                | 71.86                   | 4.42                   | 15.49            | 11.27            | 31.93                 | 2.11            | 11.06                |
| 6         | 360              | 60         | 0.01         | 1              | 18.85                | 75.11                   | 6.04                   | 15.68            | 12.01            | 32.97                 | 2.52            | 11.93                |
| 7         | 410              | 60         | 0.01         | 1              | 33.45                | 62.51                   | 4.04                   | 29.01            | 17.95            | 12.07                 | 0.95            | 2.53                 |
| 8         | 410              | 60         | 0.01         | 1              | 29.92                | 64.57                   | 5.51                   | 29.54            | 18.56            | 13.07                 | 0.98            | 2.42                 |

ตารางที่ ก1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ

| Run order | Factor           |            |              |                | Yield of gas (% wt.) | Yield of liquid (% wt.) | Yield of solid (% wt.) | Naphtha (% wt.) | Kerosene (% wt.) | Light gas oil (% wt.) | Gas oil (% wt.) | Long residue (% wt.) |
|-----------|------------------|------------|--------------|----------------|----------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|
|           | Temperature (°C) | Time (min) | Catalyst (g) | Pressure (bar) |                      |                         |                        |                 |                  |                       |                 |                      |
| 9         | 360              | 30         | 0.1          | 1              | 14.40                | 78.01                   | 7.60                   | 7.63            | 9.45             | 46.07                 | 2.38            | 12.47                |
| 10        | 360              | 30         | 0.1          | 1              | 15.91                | 76.13                   | 7.96                   | 7.27            | 7.74             | 46.34                 | 3.56            | 11.22                |
| 11        | 410              | 30         | 0.1          | 1              | 25.93                | 65.59                   | 8.48                   | 26.13           | 12.60            | 21.88                 | 0.40            | 4.58                 |
| 12        | 410              | 30         | 0.1          | 1              | 27.16                | 67.39                   | 5.44                   | 25.61           | 16.25            | 20.28                 | 1.23            | 4.03                 |
| 13        | 360              | 60         | 0.1          | 1              | 17.82                | 75.04                   | 7.14                   | 14.07           | 11.01            | 36.26                 | 1.68            | 12.01                |
| 14        | 360              | 60         | 0.1          | 1              | 18.02                | 72.87                   | 9.11                   | 13.65           | 11.43            | 36.14                 | 0.37            | 11.28                |
| 15        | 410              | 60         | 0.1          | 1              | 36.63                | 59.23                   | 4.13                   | 30.90           | 10.96            | 14.37                 | 0.84            | 2.16                 |
| 16        | 410              | 60         | 0.1          | 1              | 37.43                | 54.67                   | 7.90                   | 30.32           | 9.57             | 12.39                 | 0.66            | 1.72                 |
| 17        | 360              | 30         | 0.01         | 3              | 12.86                | 77.39                   | 9.75                   | 6.34            | 7.04             | 49.85                 | 2.43            | 11.74                |
| 18        | 360              | 30         | 0.01         | 3              | 12.91                | 78.65                   | 8.44                   | 8.14            | 7.42             | 47.06                 | 2.71            | 13.32                |
| 19        | 410              | 30         | 0.01         | 3              | 26.99                | 66.22                   | 6.79                   | 24.71           | 13.46            | 21.16                 | 2.14            | 4.75                 |
| 20        | 410              | 30         | 0.01         | 3              | 23.65                | 69.28                   | 7.06                   | 27.53           | 13.52            | 21.72                 | 1.47            | 5.04                 |

ตารางที่ ก1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ

| Run order | Factor           |            |              |                | Yield of gas (% wt.) | Yield of liquid (% wt.) | Yield of solid (% wt.) | Naphtha (% wt.) | Kerosene (% wt.) | Light gas oil (% wt.) | Gas oil (% wt.) | Long residue (% wt.) |
|-----------|------------------|------------|--------------|----------------|----------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|
|           | Temperature (°C) | Time (min) | Catalyst (g) | Pressure (bar) |                      |                         |                        |                 |                  |                       |                 |                      |
| 21        | 360              | 60         | 0.01         | 3              | 23.27                | 67.75                   | 8.99                   | 12.98           | 8.70             | 33.29                 | 2.35            | 10.43                |
| 22        | 360              | 60         | 0.01         | 3              | 17.58                | 73.35                   | 9.06                   | 14.31           | 9.39             | 35.11                 | 2.68            | 11.85                |
| 23        | 410              | 60         | 0.01         | 3              | 32.85                | 60.38                   | 6.77                   | 29.61           | 11.78            | 15.93                 | 0.85            | 2.20                 |
| 24        | 410              | 60         | 0.01         | 3              | 35.88                | 57.14                   | 6.97                   | 28.34           | 9.27             | 16.52                 | 0.93            | 2.09                 |
| 25        | 360              | 30         | 0.1          | 3              | 16.44                | 75.51                   | 8.05                   | 6.81            | 6.43             | 47.51                 | 2.07            | 12.70                |
| 26        | 360              | 30         | 0.1          | 3              | 13.53                | 76.50                   | 9.97                   | 8.64            | 3.27             | 49.81                 | 2.10            | 12.69                |
| 27        | 410              | 30         | 0.1          | 3              | 27.39                | 66.31                   | 6.30                   | 23.00           | 13.92            | 23.47                 | 1.55            | 4.37                 |
| 28        | 410              | 30         | 0.1          | 3              | 29.12                | 62.93                   | 7.95                   | 21.59           | 13.35            | 21.98                 | 1.47            | 4.54                 |
| 29        | 360              | 60         | 0.1          | 3              | 16.10                | 79.44                   | 4.46                   | 17.39           | 17.15            | 30.90                 | 3.56            | 10.44                |
| 30        | 360              | 60         | 0.1          | 3              | 20.72                | 76.17                   | 3.11                   | 16.49           | 12.62            | 33.75                 | 2.71            | 10.60                |
| 31        | 410              | 60         | 0.1          | 3              | 37.52                | 57.05                   | 5.43                   | 30.46           | 10.38            | 13.79                 | 0.17            | 2.25                 |
| 32        | 410              | 60         | 0.1          | 3              | 37.56                | 56.89                   | 5.54                   | 28.30           | 11.18            | 14.99                 | 0.12            | 2.31                 |

ตารางที่ ก1 (ต่อ) ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ

| Run order | Factor           |            |              |                | Yield of gas (% wt.) | Yield of liquid (% wt.) | Yield of solid (% wt.) | Naphtha (% wt.) | Kerosene (% wt.) | Light gas oil (% wt.) | Gas oil (% wt.) | Long residue (% wt.) |
|-----------|------------------|------------|--------------|----------------|----------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|
|           | Temperature (°C) | Time (min) | Catalyst (g) | Pressure (bar) |                      |                         |                        |                 |                  |                       |                 |                      |
| 33        | 385              | 45         | 0.055        | 2              | 23.98                | 70.68                   | 5.33                   | 18.62           | 18.70            | 25.74                 | 2.09            | 5.54                 |
| 34        | 385              | 45         | 0.055        | 2              | 22.45                | 71.73                   | 5.82                   | 19.48           | 17.22            | 27.36                 | 2.12            | 5.55                 |
| 35        | 385              | 45         | 0.055        | 2              | 20.63                | 72.85                   | 6.52                   | 22.39           | 14.41            | 26.45                 | 2.73            | 6.87                 |

ตารางที่ ก2 ผลการทดลองเปรียบเทียบผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ที่ภาวะที่เหมาะสม

| Type catalyst | Factor           |            |              |                | Yield of gas (% wt.) | Yield of liquid (% wt.) | Yield of solid (% wt.) | Naphtha (% wt.) | Kerosene (% wt.) | Light gas oil (% wt.) | Gas oil (% wt.) | Long residue (% wt.) |
|---------------|------------------|------------|--------------|----------------|----------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|
|               | Temperature (°C) | Time (min) | Catalyst (g) | Pressure (bar) |                      |                         |                        |                 |                  |                       |                 |                      |
| HZSM-5        | 391.1            | 30         | 0.1          | 1              | 21.87                | 69.58                   | 8.55                   | 21.93           | 11.49            | 27.07                 | 2.54            | 6.56                 |
| 10 %Fe/Ac     | 391.1            | 30         | 0.1          | 1              | 21.16                | 70.82                   | 8.02                   | 30.49           | 8.48             | 23.01                 | 1.58            | 7.26                 |
| No catalyst   | 391.1            | 30         | -            | 1              | 18.24                | 74.14                   | 7.62                   | 13.02           | 12.87            | 33.87                 | 1.51            | 12.87                |

## ภาคผนวก ข

### ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ

การวิเคราะห์เชิงสถิติได้วางรูปแบบการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ และอยู่ภายใต้สมมติฐานว่าตัวแปรและค่าการวิเคราะห์มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

#### 1. สัญลักษณ์ของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

1.1 k หมายถึง จำนวนตัวแปรที่ทำการศึกษา

1.2 n หมายถึง จำนวนการทดลองที่ภาวะการทดลองเดียวกัน

1.3 อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ (A, B, C, D) แทนปัจจัยที่ต้องการศึกษา เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น เป็นต้น

1.4 อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่เขียนติดกัน (Combination) เช่น AB, AC, ABC หมายถึง อันตรกิริยาของแต่ละปัจจัย (Interaction)

1.5 อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กเขียนติดกัน เช่น ab, ac, abc หมายถึงการทดลองซึ่งเกิดจากการรวมกันของอิทธิพลปัจจัยต่าง ๆ เรียกว่า Treatment combination

การทดลองที่แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จะแทนแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยเป็น -1 และ +1 โดย -1 แทนระดับต่ำ และ +1 แทนระดับสูง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันมะพร้าวบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ซึ่งออกแบบการทดลองเป็น  $2^4$  แฟกทอเรียล แบบ 2 เรพลิเคต โดยกำหนดสัญลักษณ์และระดับของตัวแปรดังนี้

ตาราง ข1 สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

| ตัวแปร   | ระดับต่ำ (-) | ระดับสูง (+) |
|--|--------------|--------------|
| อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)                                      | 360          | 410          |
| ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)                              | 30           | 60           |
| ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | 0.05         | 0.5          |
| ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์)                           | 1            | 3            |



สัญลักษณ์แทนการทดลองซึ่งเกิดจากการรวมกันของอิทธิพลปัจจัยต่าง ๆ มีความหมาย คือ การทดลองที่ปรากฏสัญลักษณ์ของปัจจัยใด แสดงว่าทำการทดลองที่ระดับ +1 ของปัจจัยนั้น และปัจจัยที่ไม่ปรากฏสัญลักษณ์ทำการทดลองที่ระดับ -1 เช่น

(-1) แสดงว่า ทำการทดลองที่ระดับ -1 ทุกปัจจัย

a แสดงว่า ทำการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ+1 และปัจจัยอื่น ๆ ทำที่ระดับ -1 ดังนั้น ภาวะการทดลองคือ อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณ ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 ร้อยละโดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

ab แสดงว่า ทำการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ +1 และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา +1 ส่วนปัจจัยอื่น ๆ ทดลองที่ระดับ -1 ดังนั้นภาวะการทดลองคือ อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 ร้อยละโดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

## 2. สูตรการคำนวณ

3.1 Contrast = (ผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment) x (สัมประสิทธิ์ (-1 หรือ +1) ของตัวแปรหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปร)

3.2 Effect Estimate  $_{AB...K}$  (EE)

$$EE_{AB...K} = \frac{2 (\text{Contrast}_{AB...K})}{n2^k}$$

3.3 Sum of Squares  $_{AB...K}$  (SS)

$$SS_{AB...K} = \frac{(\text{Contrast}_{AB...K})^2}{n2^k}$$

3.4 Total of Sum of Squares ( $SS_T$ )

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{N}, N = \text{จำนวนค่าสังเกตทั้งหมด}$$

3.5 Sum of Squares Error ( $SS_E$ )

$$SS_E = SS_T - SS \text{ of Main effect}$$

## 3.6 Mean of Square (MS)

$$MS = SS / \text{Degree of freedom}$$

$$3.7 \% \text{ Normal Probability} = \frac{(\text{Cumulative frequency} - 0.5) \times 100}{\text{Total Cumulative frequency}}$$

$$3.8 F_0 = MS_{\text{effect}} / MS_{\text{error}}$$

## 3. ตัวอย่างการคำนวณ

รูปแบบของ Treatment combinations อิทธิพลแฟกทอเรียล และค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณแสดงในตาราง ข2-ข5 โดย

เครื่องหมาย + และ - คือ +1 และ -1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการเปรียบเทียบ หรือ อิทธิพลแฟกทอเรียลต่างๆ นั่นเอง ดังนั้นอิทธิพลแฟกทอเรียล A คือ การเปรียบเทียบระหว่างระดับ +1 และ -1 ของปัจจัย A

วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ เช่น

อิทธิพลแฟกทอเรียล A: ให้ค่า + แก่ Treatment combinations ที่มีสัญลักษณ์ a นอกนั้น ให้ค่าเป็น -

อิทธิพลแฟกทอเรียล B: ให้ค่า + แก่ Treatment combinations ที่มีสัญลักษณ์ b นอกนั้น ให้ค่าเป็น -

อิทธิพลอันตรกิริยา AB: ให้คูณสัมประสิทธิ์ของ A และ B เข้าด้วยกันได้เป็นสัมประสิทธิ์ของ AB

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข2 ผลการคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน

| Treatment combination | A       | B      | AB     | C     | AC     | BC   | ABC    | D     | AD    | BD     | ABD    | CD   | ACD    | BCD   | ABCD | Yield of liquid |       |
|-----------------------|---------|--------|--------|-------|--------|------|--------|-------|-------|--------|--------|------|--------|-------|------|-----------------|-------|
| -1                    | -1      | -1     | 1      | -1    | 1      | 1    | -1     | -1    | 1     | 1      | -1     | 1    | -1     | -1    | 1    | 75.15           | 79.72 |
| a                     | 1       | -1     | -1     | -1    | -1     | 1    | 1      | -1    | -1    | 1      | 1      | 1    | 1      | -1    | -1   | 62.24           | 65.25 |
| b                     | -1      | 1      | -1     | -1    | 1      | -1   | 1      | -1    | 1     | -1     | 1      | 1    | -1     | 1     | -1   | 71.86           | 75.11 |
| ab                    | 1       | 1      | 1      | -1    | -1     | -1   | -1     | -1    | -1    | -1     | -1     | 1    | 1      | 1     | 1    | 62.51           | 64.57 |
| c                     | -1      | -1     | 1      | 1     | -1     | -1   | 1      | -1    | 1     | 1      | -1     | -1   | 1      | 1     | -1   | 78.01           | 76.13 |
| ac                    | 1       | -1     | -1     | 1     | 1      | -1   | -1     | -1    | -1    | 1      | 1      | -1   | -1     | 1     | 1    | 65.59           | 67.39 |
| bc                    | -1      | 1      | -1     | 1     | -1     | 1    | -1     | -1    | 1     | -1     | 1      | -1   | 1      | -1    | 1    | 75.04           | 72.87 |
| abc                   | 1       | 1      | 1      | 1     | 1      | 1    | 1      | -1    | -1    | -1     | -1     | -1   | -1     | -1    | -1   | 59.23           | 54.67 |
| d                     | -1      | -1     | 1      | -1    | 1      | 1    | -1     | 1     | -1    | -1     | 1      | -1   | 1      | 1     | -1   | 77.39           | 78.65 |
| ad                    | 1       | -1     | -1     | -1    | -1     | 1    | 1      | 1     | 1     | -1     | -1     | -1   | -1     | 1     | 1    | 66.22           | 69.28 |
| bd                    | -1      | 1      | -1     | -1    | 1      | -1   | 1      | 1     | -1    | 1      | -1     | -1   | 1      | -1    | 1    | 67.75           | 73.35 |
| abd                   | 1       | 1      | 1      | -1    | -1     | -1   | -1     | 1     | 1     | 1      | 1      | -1   | -1     | -1    | -1   | 60.38           | 57.14 |
| cd                    | -1      | -1     | 1      | 1     | -1     | -1   | 1      | 1     | -1    | -1     | 1      | 1    | -1     | -1    | 1    | 75.51           | 76.50 |
| acd                   | 1       | -1     | -1     | 1     | 1      | -1   | -1     | 1     | 1     | -1     | -1     | 1    | 1      | -1    | -1   | 66.31           | 62.93 |
| bcd                   | -1      | 1      | -1     | 1     | -1     | 1    | -1     | 1     | -1    | 1      | -1     | 1    | -1     | 1     | -1   | 79.44           | 76.17 |
| abcd                  | 1       | 1      | 1      | 1     | 1      | 1    | 1      | 1     | 1     | 1      | 1      | 1    | 1      | 1     | 1    | 57.05           | 56.89 |
| Contrast              | -210.99 | -78.24 | -27.31 | -6.84 | -28.22 | 4.22 | -36.20 | -4.36 | -6.11 | -11.01 | -16.58 | 8.13 | -12.42 | 38.22 | 4.49 |                 |       |
| Effect Estimate       | -13.19  | -4.89  | -1.71  | -0.43 | -1.76  | 0.26 | -2.26  | -0.27 | -0.38 | -0.69  | -1.04  | 0.51 | -0.78  | 2.39  | 0.28 |                 |       |
| Sum of Squares        | 1391.09 | 191.30 | 23.32  | 1.46  | 24.88  | 0.56 | 40.95  | 0.59  | 1.17  | 3.79   | 8.59   | 2.07 | 4.82   | 45.65 | 0.63 |                 |       |

ตาราง ข3 ผลการคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละผลได้ของเนฟทา

| Treatment combination | A       | B      | AB     | C    | AC    | BC   | ABC   | D     | AD     | BD   | ABD   | CD    | ACD    | BCD   | ABCD  | Yield of naphtha |       |
|-----------------------|---------|--------|--------|------|-------|------|-------|-------|--------|------|-------|-------|--------|-------|-------|------------------|-------|
| -1                    | -1      | -1     | 1      | -1   | 1     | 1    | -1    | -1    | 1      | 1    | -1    | 1     | -1     | -1    | 1     | 7.21             | 6.79  |
| a                     | 1       | -1     | -1     | -1   | -1    | 1    | 1     | -1    | -1     | 1    | 1     | 1     | 1      | -1    | -1    | 24.03            | 24.74 |
| b                     | -1      | 1      | -1     | -1   | 1     | -1   | 1     | -1    | 1      | -1   | 1     | 1     | -1     | 1     | -1    | 15.49            | 15.68 |
| ab                    | 1       | 1      | 1      | -1   | -1    | -1   | -1    | -1    | -1     | -1   | -1    | 1     | 1      | 1     | 1     | 29.01            | 29.54 |
| c                     | -1      | -1     | 1      | 1    | -1    | -1   | 1     | -1    | 1      | 1    | -1    | -1    | 1      | 1     | -1    | 7.63             | 7.27  |
| ac                    | 1       | -1     | -1     | 1    | 1     | -1   | -1    | -1    | -1     | 1    | 1     | -1    | -1     | 1     | 1     | 26.13            | 25.61 |
| bc                    | -1      | 1      | -1     | 1    | -1    | 1    | -1    | -1    | 1      | -1   | 1     | -1    | 1      | -1    | 1     | 14.07            | 13.65 |
| abc                   | 1       | 1      | 1      | 1    | 1     | 1    | 1     | -1    | -1     | -1   | -1    | -1    | -1     | -1    | -1    | 30.90            | 30.32 |
| d                     | -1      | -1     | 1      | -1   | 1     | 1    | -1    | 1     | -1     | -1   | 1     | -1    | 1      | 1     | -1    | 6.34             | 8.14  |
| ad                    | 1       | -1     | -1     | -1   | -1    | 1    | 1     | 1     | 1      | -1   | -1    | -1    | -1     | 1     | 1     | 24.71            | 27.53 |
| bd                    | -1      | 1      | -1     | -1   | 1     | -1   | 1     | 1     | -1     | 1    | -1    | -1    | 1      | -1    | 1     | 12.98            | 14.31 |
| abd                   | 1       | 1      | 1      | -1   | -1    | -1   | -1    | 1     | 1      | 1    | 1     | -1    | -1     | -1    | -1    | 29.61            | 28.34 |
| cd                    | -1      | -1     | 1      | 1    | -1    | -1   | 1     | 1     | -1     | -1   | 1     | 1     | -1     | -1    | 1     | 6.81             | 8.64  |
| acd                   | 1       | -1     | -1     | 1    | 1     | -1   | -1    | 1     | 1      | -1   | -1    | 1     | 1      | -1    | -1    | 23.00            | 21.59 |
| bcd                   | -1      | 1      | -1     | 1    | -1    | 1    | -1    | 1     | -1     | 1    | -1    | 1     | -1     | 1     | -1    | 17.39            | 16.49 |
| abcd                  | 1       | 1      | 1      | 1    | 1     | 1    | 1     | 1     | 1      | 1    | 1     | 1     | 1      | 1     | 1     | 30.46            | 28.30 |
| Contrast              | 254.94  | 100.40 | -22.13 | 3.82 | -6.22 | 9.43 | 6.91  | -3.44 | -10.05 | 1.86 | -0.63 | -2.37 | -22.55 | 18.70 | -1.23 |                  |       |
| Effect Estimate       | 15.93   | 6.28   | -1.38  | 0.24 | -0.39 | 0.59 | 0.432 | -0.21 | -0.63  | 0.12 | -0.04 | -0.15 | -1.41  | 1.17  | -0.08 |                  |       |
| Sum of Squares        | 2031.12 | 315.02 | 15.30  | 0.46 | 1.21  | 2.78 | 1.492 | 0.37  | 3.16   | 0.11 | 0.01  | 0.17  | 15.90  | 10.93 | 0.05  |                  |       |

ตาราง ข4 ผลการคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละผลได้ของดีเซล

| Treatment combination | A       | B       | AB    | C     | AC    | BC    | ABC   | D     | AD   | BD    | ABD  | CD     | ACD  | BCD    | ABCD  | Yield of diesel |       |
|-----------------------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|--------|------|--------|-------|-----------------|-------|
| -1                    | -1      | -1      | 1     | -1    | 1     | 1     | -1    | -1    | 1    | 1     | -1   | 1      | -1   | -1     | 1     | 48.11           | 50.29 |
| a                     | 1       | -1      | -1    | -1    | -1    | 1     | 1     | -1    | -1   | 1     | 1    | 1      | 1    | -1     | -1    | 22.01           | 24.01 |
| b                     | -1      | 1       | -1    | -1    | 1     | -1    | 1     | -1    | 1    | -1    | 1    | 1      | -1   | 1      | -1    | 34.04           | 35.49 |
| ab                    | 1       | 1       | 1     | -1    | -1    | -1    | -1    | -1    | -1   | -1    | -1   | 1      | 1    | 1      | 1     | 13.02           | 14.05 |
| c                     | -1      | -1      | 1     | 1     | -1    | -1    | 1     | -1    | 1    | 1     | -1   | -1     | 1    | 1      | -1    | 48.46           | 49.90 |
| ac                    | 1       | -1      | -1    | 1     | 1     | -1    | -1    | -1    | -1   | 1     | 1    | -1     | -1   | 1      | 1     | 22.28           | 21.51 |
| bc                    | -1      | 1       | -1    | 1     | -1    | 1     | -1    | -1    | 1    | -1    | 1    | -1     | 1    | -1     | 1     | 37.94           | 36.51 |
| abc                   | 1       | 1       | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | -1    | -1   | -1    | -1   | -1     | -1   | -1     | -1    | 15.21           | 13.06 |
| d                     | -1      | -1      | 1     | -1    | 1     | 1     | -1    | 1     | -1   | -1    | 1    | -1     | 1    | 1      | -1    | 52.27           | 49.77 |
| ad                    | 1       | -1      | -1    | -1    | -1    | 1     | 1     | 1     | 1    | -1    | -1   | -1     | -1   | 1      | 1     | 23.30           | 23.19 |
| bd                    | -1      | 1       | -1    | -1    | 1     | -1    | 1     | 1     | -1   | 1     | -1   | -1     | 1    | -1     | 1     | 35.64           | 37.79 |
| abd                   | 1       | 1       | 1     | -1    | -1    | -1    | -1    | 1     | 1    | 1     | 1    | -1     | -1   | -1     | -1    | 16.79           | 17.44 |
| cd                    | -1      | -1      | 1     | 1     | -1    | -1    | 1     | 1     | -1   | -1    | 1    | 1      | -1   | -1     | 1     | 49.58           | 51.91 |
| acd                   | 1       | -1      | -1    | 1     | 1     | -1    | -1    | 1     | 1    | -1    | -1   | 1      | 1    | -1     | -1    | 25.02           | 23.45 |
| bcd                   | -1      | 1       | -1    | 1     | -1    | 1     | -1    | 1     | -1   | 1     | -1   | 1      | -1   | 1      | -1    | 34.46           | 36.46 |
| abcd                  | 1       | 1       | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1    | 1     | 1    | 1      | 1    | 1      | 1     | 13.96           | 15.10 |
| Contrast              | -385.21 | -178.09 | 45.82 | -2.41 | -6.04 | -0.71 | -6.73 | 20.24 | 5.95 | -3.59 | 9.21 | -10.11 | 5.79 | -17.49 | -3.67 |                 |       |
| Effect Estimate       | -24.08  | -11.13  | 2.86  | -0.15 | -0.38 | -0.04 | -0.42 | 1.265 | 0.37 | -0.22 | 0.58 | -0.63  | 0.36 | -1.09  | -0.23 |                 |       |
| Sum of Squares        | 4637.02 | 991.09  | 65.61 | 0.18  | 1.14  | 0.02  | 1.42  | 12.81 | 1.10 | 0.40  | 2.65 | 3.20   | 1.05 | 9.55   | 0.42  |                 |       |

ตาราง ข5 ผลการคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละการเปลี่ยนจากน้ำมันหนัก

| Treatment combination | A      | B     | AB   | C    | AC    | BC   | ABC  | D     | AD    | BD    | ABD   | CD   | ACD  | BCD   | ABCD  | Conversion |       |
|-----------------------|--------|-------|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|------------|-------|
| -1                    | -1     | -1    | 1    | -1   | 1     | 1    | -1   | -1    | 1     | 1     | -1    | 1    | -1   | -1    | 1     | 85.13      | 84.51 |
| a                     | 1      | -1    | -1   | -1   | -1    | 1    | 1    | -1    | -1    | 1     | 1     | 1    | 1    | -1    | -1    | 95.43      | 96.68 |
| b                     | -1     | 1     | -1   | -1   | 1     | -1   | 1    | -1    | 1     | -1    | 1     | 1    | -1   | 1     | -1    | 86.22      | 85.13 |
| ab                    | 1      | 1     | 1    | -1   | -1    | -1   | -1   | -1    | -1    | -1    | -1    | 1    | 1    | 1     | 1     | 96.85      | 96.99 |
| c                     | -1     | -1    | 1    | 1    | -1    | -1   | 1    | -1    | 1     | 1     | -1    | -1   | 1    | 1     | -1    | 84.45      | 86.02 |
| ac                    | 1      | -1    | -1   | 1    | 1     | -1   | -1   | -1    | -1    | 1     | 1     | -1   | -1   | 1     | 1     | 94.30      | 94.98 |
| bc                    | -1     | 1     | -1   | 1    | -1    | 1    | -1   | -1    | 1     | -1    | 1     | -1   | 1    | -1    | 1     | 85.03      | 85.94 |
| abc                   | 1      | 1     | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | -1    | -1    | -1    | -1    | -1   | -1   | -1    | -1    | 97.31      | 97.86 |
| d                     | -1     | -1    | 1    | -1   | 1     | 1    | -1   | 1     | -1    | -1    | 1     | -1   | 1    | 1     | -1    | 85.37      | 83.39 |
| ad                    | 1      | -1    | -1   | -1   | -1    | 1    | 1    | 1     | 1     | -1    | -1    | -1   | -1   | 1     | 1     | 94.07      | 93.71 |
| bd                    | -1     | 1     | -1   | -1   | 1     | -1   | 1    | 1     | -1    | 1     | -1    | -1   | 1    | -1    | 1     | 87.00      | 85.22 |
| abd                   | 1      | 1     | 1    | -1   | -1    | -1   | -1   | 1     | 1     | 1     | 1     | -1   | -1   | -1    | -1    | 97.26      | 97.40 |
| cd                    | -1     | -1    | 1    | 1    | -1    | -1   | 1    | 1     | -1    | -1    | 1     | 1    | -1   | -1    | 1     | 84.17      | 84.19 |
| acd                   | 1      | -1    | -1   | 1    | 1     | -1   | -1   | 1     | 1     | -1    | -1    | 1    | 1    | -1    | -1    | 94.55      | 94.35 |
| bcd                   | -1     | 1     | -1   | 1    | -1    | 1    | -1   | 1     | -1    | 1     | -1    | 1    | -1   | 1     | -1    | 86.99      | 86.78 |
| abcd                  | 1      | 1     | 1    | 1    | 1     | 1    | 1    | 1     | 1     | 1     | 1     | 1    | 1    | 1     | 1     | 97.20      | 97.13 |
| Contrast              | 170.53 | 31.01 | 8.83 | 0.87 | -2.32 | 3.47 | 1.99 | -4.03 | -5.43 | 11.34 | -1.99 | 2.95 | 1.59 | -2.46 | -8.79 |            |       |
| Effect Estimate       | 10.66  | 1.94  | 0.55 | 0.05 | -0.15 | 0.22 | 0.12 | -0.25 | -0.34 | 0.71  | -0.12 | 0.18 | 0.10 | -0.15 | -0.55 |            |       |
| Sum of Squares        | 908.72 | 30.05 | 2.44 | 0.02 | 0.17  | 0.38 | 0.12 | 0.51  | 0.92  | 4.02  | 0.12  | 0.27 | 0.08 | 0.19  | 2.41  |            |       |

## ภาคผนวก ค

## ตัวอย่างการคำนวณผลการทดลอง

การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และแก๊ส ที่ทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.01 กรัม และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

## ข้อมูลจากการทดลอง

|  |         |      |
|--|---------|------|
| น้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์  | 1785.54 | กรัม |
| น้ำหนักน้ำมันมะพร้าว   | 20.08   | กรัม |
| น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา  | 0.01    | กรัม |
| น้ำหนักรวมก่อนการทดลอง   |         |      |
| (น้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์+น้ำหนักน้ำมันมะพร้าว+น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา) | 1805.63 | กรัม |
| น้ำหนักรวมหลังการทดลอง   | 1802.67 | กรัม |
| น้ำหนักรวมกระดาศิซซุและกระดาศกรองก่อนการทดลอง                        | 4.35    | กรัม |
| น้ำหนักรวมของกระดาศิซซุและกระดาศกรองหลังการทดลองน้ำหนัก              | 6.39    | กรัม |
| ค่าการกระจายตัวของแนฟทาในผลิตภัณฑ์ของเหลว (%)                        | 9.59    |      |

## วิธีการคำนวณ

|                             |                     |         |            |
|-----------------------------|---------------------|---------|------------|
| ผลิตภัณฑ์แก๊ส               | = 1805.63-1802.67   | = 2.96  | กรัม       |
| ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส    | = (2.96/20.08)x100  | = 14.74 | โดยน้ำหนัก |
| ผลิตภัณฑ์ของแข็ง            | = 6.39-4.35-0.01    | = 2.03  | กรัม       |
| ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง | = (2.03/20.08)x100  | = 10.11 | โดยน้ำหนัก |
| ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว | = 100-14.74-10.11   | = 75.15 | โดยน้ำหนัก |
| ร้อยละผลได้ของแนฟทา         | = (75.15x 9.59)/100 | = 7.21  | โดยน้ำหนัก |

## ภาคผนวก ง

## สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ง1 ธาตุองค์ประกอบบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5

| ธาตุ (Element) | ร้อยละโดยน้ำหนัก (% wt.) |
|----------------|--------------------------|
| Al             | 4.3415                   |
| Si             | 80.1304                  |
| Ca             | 11.7774                  |
| Fe             | 3.7507                   |

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาดังตารางที่ ง1 พบว่ามีร้อยละของซิลิกาและอะลูมินาเท่ากับ 80.1304 และ 4.3415 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อนำมาคำนวณหาอัตราส่วน Si/Al มีค่าเท่ากับ 18

$$\frac{80.1304}{28.0855} : \frac{4.3415}{26.9815}$$

$$2.8531 : 0.1609$$

$$18 : 1$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก จ

### การวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน

#### จ.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatograph)

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่นจะวิเคราะห์ปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดดังต่อไปนี้

|                                       |   |                              |
|---------------------------------------|---|------------------------------|
| จุดเดือดเริ่มต้น ถึง 200 องศาเซลเซียส | = | แนฟทา (Naphtha)              |
| 200 ถึง 250 องศาเซลเซียส              | = | เคโรซีน (Kerosene)           |
| 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส              | = | แก๊สออยล์เบา (Light gas oil) |
| 350 ถึง 370 องศาเซลเซียส              | = | แก๊สออยล์ (Gas oil)          |
| 370 ถึง จุดเดือดสุดท้าย               | = | กากน้ำมันหนัก (Long residue) |

การวิเคราะห์จะเริ่มจากการเตรียมสารตัวอย่าง โดยนำผลิตภัณฑ์น้ำมันไปละลายในสารละลายคาร์บอนไดออกไซด์ (CS<sub>2</sub>) ในอัตรา 1 ส่วนใน 100 ส่วนโดยปริมาตร จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Varian รุ่น CP-3800 สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันตามจุดเดือดตามมาตรฐาน ASTM D2887 พร้อมทั้งดีเทคเตอร์แบบ FID ใช้ซอฟต์แวร์ Simulated Distillation คอลัมน์ที่ใช้เป็น Capillary column มี Stationary phase คือ CP-SIL 5CB ยาว 15 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.25 มิลลิเมตร และความหนาของฟิล์ม 0.25 ไมครอน ภาวะที่ใช้คือ

อุณหภูมิหัวฉีด (Injector Temperature) เท่ากับ 298 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิคอลัมน์ (Column Temperature or Oven temperature) ซึ่งจะใช้เป็นแบบโปรแกรมอุณหภูมิ (Temperature Program) 1 ขั้นตอน และมีไนโตรเจนเหลวเป็นตัวให้ความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิด้วย คือเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0.01 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ 320 องศาเซลเซียสแล้วคงที่เป็นเวลา 8.50 นาที

อุณหภูมิดีเทคเตอร์ (Injector Temperature) เท่ากับ 320 องศาเซลเซียส

แก๊สตัวพา (Carrier Gas) เป็นแก๊สฮีเลียมที่มีอัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วย split ratio 2

## ๑.2 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2010 Gas chromatograph-Mass spectrometry (GC-MS) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์สารเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) และเชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) โดยอาศัยการเปรียบเทียบ Fingerprint ของเลขมวลของสารตัวอย่างนั้น ๆ กับข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูล สามารถวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ที่ผสมรวมกันหลายชนิดในปริมาณต่ำระดับนาโนกรัม โดยการแยกให้เป็นสารบริสุทธิ์ และสารประกอบอินทรีย์ที่นำมาวิเคราะห์นั้นจะต้องระเหยได้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 450 องศาเซลเซียส เมื่อตรวจวัดเรียบร้อยแล้วจะแสดงผลออกมาในรูปแบบของโครมาโตแกรม เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ทำหน้าที่ในการแยกองค์ประกอบของสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้เมื่อถูกความร้อน และส่วนของเครื่องแมสสเปกโทรมิเตอร์ที่ใช้ตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างโดยอาศัยกลไก คือ โมเลกุลขององค์ประกอบที่ถูกแยกออกมาจากสารตัวอย่างโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจะถูกไอออไนซ์ในสภาวะสุญญากาศแล้วตรวจวัดออกมาเป็นเลขมวล เทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิงแล้วแปลผลออกมาเป็นชื่อขององค์ประกอบนั้น ๆ โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แสดงดังตารางที่ ๑1

**ตารางที่ ๑1** ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี (Gas Chromatography-Mass spectrometry)

|   |  |
|---|--|
| ชนิดคอลัมน์                                     | DB-Wax   |
| อุณหภูมิการฉีด (Injector temperature)           | 230 องศาเซลเซียส                                     |
| อุณหภูมิคอลัมน์ (Column temperature)            | 40 ถึง 200 องศาเซลเซียส                              |
| อุณหภูมิการเชื่อมต่อ (Interface temperature)    | 230 องศาเซลเซียส                                     |
| อุณหภูมิในการผลิตไอออน (Ion source temperature) | 200 องศาเซลเซียส                                     |
| แก๊สพา (Carrier gas)                            | แก๊สฮีเลียม (He) โดยมีอัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที |

### จ.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph)

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2014 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊ส แสดงดังตารางที่ ๑2 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า Stationary phase และมีแก๊สพา (Carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโทแกรม (Chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (Recorder) โดยแก๊สโครมาโทกราฟีมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

#### 1. แก๊สพา (Carrier gas)

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สเฟสเข้าสู่คอลัมน์ แก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ โดยอัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้คงที่ แก๊สพาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ ไนโตรเจน ฮีเลียม และอาร์กอน

#### 2. ตัวควบคุมการไหล (Flow controller)

#### 3. ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่าง (Injector port)

#### 4. คอลัมน์ (Column)

คอลัมน์เป็นส่วนสำคัญของการแยกสารด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์จะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสารผสมเหล่านั้นออกจากกันเป็นส่วนๆ ดังนั้นโครมาโทแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์

#### 5. ดีเทคเตอร์ (Detector)

ดีเทคเตอร์ คือ เครื่องที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกมาจากคอลัมน์หรือไม่ ถ้ามีก็จะสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใด ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงต้องเป็นเครื่องมือที่มีลักษณะเฉพาะ สามารถให้สัญญาณกับสารต่างๆ ได้ ให้สภาพไวที่สูงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และมีหลากหลายชนิด ตามความเหมาะสมของงานก็ได้

#### 6. เครื่องบันทึก (Recorder)

ตารางที่ ๑2 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี  
(Gas Chromatography)

|                                       |                                |
|---------------------------------------|--------------------------------|
| แก๊สพา (Carrier gas)                  | แก๊สอาร์กอน (Ar)               |
| ชนิดคอลัมน์                           | Unibeads C packed              |
| อุณหภูมิการฉีด (Injector temperature) | 120 องศาเซลเซียส               |
| อุณหภูมิกอลัมน์                       | 50 ถึง 180 องศาเซลเซียส        |
| ระบบตรวจวัด (Detector)                | ระบบวัดสภาพการนำความร้อน (TCD) |



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### ๑.4 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer)

อินฟราเรดสเปกโตรโกปี เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบโมเลกุลของสาร โดยอาศัยหลักการเกี่ยวกับการสั่นของโมเลกุลในแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (2.5-25 ไมโครเมตร) ที่มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่พอเหมาะจะเกิดการสั่นของโมเลกุล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุล โมเลกุลจะเกิดการดูดกลืนแสงแล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมาแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือจำนวนคลื่นกับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่า Infrared Spectrum ซึ่งลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะโมเลกุลจึงทำให้สารสามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ที่ความถี่ต่างกันขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะและน้ำหนักของอะตอมของหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลนั้น ๆ

การแปลความหมายของการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ จะพิจารณาแถบการดูดกลืน Infrared Spectrum เป็น 3 ช่วง คือ

1. ย่านความถี่ 1300 – 1400  $\text{cm}^{-1}$  เรียกว่า Functional group regional เป็นย่านที่บอกถึงชนิดของหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล ซึ่งหากไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันใดในย่านนี้ จะเป็นการยืนยันว่าไม่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่ในโมเลกุลสารที่สนใจ แต่ทั้งนี้การแปลความหมายต้องทำอย่างระมัดระวังเนื่องจากโครงสร้างบางตัวอาจให้แถบดูดกลืนที่กว้างจนสังเกตได้ยาก

2. ย่านความถี่ 910 – 1300  $\text{cm}^{-1}$  เรียกว่า Finger print regional ซึ่งแถบดูดกลืนในย่านนี้มีความสลับซับซ้อนมาก แต่แถบที่ปรากฏจะมีลักษณะเฉพาะตัวของโมเลกุลแต่ละชนิด อันจะมีประโยชน์ในการยืนยันว่าสาร 2 ตัวที่สงสัยเป็นสารเดียวกันหรือไม่ โดยทำการเทียบสเปกตรัมของสารที่เตรียมในตัวอย่างกลางชนิดเดียวกัน หากปรากฏแถบการดูดกลืนในย่านนี้ทับกันทุกตัว แสดงว่าเป็นสารตัวเดียวกัน

3. ย่านความถี่ 650 – 910  $\text{cm}^{-1}$  จะบ่งบอกถึงการจัดตัวของหมู่แทนที่บนวงแหวนสารประกอบเอโรมาติก ซึ่งหากไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนบริเวณนี้ ย่อมแสดงว่าสารที่สนใจไม่มีองค์ประกอบเป็นเอโรมาติก

ในงานวิจัยนี้การศึกษาเอกลักษณ์ของสารตัวอย่างเชิงคุณภาพจะใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อให้ทราบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญภายในโครงสร้างโมเลกุลน้ำมันสำหรับสารตัวอย่างน้ำมันซึ่งเป็นของเหลว จะทำการหยดน้ำมันลงไปบน KBr liquid cell แล้วนำไปวัดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ โดยศึกษาในช่วงความยาวคลื่น 450-4000  $\text{cm}^{-1}$  และอุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์ 25 องศาเซลเซียส

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปิยนุช ธนวรรณิช เกิดวันที่ 13 กันยายน พ.ศ.2528 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย