

เชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



นางสาวชุติมณฑา รัตนบัณฑิตสกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIQUID FUEL FROM CRACKING OF CRUDE PALM OIL USING HZSM-5 AS CATALYST



Miss Chutimon Rattanabunditsakul

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

เชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้

HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

โดย

นางสาวชุติมณฑิ รัตนบัณฑิตสกุล


สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

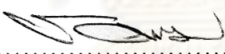
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

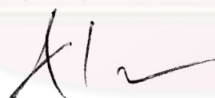
รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์

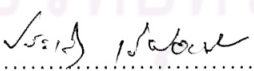
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

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

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนีรัตน์ พิพัฒน์มโนมัย)

ชุติมณฑิ รัตนบัณฑิตสกุล : เชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. (LIQUID FUEL FROM CRACKING OF CRUDE PALM OIL USING HZSM-5 AS CATALYST) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรศานต์, 66 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันปาล์มดิบ เพื่อแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีสมบัติใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิ 380-450 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.25 - 2.5 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ ภายใต้ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยน้ำมันปาล์มดิบมีองค์ประกอบของกรดไขมันเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวให้มีขนาดเล็กลง ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นของเหลว และทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวในเชิงคุณภาพโดยวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือด พบว่า ภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันปาล์มดิบ คือ อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 79.96 ร้อยละผลได้ของแก๊ส 17.37 และร้อยละผลได้ของของแข็ง 2.66 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีร้อยละผลได้ของเนฟทา 37.22 เคโรซีน ร้อยละ 13.07 แก๊สออยล์เบา ร้อยละ 16.48 แก๊สออยล์หนัก ร้อยละ 1.93 และกากน้ำมัน ร้อยละ 11.27 โดยน้ำหนัก และภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 คือ อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 68.57 ร้อยละผลได้ของแก๊ส 15.81 และร้อยละผลได้ของของแข็ง 14.61 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีร้อยละผลได้ของเนฟทา 22.97 เคโรซีน 11.31 แก๊สออยล์เบา 24.55 แก๊สออยล์หนัก 1.30 และกากน้ำมัน 8.43 โดยน้ำหนัก

ภาควิชา เคมีเทคนิค  
สาขาวิชา เคมีเทคนิค  
ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อผู้เสนอ.....ชุติมณฑิ รัตนบัณฑิตสกุล.....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....

## 4972278023: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : CRUDE PALM OIL / CATALYTIC CRACKING / HZSM-5

CHUTIMON RATTANABUNDITSAKUL : LIQUID FUEL FROM CRACKING OF  
CRUDE PALM OIL USING HZSM-5 AS CATALYST. THESIS ADVISOR :  
ASSOC. PROF. THARAPONG VITIDSANT, 66 pp.

The main objective of this research was aimed to study the cracking of crude palm oil to liquid fuel by using HZSM-5 as catalyst in a micro reactor by varied operating conditions as reaction temperature 380-450 °C, reaction time 30-60 min and mass of HZSM-5 0.25 - 2.5 % by weight with initial hydrogen pressure 100 psi. From the results, it was found that the reaction temperature, reaction time and weight of HZSM-5 catalyst were significantly affected to the oil yield. The analyzed oil product from simulated distillation gas chromatography was found that the reaction temperature is 425 °C and the reaction time is 30 min at initial hydrogen pressure 100 psi. This was the optimum condition of thermal cracking that gave the highest yield of naphtha. The oil yield was 79.96 % by weight, 37.22 %Naphtha, 13.07 %Kerosene, 16.48 % Light gas oil, 1.93% Heavy gas oil and 11.27 %long residues respectively. In case of using HZSM-5, the analyzed oil product was found that reaction temperature 410 °C reaction time 60 min by using HZSM-5 1.0% by weight was the best condition. The oil yield was 68.57% by weight, 22.97 %Naphtha, 11.31%Kerosene, 24.55% Light gas oil, 1.30% Heavy gas oil and 8.43 %long residues respectively.

Department : Chemical Technology..... Student's Signature *Chutimon R.*  
Field of Study : Chemical Technology..... Advisor's Signature *T. Vitidsant*  
Academic Year : 2009.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรานันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ ตลอดจนให้ความคิดเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิรัตน์ พิพัฒน์มโนมัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความคิดเห็น คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้รับ ทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายแผนและพลังงาน และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ และให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ที่ ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลัง ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เลี้ยงดูอบรมสั่งสอน ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 น้ำมันพืช.....	3
2.1.1 กรดไขมัน.....	3
2.2 ปาล์มน้ำมัน.....	4
2.3 ปฏิกริยาอะคะตะไลซิส.....	6
2.3.1 ปฏิกริยาอะคะตะไลซิสแบบเอกพันธ์.....	6
2.3.2 ปฏิกริยาอะคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธ์.....	7
2.3.3 ปฏิกริยาอะคะตะไลซิสแบบเอนไซม์.....	7
2.4 ตัวเร่งปฏิกริยา.....	7
2.4.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิกริยา.....	7
2.4.2 ประเภทของตัวเร่งปฏิกริยา.....	7
2.5 ซีโอไลต์.....	9
2.5.1 ประวัติซีโอไลต์.....	10
2.5.2 การจำแนกซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง.....	11
2.5.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	17
2.5.4 ประโยชน์ของซีโอไลต์.....	19
2.6 ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5.....	21
2.7 กระบวนการการแตกตัว.....	25
2.7.1 การแตกตัวด้วยความร้อน.....	25

บทที่	หน้า
2.7.2 การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา.....	26
2.7.3 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม.....	28
2.8 การเกิดได้ก.....	30
2.9 การวิเคราะห์หื่อน้ำมันดิบ.....	30
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
3. เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	34
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	34
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	37
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	37
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	37
4. ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง.....	39
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น.....	39
4.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบ.....	39
4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการแตกตัวของของน้ำมันปาล์มดิบเมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	40
4.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	40
4.2.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	42
4.3 ผลการทดลองที่ได้จากการแตกตัวของของน้ำมันปาล์มดิบเมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา HZS-5.....	44
4.3.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	44
4.3.2 ผลเวลาในการทำปฏิกิริยาของที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	48
4.3.3 ผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	52
5. สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	54
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
รายการอ้างอิง.....	56



ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก.....	59
ภาคผนวก ข.....	61
ภาคผนวก ค.....	63
ภาคผนวก ง.....	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	66



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบโดยเฉลี่ยของกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ	3
2.2	การจำแนกกลุ่มของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุดิยภูมิ.....	12
2.3	โครงสร้างของซีโอไลต์จำแนกตามโครงสร้างทุดิยภูมิ.....	12
2.4	สารก่อโครงร่างที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5.....	23
4.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันปาล์มดิบ.....	39
ก1	ผลการทดลองจากการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ ภาวะการทดลองต่างๆ.....	59
ก2	ผลการทดลองจาก การแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดย ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ภาวะการทดลองต่างๆ.....	60
ง1	สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....	65

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ต้นปาล์มและผลปาล์ม.....	5
2.2	การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	8
2.3	โครงสร้าง 2 มิติ ของอะลูมิโนซิลิเกต.....	9
2.4 ก	โครงสร้างทรงสี่หน้าของ $(\text{SiO}_4)^{4-}$ .....	10
2.4 ข	โครงสร้างทรงสี่หน้าของ $(\text{AlO}_4)^{5-}$ .....	10
2.4 ค	การจัดเรียงตัวในผลึกของซีโอไลต์.....	10
2.5 ก	หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ single four ring (S4R) .....	11
2.5 ข	หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ single six ring (S6R).....	11
2.5 ค	หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ single eight ring (S8R).....	11
2.5 ง	หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ double four ring (D4R).....	11
2.5 จ	หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ double six ring (D6R).....	11
2.5 ฉ	หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ complex 4-1.....	11
2.5 ช	หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ complex 5-1.....	11
2.5 ซ	หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ complex 4-4-1.....	11
2.6	ลักษณะเชิงโครงสร้างของซีโอไลต์.....	12
2.7	การเลือกทำปฏิกิริยาจากรูปร่างของสารตั้งต้นภายในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์....	16
2.8 ก	การเลือกทำปฏิกิริยาภายในโครงสร้างของซีโอไลต์.....	16
2.8 ข	การเลือกจากรูปร่างของสารมัธยันต์.....	16
2.8 ค	การเลือกจากรูปร่างของสารผลิตภัณฑ์.....	16
2.9	การเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์จากอนุภาคของเจล.....	18
2.10 ก	วงแหวนห้าเหลี่ยมโครงสร้างย่อยของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5.....	21
2.10 ข	ลักษณะการเชื่อมต่อกันของวงแหวนห้าเหลี่ยมเป็นโครงสร้างย่อยของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ในระนาบ [001].....	21
2.11	ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ระนาบ [100] .....	21
2.12	ลักษณะช่องว่างทั้งสองระบบในซีโอไลต์ ZSM-5.....	22
2.13	รูปแบบ XRD มาตรฐานของซีโอไลต์ ZSM-5.....	24
3.1	เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.....	34

ภาพที่	หน้า
3.2	ชุดอุปกรณ์ควบคุมแบบดิจิทัลและชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์..... 35
3.3	ชุดกรองสุญญากาศ และกระดาดาชองใยแก้ว..... 36
3.4	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น..... 36
4.1	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แก๊ส และของแข็งที่ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำ ปฏิกิริยา 30 นาที..... 40
4.2	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ความดันแก๊ส ไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที..... 42
4.3	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แก๊ส และของแข็งที่ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 425 องศา เซลเซียส..... 43
4.4	ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ความ ดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส. 43
4.5	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ความดันแก๊ส ไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5..... 44
4.6	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แก๊ส และของแข็งที่ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำ ปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก..... 45
4.7	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แก๊ส และของแข็งที่ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำ ปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก..... 45
4.8	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ความดันแก๊ส ไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก..... 47
4.9	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ความดันแก๊ส ไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก..... 47

ภาพที่	หน้า
4.10	ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5..... 48
4.11	ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แก๊ส และของแข็งที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก..... 49
4.12	ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แก๊ส และของแข็งที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก..... 49
4.13	ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก..... 51
4.14	ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก..... 51
4.15	ผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ น้ำมันที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ความดัน แก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..... 52
4.16	ผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ความ ดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..... 53
ค1	ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามคาบจุดเดือดของสารตัวอย่างจากเครื่องแก๊ส โครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น..... 64

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในภาวะการณ์ปัจจุบัน ความต้องการพลังงานมีอัตราสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประเทศไทยยังมีความจำเป็นต้องพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับคมนาคมและภาคอุตสาหกรรมและการคมนาคมในปี พ.ศ. 2550 ประมาณ 1,000,000 ล้านบาท ประกอบกับราคาน้ำมันมีราคาจำหน่ายที่สูงขึ้น และมีความผันผวนทางด้านราคาตามสภาวะการณ์ของโลก จึงได้หาหนทางในการนำเชื้อเพลิงชนิดอื่นมาใช้ทดแทนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมในอนาคต แนวทางที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน คือ การแปรรูปน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์เป็นเชื้อเพลิงเหลว เช่น การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ เอทิลเอสเทอร์ หรือที่รู้จักกันว่า “ไบโอดีเซล” หรือการนำน้ำมันพืชต่างๆ มาผสมกับน้ำมันดีเซลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ที่มีกำลังรอบต่ำ เป็นต้น

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการนำน้ำมันปาล์มดิบ มาใช้แปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากในปัจจุบัน ประเทศไทยสามารถผลิตน้ำมันปาล์มดิบได้ประมาณ 1.2 ล้านตัน/ปี โดยนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมน้ำมันพืช อุตสาหกรรมสบู่ ประมาณ 1 ล้านตัน ซึ่งยังคงเหลืออยู่ในสต็อกตามตัวเลขทางสถิติประมาณ 200,000 ตัน/ปี การนำน้ำมันปาล์มดิบส่วนนี้มาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาโดยการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูง ช่วยให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่ยาวให้มีขนาดเล็กลง และจัดโครงสร้างเหมาะสมจนมีสมบัติใกล้เคียงน้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมและศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ประกอบด้วย อุณหภูมิ เวลา และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบ

#### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (microreactor)
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ทำให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันปาล์มดิบด้วยการแตกตัวโดยใช้ HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ได้เชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันปาล์มดิบที่มีสมบัติใกล้เคียงน้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำมันพืช

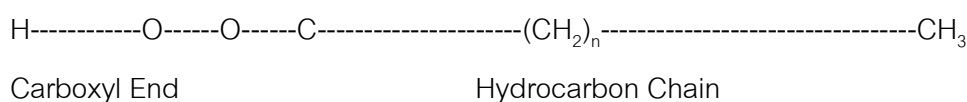
องค์ประกอบหลักของน้ำมันพืช คือ กรดไขมัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) ปริมาณสัดส่วนของกรดทั้งสองชนิดที่แตกต่างกันทำให้สมบัติของน้ำมันพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1 โดยเฉพาะการนำไปบริโภคพบว่า น้ำมันพืชที่มีกรดไขมันอิ่มตัวสูง เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว เหมาะสำหรับการทอดจะช่วยให้อาหารไม่เหม็นหืนง่าย น้ำมันพืชที่กรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน น้ำมันรำข้าว และน้ำมันข้าวโพด เหมาะสำหรับการประกอบอาหารโดยทั่วไป แต่ไม่ควรใช้อุณหภูมิมากกว่า 180 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเกิดอนุมูลอิสระซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดมะเร็ง

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบโดยเฉลี่ยของกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ

ชนิดของน้ำมันพืช	ปริมาณกรดไขมันอิ่มตัว (%)	ปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัว (%)
น้ำมันถั่วเหลือง	11.33	88.67
น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน	10.71	89.29
น้ำมันข้าวโพด	13.00	87.00
น้ำมันรำข้าว	21.60	78.40
น้ำมันปาล์ม โอเลอิน	44.91	55.09
น้ำมันปาล์ม	56.98	43.02
น้ำมันมะพร้าว	90.52	9.48

##### 2.1.1 กรดไขมัน (fatty acid)

กรดไขมันเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของไขมันเกือบทุกชนิด กรดไขมันประกอบด้วยคาร์บอนเรียงต่อกันเป็นลูกโซ่ที่มีความยาวต่างกัน ดังนี้





กรดไขมันที่พบในธรรมชาติส่วนมากจะมีอะตอมคาร์บอนเป็นเลขคู่ อยู่ในช่วง 4-30 อะตอม โดยชนิดที่มีคาร์บอน 16-18 อะตอม จะพบมากที่สุด กรดไขมันอิ่มตัวชนิดที่พบมากที่สุด คือ กรดปาล์มิติก (palmitic acid) และกรดสเตียริก (stearic acid) ส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่พบมากที่สุด คือ กรดโอเลอิก (Oleic Acid)

$\text{CH}_2=(\text{CH}_2)_{14}-\text{COOH}$	Palmitic acid
$\text{CH}_2=(\text{CH}_2)_{16}-\text{COOH}$	Stearic acid
$\text{CH}_2=(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	Oleic acid

กรดไขมันแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ

1. กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acids) คือ กรดไขมันที่ไม่มีพันธะคู่ (double bond) อยู่ในโมเลกุล มีสูตรทั่วไป คือ  $\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_2$  เช่น lauric acid, myristic acid, palmitic acid, stearic acid และ arachidic acid เป็นต้น

2. กรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acids) คือ กรดไขมันที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล อาจจะมีพันธะคู่เพียงพันธะเดียว (monounsaturated) มีสูตรทั่วไป คือ  $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}\text{O}_2$  หรือมีมากกว่าหนึ่งพันธะ เช่น palmitoleic acid, oleic acid, linoleic acid และ linolenic acid เป็นต้น

3. กรดไขมันที่มีโครงสร้างแบบอื่น (fatty acids of unusual structure) เป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญน้อย และพบในปริมาณไม่มากนัก เช่น hydroxyl and dihydroxy acid, acetylenic acid, cyclopropenoid acid, epoxy acids, keto acid, cyclopentenoid acid, furanoid acid ฯลฯ

## 2.2 ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis* Jacq.) (รูปที่ 2.1) เป็นพืชน้ำมันสำหรับใช้ในการบริโภคและอุปโภคที่สำคัญ และสามารถให้ปริมาณน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่น



รูปที่ 2.1 ต้นปาล์มและผลปาล์ม [ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี, 2552]

ในกระบวนการสกัดน้ำมันจากผลปาล์ม จะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 2 ชนิด คือ

- น้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil) สกัดจากเนื้อปาล์ม มีสีส้ม เนื่องจากมีองค์ประกอบของเบต้าแคโรทีน โดยเบต้าแคโรทีนนี้สามารถกำจัดได้โดยนำน้ำมันปาล์มดิบไปต้ม จนกระทั่งสีส้มของน้ำมันปาล์มดิบจางหายไป น้ำมันปาล์มดิบเป็นน้ำมันพืชชนิดหนึ่งที่มีไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acids) ค่อนข้างสูง จึงมีน้ำมันบางส่วนที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งของแข็ง (semi-solid) ที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยังมีวิตามินเอและวิตามินอีสูงกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ

- น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (palm oil kernel oil) สกัดจากเมล็ดในผลของปาล์ม มีสมบัติคล้ายน้ำมันมะพร้าว มีกรดลอริก (lauric acid) ซึ่งเป็นกรดไขมันอิ่มตัวในปริมาณค่อนข้างมาก และมีกรดไขมันไม่อิ่มตัว (polyunsaturated fatty acids, PUFA) ในปริมาณน้อย น้ำมันเมล็ดในผลของปาล์มสามารถแยกออกเป็นส่วนของแข็งและของเหลวได้ โดยการกรองและบีบอัดความดัน ส่วนที่เป็นของแข็ง เรียกว่า สเตียร์น (stearin) ใช้ทำเนย ส่วนที่เป็นของเหลว เรียกว่า โอเลอิน (olein) ใช้ในการบริโภคและในอุตสาหกรรมการผลิตสบู่ (มฤดี เชาวรัตน์, 2540)

น้ำมันปาล์มดิบประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) และกรดไขมันที่อิ่มตัว (saturated fatty acid) ในสัดส่วนที่สมดุล และมีวิตามินอีสูงจึงส่งผลให้น้ำมันปาล์มมีเสถียรภาพสูง กรดไขมันไม่อิ่มตัวส่วนใหญ่จะเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวพันธะเดี่ยวโอเลอิก (monounsaturated oleic acid) ร้อยละ 40 ขณะที่กรดไขมันไม่อิ่มตัวประกอบด้วย กรดปาล์มมิติก (palmitic acid) ร้อยละ 44 และกรดสเตียริก (stearic acid) ร้อยละ 5 ด้วยสัดส่วนของกรดไขมันดังกล่าว ทำให้น้ำมันปาล์มมีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารหลายประเภท นอกจากนี้ น้ำมันปาล์มยังใช้เป็นส่วนผสมของเนยเหลืองหรือมาการีน และใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสบู่ ผงซักฟอก เครื่องสำอาง และยา (พรภรณ์ีย์ วิชาชู, 2550)

## 2.3 ปฏิริยาอะตะไลซิส (catalysis reaction) (Casumano, 1978; Satterfield, 1991)

ปฏิริยาอะตะไลซิสเป็นปฏิริยาที่นำตัวเร่งปฏิริยาเข้ามาใช้เพื่อให้ปฏิริยาสามารถดำเนินไปได้รวดเร็วขึ้น ตัวเร่งปฏิริยาที่นำมาใช้จะมีหน้าที่ไปลดพลังงานกระตุ้นของปฏิริยา โดยที่ไม่ทำปฏิริยากับสารตั้งต้นหรือไปรบกวนสมดุลของปฏิริยา จึงมีความหมายโดยสรุปว่า ตัวเร่งปฏิริยาเป็นตัวเพิ่มอัตราการเกิดปฏิริยาเท่านั้น โดยเมื่อพิจารณาค่าคงที่สมดุลของปฏิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิริยาต้องไม่ทำให้ค่าคงที่สมดุลของเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้อัตราเร็วของการเกิดปฏิริยาไปข้างหน้าและอัตราเร็วของปฏิริยาย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตามทฤษฎีเมื่อสิ้นสุดปฏิริยาจะได้ตัวเร่งปฏิริยากลับมาเท่ากับปริมาณที่ใช้ตอนเริ่มต้นโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพ แต่ในทางปฏิบัติตัวเร่งปฏิริยาอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือองค์ประกอบได้ เช่น การเปลี่ยนอัตราส่วนของออกซิเจนต่อโลหะในตัวเร่งปฏิริยาที่เป็นโลหะออกไซด์บางชนิดที่อุณหภูมิสูง หรือการสัมผัสของสารตั้งต้นในระหว่างการทำปฏิริยาโดยสามารถแบ่งปฏิริยาอะตะไลซิสจากวัฏภาคของตัวเร่งปฏิริยากับสารตั้งต้นได้เป็น 3 ประเภท คือ

### 2.3.1 ปฏิริยาอะตะไลซิสแบบเอกพันธ์ (homogeneous catalysis reaction)

ปฏิริยาอะตะไลซิสแบบเอกพันธ์เป็นปฏิริยาที่ตัวเร่งปฏิริยาและสารตั้งต้นอยู่ในสถานะเดียวกัน โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.3.1.1 ตัวเร่งปฏิริยาที่เป็นแก๊ส เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิริยาที่ทำให้เกิดการออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

2.3.1.2 ตัวเร่งปฏิริยาที่เป็นของเหลว ได้แก่ การใช้กรดและเบสเป็นตัวเร่งปฏิริยาในกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างของสารละลายน้ำตาลกลูโคส

### 2.3.2 ปฏิริยาอะตะไลซิสแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalysis reaction)

ปฏิริยาอะตะไลซิสแบบวิวิธพันธุ์เป็นปฏิริยาที่ตัวเร่งปฏิริยาและสารตั้งต้นอยู่ต่างสถานะหรือไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยส่วนมากตัวเร่งปฏิริยาจะเป็นของแข็ง ในขณะที่สารตั้งต้นเป็นแก๊สหรือของเหลว หรือแก๊สรวมอยู่กับของเหลว โดยตัวเร่งปฏิริยาจะมีสมบัติทางเคมีของผิวที่ทำให้เกิดปฏิริยาอะตะไลซิส การเกิดปฏิริยาจะเกิดเฉพาะที่ผิวของตัวเร่งปฏิริยาโดยมักจะเป็นปฏิริยาการดูดซับ และไม่เกิดปฏิริยาทะลุเข้าไปถึงเนื้อในของของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิริยาหรือตัวรองรับ อัตราเร็วของการเกิดปฏิริยาจะแปรผันตรงกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิริยาที่สัมผัสกับสารตั้งต้นและความเข้มข้นของโมเลกุลที่ดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิริยา

### 2.3.3 ปฏิริยาอะตะไลซิสแบบเอนไซม์

ปฏิริยาอะตะไลซิสแบบเอนไซม์เป็นปฏิริยาที่สารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนที่มีโมเลกุลใหญ่ โดยมีความเกี่ยวข้องกับวิถีของการดำเนินปฏิริยาชีวเคมี และอยู่ก้ำกึ่งระหว่างตัวเร่งปฏิริยาแบบเอกพันธุ์และตัวเร่งปฏิริยาแบบวิวิธพันธุ์

## 2.4 ตัวเร่งปฏิริยา (วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ, 2534)

ตัวเร่งปฏิริยาเป็นสารที่เติมลงไปในปฏิริยาในจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับสารตั้งต้นแล้วทำให้ปฏิริยาเกิดเร็วขึ้น โดยที่ตัวสารเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหลังจากปฏิริยาเสร็จสิ้น โดยสมดุลของตัวเร่งปฏิริยาไม่เปลี่ยน

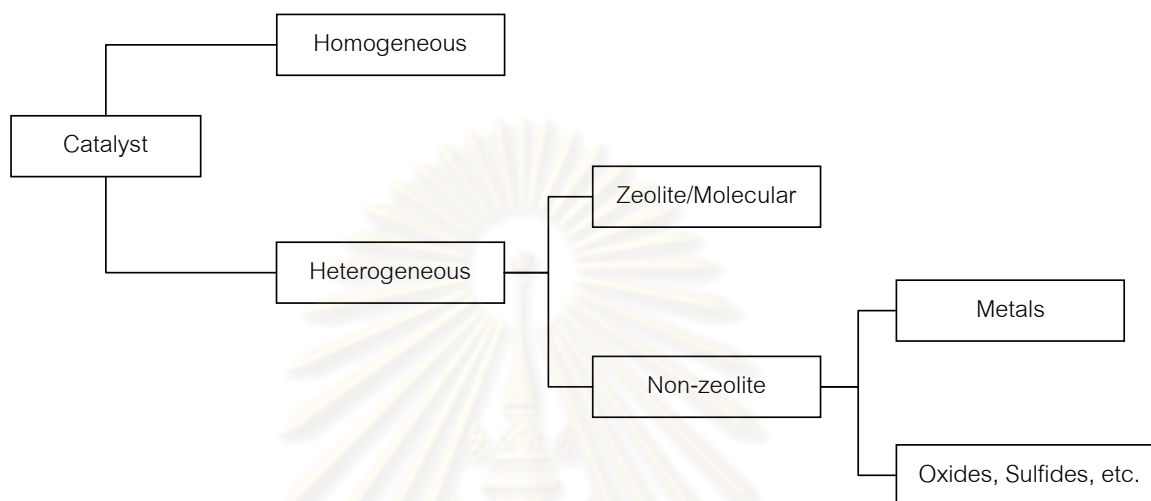
### 2.4.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิริยา

1. ไม่รบกวนสมดุลของตัวเร่งปฏิริยา
2. ช่วยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิริยา ( $E_a$ )
3. ต้องเป็นสสารเสมอ

### 2.4.2 ประเภทของตัวเร่งปฏิริยา

การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิริยา นิยมทำโดยการพิจารณาว่าตัวเร่งปฏิริยาอยู่ในวัฏภาค (phase) เดียวกับสารตั้งต้นหรือไม่ การใช้เกณฑ์นี้ทำให้สามารถแบ่งตัวเร่งปฏิริยาออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ ถ้าตัวเร่งปฏิริยาอยู่ในวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้นจัดว่าเป็นตัวเร่งปฏิริยาเอกพันธุ์ (homogeneous catalyst) แต่ถ้าตัวเร่งปฏิริยาอยู่คนละวัฏภาคกับสารตั้งต้น

จัดว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์ (heterogeneous catalyst) การแบ่งประเภทตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังรูปที่ 2.2

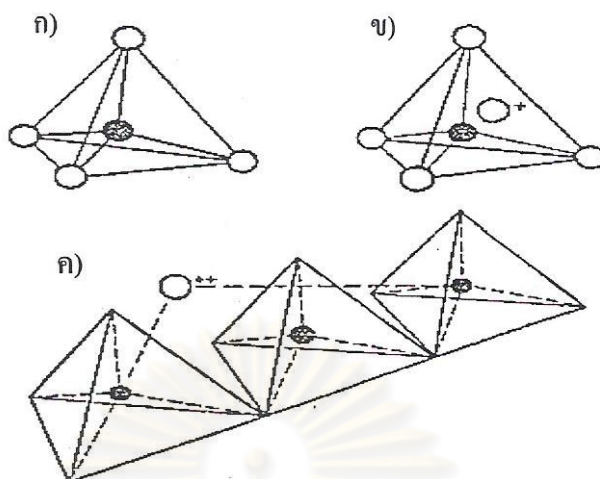


รูปที่ 2.2 การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา

ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ คือ ทุกโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมเข้าไปในระบบจะมีลักษณะที่เหมือนกันและอยู่ในสถานะเดียวกันกับสารตั้งต้น ดังนั้นรูปแบบการทำปฏิกิริยาจึงเหมือนกันด้วย ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์ซึ่งส่วนมากเป็นของแข็งนั้น เฉพาะส่วนของโครงสร้างที่อยู่บนผิวเท่านั้นที่มีการทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น อะตอม ไอออน หรือหมู่โครงสร้างที่อยู่ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้างผลึก จะมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน จึงทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยานอกเหนือไปจากปฏิกิริยาที่ต้องการได้ง่าย

ถึงแม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์จะให้ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์ก็ตาม (ทั้งนี้เพราะทุกโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาเหมือนกันหมด) แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มักจะมีเสถียรภาพที่ต่ำกว่า เพราะโครงสร้างอาจเกิดการสลายตัวได้ที่อุณหภูมิสูง ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงซึ่งเป็นช่วงที่ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็ว และยังก่อให้เกิดปัญหาในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกมาจากผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ในบางครั้งยังมีปัญหาในด้านการกัดกร่อนอุปกรณ์ และการเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้เนื่องด้วยข้อจำกัดทางด้านความสามารถในการละลาย ด้วยเหตุนี้การใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ในอุตสาหกรรมเคมี กลั่นน้ำมันและปิโตรเคมีจึงอยู่ในวงแคบกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์





รูปที่ 2.4 โครงสร้างทรงสี่หน้าของ (ก)  $(\text{SiO}_4)^{4-}$  (ข)  $(\text{AlO}_4)^{5-}$  และ  
(ค) การจัดเรียงตัวในผลึกของซีโอไลต์

เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์มีขนาดของช่องว่างหรือโพรงที่สม่ำเสมอ โดยทั่วไปมีขนาดประมาณ 3-10 อังสตรอม ขึ้นกับหน่วยของโครงสร้างผลึก จึงทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติเหมือนตะแกรงร่อนโมเลกุล (molecular sieve) ซึ่งจะยอมให้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าโพรงเข้าไปในโครงสร้าง ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าโพรงไม่สามารถผ่านเข้าได้ นอกจากนี้ถ่านหินแแก้วที่มีรูพรุน (porous glass) และถ่านคาร์บอน (active carbon) ก็มีสมบัตินี้เช่นกัน

### 2.5.1 ประวัติซีโอไลต์ (ตะวัน สุขน้อย, 2540; Dyer, 1988; Breck, 1974)

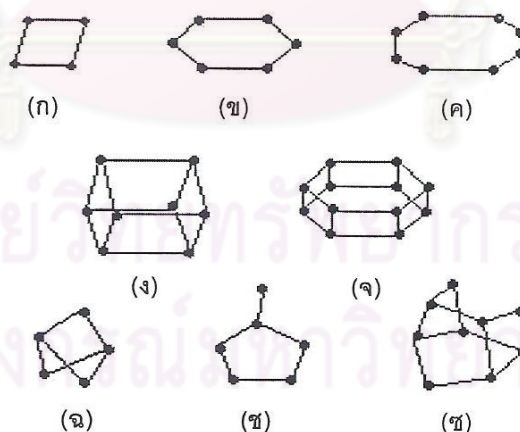
ซีโอไลต์ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1756 ซึ่งเป็นซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด stilbite คำว่า ซีโอไลต์ มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก แปลว่า หินเดือด (boiling stones) โดย zeo แปลว่า เดือด และ lithos แปลว่า หิน เนื่องจากเมื่อมีการให้ความร้อนซีโอไลต์จะปลดปล่อยไอน้ำออกมา และซีโอไลต์สามารถดูดน้ำกลับคืนได้ง่าย กล่าวคือเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ ต่อมาในปี ค.ศ. 1840 ได้ค้นพบว่า เมื่อผลึกซีโอไลต์ที่มีน้ำอยู่ในโครงผลึก (hydrated zeolite) จะสูญเสียน้ำจากการดีไฮเดรชัน (dehydration) แล้วจะทำให้ได้ซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ (spongy-framework) ซึ่งสามารถดูดซับแอลกอฮอล์ เบนซีน คลอโรฟอร์ม คาร์บอนไดออกไซด์ และปรอทได้ จากนั้นในปี ค.ศ. 1845 ได้ทำการทดลองและพบว่า ดินสามารถดูดซับเกลือแอมโมเนียได้เมื่อเทสารละลายของเกลือแอมโมเนียผ่านลงไปบนดิน และเมื่อกรองจะได้สารละลายของแคลเซียมผ่านลงมา ส่วนเกลือแอมโมเนียถูกดินดูดซับไว้

ในปี ค.ศ.1862 St. Claire Deville สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ levynite ได้โดยให้ความร้อนแก่สารละลายผสมของโพแทสเซียมซิลิเกตกับโซเดียมอะลูมิเนต ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และในปี ค.ศ.1882 Schulten สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ Analcime ได้ และในช่วงปี ค.ศ.1956 สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ A และชนิด X ได้ในปี ค.ศ.1960 และได้มีการนำซีโอไลต์ไปใช้ในกระบวนการปิโตรเลียม หลังจากนั้นการพัฒนาทางด้านซีโอไลต์เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งถึงปัจจุบันพบว่าซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติสามารถแบ่งได้เป็น 34 ชนิด และซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์มีประมาณ 100 ชนิด อย่างไรก็ตามพบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์สามารถนำไปใช้งานแพร่หลายในเชิงพาณิชย์มากกว่าซีโอไลต์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ

## 2.5.2 การจำแนกซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง

(อิริชา ฉายสุวรรณ, 2541; จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษฎานุรักษ์, 2547)

โครงสร้างของซีโอไลต์สามารถแบ่งเป็นหน่วยโครงสร้างย่อยๆ (sub-units) ของทรงสี่หน้าของอะลูมิเนียมและซิลิกอนที่จัดเรียงตัวซ้ำๆกัน โดยเรียกหน่วยย่อยของโครงสร้างนี้ว่าเป็นหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Units: SBUs) ซึ่งแบ่งได้เป็น 8 SBUs ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6



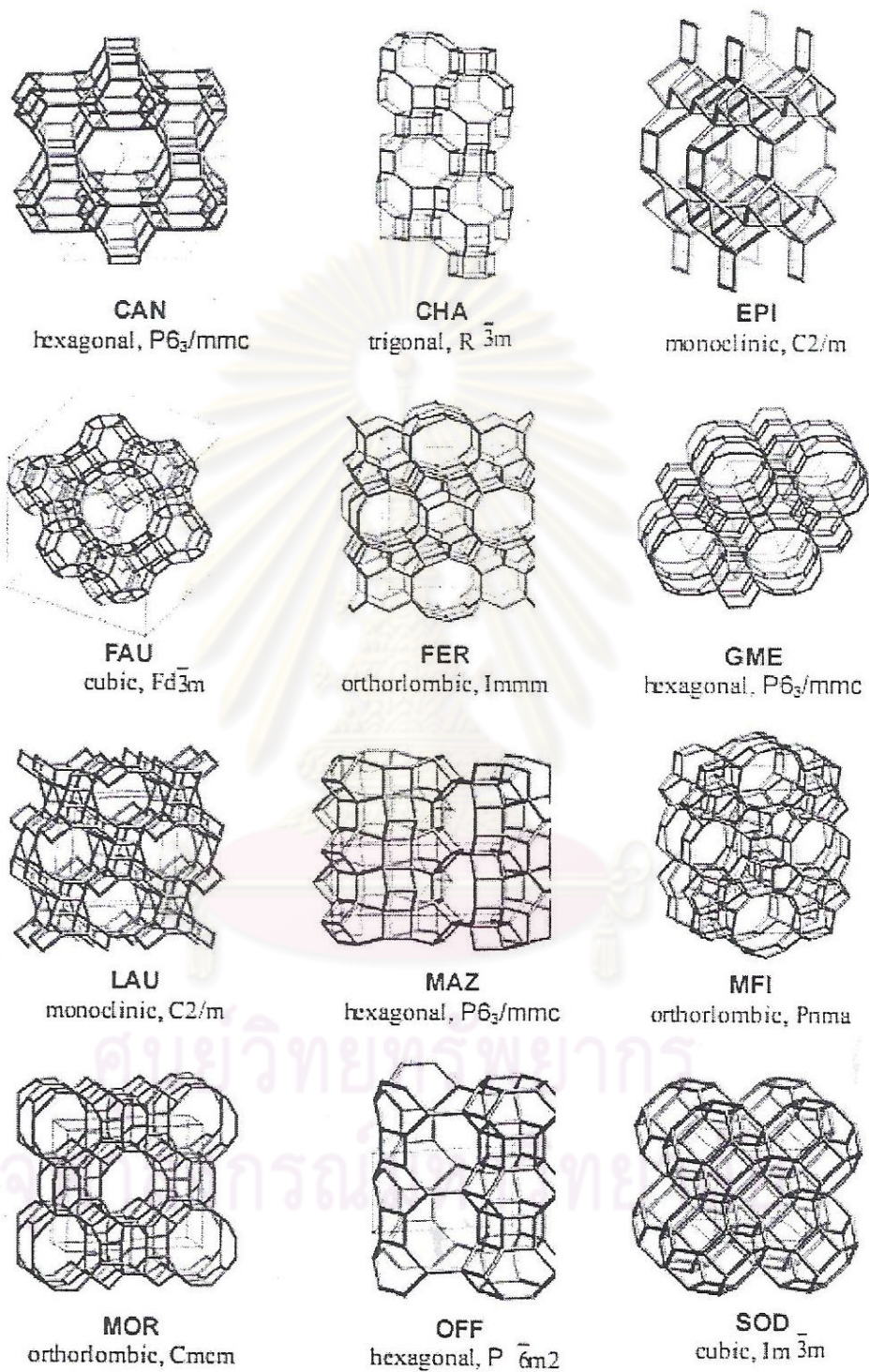
**รูปที่ 2.5** หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ (ก) single four ring (S4R),

(ข) single six ring (S6R), (ค) single eight ring (S8R), (ง) double four ring (D4R),

(จ) double six ring (D6R), (ฉ) complex 4-1, (ช) complex 5-1

และ (ซ) complex 4-4-1 (Dyer, 1988)





รูปที่ 2.6 ลักษณะเชิงโครงสร้างของซีโอไลต์ (J.V. Smith, 1976; Szostak, 1989)

การจำแนกชนิดของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุติยภูมิ สามารถแบ่งกลุ่มโครงสร้างของซีโอไลต์ได้เป็น 7 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และสามารถจำแนกโครงสร้างของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุติยภูมิได้ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 การจำแนกกลุ่มของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุติยภูมิ (Breck, 1974)

Group	Secondary Building Units (SBUs)
1	Single 4-ring, S4R
2	Single 6-ring, S6R
3	Double 4-ring, D4R
4	Double 6-ring, D6R
5	Complex 4-1, T5O10 unit
6	Complex 5-1, T8O16 unit
7	Complex 4-4-1, T10O20 unit

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างของซีโอไลต์จำแนกตามโครงสร้างทุติยภูมิ (Breck, 1974)

Secondary Building Units (SBUs)	Structure Type	Name	Typical unit cell content
S4R	ANA	Analcime	$\text{Na}_{16}\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}\cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	ANA	Wairakite	$\text{Ca}_8\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$
	GIS	Gismondine	$\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$
	GIS	Amicite	$\text{K}_4\text{Na}_4\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}\cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	GIS	Gobbinsite	$\text{Na}_5\text{Al}_5\text{Si}_{11}\text{O}_{32}\cdot 11\text{H}_2\text{O}$
	GIS	Zeolite NaP-1	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$
	LAU	Laumonite	$\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{46}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$
	MER	Merlionite	$\text{K}_5\text{Ca}_2\text{Al}_9\text{Si}_{23}\text{O}_{64}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$
	PAU	Paulingite	$(\text{K}_2,\text{Na}_2,\text{Ca},\text{Ba})_{76}\text{Al}_{152}\text{Si}_{520}\text{O}_{1344}\cdot 700\text{H}_2\text{O}$
	PHI	Phillipsite	$\text{K}_2\text{Ca}_{1.5}\text{NaAl}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$

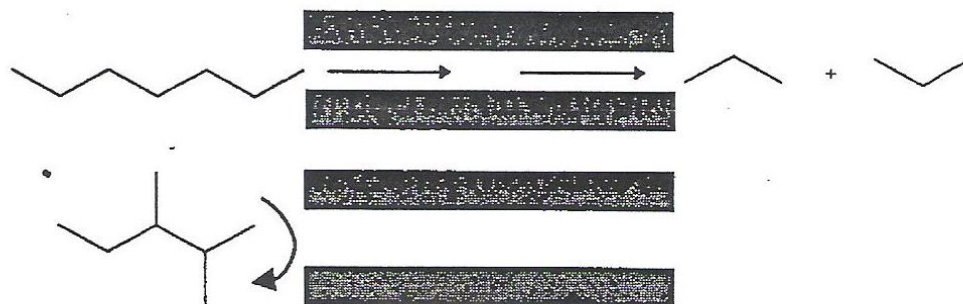
ตารางที่ 2.3 โครงสร้างของซีโอไลต์จำแนกตามโครงสร้างทุติยภูมิ (Breck, 1974) (ต่อ)

Secondary Building Units (SBUs)	Structure Type	Name	Typical unit cell content
	PHI	Harmotoma	$Ba_2Ca_{0.5}Al_5Si_{11}O_{32} \cdot 12H_2O$
	YUG	Yugawaralite	$Ca_2Al_4Si_{12}O_{32} \cdot 8H_2O$
S6R	CAN	Cancrinite hydrate	$Na_6Al_6Si_6O_{24} \cdot 8H_2O$
	ERI	Erionite	$Na_2K_2Mg_{0.5}Ca_2Al_9Si_{27}O_{72} \cdot 27H_2O$
	LEV	Levynite (Levyne)	$NaCa_3Al_7Si_{11}O_{36} \cdot 12H_2O$
	LTL	Zeolite L	$K_6Na_3Al_9Si_{27}O_{72} \cdot 21H_2O$
	LOS	Zeolite Losod	$Na_{12}Al_{12}Si_{12}O_{48} \cdot 19H_2O$
	MAZ	Mazzite (Zeolite Omega)	$Mg_2K_3Ca_{1.5}Al_{10}Si_{26}O_{72} \cdot 28H_2O$
	OFF	Offertite	$KCa_2Al_5Si_{13}O_{36} \cdot 15H_2O$
	SOD	Sodalite hydrate (HS)	$Na_6Al_6Si_6O_{24} \cdot 8H_2O$
D4R	LTA	Zeolite A	$Na_{12}Al_{12}Si_{12}O_{48} \cdot 27H_2O$
D6R	CHA	Chabazite	$Ca_2Al_4Si_8O_{24} \cdot 13H_2O$
	CHA	Wilhendersonite	$K_2Ca_2Al_6Si_6O_{24} \cdot 10H_2O$
	FAU	Faujasite	$Na_{12}Ca_{12}Mg_{11}Al_{58}Si_{134}O_{384} \cdot 235H_2O$
	FAU	Zeolite X	$Na_{88}Al_{88}Si_{104}O_{384} \cdot 220H_2O$
	GME	Gmelinite	$Na_8Al_8Si_{16}O_{48} \cdot 24H_2O$
	KFI	Zeolite ZK-5	$Na_{30}Al_{30}Si_{66}O_{192} \cdot 98H_2O$
	RHO	Zeolite Rho	$(Na,Cs)_{12}Al_{12}Si_{36}O_{96} \cdot 46H_2O$
	EDI	Edingtonite	$Ba_2Al_4Si_6O_{20} \cdot 8H_2O$
	NAT	Natrolite	$Na_{16}Al_{16}Si_{24}O_{80} \cdot 16H_2O$
	NAT	Tetranatrolite	$Na_{16}Al_{16}Si_{24}O_{80} \cdot 16H_2O$
	NAT	Paranatrolite	$Na_{16}Al_{16}Si_{24}O_{80} \cdot 16H_2O$
	NAT	Mesolite	$Na_{16}Ca_{16}Al_{48}Si_{72}O_{240} \cdot 64H_2O$
	NAT	Scoliecite	$Ca_8Al_{16}Si_{24}O_{80} \cdot 24H_2O$

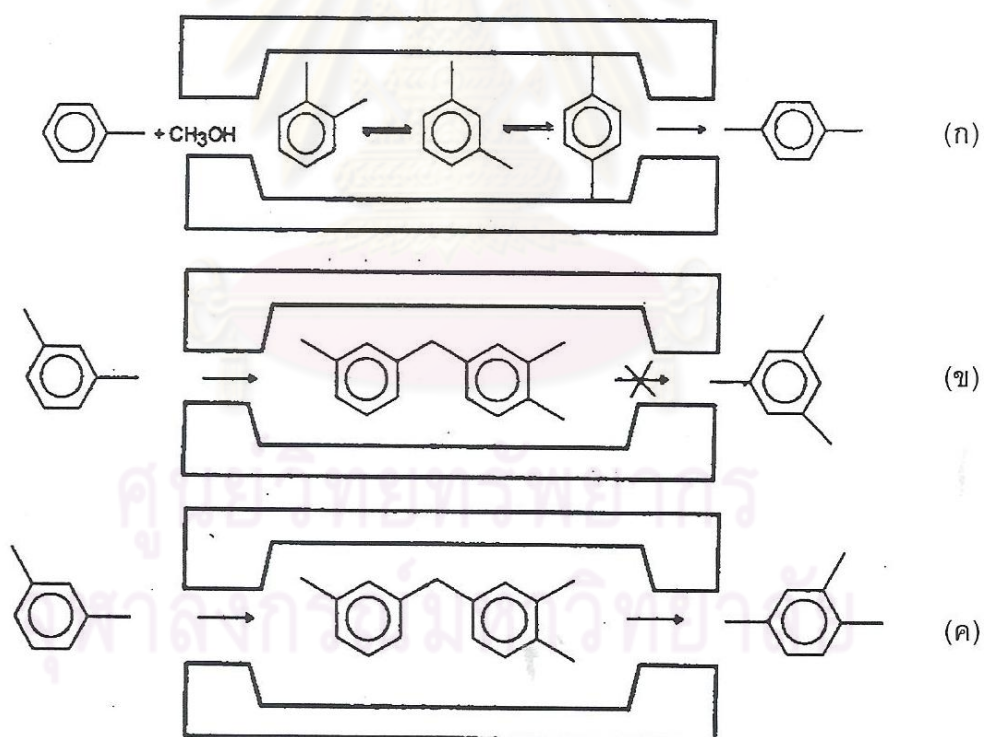
ตารางที่ 2.3 โครงสร้างของซีโอไลต์จำแนกตามโครงสร้างทุติยภูมิ (Breck, 1974) (ต่อ)

Secondary Building Units (SBUs)	Structure Type	Name	Typical unit cell content
5-1	THO	Thomsonite	$\text{Na}_4\text{Ca}_8\text{Al}_{20}\text{Si}_{20}\text{O}_{80}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$
	THO	Gonnardites	$\text{Na}_5\text{Ca}_2\text{Al}_9\text{Si}_{11}\text{O}_{40}\cdot 14\text{H}_2\text{O}$
	BIK	Bikitaite	$\text{Li}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	DAC	Dachiardite	$\text{Na}_5\text{Al}_5\text{Si}_{19}\text{O}_{48}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$
	EPI	Epistilbite	$\text{Ca}_3\text{Al}_6\text{Si}_{18}\text{O}_{48}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$
	FER	Ferrierite	$\text{NaCa}_{0.5}\text{Mg}_2\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}\cdot 20\text{H}_2\text{O}$
	MFI	Zeolite ZSM-5	$\text{Na}_n\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192}\sim 16\text{H}_2\text{O}$ (n~3)
4-4-1	MOR	Mordenite	$\text{Na}_8\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$
	BRE	Brewsterite	$\text{Sr}_2\text{Al}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{32}\cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	HEU	Heulandite	$\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$
	HEU	Clinoptilolite	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$
	STI	Stibite	$\text{Na}_2\text{Ca}_4\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72}\cdot 34\text{H}_2\text{O}$
	STI	Stellerite	$\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}\cdot 28\text{H}_2\text{O}$
	STI	Barrerite	$\text{Na}_8\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$

การที่ซีโอไลต์มีขนาดและรูปร่างของโพรงที่เป็นลักษณะเฉพาะตัว ทำให้ซีโอไลต์มีความจำเพาะสูงเชิงรูปร่าง (shape selectivity) พิเศษในการเร่งปฏิกิริยาเคมี คือ สามารถเลือกสารตั้งต้นให้เข้ามาทำปฏิกิริยาได้ ถ้าสารตั้งต้นมีขนาดใหญ่กว่าโพรงจะไม่สามารถผ่านเข้าไปจับกับตำแหน่งว่องไว (active site) ได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 นอกจากนี้รูปร่างของผลิตภัณฑ์ก็มีผลต่อปฏิกิริยาเช่นกัน รูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดผลิตภัณฑ์แล้ว สารที่มีรูปร่างเหมาะสมเท่านั้นจึงผ่านออกมาจากโพรงของซีโอไลต์ได้ ส่วนสารที่มีกึ่ง้านมากจะติดอยู่ภายในโพรง



รูปที่ 2.7 การเลือกทำปฏิกิริยาจากรูปร่างของสารตั้งต้นภายในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์  
(จตุพร และนุรักษ์, 2547)



รูปที่ 2.8 การเลือกทำปฏิกิริยาภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ (ก) การเลือกทำปฏิกิริยา  
(ข) การเลือกจากรูปร่างของสารมัธยันต์ (intermediate) และ  
(ค) การเลือกจากรูปร่างของสารผลิตภัณฑ์ (จตุพร และนุรักษ์, 2547)

### 2.5.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Dyer, 1988)

การสังเคราะห์ซีโอไลต์สามารถทำได้โดยใช้กระบวนการให้ความร้อนที่ความดันไอน้ำอิ่มตัว (hydrothermal) โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียส และความดันสูง ปฏิกิริยาจะดำเนินไปตามระยะเวลา ความดัน อุณหภูมิที่กำหนด ภายใต้ความดันไอน้ำอิ่มตัว อย่างไรก็ตามได้มีวิธีการใหม่ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิจนถึงจุดเดือดของน้ำ

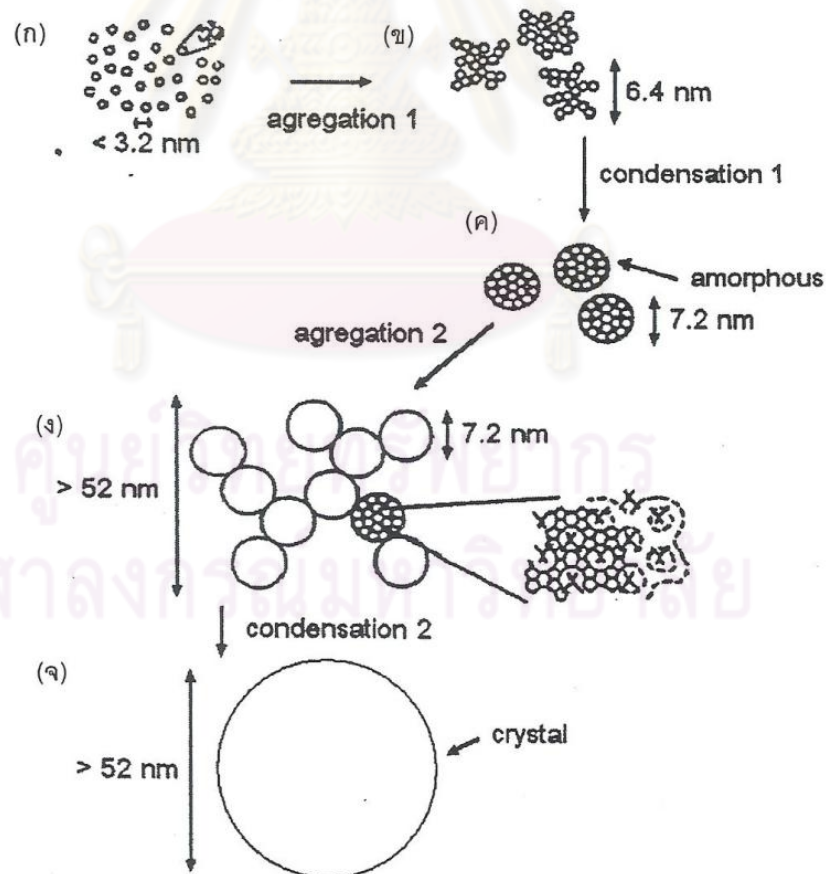
#### องค์ประกอบหลักในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

1. อะลูมิเนียม การสังเคราะห์ซีโอไลต์ในการทดลองโดยทั่วไปจะใช้เมทัลอะลูมิเนต (metal aluminates) เป็นสารตั้งต้น เช่น โซเดียมอะลูมิเนต หรืออาจใช้  $Al(OH)_3$ ,  $AlO(OH)$  อะลูมิเนียมแอลคอกไซด์ เกลืออะลูมิเนียม หรือแหล่งแร่อะลูมิเนียมตามธรรมชาติ เช่น แก้ว หินฟันม้า หรือเฟลด์สปาทอยด์ (feldspatoides)
2. ซิลิกอน โดยทั่วไปจะใช้สารละลายของซิลิกา เช่น โซเดียมเมทาซิลิเกต เพนตะไฮเดรต (sodium metasilicate pentahydrate) ซิลิกาไซล เช่น ซิลิกา ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก บางครั้งอาจใช้ซิลิกาเจล แก้ว ทราาย แร่ควอร์ตซ์ เป็นต้น
3. ไอออนบวก ได้แก่ ไอออนของโลหะหมู่ I และหมู่ II ที่อยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ยังสามารถเตรียมได้จากสารประกอบออกไซด์ และเกลือชนิดอื่นๆของโลหะหมู่ I และหมู่ II
4. สารเคมีอื่นๆ เช่น สารประกอบอินทรีย์ (organic compounds) ที่แตกตัวให้ไอออนบวก ซึ่งเรียกว่า สารก่อโครงร่าง (template) โดยใส่ในเจลเพื่อช่วยในการตกผลึกของซีโอไลต์ เช่น เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น

การสังเคราะห์ซีโอไลต์ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal process) โดยการนำสารประกอบซิลิกา เช่น โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) สารประกอบอะลูมินา เช่น โซเดียมอะลูมิเนต หรืออะลูมิเนียมซัลเฟต (aluminium sulfate) เป็นต้น ผสมกับสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนจะเป็นตัวช่วยเปลี่ยนซิลิกาให้อยู่ในรูปของซิลิเกตโดยสารละลายที่ผสมกันแล้วเรียกว่า เจล เป็นสาร hydrous metal aluminosilicate ที่เกิดจากการเกิดโคโพลิเมอร์ไรเซชัน (copolymerization) ของซิลิเกตและอะลูมิเนตที่อยู่ในสารละลาย มีกลไกการเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่น (condensation-polymerization mechanism) เจลที่ได้สามารถนำไปสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยการตกผลึกภายใต้กระบวนการควบคุม

คุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆกัน ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิประมาณ 175 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามบางครั้งอาจใช้อุณหภูมิสูงถึง 300 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้เป็นความดันออตโตจีเนียส (autogeneous pressure) ซึ่งมีค่าประมาณใกล้เคียงกับความดันไอที่อิ่มตัว (saturated vapor pressure) ของน้ำที่อุณหภูมิที่กำหนดโดยระยะเวลาที่ใช้ในการตกผลึกอาจมีค่าตั้งแต่สองถึงสามชั่วโมงไปจนถึงระยะเวลาที่เป็นวัน

ขั้นตอนการเกิดซีโอไลต์เริ่มจากการเกิดเจล ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งมีกระบวนการที่เกี่ยวข้อง คือ (รูป ก) การรวมกลุ่มกันของเจล (aggregation) ที่มีอนุภาคเล็กกว่า 3.2 นาโนเมตร เป็นกลุ่มสายโซ่ที่มีขนาดประมาณ 6.4 นาโนเมตร (รูป ข) ซึ่งจะเกิดจากการควบแน่นต่อไปเป็นอนุภาคอสัณฐาน (amorphous) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7.2 นาโนเมตร (รูป ค) จากนั้นอนุภาคอสัณฐานจะรวมกลุ่มกันเป็นสายโซ่ที่มีความยาวมากกว่า 52 นาโนเมตร (รูป ง) และสุดท้ายคือ การจับกันอีกครั้งหนึ่งของสายโซ่ที่เกิดจากอนุภาคอสัณฐานพร้อมกับการจัดโครงสร้างเป็นผลึก (รูป จ)



รูปที่ 2.9 การเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์จากอนุภาคของเจล (จตุพร และนุรักษ์, 2547)

#### 2.5.4 ประโยชน์ของซีโอไลต์ (Breck, 1974; จำรัส ลิ้มตระกูล, 2540)

เนื่องด้วยสมบัติของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้าง อันได้แก่

1. สามารถเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ในปริมาณมาก
2. มีความหนาแน่นต่ำและมีปริมาตรช่องว่างมากเมื่อถูกดึงน้ำออกจากโครงสร้าง
3. มีความเสถียรเมื่อน้ำถูกดึงออกจากโครงสร้าง
4. สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้
5. มีขนาดช่องว่างที่เท่ากันสม่ำเสมอ เมื่อผลึกถูกดึงน้ำออกจากโครงสร้าง
6. สามารถดูดซับแก๊สและไอได้
7. มีสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ด้วยสมบัติสำคัญต่างๆของซีโอไลต์ ส่งผลให้มีการนำซีโอไลต์ไปใช้ประโยชน์ที่หลากหลายแตกต่างกันออกไป โดยการใช้ประโยชน์จากซีโอไลต์ประกอบไปด้วย 3 ด้านหลักๆ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ตัวแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) และตัวดูดซับ (adsorbent)

##### 2.5.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา

เนื่องจากซีโอไลต์มีจุดหลอมเหลวสูง มีความคงทน และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปของเหลว หรือแก๊ส ทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน ส่งผลให้ซีโอไลต์มีความสำคัญในอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมีเป็นอย่างมาก โดยปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่

ก) การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking) เป็นการแตกพันธะของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวในน้ำมันดิบให้เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่สั้นลงและมีมูลค่าสูงขึ้น เช่น แกโซลีน

ข) การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (hydrocracking) เป็นการเปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็ก โดยการแตกพันธะคาร์บอน-คาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนช่วย

ค) รีฟอร์มมิง (reforming) ทำการเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลิฟาติกให้เป็นแอโรแมติก

ง) การเปลี่ยนไอโซเมอร์ของ  $C_5$  และ  $C_6$  ( $C_5/C_6$  isomerization) เป็นการเปลี่ยนเพนเทนและเฮกเซนที่มีค่าออกเทนต่ำให้เป็นไอโซเพนเทน และไดเมทิลบิวเทน ซึ่งมีค่าออกเทนที่สูงกว่าการกำจัดไขในน้ำมัน (dewaxing)



จ) การเติมหมู่แอลคิลในเบนซีน (benzene alkylation) เช่น การผลิตเอทิลเบนซีนจากเอทิลีนและเบนซีน หรือการผลิตคิวมินจากเบนซีนและโพรพิลีน เป็นต้น

ฉ) การเปลี่ยนไอโซเมอร์ของไซลีน (xylene isomerization) เป็นการเปลี่ยนไอโซเมอร์ของ *o*-ไซลีน ให้เป็น *p*-ไซลีน ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมกรด terephthalic เพื่อผลิตพอลิเอสเตอร์ (polyester)

#### 2.5.4.2 ตัวแลกเปลี่ยนประจุ

จากประจุบวกของโลหะที่เกาะกับซีโอไลต์อย่างหลวมๆพร้อมที่จะแลกเปลี่ยนกับโลหะอื่นเมื่ออยู่ในสารละลายได้ ด้วยหลักการนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้กับการลดความกระด้างของน้ำ เนื่องจากน้ำที่ไม่กระด้างหรือน้ำอ่อน เมื่อมีการเติมสารซักฟอกลงไปจะเกิดฟองในปริมาณมากโดยโลหะแอลคาไลน์ เช่น โซเดียม หรือโพแทสเซียมที่เกาะกับซีโอไลต์จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออน ซึ่งเป็นประจุของโลหะในน้ำที่เป็นสาเหตุของน้ำกระด้างและมีการนำซีโอไลต์มาใช้ลดความกระด้างของน้ำแทนฟอสเฟตในผงซักฟอก เนื่องจากฟอสเฟตที่ผสมในผงซักฟอก ถ้าใช้ในปริมาณมากจนเกินไปจะทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมได้ กล่าวคือ ฟอสเฟตจะทำให้พืชน้ำหรือพวกสิ่งมีชีวิตเล็กๆเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดปัญหาในการกำจัด และเมื่อมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดน้ำเสียได้

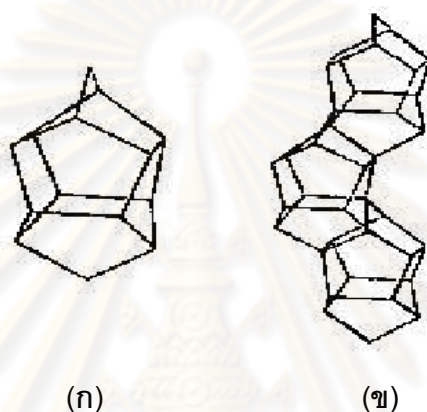
จากหลักการแลกเปลี่ยนประจุนี้ ทำให้สามารถใช้ซีโอไลต์ในการกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำเสีย โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแอมโมเนียมไอออนกับโซเดียมไอออนที่อยู่ในโพรงของซีโอไลต์

#### 2.5.4.3 ตัวดูดซับ

จากลักษณะพิเศษของโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้ดูดซับสารต่างๆได้ตามขนาดและโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด ซึ่งสามารถใช้ทั้งในกระบวนการดื่มน้ำออก (dehydration) การทำให้บริสุทธิ์ (purification) และการแยกสาร (separation) ซึ่งซีโอไลต์นั้นมีความสามารถในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่างเป็นหลักการพื้นฐานของการดูดซับโมเลกุล โดยสามารถเลือกให้มีการเลือกดูดซับเฉพาะบางโมเลกุล ส่วนการดื่มน้ำออกนั้น เนื่องจากซีโอไลต์ที่มีประจุบวกสามารถดูดซับน้ำได้ดีเป็นพิเศษ และสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ กล่าวคือ เมื่อมีการให้ความร้อนน้ำจะระเหยออกไปหมด แต่เมื่อซีโอไลต์เหล่านี้สัมผัสกับไอน้ำอีกครั้งจะสามารถดูดซับน้ำได้อีก หรืออาจนำไปใช้ดูดซับสารอื่นแทน เช่น แก๊สไฮโดรเจน ตะกั่ว หรือแอมโมเนีย

## 2.6 ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (Ramsharan, 2003; Szostak, 1992; Dyer 1988) (file all.doc)

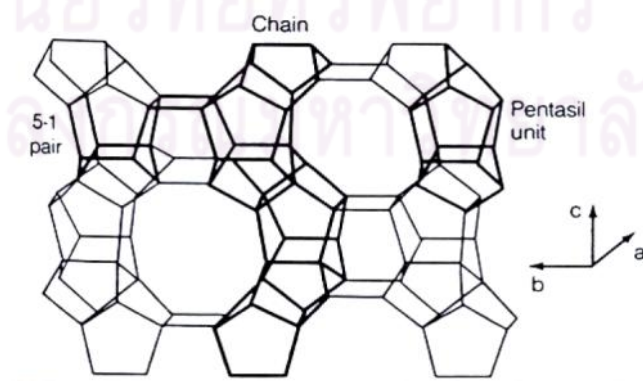
ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็นซีโอไลต์ที่ถูกจัดอยู่ในตระกูลเพนตะซิล (pentasil) ลักษณะของโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยของโครงสร้างย่อย (building unit) เป็นวงแหวนห้าเหลี่ยม (five-membered ring) จำนวน 8 วง ที่เชื่อมทรงสี่หน้าของซิลิกาปลอะอะลูมินาเข้าด้วยกัน (รูปที่ 2.10ก) หน่วยของโครงสร้างย่อยในซีโอไลต์ ZSM-5 จะต่อเรียงกันตรงบริเวณขอบต่อเรียงกันเป็นสายโซ่ (รูปที่ 2.10ข) ซึ่งสายโซ่เหล่านี้ได้เชื่อมโยงต่อกันเป็นแผ่นและมีการเชื่อมโยงจากแผ่นไปเป็นโครงสร้างสามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างย่อยของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (Kokotailo, 1978)

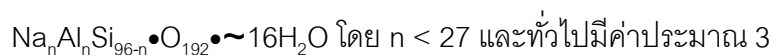
(ก) วงแหวนห้าเหลี่ยมโครงสร้างย่อยของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5

(ข) ลักษณะการเชื่อมต่อวงแหวนห้าเหลี่ยมเป็นโครงสร้างย่อยของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ในระนาบ [001]

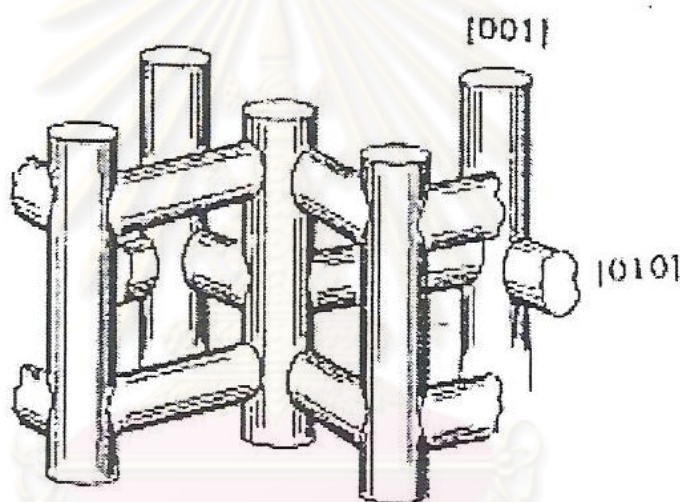


รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ระนาบ [100] (Kokotailo, 1978)

โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็น orthorhombic โดยมี  $a = 20.1$   $b = 19.9$  และ  $c = 13.4$  อังสตรอม บางครั้งอาจมีโครงสร้างเป็น monoclinic โดยมี  $\text{Na}^+$  เป็นองค์ประกอบในหน่วยเซลล์ (unit cell)



โครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 ประกอบไปด้วยช่องว่างสองระบบเชื่อมต่อกัน (intersection) โดยช่องว่างหนึ่งจะมีลักษณะเป็น sinusoidal ซึ่งวางตัวอยู่ในทิศ  $[001]$  และช่องว่างอีกระบบหนึ่งมีลักษณะเป็นท่อตรงในทิศ  $[010]$  ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะช่องว่างทั้งสองระบบในซีโอไลต์ ZSM-5 (Kokotailo, 1978)

การสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 มักใช้อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาในช่วงตั้งแต่ 20 ขึ้นไป จนถึงการใช้ซิลิกาบริสุทธิ์ ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = \infty$ ) ซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ได้ในกรณีหลังมีชื่อเรียกว่า ซิลิกาไลต์ (Silicalite) และมีการใช้สารก่อโครงสร้างซึ่งเป็นไอออนบวกของสารอินทรีย์ โดยโครงสร้างนี้จะช่วยลดการละลายของอะลูมินาและซิลิกาไฮดรอกไซด์ และช่วยจัดเรียงโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวของผลึกให้เกิดซีโอไลต์ตามชนิดที่ต้องการ ซึ่งสารก่อโครงสร้างเหล่านี้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สารก่อโครงสร้างที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 (Szostak, 1992)

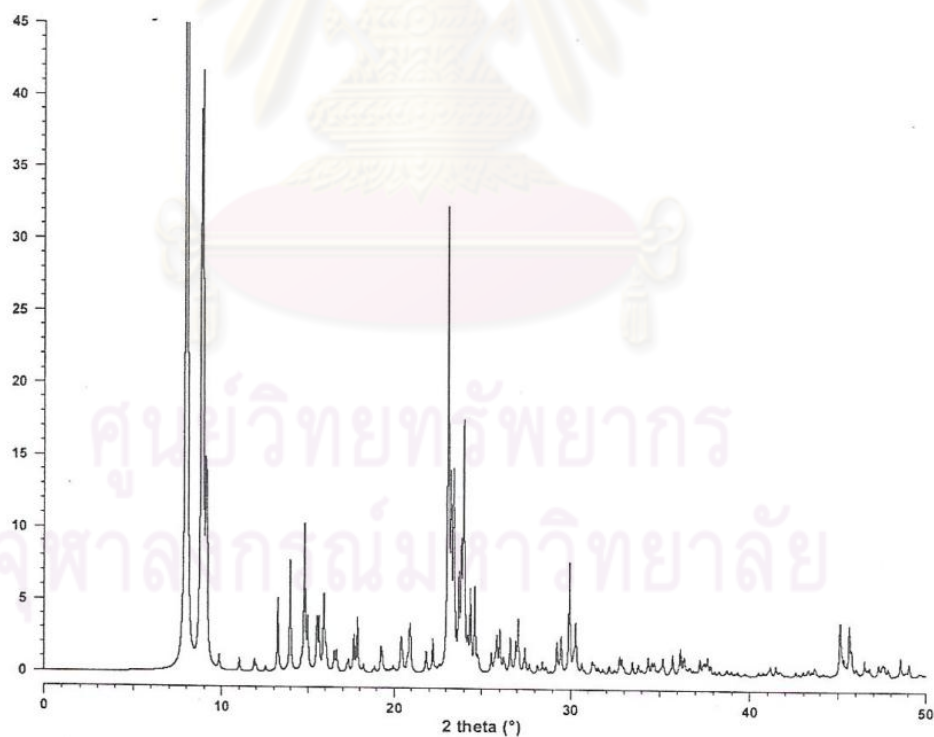
Organic	Citation
TPA	US3, 702, 886 (1972)
TEA	PP IZC 10 (1989)
DEA	Zeo. 8:508 (1988)
Tripropylamine	PP IZC 10 (1989)
Diethylamine	PP IZC 10 (1989)
DMEPA	US4, 565, 681 (1986)
HEXDM	Zeo. 8:495 (1988)
1,6-hexanediol	EP 42, 225 (1981)
no alkali	Ger. 3, 021, 580 (1981)
propylamine+propylbromide	JP 85, 71, 517 (19985)
tripropylamine+methyl iodide	JP 85, 71, 517 (1985)
triethyl-n-propylammonium <sup>+</sup>	Zeo. 2:313 (1982)
diquat phosphonium <sup>2+</sup>	Ger. 3, 333, (1982)
alkyltropinium	US4, 592, 902 (1986)
fluorocarbon-carboxylic acid	JP 84, 73, 425 (1984)
fluorocarbon-sulfonic acid	JP 84, 73, 425 (1984)
piperazine	Zeo. 8:501 (1988)
Pip+TPA	Zeo. 8:501 (1988)
Pip+TBA	Zeo. 8:501 (1988)
Pip+TrBPe	Zeo. 8:501 (1988)
Monoethylene glycol dimethylether	EP 51, 74 (1982)
Cyanoalkanes	JP 86, 68, 318 (1986)
Cyanoalkenes	JP 86, 68, 318 (1986)
N-2-hydroxyethylpiperazine-N-2-	US4, 639, 360 (1987)
Ethanesulfonic acid	

ตัวอย่างกระบวนการที่ใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่

1. การเปลี่ยนเมทานอลหรือสารประกอบที่มีออกซิเจน (oxygenate) ไปเป็นแกโซลีน (gasoline) ที่มีค่าออกเทนสูง หรือโอเลฟิน (olefins)
2. ปฏิกิริยาการเติมหมู่แอลคิล เช่น การสังเคราะห์เอทิลเบนซีน พาราเอทิลโทลูอีน โพรพิลเบนซีน หรือการเติมแอลคิลของโทลูอีนในไซลีน
3. การเปลี่ยนไอโซเมอร์ของไซลีนและพาราฟินชนิดเบา เช่น  $C_4-C_8$
4. การกำจัดไซในน้ำมัน
5. ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของแนฟทา
6. การสังเคราะห์เบนซีน โทลูอีน และไซลีน (BTX) จากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไซ

ตรง

ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 นั้น ใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ซึ่งรูปแบบ XRD ที่ได้ แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รูปแบบ XRD มาตรฐานของซีโอไลต์ ZSM-5 (M.M.J. Treacy, 2001)

## 2.7 กระบวนการการแตกตัว (cracking process)

(วิทยา เรื่องพหุวิสุทธิ, 2534; ปราโมทย์ไชยเวช, 2537; Satterfield, 1991; Schobert, 1991)

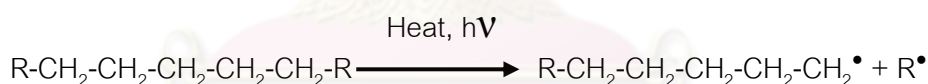
กระบวนการการแตกตัวสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามกลไกของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ

### 2.7.1 การแตกตัวด้วยความร้อน (thermal cracking)

การแตกตัวด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้มีขนาดของโมเลกุลเล็กลงโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพียงอย่างเดียว ซึ่งหากควบคุมให้การแตกตัวเป็นไปอย่างพอดี จะมีการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการในปริมาณมาก ในขณะที่การให้ความร้อนที่เกินพอดี จะทำให้โมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนแตกตัวมากเกินไป และได้ผลิตภัณฑ์เป็นโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น  $C_1$ - $C_4$  ซึ่งมีมูลค่าต่ำ

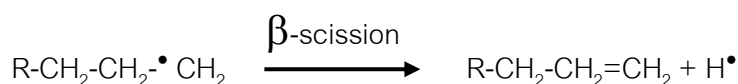
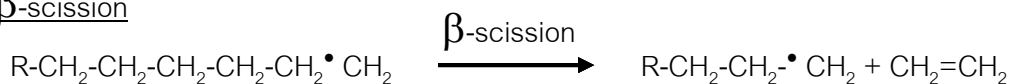
กระบวนการการแตกตัวด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (free radical) แบบห่วงโซ่ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

2.7.1.1 ขั้นเริ่มต้น (initiation step) เป็นขั้นตอนในการทำให้เกิดอนุมูลอิสระ โดยความร้อนไปทำให้พันธะคาร์บอน-คาร์บอนของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนแตกออก เกิดเป็นอนุมูลอิสระ ดังสมการ

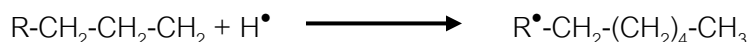


2.7.1.2 ขั้นการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (propagation step) อนุมูลอิสระในขั้นเริ่มต้นทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง โดยปฏิกิริยาจะเริ่มจากอนุมูลอิสระเข้าไปจับกับพันธะคาร์บอนที่ตำแหน่ง  $\beta$  เกิดอนุมูลอิสระใหม่ขึ้นมา ( $\beta$ -scission) ทำให้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเกิดความไม่เสถียร ส่งผลให้เกิดขั้นตอนการถ่ายทอดไฮโดรเจน (chain transfer) เพื่อทำให้โมเลกุลเกิดการเสถียร จึงเกิดเป็นสารต่างๆที่มีขนาดเล็กลงจากพอลิเมอร์เดิม พร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นต่อ เพื่อเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเรื่อยๆ

#### $\beta$ -scission



### Chain transfer



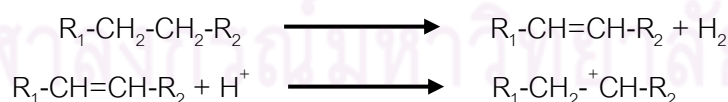
2.7.1.3 ขั้นหยุดปฏิกิริยา (termination step) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่องโดยทำปฏิกิริยากันเอง เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ใหญ่ขึ้น อาจเกิดเป็นโมเลกุลใหม่โมเลกุลเดียว หรือเกิดเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล



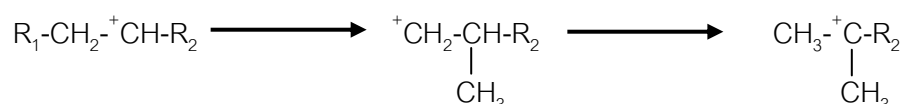
### 2.7.2 การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking)

การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาเป็นการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาช่วยมาการแตกย่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง เพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสมและมีคุณภาพพอดตามต้องการได้ กลไกการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย

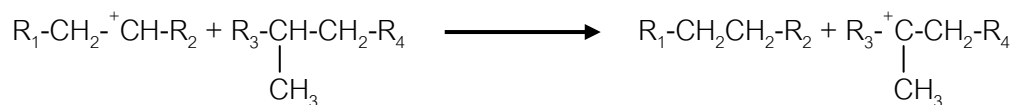
2.7.2.1 ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (dehydrogenation) และการเกิดคาร์บอนเนียมไอออน (carbonium ion) ขั้นตอนนี้เกิดจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรดีไอออนที่มีประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด ทำให้คาร์บอนเนียมไอออนมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า โดยคาร์บอนเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจะมีเสถียรภาพแตกต่างกันตามโครงสร้างของไอออน โดย tertiary ion จะมีเสถียรภาพมากกว่า secondary ion และ primary ion ตามลำดับ



2.7.2.2 ปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลภายในโมเลกุลของคาร์บอนเนียมไอออน ทำให้ได้คาร์บอนเนียมไอออนที่มีโครงสร้างที่เสถียรมากขึ้น



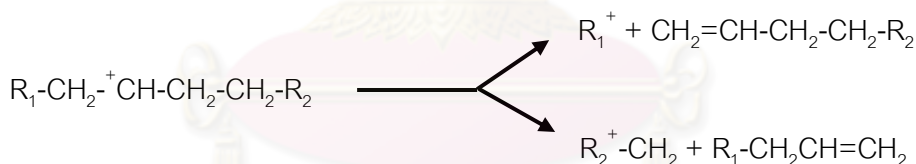
และเกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ (hydride transfer) จากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนหนึ่งไปยังคาร์บอนเนียมไอออน



สำหรับคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยา  $\beta$ -scission หรือการแตกพันธะที่ตำแหน่งเบต้า (นับจากคาร์บอนที่มีประจุบวก) ซึ่งจะได้สารประกอบโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดเล็กลง โดยมักจะเป็น primary carbonium ion ดังสมการ



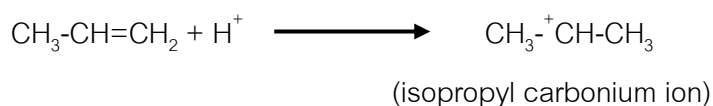
ในบางกรณีคาร์บอนเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 รูปแบบ เช่นในตัวอย่างของ secondary carbonium ion



ในส่วนของ  $R-CH=CH_2$  การเกิดการแตกพันธะที่ตำแหน่งเบต้า จะได้ผลิตภัณฑ์เพียงชนิดเดียว ดังสมการ



ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ โพรพีน (propene) เกิดจากปฏิกิริยาการเติมโปรตอนและอยู่ในรูปคาร์บอนเนียมไอออนซึ่งไม่สามารถเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้าต่อไปได้





isopropyl carbonium ion เกิดปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายไฮโดรด์กับโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรเพน หรืออาจเกิดการสูญเสียโปรตอน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพีน

ในการเกิดวงแหวนแอโรแมติกจากปฏิกิริยาดีไฮโดรไซโคลเซชัน (dehydrocyclization) โดยโอเลฟินเกิดเป็นคาร์โบเนียมไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า ได้สารประกอบ olefin carbonium ion ที่มีลักษณะเป็นวงแหวน จากนั้นเกิดปฏิกิริยากับโอเลฟิน เกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ย้ายไฮโดรด์ไอออนจากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะได้ allylic carbonium ion ที่มีเสถียรภาพและเกิดการรับโปรตอนจาก cyclohexadiene ซึ่งในขั้นสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแอโรแมติก



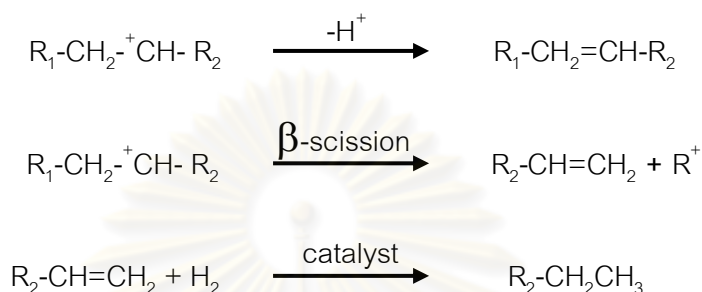
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยแก๊สที่มีโอเลฟินสูง องค์ประกอบของเบนซินที่มีค่าออกเทนสูงเนื่องจากมีสารจำพวกแอโรแมติกและโอเลฟินมาก องค์ประกอบของน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กากน้ำมันชนิดไอส์ และโค้ก (coke) ที่จะเกาะติดอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนและความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

### 2.7.3 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (hydrocracking)

การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่รวมการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและการเติมไฮโดรเจนไว้ด้วยกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นประเภท 2 หน้าที่ (dual function) คือ มีองค์ประกอบที่ช่วยในการแตกพันธะคาร์บอน-คาร์บอนของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน และมีองค์ประกอบที่ช่วยเติมไฮโดรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มักประกอบด้วยสารจำพวกซิลิกาและอะลูมินาที่สามารถช่วยในการแตกพันธะคาร์บอนได้พร้อมๆ กับการเติมไฮโดรเจน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มต้นจากการเกิดคาร์โบเนียมไอออนที่ตำแหน่งกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา



คาร์บอนเนียมไอออนอาจมีการจัดเรียงตัวใหม่ โดยการกำจัดโปรตรอนออก ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินหรือเกิดการแตกพันธะที่ตำแหน่งเบต้า ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนตัวใหม่ จากนั้นเกิดเป็นปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน โอเลฟินที่ผ่านการเติมไฮโดรเจนจะกลายเป็นสารประกอบพาราฟิน



หากปฏิกิริยาทำในภาวะที่อุณหภูมิ 400-480 องศาเซลเซียส ความดัน 35-170 บรรยากาศ จะเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบที่อิ่มตัวค่อนข้างมาก และปริมาณแอมโรเมติกต่ำ ซึ่งทำให้แก๊สที่ได้นั้นมีค่าออกเทนที่ต่ำกว่าแก๊สจากกระบวนการแตกตัวเชิงปฏิกิริยา จึงมักนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องบิน (jet fuel) และน้ำมันดีเซล รวมทั้งยังได้สารประกอบประเภท LPG ซึ่งใช้เป็นสารป้อนในกระบวนการปิโตรเคมี อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดใดๆนั้นต้องอาศัยปัจจัยอื่นๆควบคู่กันไป โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นยังขึ้นกับเวลา ชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

นอกจากนี้การเติมไฮโดรเจนที่ตำแหน่งกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยทำความสะอาดพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไปพร้อมๆกัน เนื่องจากไฮโดรเจนจะช่วยกำจัดโค้กที่เกิดขึ้นออกไป กระบวนการแตกตัวด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น จำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิอย่างดี เพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโค้ก และตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ หรือทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหายรวมทั้งไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ

## 2.8 การเกิดโค้ก (coking) (ปราโมทย์ ไชยเวช, 2537; Satterfield, 1991)

โค้ก (coke) เป็นสารประกอบระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน โดยมีอัตราส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอนน้อยกว่า 1 โค้กที่เกิดขึ้นในช่วงแรกจะมีปริมาณโครงสร้างสูง แต่เมื่อทำปฏิกิริยายาวนานขึ้นปริมาณของไฮโดรเจนจะลดลง การเกิดโค้กพบได้ในปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรคาร์บอนทุกปฏิกิริยา เช่น dehydrogenation, isomerization, reforming, catalytic cracking หรือแม้ว่าจะเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ เป็นต้น สารประกอบในกลุ่มสารประกอบอะโรมาติกที่มีวงแหวนหลายวง (polynuclear aromatics) โอลิฟิน (olefins) และพอลิโอเลฟิน (polyolefins) จะก่อให้เกิดโค้กมากกว่าสารประกอบในกลุ่มแนฟทีน (naphthenes) และพาราฟิน (parafin) นอกจากนี้เมื่อทำการป้อนสารต่างๆ เหล่านี้ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาจะพบว่าโครงสร้างสุดท้ายของโค้กที่ได้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือมีโครงสร้างเหมือนกับแกรไฟต์มากขึ้น อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดโค้กไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่เป็นที่ยอมรับกันว่าเริ่มจากการตั้งไฮโดรเจนออกจากสารตั้งต้น (dehydrogenation) กลายเป็นสารไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว ตามด้วยการสร้างสารประกอบพอลิแอโรมาติกขึ้นมาจากการรวมตัวของสารไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวที่เกิดขึ้น เช่น อาจเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของโอลิฟินต่างๆ ที่มีอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

## 2.9 การวิเคราะห์น้ำมันดิบ (crude oil evaluation)

(ปราโมทย์ ไชยเวช, 2537; Satterfield, 1991)

เป็นวิธีการวิเคราะห์หาองค์ประกอบและสมบัติของส่วนต่างๆ ในน้ำมันดิบเริ่มต้นด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี (gas chromatography) โดยทำการกลั่นแยกน้ำมันเป็นส่วนต่างๆ ตามคาบจุดเดือด (boiling range) อย่างละเอียดในช่วง 5-10 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานานจึงไม่นิยมทำ ปัจจุบันจึงใช้วิธีการกลั่นแยกน้ำมันดิบตามคาบจุดเดือดอย่างกว้างๆ ให้พอดีกับช่วงจุดเดือดของผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปใช้ในการผลิตน้ำมันสำเร็จรูป โดยสามารถแบ่งได้เป็นช่วง ดังนี้

- ส่วนกลั่นที่มีคาบจุดเดือดตั้งแต่ IBP (initial boiling point) จนถึง 200 องศาเซลเซียส เรียกว่า ส่วนกลั่นแกโซลีน มักใช้ในการผลิตน้ำมันเบนซิน
- ส่วนกลั่นที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 200-250 องศาเซลเซียส เรียกว่า ส่วนกลั่นน้ำมัน

ก๊าด (kerosene fraction) มักใช้เป็นน้ำมันก๊าดเพื่อให้แสงสว่าง ถ้าจุดเกิดควันไม่ต่ำจนเกินไป น้ำมันก๊าดที่มีคุณภาพดี มีจุดเยือกแข็งต่ำและมีสมบัติอื่นๆที่เหมาะสม สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงอากาศยานไอพ่นได้

- ส่วนกลั่นที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 250-370 องศาเซลเซียส เรียกว่า ส่วนกลั่นแก๊สออยล์ (gas oil fraction) ซึ่งเหมาะในการใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล
- ส่วนกลั่นที่มีคาบจุดเดือดสูงกว่า 370 องศาเซลเซียส เรียกว่า กากน้ำมัน (residue) อาจนำไปใช้ได้หลายอย่างแล้วแต่สมบัติของกากน้ำมัน เช่น ใช้เป็นน้ำมันเตาหรือนำไปผลิตเป็นยางมะตอย หรือน้ำมันเครื่อง

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Twaiq และคณะ (1999) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กแบบ fixed bed ภายใต้ความดันบรรยากาศ ศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาระหว่าง 350-450 องศาเซลเซียส และอัตราเร็วในการป้อนสารตั้งต้นในเทอมของน้ำหนักของสารป้อนที่ไหลผ่าน 1 หน่วยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ 1 หน่วยเวลา (Weight Hour Space Velocity, WHSV) ในช่วง 1-4 ต่อชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ซีโอไลต์  $\beta$  และ Ultrastable Y (USY) ซีโอไลต์ ซึ่งมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน และพิจารณาผลได้ของการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดของแกโซลีน ตลอดจนศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม HZSM-5-USY และ HZSM-5-ซีโอไลต์  $\beta$  ในสัดส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก HZSM-5 ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์น้ำมันในรูปสารอินทรีย์ แก๊สไฮโดรคาร์บอน และน้ำ ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ให้ผลการทดลองดีที่สุด โดยที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราเร็วการป้อนน้ำมันปาล์มเท่ากับ 1 ต่อชั่วโมง ให้ร้อยละผลได้ของแกโซลีนเท่ากับ 28 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าผลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม HZSM5-USY ให้ผลได้ของแกโซลีนสูงกว่าการใช้ USY ซีโอไลต์ชนิดเดียว การเติมตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ในตัวเร่งปฏิกิริยาผสม HZSM-5-ซีโอไลต์  $\beta$  ไม่ช่วยส่งเสริมสัดส่วนการเปลี่ยนของน้ำมันปาล์ม และพบว่าร้อยละผลได้ของการเลือกทำปฏิกิริยาเกิดเป็นแกโซลีนลดลงจาก 45 ถึง 10 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมจาก 0 ถึง 1.5 โดยน้ำหนัก

Daniela และคณะ (2004) ศึกษาการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันพืช ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม และน้ำมันละหุ่ง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบทช์ (batch reactor) ภายใต้ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350-400 องศาเซลเซียส พบว่า เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากน้ำมันทั้ง 3 ชนิด มีองค์ประกอบของโอเลฟิน (olefins) พาราฟิน (paraffins) กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) และแอลดีไฮด์ (aldehyde) และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่ใช้ในงานจริง จากการวิเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (gas chromatography-mass spectrometry) พบว่า เชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันละหุ่งมีองค์ประกอบของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ยาวกว่าเชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันปาล์ม

Ooi และคณะ (2003) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และ อะลูมินซิลิเกต (Al-MCM-41) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ microcatalytic fixed-bed ภายใต้ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 0.4 ชั่วโมง ศึกษาผลของขนาดรูพรุน และ AIMM และอัตราส่วนระหว่าง Si/Al ของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่มีต่อเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตได้ พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ซึ่งมีรูพรุนขนาดเล็ก สามารถให้เชื้อเพลิงเหลวที่มีองค์ประกอบของแก๊สอินทรีย์มากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AIMM ซึ่งมีรูพรุนขนาดกลาง และอัตราส่วนระหว่าง Si/Al ของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เชื้อเพลิงเหลวมีองค์ประกอบของแก๊สอินทรีย์น้อยลง

Twaiq และคณะ (2003) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มเป็นเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา MCM-41 ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กแบบ fixed bed ภายใต้ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 723 เคลวิน และสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา MCM-41 ที่มีรูพรุนขนาดกลาง ด้วยอัตราส่วนระหว่าง Si/Al เท่ากับ 50 โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งมีพื้นที่ผิวประมาณ 550-1200 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.8-2.8 นาโนเมตร พบว่า MCM-41 มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันปาล์ม โดยเปลี่ยนจากน้ำมันปาล์มที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (palm kernel oil) ไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวในสัดส่วนที่สูงกว่าการเปลี่ยนแปลงจากน้ำมันปาล์มที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (palm olein oil) และตัวเร่งปฏิกิริยา MCM-41 เลือกทำปฏิกิริยาเกิดเฉพาะแอลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน โดยขึ้นกับชนิดของน้ำมันปาล์มที่ใช้ โดยเฉพาะ  $C_{13}$  เมื่อใช้น้ำมันปาล์มที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และ  $C_{17}$  เมื่อใช้น้ำมันปาล์มที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และพบว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงเมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา มีการเลือกเกิดแก๊สอินทรีย์ เคโรซีน

หรือดีเซล โดยขึ้นกับขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบการเกิดโค้กเป็นจำนวนมากบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา MCM-41

มารีนา มงคล (2003) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ และ HZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (microreactor) รูปทรงกระบอก พบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม โดยได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 79.74 ร้อยละผลได้ของแก๊ส 17.78 และร้อยละผลได้ของของแข็ง 2.48 โดยน้ำหนัก และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.05 กรัม โดยได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 83.60 ร้อยละผลได้ของแก๊ส 15.30 และร้อยละผลได้ของของแข็ง 1.10 โดยน้ำหนัก

จินตนา สุมารินทร์ (2006) ศึกษาการแตกตัวด้วยไฮโดรเจนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 430-450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว 2.77 กรัมต่อนาที ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เติมลงไป 10 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 57.21 – 57.36 ซึ่งเป็นร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จริงจากปฏิกิริยา (reaction oil yield) 37.28 – 37.99 ร้อยละผลได้ของแก๊สและของแข็ง 42.46 – 42.79 โดยน้ำหนัก

## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ เพื่อหาภาวะของการทดลองที่ให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว และองค์ประกอบที่ดีที่สุด

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (microreactor) รูปทรงกระบอก ปริมาตร 70 ลิตร ทำจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม SS 316 ดังรูปที่ 3.1 โดยด้านบนมีชุดฝาปิดทำจากสแตนเลสเหนียวอย่างดี มีชุดอุปกรณ์สำหรับอัดแก๊สและวาล์วนิรภัย สามารถทดลองภายใต้ภาวะที่ทนความร้อนได้ 500 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะพาสคัล มีชุดสำหรับใส่เทอร์มอคัปเปิล (thermocouple) สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างการทดลอง



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (microreactor)

3.1.2 ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล (temperature control) ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังขดลวดความร้อนและตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเมื่อได้อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในระดับ  $\pm 10$  องศาเซลเซียส

3.1.3 ขดลวดความร้อนแบบ injection แรงดัน 220 โวลต์ กำลัง 600 วัตต์

3.1.4 เทอร์มอคัปเปิล สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ เป็นแบบเค (K-type) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร

3.1.5 ชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยมีมอเตอร์เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนแกนหมุนให้เครื่องปฏิกรณ์เกิดการแกว่ง สามารถปรับความเร็วรอบการเขย่าได้จากชุดควบคุมความเร็ว



รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ควบคุมแบบดิจิทัลและชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์

3.1.6 ชุดกรองสูญญากาศ ประกอบด้วยชุดเครื่องแก้วต่อกับเครื่องดูดอากาศ เพื่อการกรองแยกแบบสูญญากาศ สำหรับแยกส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็ง โดยผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว

3.1.7 เครื่องเหวี่ยงเพื่อแยกกากตะกอนที่เป็นของแข็งออกจากผลิตภัณฑ์น้ำมัน

3.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก ซึ่งได้ละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.1.9 เครื่องชั่งน้ำหนัก ซึ่งได้ละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.1.10 นาฬิกาจับเวลา

3.1.11 ตู้อบ

3.1.12 ตู้ดูดความชื้น (desiccator)

3.1.13 เครื่องแก้ว ประกอบด้วย ปีกเกอร์ ขวดใส่สารตัวอย่าง



3.1.14 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (gas chromatograph) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (simulated distillation) Varian CP-3800 พร้อมเครื่องตรวจวิเคราะห์แบบ FID และคอลัมน์ CP-SIL 5 CP สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887 แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ชุดกรองสุญญากาศ และกระดาษกรองใยแก้ว



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น  
(simulated distillation gas chromatograph)

### 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

- 3.2.1 น้ำมันปาล์มดิบ จากบริษัทไทย ทาโลว์ แอนด์ ออยล์ จำกัด
- 3.2.2 แก๊สไฮโดรเจนความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 จากบริษัท TIG Trading จำกัด
- 3.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5
- 3.2.4 สารละลายโทลูอีน

### 3.3 การดำเนินงานวิจัย

- 3.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบก่อนการทดลอง
- 3.3.2 เตรียมและจัดระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบขนาดเล็ก
- 3.3.3 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำปาล์มดิบโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ตัวแปรที่ศึกษามีดังนี้
  - อุณหภูมิ ดังนี้ 410, 425 และ 450 องศาเซลเซียส
  - เวลาในการทำปฏิกิริยา ดังนี้ 30, 45 และ 60 นาที
  - น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่เติมลงไป ร้อยละ 0.25, 0.5, 1.0 และ 2.5
 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ
- 3.3.4 วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น ตามมาตรฐาน ASTM D 2887

### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 3.4.1 ขั้นตอนทำการทดลอง
  1. ชั่งน้ำหนักน้ำมันปาล์มดิบใช้แล้วประมาณ 20 กรัม และตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 – 0.5 กรัม ด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง ตามสัดส่วนที่กำหนด
  2. นำสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
  3. นำเครื่องปฏิกรณ์ไปใส่อากาศที่อยู่ภายในออกโดยผ่านแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปอย่างช้าๆ แล้วอัดแก๊สไฮโดรเจนจนได้ความดัน 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยสังเกตความดันจาก Regulator ที่ต่อระหว่างถังบรรจุแก๊สไฮโดรเจนกับเครื่องปฏิกรณ์ และตรวจสอบรอยรั่วของแก๊สโดยใช้น้ำสบู่ทดสอบตามข้อต่อของเครื่องปฏิกรณ์ หากปรากฏว่าไม่มีการรั่วของแก๊สไฮโดรเจนค่อยๆหมุนวาล์วปิดเพื่อไม่ให้แก๊สออก
  4. นำเครื่องปฏิกรณ์ต่อเข้ากับชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ และต่ออุปกรณ์ขดลวด

ความร้อนแบบ injection เข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ แล้วหุ้มด้วยฉนวนทับเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง และต่อเทอร์มอคัปเปิลเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์

5. เปิดสวิตช์ชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล และเครื่องเขย่า

6. เริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์คงที่ตามที่กำหนด เมื่อครบเวลาในการทำปฏิกิริยา นำฉนวนและชุดลดความร้อนออก ใช้พัดลมเป่าเครื่องปฏิกรณ์จนภายในเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ปล่อยแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ออก

7. กรองผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยอุปกรณ์การกรองแบบสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเพื่อแยกส่วนที่เป็นของเหลวเก็บไว้ในขวดแก้วเพื่อรอการวิเคราะห์ ล้างเครื่องปฏิกรณ์ด้วยสารละลายโทลูอีน เช็ดทำความสะอาดด้วยกระดาษซับที่ชั่งน้ำหนักเตรียมไว้ จากนั้นนำส่วนของแข็งและกระดาษซับไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละของการเปลี่ยนต่อไป

8. นำผลิตภัณฑ์น้ำมัน (ผลิตภัณฑ์น้ำมัน) ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น เพื่อวิเคราะห์หาค่าการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันในช่วงจุดเดือดอุณหภูมิต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่สามารถนำไปใช้ทดแทนได้ ตัวแปรที่ศึกษา ประกอบด้วย อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมลงไป ตลอดจนศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวที่มีต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น

##### 4.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มดิบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (ดังแสดงในตารางที่ 4.1) พบว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่ประกอบด้วย กากน้ำมัน มากถึงร้อยละ 82.26 ซึ่งถือว่าเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา มีแก๊สออยล์เบา และแก๊สออยล์หนัก ร้อยละ 16.29 และ 1.54 ตามลำดับ

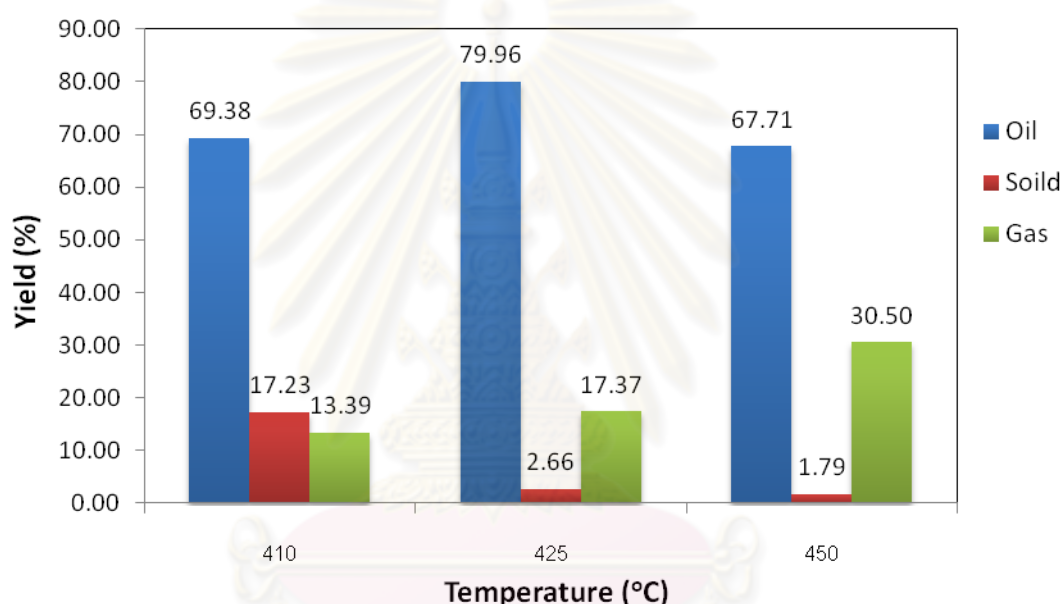
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันปาล์มดิบ

องค์ประกอบ	คาบจุดเดือด (องศาเซลเซียส)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt %)
แก๊สออยล์เบา (Light gas oil)	250-350	16.29
แก๊สออยล์หนัก (Heavy gas oil)	350-370	1.54
กากน้ำมัน (Long residue)	370-FBP	82.26

## 4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการแตกตัวของของน้ำมันปาล์มดิบเมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

### 4.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบ จากการทดลองที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้ 380, 395, 410, 425 และ 450 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.1

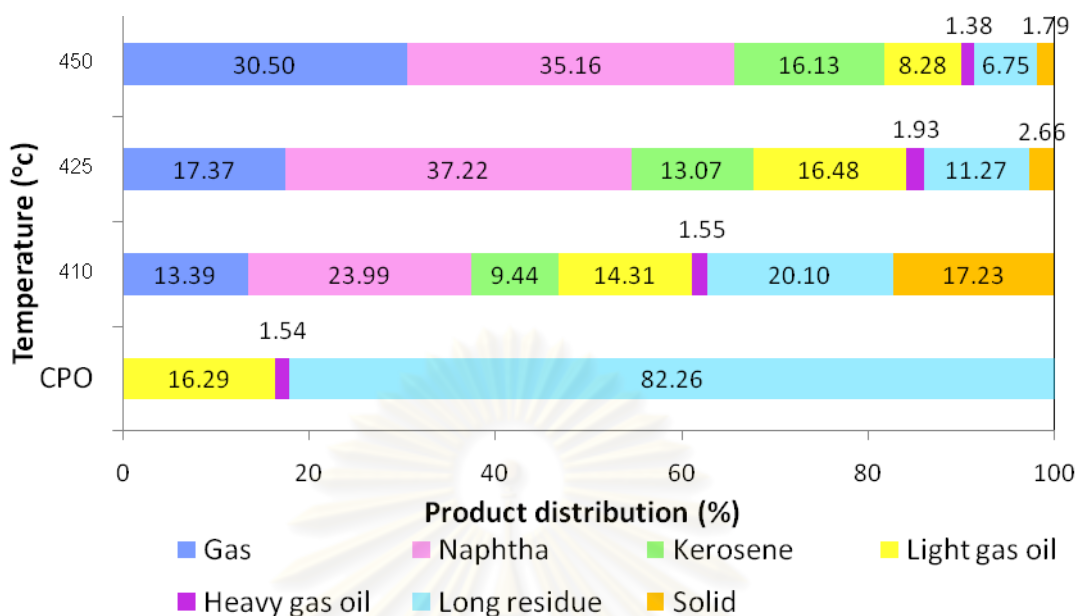


รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แก๊สและของแข็งที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

จากผลการทดลองรูปที่ 4.1 พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นน้ำมันข้นหนืด คิดเป็นร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเท่ากับ 69.38 แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 425 และ 450 องศาเซลเซียส ภายใต้การทดลองภาวะเดียวกัน จะให้น้ำมันที่มีความหนืดลดลงและมีปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันและปริมาณกากน้ำมันลดลง ส่วนร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยมีการแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และแตกตัวได้ดีที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 450 องศาเซลเซียส ภายใต้การ

ทดลองภาวะเดียวกัน พบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจากร้อยละ 79.96 เป็นร้อยละ 67.71 แต่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากอิทธิพลของการแตกตัวด้วยความร้อนของโมเลกุลสารไฮโดรคาร์บอนรุนแรงขึ้น โดยมีการแตกโมเลกุลจากขนาดใหญ่ไปเป็นขนาดกลาง และแตกโมเลกุลต่อไปจนเป็นขนาดเล็กเกินไปอยู่ในรูปของแก๊ส โดยผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้ว ได้แก่ มีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ (มารีนา มงคล, 2546) ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบน่าจะมีองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สเช่นเดียวกัน จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแก๊สในปริมาณที่มากขึ้น และได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง ส่วนร้อยละผลได้ของของแข็ง พบว่า ที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของของแข็งสูงถึง 17.23 อาจเนื่องมาจากปริมาณของโค้กที่เกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยารวมกับส่วนที่เป็นของแข็งในน้ำมันปาล์มดิบที่เกิดการแตกตัวอย่างไม่สมบูรณ์ และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเป็น 425 และ 450 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของแข็งมีค่าลดลงเป็น 2.66 และ 1.79 ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิ 380 และ 395 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีลักษณะเป็นไข แสดงว่า น้ำมันปาล์มดิบเกิดการแตกตัวอย่างไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิดังกล่าว

เมื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อหาค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นปริมาณแนฟทาจะเพิ่มสูงขึ้นเป็นผลมาจากการที่น้ำมันปาล์มดิบสามารถเกิดการแตกโมเลกุลได้ดีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะเกิดการแตกตัวจากโมเลกุลใหญ่คือ กากน้ำมันไปเป็นโมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็กจำพวกแนฟทา โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งเสริมให้เกิดการแตกตัวด้วยความร้อนทำให้เกิดการแตกโมเลกุลอย่างรุนแรงขึ้นจนได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจำพวกแก๊สไฮโดรคาร์บอน จากรูปที่ 4.2 ที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณของแนฟทาสูงที่สุด คือ ร้อยละ 37.2 และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 450 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละของแนฟทา 35.16 ดังนั้นการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันปาล์มดิบสามารถแตกตัวได้ดีที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงมากขึ้นจะมีการแตกโมเลกุลที่รุนแรงมากขึ้นจึงทำให้ได้ปริมาณแนฟทาที่ลดลงจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น

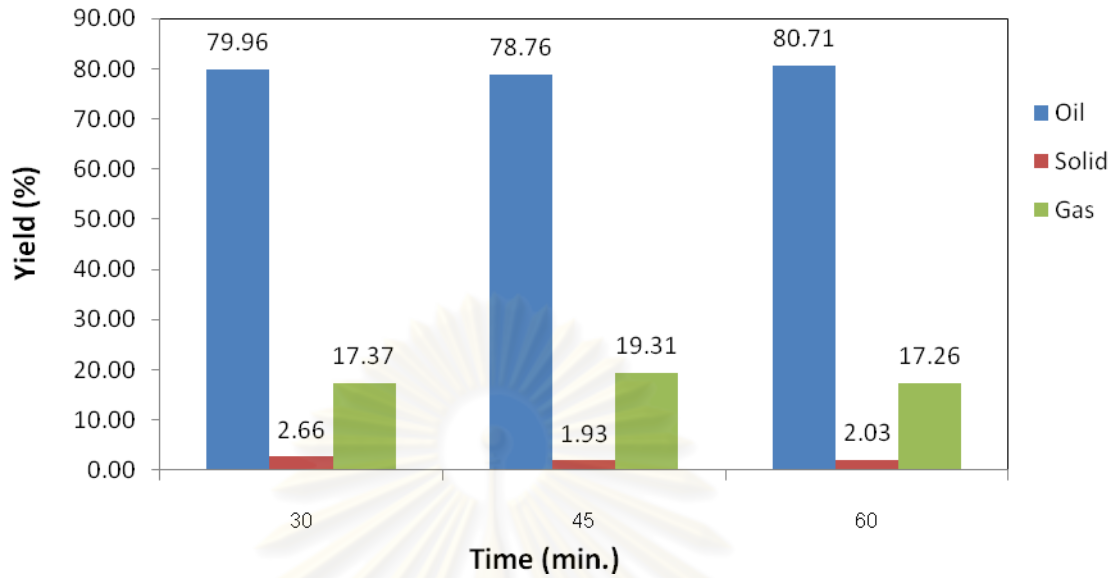


รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

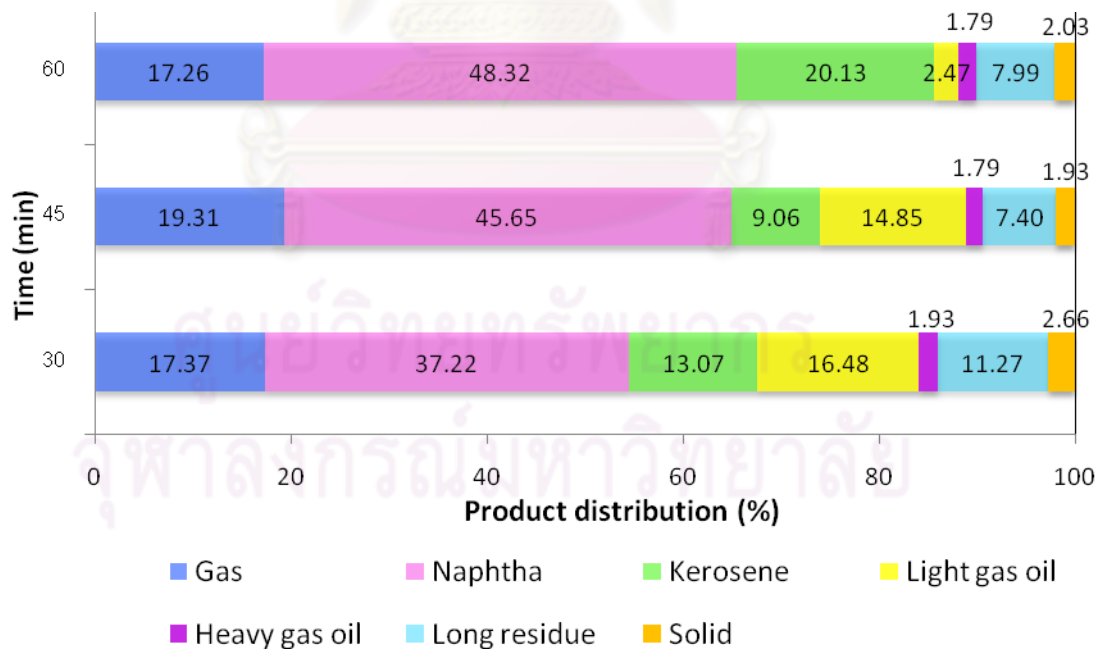
#### 4.2.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบ จากการทดลองที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส และศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา ดังนี้ 30, 45 และ 60 นาที จากผลการทดลองรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที จนถึง 60 นาที ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แก๊สไฮโดรคาร์บอนและของแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันควรลดลง ส่วนร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สควรเพิ่มขึ้น

เมื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อหาค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่า เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ปริมาณเนฟทาและเคโรซีนเพิ่มสูงขึ้นเป็นผลมาจากการเกิดการแตกโมเลกุลได้มากขึ้นเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จะเกิดการแตกตัวจากโมเลกุลใหญ่ คือ กากน้ำมันไปเป็นโมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็กจำพวกเนฟทา และเกิดการแตกโมเลกุลต่อจนได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจำพวกแก๊ส



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แก๊ส และของแข็งที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส



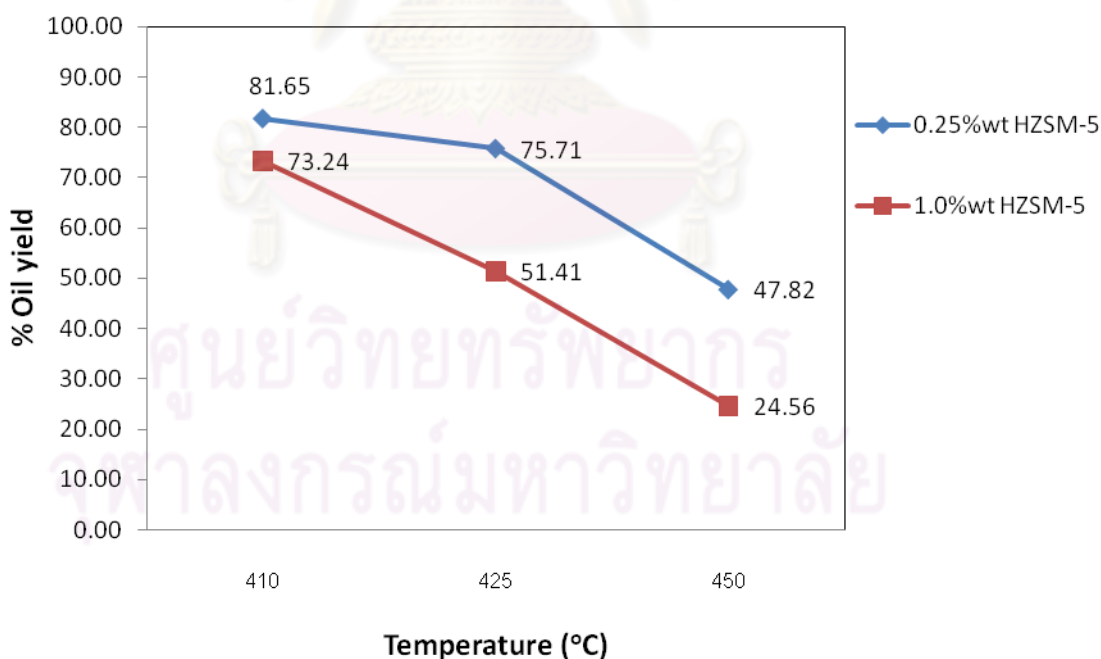
รูปที่ 4.4 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส



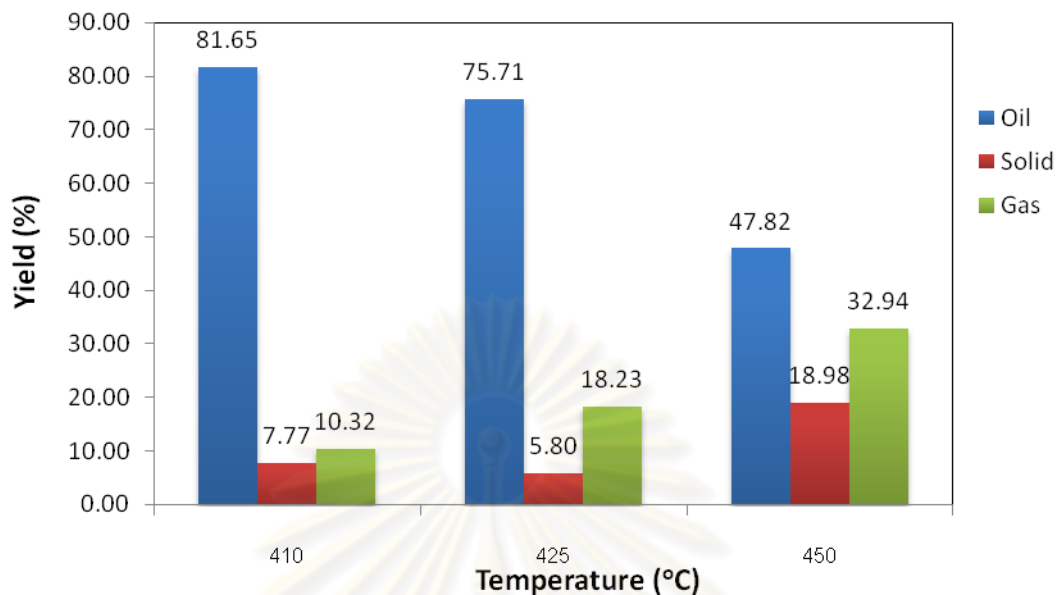
### 4.3 ผลการทดลองที่ได้จากการแตกตัวของของน้ำมันปาล์มดิบเมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

#### 4.3.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน

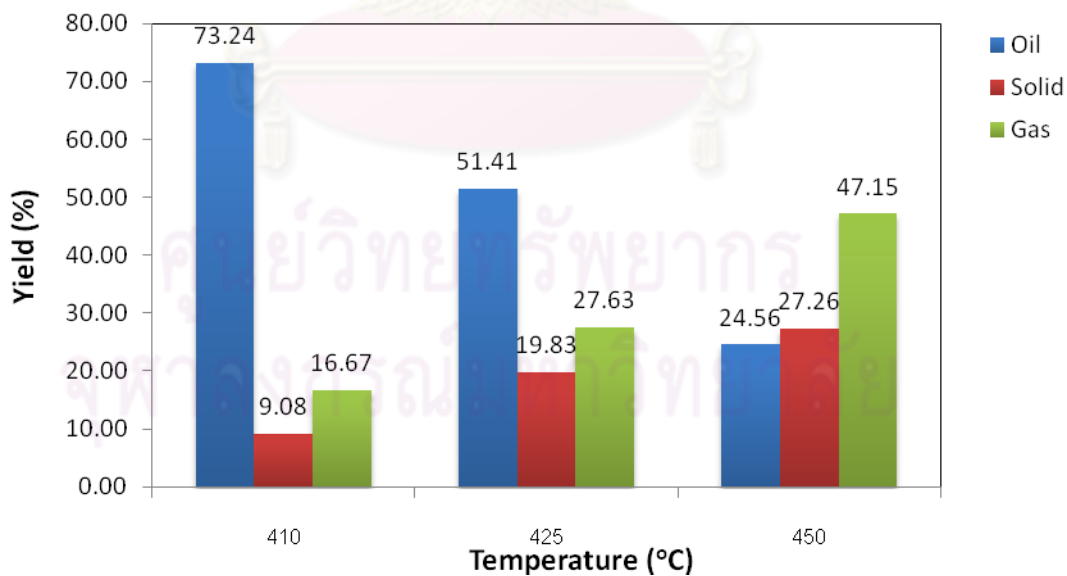
การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบ จากการทดลองที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.25 และ 1.0 โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 410 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 81.65 เป็น 47.82 ที่ HZSM-5 ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก และแนวโน้มเดียวกันสำหรับ HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 73.24 เป็น 24.56 ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของการแตกตัวด้วยความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบเป็นโมเลกุลขนาดเล็กได้มากขึ้น กลายเป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มสูงขึ้น จาก 10.32 เป็น 32.94 ที่ HZSM-5 ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก และแนวโน้มเดียวกันสำหรับ HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจาก 16.67 เป็น 47.15



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แก๊ส และของแข็งที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก

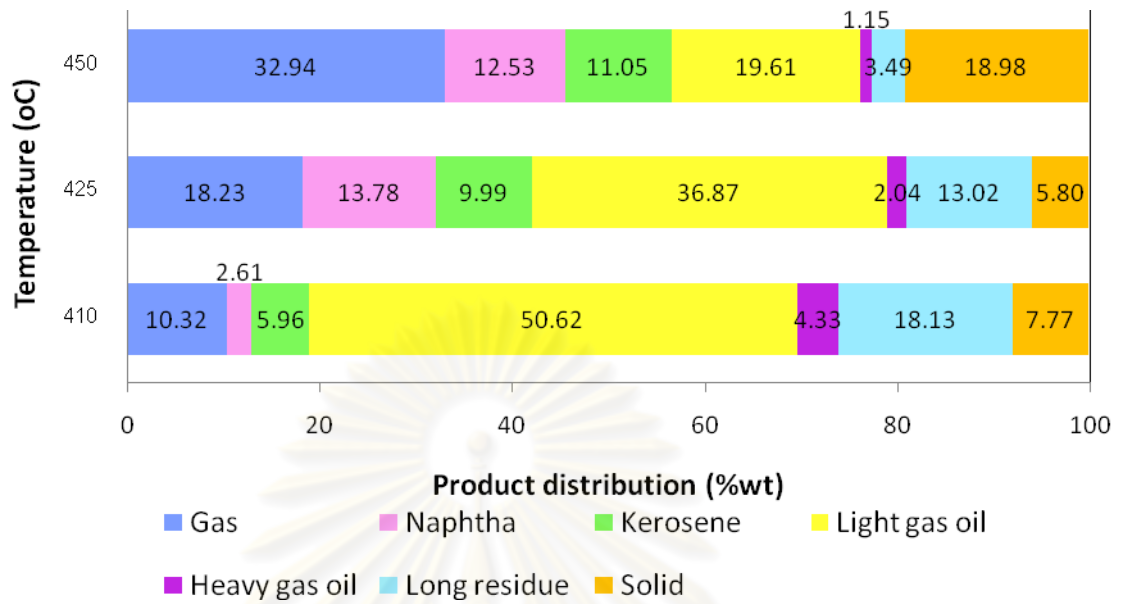


รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แก๊ส และของแข็งที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก

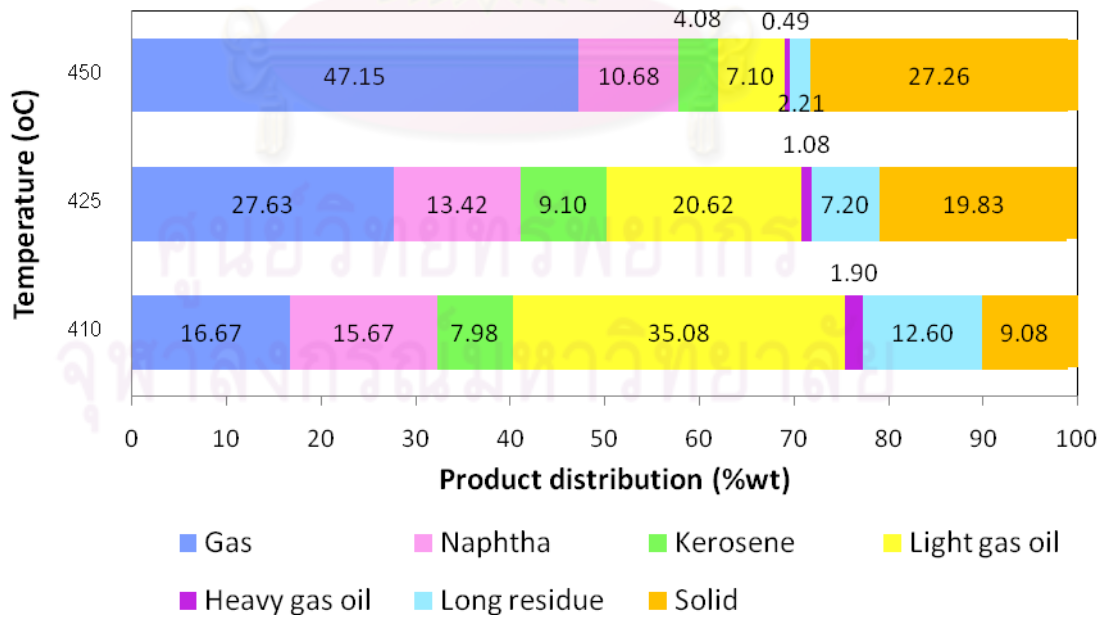
เมื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อหาค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น จากการทดลองที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.25 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นปริมาณแฉะจะเพิ่มสูงขึ้น และกากน้ำมันลดลง เนื่องจากอิทธิพลของการแตกตัวด้วยความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะเกิดการแตกตัวจากโมเลกุลใหญ่คือกากน้ำมันไปเป็นโมเลกุลขนาดกลางจำพวกเคโรซีนและแก๊สออยล์ จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีบทบาทในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กจำพวกแฉะและแก๊สเพิ่มมากขึ้น และยังพบว่าที่อุณหภูมิสูงช่วยให้กากน้ำมัน ซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่แตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงด้วย ดังจะเห็นได้ว่าจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีกากน้ำมันน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

จากผลการทดลองพบว่าที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และ HZSM-5 ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 410 องศาเซลเซียส จนถึง 450 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง แต่มีการกระจายตัวขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันในสัดส่วนของโมเลกุลขนาดเล็กใกล้เคียงกัน และพบว่ามีแนวโน้มเดียวกันที่ HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทดลอง คือ 410 องศาเซลเซียส สำหรับที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 73.42 ร้อยละผลได้ของแก๊ส 16.67 ร้อยละผลได้ของของแข็ง 9.08 ร้อยละองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันเป็นแฉะ 15.67 เคโรซีน 7.98 แก๊สออยล์เบา 35.08 แก๊สออยล์หนัก 1.90 และกากน้ำมัน 12.60 โดยน้ำหนัก

ศูนย์วิจัยปิโตรเลียม  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



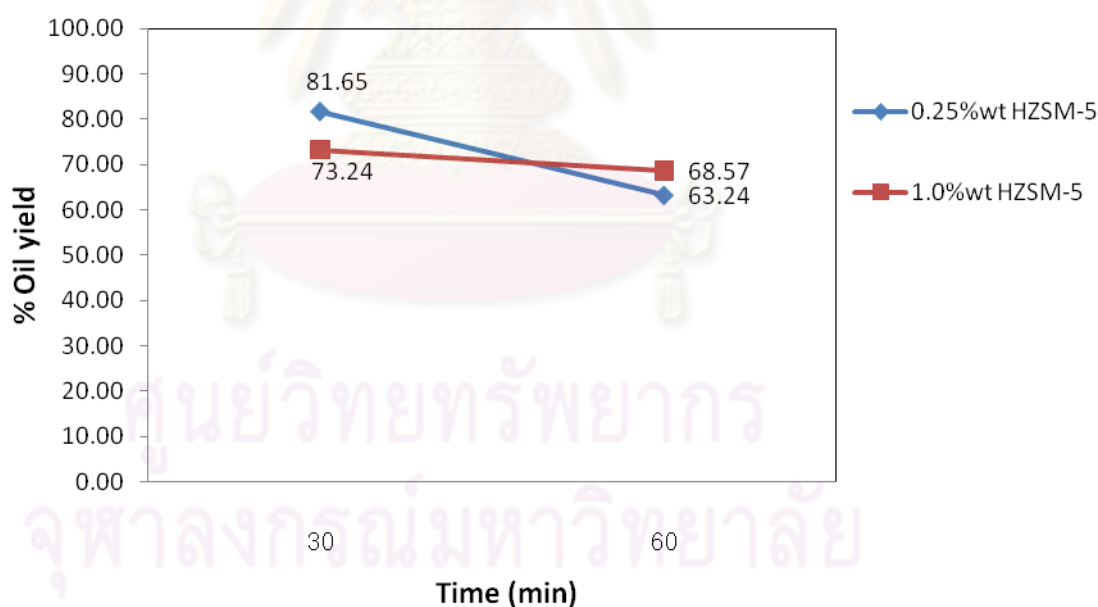
รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจน เริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก



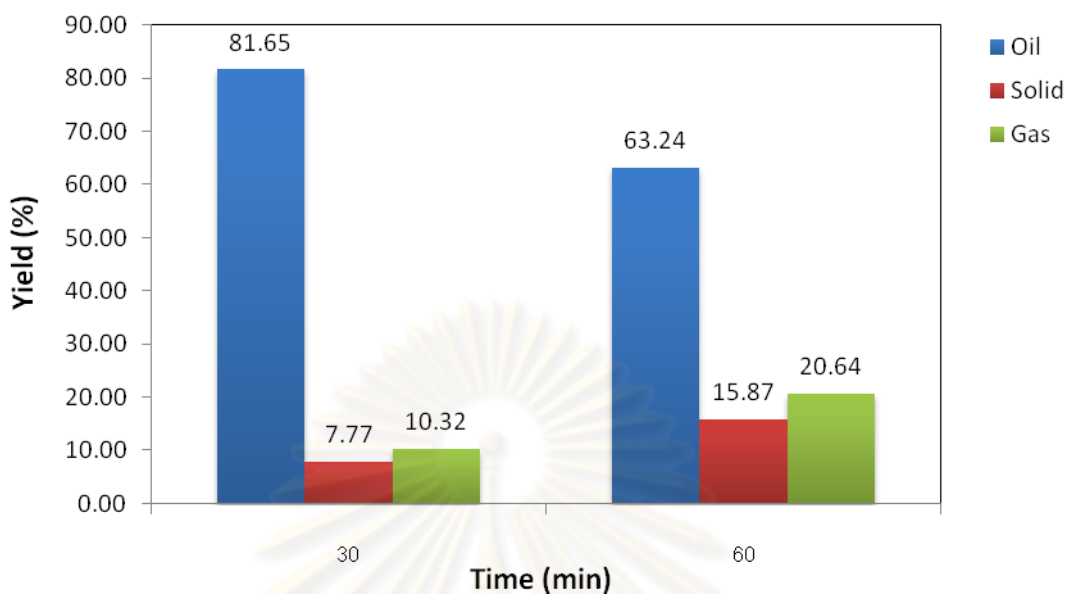
รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจน เริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก

#### 4.3.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน

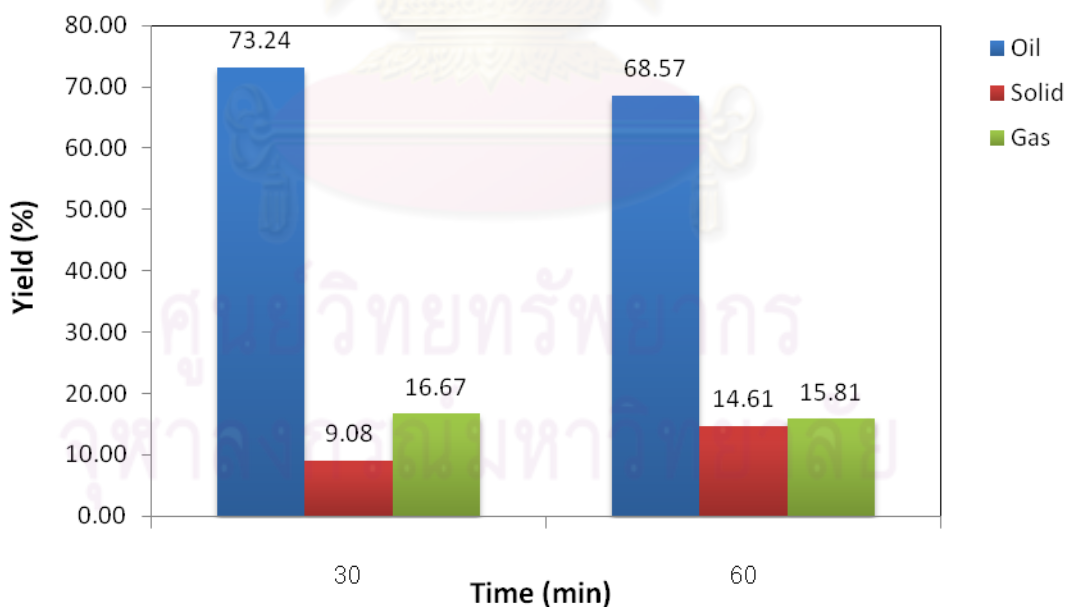
การศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบจากการทดลองที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.25 และ 1.0 โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที จนถึง 60 นาที ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 81.65 เป็น 63.42 ที่ HZSM-5 ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก และแนวโน้มเดียวกันสำหรับ HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 73.24 เป็น 63.24 ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของการแตกตัวด้วยความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กโดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีส่วนช่วยในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจากการแตกตัวด้วยความร้อน ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนจะเกิดการแตกตัวจนมีขนาดเล็กและอยู่ในสภาพที่เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง



รูปที่ 4.10 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5



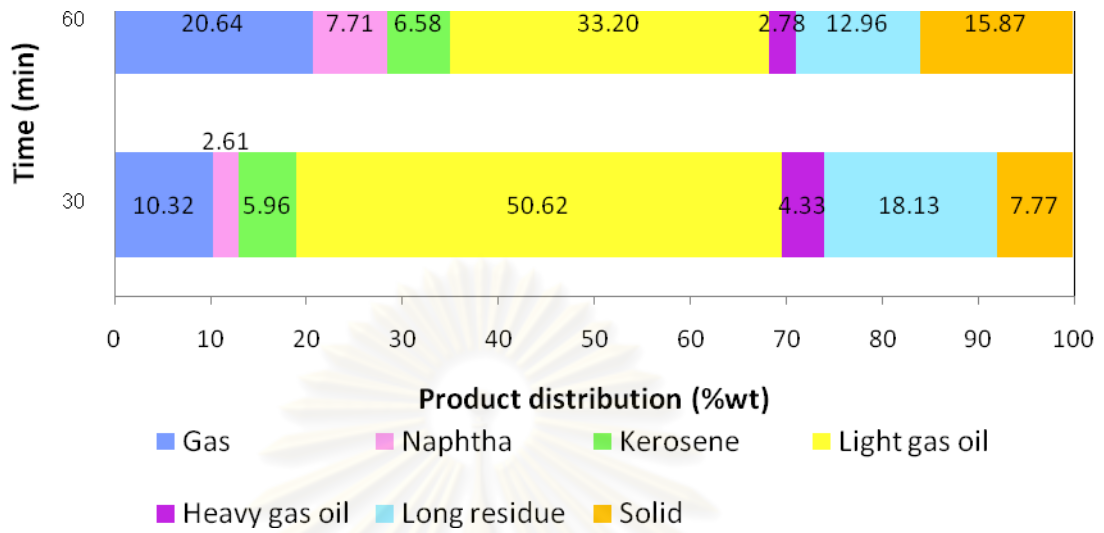
รูปที่ 4.11 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แก๊ส และของแข็งที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก



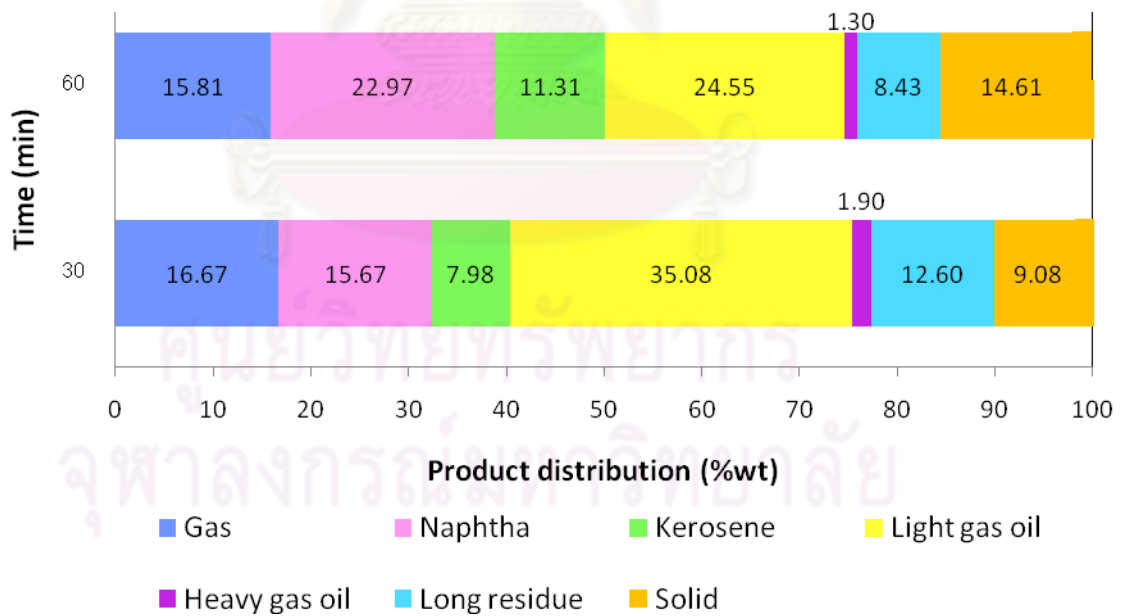
รูปที่ 4.12 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แก๊ส และของแข็งที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก

เมื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อหาค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น จากการทดลองที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.25 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ พบว่า ที่ HZSM-5 ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ร้อยละผลได้ของเนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 2.61 เป็น 7.71 ร้อยละผลได้ของกากน้ำมันลดลงจาก 18.13 เป็น 12.96 และพบว่ามีแนวโน้มเดียวกันสำหรับที่ HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ร้อยละผลได้ของเนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 15.67 เป็น 22.97 ทั้งนี้เนื่องจากการให้อุณหภูมิแก่ระบบเป็นเวลานานตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดปฏิกิริยาส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัวด้วยความร้อน ได้โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง กากน้ำมันซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่แตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง ดังจะเห็นได้ว่าร้อยละผลได้ของกากน้ำมันลดลง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะไปมีส่วนช่วยในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กที่ได้จากการแตกตัวด้วยความร้อน ได้โมเลกุลขนาดเล็กลงจำพวกเนฟทา โดยเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนจะแตกตัวจนอยู่ในสภาพที่เป็นแก๊สจำนวนมาก

จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและ HZSM-5 ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที เป็น 60 นาที พบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง แต่มีการกระจายตัวขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันในสัดส่วนของโมเลกุลขนาดเล็กเพิ่มสูงขึ้น และพบว่ามีแนวโน้มเดียวกันที่ HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จึงสามารถสรุปได้ว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการทดลอง คือ 60 นาที สำหรับที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 68.57 ร้อยละผลได้ของแก๊ส 15.81 ร้อยละผลได้ของของแข็ง 14.61 ร้อยละองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันเป็นเนฟทา 22.97 เคโรซีน 11.31 แก๊สออยล์เบา 24.55 แก๊สออยล์หนัก 1.30 และกากน้ำมัน 8.43 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.13 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก



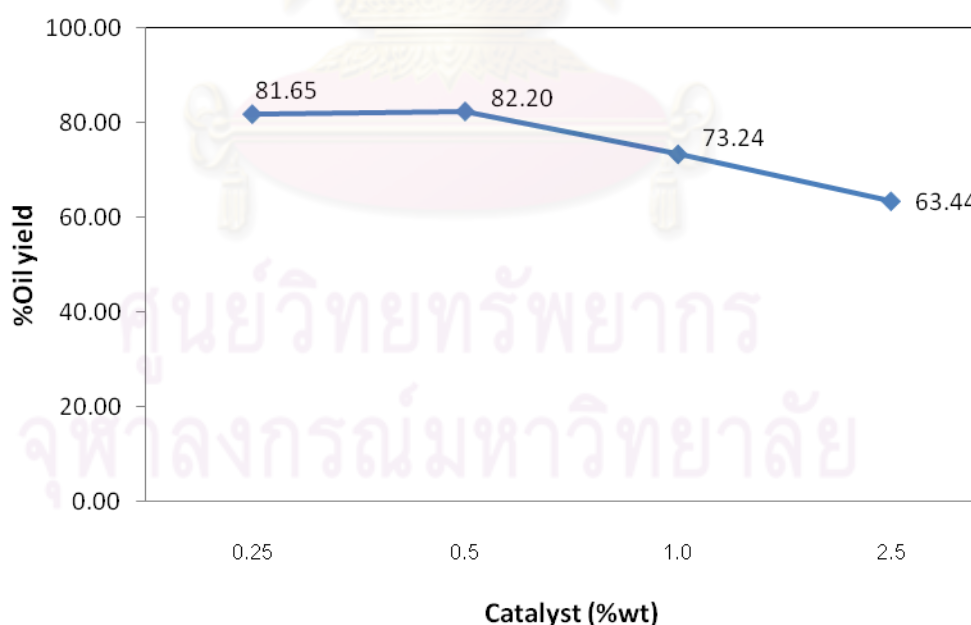
รูปที่ 4.14 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก



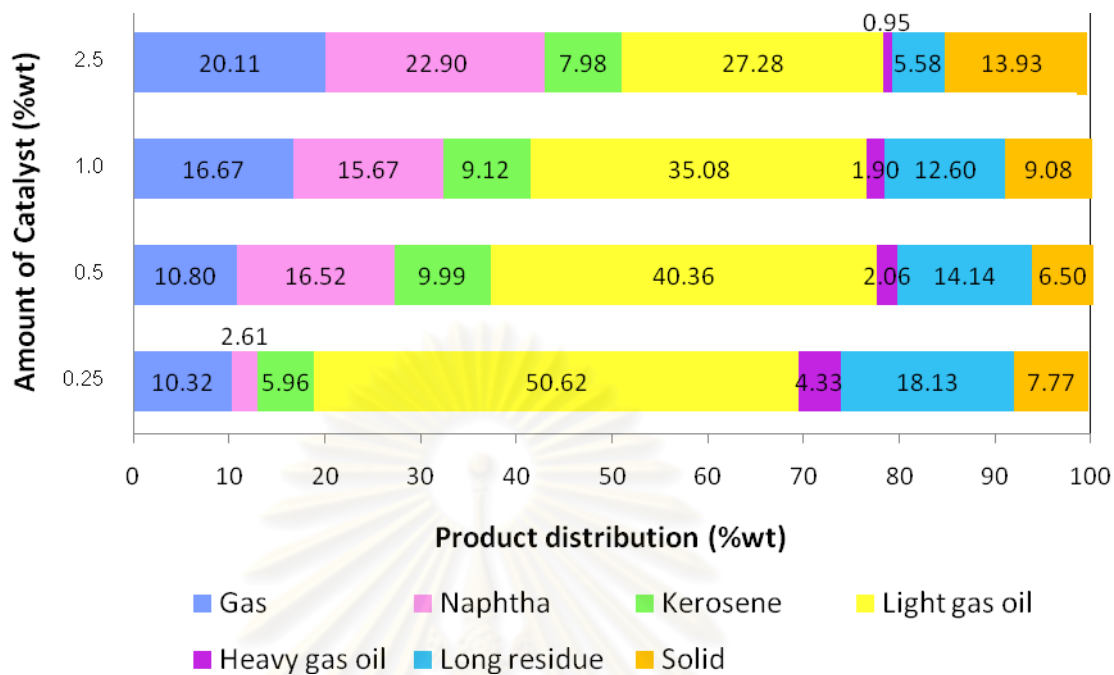
### 4.3.3 ผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน

การศึกษาผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่มีต่อการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบ จากการทดลองที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.25 0.5 1.0 และ 2.5 โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.15 พบว่า เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 81.65 เป็น 63.44 เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีส่วนช่วยในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจากการแตกตัวด้วยความร้อน ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนจะเกิดการแตกตัวจนมีขนาดเล็กและอยู่ในสภาพที่เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.25 ถึง 2.5 โดยน้ำหนัก ให้ผลได้ขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันในสัดส่วนโมเลกุลขนาดเล็กเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก แม้จะให้ผลได้ของเนฟทาสูง แต่ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันต่ำ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การเติมตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมเพียงพอต่อการทดลอง



รูปที่ 4.15 ผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



รูปที่ 4.16 ผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 ปอนด์ต่อนิ้ว

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันปาล์มดิบ เพื่อแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีสมบัติใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม โดยน้ำมันปาล์มดิบมีองค์ประกอบของกรดไขมันเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวให้มีขนาดเล็กลง ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นของเหลว และทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันในเชิงคุณภาพโดยวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น ผลการทดลอง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา
2. ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันปาล์มดิบที่ให้แนวโน้มของค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดได้ดีที่สุด คือ

อุณหภูมิ	425	องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยา	30	นาที
ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น	100	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

โดยภาวะการทดลองข้างต้นให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 79.96 ร้อยละผลได้ของแก๊ส 17.37 และร้อยละผลได้ของของแข็ง 2.66 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีร้อยละผลได้ของเนฟทา 37.22 เคโรซีน ร้อยละ 13.07 แก๊สออยล์เบา ร้อยละ 16.48 แก๊สออยล์หนัก ร้อยละ 1.93 และกากน้ำมัน ร้อยละ 11.27 โดยน้ำหนัก

3. ปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา และน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5
4. ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ให้แนวโน้มของค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดได้ดีที่สุด คือ

อุณหภูมิ	410	องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยา	60	นาที
น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ	1.0	โดยน้ำหนัก
ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น	100	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

โดยภาวะการทดลองข้างต้นให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 68.57 ร้อยละผลได้ของแก๊ส 15.81 และร้อยละผลได้ของของแข็ง 14.61 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีร้อยละผลได้ของเนฟทา 22.97 เคโรซีน 11.31 แก๊สออยล์เบา 24.55 แก๊สออยล์หนัก 1.30 และกากน้ำมัน 8.43 โดยน้ำหนัก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว เมื่อมีการขยายส่วนการผลิตในระดับที่ใหญ่ขึ้น
2. ศึกษาความเป็นได้และเศรษฐศาสตร์ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์
3. วิเคราะห์ชนิดของไฮโดรคาร์บอนในผลิตภัณฑ์น้ำมัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.
- จินตนา สุมารินทร์. การแตกตัวด้วยไฮโดรเจนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก/ ถ่านกัมมันต์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- จำรัส ลิ้มตระกูล. เคมีของซีโอไลต์. วารสารวิทยาศาสตร์ของสมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย. 51, 6 (2540): 420-423.
- ตะวัน สุขน้อย. เอกสารประกอบการสอนวิชาซีโอไลต์และสารที่มีรูพรุนที่เกี่ยวข้อง. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540.
- ปราโมทย์ ไชยเวช. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์สุนทรออฟเซต, 2537.
- พรพนีย์ วิชชาชู. น้ำมันปาล์มกับไบโอดีเซล. [ออนไลน์]. 2546. แหล่งที่มา: <http://www.doa.go.th>. [2550, กรกฎาคม 15]
- มลฤดี เขาวรัตน์. เอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในรำข้าวและไฮโดรลิซิสน้ำมันรำข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.
- มารีนา มงคล. การแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบน ถ่านกัมมันต์และ HZSM-5. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. คะตะไลซิสแบบเฮเทอโรโรจีเนียส หลักทฤษฎี & การประยุกต์. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
- ศุภยวีจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี. วิชาการปาล์มน้ำมัน: การแปรรูปปาล์มน้ำมัน. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: <http://www.doa.go.th>. [2552, สิงหาคม 23]
- อธิชา ฉายสุวรรณ, วรินทร์ ขวศิริ และวิมลรัตน์ ตระการพฤษ์. แคตตะลิสต์ในโพรงซีโอไลต์วายเป็นสำหรับการออกซิเดชันสารประกอบไฮโดรเจน. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

ภาษาอังกฤษ

- Breck, D.W. Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry and Use. New York: John Wiley & Sons, 1974.
- Daniela, G.L., et al. Diesel-like fuel obtained by Pyrolysis of vegetable oils. J. Anal. Appl. Pyrolysis. 71 (2004): 987-996.
- Casummano, J.A. Catalysis in Coal. New York: Academic Press, 1978.
- Dyer, A. An Introduction to Zeolite Molecular Sieves. New York: John Wiley & Sons, 1988.
- J.V. Smith. Zeolite Chemistry and Catalysis. J.A. Rabo Ed. ACS Monograph, 1976.
- Kokotailo, G.T., Lawton and D.H. Olson. Structure of synthetic zeolite ZSM-5. Nature. 272 (1978): 437-438.
- M.M.J. Treacy, and J.B. Higgins. Collection of Simulated XRD Powder Patterns for Zeolites. 4<sup>th</sup> ed. Amsterdam: Elsevier, 2001.
- Ooi, Y.S., Twaiq, F., Zakaria, R., Mohamed, A.R., and Bhatia, S. Biofuel Production from Catalytic Cracking of Palm Oil. Energy Sources. 25 (2003): 859-869.
- Ramsharan, S. and Prabir, K.D. Handbook of zeolite science and technology. Ohio: 2003.
- Satterfield, C.N. Heterogeneous Catalysis in Industrial Practices. New York: McGraw-Hill, 1991.
- Schobert, H. H. The Chemistry of Hydrocarbon fuel. New York: 1991.
- Szostak R. Molecular sieves principles of synthesis and identification. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- Twaiq, F. A., Zabidi, N. A. M., and Bhatia, S. Catalytic conversion of palm oil to hydrocarbons: Performance of various zeolite catalysts. Ind. Eng. Chem. Res. 38 (1999): 3230-3237.
- Twaiq, F. A., Zabidi, N. A. M., Mohamed, A. R., and Bhatia, S. Catalytic conversion of palm oil over mesoporous aluminosilicate MCM-41 for the production of liquid hydrocarbon fuels. Fuel Processing Technology. 1660 (2003): 1-16.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ก**  
**ข้อมูลการทดลอง**

ตารางที่ ก1 ผลการทดลองจากการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ภาวะการทดลองต่างๆ

Temp (°C)	Time (min)	% Oil yield	% Gas yield	% Solid yield	% Naphtha	% Kerosene	% Light gas oil	% Heavy gas oil	% Long residue
410	30	69.38	13.39	17.23	17.95	5.31	26.58	9.72	25.92
425	30	79.96	17.37	2.66	6.86	3.30	7.67	1.75	47.71
450	30	67.71	30.50	1.79	6.02	1.94	4.73	2.49	27.11
425	30	79.96	17.37	2.66	46.54	16.34	20.61	2.41	14.10
425	45	78.76	19.31	1.93	57.96	11.50	18.86	2.28	9.40
425	60	80.71	17.26	2.03	59.87	24.95	3.07	2.22	9.90

Temp: อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)

Time: เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)

Catalyst: น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)



ตารางที่ ก2 ผลการทดลองจากการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ภาวะการทดลองต่างๆ

Temp (°C)	Time (min)	Catalyst (%wt)	% Oil yield	% Gas yield	% Solid yield	% Naphtha	% Kerosene	% Light gas oil	% Heavy gas oil	% Long residue
410	30	0.25	81.65	10.32	7.77	2.61	5.96	50.62	4.33	18.13
450	30	0.25	47.82	32.94	18.98	12.53	11.05	19.61	1.15	3.49
410	60	0.25	63.24	20.64	15.87	7.71	6.58	33.20	2.78	12.96
450	60	0.25	27.18	61.69	10.89	6.88	7.04	12.18	0.35	0.73
410	30	1.0	73.24	16.67	9.08	15.67	7.98	35.08	1.90	12.60
450	30	1.0	24.56	47.15	27.26	10.68	4.08	7.10	0.49	2.21
410	60	1.0	68.57	15.81	14.61	22.97	11.31	24.55	1.30	8.43
450	60	1.0	33.94	51.88	13.15	21.96	3.19	6.55	0.27	1.97
425	30	0.25	75.71	18.23	5.80	13.78	9.99	36.87	2.04	13.02
425	30	1.0	51.41	27.63	19.83	13.42	9.10	20.62	1.08	7.20
410	45	0.25	50.52	32.48	16.76	13.54	6.87	20.66	1.21	8.23
410	30	0.5	82.20	10.80	6.50	16.52	9.12	40.36	2.06	14.14
410	30	2.5	63.44	20.11	13.93	22.90	6.72	27.28	0.95	5.58
425	45	0.5	64.89	25.25	9.31	24.66	7.20	24.20	1.17	7.66

## ภาคผนวก ข

### ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์องค์ประกอบ

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน} = \frac{\text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ [g]} \times 100}{\text{น้ำหนักของสารตั้งต้น [g]}}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง} = \frac{\text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของแข็งหลังกรอง [g]} \times 100}{\text{น้ำหนักของสารตั้งต้น [g]}}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส} = 100 - \text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันรวมกับของแข็ง}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของแนฟทา} = \frac{\% \text{ แนฟทาจาก DGC} \times \text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน}}{100}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของเคโรซีน} = \frac{\% \text{ เคโรซีนจาก DGC} \times \text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน}}{100}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของแก๊สออร์โทเบนซีน} = \frac{\% \text{ แก๊สออร์โทเบนซีนจาก DGC} \times \text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน}}{100}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของแก๊สออร์โทโทลูอีน} = \frac{\% \text{ แก๊สออร์โทโทลูอีนจาก DGC} \times \text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน}}{100}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของกากน้ำมัน} = \frac{\% \text{ กากน้ำมันจาก DGC} \times \text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน}}{100}$$

ศูนย์วิจัยและพัฒนา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ตัวอย่างการคำนวณ

ที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ 20 กรัม

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน} = \frac{15.99 \times 100}{20} = 79.96$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง} = \frac{0.532 \times 100}{20} = 2.66$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส} = 100 - 79.96 - 2.66 = 17.37$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของเนฟทา} = \frac{46.54 \times 79.96}{100} = 37.22$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของเคโรซีน} = \frac{16.34 \times 79.96}{100} = 13.07$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของแก๊สออร์โอบา} = \frac{20.61 \times 79.96}{100} = 16.48$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของแก๊สออร์โอบนั้ก} = \frac{2.41 \times 79.96}{100} = 1.93$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของกากน้ำมัน} = \frac{14.10 \times 79.96}{100} = 11.27$$

ศูนย์วิจัยและพัฒนาการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ค**  
**การวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน**  
**ตามคาบจุดเดือด (Boiling Distillation)**

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatography) วิเคราะห์ตามจุดเดือดของสาร ดังต่อไปนี้

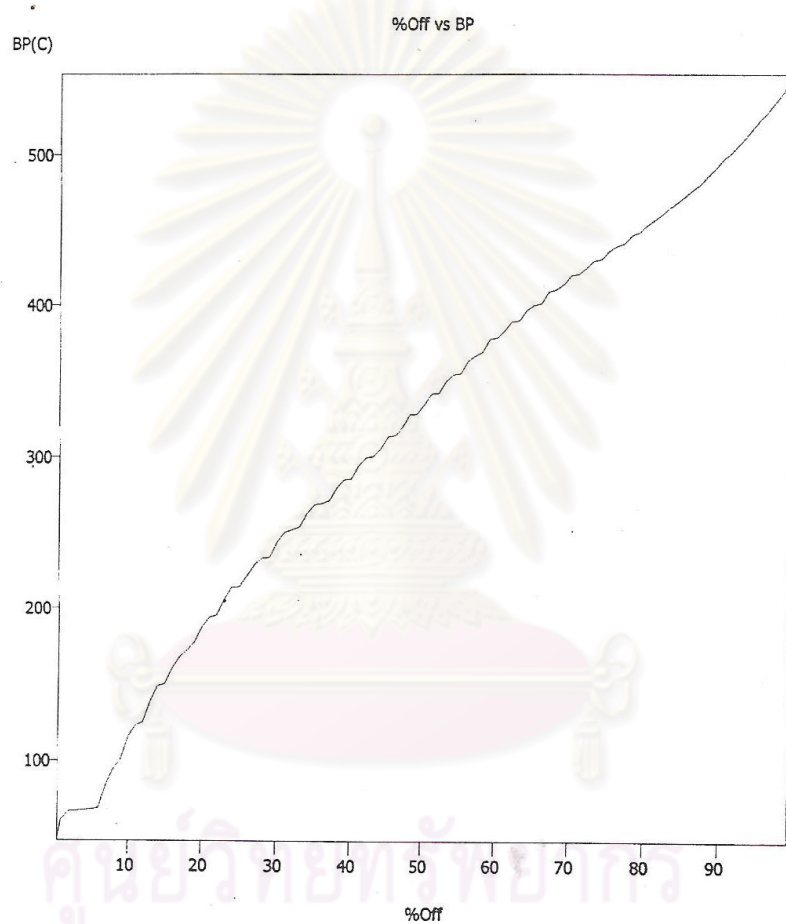
IBP – 200 °C	=	Gasoline
200 °C – 250 °C	=	Kerosene
250 °C – 350 °C	=	Light gas oil
350 °C – 370 °C	=	Heavy gas oil
370 °C – FBP	=	Long residue

การวิเคราะห์เริ่มจากการเตรียมสารตัวอย่างโดยนำผลิตภัณฑ์น้ำมันไปละลายในสารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS<sub>2</sub>) ในอัตราส่วน 1 ส่วนใน 100 ส่วนโดยปริมาตร วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น ยี่ห้อ Varian รุ่น CP-3800 สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887 พร้อมทั้งดีเทคเตอร์แบบ FID ซอฟต์แวร์ Simulated Distillation คอลัมน์ที่ใช้เป็นแบบ Capillary column โดย stationary phase คือ CP-SIL 5CB ยาว 15 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.25 มิลลิเมตร และความหนาฟิล์ม 0.25 ไมครอน โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ

- อุณหภูมิหัวฉีด (Injection temperature) 298 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิคอลัมน์ (Column temperature) ซึ่งจะใช้เป็นแบบโปรแกรมอุณหภูมิ (Temperature program) 1 ขั้นตอน และมีไนโตรเจนเหลวเป็นสารให้ความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิ คือ เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.01 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ 320 องศาเซลเซียส คงที่เป็นเวลา 8.50 นาที
- อุณหภูมิดีเทคเตอร์ (Detector temperature) 320 องศาเซลเซียส
- แก๊สตัวพา (Carrier gas) คือ แก๊สฮีเลียม โดยมีอัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วย split ratio เท่ากับ 2

## ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือด

โครมาโทแกรมที่ได้จากการแยกสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ จะนำไปเปลี่ยนเป็นกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือดด้วยโปรแกรม Simulated Distillation โดยจะเทียบกับกราฟโครมาโทแกรมของสารผสมมาตรฐานตาม ASTM D2887 และโครมาโทแกรมของการทำงานของเครื่องวิเคราะห์เมื่อไม่มีการฉีดสารใดๆ (Blank) ดังแสดงในรูปที่ ค1



รูปที่ ค1 ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามคาบจุดเดือดของสารตัวอย่างจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น

**ภาคผนวก ง**  
**สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5**

การตรวจวัดพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ด้วยเครื่อง BET surface area แสดงดังตาราง ง1

ตารางที่ ง1 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ขนาดรูพรุน (นาโนเมตร)	พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด, $S_{BET}$ (ตารางเมตรต่อกรัม)
HZSM-5	4.60	421.78

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชุติมณฑิ รัตนบัณชิตสกุล เกิดเมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2528 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2549 และมีโอกาสได้เป็นนักเรียนแลกเปลี่ยนในโครงการ “Exchange Program for East Asian Young Researchers” ซึ่งจัดขึ้นโดย Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) ณ Tokyo University of Agriculture and Technology ประเทศญี่ปุ่น ตั้งแต่วันที่ 30 มกราคม 2552 ถึง วันที่ 10 มีนาคม 2552 และโครงการ “JENESYS program 2009/10: Invitation Project of Undergraduate and Postgraduate Students of Environment-related Subjects, Implemented by JASSO” ณ Tokyo University of Agriculture and Technology ประเทศญี่ปุ่น ตั้งแต่วันที่ 25 กันยายน 2552 ถึง วันที่ 31 มีนาคม 2553 และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย