

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5



T119176

ดลพร ชูเกียรติสกุล  
นันทพร เสรีประชารัตน์  
สุวนีย์ นาทะคำ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **119176**  
วัน,เดือน,ปี..... **6 S.A. 2554**

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

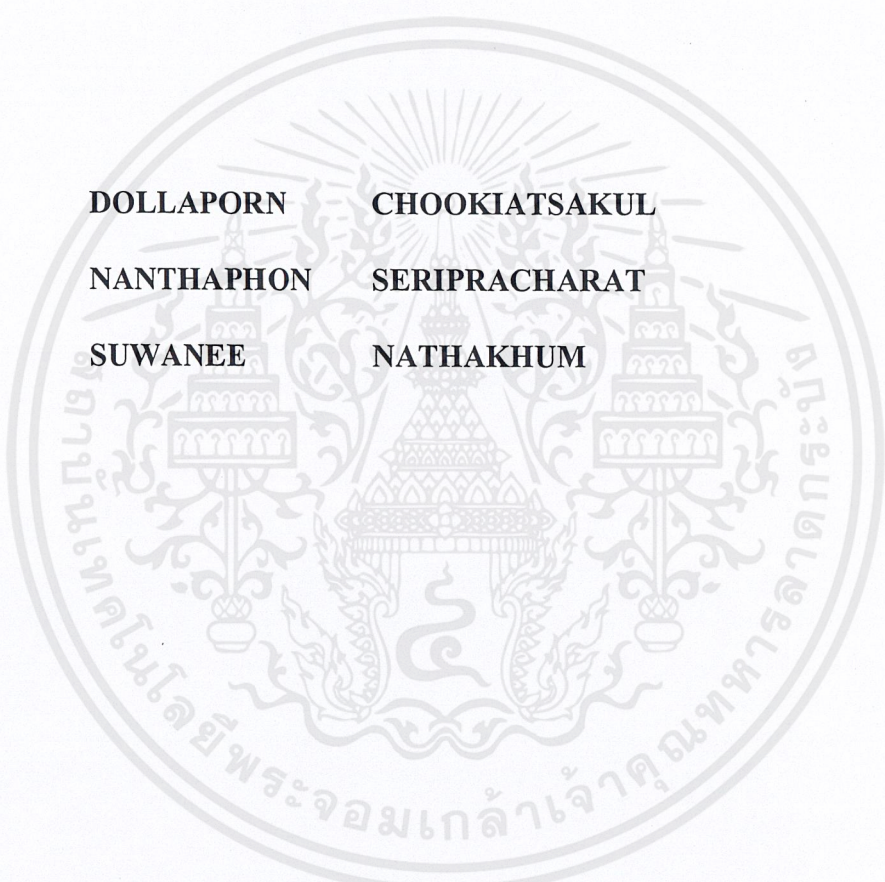
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**CATALYTIC CRACKING OF USED VEGETABLE OILS TO LIQUID FUELS  
USING HZSM-5**



**DOLLAPORN      CHOOKIATSAKUL  
NANTHAPHON      SERIPRACHARAT  
SUWANEE      NATHAKHUM**

**THE THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง

การแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วย  
ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

โดย

นางสาวดลพร ชูเกียรติสกุล  
นางสาวนันทพร เสรีประชารัตน์  
นางสาวสุนีย์ นาทะคำ

ปริญญานิพนธ์

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อาจารย์ที่ปรึกษา

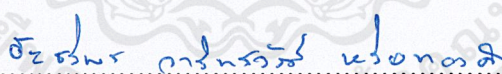
รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

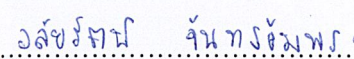
รศ.ดร. ธารพงษ์ วิฑิตสานต์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

 ..... ประธานกรรมการ  
(รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)

 ..... กรรมการ  
(รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา)

 ..... กรรมการ  
(ดร.วัลย์รัตน์ จันทอัมพร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยตัวเร่ง
	ปฏิกิริยา HZSM-5
โดย	นางสาวดลพร ชูเกียรติสกุล นางสาวนันทพร เสรีประชาardtน์ นางสาวสุนีย์ นาทะคำ
ปริญญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อัญชสิทธิ์ วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทคัดย่อ

ปริมาณน้ำมันสำรองของโลกที่ลดลงในขณะที่ความต้องการพลังงานจากปิโตรเลียมที่มีมากขึ้นเป็นแรงผลักดันต่อความพยายามหาแหล่งพลังงานทางเลือกที่สะอาด ปริญญานิพนธ์นี้ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กแบบกะให้ได้เชื้อเพลิงเหลว เพราะนอกจากการบำบัดของเสียแล้วยังเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มน้ำมันพืชที่ใช้แล้วซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งของแหล่งพลังงานที่ยั่งยืน ตัวแปรที่ศึกษาและคาดว่ามีผลต่อร้อยละของผลได้ (Yield) ของเชื้อเพลิงเหลวและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลว ได้แก่ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชใช้แล้วร้อยละ 0.5 และ 2 (0.1 และ 0.4 กรัม ต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 20 กรัม) เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 และ 60 นาที และอุณหภูมิ 380 และ 440 องศาเซลเซียส ที่ความดันของแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ คือ 1 บาร์เกจ ผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการทดลองตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น พบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชใช้แล้วร้อยละ 0.5 เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และอุณหภูมิ 380°C เป็นภาวะที่เหมาะสมที่น้ำมันพืชใช้แล้วแตกตัวได้ผลได้ของเชื้อเพลิงเหล্বর้อยละ 71.48 โดยน้ำหนัก (ประกอบด้วยแกโซลีน 42.89 เคโรซีน 5.60 ดีเซล 15.52 และกากน้ำมันหนัก 7.47) แก๊สไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 22.14 และของแข็ง 6.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Thesis Title** Catalytic Cracking of Used Vegetable Oils to Liquid Fuels  
Using HZSM-5

**By** Miss Dollaporn Chookiatsakul  
Miss Nanthaphon Seripracharat  
Miss Suwanee Nathakhum

**Degree** Bachelor of Engineering

**Program** Chemical Engineering

**Year** 2010

**Advisor** Assoc. Prof. Dr. Anchaleeporn Waritswat Lotongkum

**Co-Advisor** Assoc. Prof. Dr. Tharapong Vitidsant  
Department of Chemical Technology, Faculty of Science  
Chulalongkorn University

## ABSTRACT

Less petroleum reserve while high demand of petroleum energy is a driving force to find a clean alternative energy. This work studied catalytic cracking of used vegetable oils to liquid fuels by HZSM-5 in a batch micro reactor. It was not only waste treatment but also value added. Used vegetable oil is one of potential sources for liquid fuels. A series of experiments were conducted by varying the following parameters: weight ratio of HZSM-5 to used vegetable oils of 0.5 and 2 % (0.1 and 0.4 g HZSM-5 per 20 g of used vegetable oils), reaction time of 30 and 60 min, and reaction temperature of 380°C and 440 °C at a constant hydrogen pressure of 1 barg. From the results analyzed by the simulated distillation gas chromatography, the optimum product distribution was found to be liquid fuels, hydrocarbon gases and a small amount of solids of 71.48, 22.14 and 6.38 wt%, respectively at 0.5 wt% of HZSM-5 to used vegetable oils, reaction time of 30 min, and temperature of 380°C. Liquid fuels were composed of gasoline, kerosene, diesel and long residues of 42.89, 5.60, 15.52 and 7.47 wt%, respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

งานปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร. อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ หัวหน้าภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความช่วยเหลือ คำชี้แนะในการแก้ปัญหา รวมทั้งความรู้และประสบการณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา และ ดร.วัลย์รัตน์ จันทอัมพร กรรมการสอบปริญญานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางการทดลอง

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้สถานที่ อุปกรณ์การทดลอง และเครื่องมือวิเคราะห์ในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณเพื่อนิสิตปริญญาโทในห้องปฏิบัติการทุกคน

คุณความดีและประโยชน์อันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์นี้ ขอมอบให้บิดา มารดา ผู้ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ครูและอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรม สั่งสอน และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดมา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 แนวทางการทำโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เชื้อเพลิงชีวภาพ.....	3
2.2 น้ำมันพืชใช้แล้ว.....	4
2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	5
สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	5
ความเป็นกรดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	8
ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์.....	9
2.4 การดูดซับและการคายซับ.....	12
ชนิดของการดูดซับ.....	13
ไอโซเทิร์มของการดูดซับ.....	15
2.5 ซีโอไลต์.....	19
ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์.....	22
สมบัติของซีโอไลต์.....	22
ประโยชน์และการประยุกต์ใช้งานของซีโอไลต์.....	23
ซีโอไลต์ ZSM-5.....	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน.....	25
2.7 กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา.....	26
2.8 กระบวนการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม.....	31
2.9 แนฟทา.....	33
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	38
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	38
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	40
3.3 วิธีการทดลอง.....	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	42
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น.....	42
4.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้ว.....	42
4.1.2 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	43
4.2 การแตกตัวของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....	44
4.2.1 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยน้ำหนัก ของเชื้อเพลิงเหลว.....	43
4.2.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลว.....	46
4.2.3 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยน้ำหนัก ของเชื้อเพลิงเหลว.....	48
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	53
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	54
เอกสารอ้างอิง.....	55

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบในเชื้อเพลิงเหลว ตามคาบจุดเดือด .....	59
ภาคผนวก ข สูตรที่ใช้และตัวอย่างการคำนวณ .....	64
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลว.....	66
ประวัติผู้เขียน .....	67



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี.....	14
2.2 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับในระดับอุตสาหกรรม.....	23
2.3 ปฏิริยาที่สำคัญของการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิริยา.....	28
3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ศึกษา.....	40
4.1 องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้วก่อนการแตกตัว.....	42
4.2 สมบัติของตัวเร่งปฏิริยา HZSM-5.....	43
4.3 ธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิริยา HZSM-5.....	43
4.4 เปรียบเทียบองค์ประกอบของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วก่อนการแตกตัวกับ เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการแตกตัว.....	50
4.5 ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่ง ปฏิริยา HZSM-5.....	50
4.6 เปรียบเทียบการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วกับงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน.....	52
ก1 ผลการทดลองการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิริยา HZSM-5.....	66

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	วัฏจักรคาร์บอน ไดออกไซด์.....3
2.2	ไอโซเทอร์มของการดูดซับและคายซับ ใน โตรเจนของแบไรต์ (Bayerite, $Al_2O_3$ ) ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน..... 6
2.3	กราฟเชิงเส้นของสมการ BET ของการดูดซับในโตรเจนบนแบไรต์.....7
2.4	การแพร่ของสาร A จากภายนอกไปยังผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....9
2.5	การแพร่ของสาร A เข้าไปภายในรูพรุนไปยังพื้นผิวที่เกิดการเร่งปฏิกิริยา..... 10
2.6	การดูดซับทางเคมีของตัวทำปฏิกิริยาไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา..... 10
2.7	การเกิดปฏิกิริยาของโมเลกุล A ไปเป็น B บนพื้นผิวดังตัวเร่งปฏิกิริยา..... 10
2.8	ผลของอุณหภูมิในปฏิกิริยาการเร่ง ที่อุณหภูมิต่ำ ปานกลาง และสูง..... 12
2.9	การดูดซับทางกายภาพและทางเคมีบนพื้นผิวตัวดูดซับ..... 12
2.10	ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับด้วยการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี และ ปริมาตรรวมของการดูดซับที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ..... 14
2.11	ไอโซเทอร์มการดูดซับของนอร์มัลเพนเทนบนของแข็ง และของเหลว..... 15
2.12	ไอโซเทอร์มการดูดซับแก๊สในโตรเจนบนวัสดุที่มีความพรุน ที่อุณหภูมิ -195 องศาเซลเซียส..... 16
2.13	ไอโซเทอร์มการดูดซับจำแนกตาม IUPAC..... 18
2.14	โครงสร้างพื้นฐานของซีโอไลต์..... 20
2.15	หน่วยทฤษฎีของซีโอไลต์..... 20
2.16	วงแหวนออกซิเจนใน โมเลกุลของซีโอไลต์..... 21
2.17	ก) การคัดเลือกขนาดของโมเลกุลที่เข้าทำปฏิกิริยาในโพรงของซีโอไลต์ ด้วยขนาดของปากโพรง ข) การคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาและออกจากโพรงของซีโอไลต์..... 22
2.18	ชั้นของวงแหวนออกซิเจน 5 อะตอมที่เชื่อมต่อกับชั้นของวงแหวนที่อยู่ข้างเคียง..... 25
2.19	ก) คาร์บีเนียมไอออนของมีเทน ข) คาร์โบเนียมไอออนของมีเทน..... 27

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ทำงานแบบกะ.....	38
3.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ .....	39
3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น .....	39
4.1 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลว ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 และ 60 นาที อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส .....	44
4.2 ก) ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลว ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ข) ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลว ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส .....	45
4.3 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส .....	46
4.4 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส .....	46
4.5 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลว ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส .....	47
4.6 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลว ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส .....	47
4.7 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส .....	48
4.8 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที .....	49
4.9 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที .....	49
ก1 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ .....	59
ก2 Flame Ionization Detector.....	60

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก3 โครมาโทแกรมที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี .....	61
ก4 Retention Time ขององค์ประกอบ A, B และ C.....	61
ก5 การเปรียบเทียบค่าเวลาที่คงอยู่ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน .....	62
ก6 โครมาโทแกรมจากการแยกเชื้อเพลิงเหลวด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี .....	63
ก7 กราฟการกลั่นตามจุดเดือดขององค์ประกอบในเชื้อเพลิงเหลวจาก เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น .....	63



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ความต้องการพลังงานจากปิโตรเลียมที่นับวันจะเพิ่มมากขึ้นในขณะที่ปริมาณสำรองของปิโตรเลียมลดลง รวมทั้งมลพิษทางอากาศ เช่น แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ ซัลเฟอร์ออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลเป็นแรงผลักดันให้มีความจำเป็นต้องหาพลังงานทางเลือกสำหรับใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิล น้ำมันจากพืชน้ำมันเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจเพราะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีสารประกอบของไนโตรเจนและซัลเฟอร์ ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมาอัตราการบริโภคน้ำมันพืชทั่วโลกเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 4 ต่อปี มีรายงานว่าปริมาณการบริโภคน้ำมันพืชในปัจจุบันสูงกว่า 100 ล้านตันต่อปี และมีน้ำมันพืชใช้แล้วจำนวนมากที่เหลือจากการปรุงอาหาร สำหรับประเทศไทยข้อมูลการบริโภคน้ำมันพืชสูงกว่า 800,000 ตันต่อปี ประเมินว่าน่าจะมีน้ำมันพืชใช้แล้วเหลือมากกว่า 100 ล้านลิตรต่อปี [1] งานวิจัยหลายแห่งศึกษาความเป็นไปได้ของการนำน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ เพราะนอกจากจะได้แหล่งพลังงานที่ยั่งยืนแล้ว ยังช่วยลดการกำจัดและช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มของของเสีย

มารีนา มงคล [2] ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ซึ่งสามารถเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีสัดส่วนของแก๊โซลีนเป็นส่วนใหญ่เนื่องจาก HZSM-5 มีค่าการเลือกจำเพาะต่อขนาดและรูปร่าง (Pore Size and Shape Selectivity) สูง ตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของผลได้ (% Yield) ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ศึกษาได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.05-0.2 กรัม ต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 20 กรัม เวลาในการทำปฏิกิริยา 45-60 นาที อุณหภูมิ 400-430 องศาเซลเซียส และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10-20 บาร์ พบว่าเมื่อใช้ HZSM-5 0.05 กรัม เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เกจ ได้ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 83.60 ซึ่งประกอบด้วย แนฟทา 26.75 เควโรซีน 13.79 แก๊สออยล์เบา 22.99 แก๊สออยล์หนัก 3.76 และกากน้ำมันหนัก 16.30 เปอร์เซ็นต์

สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์ เกจ ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (Micro Reactor) ที่ทำงานแบบกะ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชใช้แล้วร้อยละ 0.5 และ 2.0 เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 และ 60 นาที และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380 และ 440 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 สังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5
- 1.2.2 หาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ต่อผลได้ องค์กรประกอบ และการกระจายตัวของเชื้อเพลิงเหลว

## 1.3 แนวทางการทำโครงการงาน

- 1.3.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วตามมาตรฐาน ASTM D 2887
- 1.3.3 วิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ พื้นที่ผิว (Surface Area) ปริมาตรรูพรุน (Pore Volume) ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average Pore Size)
- 1.3.4 ออกแบบการทดลอง ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วร้อยละ 0.5 และ 2.0 (คิดเป็นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 และ 0.4 กรัม ต่อ น้ำมันพืชใช้แล้ว 20 กรัม) เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 และ 60 นาที และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380 และ 440 องศาเซลเซียส
- 1.3.5 หาภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้ว วิเคราะห์ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และองค์ประกอบและการกระจายตัวของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ตามมาตรฐาน ASTM D2887
- 1.3.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง
- 1.3.7 สรุปและเขียนรายงาน

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

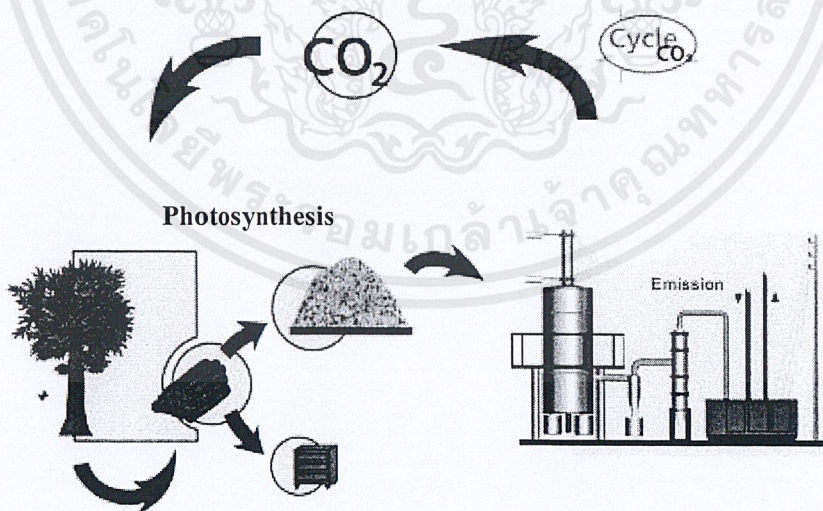
- 1.4.1 ทราบภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ทำงานแบบกะ
- 1.4.2 ลดการกำจัดและสร้างมูลค่าเพิ่มน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เชื้อเพลิงชีวภาพ [3-6]

เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากชีวมวล (Biomass) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่กักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์โดยการสังเคราะห์ด้วยแสง พืชที่มีคลอโรฟิลล์จะดูดพลังงานจากแสงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีเพื่อใช้ในการสร้างอาหารจากคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากแหล่งที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะสั้น ต่างจากเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการสะสมตัวเป็นเวลาหลายล้านปี ดังนั้นไม่ว่าจะนำพืชไปทำอาหารหรือพลังงานก็ตาม ถ้าปริมาณการใช้สมดุลกับการเกิดชีวมวลใหม่ จะทำให้มีชีวมวลใช้ไปตลอด สำหรับประเทศไทยมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการสร้างแหล่งพลังงานจากชีวมวลภายในประเทศเพราะเป็นประเทศเกษตรกรรม เกษตรกรสามารถสร้างรายได้เพิ่มจากการจำหน่ายชีวมวลให้ผู้ใช้ ซึ่งจะช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้บ้าง นอกจากนี้ที่สำคัญการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพจะไม่เพิ่มปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิในชั้นบรรยากาศ เพราะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรคาร์บอนไดออกไซด์ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### เชื้อเพลิงชีวภาพมี 3 รูปแบบ

1. ของแข็ง ได้แก่ ไม้ ชี้อัลเลอีย ฟางข้าว ชังข้าวโพด ชานอ้อย มูลสัตว์ ถ่าน เา เปลือกของพืช เช่น แกลบข้าว เปลือกฝ้าย เปลือกถั่วลิสง เป็นต้น ไม้ฟืนเป็นพลังงานชีวภาพชนิดแรกที่มนุษย์นำมาใช้ในการหุงต้มอาหาร ให้แสงสว่าง และสร้างความอบอุ่นให้แก่ครัวเรือน เนื้อไม้ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด และมีเซลลูโลสเป็นสารประกอบหลัก สารประกอบแต่ละชนิดในเนื้อไม้จะให้ค่าความร้อนแตกต่างกัน
2. ของเหลว เชื้อเพลิงชีวภาพที่อยู่ในรูปของเหลวอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่
  - แอลกอฮอล์ เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสถานะเป็นของเหลวระเหยง่าย แอลกอฮอล์ที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมี 2 ชนิด คือ เอทานอล และเมทานอล
  - น้ำมันจากพืชและสัตว์ ได้แก่ น้ำมันพืชบริสุทธิ์ น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ไขมันสัตว์ และไบโอดีเซลที่ผลิตจากพืชไขมัน ไขมันสัตว์ และน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยผ่านกรรมวิธีทางเคมี
  - น้ำมันจากขยะ มีสมบัติทางเคมีและกายภาพคล้ายคลึงกับปิโตรเลียม สามารถสกัดได้จากขยะชีวมวล
3. แก๊สชีวภาพ ( Biogas ) ส่วนใหญ่ คือ แก๊สมีเทนที่ได้จากการหมักมูลสัตว์หรือของเสียจากโรงเลี้ยงสัตว์ เช่น สุกร โค กระบือ โดยรวบรวมของเสียเหล่านี้ใส่ในถังหมักที่มีเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาในที่ที่ไม่มีอากาศ จุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ในของเสียและเกิดแก๊สมีเทนที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการปรุงอาหารและกระบวนการที่ต้องการใช้ความร้อน ส่วนของเหลือจากถังหมักเมื่อสะสมมากสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยได้

### 2.2 น้ำมันพืชใช้แล้ว (Used Vegetable Oils) [7-8]

น้ำมันพืชปรุงอาหารจากร้านจำหน่ายอาหารทอดต่าง ๆ ในท้องตลาด เช่น ไข่ทอด ปลาทอด ทอดมัน ปลาทอดไก่ กุ้งแขก ฯลฯ ที่ใช้ซ้ำหลายหลายครั้ง มีการเสื่อมสภาพทั้งทางกายภาพและทางเคมี สีของน้ำมันพืชจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลหรือดำ ซึ่งเกิดจากกรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมันพืชได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานาน นอกจากนี้ยังเกิดสารกลุ่มพอลิไซคลิก แอโรมาติกส์ ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatics Hydrocarbon: PAHs) และสารพิษประเภทสารประกอบที่มีขั้วหลายชนิดที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและเป็นสาเหตุของโรคมะเร็ง น้ำมันพืชปรุงอาหารที่ใช้ซ้ำหลายครั้งอาจทำให้เกิดมะเร็งกระเพาะอาหาร การทำงานของไตและตับผิดปกติ แต่เนื่องจากน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นการศึกษาความเป็นไปได้ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำมาทำเชื้อเพลิงเหลว นอกจากจะได้แหล่งพลังงานที่ยั่งยืนแล้ว ยังสร้างมูลค่าเพิ่มของของเสียลดการกำจัดของเสียที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อม และป้องกันพ่อค้าคนกลางรับซื้อน้ำมันใช้แล้วที่เสื่อมสภาพมาแปรรูปกลับมาใช้บริโภคอีก

## 2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ วัสดุที่ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาและความเลือกจำเพาะของปฏิกิริยาเคมี แต่ไม่มีผลต่อผลิตภัณฑ์และสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์
- ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาคต่างกับสารตั้งต้น นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็งและสารตั้งต้นอยู่ในวัฏภาคแก๊สหรือของเหลว เพื่อความสะดวกในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือหลังปฏิกิริยาสิ้นสุด

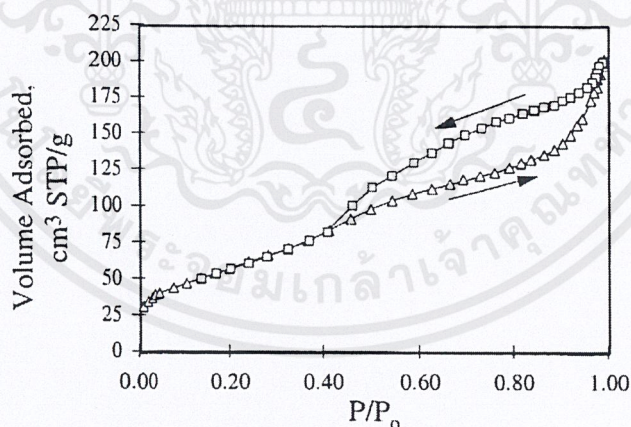
### สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา [9]

พื้นที่ผิว (Surface Area) ขนาดของรูพรุน (Pore Size) ปริมาตรของรูพรุน (Pore Volume) เป็นสมบัติสำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยาที่บ่งชี้พื้นที่ผิวภายในที่ตำแหน่งกัมมันต์ (Active Site) จะสามารถเข้าไปอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาได้ รวมทั้งความสามารถในการเข้าถึงตำแหน่งกัมมันต์ของสารตั้งต้นหรือตัวทำปฏิกิริยา (Reactant) ที่จะเข้าทำปฏิกิริยา และความสะดวกของผลิตภัณฑ์ที่จะออกจากผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังกระแสของไหลภายนอก โดยทั่วไปรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดจากการทำให้แห้ง (Drying) หรือการเผาตะกอนของไฮดรอกไซด์ให้เป็นเถ้า (Calcining Precipitates) แต่ก็มีวัสดุบางชนิดที่สามารถแสดงความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพราะมีความเป็นรูพรุนโดยธรรมชาติ เช่น คาร์บอน ซีโอไลต์ธรรมชาติ (Natural Zeolite)

ขนาดและจำนวนรูพรุน (Size and Number of Pores) เป็นตัวชี้วัดพื้นที่ผิวภายในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวสูงจะมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่อย่างหนาแน่น ซึ่งจะทำให้การกระจายของตำแหน่งกัมมันต์สูง สารปิโตรเลียมโมเลกุลใหญ่ หรือวัสดุคิบประเภทถ่านหิน อาจมีขนาดใหญ่เกินกว่าจะผ่านรูขนาดเล็กได้ ดังนั้นการเลือกโครงสร้างของรูและพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาต้อง

เหมาะสมกับขนาดโมเลกุลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากตำแหน่งกัมมันต์ได้มากที่สุด

การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน การดูดซับด้วยแก๊สเป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับวัดพื้นที่ผิวภายในของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลางที่มีพื้นที่ผิวมากกว่า 1 หรือ 2 ตารางเมตรต่อกรัม ถึง 1,200 ตารางเมตรต่อกรัม โดยปกติใช้การดูดซับและการควบแน่นของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวด้วยวิธีสุญญากาศ (Static Vacuum Procedures) ตามมาตรฐานของ American Society of Testing Materials (ASTM) โดยใส่ตัวอย่างลงในเซลล์แล้วไล่อากาศออก (Purging) ด้วยแก๊สเฉื่อย จากนั้นให้ความร้อนถึง 373-673 เคลวิน และลดอุณหภูมิจนถึง 77 เคลวิน ด้วยไนโตรเจนเหลว ซึ่งจะต้องเพิ่มความดันย่อยของไนโตรเจนในตัวอย่างทีละน้อย บันทึกปริมาณของไนโตรเจนที่ถูกดูดซับเมื่อเข้าสู่สมดุลที่แต่ละจุดที่เพิ่มความดัน จากนั้นทำย้อนกลับด้วยการลดความดันทีละน้อย จะได้เส้นไอโซเทิร์มของการดูดซับ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.2 เป็นไอโซเทิร์มของการดูดซับของไนโตรเจนบนแบไรต์ (Bayerite) ที่ 77 เคลวิน แต่ละโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะใช้พื้นที่บนพื้นผิวเทียบได้กับพื้นที่ตัดขวางของโมเลกุล (0.162 ตารางนาโนเมตร) โดยการวัดจำนวนโมเลกุลของไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวเพียงชั้นเดียวจะสามารถคำนวณพื้นที่ผิวภายในได้



รูปที่ 2.2 ไอโซเทิร์มของการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของแบไรต์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน [9]

ในทางปฏิบัติการดูดซับบนพื้นผิวเกิดมากกว่า 1 ชั้น และที่ความดันย่อยของไนโตรเจนสูง จะเกิดการควบแน่นของของแก๊สไนโตรเจนในรูพรุนทำให้ไอโซเทิร์มของการดูดซับมีค่าเป็น

อนันต์ สมการ Brunauer, Emmett, Teller (BET Equation) สามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างเอกสารนเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดันย่อยของ ไอของ โมเลกุลที่มาดูดซับและปริมาตรที่ถูกดูดซับเพียงชั้นเดียว ดังสมการ

$$\frac{x}{V(1-x)} = \frac{1}{cV_m} + \frac{(c-1)x}{cV_m} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $x$  = ความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ )

$P$  = ความดันย่อยของไนโตรเจน

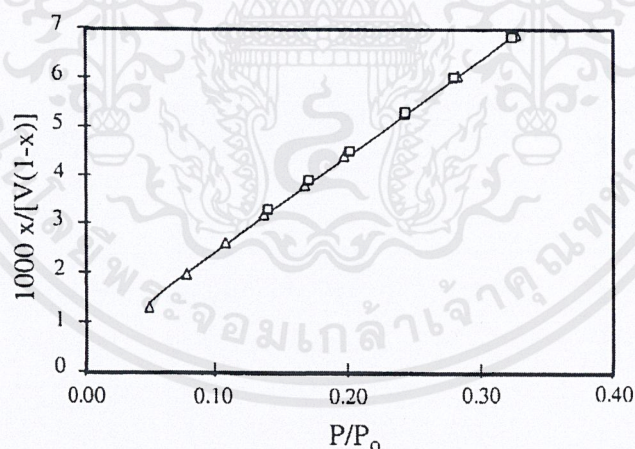
$P_0$  = ความดันอิ่มตัว ณ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง

$V$  = ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดันย่อยของไนโตรเจน

$V_m$  = ปริมาตรที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวเพียงชั้นเดียว

$c$  = ค่าคงที่

เมื่อจัดรูปสมการนี้ให้อยู่ในรูปเชิงเส้น  $y = mx + b$  เทอมทางซ้ายมือของสมการเป็น  $y$  จุดตัดแกน  $y$  จะมีค่าเท่ากับ  $1/cV_m$  และความชันเท่ากับ  $(c-1)/cV_m$  ทำให้สามารถทราบพื้นที่ผิวได้ สมการนี้เชื่อถือได้ที่ความดันสัมพัทธ์มีค่าระหว่าง 0.05-0.3 รูปที่ 2.3 แสดงกราฟเชิงเส้นของสมการ BET



รูปที่ 2.3 กราฟเชิงเส้นของสมการ BET ของการดูดซับไนโตรเจนบนแบไรต์ [9]

ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค [9]

ผง (Powders) – ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผงมักถูกใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบของเหลวชั้น (Liquid-phase Slurry Reactors) เช่น ปฏิกิริยาฟิชเชอร์-โทรป (Fischer-Tropsch Reaction) การเติมไฮโดรเจนในเฟสของเหลว (Liquid-phase Hydrogenation) และเครื่องปฏิกรณ์ฐานก่อสภาพของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหล หรือเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed Reactor) ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผงแปรผันอย่างมากตามแหล่งกำเนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา แม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะมีอัตราการตกตะกอนและการกรองสูงกว่า แต่เส้นทางการแพร่ในอนุภาคขนาดใหญ่จะเป็นตัวจำกัดไม่ให้โมเลกุลเข้าถึงพื้นผิวภายในได้ คือ มีความต้านทานการแพร่สูง (Diffusional Resistance & Diffusion Control Limitation) ดังนั้นการทำให้ความต้านทานการแพร่ผ่านรูพรุนต่ำที่สุดและอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุดทำได้โดยใช้อนุภาคขนาดเล็ก สำหรับการควบคุมปฏิกิริยาการถ่ายเทมวลผ่านชั้นฟิล์ม (Film Mass Transfer) การใช้อนุภาคขนาดเล็กสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยารวมได้เนื่องจากทำให้พื้นที่ผิวเพิ่ม ในทางอุตสาหกรรมความต้านทานการแพร่ผ่านรูพรุนมีความสำคัญมากต่ออัตราการผลิต จึงต้องทำให้มีอัตราการกรองสูงและความดันลดต่ำด้วยการใช้อนุภาคขนาดใหญ่ และมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงด้วยการใช้อนุภาคขนาดเล็ก และมีความสมดุลกันระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่และอนุภาคขนาดเล็ก

**อนุภาค (Particulates)** – การกระจายตัวของขนาดอนุภาคมีผลต่อการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอนุภาคในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed Bed Reactor) การกระจายของขนาดอนุภาคมีผลต่อตัวแปรในกระบวนการ เช่น อัตราการไหล การสัมผัสกันระหว่างตัวทำปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยา ความปั่นป่วน การควบคุมอุณหภูมิ และความดันลด ตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ ผลได้ และความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะมีความดันลดต่ำ แต่การสัมผัสกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นไม่ดี อนุภาคขนาดเล็กจะสามารถควบคุมปฏิกิริยาการถ่ายเทมวลผ่านชั้นฟิล์มของตัวทำปฏิกิริยาออกสู่พื้นผิวภายนอกได้ดีกว่า เพราะมีความต้านทานการแพร่ผ่านรูพรุนต่ำ มีพื้นผิวมาก และระยะการแพร่ผ่านรูพรุนสั้น ดังนั้นขนาดอนุภาคที่เหมาะสมต้องมีความสมดุลกันระหว่างการเกิดความดันลดต่ำและมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง

### ความเป็นกรดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา [10]

ความเป็นกรดบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (Surface Acidity) เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญของการเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นการวัดค่าความเป็นกรดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงสำคัญมากในอุตสาหกรรมการผลิตสารเคมี แต่การวัดค่าความเป็นกรดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการหาลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ค่อนข้างยาก วิธีที่ใช้ในการวัดความเป็นกรดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีหลายวิธี แบ่งเป็น 4 กลุ่ม คือ (1) วิธีไทเทรต (2) วิธีทาง

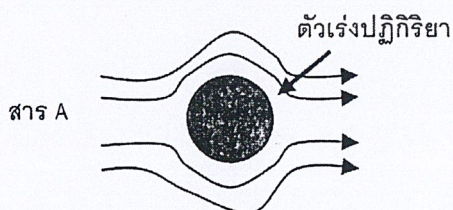
สเปกโทรสโกปีโดยเครื่องมืออินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (IR) (3) วิธีทดสอบปฏิกิริยาเคมี และ (4) วิธีดูดซับและคายซับสารประกอบที่เป็นเบส ซึ่งสองวิธีแรกจะให้ข้อมูลที่บอกความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง แต่สำหรับสองวิธีหลังจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ วิธีไทเทรตเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด

ตัวอย่างการวัดความเป็นกรดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง เช่น  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Ni-SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำหน้าที่ 2 อย่าง (Dual-Function Catalyst) และสารประกอบซีโอไลต์ เป็นต้น ใช้วิธีวัดการดูดซับและการคายซับแก๊สภายใต้โปรแกรมอุณหภูมิ (Temperature Programmed Desorption: TPD) ตัวอย่างสารประกอบที่เป็นเบสที่ใช้ เช่น เทอร์เชียรีบิวทิลลามีน (Tertiary Butylamine) พบว่า ความเป็นกรดที่วัดได้จากการคายซับสารประกอบเทอร์เชียรีบิวทิลลามีนของตัวเร่งปฏิกิริยานั้น สอดคล้องกับพื้นที่ผิวที่ไวต่อปฏิกิริยาของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ

### ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ [9, 11]

ปัจจัยสำคัญในการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุน คือ การทำให้ตัวทำปฏิกิริยาสัมผัสกับตำแหน่งกัมมันต์ให้มากที่สุด เช่น สาร A ไหลผ่านเบดของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ และทำปฏิกิริยาที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นสาร B เพื่อให้สาร A เปลี่ยนรูปเป็นสาร B ในอัตราสูง ขั้นตอนทางกายภาพและทางเคมีที่ต้องเกิดขึ้นมีดังนี้

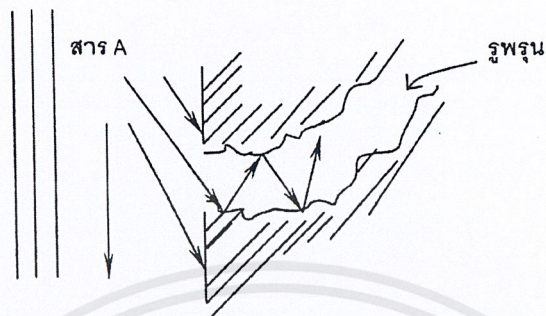
1. การแพร่ของตัวทำปฏิกิริยาจากภายนอก (External Diffusion) สาร A เกิดการถ่ายเทมวลผ่านชั้นฟิล์ม เป็นการแพร่ของสาร A จากกระแสของไหล (Bulk Diffusion) ผ่านชั้นฟิล์มของแก๊สเฉื่อยหรือชั้นขอบเขต (Boundary Layer) ที่ล้อมรอบอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การแพร่ของสาร A จากภายนอกไปยังผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา [11]

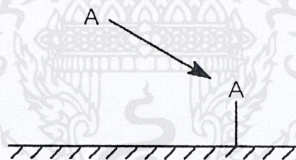
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การแพร่ของสาร A เข้าไปภายในรูพรุน (Internal Pore Diffusion) การแพร่ของสาร A ผ่านโครงสร้างรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังพื้นผิวที่เกิดการเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Surface) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



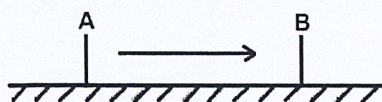
รูปที่ 2.5 การแพร่ของสาร A เข้าไปภายในรูพรุนไปยังพื้นผิวที่เกิดการเร่งปฏิกิริยา [11]

3. การดูดซับ (Adsorption) เป็นการดูดซับสาร A ไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เนื่องจากเกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของตัวทำปฏิกิริยาและผิวหน้าของของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การดูดซับทางเคมีของตัวทำปฏิกิริยาไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา [11]

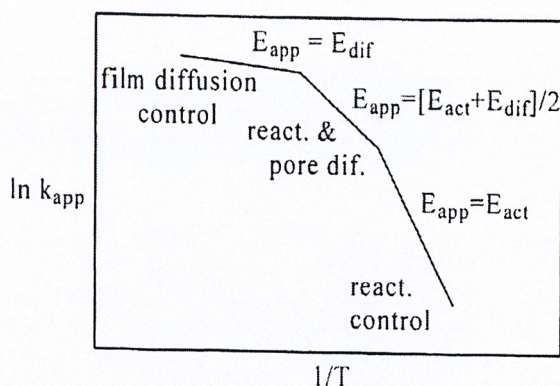
4. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) การเกิดปฏิกิริยาของสาร A ไปเป็นสาร B ที่บริเวณที่เกิดการเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Sites) บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาของโมเลกุล A ไปเป็น B บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา [11]

5. การคายซับ (Desorption) สารผลิตภัณฑ์ B หลุดออกจากผิวตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุด เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขั้นสุดท้าย การคายซับถือว่าเป็นกระบวนการย้อนกลับของการดูดซับ ถ้าเป็นการดูดซับในระบบปิดจะเกิดสมดุลระหว่างการดูดซับและการคายซับ
6. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ B ออกจากภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังปากโพรง (Aperture) ของตัวเร่งปฏิกิริยา
7. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ออกจากผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ B เกิดการถ่ายเทมวลผ่านชั้นฟิล์ม เป็นการแพร่ของสาร B จากกระแสของไหลจากผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านชั้นฟิล์มของแก๊สเฉื่อยไปยังกระแสของไหล (Bulk Diffusion)

ขั้นที่ 1, 2, 6 และ 7 เป็นกระบวนการแพร่ที่อุณหภูมิมิมีผลไม่มากนัก แต่ขั้นที่ 3, 4, และ 5 เป็นกระบวนการทางเคมีที่อุณหภูมิมิมีผลอย่างมาก คือ มีพลังงานกระตุ้น 20 – 200 กิโลจูล/โมล ขั้นตอนที่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นจะช้าเมื่อเทียบกับขั้นตอนอื่น และถือเป็นขั้นควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยารวม (Rate Determining/ Limiting Step of Overall Rate of Reaction) ที่อุณหภูมิจากการเกิดปฏิกิริยาดำ อัตราการเกิดกระบวนการทางเคมีจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลและมีพลังงานกระตุ้นสูงเมื่อเทียบกับกระบวนการแพร่ แต่ที่อุณหภูมิจากการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น อัตราการเกิดกระบวนการทางเคมีจะสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับกระบวนการแพร่ทำให้ขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนจากกระบวนการทางเคมีเป็นกระบวนการแพร่ ในกรณีที่อุณหภูมิจากการเกิดปฏิกิริยาปานกลาง การแพร่ผ่านรูพรุนและปฏิกิริยาที่ผิวภายในรูพรุนจะเกิดช้าที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีที่อุณหภูมิจากการเกิดปฏิกิริยาสูงและต่ำ ดังนั้นพลังงานกระตุ้นจะลดลงเท่ากับค่าเฉลี่ยระหว่างกระบวนการทางเคมีกับกระบวนการแพร่ และที่อุณหภูมิจากการเกิดปฏิกิริยาสูงปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นเร็วพอที่ตัวทำปฏิกิริยาจะเปลี่ยนรูปได้ที่ผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ก่อนที่จะแพร่เข้าไปภายในตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีนี้การถ่ายเทมวลผ่านฟิล์มหรือการแพร่ซึ่งอุณหภูมิมิมีผลน้อย จึงเป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ความสัมพันธ์ของการลดลงของพลังงานกระตุ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิจากขั้นกำหนดปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนไปแสดงดังรูปที่ 2.8 ตามกฎของอาร์เรเนียส (Arrhenius Law)  $k_{app} = A \exp(-E_{app}/RT)$  พล็อตระหว่าง  $\ln(k_{app})$  กับ  $1/T$  จะได้ความชันเท่ากับ  $-E_{app}/R$  เมื่อ  $E_{app}$  คือ พลังงานกระตุ้นที่ปรากฏ (Apparent Activation Energy)

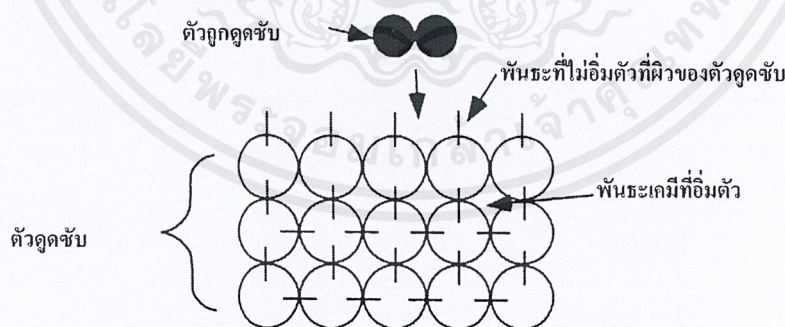


รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิในปฏิกิริยาการเร่ง ที่อุณหภูมิต่ำ ปานกลาง และสูง [9]

## 2.4 การดูดซับและการคายซับ [9, 11-12]

การดูดซับของตัวทำปฏิกิริยา และการคายซับของผลิตภัณฑ์เป็นขั้นตอนที่สำคัญของการเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ลักษณะที่สำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ มีพื้นผิวที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับของตัวทำปฏิกิริยา ดังนั้นในทางเคมี การดูดซับ คือ การเกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับ (Adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) บนตำแหน่งกัมมันต์ เพื่อให้โมเลกุลเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ส่วนการคายซับ คือ การแตกพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับทำให้ได้ตำแหน่งกัมมันต์กลับคืนมา

(ก) การเริ่มกระบวนการดูดซับ



(ข) การดูดซับทางกายภาพ



(ค) การดูดซับทางเคมี



รูปที่ 2.9 การดูดซับทางกายภาพและทางเคมีบนพื้นผิวตัวดูดซับ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชนิดของการดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นจากแรงระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ คือ แรงทางกายภาพและแรงทางเคมี การดูดซับจึงแบ่งออกเป็น 2 แบบ ตามชนิดของแรงที่ดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) และ (ค) ตามลำดับ

### 1. การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ มีลักษณะที่สำคัญ คือ เป็นการดูดซับที่อ่อนและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิห้อง และเกิดได้ดีมากขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง (-200 ถึง -20 องศาเซลเซียส) แรงดึงดูดระหว่างอะตอมที่ผิวหน้าของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) มีค่าความร้อนของการดูดซับต่ำ ประมาณ 15-20 กิโลจูล/โมล เป็นกระบวนการคายความร้อน ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy) และไม่มี การแตกพันธะ จึงเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในทันทีที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเดินทางมาถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้าลง เนื่องจากถูกจำกัดด้วยอัตราการแพร่ ปริมาณของการดูดซับแบบนี้เป็นแบบไม่จำเพาะเจาะจง คือ ขึ้นกับจุดเดือดของแก๊สที่เป็นตัวถูกดูดซับ แต่ไม่ขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับและชนิดของแก๊ส หลังการดูดซับแก๊สที่ผิวหน้าไม่เป็นชั้นเดียว เพราะการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นที่ชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมบนผิวหน้าของตัวดูดซับ โดยไม่จำกัดจำนวน โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน จึงมักเรียกรวมการดูดซับลักษณะนี้ว่า การดูดซับหลายชั้น (Multilayer Adsorption)

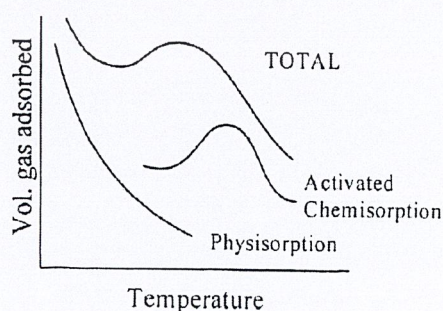
### 2. การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมีจะตรงกันข้ามกับการดูดซับทางกายภาพ คือ เป็นการดูดซับที่แข็งแรง เพราะมีพันธะเคมีเกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับในลักษณะเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้น การดูดซับจึงมักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง (25 ถึง 400 องศาเซลเซียส) เกิดแก๊สของโลหะและโลหะออกไซด์ที่ผิวหน้า ค่าความร้อนที่ใช้ในการดูดซับสูงประมาณ 50 – 300 กิโลจูล/โมล การดูดซับแบบนี้เป็นแบบเฉพาะเจาะจง คือ ขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับและชนิดของแก๊สที่เป็นตัวถูกดูดซับ หลังการดูดซับแก๊สที่ผิวหน้าจะเป็นชั้นเดียว คือ เกิดเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น ความแตกต่างของกระบวนการการดูดซับทั้งสองแบบ สรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี [9]

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ตัวดูดซับ	ของแข็งทั้งหมด	ของแข็งบางส่วน
ตัวถูกดูดซับ	แก๊สทั้งหมดที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต	แก๊สบางชนิดที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี
ช่วงอุณหภูมิ	อุณหภูมิต่ำ ประมาณจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ	โดยทั่วไปอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของตัวถูกดูดซับ
ความร้อนของการดูดซับ	ต่ำ ( $-\Delta H \leq 20 \text{ kJ/mol}$ )	สูง ( $-\Delta H \approx 50 - 300 \text{ kJ/mol}$ )
อัตราเร็ว พลังงานกระตุ้น	เร็วมาก ไม่มีการกระตุ้น	บางครั้งช้า ต้องการการกระตุ้น
ผลของความดัน	มีผลมาก	มีผลน้อย
การปกคลุม	หลายชั้น ไม่เฉพาะเจาะจง	ชั้นเดียว เฉพาะเจาะจง
การคายซับ	เกิดได้ง่ายในภาวะสูญญากาศ หรือใช้แก๊สไล่	พลังงานที่ใช้ในการคายซับมากกว่า 50 -100 กิโลจูล/โมล เกิดการคายซับเฉพาะที่อุณหภูมิสูง
การผันกลับได้	ผันกลับได้	ส่วนมากผันกลับไม่ได้
ความสำคัญ	ใช้กำหนดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน	ใช้กำหนดพื้นที่ผิวก็มมันด์ และอธิบายจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่พื้นผิว

ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแก๊สดูดซับของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี แสดงในรูปที่ 2.10 ปริมาณแก๊สของการดูดซับทางกายภาพจะสูงที่อุณหภูมิต่ำและจะลดลงอย่างคงที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณแก๊สของการดูดซับทางเคมีจะสูงที่สุดที่อุณหภูมিপานกลางและจะลดลงที่อุณหภูมิสูง เพราะอัตราของการคายซับมากกว่าอัตราการดูดซับ

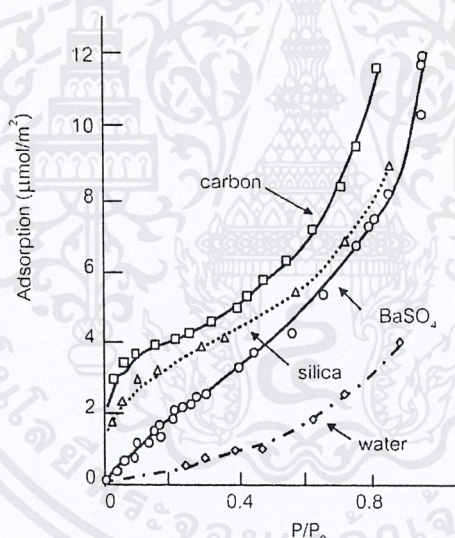


รูปที่ 2.10 ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับด้วยการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี และปริมาตรรวมของการดูดซับที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ [9]

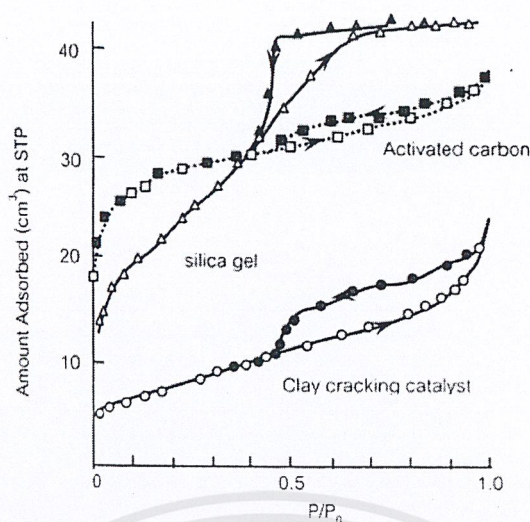
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) [11-12]

ไอโซเทิร์มของการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยของตัวถูกดูดซับที่มักใช้ค่าความดันสัมพัทธ์  $P/P_0$  กับปริมาณการดูดซับที่สมดุล รูปร่างของไอโซเทิร์มจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นไอโซเทิร์มของการดูดซับของนอร์มัลเพนเทน (n-Pentane) บนของแข็งสามชนิดและบนของเหลว คือ น้ำ จะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ รูปที่ 2.12 แสดงไอโซเทิร์มของการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -195 องศาเซลเซียส บนวัสดุที่มีรูพรุนขนาด 5-50 นาโนเมตร จะให้กราฟการดูดซับและการคายซับที่มีลักษณะเป็น Hysteresis Loop คือ เส้นกราฟสองเส้นไม่ทับกันในช่วง เพราะการควบแน่นในรูเล็ก (Capillary Condensation) ซึ่งแสดง Hysteresis Loop ของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนซิลิกาเจล (Silica Gel) ถ่านกัมมันต์ และ Clay Cracking Catalyst เส้นบน คือ การดูดซับ และเส้นล่าง คือ การคายซับของโมเลกุล



รูปที่ 2.11 ไอโซเทิร์มการดูดซับของนอร์มัลเพนเทนบนของแข็งและของเหลว [11]



รูปที่ 2.12 ไอโซเทิร์มการดูดซับแก๊สใน โตรเจนบนวัสดุที่มีความพรุนที่อุณหภูมิต่ำ

-195 องศาเซลเซียส [11]

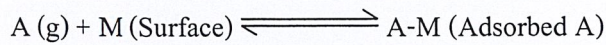
ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) เป็น ไอโซเทิร์มที่ง่ายที่สุด นิยมใช้สำหรับ การดูดซับแบบชั้นเดียว มักพบในวัสดุที่มีความพรุนแต่ผิวหน้ามีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำ เช่น ซีโอไลต์ หรือ ถ่านกัมมันต์บางชนิด ปริมาตรของรูพรุนจึงมีค่ามากกว่าปริมาตรของการดูดซับชั้นเดียวมาก ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นในตอนต้น และเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วจนค่าการดูดซับคงที่ การดูดซับแบบนี้จะพบได้ในการดูดซับที่ย้อนกลับได้

ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์ มีสมมติฐานดังนี้

1. การดูดซับของตัวดูดซับบนผิวของตัวถูกดูดซับเป็นการดูดซับที่แข็งแรง (การดูดซับทางเคมี) และเป็นแบบชั้นเดียว
2. สารหนึ่งโมเลกุลจะดูดซับเพียงหนึ่งตำแหน่งเท่านั้น (ค่านี้สามารถปรับได้ ถ้าปริมาณสารสัมพันธ์ไม่เท่ากับ 1:1)
3. เอนทาลปีของการดูดซับ ( $\Delta H_u$ ) ไม่ขึ้นกับสัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกดูดซับ ( $\theta$ ) คือ แต่ละตำแหน่งมีพลังงานคงที่ และไม่มีอันตรกิริยาระหว่างตำแหน่ง และ/หรือ ระหว่างตัวดูดซับด้วยกัน
4. เกิดสมดุลระหว่างการดูดซับและการคายซับ คือ อัตราเร็วของการดูดซับเท่ากับ อัตราเร็วของการคายซับจากพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีแก๊ส A ที่ความดัน  $P_A$  มาดูดซับบนพื้นผิวโดยไม่มีการแตกพันธะเคมี



เมื่อ	A	=	ชนิดของตัวถูกดูดซับ
	M	=	ตำแหน่งบนพื้นผิว เช่น อะตอมโลหะ
	$\theta_A$	=	สัดส่วนของพื้นผิวที่ปกคลุมด้วย A
	$1 - \theta_A$	=	สัดส่วนพื้นที่ที่ไม่ถูกปกคลุมด้วย A
	$P_A$	=	ความดันของแก๊ส A
	$k_a$	=	ค่าคงที่อัตราของการดูดซับ
	$k_d$	=	ค่าคงที่อัตราของการคายซับ

อัตราการดูดซับทั้งหมด คือ ผลรวมของอัตราไปข้างหน้าและอัตราย้อนกลับ ดังสมการที่ (2.2)

$$R = k_a P_A (1 - \theta_A) - k_d \theta_A \quad (2.2)$$

เนื่องจากอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันของแก๊ส A ( $P_A$ ) และสัดส่วนของพื้นที่ที่ยังว่างอยู่ ( $1 - \theta_A$ ) ส่วนอัตราการคายซับเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ที่ถูกปกคลุมด้วยแก๊ส A ( $\theta_A$ ) ที่จุดสมดุล  $r = 0$  คือ อัตราเร็วของการดูดซับเท่ากับอัตราเร็วของการคายซับ สมการที่ (2.2) จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(k_a/k_d) P_A (1 - \theta_A) = \theta_A \quad (2.3)$$

กำหนดให้ K เป็นค่าคงที่สมดุลและเขียนค่าคงที่อัตราในรูปของแฟกเตอร์ความถี่ (Frequency Factors) และพลังงานกระตุ้นจากทฤษฎีเรเนี่ยส

$$K = (k_a/k_d) = (A_a/A_d) e^{-\Delta H_a/RT} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\Delta H_a$  = เอนทาลปีของการดูดซับ =  $E_a - E_d$

สมมติให้  $\Delta H_a \neq f(\theta_A)$

$$K P_A (1 - \theta_A) = \theta_A$$

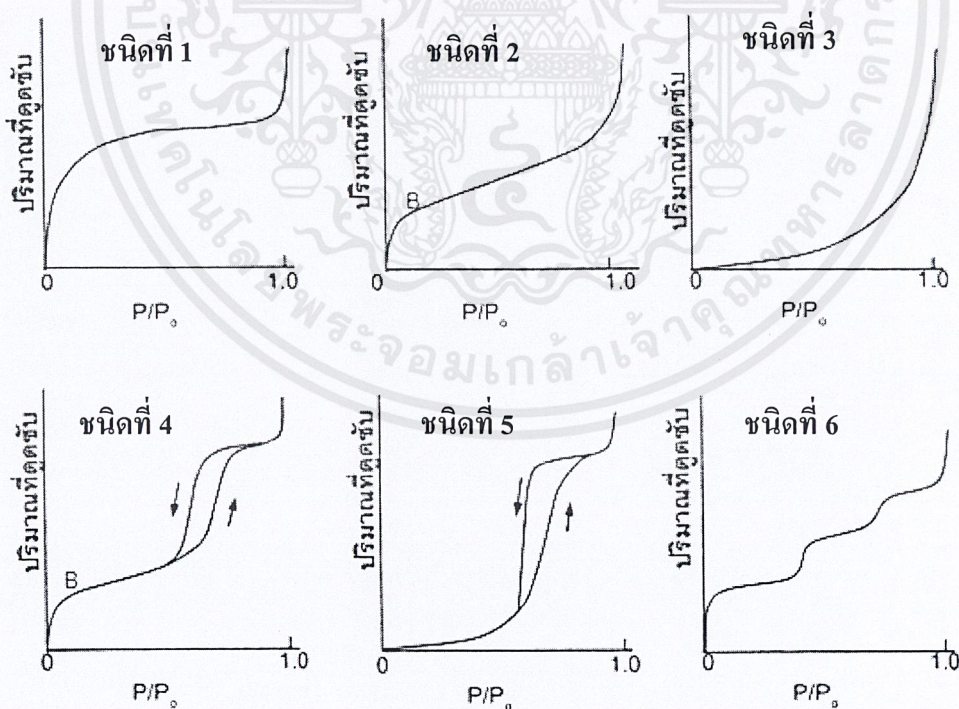
แก้สมการหา  $\theta_A$

$$\theta_A = \frac{K P_A}{(1 + K P_A)} \quad (2.5)$$

ค่า  $K$  จะบอกความแข็งแรงของการดูดซับที่อุณหภูมิ และ  $P_A$  คงที่ ถ้าค่า  $K$  มากแสดงว่าพันธะแข็งแรงและสัดส่วนของพื้นผิวที่ถูกปกคลุมมีค่ามาก เมื่อค่า  $P_A$  ต่ำ สัดส่วนของพื้นผิวที่ถูกคลุมจะแปรผันโดยตรงกับ  $P_A$  ไอโซเทิร์มจะเป็นเส้นตรง แต่เมื่อค่า  $P_A$  สูง คือ  $1 \ll K P_A$  ปริมาตรที่ถูกดูดซับไม่ขึ้นกับความดัน  $P_A$  และจะเข้าใกล้ปริมาตรของการดูดซับแบบชั้นเดียว หรือ  $\theta \rightarrow 1$

### การดูดซับหลายชั้นและไอโซเทิร์ม Brunauer, Emmett, Teller (BET Isotherm)

การดูดซับทางกายภาพทำให้เกิดการดูดซับแบบหลายชั้น ไอโซเทิร์มของการดูดซับแบ่งเป็น 6 ชนิด ตามเกณฑ์ IUPAC ซึ่งขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 สำหรับของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางแสดงไอโซเทิร์มชนิดที่ 4 เป็นแบบที่ง่ายที่สุด โดยถ้าสามารถจำลองไอโซเทิร์มได้และ  $V_m$  สามารถวัดหรือคำนวณได้จากปริมาณอื่นที่วัดค่าได้ จะสามารถกำหนดพื้นที่ผิวทั้งหมดของของแข็งชนิดต่างๆ ได้



รูปที่ 2.13 ไอโซเทิร์มการดูดซับจำแนกตาม IUPAC [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

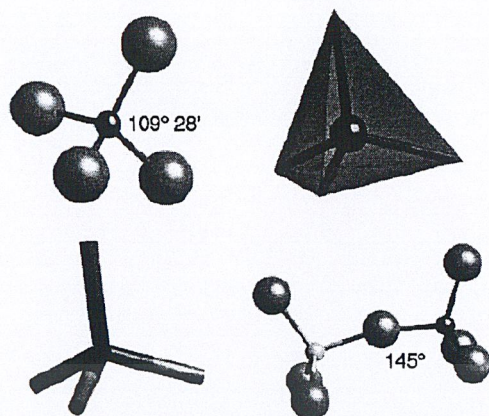
ไอโซเทิร์มแบบบรันเนอร์-เฮมเมตต์-เทลเลอร์ มีสมมติฐานดังนี้

1. สมมติฐานเริ่มต้นเหมือนกับ ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์
2. ตัวถูกดูดซับบนผิวหน้าชั้นแรกจะเป็นตัวรองรับตัวถูกดูดซับชั้นที่ 2
3. อัตราการดูดซับ ( $r_d$ ) ในชั้นที่  $i$  จะเท่ากับอัตราการคายซับ ( $r_d$ ) ของชั้นที่  $i+1$
4. เอนทาลปีของการดูดซับมีค่าเท่ากันในชั้นที่ 2 และชั้นถัดไป และจะเท่ากับความร้อนของการควบแน่น (Heat of Condensation,  $\Delta H_C$ ) ของแก๊ส คือ  $\Delta H_{d2} = \Delta H_{d3} = \dots = \Delta H_C$

## 2.5 ซีโอไลต์ (Zeolite) [13-17]

ซีโอไลต์เป็น โมเลกุลที่มีความเป็นผลึกสูง อยู่ในรูปของแร่อะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) โครงสร้างพื้นฐานเป็นทรงสี่หน้า (Tetrahedral) ของ  $(SiO_4)^{4-}$  และ  $(AlO_4)^{5-}$  ซึ่งยึดติดกันด้วยออกซิเจนที่มุมของทรงสี่หน้าเป็นหน่วยปฐมภูมิ (Primary Unit) ดังรูปที่ 2.14 เมื่อหน่วยปฐมภูมิเชื่อมต่อกันจะได้เป็นหน่วยทุติยภูมิ (Secondary Building Unit) รูปแบบต่างๆ กัน แสดงดังรูปที่ 2.15 จากนั้นเกิดการรวมตัวกันเป็นโมเลกุลของสารอนินทรีย์ขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ ถ้าทุกหน่วยในโครงสร้างเป็น  $(SiO_4)^{4-}$  สารที่ได้ชนิดนี้ก็จะเป็  $SiO_2$  และหากแทน  $(SiO_4)^{4-}$  ด้วย  $(AlO_4)^{5-}$  จะทำให้เกิดประจุลบที่ทุกหน่วยของ  $(AlO_4)^{5-}$  ประจุบวกจึงถูกเติมเข้าไปชดเชยประจุลบที่เกิดขึ้น

ในโครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบด้วยโพรงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 0.2-1 นาโนเมตร ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางนี้ขึ้นกับชนิดของซีโอไลต์ ประจุบวกที่มีอยู่ภายในโครงสร้าง และวิธีการปรับสภาพ เช่น การเผาให้เป็นเถ้า (Calcination) การสกัดด้วยของไหล (Leaching) และด้วยวิธีทางเคมีต่างๆ ภายในโพรงของซีโอไลต์จะมีน้ำและประจุบวก การเอาน้ำออกจากซีโอไลต์จะไม่ทำลายโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์ ประจุบวกส่วนมากเป็นโซเดียมไอออน ( $Na^+$ ) ซึ่งจะสมดุลกับประจุลบในโครงสร้าง ประจุบวกนี้สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วมาก ทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุบวก การเรียกชื่อของซีโอไลต์จะเรียกตามประจุบวกในโครงสร้าง เช่น  $NaZSM-5$  ประจุบวก คือ  $Na^+$  สำหรับ  $HZSM-5$  ประจุบวกคือ  $H^+$



รูปที่ 2.14 โครงสร้างพื้นฐานของซีโอไลต์ [14]



รูปที่ 2.15 หน่วยทฤษฎีของซีโอไลต์ [16]

จะเห็นว่าซีโอไลต์ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ คือ โครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน 4 โครงสร้าง (4-connected Framework) โครงสร้างของไอออนบวกที่เติมเข้าไป และเฟสที่ถูกดูดซับ ซึ่งในที่นี่หมายถึง น้ำ นอกจากนั้นซีโอไลต์ยังมีโครงสร้างแบบเปิด คือ รูพรุนและช่องว่างที่ไอออนและโมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ องค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์แสดงได้ด้วยสูตรโมเลกุลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



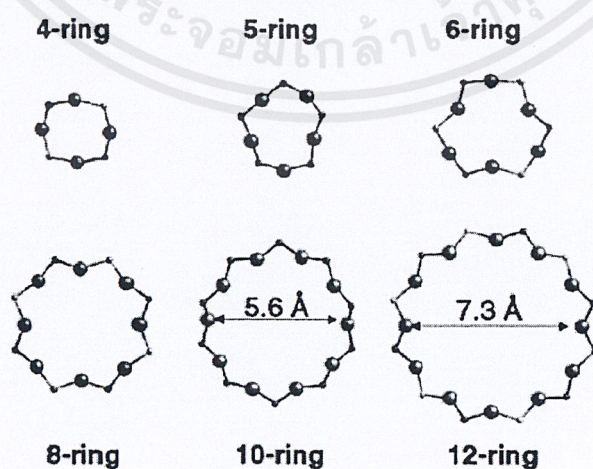
A คือ ประจุบวกที่มีประจุเท่ากับ m

(x + y) คือ จำนวนของเตตระฮีดรอลต่อหนึ่งผลึก

x/y เรียกว่า อัตราส่วนโครงสร้างซิลิกา/อะลูมินา หรือ Si/Al

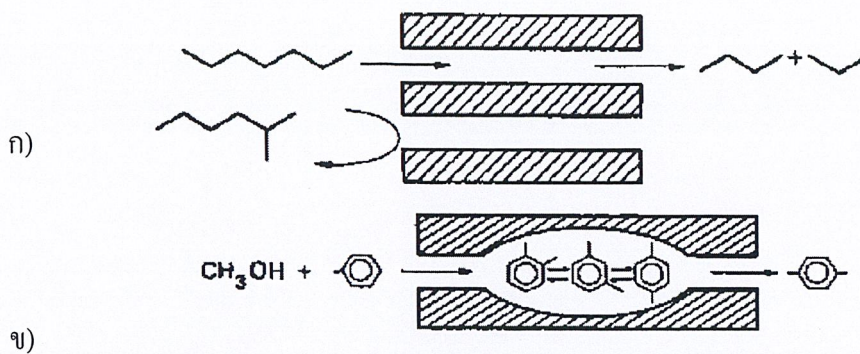
ตัวอย่างเช่น แร่ซีโอไลต์ ZSM-5 (MFI) เป็นแร่ที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็น  $Na^+(H_2O)_{16}[Al_3Si_{93}O_{192}]$  จากสูตรโมเลกุลนี้หมายความว่า ใน 1 โพรง (Unit Cell) ของโครงสร้างประกอบด้วย อะลูมินเตเตตระฮีดรอล ( $[AlO_2^-]$ ) 3 โมเลกุล ซิลิกเตเตตระฮีดรอล ( $[SiO_2]$ ) 93 โมเลกุล และทั้ง 3 ไอออนของโซเดียมที่ถูกเติมเข้าไปเพื่อให้สมดุลกับประจุลบในโครงสร้างและมีโมเลกุลของน้ำ 16 โมเลกุลในโพรง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปากโพรง (Aperture) เป็นตัวจำกัดขนาดและรูปร่างของโมเลกุลที่จะเข้าไปภายในโพรงที่เกิดขึ้นจากวงแหวนออกซิเจนที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ทรงสี่หน้าที่เชื่อมต่อกันเป็นวงแหวน โดยวงแหวนที่มีทรงสี่หน้า n หน่วยจะมีออกซิเจนในวงแหวน n อะตอม เรียกว่า n-Ring วงแหวน ซีโอไลต์ส่วนใหญ่ประกอบด้วยเตตระฮีดรอล 4, 5, 6, 8, 10 หรือ 12 หน่วย ขนาดของวงแหวนออกซิเจนที่มักพบในซีโอไลต์แสดงดังรูปที่ 2.16 โมเลกุลที่มีรูปร่างพอดีกับปากโพรงและขนาดของโพรงจะสามารถผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ และผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็ต้องมีรูปร่างและขนาดจำเพาะกับปากโพรงจึงจะออกจากโพรงได้ ทำให้ซีโอไลต์มีความเลือกจำเพาะต่อรูปร่างและขนาด (Shape and Size Selectivity) ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 วงแหวนออกซิเจนในโมเลกุลของซีโอไลต์ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ก) การคัดเลือกขนาดของโมเลกุลที่เข้าทำปฏิกิริยาในโพรงของซีโอไลต์ด้วยขนาดของปากโพรง

ข) การคัดเลือกรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่จะสามารถออกจากโพรงของซีโอไลต์ได้ [14]

ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ [13] แบ่งได้เป็น

1. รูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) มีขนาดของรูพรุนน้อยกว่า 5 อังสตรอม ซึ่งเกิดจากวงแหวนออกซิเจน 8 อะตอม เช่น ซีโอไลต์เอ (Zeolite A)
2. รูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) มีขนาดรูพรุน 5-6 อังสตรอม ซึ่งเกิดจากวงแหวนออกซิเจน 10 อะตอม เช่น ซีโอไลต์ ZSM-5
3. รูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous) มีขนาดรูพรุน 7-8 อังสตรอม ซึ่งเกิดจากวงแหวนออกซิเจน 12 อะตอม เช่น ซีโอไลต์ฟูจาไซต์ (Zeolite Faujasite)

สมบัติของซีโอไลต์

1. โครงสร้างเป็นผลึกและมีรูพรุน  
มีโครงสร้างเป็นผลึกและมีรูพรุนอยู่ภายใน ทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของตัวทำปฏิกิริยามาก นอกจากนี้รูพรุนขนาดเล็กจะช่วยเพิ่มแรงกระทำระหว่างโมเลกุล
2. สมบัติในการเลือกสารเข้าทำปฏิกิริยาเคมี หรือเลือกผลิตภัณฑ์ที่ออก (Selectivity)  
ซีโอไลต์มีขนาดและรูปร่างของรูพรุนที่เป็นลักษณะเฉพาะตัว จึงมีสมบัติพิเศษในการเร่งปฏิกิริยาเคมี เพราะสามารถเลือกรูปร่างและขนาดสารตั้งต้นให้เข้ามาทำปฏิกิริยาได้ และรูปร่างและขนาดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา เช่น ถ้าสารตั้งต้นมีขนาดใหญ่กว่าโพรง จะไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ สารที่มีรูปร่างเหมาะสมเท่านั้นที่สามารถผ่านเข้าและออกจากโพรงซีโอไลต์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เร็วขึ้น

ซีโอไลต์สามารถช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์มีรูพรุนอยู่ภายในทำให้มีตำแหน่งกัมมันต์บนพื้นผิวสูง จึงมีโอกาสดเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารตั้งต้นมาก และสารที่เข้าทำปฏิกิริยาสามารถเข้าไปถึงตำแหน่งกัมมันต์ได้มาก

## ประโยชน์และการประยุกต์ใช้งานของซีโอไลต์

### 1. ตัวดูดซับ

การใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับสามารถใช้ได้ทั้งกับกระบวนการทำให้แห้ง การทำให้บริสุทธิ์ และการแยกสาร เพราะซีโอไลต์มีสมบัติความเลือกจำเพาะต่อรูปร่าง สามารถเลือกดูดซับเฉพาะบางโมเลกุล ส่วนการทำให้แห้งประยุกต์ในซีโอไลต์สามารถดูดซับน้ำได้ดีและเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ คือ เมื่อมีการให้ความร้อน น้ำจะระเหยออกไปหมด แต่เมื่อซีโอไลต์เหล่านี้สัมผัสกับไอน้ำอีกครั้งก็สามารถดูดซับน้ำได้อีก ตารางที่ 2.2 แสดงการประยุกต์ใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับในระดับอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.2 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับในระดับอุตสาหกรรม [14]

การทำให้บริสุทธิ์	กระบวนการแยกสาร
การทำให้แห้ง เช่น	กระบวนการแยกพาราฟิน โซ่ตรงและโซ่กิ่ง
- แก๊สธรรมชาติ (รวมทั้งแก๊สธรรมชาติเหลว (LNG))	กระบวนการแยกไซลีน
- แก๊สที่เกิดจากการแตกตัว (Cracking Gas) ในโรงงานผลิตเอทิลีน (Ethylene Plants)	กระบวนการแยกโอเลฟินส์
- สารทำความเย็น	กระบวนการแยกตัวทำลายอินทรีย์
กำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น	กระบวนการแยกแก๊สออกซิเจนออกจากอากาศ
- จากแก๊สธรรมชาติ แก๊สเสีย	กระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
- กระบวนการแยกอากาศที่ภาวะเย็นยิ่งยวด	แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แก๊สแอมโมเนีย
กำจัดสารประกอบซัลเฟอร์	กระบวนการแยกน้ำตาล
	กระบวนการแยกกรดอะมิโน

### 2. ตัวเร่งปฏิกิริยา

ประโยชน์ของซีโอไลต์ในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีความสำคัญในอุตสาหกรรมเคมี เช่น ใช้สำหรับปฏิกิริยาเติมไฮโดรเจน การเกิดสารอะโรแมติกส์ ไอโซเมอไรเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Isomerization) เป็นต้น เพราะซีโอไลต์เป็นของแข็งที่มีจุดหลอมเหลวสูง มีความคงทนสูง และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นที่อยู่ในรูปของเหลวหรือแก๊ส

### 3. การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

ในโครงสร้างของซีโอไลต์มีประจุบวกของโลหะเกาะอยู่อย่างหลวมๆ จึงมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุกับโลหะอื่นที่อยู่ในสารละลายได้ จึงสามารถประยุกต์ใช้สำหรับลดความกระด้างของน้ำ เช่น ในอุตสาหกรรมการซักฟอกโดยโลหะอัลคาไล เช่น โซเดียม หรือโพแทสเซียมที่เกาะกับซีโอไลต์จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งเป็นประจุของโลหะในน้ำที่เป็นสาเหตุทำให้น้ำกระด้าง นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสียหรือสามารถใช้กำจัดโลหะต่างๆ ในน้ำมัน

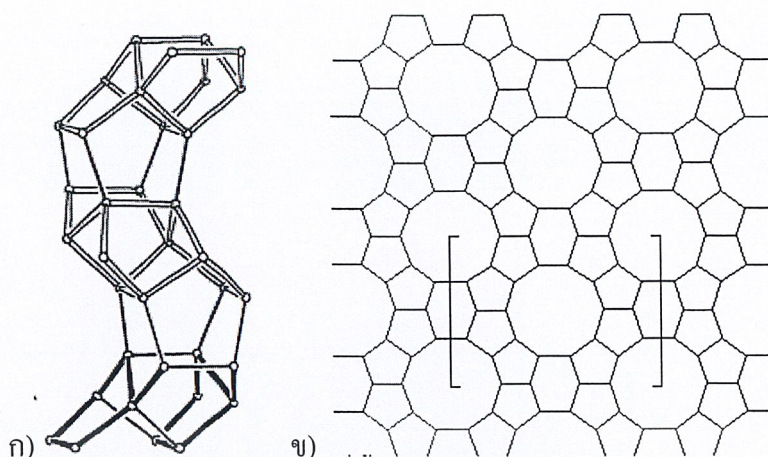
### 4. สารคัดเลือกโมเลกุล (Molecular Sieve)

โครงสร้างของซีโอไลต์มีขนาดของรูพรุนหรือช่องว่างที่สม่ำเสมอและมีระเบียบจำนวนมากทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติเป็นสารคัดเลือกโมเลกุล ซึ่งแตกต่างจากสารดูดซับชนิดอื่นที่มีขนาดรูพรุนไม่สม่ำเสมอ เช่น ซิลิกาเจล ถ่านกัมมันต์ และอะลูมินา เป็นต้น รูพรุนจะทำหน้าที่คัดเลือกขนาด โดยยอมให้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าเท่านั้นที่จะผ่านไปได้

ซีโอไลต์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนมากมีรูพรุนขนาดกลางถึงใหญ่ ที่เกิดขึ้นจากวงแหวนออกซิเจน 10-12 อะตอม และมีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาสูง ซีโอไลต์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เช่น ซีโอไลต์ ZSM-5 ซึ่งมีวงแหวนออกซิเจน 10 อะตอม ซีโอไลต์วาย (Zeolite Y) และมอร์ดไนท์ (Mordenite) ซึ่งมีวงแหวนออกซิเจน 12 อะตอม ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มากในกระบวนการแตกตัวของน้ำมัน โมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงโดยการตัดสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน

#### ซีโอไลต์ ZSM-5 (MFI: Mordenite Framework Inverted)

ซีโอไลต์ ZSM-5 เกิดจากหน่วยทศนิยมแบบ 5-1 สองหน่วยมาเชื่อมต่อกัน เกิดเป็นวงแหวนที่มีออกซิเจน 5 อะตอม แสดงดังรูปที่ 2.18 ก) เป็นโครงสร้างที่เรียกว่า เพนทาซิล (Pentasil) ต่อกันเป็นชั้น ชั้นของวงแหวนนี้จะเชื่อมต่อกับวงแหวนอื่นที่อยู่ด้านข้างทั้งสองข้าง เกิดเป็นวงแหวนที่มีอะตอมออกซิเจน 10 อะตอมซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะทำให้เกิดโครงสร้างขนาดใหญ่ทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่ผ่านไปได้ ดังรูปที่ 2.18 ข)



รูปที่ 2.18 ชั้นของวงแหวนออกซิเจน 5 อะตอมที่เชื่อมต่อกับชั้นของวงแหวนที่อยู่ข้างเคียง [17]

## 2.6 กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal Cracking) [18 -20]

กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนเป็นการแตกไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่เป็นโมเลกุลที่เล็กกว่าโดยใช้ความร้อน ปฏิกิริยาเป็นแบบอนุมูลอิสระ (Free Radical) เริ่มจากการแตกพันธะ C-C ในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนแบบ Homolytic Cleavage ได้อนุมูลอิสระที่จะทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) และดึงไฮโดรเจนออกจากอัลเคน เพราะอนุมูลที่เกาะที่คาร์บอนอะตอมที่ 2 เสถียรกว่าอนุมูลที่เกาะที่คาร์บอนอะตอมแรก ( $1^\circ$  Radical) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอัลเคน โมเลกุลเล็กลง และอนุมูลที่เกาะที่คาร์บอนอะตอมที่ 2 ( $2^\circ$  Radical) ดังสมการที่ (2.7)

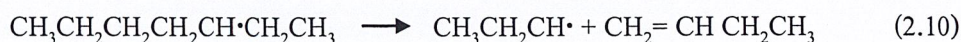
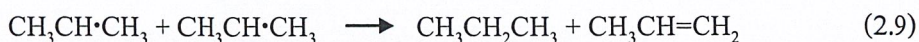


ซึ่งอนุมูลที่เกาะที่คาร์บอนอะตอมที่ 2 นี้จะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า ( $\beta$  - scission) เกิดเป็น 1-Alkene และอนุมูลที่เกาะที่คาร์บอนอะตอมแรก ดังสมการที่ (2.8)



อนุมูลที่เกาะที่คาร์บอนอะตอมแรกที่มีขนาดเล็กลงนี้จะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้าต่อเนื่องได้เอทิลีนจำนวนมากเป็นผลพลอยได้ (By Product) การแตกตัวด้วยความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อปฏิกิริยา โดยเฉพาะส่วนที่มีแชน โอลิฟินส์และไดโอะเลฟินส์ ทำให้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ทำปฏิกิริยากันเอง หากได้รับความร้อนมากเกินไปจะได้ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กในรูป  $\text{C}_2$ - $\text{C}_4$  และควบคุมปฏิกิริยาได้ยาก นอกจากนี้ในกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนจะเกิดปฏิกิริยา Disproportionation หรือเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้าเกิดเป็นอัลคีน ดังสมการที่ (2.9) และ (2.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

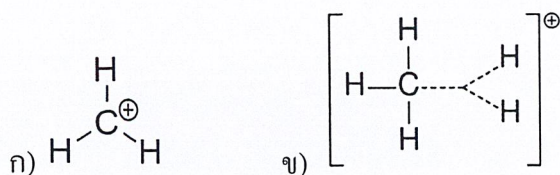


เนื่องจากอัลคีนมีค่าออกเทนสูงกว่าอัลเคน จึงเหมาะที่จะเป็นส่วนผสมสำหรับแกโซลีน (Gasoline Blending) และได้แกโซลีนที่มีคุณภาพดีกว่าแกโซลีนจากหอกลิ้น (Straight-run Gasoline) ส่วนที่เหลือจากการแตกตัวพบในลักษณะ โคล์และกากที่ไม่ค่อยอยู่ตัว มีความหนืดสูง และเกิดตะกอนได้ง่าย

## 2.7 กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Cracking) [9, 18-23]

กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง ตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้การแตกโมเลกุลเป็นไปตามที่ต้องการ คือ สามารถควบคุมและปรับแต่งให้ได้โมเลกุลที่มีรูปร่างและขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งานตามที่ต้องการ ปฏิกิริยาที่สำคัญของการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ การแตกตัวครั้งแรกของไฮโดรคาร์บอนหนักเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีช่วงจุดเดือดเป็นแกโซลีนตามที่ต้องการ สรุปได้ดังตารางที่ 2.3 ตามด้วยการแตกตัวครั้งที่ 2 ที่มากเกินไปเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ คือ แก๊สเบาและโคล์ อีกประมาณ 0.8–1 % เกาะสะสมและอุดตันตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้พื้นผิวที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาลดลง ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาจึงลดลง ดังนั้นต้องกำจัดโคล์โดยการเผาไหม้กับอากาศ เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับสภาพเดิมก่อนนำกลับมาใช้ใหม่

ขั้นตอนของการแตกตัวครั้งแรกเป็นการแตกพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนผ่านการเกิดคาร์โบแคตไอออน (Carbocation: Carbenium and Carbonium Ions) โดย Brønsted Acid Site และ Lewis Acid Site ของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่เป็นกรด (Acid Solid) เช่น  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  หรือ ซีโอไลต์ คาร์บีเนียมไอออน คือ อะตอมคาร์บอนที่มี 3 แขน (Tricoordinated Carbon Atom) และมีประจุเป็นบวก ส่วนคาร์โบเนียมไอออน คือ อะตอมคาร์บอนที่มี 5 แขน (Pentacoordinated Carbon Atom) และมีประจุเป็นบวก ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ก) คาร์บีนเนียมไอออนของมีเทน

ข) คาร์โบเนียมไอออนของมีเทน [22]

ตารางที่ 2.3 ปฏิกริยาที่สำคัญของการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกริยา [9]

ตัวทำปฏิกริยา	ปฏิกริยา	ผลิตภัณฑ์
อัลเคน (Alkane)	Cracking	Alkane + Alkene
อัลคีน (Alkene)	Cracking	LPG Alkene
	Cyclization	Naphthenes
	Isomerization	Branched Alkenes → Branched Alkane
	H Transfer	Alkanes
	Cyclization	Coke
	Condensation Dehydrogenation	
แนฟทีน (Naphthenes)	Cracking	Alkenes
	Dehydrogenation	Cycloalkenes → Dehydrogenation → Aromatics
	Isomerization	Naphthenes with Different Rings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

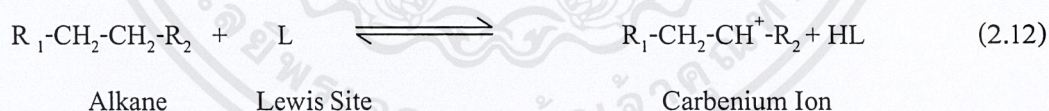
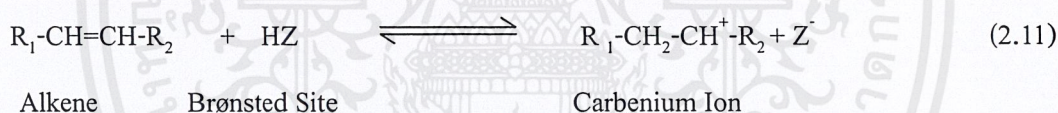
ตารางที่ 2.3 ปฏิกริยาที่สำคัญของการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกริยา [9] (ต่อ)

ตัวทำปฏิกริยา	ปฏิกริยา	ผลิตภัณฑ์
เอโรมาติกส์ (Aromatics)	Side-chain Cracking	Unsubstituted Aromatics + Alkenes
	Transalkylation	Different Alkylaromatics
	Dehydrogenation	Polyaromatics
	Condensation	Polyaromatics
		Alkylation Condensation Dehydrogenation

กลไกการเกิดปฏิกริยาที่เกิดผ่านคาร์บีนียมไอออน (Carbenium Ion) มีขั้นตอนดังนี้

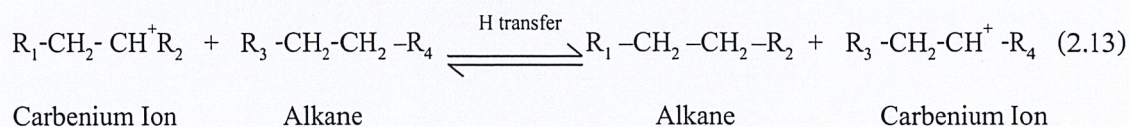
1. **ขั้นเริ่มต้น (Initiation Step)** เกิดขึ้นที่ Brønsted Site โดยการจ่ายโปรตอน (Protonation) ให้แก่อัลคีน หรือเกิดขึ้นที่ Lewis Site โดยการดึงไฮโดรเจนออกจากอัลเคน (H-abstraction) ดังสมการที่ (2.11)–(2.12)

**Initiation Step:**

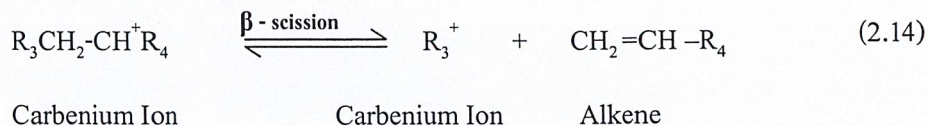


2. **ขั้นเกิดปฏิกริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (Propagation Step)** เกิดการถ่ายเทไฮโดรด์ (Hydride Transfer) และการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า ดังสมการที่ (2.13) – (2.14)

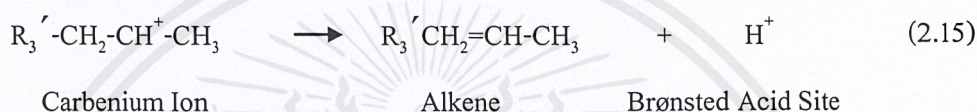
**Propagation Step (Hydride Transfer):**



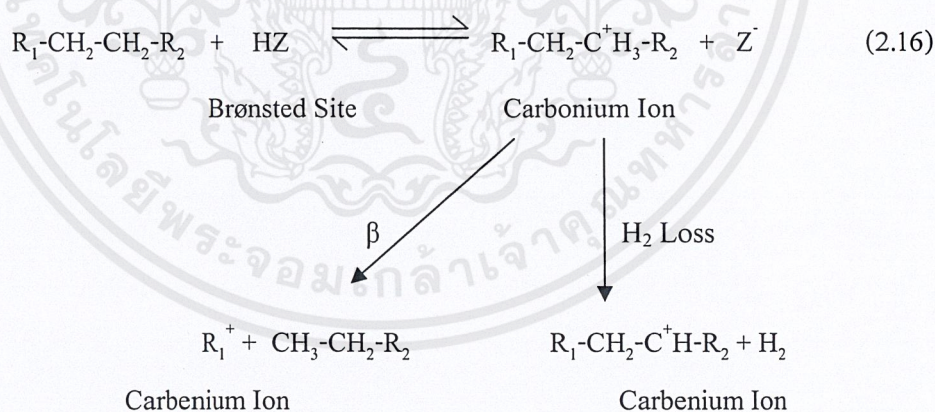
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Cracking Step ( $\beta$  - scission):**

3. **ขั้นการหยุดปฏิกิริยา (Termination Step)** เป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บีนเนียมไอออน กับ Brønsted Base เกิดเป็นอัลคีน และได้ Brønsted Acid Site กลับคืนมา ดังสมการ (2.15) หรือระหว่างคาร์บีนเนียมไอออนกับ Lewis Base เกิดเป็นอัลเคน และได้ Lewis Acid กลับคืนมา หรือระหว่างคาร์บีนเนียมไอออนกับไฮโดรคาร์บอนที่ไอออนที่เกิดจากโค้กเกิดเป็นอัลเคน

**Termination to an Olefin:**

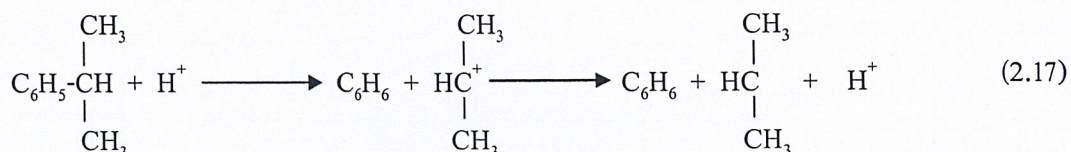
ในขั้นเริ่มต้นและขั้นการแตกตัวยังสามารถเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาของอัลคีนกับ Brønsted Acid Site ได้เป็นคาร์บีนเนียมไอออน (Carbenium Ion) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้าเกิดเป็นอัลคีนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงกับคาร์บีนเนียมไอออน หรือเกิดการดึงไฮโดรเจนออกได้เป็นคาร์บีนเนียมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังสมการที่ (2.16)



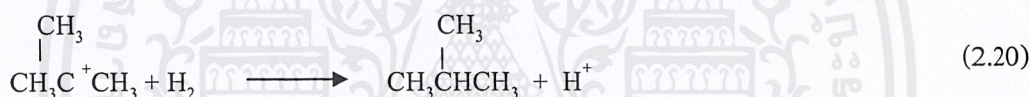
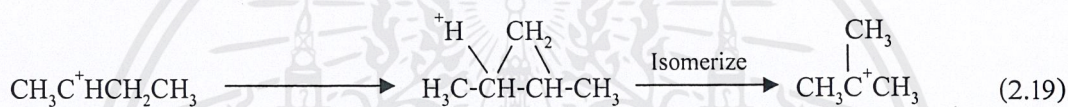
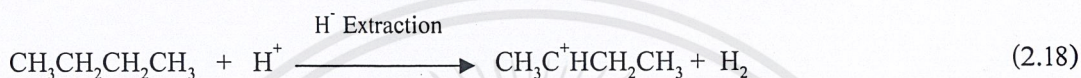
ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวครั้งแรกดังสมการที่ (2.11) - (2.16) นั้น การแตกตัวครั้งที่ 2 ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด (Acid-catalyzed Reaction) จะเกิดขึ้นด้วย เช่น ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน ปฏิกิริยาการเติมหมู่อัลคิลของเอโรมาติกส์ (Aromatics Alkylation) ปฏิกิริยาการดึงหมู่อัลคิล (Dealkylation) ปฏิกิริยาการเกิดกิ่ง (Branching) ปฏิกิริยาการต่อเป็นวง

(Cyclization) และพอลิเมอไรเซชัน สมการที่ (2.17) - (2.20) แสดงตัวอย่างกลไกการเกิดปฏิกิริยาการดึงหมู่อัลคิลและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน

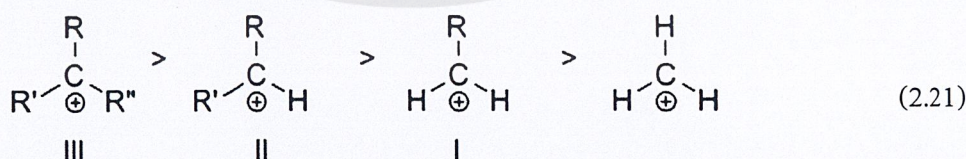
#### Acid-catalyzed Dealkylation and Alkene Formation:



#### Acid-catalyzed Isomerization:



ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของอัลเคนและอัลคีนเป็นปฏิกิริยาที่มีความสำคัญ เพราะช่วยเพิ่มค่าออกเทนให้ไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดเดือดอยู่ในช่วงของแกโซลีน โดยทำให้เกิดคาร์บีเนียมไอออนปฐมภูมิ (Primary Carbenium Ions) ซึ่งไม่เสถียรและจะเปลี่ยนรูปไปเป็นคาร์บีเนียมไอออนทุติยภูมิและตติยภูมิ (Secondary and Tertiary Carbenium Ions) ตามสมการที่ (2.18) - (2.19) ความเสถียรของคาร์บีเนียมไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นดังนี้



ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของอัลเคน หรืออัลคีนเป็นตัวอย่างของคาร์บีเนียมไอออนทุติยภูมิที่เปลี่ยนรูปไปเป็นคาร์บีเนียมไอออนตติยภูมิ ตามสมการที่ (2.19)

สำหรับการแตกโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ที่ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Oxygenates Hydrocarbon) เริ่มจากการแตกตัวด้วยความร้อนผ่านอนุมูลอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ที่มีสมบัติด้านการทนความร้อนต่ำ ได้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่มีขนาดใหญ่ เช่น กรดไขมัน คีโตน แอลดีไฮด์ และเอสเทอร์ และจะเกิดการแตกตัวอีกครั้งที่ตำแหน่งกัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้าตรงพันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน และพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอม ซึ่งสามารถเกิดได้ 2 เส้นทาง คือ

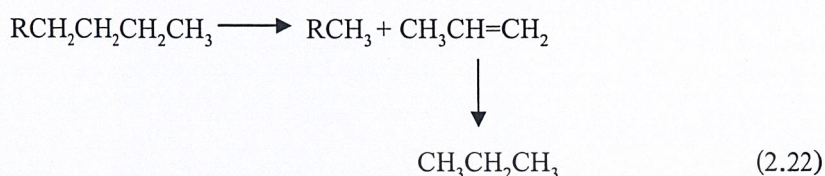
1. เกิดผ่านปฏิกิริยา Decarboxylation ( $\text{CO}_2$  Removal) และปฏิกิริยา Decarbonylation ( $\text{CO}$  Removal) ตามด้วยการแตกพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมผ่านอนุมูลอิสระ
2. การแตกพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบตามด้วยการเกิดปฏิกิริยา Decarboxylation และปฏิกิริยา Decarbonylation ได้เป็นโมเลกุลสายสั้น

การจะเกิดปฏิกิริยาในเส้นทางใดจะขึ้นอยู่กับพันธะคู่ในโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ การแตกพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ตำแหน่งเบต้า (เส้นทางที่ 2) มักเกิดในโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่ไม่อิ่มตัว ส่วนการแตกตัวผ่าน (เส้นทางที่ 1) จะเกิดกับไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่อิ่มตัว เพราะความอิ่มตัวของไฮโดรคาร์บอนจะมีผลต่อตำแหน่งเบต้าของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้จะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดด้วย เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า Hydrogen Transfer ไอโซเมโรเซชัน การต่อเป็นวงหรือแอโรมาติกส์ และปฏิกิริยาพอลิเมโรเซชัน ซึ่งจะทำให้เกิดโค้ก ซึ่งเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอน

## 2.8 กระบวนการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking) [9, 19, 23-24]

กระบวนการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม เป็นกระบวนการที่ใช้เปลี่ยนน้ำมันหนักให้เป็นน้ำมันเบาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในภาวะความดันและอุณหภูมิสูง และใช้แก๊สไฮโดรเจนป้องกันการเกิดโอเลฟินส์มากเกินไป ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ เป็นประเภท Dual Function ที่ทำหน้าที่ 2 อย่าง คือ แตกพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนด้วยซีโอไลต์ซึ่งประกอบด้วยซิลิกา-อะลูมินา และช่วยเติมไฮโดรเจนซึ่งเกิดขึ้นบริเวณที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตำแหน่งกัมมันต์ โลหะที่ใช้เป็นพวกแร่หายาก (Rare Earth) ที่นิยมใช้ คือ แพลตินัม แพลลาเดียม ทังสเตน และนิกเกิล พื้นฐาน

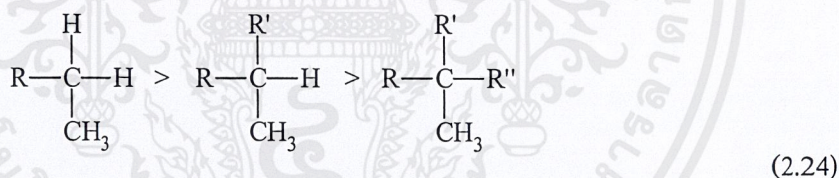
ของปฏิกิริยาขั้นแรกเหมือนกับกระบวนการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ปฏิกิริยาขั้นที่สองบางปฏิกิริยาถูกยับยั้งโดยไฮโดรเจน ไฮโดรเจนจะทำให้ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวโดยการแตกพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนแล้วเติมไฮโดรเจนเข้าไปแทน ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาการลดขนาดโมเลกุลและเติมไฮโดรเจนเข้าไปในโมเลกุลของโอเลฟินส์ แสดงดังสมการที่ (2.22)



ในกรณีของการเติมไฮโดรเจนในพาราฟินที่เป็นโซ่กิ่งจะเกิดปฏิกิริยาการดึงมีเทนออก (Demethanation)



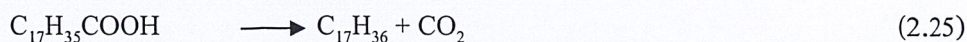
หมู่เมทิลที่เกาะที่คาร์บอนทุติยภูมิ (Secondary Carbon) สามารถแตกออกง่ายกว่าคาร์บอนตติยภูมิ (Tertiary Carbon) ในขณะที่กลุ่มเมทิลที่เกาะที่คาร์บอนจตุรภูมิ (Quaternary Carbon) จะทนต่อการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมที่สุด



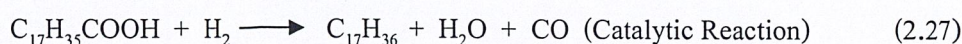
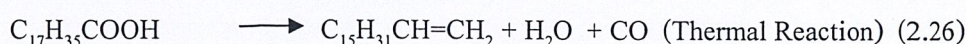
โดย R, R' และ R'' คือ หมู่อัลคิล

สำหรับการแตกครั้งที่ 2 ของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในกระบวนการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นไฮโดรคาร์บอน แสดงด้วยตัวอย่างของการแตกโมเลกุลของกรดไขมัน ซึ่งในตัวอย่างคือกรด สเตียริก มี 3 วิธี แสดงดังสมการที่ (2.25) – (2.28) ดังนี้

### 1. Decarboxylation (CO<sub>2</sub> Removal):

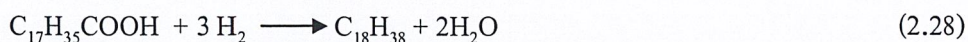


### 2. Decarbonylation (CO Removal):



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. Hydrodeoxygenation (Reduction):



## 2.9 แนฟทา (Naphtha) [25 - 29]

Full Range Naphtha คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนผสม ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอน 5-12 อะตอม น้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 100-215 กรัมต่อโมล ความถ่วงจำเพาะ 0.75-0.785 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความดันไอน้อยกว่า 5 ทอร์ (5 มิลลิเมตรปรอท) ประกอบด้วย ไฮโดรคาร์บอนประเภท พาราฟิน แนฟทีน และเอโรแมติก มี Initial Boiling Point (IBP) ประมาณ 35 °C และ Final Boiling Point (FBP) ประมาณ 200 °C เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีราคาสูง ชนิดของแนฟทาแบ่งตามความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร หรือ ความถ่วงจำเพาะ) และ PIONA Analysis ในรูปของร้อยละโดยปริมาตรขององค์ประกอบคือพาราฟิน ไอโซพาราฟิน โอลิฟินส์ แนฟทีน และเอโรแมติก ดังนี้

1. พาราฟินิกแนฟทา หรือแนฟทาเบา (Paraffinic Naphtha or Light Naphtha) มี IBP ประมาณ 30 °C และ FBP ประมาณ 90 °C มีอะตอมคาร์บอนในโมเลกุลน้อยกว่า 6 อะตอม โดยมีพาราฟินเป็นส่วนใหญ่ จึงมักเรียกแนฟทาชนิดนี้ว่า Straight-run Gasoline เหมาะสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบผลิต โอลิฟินส์ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีด้วย Steam Crackers แนฟทาและไอน้ำจะถูกให้ความร้อนโดยไม่มีออกซิเจนหรืออากาศจนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนแตกสลาย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวนี้ คือ แก๊ส โอลิฟินส์ (เอทิลีน โพรพิลีน และบิวตะไดอิน) ที่เป็นวัตถุดิบผลิตพลาสติก เช่น โพลีเอทิลีน โพลีโพรพิลีน เป็นต้น หรือสำหรับเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมี เช่น ผลิตไกลคอล
2. แนฟทาหนัก (Heavy Naphtha) มี IBP ประมาณ 90 °C และ FBP ประมาณ 200 °C มีอะตอมคาร์บอนในโมเลกุล 6-12 อะตอม โดยมีแนฟทีนและ เอโรแมติกเป็นส่วนใหญ่ จึงมักเรียกแนฟทาชนิดนี้ว่า Straight Run Benzene ใช้สำหรับผลิตสารเอโรแมติกส์ และรีฟอร์มเมต โดยการจัดรูปโมเลกุลใหม่เพื่อเพิ่มค่าออกเทน ใช้เป็นส่วนผสมของแกโซลีนด้วยกระบวนการ Catalytic Reforming รวมทั้งเป็นวัตถุดิบในการผลิต Polyethylene Terphthalate (PET) และตัวทำละลายในสารอินทรีย์ เช่น ไขมัน ยาง และใช้ทำสี น้ำมันขัดเงา (Varnish) นอกจากนี้แนฟทาสามารถใช้ในการผลิตน้ำมันเบนซินรถยนต์ (Motor Gasoline) โดยน้ำมันเบนซินหรือแกโซลีนเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงส่วนที่เบาที่สุด มีช่วงจุดเดือดเหมือน Full Range Naphtha น้ำมันเบนซินมี 2 ประเภท คือ น้ำมันเบนซินอากาศยาน

(Aviation Gasoline) และน้ำมันเบนซินรถยนต์ น้ำมันเบนซินอากาศยานมีค่าออกเทนสูง กว่าน้ำมันเบนซินรถยนต์มาก

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**มารีนา มงคล [2]** ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 โดยศึกษาผลของตัวแปรต่อร้อยละผลได้ (% Yield) ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น พบว่าเมื่อใช้ HZSM-5 0.05 กรัม เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ ได้ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 83.60 ซึ่งประกอบด้วย แนฟทา 26.75 เคโรซีน 13.79 แก๊สออยล์เบา 22.99 แก๊สออยล์หนัก 3.76 และกากน้ำมันหนัก 16.30 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการทดลองโดยไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ภาวะดังกล่าว เปรียบเทียบกับกรณีที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้อัตราผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวลดลง ร้อยละผลได้ของแก๊สเพิ่มขึ้น และมีการกระจายตัวของสัดส่วนเชื้อเพลิงเหลวที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก คือ แนฟทา และเคโรซีน เพิ่มขึ้น

**Raphael O. Idem et al. [30]** ศึกษาผลของสภาพกรด (Acidity) ความเป็นเบส และความเลือกจำเพาะต่อรูปร่าง (Shape Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5, Silicalite, ซิลิกา-อะลูมินา แกมมา-อะลูมินา ( $\gamma$ -Alumina) แคลเซียมออกไซด์ และ แมกนีเซียมออกไซด์ ต่อการเปลี่ยนน้ำมันคาโนลา (Canola Oil) เป็นเชื้อเพลิงเหลว และการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ พบว่าตอนเริ่มต้นน้ำมันคาโนลาของจะแตกตัวได้ไฮโดรคาร์บอนสายยาว และไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวเร่ง แต่การแตกตัวครั้งที่ 2 (Secondary Cracking) จะแตกโมเลกุลใหญ่เป็นโมเลกุลเล็กเพิ่มขึ้น (แก๊สหรือของเหลว) ตามการมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (เป็นอสัณฐาน) และไม่เลือกจำเพาะต่อรูปร่างของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (ซิลิกา-อะลูมินา แกมมา-อะลูมินา และซิลิกา) สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5, Silicalite มีความเลือกจำเพาะต่อรูปร่างสูง การแตกตัวครั้งที่ 2 เกิดไม่รุนแรง จึงได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวมากและเกิดแก๊สน้อย ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตำแหน่งกัมมันต์เป็นเบส ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ จะขัดขวางการแตกตัวครั้งที่ 2 ทำให้ได้กากน้ำมันมากและเกิดแก๊สน้อย

**Farouq A. Twaiq et al. [31]** ศึกษาผลของสภาพกรดและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (Fixed Bed Microreactor) ต่อร้อยละของการเปลี่ยนน้ำมันปาล์มเป็นเชื้อเพลิงเหลว และค่าการเลือกเกิด (Selectivity) แอโรแมติกและแกโซลีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ซีโอไลต์ที่มีขนาดรูพรุนต่างกัน ได้แก่ HZSM-5 ซีโอไลต์ เบต้า และ Ultrastable Y (USY) Zeolite ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไฮบริด (Hybrid Catalyst) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ให้ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง (% Conversion) ไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวสูงสุด คือ ร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก และผลได้ของแกโซลีนร้อยละ 28 ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารตั้งต้น 1 ชม.<sup>-1</sup>

**Yean-Sang Ooi et al. [32]** ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยใช้ซีโอไลต์ เบต้า (Zeolite Beta) ผสมกับ MCM-41 (MCM-41/Beta Composite) ซึ่งมีรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous Material) MCM-41 จะช่วยพัฒนาสมบัติด้านการทนความร้อน (Thermal and Hydrothermal Stability) แต่มีความว่องไว (Activity) ไม่สูงเท่าวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous Material) พบว่าน้ำมันปาล์มใช้แล้วเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้สูงสุดร้อยละ 87.6 ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารตั้งต้น 3.30 ชม.<sup>-1</sup> (Weight Hourly Space Velocities: WHSV) และมีค่าการเลือกเกิดแกโซลีนและโอเลฟินส์สูง

**Yean-Sang Ooi et al. [33]** ศึกษาการแตกตัวของกากของกรดไขมันจากน้ำมันปาล์ม (Palm Oil Based Fatty Acids Mixture: FAM) เป็นเชื้อเพลิงเหลว ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ความดันบรรยากาศ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของกรดไขมันต่อตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการป้อนสารตั้งต้นต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว พบว่าได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีแกโซลีนสูงร้อยละ 44.4 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของกรดไขมันต่อตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 9.64 และอัตราการป้อนสารตั้งต้น 3.66 ชม.<sup>-1</sup>

**Witchakorn C. et al. [34]** ศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซัลเฟตเซอร์โคเนีย 0.2 กรัมในน้ำมันพืชใช้แล้ว 20 กรัม ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก พบว่าได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีแกโซลีนร้อยละ 24.38 โดยน้ำหนัก ร้อยละของแก๊สไฮโดรคาร์บอน 19.07 และของแข็ง 0.65 ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ และที่สภาวะเดียวกันนี้ได้เคโรซีนร้อยละ 11.98 แก๊สออกซิเจน 24.35 แก๊สออกไซด์ 5.70 กากน้ำมันหนัก 13.86

**Stella Bezergianni et al. [35]** ศึกษากระบวนการแตกตัวของน้ำมันพืชและน้ำมันพืชที่ใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วม เพื่อเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ และคุณภาพของน้ำมันพืชและน้ำมันพืชใช้แล้ว ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดหยุดนิ่ง (Fix Bed Reactor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดัน 2,000 psig อัตราการป้อนสารตั้งต้น 1.5 ช.ม.<sup>1</sup> อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมันพืช 6,000 ลูกบาศก์ฟุตตามมาตรฐานต่อบาร์เรล (scfb) ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 350, 370 และ 390 องศาเซลเซียส พบว่าทั้งน้ำมันพืชและน้ำมันพืชที่ใช้แล้วได้ร้อยละผลได้ของดีเซลเป็นส่วนใหญ่ เคโรซีนและแกโซลีนเล็กน้อย โดยค่าการเลือกเกิดของดีเซลจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ น้ำมันพืชใช้แล้วจะมีค่าการเลือกเกิดของเคโรซีนและแกโซลีนสูงกว่าน้ำมันพืชที่ยังไม่ใช้ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เพราะน้ำมันพืชใช้แล้วมีโมเลกุลที่มีความเป็นขั้วสูง ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการความว่องไวในการแตกตัว และ น้ำมันพืชที่ยังไม่ได้ใช้จะให้ร้อยละผลได้ของดีเซลสูงกว่าน้ำมันพืชใช้แล้วที่ทุกอุณหภูมิ เนื่องจากน้ำมันพืชที่ยังไม่ได้ใช้มีโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวมากกว่า ทำให้มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำมันพืชใช้แล้ว โมเลกุลขนาดใหญ่ที่สามารถเกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กจึงมีน้อยกว่าน้ำมันพืชใช้แล้ว การแตกตัวน้ำมันพืชที่ยังไม่ได้ใช้ให้เป็นแกโซลีนและเคโรซีน ต้องใช้อุณหภูมิสูง (390 องศาเซลเซียส) น้ำมันพืชที่ยังไม่ใช้จึงมีค่าการเลือกเกิดของเคโรซีนและแกโซลีนสูงขึ้น

**รวีวรรณ สวัสดิ์รักษา. [36]** ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยมีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบหม้อหนึ่งอัด ไอ (Autoclave Reactor) ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนคงที่ 6.89 บาร์ โดยศึกษาผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันสบู่ดำเวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว พบว่าภาวะที่ทำให้ได้ร้อยละผลได้ของแกโซลีนสูงสุด คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันสบู่ดำ 6.35 เวลาในการทำปฏิกิริยา 56 นาที และอุณหภูมิ 426 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละโดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลวและแกโซลีน 58.62 และ 40.60 ตามลำดับ

**เสาวลักษณ์ โมลิกมาศ. [37]** ศึกษาการแตกตัวของกลีเซอรอลเหลือทิ้งเป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ทำงานแบบกะ ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 6.89 บาร์ โดยศึกษาผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อกลีเซอรอลเหลือทิ้ง เวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิ ต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวและองค์ประกอบที่เป็นแกโซลีน พบว่าภาวะที่ทำให้ได้ร้อยละผลได้ของแกโซลีนสูงสุด คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.25 เวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลว 71.07 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีร้อยละผลได้ของแกโซลีน 22.81 เคโรซีน 15.99 แก๊สออกไซด์เบา 23.88 แก๊สออกไซด์ 1.92 และกาน้ำมัน 6.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Rogelio Sotelo-Boyas. et al. [23]** ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันเมล็ดเรพ (Rapeseed Oil) เป็นน้ำมันดีเซล ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำหน้าที่ 2 อย่าง ได้แก่ แพลตินัมบนซีโอไลต์ H-Y (Pt/H-Y) แพลตินัมบนซีโอไลต์ HZSM-5 (Pt/HZSM-5) และนิกเกิลโมลิบดีนัมซัลไฟด์บนแกมมา-อลูมินา ออกไซด์ (Sulfided NiMo/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น และความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ ร้อยละผลได้ของดีเซล พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 350-400 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 8-10 MPa นิกเกิลโมลิบดีนัมซัลไฟด์บนแกมมา-อลูมินา ออกไซด์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นดีเซลที่สูงที่สุดและใช้อุณหภูมิต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นซีโอไลต์ ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นซีโอไลต์ทั้ง 2 ชนิด ให้ผลิตภัณฑ์ทั้งที่เป็นดีเซลและแก๊สลิแกนด์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นซีโอไลต์มีความเป็นกรดสูงกว่า จึงควรให้ความเป็นกรดอยู่ในระดับที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้ไอโซพาราฟินที่จะทำให้เกิดดีเซลที่มีคุณภาพดี คือ มีจุดไหลเทต่ำและเกิดการแตกตัวที่ไม่รุนแรง เพราะความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นซีโอไลต์จะทำให้เกิดไอโซพาราฟิน

## บทที่ 3

# เครื่องมือและวิธีการทดลอง

### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

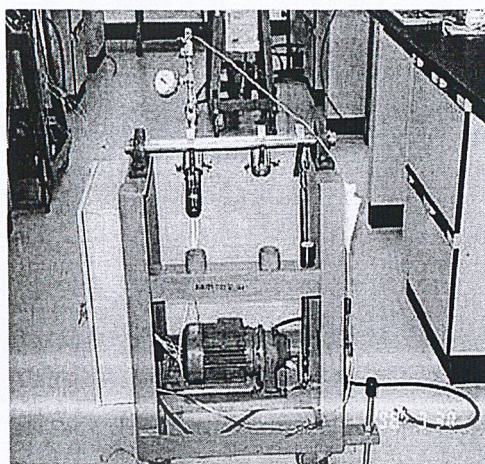
1. เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (Micro Batch Reactor) ทรงกระบอก ปริมาตร 70 มิลลิลิตร ด้านบนมีชุดฝาปิด ชุดอุปกรณ์สำหรับอัดแก๊ส วาล์วนิรภัย และชุดสำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิล ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ทำงานแบบกะ

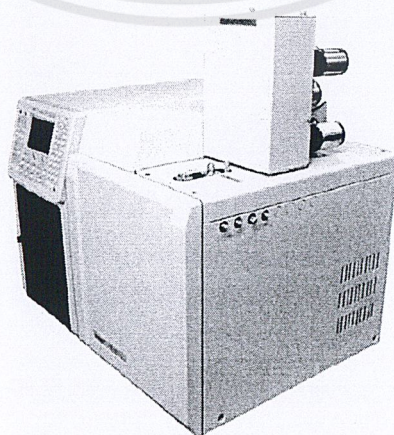
2. ชุดควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ (Temperature Controller) ควบคุมอุณหภูมิได้ในระดับ  $\pm 10$  องศาเซลเซียส
3. ขดลวดความร้อนแรงดัน 230 โวลต์ ขนาด 400 วัตต์ อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที
4. เทอร์โมคัปเปิล แบบเค (K Type) สำหรับวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างทำการทดลอง
5. ชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ ขับเคลื่อนแกนหมุนให้เครื่องปฏิกรณ์แกว่ง โดยปรับความเร็วรอบของการแกว่งเครื่องปฏิกรณ์ ในการทดลองเป็น 50 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์

6. ชุดกรองสุญญากาศ และกระดาษกรอง สำหรับแยกส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็ง
7. เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียดทศนิยม 2 และ 4 ตำแหน่ง
8. นาฬิกาจับเวลา
9. ตู้อบ
10. เครื่องแก้ว เช่น บีกเกอร์ ขวดใส่สารตัวอย่าง หลอดทดลองสำหรับหมุนเหวี่ยง
11. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น ยี่ห้อ Variant รุ่น CP-3800 ดังรูปที่ 3.3 สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ประเภทปิโตรเลียม ตามมาตรฐาน ASTM D 2887 และ ASTM D 2887-D86 ด้วยตัวตรวจหาแบบ FID (Flame Ionization Detector) ใช้คอลัมน์หลอดแก้วเล็ก (Capillary Glass Column)



รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

1. น้ำมันพืชใช้แล้ว
2. ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5
3. แก๊สไฮโดรเจนความบริสุทธิ์ ร้อยละ 99.99
4. โทลูอีนความบริสุทธิ์ ร้อยละ 99

### 3.3 วิธีการทดลอง

1. วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้ว
2. วิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ได้แก่ พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ย ด้วยวิธี Brunauer, Emmett, Teller (BET Method) และธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)
3. ออกแบบการทดลอง ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 และ 60 นาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380 และ 440 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อน้ำมันพืชใช้แล้วร้อยละ 0.5 และ 2.0 (0.1 และ 0.4 กรัม ต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 20 กรัม)

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปร	สัญลักษณ์	หน่วย	ระดับต่ำ	ระดับสูง
เวลา	A	min	30	60
อุณหภูมิ	B	°C	380	430
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	C	g	0.1	0.4
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว	C	% wt	0.5	2.0

4. ขั้นตอนการทดลองการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้ว
  - 4.1 กรองของแข็งออกจากน้ำมันพืชใช้แล้ว
  - 4.2 ชั่งน้ำมันพืชใช้แล้วน้ำหนัก 20 กรัมและตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ตามอัตราส่วนที่กำหนดใส่ในเครื่องปฏิกรณ์

- 4.3 ผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้าเครื่องปฏิกรณ์เพื่อไล่อากาศออก แล้วอัดแก๊สไฮโดรเจน ความดัน 1 บาร์เกจ ตรวจสอบรอยรั่วของแก๊สโดยใช้น้ำสบู่ฉีดตามรอยต่อ
- 4.4 ต่อเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ ขดลวดความร้อน และเทอร์โมคัปเปิล
- 4.5 เปิดชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ ตั้งอุณหภูมิ และเริ่มจับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่กำหนด เมื่อครบเวลา ถอดขดลวดความร้อน ออก รอกอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ลดลงจนถึงอุณหภูมิห้องเพื่อป้องกันผลที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) และการกลายเป็นของแข็งของกาน้ำมัน ปล่อยให้แก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ออก จากนั้นนำเครื่องปฏิกรณ์ไปชั่งน้ำหนัก
- 4.6 กรองผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยอุปกรณ์การกรองแบบสุญญากาศ เพื่อแยกส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวออกจากของแข็ง นำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้มาเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนที่เจือปนออก ละลายด้วย  $CS_2$  ในอัตราส่วน 1 ต่อ 100 โดยปริมาตร เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบและการกระจายตัวขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามคาบจุดเดือด

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ทำงานแบบกะ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้ว เวลา และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดร้อยละของผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลวและแก๊สอินทรีย์มากที่สุด การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้ว สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 แสดงในหัวข้อที่ 4.1

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น

4.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้ว วิเคราะห์ตามจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ พร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatograph)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วก่อนการแตกตัว

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)
แนฟทา (Naphtha)	9.95
เคโรซีน (Kerosene)	0.20
แก๊สออยล์เบา (Light Gas Oils)	2.71
แก๊สออยล์หนัก (Heavy Gas Oils)	0.30
กากน้ำมัน (Long Residue)	86.83

จากตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำมันพืชใช้แล้วมีกากน้ำมันสูงถึงร้อยละ 86.83 ซึ่งไม่มีสมบัติที่เหมาะสมจะนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง

#### 4.1.2 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

ตารางที่ 4.2 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

พื้นที่ผิวรูพรุน (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)
421.78	0.48	46.01

ตารางที่ 4.3 ธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

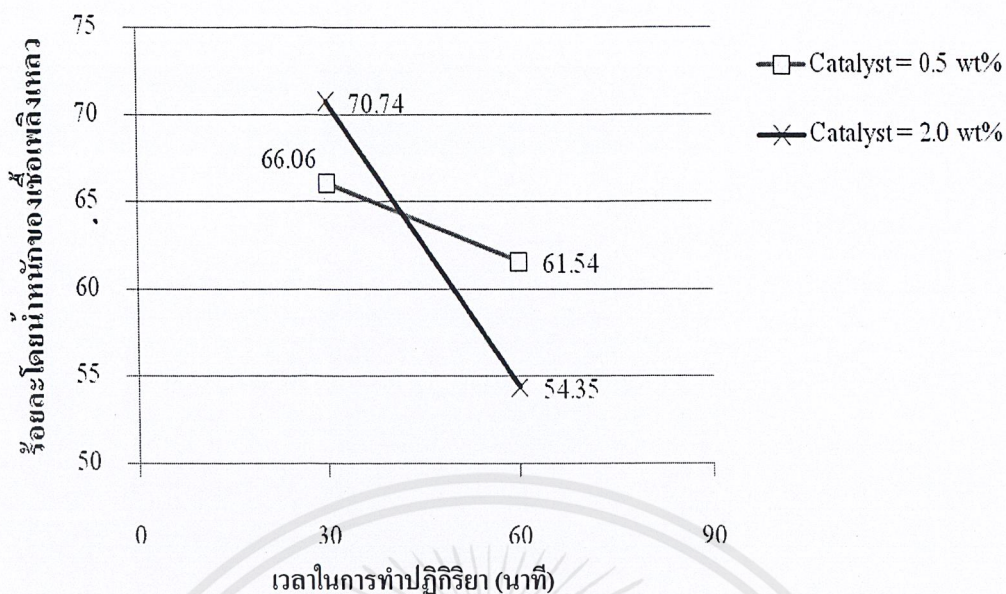
ธาตุ (Element)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)
Si	80.1304
Al	4.3415
Ca	11.7774
Fe	3.7507

จากตารางที่ 4.3 อัตราส่วน Si/Al ของตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ 18

## 4.2 การแตกตัวของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

### 4.2.1 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลว

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแตกตัวน้ำมันพืชด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาหลายชนิด [2, 32-34, 36-37] พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเปลี่ยนน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วย HZSM-5 คือ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส งานวิจัยนี้จึงเริ่มต้นศึกษาผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 0.5 และ 2 wt% ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.5 และ 2 wt% ร้อยละของผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลวเพิ่มขึ้นจาก 66.06 เป็น 70.74 เพราะ HZSM-5 ช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่พวกกาน้ำมัน (Long Residue) ให้เกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนเชื้อเพลิงเหลวที่มีขนาดเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 4.1

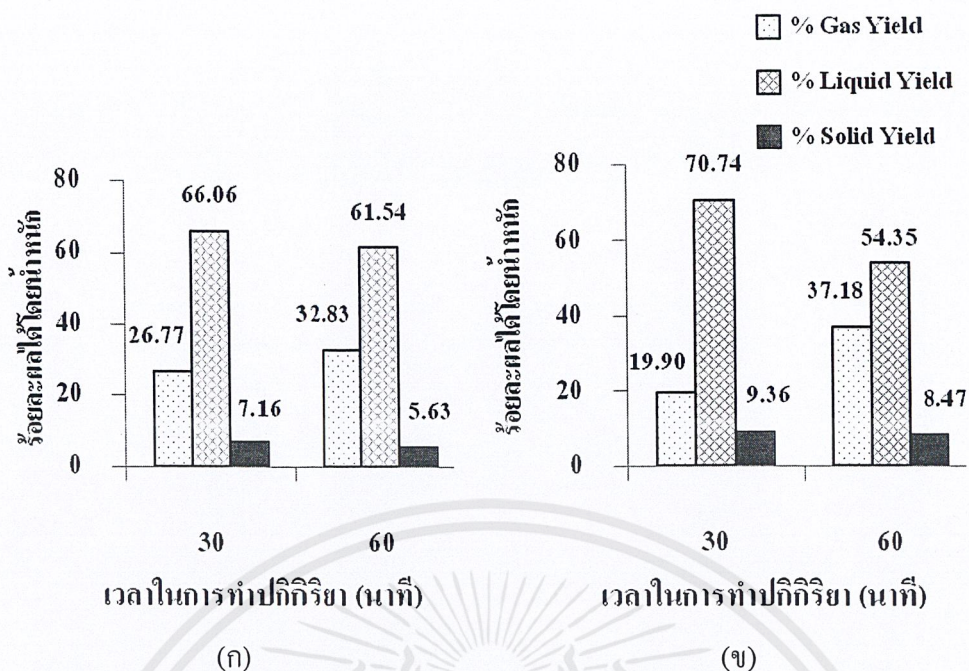


รูปที่ 4.1 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยนำหนักของเชื้อเพลิงเหลว ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 และ 60 นาที อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส

เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มจาก 30 เป็น 60 นาที ร้อยละของผลได้โดยนำหนักของเชื้อเพลิงเหลวจะลดลง พบว่าที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 2 wt% ร้อยละของผลได้โดยนำหนักของเชื้อเพลิงเหลวมีอัตราการลดลงมากกว่าที่ 0.5 wt% เนื่องจากทั้งอุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากกว่า และเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวประเภทเชื้อเพลิงเหลวแตกตัวไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กประเภทแก๊สไฮโดรคาร์บอน และยืนยันได้จากกราฟแสดงผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว แก๊สไฮโดรคาร์บอน และของแข็ง ในรูปที่ 4.2 ก) และ ข)

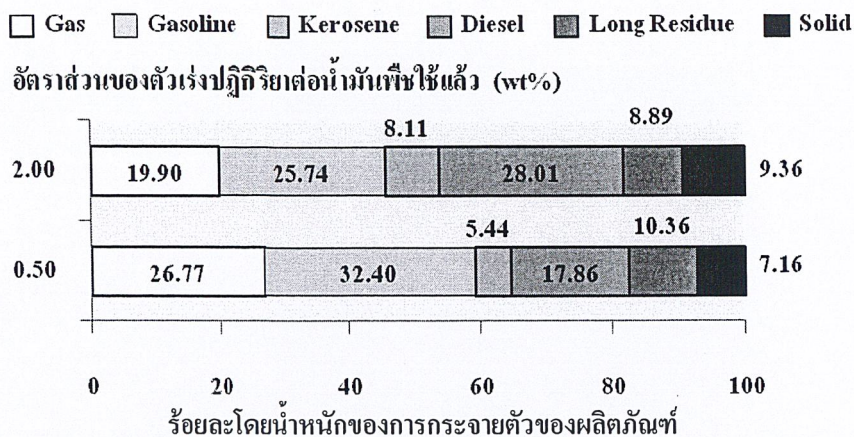
จากรูปที่ 4.2 ก) และ ข) เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 60 นาที เมื่อใช้อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 2 wt% ปริมาณผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวลดลงอย่างชัดเจนกว่ากรณีที่ใช้อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% ในการเพิ่มอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา การแตกตัวครั้งที่ 2 ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด (Acid-catalyzed Reaction) จะเกิดขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเปลี่ยนเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น [9]

แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงเหลวเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ดังนั้นจึงได้พิจารณาใช้อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% ในการทดสอบผลของเวลาและอุณหภูมิต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วต่อไป

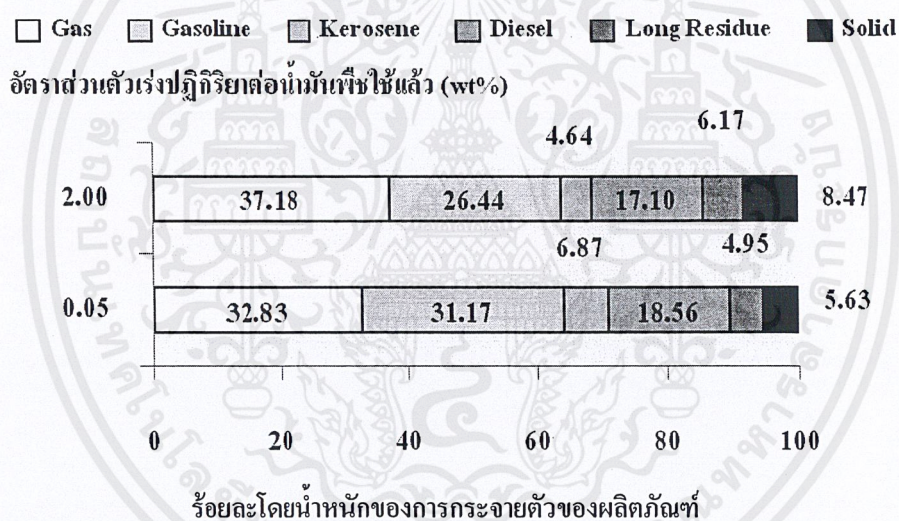


รูปที่ 4.2 ก) ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลวที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส  
 ข) ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลวที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 2 wt% อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส

อย่างไรก็ดีเมื่อเปรียบเทียบร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ในเชื้อเพลิงเหลวที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 และ 60 นาที และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 และ 2 wt% ในรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าร้อยละของผลได้โดยน้ำหนักของแก๊สในกรณีที่ใช้อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% สูงกว่าเมื่อใช้อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 2 wt%



รูปที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์  
ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส

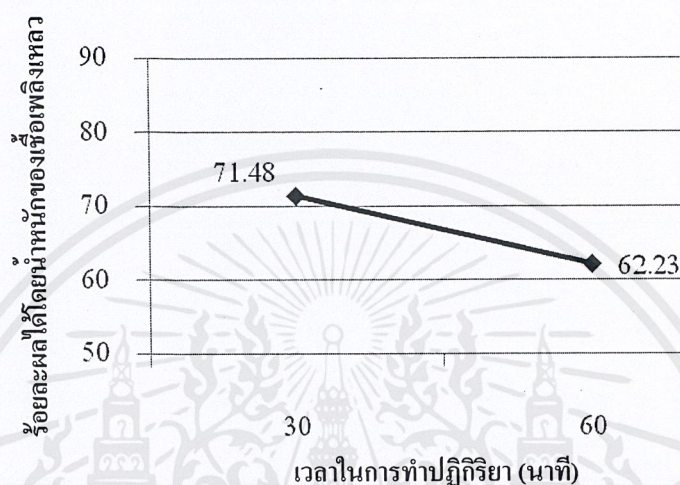


รูปที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์  
ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส

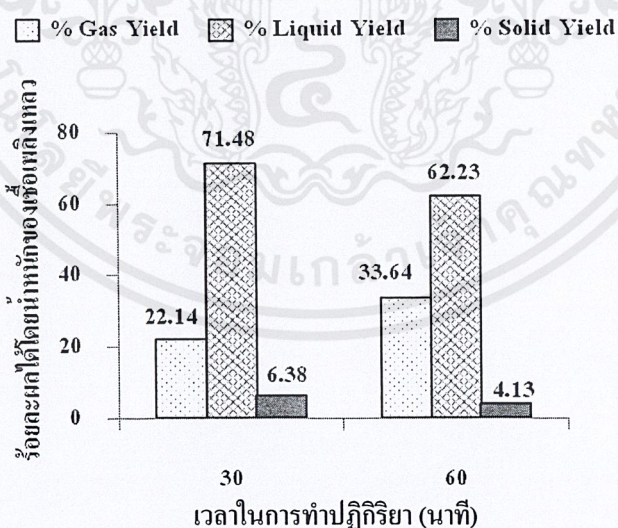
#### 4.2.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลว

เนื่องจากร้อยละของผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลวที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 2 wt% อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที มีอัตราการลดลงและเปลี่ยนเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนสูง และที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% ทั้งเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 และ 60 นาที ได้ร้อยละของผลได้โดยน้ำหนักของแก๊สใกล้เคียงกันประมาณ 31-32 จึงทดสอบและแสดงผลการแตกตัวของน้ำมันพืช เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผสมที่ใช้แล้วที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 30 เป็น 60 นาที ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวลดลงจาก 71.48 เป็น 62.23 (มีแนวโน้มที่ลดลง เช่นเดียวกันแต่อัตราการลดลงน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส) จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าที่เวลา 30 นาที เกิดผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวมากกว่า และเกิดไฮโดรคาร์บอนน้อยกว่าที่เวลา 60 นาที



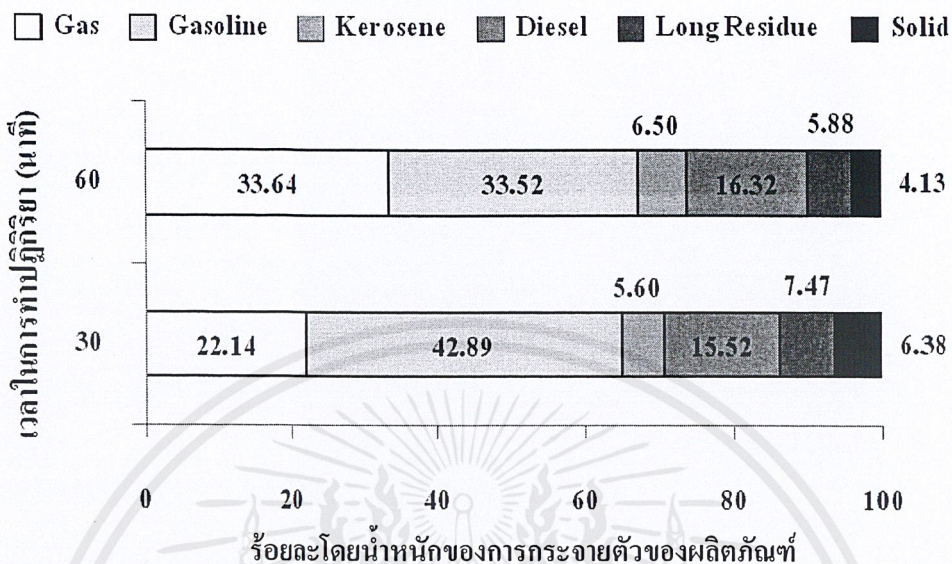
รูปที่ 4.5 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลวที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลวที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของแกโซลีนในรูปที่ 4.7 พบว่าที่เวลา 30 นาที สูงกว่าที่เวลา 60 นาที สรุปว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ 30 นาที

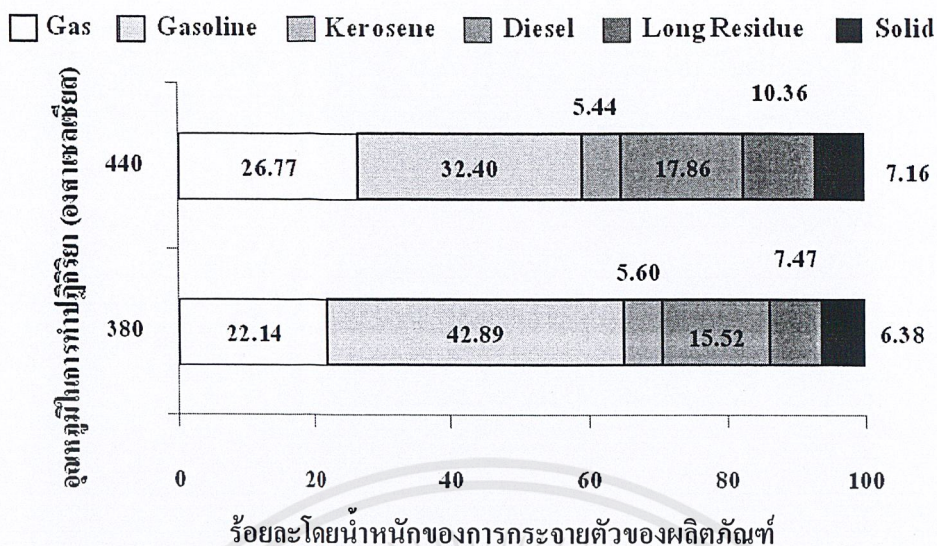


รูปที่ 4.7 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส

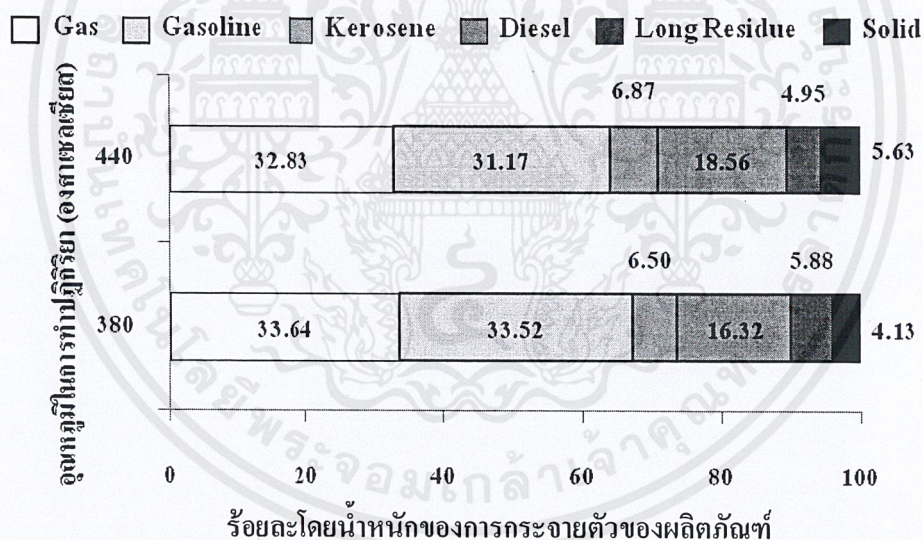
#### 4.2.3 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลว

พิจารณาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380 และ 440 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 และ 60 นาที เปรียบเทียบร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้เท่ากับ 71.48 และมีองค์ประกอบเป็นแกโซลีนมากกว่าการแตกตัวของอุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ค่าร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของแกโซลีนสูงสุดที่ 42.89

ที่อุณหภูมิสูง (440 องศาเซลเซียส) การแตกตัวด้วยความร้อนจะเกิดเร็วกว่าการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนสายยาวเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนและดึง CO<sub>2</sub> ออกจากไตรกลีเซอไรด์ของโมเลกุลของน้ำมันได้เป็นไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในช่วงของเคโรซีนและแก๊สออยล์ ในขณะที่เดียวกันเนื่องจากมีตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการถ่ายเทโปรตอนและเร่งการแตกตัวให้ได้ไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลเล็กลง ทำให้ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของแกโซลีนลดลง [34]



รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์  
ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์  
ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบการกระจายตัวขององค์ประกอบในน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้ว ก่อนเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว และเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ภาวะซึ่งได้ร้อยละของผลได้ของแก๊สไฮโดรคาร์บอนสูงสุด คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้ว 0.5 wt% เวลา 30 นาที และอุณหภูมิในการ

ทำปฏิกิริยา 380 องศาเซลเซียส พบว่าหลังการแตกตัวขององค์ประกอบที่เป็นกากน้ำมันลดลง จาก 86.83 wt% เหลือ 7.47 โดยแตกตัวเป็นองค์ประกอบที่มีโมเลกุลขนาดเล็กเพิ่มขึ้น และมีแก๊สอินซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ต้องการมาก ร้อยละ 42.89 ตารางที่ 4.5 แสดงร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวและแก๊สอินจากภาวะการทดลองต่างๆ ที่ได้จากงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบองค์ประกอบของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วก่อนการแตกตัวกับเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการแตกตัว

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)	
	ก่อนการแตกตัว	หลังการแตกตัว
แก๊สอิน (Gasoline)	9.95	42.89
เคโรซีน (Kerosene)	0.20	5.60
แก๊สออยล์เบา (Light Gas Oils)	2.71	14.80
แก๊สออยล์หนัก (Heavy Gas Oils)	0.30	0.72
กากน้ำมัน (Long Residue)	86.83	7.47

ตารางที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

การทดลอง	อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	ร้อยละผลได้	
				เชื้อเพลิงเหลว	แก๊สอิน
1	0.5	30	380	71.48	42.89
2	0.5	30	440	66.06	32.40
3	0.5	60	380	62.23	33.52
4	0.5	60	440	61.55	31.17
5	2.0	30	440	70.74	25.74
6	2.0	60	440	54.35	26.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบผลงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นที่ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 สามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชได้ดี เพราะ HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด มีความเลือกจำเพาะต่อรูปร่างและขนาด ให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงเช่นเดียวกับการแตกกากของกรดไขมันจากน้ำมันปาล์มจากงานวิจัยของ Yean-Sang Ooi [33] และเมื่อเทียบกับมารีนา มงคล [2] ซึ่งเป็นงานที่ใกล้เคียงกันมาก และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 เช่นกัน แม้ว่าในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่างานของมารีนา 2 เท่า แต่ใช้เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ำกว่า ใด้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวน้อยกว่า แต่มีร้อยละผลได้ของแกโซลีนและค่าการแปลงผันของการเกิดเชื้อเพลิงเหลวสูงกว่า สำหรับงานวิจัยของ Farouq A. Twaiq et al. [31] ที่ใช้ซีโอไลต์ เบต้าซึ่งมีพื้นที่ผิวรูพรุนมากประมาณ 2 เท่าของ HZSM-5 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะเกิดการแตกตัวสูง และใด้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวน้อย ประมาณ 41.4 ร้อยละผลได้ของแกโซลีนเพียง 16.1 ส่วนที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา MCM-41 ใด้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวน้อย คือ 41.4 และร้อยละของผลได้ของแกโซลีน 30.3 เพราะ MCM-41 มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาต่ำ [31]

ตารางที่ 4. 6 เปรียบเทียบการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วกับงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

การทดลอง	Farouq A. Twaiq et al. [31]		Year-Sang Ooi [33]	Witchakorn [34]	มารีนา มงคล [2]	งานวิจัยนี้
สารตั้งต้น	น้ำมันปาล์ม		กากของกรดไขมันจากน้ำมันปาล์ม	น้ำมันพืชใช้แล้ว	น้ำมันพืชใช้แล้ว	น้ำมันพืชผสมที่ใส่แล้ว
เครื่องปฏิกรณ์	แบบเบดนิ่ง		แบบกะ	แบบกะ	แบบกะ	แบบกะ
ตัวเร่งปฏิกิริยา	MCM-41	ซีโอไลต์ เบต้า	HZSM-5	ซัลเฟตเซอร์โคเนีย	HZSM-5	HZSM-5
พื้นที่ผิวพรุน (m <sup>2</sup> /g)	454	964	430	133	570	421.78
เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	-	-	-	90	60	30
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (°C)	450	450	440	430	430	380
อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารตั้งต้น (wt%)	-	-	0.10	1	0.25	0.5
อัตราการป้อนสารตั้งต้น (ชม <sup>1</sup> )	3.30	3.30	3.66	-	-	-
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (barg)	-	-	-	10	10	1
ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว (wt%)	41.4	41.4	-	80.27	83.60	71.48
ร้อยละผลได้ของแก๊สไฮโดรเจน (wt%)	30.3	16.1	44.4	24.38	26.75	42.89
ค่าการเปลี่ยนแปลงของการเกิดเชื้อเพลิงเหลว	72.7	70.9	85.4	30.05	-	91.39

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ทำงานแบบกะ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชใช้แล้วร้อยละ 0.5 และ 2.0 เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 และ 60 นาที และ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380 และ 440 องศาเซลเซียส เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา ทั้งในเชิงปริมาณเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวมากที่สุด และเชิงคุณภาพ เพื่อให้การกระจายตัวของเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดเป็นแกโซลีนมากที่สุด ได้ผลการทดลองดังนี้

1. ปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้และองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลว ได้แก่ อัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา
2. ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ตามการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ดีที่สุด คือ

อัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วร้อยละ 0.5 (คิดเป็นน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัม ต่อน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้ว 20 กรัม)

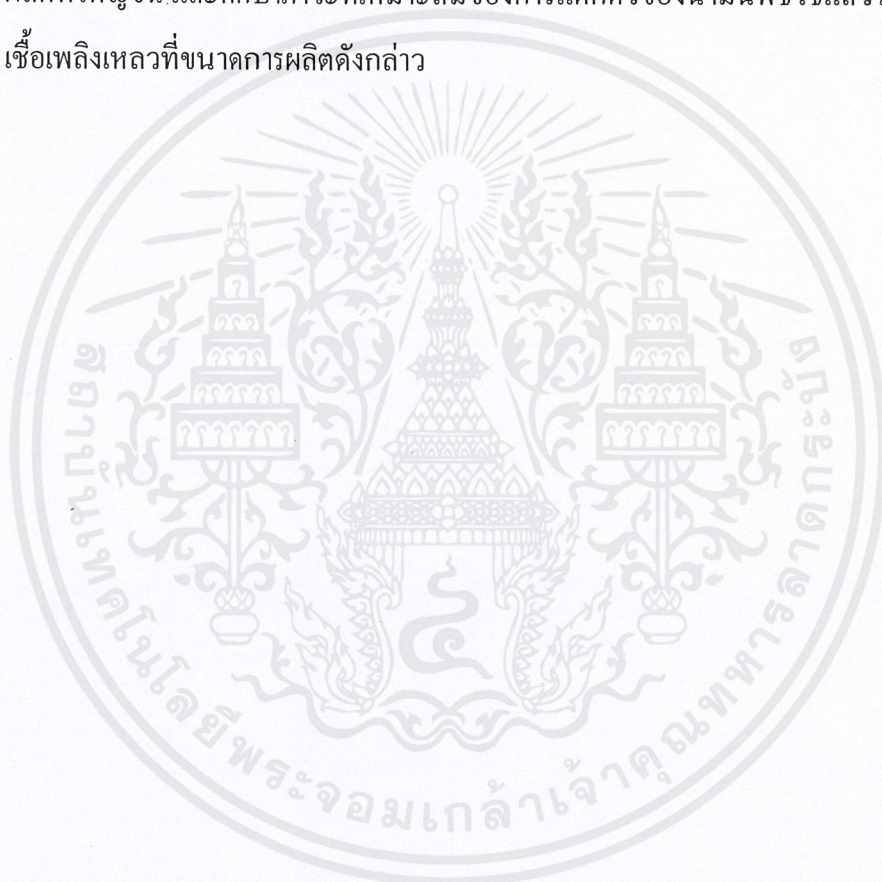
เวลาในการทำปฏิกิริยา	30	นาที
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	380	องศาเซลเซียส

การแตกตัวด้วยความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้กากน้ำมันหนักซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ในน้ำมันพืชใช้แล้ว แตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก ที่ภาวะของการทดลองข้างต้น ได้ ผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลว ร้อยละ 71.48 โดยน้ำหนัก (ประกอบด้วยแกโซลีน 42.89 เควโรซีน 5.60 ดีเซล 15.52 และกากน้ำมันหนัก 7.47) แก๊สร้อยละ 22.14 และของแข็ง 6.38 ปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการให้อุณหภูมิสูงแก่ระบบ และการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะส่งผลให้ได้ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของแกโซลีนสูงขึ้น จึงสรุปว่า

การแตกตัวน้ำมันพืชที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่น้ำมันพืช  
ใช้แล้วได้ และได้องค์ความรู้ของการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลว

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ที่มีราคาไม่แพง และศึกษาวิธีแยกตัวเร่ง  
ปฏิกิริยาจากกระบวนการเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
- 5.2.2 ศึกษาความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวที่ขนาดการ  
ผลิตที่ใหญ่ขึ้น และศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วให้เป็น  
เชื้อเพลิงเหลวที่ขนาดการผลิตดังกล่าว

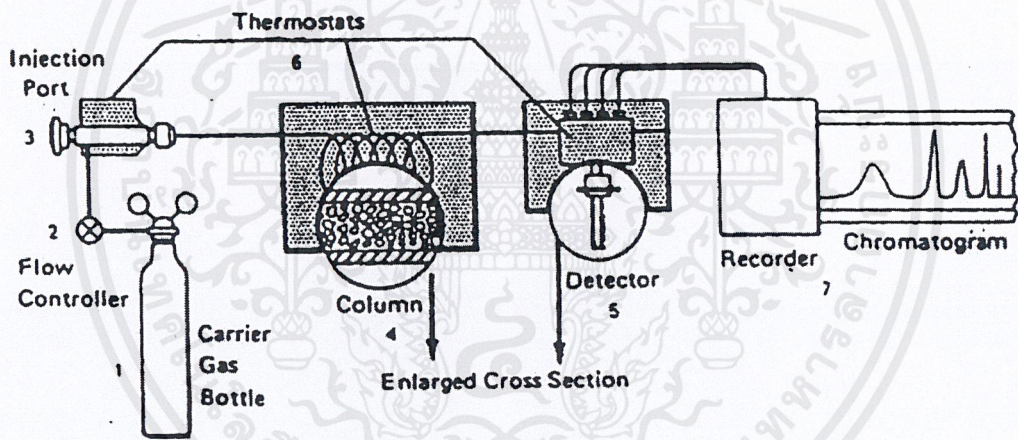


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบ ในเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือด

### แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) [38]

หลักการแยกสารด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี เป็นการแยกสารผสมตัวอย่างออกจากกัน สามารถบอกได้ทั้งชนิดและปริมาณของสารที่เป็นองค์ประกอบ อาศัยหลักการของความแตกต่างของความสามารถในการเคลื่อนที่และกระจายตัวผ่านเฟสคงที่ของแต่ละองค์ประกอบในสารตัวอย่าง ทำให้สารแต่ละชนิดแยกออกจากกันได้ สารตัวอย่างที่จะแยกต้องสามารถระเหยกลายเป็นไอและมีความเสถียรเมื่อถูกความร้อน ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแสดงดังรูปที่ ก1

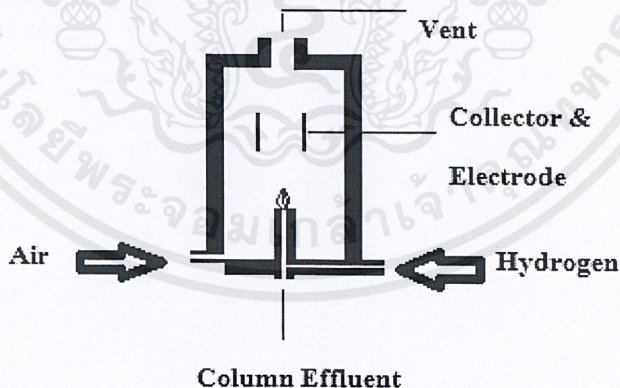


รูปที่ ก1 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

โดยทั่วไปเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี มีส่วนประกอบ ดังนี้

1. แก๊สตัวพา (Carrier Gas) ที่ใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) ต้องเป็นแก๊สเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยา ได้แก่ ไนโตรเจน ฮีเลียม อาร์กอน และคาร์บอน ไดออกไซด์ ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวตรวจหา (Detector) ที่ใช้
2. ตัวควบคุมการไหล (Flow Regulator) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สตัวพา
3. ช่องสำหรับฉีดสารตัวอย่าง เป็นบริเวณสำหรับฉีดตัวอย่างเข้าไปในคอลัมน์และทำหน้าที่ให้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนตัวอย่างที่เป็นของเหลวให้อยู่ในรูปไอ

4. คอลัมน์ นิยมใช้เหล็กกล้าไร้สนิม ทองแดง นิกเกิลโดยอาจอยู่ในรูปท่อรูปตัวยู (U- Tube) หรือเป็นขดทรงกลม ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 1-2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง (Inner Diameter) 3-6 มิลลิเมตร อาจมีการใช้คอลัมน์ที่ทำจากแก้วในการแยกสเต็มเตอรอยด์ ยา สารประกอบชีวภาพ นอกจากนี้ คอลัมน์ชนิดคอลัมน์รูเล็ก ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร คอลัมน์รูเล็กแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้
- 4.1 Wall-Coated Open Tubular (WCOT) เป็นคอลัมน์ชนิดที่มีเฟสหยุดนิ่งเป็นของเหลว เคลือบเป็นฟิล์มบางๆ (0.1- 1 ไมครอน) อยู่ที่ผนังด้านใน ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 10- 100 เมตร
- 4.2 Support Coated Open Tubular (SCOT) เป็นคอลัมน์ชนิดที่มีตัวรองรับ หรือเมทริกซ์บรรจุอยู่ภายในความยาวของคอลัมน์ประมาณ 10-100 เมตร
- 4.3 Micropacked Column เป็นคอลัมน์ขนาดเล็ก มีความยาวประมาณ 0.7-1.0 เมตร
5. Flame Ionization Detector (FID) สารที่ผ่านจากคอลัมน์จะถูกเผาโดยเปลวไฟ (Flame) ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ภายในตัวตรวจหา มีขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่จะจับกับไอออนซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ตัวตรวจหาชนิด FID นี้ เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุดองค์ประกอบของตัวตรวจหาแสดงดังรูปที่ ก2

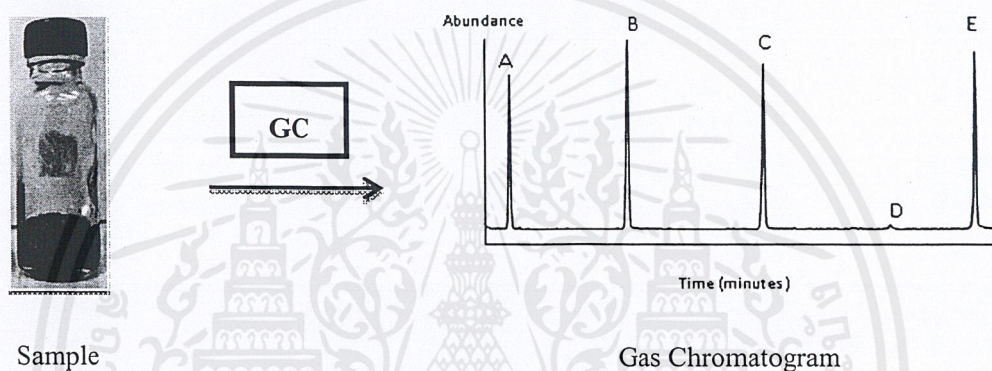


รูปที่ ก2 Flame Ionization Detector

สารตัวอย่างจะถูกฉีดเข้าไปที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และให้ความร้อนจนกลายเป็นไอที่ช่องสำหรับฉีดสารตัวอย่าง (Injection Port) แล้วผ่านเข้าไปในคอลัมน์หลอดแก้วรูเล็ก (Capillary Glass Column) รุ่น CP-SIL5CB เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.25 มิลลิเมตร ความยาว 15 เมตร และความหนาของชั้นฟิล์ม 0.25 ไมครอน โดยอาศัยการพาของเฟสเคลื่อนที่ หรือแก๊สตัวพา ในที่นี้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

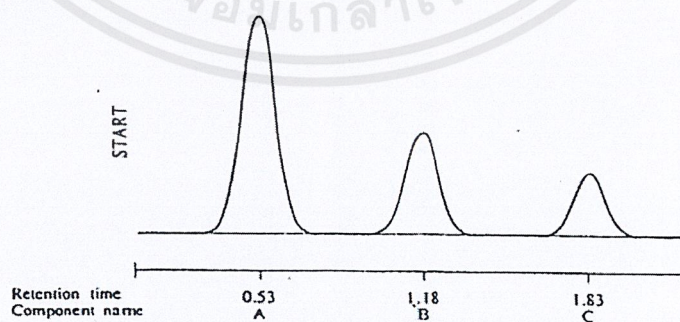
แก๊สฮีเลียม อัตราการไหล 1.5 ไมโครลิตร/นาที ไปยังคอลัมน์ เพื่อแยกสารออกจากกัน อุณหภูมิของเตาอบปรับอุณหภูมิให้มีการเปลี่ยนแปลงได้ในขณะทำการทดลอง (Temperature Programming Operation) โดยตั้งอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที โดยอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30-320 องศาเซลเซียส ใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นสารหล่อเย็น เพื่อควบคุมอุณหภูมิ ตั้งแต่ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0.01 วินาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที จนถึงอุณหภูมิสุดท้าย 320 องศาเซลเซียส ที่เวลาที่อุณหภูมินี้ 8.50 นาที มีตัวตรวจหาทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณที่เกิดขึ้น เมื่อสารแยกออกจากคอลัมน์ จะถูกบันทึกและแสดงออกมาในรูปแบบโครมาโทแกรม (Chromatogram) แสดงดังรูปที่ ก3



รูปที่ ก3 โครมาโทแกรมที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

#### การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

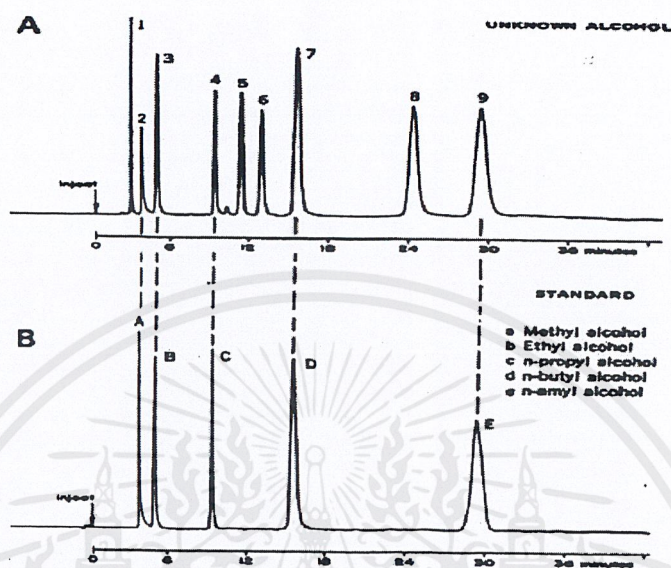
Retention Time (RT) คือ เวลาที่สารแต่ละชนิดใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์นับจากเวลาเริ่มต้นของการวิเคราะห์ถึงตำแหน่งเวลาที่ตัวตรวจหาอ่านค่าสัญญาณสูงสุด (Peak) จากการตรวจวัดของสารนั้นได้ ดังรูปที่ ก4



รูปที่ ก4 Retention Time ขององค์ประกอบ A, B, และ C

โดย Retention Time เป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิด ในภาวะการวิเคราะห์เดียวกัน ทั้งชนิดของคอลัมน์และอุณหภูมิที่ใช้ ค่าเวลาที่คงอยู่ของสารชนิดเดียวกันที่วิเคราะห์ได้ควรจะคงที่หรือมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ดังนั้น การตรวจพิสูจน์องค์ประกอบในของผสมตัวอย่างสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าเวลาที่คงอยู่ระหว่างองค์ประกอบในของผสมตัวอย่างกับองค์ประกอบมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 65



รูปที่ 65 การเปรียบเทียบค่า Retention Time ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน

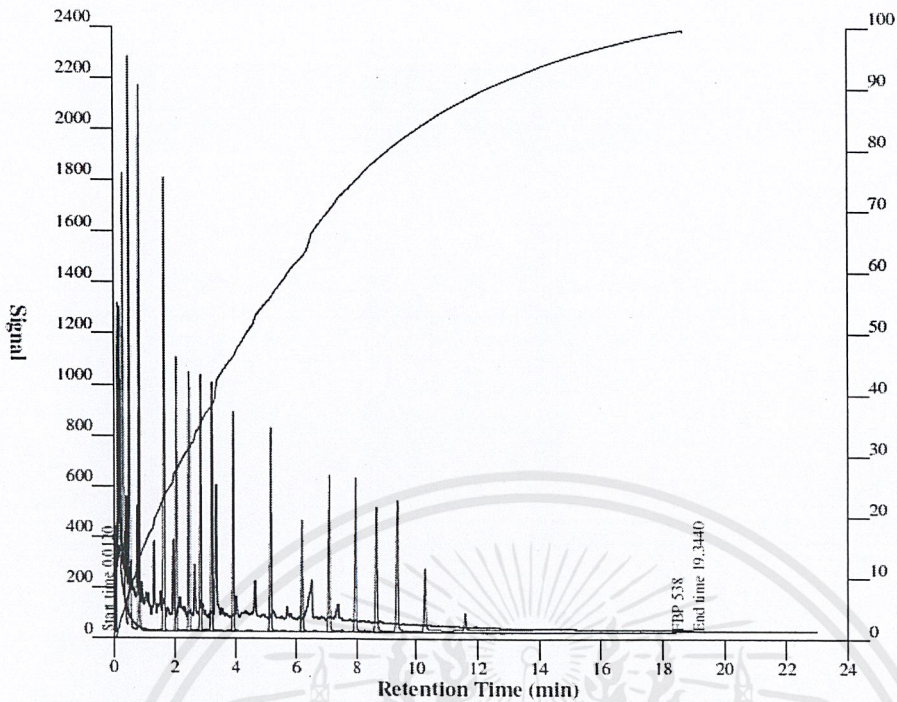
การวิเคราะห์เพื่อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น จะวิเคราะห์ตามจุดเดือดของสาร ดังนี้

IBP – 200 °C	=	Naphtha
200 °C - 250 °C	=	Kerosene
250 °C - 350 °C	=	Light Gas Oils
350 °C - 370 °C	=	Heavy Gas Oils
370 °C - FBP	=	Long Residue

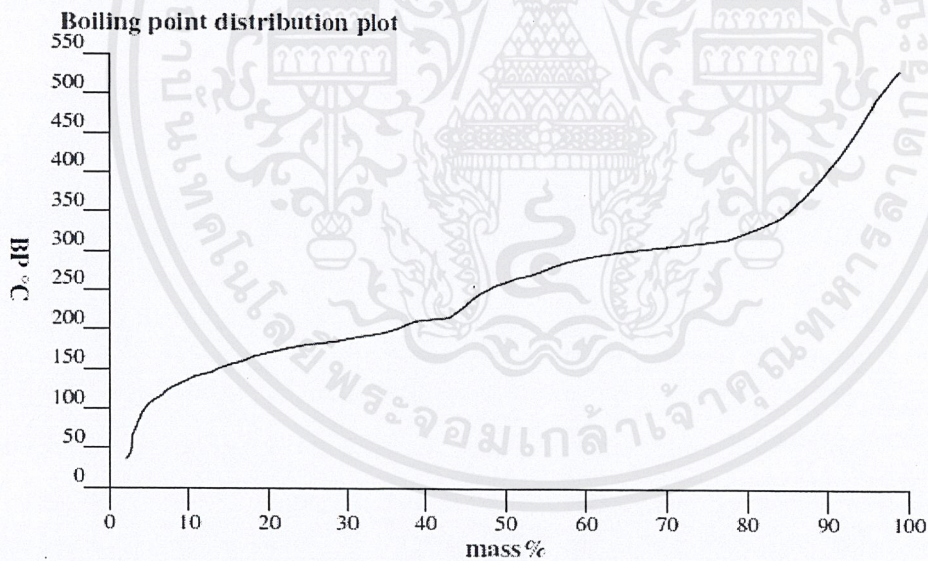
#### กราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือด

โครมาโทแกรมที่ได้จากการแยกสารด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี จะเปลี่ยนให้เป็นกราฟการกลั่นตามจุดเดือด (Boiling Point Distribution Plot) ด้วยโปรแกรมจำลองการกลั่น เทียบกับโครมาโทแกรมของสารมาตรฐานตาม ASTM D2887 และโครมาโทแกรมของเครื่องมือที่ไม่มีการฉีดสาร ดังแสดงในรูปที่ 66 และ 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 โครมาโทแกรมจากการแยกเชื้อเพลิงเหลวด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี



รูปที่ 7 กราฟการกลั่นตามจุดเดือดขององค์ประกอบในเชื้อเพลิงเหลว  
จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

# สูตรที่ใช้และตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ และร้อยละผลได้ของแต่ละองค์ประกอบ

$$\text{ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว} = \frac{\text{น้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้}}{\text{น้ำหนักน้ำมันพีซีใช้แล้ว}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของแก๊สและของแข็ง} = 100 - \text{ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของแต่ละองค์ประกอบในเชื้อเพลิงเหลว} = \frac{\text{ร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบนั้นในเชื้อเพลิงเหลว} \times \text{ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว}}{100}$$

$$\text{ค่าการเปลี่ยนแปลงของการเกิดเชื้อเพลิงเหลว} = \frac{\text{Long Residue ก่อนแตกตัว} - \text{Long Residue หลังแตกตัว}}{\text{Long Residue ก่อนแตกตัว}}$$

ตัวอย่าง หาร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลวและแก๊สโซลีน และค่าการเปลี่ยนแปลงของการเกิดเชื้อเพลิงเหลว ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 กรัม

ข้อมูลจากการทดลอง

น้ำมันพีซีใช้แล้ว	20.02 กรัม
น้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์ก่อนทดลอง	935.80 กรัม
น้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์หลังทดลอง	951.49 กรัม
น้ำหนักกระดาศยพิษูและกระดาศยกรองหลังการทดลอง	9.18 กรัม
น้ำหนักกระดาศยพิษูและกระดาศยกรองก่อนการทดลอง	7.91 กรัม
Long Residue ในน้ำมันพีซีใช้แล้วก่อนแตกตัว	86.83 wt%
Long Residue ในเชื้อเพลิงเหลวหลังแตกตัว	7.47 wt%

### วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์ก่อนการทดลอง} &= 935.80 \text{ กรัม} \\
 \text{น้ำหนักรวมก่อนทำการทดลอง} &= \text{น้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์} + \text{น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา} \\
 &\quad + \text{น้ำหนักน้ำมันพีซีซีแล้ว} \\
 &= 935.80 + 20.20 + 0.10 \\
 &= 956.10 \text{ กรัม} \\
 \text{น้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์หลังการทดลอง} &= 951.49 \text{ กรัม} \\
 \text{น้ำหนักแก๊สที่เกิดขึ้น} &= 956.10 - 951.49 = 4.43 \text{ กรัม} \\
 \text{น้ำหนักของแข็งที่เกิดขึ้น} &= 9.18 - 7.9089 - 0.10 \text{ กรัม} \\
 &= 1.28 \text{ กรัม} \\
 \text{เชื้อเพลิงเหลวที่ได้} &= 20.02 - 4.43 - 1.28 \text{ กรัม} \\
 &= 14.31 \text{ กรัม} \\
 \text{ดังนั้น ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว} &= \frac{14.31}{20.02} \times 100 \text{ กรัม} \\
 &= 71.48 \text{ กรัม} \\
 \text{เมื่อนำไปวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น ได้ Mass} \\
 \text{Recovery ของแกโซลีน 41.89 จาก Mass Recovery ขององค์ประกอบทั้งหมด 99.5} \\
 \text{\% Mass Recovery of Gasoline} &= \frac{59.7}{99.5} \times 100 = 60.0 \\
 \text{ดังนั้น ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของแกโซลีน} &= \frac{71.48}{60} \times 100 = 42.89 \\
 \text{ค่าการแปลงผันของการเกิดเชื้อเพลิงเหลว} &= \frac{86.83 - 7.47}{86.83} = 0.9139
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลว

ตารางที่ ค1 องค์ประกอบและการกระจายตัวของน้ำมันพืชผสมที่ใช้แล้วหลังการแตกตัว  
ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

Run No.	Factor			Conversion	Product Yield			Product Distribution				
	Catalyst Ratio (g)	Time (min)	Temp (°C)		% Gas Yield	% Oil Yield	% Solid Yield	% Gasoline	% Kerosene	% Light Gas Oils	% Gas Oils	% Long Residue
1	0.1	30	380	91.39	22.14	71.48	6.38	42.89	5.60	14.80	0.72	7.47
2	0.1	30	440	88.07	26.77	66.06	7.16	32.40	5.44	16.80	1.06	10.36
3	0.1	60	380	93.22	33.64	62.23	4.13	33.52	6.50	15.64	0.69	5.88
4	0.1	60	440	94.30	32.83	61.54	5.63	31.17	6.87	17.69	0.87	4.95
5	0.4	30	440	89.76	19.90	70.74	9.36	25.74	8.11	26.59	1.42	8.89
6	0.4	60	440	92.89	37.18	54.35	8.47	26.44	4.64	16.11	0.98	6.17

Catalyst Ratio : อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว (wt%)

Time : เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)

Temp : อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวคณพร ชูเกียรติสกุล
วัน เดือน ปีเกิด	1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2531 ที่จังหวัด บุรีรัมย์
ที่อยู่	114 หมู่ 7 บ้านพัฒนา ถนน ลำปลายมาศ – นารอง ตำบล ลำปลายมาศ อำเภอ ลำปลายมาศ จังหวัด บุรีรัมย์ 31130
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2553 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวนันทพร เสรีประหารตัน
วัน เดือน ปีเกิด	11 กรกฎาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัด นนทบุรี
ที่อยู่	9 หมู่ 1 ตำบล คลองขวาง อำเภอ ไทรน้อย จังหวัด นนทบุรี 11150
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2553 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ชื่อ-นามสกุล	นางสาวสุวนีย์ นาทะคำ
วัน เดือน ปีเกิด	21 พฤศจิกายน พ.ศ. 2531 ที่จังหวัด ชลบุรี
ที่อยู่	321/27 หมู่ 6 ตำบล สूरศักดิ์ อำเภอ ศรีราชา จังหวัด ชลบุรี 20110
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2553 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Available from : <http://www.bangchak.co.th/th/Biodiesel-Detail.aspx?did=34> “Bangchak Petroleum Public Company Limited” [17 กรกฎาคม 2553]
- [2] มารีนา มงคล. 2546. “การแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ และ HZSM-5.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] Available from : <http://www.pttplc.com/TH/news-energy-fact-national-petroleum-balance.aspx?> “บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) พลังงานที่ยั่งยืนเพื่อไทย” [15 กุมภาพันธ์ 2554]
- [4] วรณัฐ แจ่มสว่าง. 2551. พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] นคร ทิพย์วงศ์. 2553. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [6] Available from : <http://www.xylowatt.com/resEN.htm> “The Belgian manufacturer of wood gasification power plant” [7 มีนาคม 2554]
- [7] Available from : [http://www.uniserv.buu.ac.th/forum2/topic.asp?TOPIC\\_ID=696](http://www.uniserv.buu.ac.th/forum2/topic.asp?TOPIC_ID=696) “สำนักบริการวิชาการ ม.บูรพา” [8 มิถุนายน 2553]
- [8] Available from : [http://www.qmaker.com/fda/new/images/cms/top\\_upload/1141800379\\_ntf283-2547.pdf](http://www.qmaker.com/fda/new/images/cms/top_upload/1141800379_ntf283-2547.pdf) “สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา” [9 กันยายน 2553]
- [9] C.H. Bartholomew and R. J. Farrauto. 2006. **Fundamentals of Industrial Catalytic Processes**. 2<sup>nd</sup>ed. USA : John Wiley & Sons.
- [10] วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. 2547. ปฏิกิริยาเร่ง: เคมีเกี่ยวกับผิวและปิโตรเคมี **Catalysis Surface Chemistry and Petrochemical**. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

- [11] จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์ **Catalysis: Fundamentals and Applications**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [12] เดชา นัตรศิริเวช. 2552. กระบวนการดูดซับ: **Adsorption Processes**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [13] Jens Weitkamp, “**Zeolites and Catalysis**”, Solid State Ionics, Vol. 131, pp.175-188, 2000.
- [14] Scott M. Auerbach, Kathleen A. Carrado, and Prabir K. Dutta. 2003. **Handbook of Zeolite Science and Technology**. New York: Marcel Dekker.
- [15] Bruce C. Gates. 1991. **Catalytic Chemistry**. Canada: John Wiley & Sons.
- [16] Available from : <http://wikis.lib.ncsu.edu/index.php/Zeolites> [14 ธันวาคม 2553]
- [17] Available from : <http://www.ch.ic.ac.uk/vchemlib/course/zeolite/structure.html> [18 กันยายน 2010]
- [18] ปราโมทย์ ไชยเวช. 2552. **ปิโตรเลียมเทคโนโลยี**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [19] James G. Speight. 1991. **The Chemistry and Technology of Petroleum**. 2<sup>nd</sup> ed. New York :Marcel Dekker.
- [20] บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2553. **สารานุกรมเปิดโลกปิโตรเลียมและพลังงานทดแทน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: เกียวโด-เนชั่น-พรีนติ้ง เซอร์วิส.
- [21] Juan A. Melero, M. Milagrosa Clavero, Guillermo Calleja, Alica Garcia, Ruben Miravalles, and Tamara Galindo, “**Production of Biofuels via the Catalytic Cracking of Mixture of Crude Vegetable Oil and Nonedible Animal Fats with Vacuum Gas Oil.**” Energy Fuels, Vol. 24, 2010. pp. 707-717.
- [22] Available from : [http://www.en.wikipedia.org/wiki/Carbonium\\_ion](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Carbonium_ion) “Wikipedia, the free encyclopedia” [13 มีนาคม 2554]

- [23] Rogelio Sotelo-Boyas, Yanyong Liu, and Tomoaki Minowa, **“Renewable Diesel Production from the Hydrotreating of Rapeseed Oil with Pt/Zeolite and NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts.”** *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 50, 2011. pp. 2791-2799.
- [24] Harold H. Schobert. 1990. **The Chemistry of Hydrocarbon Fuels.** Butterworths.
- [25] Available from : [http://www.icis.com/StaticPages/Naphtha\\_Solvent.htm](http://www.icis.com/StaticPages/Naphtha_Solvent.htm) “Naphtha Solvent ICIS Methodology” [15 มีนาคม 2554]
- [26] Available from : <http://www.vcharkarn.com/vcafe/148628> “วิชาการ.คอม” [15 มีนาคม 2554]
- [27] Available from : <http://www.encyclopedia.com/topic/naphtha.aspx> “Encyclopedia.com articles about naphtha” [15 มีนาคม 2554]
- [28] Available from : <http://en.wikipedia.org/wiki/Naphtha> “Wikipedia, the free encyclopedia” [13 มีนาคม 2554]
- [29] อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ. 2553. เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีปิโตรเคมี. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [30] Raphael O. Idem, Sai P.R. Katikaneni, and Narendra N. Bakhshi, **“Catalytic conversion of canola oil to fuels and chemicals: roles of catalyst acidity, basicity and shape selectivity on product distribution.”** *Fuel Processing Technology*, Vol. 51, 1997. pp. 101-125.
- [31] Farouq A. Twaiq, Noor A. M. Zabidi and Subhash Bhatia, **“Catalytic Conversion of Palm Oil to Hydrocarbons: Performance of Various Zeolite Catalysts.”** *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 38, 1999. pp. 3230-3237.
- [32] Yean-Sang Ooi, Ridzuan Zakaria, Abdul Rahman Mohamed and Subhash Bhatia, **“Synthesis of composite material MCM-41/Beta and its catalytic performance in waste used palm oil cracking.”** *Applied Catalysis A*, Vol. 274, 2004. pp. 15–23.

- [33] Yean-Sang Ooi, Ridzuan Zakaria, Abdul Rahman Mohamed and Subhash Bhatia, **“Catalytic conversion of palm oil –based fatty acid mixture to liquid fuel.”** Biomass and Bioenergy, Vol. 27, 2004. pp. 477-484.
- [34] Witchakon Charusiri and Tharapong Vitidsant, **“Kinetic Study of Used Vegetable Oil to Liquid Fuels over Sulfated Zirconia.”** Energy & Fuels, Vol. 19, 2005. pp. 1783-1789.
- [35] Stella Bezerigianni, Spyros Voutetakis and Aggeliki Kologianni, **“Catalytic Hydrocracking of Fresh and Used Cooking Oils.”** Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 48, 2009. pp. 8402-8406.
- [36] รวีวรรณ สวัสดิ์รักษา. 2552. “การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบน HZSM-5.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [37] เสาวลักษณ์ โมสิกมาส. 2552. “การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของกลีเซอรอลเหลือทิ้งเป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [38] แม้น อมรสิทธิ์. 2553. หลักการและเทคนิควิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.