

การแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์



นายประจักษ์ คุ้มดี

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

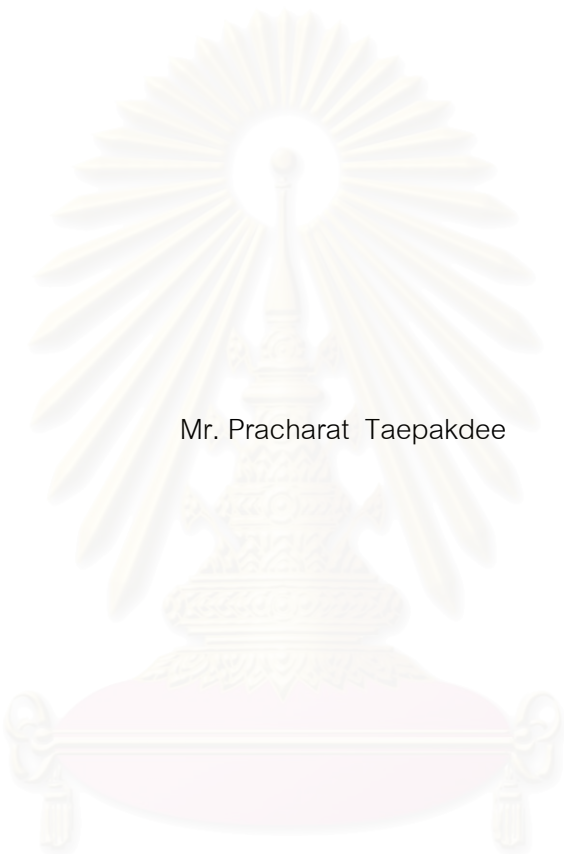
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6554-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CATALYTIC CRACKING OF POLYPROPYLENE, POLYSTYRENE AND  
USED - LUBRICATING OIL WITH Fe/ACTIVATED CARBON



Mr. Pracharat Taepakdee

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6554-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัว เร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์
โดย	นายประชารัตน์ แต่ภักดี
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตรสานต์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรสานต์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสุสิทธิ์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปดี)

นายประจักษ์ คุ้มศักดิ์ : การแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วย  
ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.(CATALYTIC CRACKING OF POLYPROPYLENE,  
POLYSTYRENE AND USED-LUBRICATING OIL WITH Fe/ACTIVATED CARBON)  
อ.ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรานันต์, 126 หน้า. ISBN 974-17-6554-1.

งานวิจัยนี้เน้นที่จะศึกษาถึงกระบวนการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ขนาด 70 มิลลิลิตร กระบวนการแตกตัวกระทำการศึกษาถึง เปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ อัตราส่วนพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีน อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นต่อพลาสติก อุณหภูมิ 390-450 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 45-105 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-10 บาร์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.1 -1.5 กรัม ปริมาณสารตั้งต้นจำนวน 15 กรัม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด

โดยภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ดังนี้ เปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ คือ 5 % อัตราส่วนพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีน คือ 70:30 อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นต่อพลาสติก คือ 60:40 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 75 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยา 0.8 กรัม ซึ่งในภาวะการทดลองข้างต้นจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 75.65 % ผลิตภัณฑ์แก๊ส 17.37 % และของแข็งที่ไม่ทำปฏิกิริยา 6.98 % เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาวิเคราะห์หาการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ พบว่ามีปริมาณของแก๊สไฮโดรเจน 61.25 % ไครซีน 13.25 % แก๊สออกซิเจน 15.84 % แก๊สออกไซด์ 3.65 % และกากน้ำมันหนัก 6.01 % และพบว่ามีหมู่ฟังก์ชันหลักเป็น แอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเมื่อเทียบกับหมู่ฟังก์ชันหลักในน้ำมันเบนซินออกเทน 95 แล้วพบว่ามีหมู่แอโรแมติกไฮโดรคาร์บอนคล้ายกัน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Ni - Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ HZSM-5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/Activated carbon ให้ผลของผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด

ภาควิชา เคมีเทคนิค  
สาขาวิชา เคมีเทคนิค  
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4672323223: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: CATALYTIC / CRACKING / POLYPROPYLENE / POLYSTYRENE / LUBRICATING OIL

PRACHARAT TAEPKDEE: CATALYTIC CRACKING OF POLYPROPYLENE, POLYSTYRENE AND USED - LUBRICATING OIL WITH Fe/ACTIVATED CARBON. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF.THARAPONG VITIDSANT, Ph.D.126 pp. ISBN 974-17-6554-1.

The aim of this research was to study the catalytic cracking of polypropylene polystyrene and used lubricating oil with Fe/Activated carbon in a micro reactor of 70 ml. The cracking process was performed at % Fe loading on activated carbon, ratio of PP: PS, ratio of Lubricant: Plastics, reaction temperature 390 - 450 °C, reaction time 45 - 105 min, initial hydrogen pressure 1 - 10 bars, containing 0.15 - 1.5 g of Fe/Activated carbon and weight of raw material is 15 g to produce the best product and components.

The optimum conditions of catalytic cracking of polypropylene polystyrene and used lubricating oil were 5% Fe loading on activated carbon, PP: PS ratio of 70:30, Lubricant: Plastics ratio of 60:40, reaction temperature of 430 °C, reaction time of 75 min, initial hydrogen pressure 1 bar by using 0.80 g of catalyst. The product was present in 75.68 % by weight of oil yield, 17.37 % by weight of gas yield, and 6.98 % by weight of solid yield and composed of gasoline, kerosene, light gas oil, gas oil and long residue (61.25, 13.25, 15.84, 3.65, 6.01 percentage respectively). It was found that the product also found an aromatic hydrocarbon in main structure. Comparing the product and benzene (octane 95) the structure was similar. The comparison of catalyst types: Fe/Activated carbon, Ni - Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and HZSM-5, was found that Fe/Activated carbon is the best catalyst.

Department Chemical Technology

Field of study Chemical Technology

Academic year 2004

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปตี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความเห็น คำแนะนำ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงษ์สถาปตี ที่ให้ความกรุณาชี้แนะแนวทางและคำแนะนำ คำปรึกษาในเรื่องงานและเรื่องต่าง ๆ อีกมากมายและกำลังใจในการทำงานจนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัย ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและกรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกด้วยในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

ขอขอบคุณ บริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด มหาชน ที่กรุณาอนุเคราะห์เม็ดพลาสติกเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ โรงซ่อมบำรุงรถไฟสถานีบางซื่อ ที่กรุณาอนุเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ .....	ฐ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 พลาสติก.....	4
2.1.1 การบริโภคเม็ดพลาสติก .....	5
2.1.2 เม็ดพลาสติก .....	5
2.1.2.1 พอลิพรอพิลีน.....	5
2.1.2.2 พอลิสไตรีน .....	10
2.2 น้ำมันหล่อลื่น.....	12
2.2.1 น้ำมันแร่.....	12
2.2.2 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์.....	14
2.2.3 สมบัติของน้ำมันหล่อลื่น.....	15
2.2.4 ปริมาณการใช้น้ำมันหล่อลื่นในประเทศไทย .....	21
2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	22
2.3.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	22
2.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	23
2.4 ตัวรองรับ .....	27
2.4.1 หน้าที่ของตัวรองรับ (Support).....	27
2.4.2 การเลือกตัวรองรับ .....	27
2.5 ถ่านกัมมันต์.....	27
2.5.1 วัตถุประสงค์ที่นำมาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์.....	28
2.5.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	28

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.5.3	ลักษณะและชนิดของถ่านกัมมันต์ ..... 31
2.5.4	โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ..... 32
2.5.5	โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ ..... 34
2.5.6	การดูดซับของถ่านกัมมันต์ ..... 38
2.6	การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) ..... 39
2.7	การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) ..... 40
2.8	การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking) ..... 42
2.9	การวิเคราะห์หาคุณภาพของน้ำมัน Crude oil evaluation ..... 44
2.10	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 44
3.	เครื่องมือและอุปกรณ์ ..... 52
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ ..... 52
3.2	สารตั้งต้นและสารเคมี ..... 55
3.3	การดำเนินการวิจัย ..... 55
3.4	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ..... 57
4.	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง ..... 59
4.1	การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น ..... 59
4.1.1	องค์ประกอบธาตุของเม็ดพลาสติก ..... 59
4.1.2	องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ..... 59
4.1.3	สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ..... 59
4.2	ศึกษาหาอิทธิพลของตัวแปรเบื้องต้นที่มีผลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบว การแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่น ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ..... 61
4.2.1	ผลของเปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ..... 62
4.2.2	ผลของอัตราส่วนพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีน ..... 66
4.2.3	ผลของอัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อพลาสติก ..... 70
4.3	การศึกษาหาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ ได้จากการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ..... 74



สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.4 การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของ องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ ตาม ASTM D2887 เป็นแก๊สโซลีน (Gasoline) เคโรซีน (Kerosene) แก๊สออยล์เบา (Light gas oil) แก๊สออยล์ (Gas oil) และกากน้ำมันหนัก (Long residue) .....	77
4.4.1 อิทธิพลของคุณสมบัติที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน .....	77
4.4.2 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการทดลองที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	81
4.4.3 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน .....	85
4.4.4 อิทธิพลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน .....	88
4.5 การเปรียบเทียบผลของการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์ กับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ .....	92
4.6 การวิเคราะห์หิมูฟังก์ชั่นของผลิตภัณฑ์ .....	95
4.7 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน .....	97
5 สรุปผลการทดลอง.....	99
5.1 การแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	99
5.2 การเปรียบเทียบผลของการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์ กับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ .....	100
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป.....	102
รายการอ้างอิง.....	103
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก. ข้อมูลการทดลอง .....	107

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ.....	113
ภาคผนวก ค. การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ น้ำมันตามคาบจุดเดือด.....	120
ภาคผนวก ง. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่อง FT-IR.....	124
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	126



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิพรอพิลีน.....	9
2.2 ปริมาณการนำเข้าน้ำมันหล่อลื่นภายในประเทศไทย.....	22
3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก บนถ่านกัมมันต์.....	56
4.1 ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบธาตุดของเม็ดพลาสติก.....	60
4.2 ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว.....	60
4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	61
4.4 แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการออกแบบการทดลองแบบ แฟกทอเรียลสองระดับ ( $2^4$ factorial design).....	75
4.5 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนที่ได้จาก การแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	76
4.6 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน.....	98
ก1 แสดงผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์เหล็กบนถ่านกัมมันต์ที่มีผลต่อการแตกตัว พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	107
ก2 แสดงผลการศึกษาอัตราส่วนพอลิพรอพิลีนกับพอลิสไตรีนที่มีผลต่อ การแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	107
ก3 แสดงผลการศึกษาอัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อพลาสติก ที่มีต่อการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	108
ก4 แสดงผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสอง ระดับ 4 ตัวแปร ( $2^4$ factorial design) สำหรับการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่าน กัมมันต์ ภาวะทดลองอัตราส่วน PP:PS 70:30 อัตราส่วน Lub:Plastics 60:40 และ% Fe loading 5 %.....	109

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ก5	แสดงผลการศึกษากวาระอนุภูมิภาคที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ .....	110
ก6	แสดงผลการศึกษากวาระอนุภูมิภาคที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ .....	110
ก7	แสดงผลการศึกษากวาระปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการแตกตัว พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์ .....	111
ก8	แสดงผลการศึกษากวาระความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการแตกตัว พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์ .....	111
ก9	แสดงผลการศึกษากวาระเปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแตกตัว พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์ .....	112
ข1	สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา .....	113
ข2	แสดงภาวะของตัวแปรและร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สไซลีนที่ได้ .....	116
ข3	แสดงผลการคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สไซลีนที่ได้ .....	117
ข4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง normal probability (%) กับ absolute effect estimate (เรียงจากน้อยไปมาก) .....	118
ข5	แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สไซลีนที่ได้ จากการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ .....	119

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ข้อมูลและการคาดการณ์การบริโภคผลิตภัณฑ์พลาสติกภายในประเทศ ตั้งแต่ ปี ค.ศ.1999 ถึง ค.ศ. 2008 .....	5
2.2 การกลั่นน้ำมันดิบ.....	13
2.3 ขบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น .....	13
2.4 หลักการของความหนืด.....	16
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นบางชนิด .....	17
2.6 ผลของความดันต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40.....	18
2.7 การหาค่าดัชนีความหนืด.....	19
2.8 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในการคาร์บอนไนซ์ .....	29
2.9 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ .....	30
2.10 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางกายภาพ .....	30
2.11 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางกายภาพโดยมีการกำจัด โมเลกุลแปลกปลอม .....	33
2.12 เปรียบเทียบขนาดและการวางตัวของรูพรุนขนาดต่าง ๆ .....	33
2.13 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	35
2.14 การเคลื่อนที่ของไพโอเล็กตรอนในโครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์ .....	35
2.15 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันัลที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์ .....	36
2.16 ตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่ผิวเป็นกรด.....	36
2.17 ตัวอย่างการดูดซับโมเลกุลกรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นเบส.....	37
3.1 แสดงเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ปริมาตร 70 มิลลิลิตร (Micro-reactor).....	52
3.2 แสดงชุดทดลองประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล และเครื่องเขย่า .....	53
3.3 แสดงชุดกรองสุญญากาศ.....	53
3.4 แสดงเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น.....	54
3.5 แสดงเครื่อง FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) .....	55

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.1 ผลของปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากกระบวนการแตกตัวของ พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่เปอร์เซ็นต์ ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 1% - 10%.....	63
4.2 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยเครื่อง Simulated distillation gas chromatograph ที่เปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 1% - 10% .....	64
4.3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากเปอร์เซ็นต์ของเหล็กบน ถ่านกัมมันต์ 1% - 10% .....	65
4.4 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของ พอลิพรอพิลีนกับพอลิสไตรีนในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	67
4.5 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่อง Simulate Distillation G.C. ที่อัตราส่วนระหว่างพอลิพรอพิลีนกับพอลิสไตรีนต่าง ๆ .....	68
4.6 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากอัตราส่วนพอลิพรอพิลีนกับ พอลิสไตรีนต่าง ๆ.....	69
4.7 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของน้ำมัน หล่อลื่นที่ใช้แล้วกับพลาสติกที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	71
4.8 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่อง Simulate Distillation G.C. ที่อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกับพลาสติกต่าง ๆ .....	72
4.9 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากอัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่น ใช้แล้วกับพลาสติกต่าง ๆ กัน.....	73
4.10 Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนจากการ แตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่ง ปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ .....	76
4.11 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิระหว่าง 390 - 450 องศาเซลเซียส .....	78

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.12 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่อง Simulate Distillation G.C. ที่อุณหภูมิระหว่าง 390 - 450 องศาเซลเซียส.....	79
4.13 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากอุณหภูมิ 390 – 450 องศาเซลเซียส .....	80
4.14 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการทดลองระหว่าง 45 – 105 นาที.....	82
4.15 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่อง Simulate Distillation G.C. ที่เวลาในการทดลองระหว่าง 45 - 105 นาที .....	83
4.16 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากเวลาในการทดลองระหว่าง 45 – 105 นาที เซลเซียส .....	84
4.17 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ระหว่าง 0.15 – 1.5 กรัม .....	85
4.18 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่อง Simulate Distillation G.C. ที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ระหว่าง 0.15 – 1.5 กรัม.....	86
4.19 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ระหว่าง 0.15 – 1.5 กรัม .....	87
4.20 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นระหว่าง 1 – 10 บาร์.....	89
4.21 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่อง Simulate Distillation G.C. ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นระหว่าง 1 – 10 บาร์.....	90
4.22 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้นระหว่าง 1 – 10 บาร์.....	91
4.23 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน .....	92

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.24 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่อง Simulate Distillation G.C. ที่ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน.....	93
4.25 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน .....	94
4.26 แสดง FTIR spectrum จากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของ พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว จำนวน 15 กรัม.....	96
4.27 แสดง FTIR spectrum จากผลิตภัณฑ์น้ำมันเบนซินออกเทน 95 .....	96
ข1 Normal Probability Plot ของร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนที่ได้จาก การแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ .....	119
ค1 แสดงโครมาโทแกรมจากการแยกของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง แก๊สโครมาโทกราฟี.....	121
ค2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน(%off) กับจุดเดือด ของสารจากโปรแกรม Simulated Distillation .....	121
ค3 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบ ผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องมือ Simulated Distillation Gas Chromatography และการคำนวณปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ .....	122
ง.1 แถบการดูดกลืนของ Infrared Spectra ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ.....	124
ง.2 ตัวอย่างแสดงค่าการดูดกลืนของแสงจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของ พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว .....	125



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ขยะปริมาณมหาศาลจากการดำรงชีวิตในสังคมยุคปัจจุบัน ส่วนใหญ่มักเป็นพลาสติกใช้แล้วทิ้ง ซึ่งจะกำจัดด้วยการฝังกลบ การกำจัดขยะเหล่านี้เป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญในประเทศไทยอยู่ในขณะนี้ การฝังกลบ การเผาโดยตรง และการหลอม ไม่สามารถแก้ปัญหาทางด้านมลพิษได้จึงเป็นที่น่าสนใจในการพัฒนาวิธีการใหม่ ๆ เพื่อแก้ไขปัญหานี้หรือเพื่อเป็นสารตั้งต้น สารเคมี หรือพลังงานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ จากความนิยมในการบริโภคพลาสติกกันอย่างแพร่หลาย และปริมาณมากขึ้นจนเป็นสาเหตุของปัญหาสิ่งแวดล้อม ด้านขยะจากพลาสติกที่ทวีคูณขึ้น ซึ่งโดยมาก เป็นพวกพลาสติกบรรจุภัณฑ์ ชิ้นส่วนรถยนต์ และวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น จากการรายงานพบว่าปริมาณขยะพลาสติกจากบ้านเรือนจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม และจากการค้าขายหมุนเวียนตามท้องตลาดจะมีโดยรวมทั้งสิ้น ประมาณ 2.5 ล้านตันต่อปี การนำไปทำการกำจัด โดยการฝังกลบถึง 1.3 ล้านตัน [1] ส่วนที่เหลือนอกจากนั้นก็นำไปเผาเพื่อใช้พลังงานและนำกลับมาใช้ใหม่ ปัญหาที่พบจากการกำจัดโดยการฝังกลบ คือ ขยะพลาสติกจะใช้เนื้อที่ในการฝังกลบมากเนื่องจากมีปริมาตรมาก นอกจากนี้ในปัจจุบันยังพบว่าการฝังกลบขยะจะต้องใช้ต้นทุนสูงเพราะขาดแคลนพื้นที่และที่ดินมีราคาแพงอีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยจะเกิดการปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดินและถือว่าการสูญเสียวัสดุพลาสติกเหล่านั้นไปโดยเปล่าประโยชน์จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีความสนใจ ที่จะนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่

ดังนั้นจึงมีการคิดค้นการนำพลาสติกมาใช้ใหม่โดยมีวิธีหลักอยู่ 2 วิธี คือ วิธีทางกายภาพ คือ การนำพลาสติกมาหลอมเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ได้ และ วิธีทางเคมี คือ การเปลี่ยนพลาสติกไปเป็นสารเคมีหรือ เชื้อเพลิงที่มีคุณค่าส่วนวิธีทางเคมีนั้นจะใช้ปฏิกิริยาการแตกย่อย (Cracking) โดยอาศัยความร้อน (Thermal cracking) หรืออาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) การแตกย่อยโดยใช้ความร้อนอย่างเดียวต้องทำที่อุณหภูมิสูงและให้ความเลือกจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ต่ำ การแตกย่อยโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำการแตกย่อยที่อุณหภูมิต่ำกว่าและให้ความเลือกจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์สูง จึงมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ในการแตกย่อยพลาสติกอย่างแพร่หลายมากกว่าที่จะใช้ความร้อนอย่างเดียว ในภาวะการณ์ปัจจุบันมนุษย์ยังมีความต้องการใช้พลังงานสูงมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และประเทศไทยยังต้องมีการพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะและภาคอุตสาหกรรม โดยในปี 2546 ประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงานคิดเป็นมูลค่าถึง 411,193 ล้านบาท โดยเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 20.2 เมื่อเทียบกับปี

2545 ส่วนมูลค่าการนำเข้าน้ำมันดิบมีสัดส่วนสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและในขณะนี้ประเทศไทยมีความต้องการใช้น้ำมันดิบโดยรวมปี 2547 ตลอดปีอยู่ที่ระดับ 81.1 ล้านบาร์เรลต่อวัน ซึ่งเพิ่มจากเดิม ปี 2546 ถึง 0.7 ล้านบาร์เรลต่อวัน ประกอบกับด้วยน้ำมันในท้องตลาดมีแนวโน้มสูงขึ้นอยู่ตลอดเวลา และผันผวนตามสถานการณ์ของโลกและในปี 2547 อีกทั้งประเทศไทยมีการใช้รถยนต์นั่งทุกชนิดเพิ่มขึ้นจากปี 2546 มากกว่า 2 ล้านคัน ซึ่งต้องใช้น้ำมันหล่อลื่นสำหรับรถยนต์นั่งรวมกันประมาณ 50 ล้านลิตรต่อปี [2] น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วนั้นจะต้องถูกทิ้งและไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือรอการกำจัดเป็นจำนวนมาก ซึ่งถ้าไม่มีการกำจัดที่ดีจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้มีแนวความคิดว่าควรที่จะนำน้ำมันเหล่านี้กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยปัจจุบันน้ำมันบางส่วนจะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงไปในภาคอุตสาหกรรมหนักรวมทั้งนำน้ำมันมาปรับปรุงคุณภาพเพื่อนำมาเป็นน้ำมันหล่อลื่นใช้อีกครั้งหนึ่ง แต่การนำกลับมาใช้ก็คงยังเป็นส่วนที่เล็กน้อยมากน้ำมันส่วนใหญ่ยังคงถูกทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อรอการบำบัดดังนั้นจึงควรมีแนวทางในการกำจัดของเหลือทิ้งเหล่านี้ซึ่งจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้และเพื่อลดการนำเข้พลังงานเชื้อเพลิงรวมทั้งเป็นการทดแทนในยามขาดแคลนในอนาคตและรักษาสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

การศึกษาถึงกระบวนการแตกตัวพลาสติกพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเพื่อนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงโดยศึกษาอิทธิพลตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการประกอบด้วย อัตราส่วนพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีน อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อพลาสติก อุณหภูมิ ความดัน เวลาในการเกิดปฏิกิริยา โดยมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ (Fe/Active carbon) เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีราคาไม่สูงมาก สามารถเตรียมได้ง่าย และนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย โดยนำไปใช้เพื่อเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น และสามารถทำการศึกษาได้ในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเล็กและทนความดันได้สูง เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ เมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากห้องปฏิบัติการที่มีเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบของเชื้อเพลิง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ซึ่งประกอบด้วย เปอร์เซ็นต์เหล็กบนถ่านกัมมันต์ อัตราส่วนพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีน อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อพลาสติก อุณหภูมิ ความดัน เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนพอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจากตัวแปรต่าง ๆ ที่ให้ผลเป็นร้อยละของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบที่ดีที่สุด

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชนิดเบาจากของผสมพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์
2. เป็นการนำประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งประเภทพลาสติกและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว สำหรับสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวเพื่อเพิ่มมูลค่า และก่อให้เกิดผลดีต่อการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจะเป็นการช่วยลดขยะพลาสติกที่จะต้องใช้เวลาในการย่อยสลาย หรือ ลดค่าใช้จ่ายในการนำกลับมาใช้ใหม่ หรือ การทำลาย
3. เป็นการศึกษาถึงการปรับปรุงร้อยละของการเปลี่ยนพลาสติกพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วให้เป็นผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเพิ่มมากขึ้น
4. ใช้เป็นข้อมูลเพื่อประโยชน์ในการขยายส่วนสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวในภาคอุตสาหกรรม หรือ การผลิตในเชิงพาณิชย์ ซึ่งจะทำให้ช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกได้ในอนาคต

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พลาสติก [3, 4]

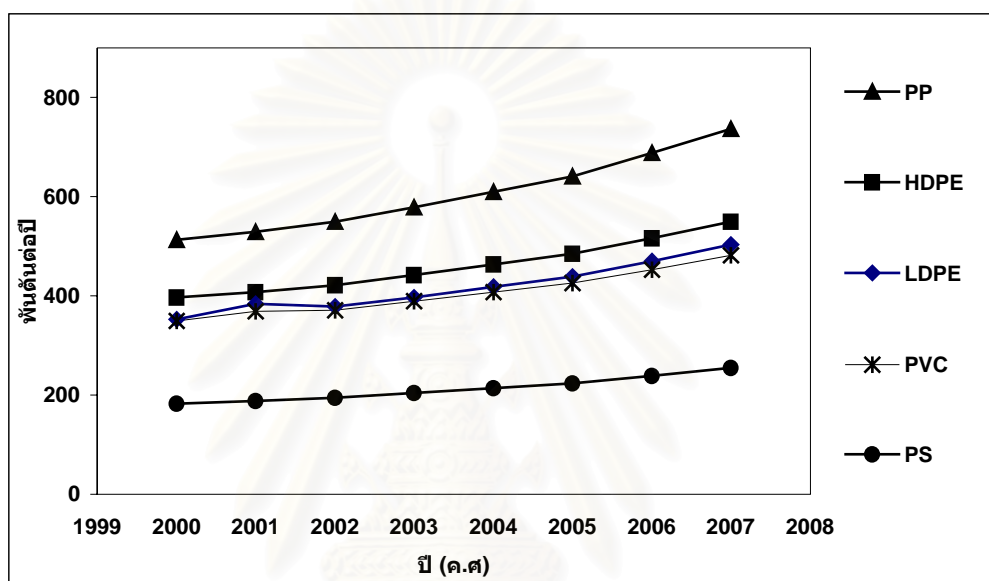
ในปัจจุบัน พลาสติกได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของคนเรา ไม่ว่าจะเป็นเครื่องครัว ถ้วยชาม อุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องประดับ เพอร์นิเจอร์ ฯลฯ ล้วนแต่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากพลาสติกแทบทั้งสิ้น พลาสติกหรือที่เรียกว่า "พอลิเมอร์" (Polymer) เป็นสารสังเคราะห์ที่ขึ้นมาตามกระบวนการที่เรียกว่า "พอลิเมอไรเซชัน" (Polymerization) ซึ่งเป็นการก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้หน่วยเล็ก ๆ ที่เรียกว่า "มอนอเมอร์" (Monomer) เกิดการรวมตัวเชื่อมกัน ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นและแปรลักษณะทางกายภาพจากเดิมที่อาจจะอยู่ในรูปของแก๊สหรือของเหลว กลายเป็นของแข็งซึ่งจะมีสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ มนุษย์ค้นพบสารประกอบพอลิเมอร์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2313 ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติในรูปของยาง

การผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกนั้น จะนำวัตถุดิบมาแปรรูป โดยวิธีการต่าง ๆ เช่น ทำเป็นแผ่นฟิล์ม ทำเป็นเส้นใย ทำเป็นแผ่นเทป ทำให้เป็นรูปแบบตามแบบพิมพ์โดยการฉีดขึ้นรูป หรือเป่าตามแบบ เป็นต้น ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์พลาสติกต่าง ๆ เช่น ถุงพลาสติกชนิดถุงร้อนและถุงเย็น ของเด็กเล่น เครื่องใช้ในครัวเรือน เส้นใย ฯลฯ อุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกนี้เริ่มขึ้นในประเทศไทยตั้งแต่ปี 2493 ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกได้เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่มีสมบัติพิเศษ และเด่นกว่าวัสดุชนิดอื่น และสามารถใช้แทนแก้วไม้ หรือกระดาษได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านความแข็งแรง เหนียว ทนต่อกรดและด่างได้ดี อีกทั้งยังสามารถเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี มีน้ำหนักเบา

จากสมบัติข้างต้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากพลาสติกเป็นที่ยอมรับจนสามารถสร้างตลาดได้ดีและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะเดียวกันก็ได้มีการพัฒนารูปแบบพลาสติกต่าง ๆ สีสันพร้อมกับคุณภาพที่สูงขึ้น

## 2.1.1 การบริโภคเม็ดพลาสติก [1, 5]

ผลผลิตเม็ดพลาสติกมีสัดส่วนร้อยละ 9.0 ของผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือร้อยละ 2.5 ของ GDP ผลผลิตครึ่งหนึ่งส่งออกไปจำหน่ายต่างประเทศ ยอดการใช้เม็ดพลาสติกในประเทศปีละประมาณ 2.4 ล้านตัน ผลิตในประเทศ 1.7 ล้านตัน และนำเข้า 0.7 ล้านตัน โดยแบ่งเป็นพลาสติก 5 ประเภท คือ พอลิเอทิลีน พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และพอลิไวนิลคลอไรด์ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ข้อมูลและการคาดการณ์การบริโภคผลิตภัณฑ์พลาสติกภายในประเทศตั้งแต่ปี ค.ศ. 1999 ถึง ค.ศ.2008 [6]

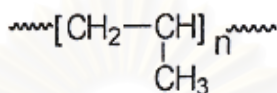
## 2.1.2 เม็ดพลาสติก

### 2.1.2.1 พอลิพรอพิลีน [4, 7, 8, 9]

พอลิพรอพิลีนเป็นพลาสติกจำพวกเทอร์โมพลาสติก ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน มีสมบัติเฉพาะตัวคือ ความถ่วงจำเพาะต่ำ ความแข็งแรงสูง อุณหภูมิบิดตัวสูง ทนทานต่อสารเคมีได้ดี มีสมบัติต้านไฟฟ้าได้ดี จึงมีการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ หลายชนิด เช่น อุปกรณ์ในครัวเรือน ภาชนะบรรจุภัณฑ์ ของเด็กเล่น พอลิพรอพิลีนเป็นไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและประกอบด้วยโครงสร้างที่ไม่อิมิตว่น้อยมาก หรือไม่มีเลยการสลับที่ของหมู่เมทิลไปตามคาร์บอนอะตอมบนสายโซ่โมเลกุลทำให้สมบัติของพอลิเมอร์แตกต่างกันได้มาก

มาย โดยหมู่เมทิลเป็นตัวกำหนดโครงสร้างแทกติกซิตี (Tacticity) ของพอลิเมอไรด์ โดยแบ่งเป็นแบบต่าง ๆ กันดังนี้

1. แบบ Isotactic เมื่อหมู่เมทิลทั้งหมดอยู่ด้านเดียวกันของสายโซ่โมเลกุล
2. แบบ Syndiotactic เมื่อหมู่เมทิลทั้งหมดอยู่สลับกันบนสายโซ่โมเลกุล
3. แบบ Atactic เมื่อหมู่เมทิลไม่อยู่กันเป็นระเบียบบนสายโซ่โมเลกุล



### แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิพรอพิลีน

ลักษณะการใช้งาน	เทอร์โมพลาสติก เส้นใย เทอร์โมพลาสติกยืดหยุ่น (thermoplastic elastomers)
มอนอเมอร์	พรอพิลีน
ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน	Ziegler-Natta polymerization, Metallocene catalysis polymerization
โครงสร้างพื้นฐานวิทยา(Morphology) :	ความเป็นอสัณฐานสูง (atactic), ความเป็นผลึกสูง(isotactic)
อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature) :	270 องศาเซลเซียส(100% isotactic)
อุณหภูมิคล้ายแก้ว(Glass transition temperature):	-17 องศาเซลเซียส

### สมบัติทางเคมีของพอลิพรอพิลีน [4, 9]

1. ความต้านทานต่อสารเคมี พอลิพรอพิลีนเป็นสารที่ไม่มีขั้ว (non polar) จึงแสดงสมบัติการต้านทานต่อสารเคมีได้เป็นอย่างดี โดยสามารถทนต่อกรด (ยกเว้น Oxidizing acid) เบส ได้
2. ความต้านทานต่อสภาพแวดล้อม พอลิพรอพิลีนมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบ Teritary มีการเกาะตัวของโมเลกุลอย่างไม่แน่นอนหนา ถูกย่อยสลายได้ง่าย ไม่ทนต่อสภาพแวดล้อม เช่น แสงแดด
3. ความสามารถในการติดไฟ พอลิพรอพิลีนติดไฟได้เองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส โดยสมบัติทางกลและสมบัติทางเคมีของพอลิพรอพิลีน แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิพรอพิลีน [10]

สมบัติ	วิธีการทดสอบ	ไฮโมพอลิเมอร์		
ดรรชนีการไหล	(ก)	3	0.7	0.2
ความต้านทานแรงดึงขาด (ปอนด์/ตารางนิ้ว) (เมกะพาสคัล)	(ข)	5000	4400	4200
ร้อยละการยืดตัวเมื่อขาด	(ข)	34	30	29
มอดูลัสการบิดโค้ง (ปอนด์/ตารางนิ้ว)(* 10 <sup>5</sup> ) (เมกะพาสคัล)	-	350	115	175
อุณหภูมิเปราะตัว (°C)	ici/ASTM D.476	1.9	1.7	1.6
จุดอ่อนตัวไวแคท (°C)	BS 2782	1310	1170	1100
ความแข็งตามสเกลรีคเวล (สเกล อาร์)	-	15	0	0
ความต้านทานแรงกระแทก (ฟุต-ปอนด์) (จูล)	(ค)	145-150	148	148
		95	90	90
		10	25	34
		13.5	34	46

(ก) ใช้พอลิเอทิลีนเกรดมาตรฐาน ขึ้นรูปครั้งละ 2.16 กิโลกรัม อุณหภูมิการขึ้นรูป 230 °C

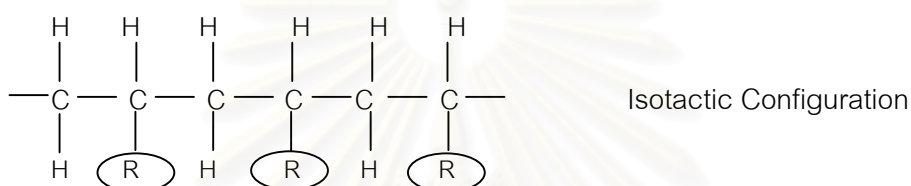
(ข) อัตราเร็วในการดึง (Straining Rate) 18 นิ้ว/นาที

(ค) ทดสอบโดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน ขนาดศูนย์กลาง 14 นิ้ว ทดสอบ ณ อุณหภูมิ 20 °C

ในปี ค.ศ.1954 แนนตาได้นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ซีเกอร์ค้นพบมาใช้ในการเตรียมพอลิพรอพิลีน โดยปรับปรุงรูปแบบของตัวเร่งปฏิกิริยา และได้พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไป ซึ่งมีผลทำให้สมบัติแตกต่างกันออกไป เช่น ไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีนที่มีความหนาแน่นสูงเหมือนพอลิเอทิลีนแต่มีจุดอ่อนตัวสูงกว่าและแข็งแรงกว่าโครงสร้างทางเคมีส่วนใหญ่ของพอลิพรอพิลีนจะมีหมู่เมทิล

(Methyl group) เกาะบนโซ่หลักของโมเลกุล (Main chain) พอลิพรอพิลีนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนสายโซ่โมเลกุลหลักได้แก่

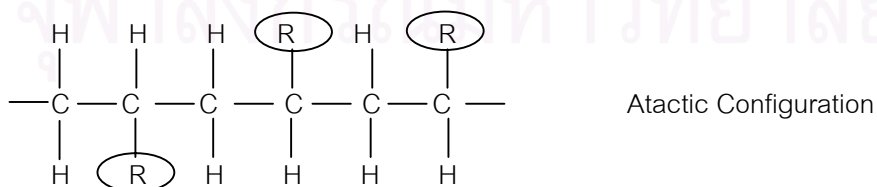
I) ไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน (Isotactic polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลด้านเดียวกันบนโซ่โมเลกุลหลัก ลักษณะเช่นนี้โครงสร้างโมเลกุลมีความเป็นระเบียบสูงส่งผลทำให้การตกผลึกดีที่สุดสังเคราะห์ได้ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ Heterogenous ของ Titanium (III) chloride กับตัวเร่งร่วมกับสารประกอบ Organoaluminium เช่น Diethylaluminium chloride



#### สมบัติของไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน [8]

สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิพรอพิลีนนอกจากขึ้นอยู่กับโครงสร้างที่เป็นแบบไอโซแทกติกแล้ว ยังขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วย ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของพอลิพรอพิลีนทางการค้า ซึ่งทำการผลิตจากแหล่งเดียวกัน ทดสอบวิธีเดียวกัน และมีปริมาณโครงสร้างไอโซแทกติกใกล้เคียงกันมาก แต่น้ำหนักโมเลกุลต่างกัน ปรากฏว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น คือเมื่อลดดัชนีการไหล (Melt Flow Index) ลดลง พลาสติกจะมีความต้านทานแรงดึงขาด ความแข็งดึง ความแข็ง และ อุณหภูมิจุดเปราะต่ำลง ในขณะที่ความต้านทานแรงกระแทกสูงขึ้น

#### II) อะแทกติกพอลิพรอพิลีน



อะแทกติกพอลิพรอพิลีน (Atactic polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนโซ่พอลิเมอร์หลักอย่างไม่เป็นระเบียบลักษณะเช่นนี้ทำให้มีการตกผลึกน้อยที่สุด

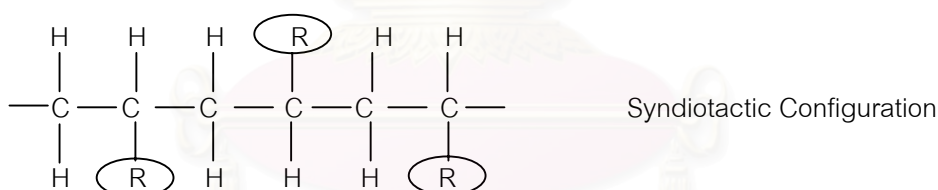


สังเคราะห์จากกรดลิวอิส และสารประกอบ Organometallic เกิดเป็นโครงสร้างของอะแทกติกพอลิพรอพิลีน

อะแทกติกพอลิพรอพิลีน สามารถทำการผลิตได้โดยตรง หรือเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต ตามปกติพอลิพรอพิลีน ชนิดเอแทกติกอย่างสมบูรณ์ จะมีโครงสร้างอสัณฐาน แต่ในทางการค้ายังมีส่วนที่เป็นผลึกหลงเหลืออยู่บ้าง น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 20,000 - 80,000 และมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.86 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร อะแทกติกพอลิพรอพิลีนมีลักษณะอยู่กึ่งกลางระหว่างไซ และยาง สามารถทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนได้เช่นเดียวกับไอโซแทกติกพอลิพรอพิลีน แต่อะแทกติกพอลิพรอพิลีนจะเกิดการบวมอย่างมากในสารไฮโดรคาร์บอนทั้งประเภทอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว และรวมตัวได้ดีกับตัวเติมจำพวกแรบิโทมินัส และเรซินต่าง ๆ

ในอดีตอะแทกติกพอลิพรอพิลีนเป็นผลพลอยได้ที่ไม่เป็นที่ปรารถนาในการผลิต แต่ในปัจจุบันเริ่มมีการนำมาใช้งานมากขึ้นในยุโรปใช้ผสมกับบิโทมินัส เพื่อใช้ทำรอยต่อต่าง ๆ การผสมพลาสติกชนิดนี้จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดีขึ้น

III ) ซินดีโอแทกติกพอลิพรอพิลีน (Syndiotactic polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิล (Methyl group) สลับกันบนโซ่โมเลกุลหลักอย่างเป็นระเบียบทำให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบลดลงมีผลทำให้การตกผลึกลดลงด้วย



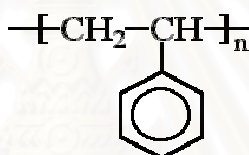
การใช้ประโยชน์ของพอลิพรอพิลีน [4, 8]

ปัจจุบันได้มีการใช้พอลิพรอพิลีนอย่างกว้างขวาง มีการปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับประโยชน์ใช้งาน เช่น โพลิพรอพิลีน เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานประเภทที่ต้องการสมบัติด้านทนทานต่อสภาพแวดล้อมและทนความร้อนได้ดี นิยมนำมาทำกล่องพลาสติก ส่วนพอลิพรอพิลีนโคโพลิเมอร์มีสมบัติด้านทนทานการกระแทกสูง มีจุดเปราะต่ำที่อุณหภูมิห้อง นิยมใช้ผลิตเป็นวัสดุหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น ชิ้นส่วนเครื่องซักผ้า ตัวถัง และกันชนรถยนต์ นอกจากนี้ได้มีการพยายามที่จะปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของพอลิพรอพิลีนให้สมบัติทนทานในการรับแรงกระแทก หรือทนต่อ ความร้อน อุณหภูมิสูงได้ โดยผสมพอลิพรอพิลีนกับวัสดุจำพวกยางเพื่อผลิตเป็นชิ้นส่วน

ของรถยนต์ เช่น กันชน หน้าปัด หรือการผสมพอลิพรอพิลีนกับทัลค์ (Talc) เพื่อให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ทนต่อความร้อน และอุณหภูมิ

### 2.1.2.2 พอลิสไตรีน [9, 11, 12, 13]

พอลิสไตรีนเริ่มผลิตเมื่อปี ค.ศ. 1925 สมบัติของพอลิสไตรีน คือ โปร่งใส ขึ้นรูปง่าย ราคาถูกผสมสีง่ายและเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี แต่พอลิสไตรีนมีข้อเสียคือทนแรงกระแทกได้น้อย (Low impact strength) จึงทำให้มีการพัฒนาสมบัติทางด้านนี้โดยการเติมบิวทาไดอีนเพราะจะทำให้มีสมบัติทนแรงกระแทกได้มากขึ้น รวมทั้งเพิ่มความมันเงาและสมบัติการทนต่อสารเคมีมากขึ้นด้วย ซึ่งเรียกพอลิเมอร์ชนิดนี้ว่า พอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูงหรือฮิปส์ (high impact polystyrene, HIPS) แต่มีข้อเสียคือจะมีความใส่น้อยลงโดยคุณสมบัติแสดงดังภาพข้างล่าง



ลักษณะโครงสร้างของพอลิสไตรีน PS

ลักษณะการใช้งาน	เทอร์โมพลาสติก
มอนอเมอร์	สไตรีน
ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน	Free radical chain polymerization
(atactic),	
	Ziegler-Natta polymerization
(syndiotactic)	
โครงสร้างสัญญาณวิทยา(Morphology):	ความเป็นอสัญฐานสูง (atactic), ความเป็นผลึกสูง (syndiotactic)
อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature) :	270 องศาเซลเซียส(syndiotactic)
อุณหภูมิคล้ายแก้ว(Glass transition temperature):	100 องศาเซลเซียส

พอลิสไตรีนเป็นสารที่โมเลกุลใหญ่ เกิดจากสไตรีนโมโนเมอร์ประมาณ 2000-3000 หน่วยมาต่อกันโดยทั่วไปพอลิสไตรีนที่ใช้ในทางการค้าแบ่งเป็น 3 แบบ คือ แบบไหลง่าย (easy-flow) แบบไหลปานกลาง (intermediate-flow) และ แบบใช้ความร้อนสูง (high heat) โดยสมบัติทาง

กายภาพขึ้นกับมวลโมเลกุล การแจกแจงมวลโมเลกุล (molecular weight distribution) และการเติมสารเติมแต่ง

แบบไหลง่าย (Easy-flow) เป็นเรซินที่มีมวลโมเลกุลต่ำที่สุด มีการเติมน้ำมันลงไป 3-4 % เพื่อช่วยลดความหนืด (melt viscosity) และเพิ่มดัชนีการไหล (melt flow rates > 20 g/10 min ที่ 392 °C) โดยเมื่อความหนืดลดลงจะทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ส่วนใหญ่จะใช้การขึ้นรูปแบบฉีด (injection molding)

แบบไหลปานกลาง (Intermediate-flow) จะมีการเติมน้ำมันธรรมชาติลงไป 1-2 % ซึ่งจะช่วยให้พอลิสไตรีนประเภทนี้มีลักษณะการไหลและสมบัติทางกายภาพอยู่ระหว่างแบบไหลง่ายและแบบใช้ความร้อนสูง

แบบใช้ความร้อนสูง (High-heat) เป็นพอลิสไตรีนที่มีมวลโมเลกุลสูงมากและประกอบด้วยสารเติมแต่งน้อยที่สุด ไม่มีการเติมน้ำมัน หรือสารเพิ่มการไหล ต้องใช้ความร้อนสูงในการขึ้นรูป อาจมีการเติมสารประเภท กรดสเตียริก ช่วยในการทำให้หลุดจากแม่พิมพ์ได้ง่าย ซึ่งพอลิสไตรีนประเภทนี้จะสามารถทนต่อความร้อนได้สูงและสามารถแตกได้ง่ายกว่าพอลิสไตรีนประเภทอื่น

### ประโยชน์ของพอลิสไตรีน [13]

ผลิตภัณฑ์คริสตัลพอลิสไตรีน มีลักษณะโปร่งใสสามารถนำมาฉีดใส่แบบพิมพ์ (mold) หรือนำมาขึ้นรูป โดยพอลิสไตรีนที่นำมาฉีดใส่แบบพิมพ์จะนำไปใช้ในการทำเครื่องเสียง เทปคาสเซต กล้องใสแผ่นดิสก์ เครื่องใช้ในสำนักงาน เครื่องใช้ในบ้าน ของเล่น เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์อิมแพคเกรดพอลิสไตรีน (impact polystyrene) มีลักษณะทึบแสงแต่มีค่าทนต่อแรงกระแทก (impact strengths) สูงกว่า เมื่อเทียบกับคริสตัลพอลิสไตรีน โดยจะมีการเติมยางเพื่อเพิ่มค่าทนแรงกระแทกและค่าการยืดตัว แต่จะทำให้ความใสและความตึง (stiffness) ลดลง อิมแพคและคริสตัลพอลิสไตรีนจะเสื่อมสลายลงอย่างรวดเร็วเมื่อโดนแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้งานกลางแจ้งถ้าไม่ได้เติมสารเติมแต่งที่เหมาะสมเพื่อป้องกันแสง

อิมแพคพอลิสไตรีนสามารถนำมาฉีดใส่แบบพิมพ์เพื่อทำเป็น ชั้นวางเครื่องเสียง เครื่องใช้ภายในบ้าน เทปวีดีโอ เพอร์นิเจอร์ และสามารถนำมาขึ้นรูป เพื่อใช้ทำกระเป๋าเดินทาง ที่บรรจุประตู่ตู้เย็น ภาชนะใส่อาหาร เป็นต้น

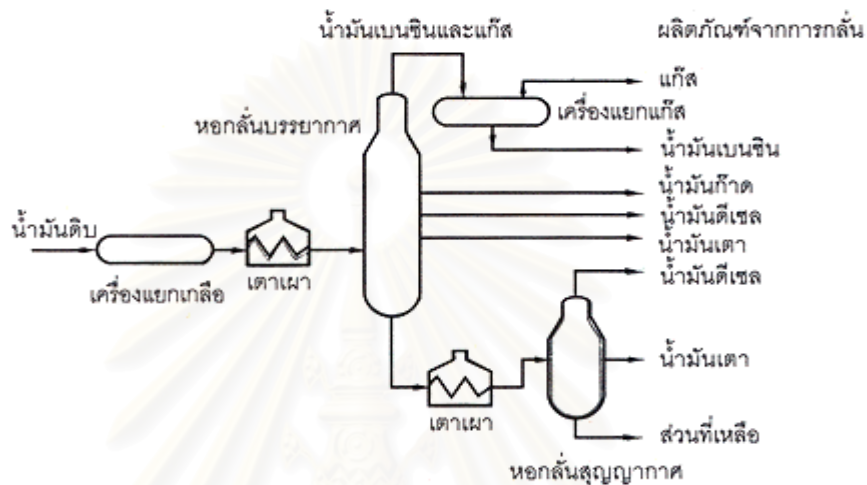
## 2.2 น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating oil) [14, 15]

สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมาย ซึ่งถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็นสี่ชนิด คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งแข็ง (semi solid) และของแข็งในจำนวนของสารหล่อลื่นทั้งหมดที่ใช้กันสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุด รองลงมาคือ สารกึ่งแข็งซึ่ง ได้แก่ จาระบี การที่สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนิยมใช้กันแพร่หลายมากนั้นเพราะสามารถแยกผิววัตถุทั้งสองได้อย่างสมบูรณ์และสามารถรับแรงที่กระทำได้มากของเหลวที่ใช้เป็นสารหล่อลื่นมีสารละลายกับน้ำ (aqueous solution) น้ำมันแร่ (mineral oil) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ และน้ำมันสังเคราะห์ในบรรดาสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนี้ น้ำจะมีการใช้งานค่อนข้างจำกัด เช่น ใช้ในการหล่อลื่นแบริ่งไม้ หรือแบริ่งยางของกังหันวิดน้ำหรือเครื่องสูบน้ำบางประเภทส่วนสารละลายกับน้ำจะใช้เฉพาะในการหล่อลื่นชิ้นงานของเครื่องกลึง เครื่องเจียระไนและเครื่องไสเป็นหลัก สำหรับสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวที่ใช้กันมากที่สุดคือ น้ำมันหล่อลื่นซึ่งจะมีอยู่สองชนิดคือ น้ำมันแร่และน้ำมันสังเคราะห์ ส่วนน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ไม่เป็นที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีราคาแพง

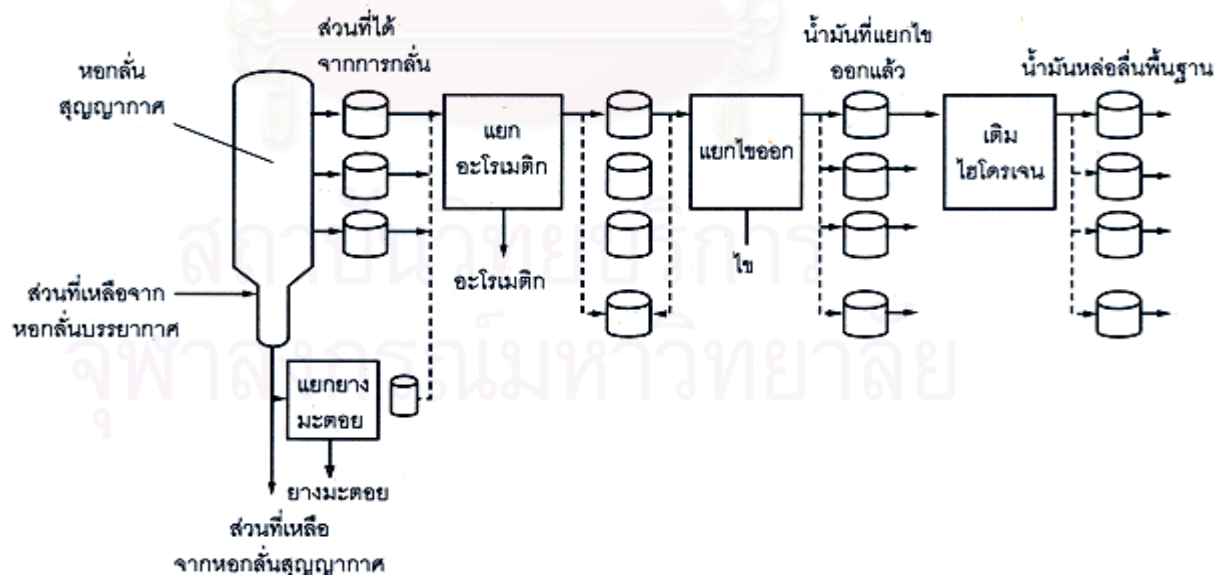
### 2.2.1 น้ำมันแร่

น้ำมันแร่เป็นน้ำมันที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ (crude oil) น้ำมันหล่อลื่นได้มาจากส่วนที่หนักของน้ำมันดิบที่เหลือจากการกลั่นเอาส่วนที่เบา ได้แก่ ก๊าซน้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด และน้ำมันดีเซลออกไปโดยหอกลั่นบรรยากาศ (atmospheric tower) ตามที่แสดงในรูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นจากน้ำมันดิบเริ่มต้นจากการนำเอา ส่วนที่เหลือจากหอกลั่นบรรยากาศเข้าไปกลั่นอีกครั้งหนึ่งในหอกลั่นสุญญากาศ (vacuum tower) เพื่อแยกส่วนที่เหลือออกจากหอกลั่นบรรยากาศออกเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีจุดเดือด (boiling point) เหมือนกันโดยความดันในหอกลั่นสุญญากาศจะมีค่าต่ำกว่าหนึ่งส่วนสิบของความดันบรรยากาศทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการแยกสลาย (cracking) ที่อุณหภูมิสูง คุณสมบัติที่สำคัญที่ถูกควบคุมโดยการกลั่นสุญญากาศก็คือความหนืด (viscosity) จุดวาบไฟ (flash point) และกากคาร์บอน (carbon residue) ซึ่งก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดต่าง ๆ กันออกมาหลังจากที่ออกจากหอกลั่นสุญญากาศแล้วก็จะนำไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อแยกส่วนที่ไม่ต้องการออกให้เหลือผลิตภัณฑ์หรือน้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติตามต้องการ ตัวอย่าง ของกระบวนการเหล่านี้ได้แก่ กระบวนการแยกยางมะตอยออกโดยใช้โพรเพนเป็นสายละลาย (propane deasphalting) กระบวนการแยกเอาสารประกอบพวกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (aromatic compounds) ออกจากพวกที่ไม่ใช่อะโรแมติก (nonaromatic compound) ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น ได้แก่ การเพิ่มเสถียรภาพในด้านความร้อนและการรวมตัวกับออกซิเจนและเพิ่มดัชนีความ

หนืด (viscosity index) กระบวนการอันดับต่อไปก็คือกระบวนการแยกเอาไขออก (dewaxing) เพื่อลดจุดไหลเทให้ต่ำลงให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำส่วนกระบวนการสุดท้ายก็คือการเติมไฮโดรเจน (hydro - finishing) เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดสีและสารที่ไม่เสถียรทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีสีจางลงและช่วยเพิ่มคุณสมบัติบางประการกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นดังกล่าวได้แสดงไว้ตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 การกลั่นน้ำมันดิบ [14, 15]



รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น [14, 15]

น้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากการผลิตตามกระบวนการผลิตดังกล่าวเรียกว่า น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (lube base stock) ซึ่งโดยทั่วไปยังไม่สามารถนำไปใช้ในการหล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลได้ ทั้งนี้เนื่องจากยังมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเสียก่อน วิธีที่นิยมใช้กันก็คือการใส่สารเพิ่มคุณภาพ (additives) เข้าไป

## 2.2.2 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ [14, 15]

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบนั้น แม้ว่าจะผ่านกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบนั้นหรือจะผ่านกระบวนการมากมายที่ใช้กำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออกไปแต่น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้ออกมานั้นยังคงเป็นของผสมของสารประกอบหลายตัว ซึ่งไม่มีทางที่จะเลือกเอาเฉพาะสารที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดได้ หรือถ้ามีก็จะได้ผลผลิตต่ำทำให้การผลิตไม่คุ้มค่านั่นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่จึงมีคุณสมบัติเฉลี่ยของของผสมซึ่งประกอบด้วยสารประกอบที่เหมาะสมมากที่สุดและน้อยที่สุดเป็นผลให้น้ำมันเริ่มข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันสังเคราะห์ขึ้นมา น้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ได้จากกระบวนการทางเคมีซึ่งเป็นการรวมตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำให้ได้น้ำมันที่มีความหนืดเพียงพอที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่น โดยสารประกอบเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิตน้ำมันสังเคราะห์มักจะได้มาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และเนื่องจากน้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันที่สร้างขึ้นจากกระบวนการเคมีจึงสามารถควบคุมให้มีโครงสร้างโมเลกุลตามที่ต้องการและมีคุณสมบัติตามที่คาดหวังไว้ได้

ข้อได้เปรียบที่สำคัญของน้ำมันสังเคราะห์ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ สามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าน้ำมันแร่ คือใช้ได้ทั้งอุณหภูมิที่ต่ำกว่าและสูงกว่าของน้ำมันแร่ นอกจากนี้ น้ำมันสังเคราะห์บางประเภทยังให้คุณสมบัติเฉพาะ เช่น ผสมเข้ากันกับน้ำได้และไม่ติดไฟ เป็นต้น

สำหรับน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ที่ใช้กันอยู่สามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม คือ

1. ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์ (synthesized hydrocarbons) ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ได้มาจากน้ำมันดิบที่ใช้กันมากมีอยู่สามชนิด คือ โอลิฟินโอลิโกเมอร์ (olefin oligomers), อัลคิลเลเตดอะโรมาติ (alkylated aromatics) และโพลิบิวทีน (polybutenes) ข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ มีความมั่นคง ที่อุณหภูมิสูง อายุการใช้งานยาวมีดัชนีความหนืดสูง มีการไหลที่อุณหภูมิต่ำไม่มีไข และมีการระเหยต่ำ

2. เอสเทอร์อินทรีย์ (organic esters) เป็นสารหล่อลื่นที่ได้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสารหล่อลื่นของเครื่องยนต์เจ็ทของอากาศยานและใช้ในระบบไฮดรอล

ลิก เป็นต้น เอสเทอร์อินทรีย์ที่ใช้กันมีอยู่สองชนิดชนิดแรก คือ ไดเบสิกเอซิดเอสเตอ์ (dibasic acid esters) บางครั้งเรียกว่าไดเอสเทอร์ (diesters) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง ไดเบสิกเอซิด (dibasic acid) กับโมโนไฮดรอลกอฮอล์ (monohydric alcohol) อีกชนิดหนึ่งก็คือ โพลีโอลเอสเทอร์ (polyol esters) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างโพลีไฮดรอลกอฮอล์ (polyhydric alcohol) กับโมโนเบสิกเอซิด (monobasic acid) ข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับ น้ำมันแร่ก็คือ มีความมั่นคงที่อุณหภูมิสูง มีการไหลที่อุณหภูมิต่ำ และมีอายุการใช้งานยาว

3. **พอลิไกลคอลส์ (polyglycols)** เป็นสารหล่อลื่นที่มีจุดเดือดสูงและจุดไหลเทต่ำ เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ใช้เป็นน้ำมันเบรกและน้ำมันไฮดรอลิกที่ติดไฟได้

4. **ฟอสเฟตเอสเทอร์ (phosphate esters)** เป็นสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติทนไฟ จึงใช้เป็นน้ำมันไฮดรอลิกสำหรับอากาศยานและน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟด้วย

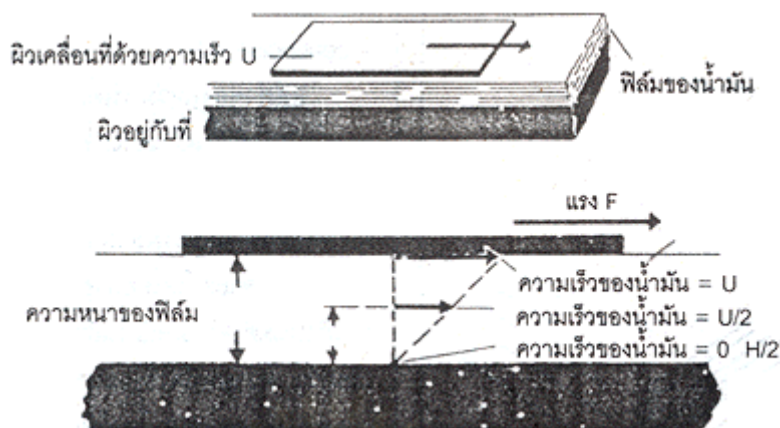
5. **น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์อื่น** ได้แก่ ซิลิโคนซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่มีดัชนีความหนืดสูงมาก (300 หรือ มากกว่า) และมีจุดไหลเทต่ำ จึงเหมาะสมสำหรับการใช้งานในช่วงอุณหภูมิกว้าง และใช้เป็นน้ำมันไฮดรอลิกในกรณีพิเศษ เช่น ใช้เป็นสปริงของเหลวและซิลิเคตเอสเทอร์ (Silicate esters) เป็นสารหล่อลื่นที่มีดัชนีความหนืดสูงและจุดไหลเทต่ำเช่นกัน

แม้ว่าน้ำมันสังเคราะห์จะมีคุณสมบัติโดยทั่วไปดีกว่าน้ำมันแร่ก็ตามแต่สำหรับการนำไปใช้งานบางประเภทน้ำมันสังเคราะห์ก็อาจจะยังไม่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมทุกด้าน จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันสังเคราะห์ โดยการใส่สารเพิ่มคุณภาพเข้าไปเช่นเดียวกับการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันแร่

### 2.2.3 สมบัติของน้ำมันหล่อลื่น [14, 15]

น้ำมันหล่อลื่นประเภทน้ำมันแร่นั้นมีหลายชนิดแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกใช้ จึงจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น และในการผลิตก็จะต้องมีการควบคุมคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นให้ได้ตามต้องการสำหรับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่สำคัญทั้งคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์และเคมีมีดังต่อไปนี้

1. **ความหนืด (viscosity)** ถือว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่นเนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัสและมีผลต่อการเกิดความร้อนขึ้นในระหว่างผิวสัมผัสที่มีการหล่อลื่นด้วยน้ำมัน ความหนืด หมายถึง ความข้นหรือความใสของน้ำมัน เป็นคุณสมบัติของของไหลซึ่งวัดในรูปของความต้านทานในการไหล

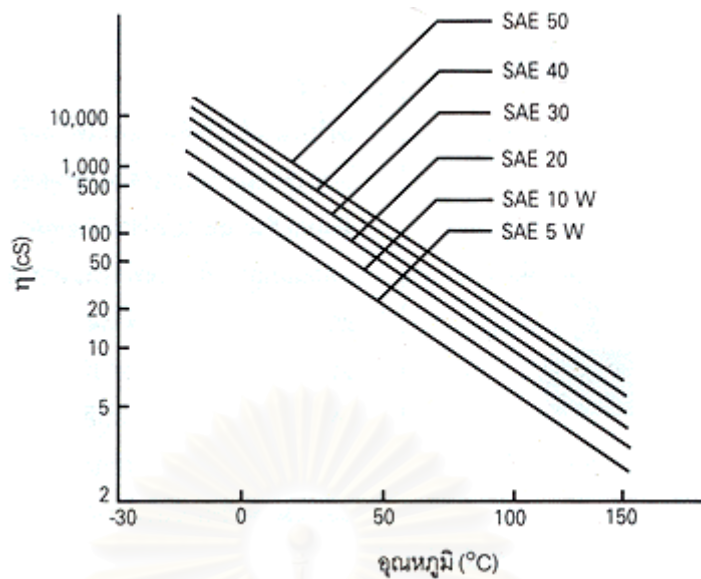


รูปที่ 2.4 หลักการของความหนืด [14, 15]

หลักการของความหนืดตามที่แสดงในรูปที่ 2.4 ประกอบด้วยแผ่นวัตถุถูกดึงไปบนฟิล์มของน้ำมันด้วยความเร็วสม่ำเสมอฟิล์มของน้ำมันติดอยู่กับผิววัตถุที่เคลื่อนที่และที่อยู่กับที่ซึ่งเมื่อพิจารณาให้น้ำมันประกอบขึ้นด้วยชั้นน้ำมันหลายๆ ชั้น ชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่เคลื่อนที่ก็เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเดียวกับผิวที่เคลื่อนที่ ( $U$ ) ส่วนชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่อยู่กับที่ก็จะมีความเร็วเป็นศูนย์ชั้นน้ำมันที่อยู่ระหว่างชั้นบนสุดและชั้นล่างสุดก็จะถูกดึงไปด้วยชั้นน้ำมันที่อยู่ด้านบนถัดไปให้มีความเร็วส่วนหนึ่งของความเร็ว  $U$  ซึ่งความเร็วของแต่ละชั้นของน้ำมันดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากผิววัตถุที่อยู่กับที่แรง ( $F$ ) ที่ต้องใช้ในการดึงให้ผิววัตถุอันบนเคลื่อนที่ไปนี้ก็คือ แรงที่ต้องเอาชนะความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นน้ำมันนั่นเอง และเนื่องจากแรงนี้เป็นผลมาจากความหนืด โดยแรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนืด ดังนั้นความหนืดก็สามารถได้จากการวัดแรงที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทานของน้ำมันความหนืดที่หาได้ในที่นี้เรียกว่า ความหนืดสัมบูรณ์ หรือความหนืดเชิงพลศาสตร์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นบางชนิด [14, 15]

ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะไม่คงที่แต่จะแปรผันตามสภาวะการใช้งานโดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผัน กับอุณหภูมิและความดันในการใช้งานในด้านของอุณหภูมิความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมันซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของเหลวจะขยายตัวโมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนออกห่างกันทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ลดลงและเป็นผลให้ความหนืดลดลงด้วย แสดงดังรูปที่ 2.5 เป็นกราฟแสดงถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดเชิงพลศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่น และเนื่องจากความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงน้อยมากกับอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดเชิงพลศาสตร์ได้ด้วย นอกจากแสดงด้วยกราฟแล้วผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดก็ยังสามารถแสดงได้ด้วยสมการแต่เป็นเพียงสมการโดยประมาณเท่านั้น

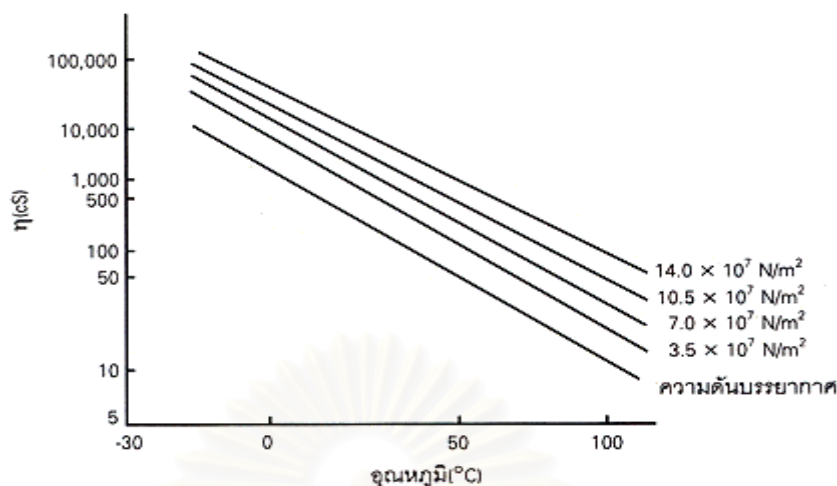
$$\log \eta = A + B / T$$

$$\eta = \text{ความหนืดเชิงพลศาสตร์}$$

$$A \text{ และ } B = \text{ค่าคงที่ (ขึ้นอยู่กับชนิดของของเหลว)}$$

$$T = \text{อุณหภูมิสัมบูรณ์}$$

สำหรับผลของความดันต่อความหนืดนั้น จะเห็นได้ชัดเจนก็ต่อเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นมาก ซึ่งเมื่อความดัน ของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นโมเลกุลของน้ำมันก็จะถูกบีบให้เข้าใกล้กันทำให้แรงยึดติดระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น และเป็นผลให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นด้วย รูปที่ 2.6 แสดงถึงผลของความดันที่มีต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ซึ่งความหนืดจะเปลี่ยนแปลงจนเห็นได้ชัดเจนเมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ  $2 \times 10^7 \text{ N/m}^2$  (Pascal)



รูปที่ 2.6 ผลของความดันต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 [14, 15]

และเมื่อความดันเพิ่มเป็น  $3.5 \times 10^7 \text{ N/m}^2$  ความหนืดก็จะเพิ่มเป็นสองเท่าของความหนืดที่ความดันบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงของความหนืดอันเนื่องมาจากความดันสามารถแสดงได้ด้วยสมการโดยประมาณ คือ

$$\eta = \eta_0 e^{\alpha P}$$

$$\eta = \text{ความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่ความดัน } P$$

$$\eta_0 = \text{ความหนืดเชิงพลศาสตร์ที่ความดันบรรยากาศ}$$

$$P = \text{ความดันของน้ำมันหล่อลื่น}$$

$$\alpha = \text{สัมประสิทธิ์ของความดันกับความหนืด}$$

$$e = 2.71828$$

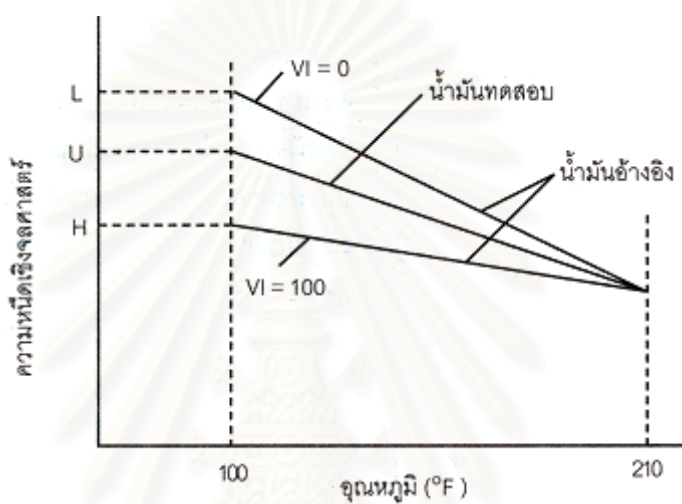
2. ดัชนีความหนืด (viscosity index) น้ำมันหล่อลื่นต่างชนิดกันจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดดัชนีความหนืดขึ้นมาเพื่อใช้แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิโดยใช้การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่จะหาดัชนีความหนืดกับน้ำมันหล่อลื่นที่เลือกสองชนิด เช่น น้ำมันหล่อลื่น Gulf Coast ซึ่งความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิมากให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 0 และน้ำมันหล่อลื่น Pennsylvanian ซึ่งความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิน้อยให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 100

การหาดัชนีความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นกระทำได้โดยการหาความหนืดเชิงจลศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่น ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 100°F และ 120°C แล้วหาค่าดัชนีความหนืดตามสมการคือ

$$V.I. = \frac{L-U}{L-H} \times 100$$

V.I. = ดัชนีความหนืด (viscosity index)

ค่า L, U และ H แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การหาค่าดัชนีความหนืด [14, 15]

3. **กากคาร์บอน** (carbon residue) หมายถึง สิ่งที่ตกค้างอยู่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายหลังจากเผาไหม้น้ำมันหล่อลื่นในสภาวะที่กำหนด ปริมาณกากคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นจะไม่ค่อยมีความสำคัญนักสำหรับการใช้งาน เนื่องจากจะไม่มีคาร์บอนไหม้โดยตรงของน้ำมันหล่อลื่นในการนำไปใช้งาน แต่ปริมาณกากคาร์บอนจะมีความสำคัญสำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงเพราะจะมีการเผาไหม้โดยตรง ดังนั้นการหาปริมาณกากคาร์บอน ในน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจึงเป็นการหาสำหรับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเพื่อดูว่าขบวนการผลิตเป็นไปตามกำหนดหรือไม่

4. **สี** (color) สีของน้ำมันหล่อลื่นที่เห็นเมื่อมีแสงผ่านนั้นจะมีสีต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ใสมากจนถึงดำ ซึ่งอาจ มีสีเหลือง แดง และน้ำตาล เป็นต้น ความแตกต่างกันของสีของน้ำมันหล่อลื่นเป็นผลมาจากชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นแตกต่างกันทั้งวิธีการกลั่นและผลิตจำนวน และชนิดของสารเพิ่มคุณภาพ ดังนั้นสีของน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปจึงไม่มีความสำคัญนักในด้านการใช้งานยกเว้นกรณีที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา

5. **ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ** (density and gravity) ความหนาแน่น หมายถึง มวลของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนด ส่วนความถ่วงจำเพาะ (ความหนาแน่นสัมพัทธ์) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันและความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกันในสหรัฐอเมริกา มักนิยมกำหนดค่าความถ่วงจำเพาะในรูปของหน่วย องศา API (American Petroleum Institute) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\text{องศา API} = \frac{141.5}{\text{Sp.gr.}_{60/60^\circ\text{F}}} - 131.5$$

องศา API = องศา API ที่  $60^\circ\text{F}$  Sp gr  $60/60^\circ\text{F}$  = ความถ่วงจำเพาะของน้ำมันที่  $60^\circ\text{F}$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเมื่อค่าองศา API เพิ่มค่าความถ่วงจำเพาะจะลดลง ค่าความถ่วงจำเพาะนี้จะเป็นตัวช่วยในการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันหล่อลื่น เครื่องยนต์ที่ใช้แล้วซึ่งถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะลดลง (ค่าองศา API เพิ่มขึ้น) ก็อาจแสดงว่ามีน้ำมันเชื้อเพลิงเข้ามาผสมกับน้ำมันหล่อลื่นและถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นก็อาจแสดงว่ามีสิ่งแปลกปลอม เช่น เชม่า หรือสารที่เกิดจากการรวมตัวกับออกซิเจนผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่น

6. **จุดวาบไฟและจุดติดไฟ** (flash and fire points) หมายถึงอุณหภูมิที่น้ำมันระเหยกลายเป็นไอ เพียงพอที่ผิวและสามารถลุกไหม้ได้เมื่อโดนเปลวไฟแต่ที่อุณหภูมินี้การระเหยกลายเป็นไอจะไม่เพียงพอที่จะทำให้การลุกไหม้คงอยู่ต่อไป เปลวไฟจึงดับลงเองทันที แต่หากมีการให้ความร้อนแก่น้ำมันต่อไปอีกอุณหภูมิก็จะสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่การระเหยกลายเป็นไอเพียงพอที่จะทำให้เกิดลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่องอุณหภูมินี้ เรียกว่า จุดติดไฟ จุดวาบไฟของน้ำมันหล่อลื่นใหม่จะแปรผันกับความหนืดโดยน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงก็จะมีจุดวาบไฟสูงด้วย นอกจากนี้ชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานก็มีผลต่อจุดวาบไฟด้วย จุดวาบไฟ และจุดติดไฟของน้ำมันใช้ในการควบคุมการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและใช้ในการพิจารณาในด้านความปลอดภัยในการทำงาน

7. **จุดไหลเท** (pour point) หมายถึง อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันหล่อลื่นจะเริ่มไหลภายใต้สภาวะที่กำหนดซึ่งน้ำมันทั่วไปจะมีไขส่วนหนึ่งละลายอยู่ด้วย เมื่อน้ำมันเย็นไขก็จะตกผลึกและเกาะกันเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงโดยกักเอาน้ำมันไว้และเมื่อผลึกของไขเกิดขึ้นมากพอ น้ำมันก็จะไม่สามารถไหลได้ต่อไป ความสำคัญของจุดไหลเทจะขึ้นอยู่กับสภาวะของการทำงาน ตัวอย่างเช่น ในประเทศหนาวจะต้องเลือกใช้ น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำเพื่อให้ น้ำมันสามารถไหลได้ถึงแม้อุณหภูมิของอากาศโดยรอบจะต่ำในทางตรงกันข้ามน้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำก็ไม่มีมีความจำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงตลอดเวลา

8. **ตัวเลขความเป็นกลาง** (neutrallization number) น้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่เล็กน้อยซึ่งสภาพความเป็นกรดนี้จะวัดเป็นปริมาณของเบสมาตรฐานที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำมันมีสภาพเป็นกลางสภาพความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจน (oxidation) ซึ่งทำให้เกิดกรดอินทรีย์ขึ้นสภาพความเป็นกรดนี้อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นส่วนที่เป็นโลหะได้ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นโดยเฉพาะน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลจึงนิยมเติมสารเพิ่มคุณภาพที่มีสารที่เป็นด่างเข้าไปเพื่อให้สารที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งมีสภาพเป็นกรดให้มีสภาพเป็นกลาง และเมื่อน้ำมันหล่อลื่นไปใช้งานอัตราการสิ้นเปลืองสารที่เป็นด่างที่ตรวจสอบได้ก็จะเป็นตัวชี้ถึงอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น การวัดความเป็นด่างนี้จะวัดใน รูปของจำนวนเบสทั้งหมด

## 2.2.4 ปริมาณการใช้น้ำมันหล่อลื่นในประเทศไทย [16]

ปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยเจริญเติบโตมากขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งน้ำมันหล่อลื่นมีความจำเป็นต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อีกทั้งมีการใช้รถยนต์ชนิดต่าง ๆ มากขึ้นอย่างต่อเนื่องจึงทำให้ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นไม่เพียงพอต่อความต้องการโดยในปี 2547 ประเทศไทยมีการใช้รถยนต์นั่งทุกชนิดเพิ่มขึ้นจากปี 2546 มากกว่า 2 ล้านคัน ซึ่งต้องใช้น้ำมันหล่อลื่นเฉพาะสำหรับรถยนต์นั่งรวมกันประมาณ 50 ล้านลิตรต่อปี และหากรวมถึงน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมด้วย จะต้องใช้น้ำมันหล่อลื่นมากกว่า 45,045 ล้านลิตรต่อปี จึงต้องมีการพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันหล่อลื่นจากต่างประเทศเพื่อใช้ในกระบวนการต่าง ๆ โดยปริมาณการนำเข้าน้ำมันหล่อลื่นของประเทศไทยแสดงดังตารางที่ 2.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการนำเข้าน้ำมันหล่อลื่นภายในประเทศไทย [17]

ปี	ปริมาณการนำเข้า (ล้าน ลิตร)
2535	16,148
2536	18,794
2537	21,336
2538	26,558
2539	36,844
2540	42,348
2541	39,446
2542	40,535
2543	39,242
2544	41,368
2545	42,279
2546	45,045

### 2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา [18, 19]

เป็นสารที่เติมลงไปในปฏิกิริยาในจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับสารตั้งต้นแล้วทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้นโดยที่ตัวสารเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหลังจากปฏิกิริยาเสร็จสิ้น โดยสมดุลของปฏิกิริยาไม่เปลี่ยน

#### 2.3.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ไม่รบกวนสมดุลของปฏิกิริยา
2. ช่วยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา ( $E_a$ )
3. ต้องเป็นสารเสมอ

### ปฏิกิริยาอะคะตะไลซิส (Catalytic reaction หรือ Catalysis) [18, 19, 20, 21]

สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. **ปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalytic Reaction)** เป็นปฏิกิริยาที่ทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นอยู่ในสถานะเดียวกัน เช่น การสังเคราะห์  $\text{CH}_3\text{COOH}$  จาก  $\text{CH}_3\text{OH}$  และ  $\text{CO}$  โดยใช้ rhodium complex  
ประเภทของปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสแบบเอกพันธ์
  - 1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแก๊ส ได้แก่ Nitrogen oxide ในปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Sulfur dioxide ในกระบวนการผลิตกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$
  - 1.2 สภาพที่เป็นของเหลว เช่น การใช้กรดและเบสในกระบวนการไฮโดรลิซิสของพอลิเอสเตอร์
2. **ปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalytic Reaction)** เป็นปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยามีสถานที่ต่างกัน ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของโพรเพน
3. **ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอนไซม์ (enzyme) Enzymatic Catalysis** มีทั้งแบบเอกพันธ์และแบบวิวิธพันธ์ ส่วนใหญ่ที่ใช้กันในปัจจุบันเป็นแบบเอกพันธ์ (เอนไซม์เป็น mobilized enzyme) แต่ได้มีการพัฒนา immobilized enzyme ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์

#### 2.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา [21]

1. **วิธีการตกตะกอน (Precipitation Method)** เป็นการผสมสารละลาย 2 ชนิด หรือมากกว่าทำให้เกิดการตกตะกอนแล้วตามด้วย การกรอง การล้าง การทำให้แห้ง การจัดรูปร่าง และการให้ความร้อนเพื่อทำให้เกิดเป็นสารเนื้อเดียวและเกิดเป็นสารประกอบขึ้นโดยการแพร่กระจายของความร้อน

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการแบบตกตะกอน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

##### 1.1. การตกตะกอนแบบธรรมดา

เติมสารละลายที่เป็นเกลือของโลหะลงในสารละลายพวกอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkaline hydroxide) หรือแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide) หรือแอมโมเนียมคาร์บอเนต (Ammonium carbonate) จะทำให้เกิดการตกตะกอนในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ แล้วให้ความร้อนเปลี่ยนตะกอนให้อยู่ในรูปของโลหะออกไซด์ (Metal oxide)

## 1.2. การตกตะกอนร่วม (Coprecipitation)

เตรียมสารละลายของเกลือโลหะ 2 ชนิด เช่น การเตรียมโลหะบนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์ ต้องเตรียมสารละลายเกลือโลหะ และเกลือแมกนีเซียมก่อน จากนั้นเติมสารที่ทำให้เกิดการตกตะกอน (Precipitation agent) เช่น โลหะอัลคาไลคาร์บอเนต ( $\text{NaCO}_2$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ) ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งต้น (Catalyst precursor) แล้วให้ความร้อนเพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งต้น (Catalyst precursor) สลายตัวได้โลหะออกไซด์บนตัวรองรับ (Support) ที่ต้องการ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ และอลูมินา เป็นต้น

### ข้อควรระวังในการเตรียม

1. ควบคุมสภาวะในการเตรียม เช่น ความเป็นกรด-เบส (pH) อัตราการผสม อัตราการเติมสารที่ทำให้ตกตะกอน เป็นต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ มีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอย่างมาก
2. การเลือกเกลือโลหะเริ่มต้น จะต้องเป็นประเภทที่หาง่ายและละลายน้ำได้ดี บางกรณีต้องหลีกเลี่ยงการใช้ธาตุที่เป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น คลอไรด์ เนื่องจากกรดที่มาจากกรดคลอไรด์ที่อุณหภูมิสูงมีฤทธิ์กัดกร่อน หรือไฮเดียม ซึ่งสารประกอบไฮเดียมจะช่วยให้เกิดการรวมตัวที่อุณหภูมิสูงได้
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับ ไม่สามารถใช้เป็นโลหะซัลเฟตได้ เนื่องจากโลหะซัลเฟตสามารถถูกรีดิวซ์ไปเป็นซัลไฟด์ที่เป็นสารพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยาได้

2. วิธีการแบบฝัง (Impregnation Method) เป็นวิธีการที่ง่าย และใช้กันมากที่สุด ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้โดยการเติมตัวรองรับ (Support) เช่น อลูมินาในสารละลายของเกลือโลหะ เช่น เกลือไนเตรท เกลือโลหะจะแพร่กระจายสู่ตัวรองรับ จากนั้นทำให้เกลือโลหะร้อนเพื่อให้เกลือโลหะที่อยู่บนตัวรองรับสลายตัวให้เกลือโลหะออกไซด์เกาะบนตัวรองรับ

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการแบบฝังตัว สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

### 2.1. การฝังตัวแบบเปียก (Wet-Impregnation)

เติมตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือโลหะที่มีปริมาณมากเกินไป โดยปริมาณของเกลือโลหะที่เกาะบนตัวรองรับ จะหาจากปริมาณที่แตกต่างของเกลือโลหะก่อนและหลัง

### 2.2. การฝังตัวชนิดแห้ง

(Dry-Impregnation or Impregnation to incipient wetness)

ตัวรองรับจะถูกทำให้กระจายตัวและพ่นด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสม โดยปริมาตรของสารละลายที่ใช้ต้องมีปริมาณเท่ากับ ปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของตัวรองรับหรือ



น้อยกว่าเล็กน้อย ซึ่งสามารถควบคุมปริมาณขององค์ประกอบที่ว่องไวที่เกาะบนตัวรองรับได้อย่างถูกต้อง หลังจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกทำให้แห้งและเผาที่อุณหภูมิสูง

ปริมาณและการแจกแจง (Dispersion) ของเกลือโลหะบนพื้นผิวภายในของตัวรองรับมีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น ปริมาณและการแลกเปลี่ยนขึ้นอยู่กับลักษณะการดูดซับของเกลือเข้าไปอยู่ในรูพรุนของตัวรองรับในขั้นตอนแรกการแจกแจงของเกลือโลหะยังไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงต้องปล่อยให้ว่องไวในภาชนะปิดที่มีความชื้นสัมพัทธ์อิ่มตัวอย่างน้อย 1 ชั่วโมง จะทำให้การแจกแจงของเกลือโลหะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งในตอนแรกปริมาณการดูดซับขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย และเมื่อการดูดซับถึงจุดอิ่มตัวแล้วความเข้มข้นจะไม่มีผลต่อการดูดซับ เมื่อการดูดซับอิ่มตัวแล้วจะนำตัวเร่งปฏิกิริยามาอบแห้ง เพื่อเป็นการกำจัดตัวทำละลายการอบจะมีความร้อนอย่างช้า ๆ เพื่อให้การระเหยเป็นไปอย่างช้า ๆ (เนื่องจากตัวรองรับมีขนาดรูพรุนต่างกัน เมื่อทำการระเหยสารละลายที่มีอยู่ในรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะระเหยไปเนื่องจากความดันจะดันสารละลายไปอยู่ในรูพรุน ที่มีขนาดเล็กกว่า)

### กรรมวิธีหลังการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา [21]

#### 1. การทำให้แห้ง (Drying)

ทำในตู้อบหรือทิ้งไว้ในอากาศ แต่นิยมทำในตู้อบที่ 100 °C ประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำในโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 2. การขึ้นรูป (Forming)

- เม็ดเล็ก (Granule)
- ทรงกลม (Sphere)
- เม็ดแบน (Tablet)
- วงแหวน (Ring)
- ทรงกระบอก (Cylinder)

โดยพิจารณาจากปัจจัยหลายอย่าง คือ

- สมบัติการไหลของของผสม
- ความแข็งแรง
- โครงสร้างของรูเปิด
- ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด
- ราคา

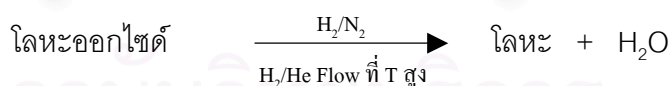
### 3. การเผาที่อุณหภูมิสูง (Calcination)

การเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง มีเหตุผลหลายประการ ดังนี้

1. เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ต้องการ เช่น ตัวประสาน (Binder) สารหล่อลื่นของ ดายไอออนบวก/ไอออนลบที่ไม่เสถียร และสารที่ระเหยได้ง่ายที่เติมลงไปในช่วง ตอนต้น
2. อุณหภูมิที่ใช้ควรสูงพอเพื่อทำให้เกิดสภาพการเริ่มต้นของการรวมตัวของผลึก (Incipient sintering) แต่ต้องไม่ให้เกิดการรวมของผลึกของความร้อนที่มากเกินไป (Excessive sintering) ซึ่งถ้าเกิดการรวมตัว (Sintering) จะทำให้พื้นที่ผิว (Surface area) ลด มีผลทำให้ตำแหน่งที่ว่างไวในการเกิดปฏิกิริยา (Active site) ลดลง และอาจเป็นสาเหตุของการจำกัดการแพร่ (Diffusional limitation) เพราะ ขนาดของรูพรุนที่เล็กลง
3. การเปลี่ยนรูปเกลือโลหะให้เป็นโลหะออกไซด์ โดยการเลือกใช้อุณหภูมิขึ้นกับ โลหะที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) ปัญหาที่พบในระหว่างการเผาที่อุณหภูมิสูง คือ อาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวรองรับกับโลหะออกไซด์ เช่น โลหะออกไซด์กับอลูมินา ได้โลหะอลูมิเนต ( $\text{MeAl}_2\text{O}_4$ ) โลหะออกไซด์กับซิลิกา ได้โลหะซิลิเกต เป็นต้น

### 4. การรีดิวซ์เป็นโลหะ (Reduction to the Metal)

การรีดิวซ์สามารถทำได้ทั้งในเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) หรือเตาเผาที่อุณหภูมิสูง (Calcination) ทั้งนี้ขึ้นกับความว่องไวของโลหะหลังจากการรีดิวซ์ โดยบางชนิดสามารถลุกติดไฟได้เอง จึงควรทำในเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor)



อุณหภูมิที่ใช้ในการรีดิวซ์โลหะหมู่ VIII B ประมาณ 300-400 องศาเซลเซียส โดย อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการรีดิวซ์ต้องไม่มากกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor)

## 2.4 ตัวรองรับ (Support) [21]

เป็นสารเฉื่อยที่ใช้สำหรับการกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง อาจอยู่ในรูปของเม็ด (Pellet) หรือผง (Powder) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Alumina),  $\text{SiO}_2$  (Silica) และ Activated carbon

### 2.4.1 หน้าที่ของตัวรองรับ (Support)

- ทำให้เกิดการกระจายตัวของโลหะ (Metal active site) ได้ดีที่สุด
- เพิ่มความแข็งแรงให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัวที่มีโครงสร้างไม่แข็งแรง
- เพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้างของตำแหน่งว่างในการเกิดปฏิกิริยา (Active site)
- เพิ่มความสามารถในการต้านทานภาวะ การรวมตัวกันเนื่องจากความร้อน

### 2.4.2 การเลือกตัวรองรับ (Support)

- เฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ
- มีสมบัติเชิงกลที่ต้องการ เช่น ทนต่อการขัดสี, มีความแข็งแรง หรือทนต่อแรงกด
- เสถียรภายใต้สภาวะของปฏิกิริยาและสภาวะที่ใช้เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่
- ควรมีพื้นที่ผิวมาก แต่ต้องคำนึงถึงขนาดของโมเลกุล
- มีรูพรุน ประกอบด้วยขนาดรูพรุนเฉลี่ยและการกระจายตัวของรูพรุน
- ราคาถูก

## 2.5 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) [22, 23]

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ของคาร์บอน ซึ่งเป็นตัวดูดซับชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ อาจอยู่ในรูปของผง หรือเม็ดได้ มีโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวดูดซับสูง ทำให้มีสมบัติการดูดซับที่ดี ใช้ประโยชน์ในการกำจัดกลิ่น สี หรือแก๊ส โดยทั่วไป มักจะเลือกวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเป็นของเหลือทิ้งหรือมีราคาถูก มีปริมาณคาร์บอนสูง มีปริมาณสารอนินทรีย์ต่ำ มีปริมาณเถ้าต่ำและมีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บไว้นานๆโดยนำวัตถุดิบซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม มาผ่านกระบวนการกระตุ้นให้มีพื้นที่ผิวสูงมีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มีการจุในการดูดซับสูง และมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก

### 2.5.1 วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ควรมีลักษณะดังนี้

- เป็นวัสดุเหลือทิ้ง หรือเป็นวัสดุที่มีราคาถูก
- มีปริมาณคาร์บอนสูง
- มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ
- มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ
- สามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงได้

การเตรียมถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบโดยตรง หรือผลิตจากวัตถุดิบที่ถูกเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นถ่านชาร์แล้วก็ได้ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุเป็นส่วนใหญ่

### 2.5.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ [22, 23]

การเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิว หรือการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น

Mukherjee (1947) ได้พิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้ 3 ลักษณะคือ

- การเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน
- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้ผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงการทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุและอนินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ

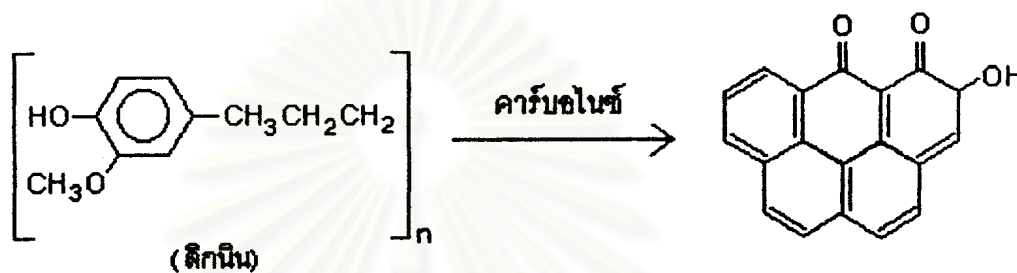
ในปัจจุบันกรรมวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์มีอยู่หลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ โดยทั่วไปกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 2 ขั้นตอน ดังนี้

#### 1) การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

การคาร์บอนไนเซชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) รูปแบบหนึ่งแสดงดังรูปที่ 2.8 โดยใช้ความร้อนไล่ความชื้น และสารระเหยได้ต่างๆ ออกจากวัตถุดิบทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งสีดำ เรียกว่า ถ่านชาร์ (Char) ส่วนที่หลุดออกมา คือ แก๊สและน้ำมันทาร์ กระบวนการคาร์บอนไนเซชันเป็นการเพิ่มร้อยละของคาร์บอนให้สูงขึ้น การ

คาร์บอนไนซ์ให้ได้ถ่านที่มีสมบัติที่ต้องการทำได้โดยการปรับภาวะให้เหมาะสม โดยมีตัวแปรที่สำคัญดังนี้

- อุณหภูมิ
- อัตราการให้ความร้อน
- ตัวกลางของปฏิกิริยา
- ธรรมชาติของวัตถุดิบ

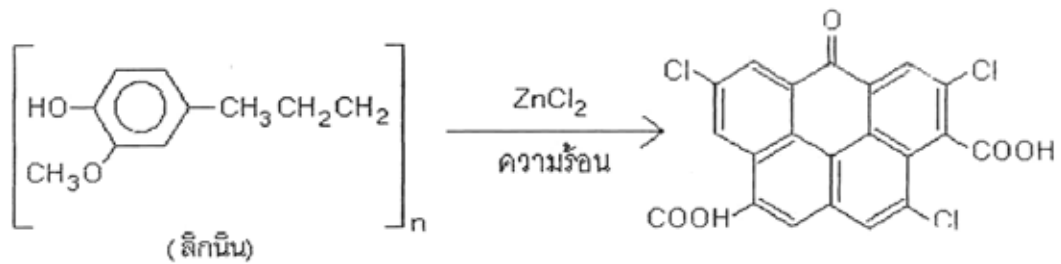


รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในการคาร์บอนไนซ์ [22, 23]

## 2) การกระตุ้น (Activation) [24]

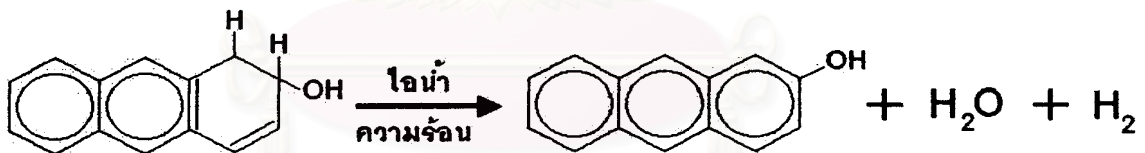
การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ แบ่งตามกลไกที่เกิดขึ้นได้ 2 ประเภท

2.1 การกระตุ้นทางเคมี เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้อุณหภูมิต่ำ (400 – 600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน ในการผลิตถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมี

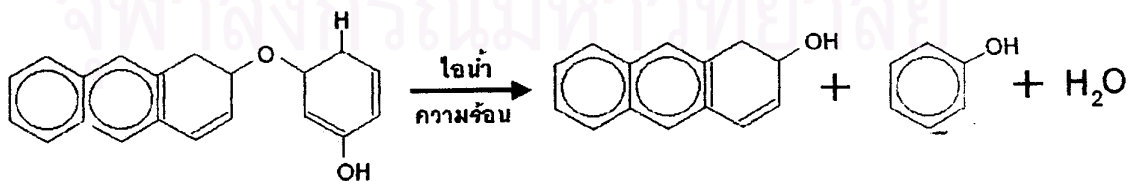


รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ [23]

2.2 การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ แสดงดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 โดยมีการจัดเรียงตัวใหม่ในโครงสร้าง ซึ่งเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้นนิยมใช้แก๊สออกซิเดชันต่างๆ เช่นไอน้ำร้อนยอติ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจนร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิกริยากระตุ้นนี้อาจใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้ความร้อนสูงมากถึง 1200 องศาเซลเซียส และพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับความร้อน ข้อดีของการกระตุ้นวิธีนี้คือไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าวิธีกระตุ้นด้วยสารเคมี



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางกายภาพ [23]



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางกายภาพโดยมีการกำจัดโมเลกุลแปลกปลอม [23]

### 2.5.3 ลักษณะและชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง สารดูดซับชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นของแข็ง มีสีดำ อาจอยู่ในรูปผง หรือเม็ดก็ได้ใช้ประโยชน์ในการดูดซับกลิ่น สี หรือแก๊ส โดยทั่วไปมีลักษณะดังต่อไปนี้

- มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก
- มีพื้นที่ผิวสูง
- มีความจุในการดูดซับสูง
- มีความว่องไวในการดูดซับสูง
- มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (Microporous Structure)

ชนิดของถ่านกัมมันต์ ขึ้นอยู่กับเกณฑ์การแบ่ง ดังนี้

#### 1) แบ่งตามชนิดของการกระตุ้น

- การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน ถ่านกัมมันต์ที่ได้มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ตัวกระตุ้นที่ใช้ได้แก่  $ZnCl_2$  และ  $NaCl$  เป็นต้น

- การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดซ์เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ ร่วมกับความร้อน ถ่านกัมมันต์ที่ได้มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

#### 2) แบ่งตามขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

- ขนาดเล็ก (Micropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนเล็กกว่า 1.5 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดแก๊สหรือสารระเหย

- ขนาดกลาง (Mesopore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 1.5 ถึง 200 นาโนเมตร มักใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่ง (Catalytic reaction) ใช้ดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น ฟอกสี

- ขนาดใหญ่ (Macropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 200 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่าง ๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ง่ายขึ้น มักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสีและการผลิตยา

### 3) แบ่งตามลักษณะของรูปร่าง

- ประเภทผง (Powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอกสี และดูดกลิ่นในของเหลว

- ประเภทเม็ด (Pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตรไม่เกินกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัด หรืออาจทำให้เป็นเกล็ดใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์ หรือการทำตัวทำละลายที่ใช้แล้วให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการปฏิกิริยาของแก๊ส และใช้ทำหน้าที่กักป้องกันแก๊สและไอพิษต่าง ๆ

### 4) แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

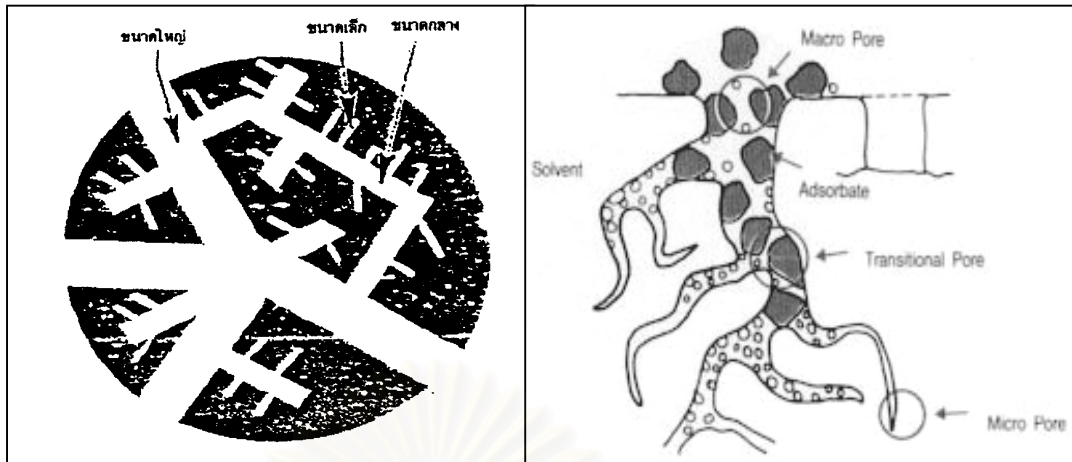
- ความหนาแน่นต่ำ มักใช้ประโยชน์ในภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น ฟอกสี น้ำตาลหรือทำน้ำให้บริสุทธิ์

- ความหนาแน่นสูง ใช้ในการดูดซับแก๊ส หรือไอระเหย

## 2.5.4 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ [22, 23]

เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์แล้วจะพบว่า มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์ อย่างไม่เป็นระเบียบและความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูพรุนเหล่านี้เปรียบได้กับหลอดแก้วขนาดเล็ก (Capillary tube) ที่เสียบเข้าไปในเนื้อถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปจะเรียกรูพรุนเหล่านี้ตามขนาด แสดงดังรูปที่ 2.12 คือ ขนาดเล็ก (Micropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนน้อยกว่า 2 นาโนเมตร ขนาดกลาง (Mesopore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 2 ถึง 50 นาโนเมตร และขนาดใหญ่ (Macropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ เชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกว่าการกระจายขนาดรูพรุน (Poresize distribution) จะขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้และวิธีการกระตุ้น





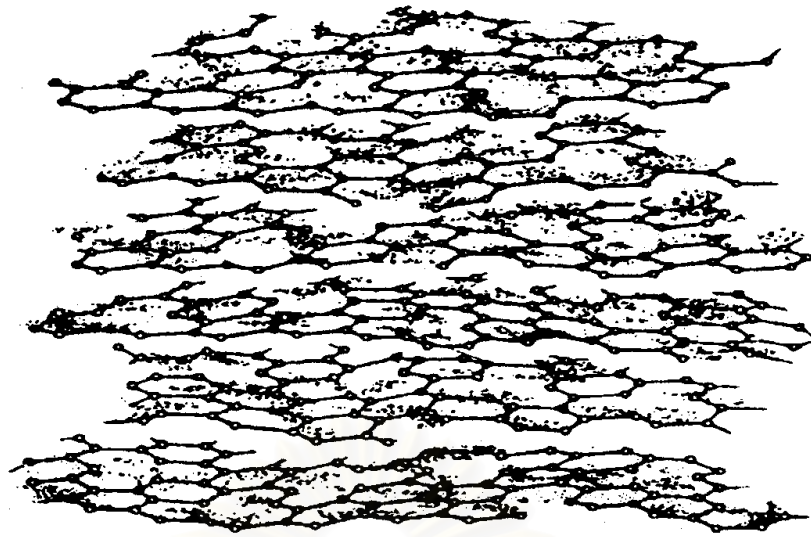
รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบขนาดและการวางตัวของรูพรุนขนาดต่าง ๆ [22]

รูพรุนขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ ออกจากช่องว่างของถ่านที่ใช้เป็นวัสดุดิบเริ่มต้น รวมทั้งเกิดการจัดเรียงและเคลื่อนย้ายอะตอมเพื่อให้เกิดช่องว่างที่มีอำนาจการดูดซับ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารถูกดูดซับเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก จึงไม่มีผลต่อความจุในการดูดซับแต่จะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับสำหรับรูพรุนขนาดกลางนั้นสามารถดูดซับโมเลกุลของของเหลวได้บ้าง แต่จะมีความสำคัญมากขึ้นเมื่อดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์สูง ๆ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200 - 300 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับรูพรุนขนาดเล็กมีหน้าที่ในการดูดซับจึงมีผลต่อความจุในการดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่มีความดันสัมพัทธ์ต่ำ ถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนขนาดเล็กประมาณร้อยละ 90 ถึง 95 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่า ความจุในการดูดซับยังขึ้นกับลักษณะและธรรมชาติของผิวด้วย กล่าวคือ ถ้าผิวของถ่านกัมมันต์เป็นเพียงระนาบพื้นฐาน (basal planes) ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ การดูดซับจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ หรืออาจเกิดจากไพอเล็คตรอน แรงยึดเหนี่ยวทั้งสองเป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อน แม้จะดูดซับได้แต่ก็มีโอกาสจะหลุดออกได้ง่าย แต่ถ้าเป็นผิวบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชันอื่น การดูดซับจะเกิดจากแรงที่แข็งแรง โอกาสที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกมาจึงมีน้อยกว่า หมู่ฟังก์ชันชนิดบนผิวของถ่านกัมมันต์มี 2 ชนิด คือ พวกออกไซด์ของกรด ซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิประมาณ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และพวกออกไซด์ของเบส ซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิประมาณ 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส

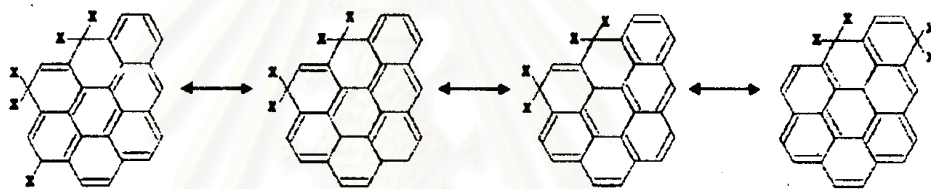
### 2.5.5 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ [22, 25]

ถ่านกัมมันต์มักเตรียมจากถ่านที่ได้จากการเผาผลาญสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ในระหว่างการเผาผลาญอะตอมต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจนถูกกำจัดออกในรูปแก๊ส อะตอมของคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงแหวนเฮลิยม (Aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดช่องว่างหรือโพรงซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้นโดยการล้างพวกทาร์และสารต่าง ๆ ที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่างหรือโพรง และสร้างหมู่ฟังก์ชันนัลขึ้นมาแทน ความสามารถในการดูดซับถ่านกัมมันต์จึงเป็นผลสืบเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีด้วย

ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายผลึกแกรไฟต์ กล่าวคือ อะตอมของคาร์บอนจะเรียงตัวเป็นชั้น ๆ แสดงดังรูปที่ 2.13 แต่ละชั้นห่างกันประมาณ 0.335 นาโนเมตร แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้น คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนัก แต่ละชั้นจะประกอบไปด้วยกลุ่มอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม อะตอมคาร์บอนแต่ละตัวจะใช้ซิกมาอิลเล็กตรอนสร้างพันธะเดียวกับอะตอมข้างเคียง 3 อะตอม ความยาวพันธะระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 0.144 นาโนเมตร อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งตัวเป็นไพอิลเล็กตรอนใช้ในการสร้างพันธะที่ไม่อิ่มตัวคือพันธะคู่ แต่โดยทั่วไปถ่านหรือถ่านกัมมันต์จะมีอิเล็กตรอนไม่ครบคู่ อะตอมคาร์บอนบางตัวจึงต้องรับอิเล็กตรอนดังกล่าวไว้ ทำให้มีความหนาแน่นประจุสูง อะตอมดังกล่าวจะปล่อยให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังอะตอมข้างเคียงเพื่อลดความหนาแน่นของประจุ แสดงดังรูปที่ 2.14 เพื่อให้โครงสร้างเสถียรยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (Mattson et al 1971) [22]

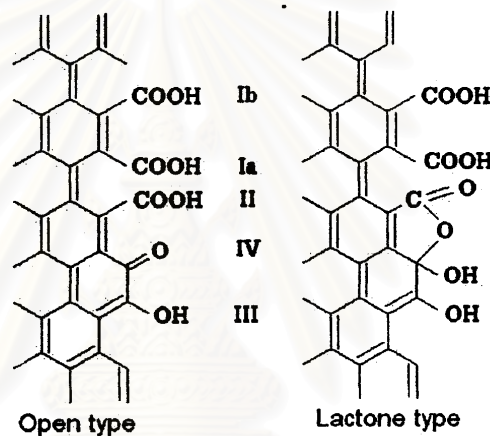


รูปที่ 2.14 การเคลื่อนที่ของไอออนในโครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์ [22]

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระในวงโคจรนอกสุดมีไม่ครบ 2 หรือ 8 (Unsaturated valencies) ตามกฎออกเตต จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรืออะตอมต่าง ๆ ที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยให้การเกาะกันของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง มักเกิดกับอะตอมที่อยู่ในวงอะโรเมติกส์ ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแบบเคมี (Chemisorbtion) กับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนเป็นออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจนซึ่งจะไม่หลุดออกแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1000 องศาเซลเซียส รวมทั้งสามารถดึงอะตอมของไนโตรเจนออกจากโมเลกุลของแอมโมเนีย ดึงอะตอมซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลของไฮโดรเจนซัลไฟด์ และดึงอะตอมกลุ่มฮาโลเจนออกจากโมเลกุลฮาโลเจน ทั้งที่อยู่ในสภาพแก๊สหรือของเหลวก็ได้ เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันนัลต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัม

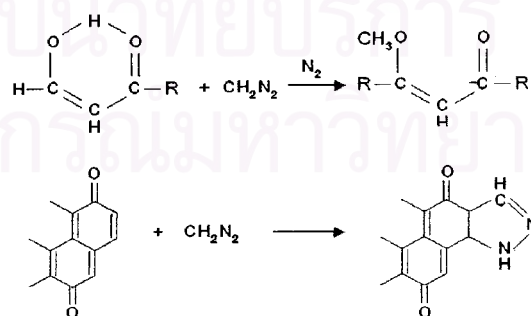
มันต์ ที่สำคัญคือผิวที่เกิดจากอะตอมคาร์บอนและออกซิเจนหรือที่เรียกว่าผิวออกไซด์นั้น มี 2 ชนิด คือ

1. ชนิดที่เป็นกรด มักเกิดในถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิต่ำไม่สูงมาก หมู่ฟังก์ชันหลักที่เกาะอยู่บนผิวถ่านกัมมันต์จะมีสมบัติคล้ายกรดได้แก่ carbonyl, phenols, lactones, aldehydes, ketones, quinones, hydroquinones, anhydride เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.15 สามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นเบสได้ แสดงดังรูปที่ 2.16 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์เหล่านี้ค่อนข้างที่จะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้เล็กน้อย จะสลายตัวเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้มากจะเกิดการสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน



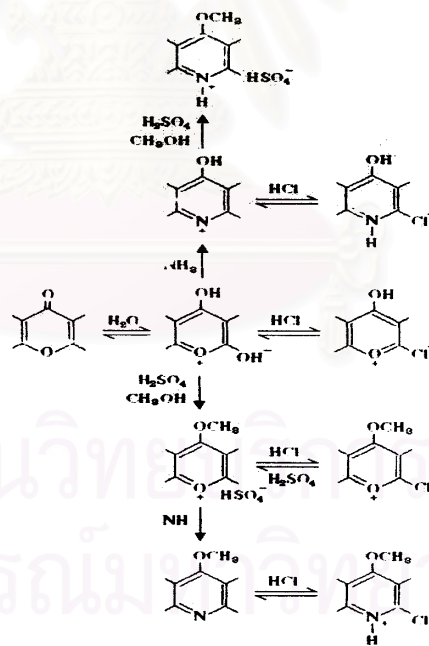
Surface oxides on carbon surface I : Carbonyl group, a. Removed by 200°C b. Removed above 325°C II : Carbonyl group which exists as lactol group III : Phenolic hydroxyl group IV : Carbonyl group

รูปที่ 2.15 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันหลักที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์ [25]



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่ผิวเป็นกรด [25]

2. ชนิดที่เป็นเบส มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันนัลที่เกาะอยู่บนผิวถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโมเลกุลของกรดได้ดี ได้แก่ hydroxyl , carbonate เป็นต้น ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับของถ่านกัมมันต์ประเภทนี้แสดงในรูปที่ 2.17 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อถ่านกัมมันต์ประเภทนี้เกิดปฏิกิริยาดูดซับกับออกซิเจนและกรดไฮโดรคลอริก จะเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ขึ้นมาด้วย มีผู้อธิบายโดยใช้ทฤษฎีต่าง ๆ เช่น ทฤษฎีโครมีน (Chromene groups) ทฤษฎีออกไซด์ เป็นต้น แต่ปัจจุบันยังไม่เป็นที่ยอมรับ เชื่อกันว่าโมเลกุลของกรดจะถูกดูดซับด้วยแรงทางฟิสิกส์ โปรตอนและไอออนลบจะถูกยึดด้วยแรงดูดซับจากผิวของถ่านกัมมันต์ แต่โปรตอนจะถูกแรงกระทำมากกว่าจึงอยู่ใกล้ผิวของถ่านกัมมันต์ แล้วจึงเกิดการดูดซับไอออนลบเป็นขั้นที่สอง เมื่อนำมาถ่านกัมมันต์มากระตุ้นพบว่า เกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงร้อยละ 10 ของปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในถ่านกัมมันต์ จึงคาดว่าอะตอมที่อยู่ในถ่านกัมมันต์มี 2 แบบคือ แบบที่สลายตัวกลายเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสและแบบที่สลายตัวไปเป็นสารอื่นที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการดูดซับโมเลกุลกรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นเบส [25]

อย่างไรก็ตามถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นในตลาดการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ด อาจได้รับผลจากการที่ในอุตสาหกรรมบางส่วนได้ใช้ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการผ่านกระบวนการการนำกลับมาใช้ใหม่ ในการพิจารณาถึงการที่จะนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่นั้นจะต้องคำนึงถึง ค่าใช้จ่าย ปริมาณของถ่านกัมมันต์ ชนิดของตัวถูกดูดซับ และเกณฑ์ที่บังคับด้านสิ่งแวดล้อม

## 2.5.6 การดูดซับของถ่านกัมมันต์ [25]

ความจุของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (Adsorption Capacity) จะขึ้นกับ

- พื้นที่ผิวทั้งหมด (total surface area)
- โครงสร้างรูพรุนในเนื้อถ่าน
- การมีฟังก์ชันนัล (functional group) ที่รูปร่างต่าง ๆ บนผิวรูพรุนของถ่าน

ขนาดรูพรุนบริเวณผิวจะเป็นสิ่งหนึ่งที่กำหนดความจุในการดูดซับ โดยโครงสร้างทางเคมีที่ผิวถ่านกัมมันต์ จะมีผลต่อสารที่ถูกดูดซับในกรณีที่สารนั้นมีขั้วหรือไม่มีขั้ว นอกจากนั้นตำแหน่งที่ว่องไวบริเวณผิวถ่านกัมมันต์ จะเป็นสิ่งที่กำหนดชนิดของปฏิกิริยาเคมีที่ผิวถ่านกับโมเลกุลอื่น

ดังนั้น ในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ จึงไม่ได้ขึ้นกับพื้นที่ผิวอย่างเดียว ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวเท่ากันแต่ได้จากการเตรียมที่มีวิธีต่างกัน อาจจะเป็นวิธีการกระตุ้นที่ต่างกันก็สามารถให้ลักษณะการดูดซับ (adsorption characteristics) ที่ต่างกัน ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่ดีจึงควรมีพื้นที่ผิวมากและมีขนาดรูพรุนที่เหมาะสมกับสปีชีส์ (species) ที่ถูกดูดซับ

ที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ จะมีผลึกคาร์บอนอยู่ที่บริเวณผิวและขอบของผลึกคาร์บอนโดยจะมีตำแหน่งวาเลนซ์ที่เหลืออยู่จึงทำให้บริเวณดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่ว่องไว จะเห็นได้จากการดูดซับทางเคมีที่บริเวณผิวถ่าน ธาตุที่ถูกดูดซับเข้ามาอาจเป็น ออกซิเจน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน คลอรีน โบรมีน ไอโอดีน และซัลเฟอร์ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบซับซ้อนที่บริเวณผิวจึงไม่สามารถเขียนกลไกการดูดซับออกมาในรูปแบบของการเคมีได้

เมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันนัลที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ พบว่าหมู่ฟังก์ชันนัลที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมีความสำคัญมากที่สุด เมื่อตรวจสอบที่บริเวณผิวของคาร์บอนโดยใช้เอกซ์เรย์ พบว่าอะตอมของออกซิเจนจะสร้างพันธะกับอะตอมของคาร์บอน ซึ่งจะมีเป็นจำนวนมากที่บริเวณขอบของโมเลกุลคาร์บอนที่เกาะตัวเป็นแอมโรว์แมติกโดยพันธะระหว่างออกซิเจนและไฮโดรเจนจะมีอิทธิพลมากที่สุดต่อลักษณะพื้น

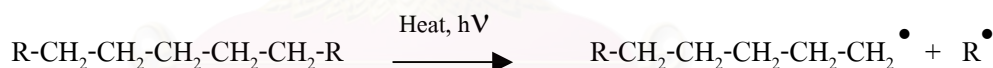
ผิวถ่านกัมมันต์ เช่น ความเป็นกรดที่บริเวณผิว การแลกเปลี่ยนไอออนบวก รวมถึงการดูดซับแก๊สและไอที่มีซัลเฟอร์และไม่มีซัลเฟอร์

## 2.6 การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) [18, 24, 26, 27]

การแตกตัวด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้มีขนาดของโมเลกุลที่เล็กลงโดยใช้ความร้อนอุณหภูมิสูง โดยหากควบคุมให้การแตกตัวเป็นไปได้อย่างพอดี จะมีการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เนื่องจากการให้ความร้อนจะเกินพอดีจะทำให้การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กเกินไปจนอยู่ในรูปก๊าซ  $C_1-C_4$  ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการและไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนจะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาโดยเฉพาะส่วนที่มีแอลิเฟน (olefin) และไดโอลิเฟน (diolefin) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากันเองต่อไป

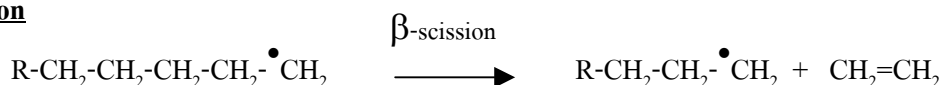
กระบวนการแตกตัวโมเลกุลด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (Free radical) แบบห่วงโซ่ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน [23]

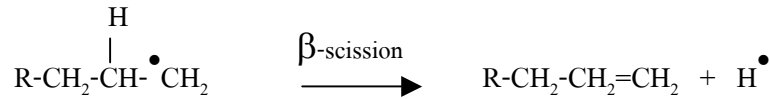
1. ขั้นเริ่มต้น (Initiation step) เป็นขั้นตอนในการเกิดอนุมูลอิสระ (free radical) เกิดจากความร้อนไปทำให้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขาดออกจากกัน เกิดเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งจะนำไปทำปฏิกิริยาในขั้นต่อไป



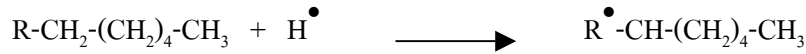
2. ขั้นการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (Propagation step) เกิดจากอนุมูลอิสระในขั้นเริ่มต้นทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง การแตกตัวจะเริ่มจากอนุมูลอิสระเข้าไปยังพันธะคาร์บอนที่ตำแหน่ง  $\beta$  เกิดอนุมูลอิสระใหม่ขึ้น ( $\beta$ -fission) ซึ่งทำให้ภายในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเกิดความไม่เสถียรส่งผลให้เกิดขั้นตอนการถ่ายทอดไฮโดรเจน (chain transfer) เพื่อทำให้โมเลกุลเกิดความเสถียร จึงเกิดเป็นสารต่างๆ ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงจากพอลิเมอร์เดิม พร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นต่อ เพื่อเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเรื่อยๆ

### $\beta$ -fission





### Chain transfer



3. ขั้นหยุดปฏิกิริยา (Termination step) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่อง โดยจะทำปฏิกิริยากันเอง เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ใหญ่ขึ้น โดยอาจเกิดเป็นโมเลกุลใหม่โมเลกุลเดียว หรือ เกิดเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล



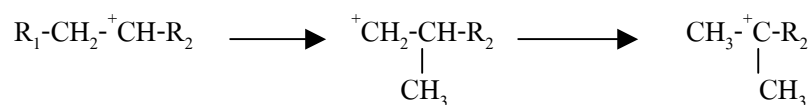
## 2.7 การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) [21, 26, 27]

การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามามีบทบาทในการช่วยแตกย่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ให้ขนาดเล็กลง ให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสม คุณภาพพอเหมาะที่จะนำไปใช้ประโยชน์ตามต้องการได้ กลไกของการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย

1. การเกิดดีไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนเนียมไอออน (Carbonium ion) ซึ่งเกิดจากการที่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรดีไอออนที่มีประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด ทำให้คาร์บอนเนียมไอออนมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า โดยคาร์บอนเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจะมีเสถียรภาพแตกต่างกันตามโครงสร้างของไอออน โดย tertiary ion จะมีเสถียรภาพมากกว่า secondary ion และ primary ion ตามลำดับ

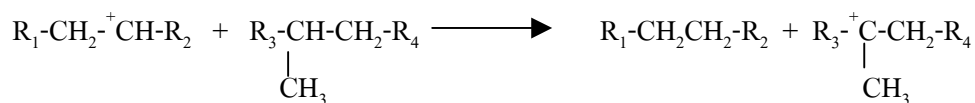


2. การเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลของคาร์บอนเนียมไอออน ซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้างของคาร์บอนเนียมไอออนมีเสถียรภาพแตกต่างกัน





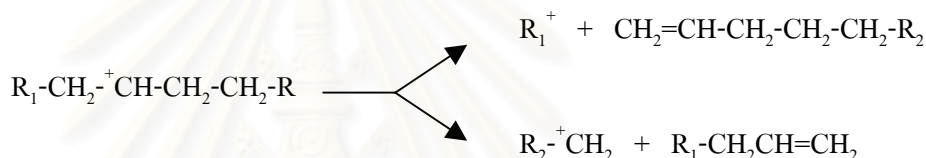
และเกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ (hydride transfer) โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนเนียมไอออนกับโมเลกุลของสายโซ่ไฮไดรด์คาร์บอน



สำหรับคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยา  $\beta$ -scission หรือการแตกตัวที่ตำแหน่ง  $\beta$  ที่นับจากจุดที่มีประจุบวก ซึ่งจะให้สารประกอบโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดเล็กลง โดยมักจะเป็น primary carbonium ion ดังสมการ



ในบางกรณีคาร์บอนเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 รูปแบบ เช่น ในตัวอย่างของ secondary carbonium ion



ถ้า  $R_1 = H$  การเกิด  $\beta$ -scission จะสามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว ดังสมการ

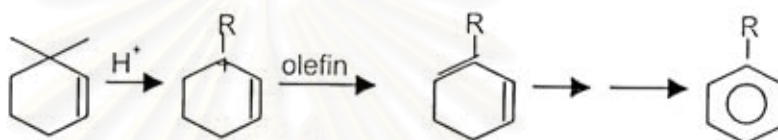
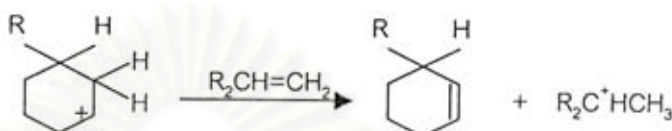
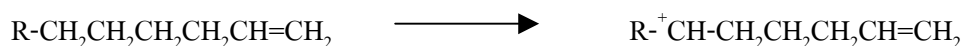


โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คือโพรพีนจะเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนและอยู่ในรูปคาร์บอนเนียมไอออนซึ่งจะไม่สามารถเกิด  $\beta$ -scission ต่อไปได้



Isopropyl carbonium ion จะเกิดปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายไฮไดรด์กับโมเลกุลประกอบไฮไดรด์คาร์บอนอื่น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรเพน หรือ อาจเกิดการสูญเสียโปรตอน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพีน

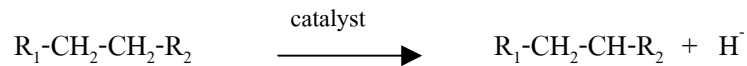
ในการเกิดวงแหวนแอโรแมติกจากปฏิกิริยาดีไฮโดรไซคลิกเซชัน (dehydrocyclization) โดยโอเลฟินเกิดเป็นคาร์บอนเนียมไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยา  $\beta$ -scission ได้สารประกอบ olefin carbonium ion ที่มีลักษณะเป็นวงแหวน จากนั้นเกิดปฏิกิริยากับโอเลฟิน เกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ไอออนจากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะได้ allylic carbonium ion ที่มีเสถียรภาพและเกิดการรับโปรตอนจาก cyclohexadiene ซึ่งในขั้นสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแอโรแมติก



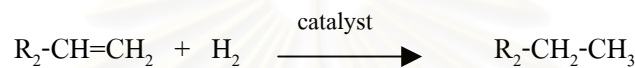
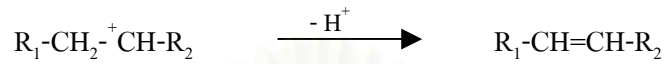
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยก๊าซที่มีโอเลฟินสูง องค์ประกอบของเบนซีนที่มีค่าออกเทนสูงเนื่องจากมีสารจำพวกแอมโรแมติกและโอเลฟินมาก องค์ประกอบของน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กากน้ำมันชนิดใส และโค้ก (coke) ที่จะเกาะติดอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้พื้นที่ผิวรูพรุนและความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงจนเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

## 2.8 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking) [24, 27, 28, 29, 30]

การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่รวมระหว่างการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและการเติมไฮโดรเจน ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีแขนแตกแขนงจำนวนมาก เกิดเป็นพาราฟินและแนฟทีน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นประเภท 2 หน้าที่ (dual function) คือ ช่วยในการแตกพันธะคาร์บอน-คาร์บอนของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนและช่วยเติมไฮโดรเจน จึงมักประกอบด้วยสารจำพวกซิลิกา-อะลูมินาที่สามารถช่วยในการแตกพันธะคาร์บอนได้พร้อมๆ กับการเติมไฮโดรเจน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มต้นจากการเกิดคาร์บอนเนียมไอออนตรงบริเวณที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา



คาร์บอนเนียมไอออนอาจมีการจัดเรียงตัวใหม่ โดยการกำจัดโปรตอนออกจากโอเลฟินหรือเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า ( $\beta$ -scission) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนตัวใหม่ จากนั้นเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนและการดึงไฮโดรเจน โอเลฟินที่ผ่านการเติมไฮโดรเจนจะกลายเป็นสารประกอบประเภทพาราฟิน



หากปฏิกิริยาเกิดในภาวะที่อุณหภูมิ 400-480 องศาเซลเซียส ความดัน 35-170 บรรยากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบที่อิมัลชันค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้ก๊าซโซลีนที่ได้จากกระบวนการนี้มีค่าออกเทนที่ต่ำกว่ากระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องมาจากผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีปริมาณสารประกอบแอมโรแมติกน้อย เพราะเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนมากกว่า สารที่ได้จึงมักนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องบิน (jet fuel) รวมทั้งยังได้สารประกอบประเภท LPG ซึ่งใช้เป็นสารป้อนในกระบวนการปิโตรเคมี อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ใดๆ นั้นต้องอาศัยปัจจัยอื่นๆควบคู่กันไป โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นกับเวลา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งชนิดของปฏิกิริยาและชนิดของพลาสติก

นอกจากนี้การเติมไฮโดรเจนบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะช่วยทำความสะอาดให้กับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไปพร้อมๆกันด้วย เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนจะช่วยกำจัดโค้กที่เกิดขึ้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาออกไป กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมนี้ เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นอย่างดี เพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโค้กและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความสามารถไปหรือทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหายรวมทั้งไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

## 2.9 การวิเคราะห์หาคุณภาพของน้ำมัน Crude oil evaluation [18, 27, 31]

เป็นวิธีการวิเคราะห์หาคุณภาพของน้ำมันดิบอย่างละเอียด เพื่อหาองค์ประกอบและสมบัติของส่วนต่างๆ ในน้ำมันดิบเริ่มต้นเพื่อหาปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สที่มีอยู่โดยวิธี Gas chromatography แล้วนำน้ำมันมากลั่นแยกเป็นส่วนตามคาบจุดเดือด (Boiling range) อย่างละเอียด โดยแบ่งเป็นส่วนแคบ ๆ ชนิดคาบจุดเดือดเพียง 5-10 องศาเซลเซียส แต่มีค่าใช้จ่ายที่แพงมากและใช้เวลานานจึงไม่นิยมทำกัน ปัจจุบันจึงใช้วิธีแยกน้ำมันดิบออกตามคาบจุดเดือดกว้าง ๆ ให้พอดีกับที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตน้ำมันสำเร็จรูปกล่าวอย่างหยาบสามารถแบ่งได้เป็น

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

## 2.10 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ได้มีนักวิทยาศาสตร์ทำการศึกษาวิจัยถึงกระบวนการผลิตของเหลวจากวัสดุเหลือทิ้งจำพวกพลาสติก อาทิ พอลิเอทิลีน (Polyethylene : PE), พอลิพรอพิลีน (Polypropylene : PP), พอลิสไตรีน (Polystyrene : PS) พอลิเอทิลีนเทอแรพทาเลต (Polyethyleneteraphthalate : PET) รวมถึงการผสมพลาสติกเหล่านี้ด้วยกัน นอกจากนี้ได้มีการวิจัยนำเอาพลาสติกเหล่านี้รวมกับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ภาวะต่าง ๆ กัน

Serno D.P., Aguado J., Escola J.M., Garagorri E. [32] ศึกษาทั้งกระบวนการแตกตัวแบบใช้ความร้อน และ ตัวเร่งปฏิกิริยาของส่วนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และน้ำมันหล่อลื่น (lubricating oil base) ในเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องเตาเผาแบบหมุนโดยมีบริเวณที่ทำปฏิกิริยาสองช่วงการทำงานในอุณหภูมิที่ต่างกัน ( $T_1/T_2$ ) และการนำน้ำมันหล่อลื่นลงในพลาสติกจะลดความหนืดของน้ำมันได้เป็นผลดีต่อส่วนผสมที่ไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์ กระบวนการแตกย่อยแบบใช้ความร้อน ที่  $450/500^\circ\text{C}$  ของ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและน้ำมันหล่อลื่นที่มีส่วนประกอบตั้งแต่ 40/60 – 70/30 (% w/w) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวประมาณ 90 % โดยมีผลิตภัณฑ์ส่วนน้อยจะได้  $C_1 - C_4$  การแตกย่อยโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 70/30 (% w/w) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและน้ำมันหล่อลื่นและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ mesoporous Al-MCM-41 ที่  $400/450^\circ\text{C}$  จะมีความสามารถในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาที่ต่ำกว่า การแตกย่อยโดยใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเพียงอย่างเดียว ส่วนการเป็นพิษของตัวเร่งปฏิกิริยาตรงบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาโดยซัลเฟอร์และไนโตรเจนจะรวมกันเป็นสารประกอบและปรากฏอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นแต่ทั้งนี้ในอุณหภูมิที่สูงกว่า  $450/500^\circ\text{C}$  จะเกิดการแตกย่อยได้ดีที่ส่วนผสมนั้น ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Al-MCM-41 และ nanocrystalline HZSM-5 (n-HZSM -5) , Al-MCM-41 ส่วนมากจะได้ผลิตภัณฑ์ ส่วนใหญ่เป็น  $C_5 - C_{12}$  ประมาณ 65% แต่ n-HZSM - 5 จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สจำนวนมากกว่า และได้ผลิตภัณฑ์  $C_5 - C_{12}$  ประมาณ 63 % ผลิตภัณฑ์นี้ได้แสดงว่าเครื่องปฏิกรณ์เตาเผาแบบหมุนเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการแบบต่อเนื่องของของผสมระหว่างพลาสติกและน้ำมันหล่อลื่นโดยการบำบัดสิ่งเหล่านี้ได้ด้วยวิธีการแตกย่อยแบบความร้อนและแบบตัวเร่งปฏิกิริยา

Kim, J.R., Yoon, J.H. , Park, D.W. [33] การแตกตัวของผสมระหว่างพอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีน ซึ่งทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งแบตช์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ HNZ, SA, HZSM-5 ซึ่งการแตกย่อยจะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นน้ำมันที่มีคาร์บอนอะตอมในช่วงของแก๊สโซลีน และ HNZ จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีในการแตกย่อยโดยดีกว่า SA และ HZSM-5 ส่วน HZSM-5 จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สออกมามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่น ๆ ในการเพิ่มอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจะลดปริมาณของ ethylbenzene และ propylbenzene แต่จะเพิ่มปริมาณของสไตรีน และได้มีการวิเคราะห์หาอัตราการสลายตัวของพอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีนด้วยเครื่อง Thermogravimetric โดยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด (HNZ) natural clinoptilolite Zeolite จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีในการแตกย่อย PP + PS ที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  และตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดคือ HNZ, H2SM-5 และ SA จะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์หลัก คือน้ำมันที่ประกอบด้วยแอมโรแมติกในปริมาณมาก ซึ่งผลิตภัณฑ์น้ำมันส่วนใหญ่จะเป็น styrene, ethylbenzene and methyl styrene

ในส่วนของ HZSM-5 จะให้ปริมาณของแก๊สมากในส่วนของการเติม H เข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยา จากเดิมคือ  $NZ \rightarrow HNZ$  และ  $ZSM-5 \rightarrow HZSM-5$  จะเพิ่มผลิตภัณฑ์ที่เป็น ethylbenzene และ จะลดปริมาณของสไตรีนและในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจะเกิดผลิตภัณฑ์เป็นสไตรีนได้มากกว่า และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

Walendziewski, J., Steininger, M. [34] ได้ศึกษาถึงการนำของเสียจำพวกพอลิเอทิลีน และพอลิสไตรีนมาผ่านกระบวนการแตกย่อยด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ความร้อนและด้วยไฮโดรเจนใน closed autoclaves ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้นำไปวิเคราะห์จะมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว และดีเซลช่วงจุดเดือดที่ไม่ต้องการ และเมื่อมีการเติมไฮโดรเจนเข้าไปโดยในการทดลองใช้แพททินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยภาวะที่เหมาะสมในการแตกย่อยด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีนและพอลิสไตรีนคือที่ อุณหภูมิ 410 – 430 องศาเซลเซียส ถ้าภาวการณ์ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ไฮโดรเจน จะสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า คือ 390 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ 1.5 ชั่วโมงโดยผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะได้เป็นแก๊สและของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำกว่า 360 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ถึง 90 เปอร์เซ็นต์

Taghlei, M.M., Feng, Z., Huggines, F.E., Hulfmann G.P. [35] ศึกษาเปรียบเทียบการนำขยะพลาสติก ได้แก่ พอลิเอทิลีน (Polyethylene), พอลิพรอพิลีน (Polypropylene), พอลิเอทิลีนเทอแรพทาเลต (Polyethyleneterephthalate) และผสมพลาสติกเหล่านี้กับบิทูมินัสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว ภายใต้ภาวะอุณหภูมิ 420 – 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ที่ ความดัน 800 psig โดยเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ Iron-based catalyst และ HZSM-5 Zeolite catalyst จากการศึกษพบว่าผลการแตกตัวด้วยความร้อนทำให้เกิดการแตกตัวต่อเนื่องจนเสร็จสิ้นปฏิกิริยา โดยที่อุณหภูมิสูง ๆ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนอย่างรุนแรงจนได้โมเลกุลแก๊สไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากและผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีอิทธิพลต่อการแตกตัวของพลาสติกมากกว่าการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว สัดส่วนระหว่างซบิทูมินัสร่วมกับพลาสติกมีอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 800 psig เป็นเวลา 60 นาที พบว่าผลการทดลองใกล้เคียงกันกับการใช้ Iron-based catalyst แต่ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้มีปริมาณน้อยกว่าการใช้พลาสติกเพียงอย่างเดียว

Serrano, D. P., Aguado, J., Escola, J. M. [36] ศึกษาการเปลี่ยนพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา HMCM-41, HZSM-5 และ amorphous  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  เปรียบเทียบกับ thermal cracking พบว่า HMCM-41 มีประสิทธิภาพดีที่สุด นั่นคือทำให้พอลิสไตรีนเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ ร้อยละ 82 โดยใช้ อุณหภูมิ  $375^\circ\text{C}$  อัตราส่วนระหว่างพอลิสไตรีนต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 9 เวลา 4 ชั่วโมง โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือ benzene, ethylbenzene และ cumene ซึ่ง  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  ให้ผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับ HMCM-41 ส่วน HZSM-5 และ thermal cracking ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น styrene

Audisio G., Bertini F. [37] ศึกษาการแตกตัวพอลิสไตรีนโดยใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา silica, alumina, silica-alumina และ zeolites ภายใต้ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ  $200\text{-}550^\circ\text{C}$  ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า ที่อุณหภูมิ  $350^\circ\text{C}$  ขึ้นไปได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากกว่าร้อยละ 80 โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือ benzene รองมาคือ ethylbenzene และเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ styrene และ dimmer

Nakamura, I., Fujimoto, K. [38] ศึกษาการแตกตัวเป็นของเหลวของพอลิพรอพิลีน ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอน โดยศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-คาร์บอน (Yallourn-coal-base) ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-คาร์บอน และปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่าระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดการเปลี่ยนของพอลิพรอพิลีนไปเป็นของเหลวได้ดีกว่าการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีร้อยละของการเปลี่ยนแปลงถึงร้อยละ 92 โดยพอลิพรอพิลีนมีกลไกของปฏิกิริยาเป็นแบบการเกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) อุณหภูมิที่สูงขึ้นโดยความร้อนที่สูงขึ้นจะช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนด้วยความร้อนให้เป็นอนุมูลอิสระและเกิดปฏิกิริยาแบบลูกโซ่แบบต่อเนื่องจนได้สายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่เล็กลง และอยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวในระบบที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ การแตกตัวด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียว (Thermal cracking) พบว่าการเติม  $\text{H}_2\text{S}$  สามารถทำให้พอลิพรอพิลีนแตกตัวเป็นของเหลวได้ดีกว่าการใช้  $\text{CS}_2$  เนื่องจากสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในการเปิดโครงสร้างของพอลิพรอพิลีนและเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอนได้ดีกว่า เหล็กบน  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  เปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอน พบว่า ผลของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็ก บน  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  ยังมีกากของแข็งที่เหลือจากปฏิกิริยาสูงกว่าปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนประมาณ 3 ใน 4 เท่า

Ding, W., Liang, J., Anderson, L.L. [39] ศึกษาถึงการสังเคราะห์ของเหลวจากพลาสติกเหลือทิ้งเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ โดยได้ศึกษาถึงภาวะที่ใช้คือ อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส และ 525 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และ 10 นาที และ ศึกษาถึงผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ประกอบด้วย Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni-Mo/(HZSM5+SiO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Ni/(HZSM-5+SiO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และ KC-2600 ที่สามารถให้ร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสูง และนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เมื่อทำการทดลองที่ภาวะอุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ความดัน 300 Psig ให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันถึงร้อยละ 88.7 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนที่ความดัน 300 Psig โดยเพิ่มเวลาการทดลองเป็น 10 นาที ให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันเพียงร้อยละ 60 ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวในปริมาณน้อยกว่าการใช้เวลาทำปฏิกิริยาเพียง 5 นาทีเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของเหลวที่เป็นน้ำมันที่ได้จากระบบที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส และ 520 องศาเซลเซียส ให้ของเหลวที่มีองค์ประกอบที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน C<sub>4</sub>-C<sub>40</sub> และ C<sub>4</sub>-C<sub>20</sub> ตามลำดับ โดยไม่มีองค์ประกอบที่เป็น isoparaffins จึงไม่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ได้ แต่เมื่อทำการศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ กันพบว่า ในระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวได้ดีกว่า และจะใช้ภาวะที่รุนแรงน้อยกว่า

นอกจากนี้เมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 % wt ของ NiMo/(HZSM-5+SiO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และ 20 % wt ของ Ni/(HZSM-5+SiO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ในภาวะอุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน 1000 Psig เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวถึงร้อยละ 47.9 และ 64.8 ตามลำดับ โดยเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวในระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาก็ให้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้

Wang, L., Yoo, J., Park, S., Heon J., Ho, T.L., Deuk K.L. [40] ศึกษาการแตกตัวของพลาสติก พอลิพรอพิลีน (PP) พอลิเอทิลีน (PE) พอลิสไตรีน (PS) พอลิเอทิลีนเทอแรพทาเลต (PET) และอะคริโรไนไตรล์บิวตะไดอินสไตรีน (ABS) ร่วมกับน้ำมันหล่อลื่นพบว่า พอลิเอทิลีนจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่ 460 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน มากกว่า 99 % ภาวะที่เหมาะสมของพอลิพรอพิลีน คือ 430 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์เกือบสมบูรณ์ ซึ่งใช้พลังงานในการแตกตัวต่ำกว่า ใช้พอลิเอทิลีน ส่วนพอลิสไตรีนจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ที่ 430 องศาเซลเซียส เวลา 12 นาที ABS จะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันต่ำกว่า PS และใช้



เวลา 12 นาที 430 องศาเซลเซียส ส่วน PET จะให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันน้อย ประมาณ 78 % และใช้ เวลา 30 นาที ที่ 460 องศาเซลเซียส

D. P. Serrano, J. Aguado., J. M. Escola. [41] ศึกษาการแตกตัวของพอลิเอสไตรีนด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิดคือ HMCM-41, HZSM-5 และ amorphous  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  เปรียบเทียบกับการแตกตัวแบบความร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิด HMCM-41 มีความเป็นกรดสูง จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีและดีกว่าแบบใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว ส่วน HZSM-5 และ amorphous  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  จะให้ผลิตภัณฑ์ต่ำกว่า โดย HZSM-5 จะมี ผลิตภัณฑ์หลักเป็น สเตรีน ประมาณ 50 % ส่วน HMCM-41 และ  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  จะให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น เบนซีน เอทิลเบนซีน และควิมีน

สมสุข ไตรศุกิตติ [42] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพอลิเอทิลีนไปเป็นแก๊สโซลีนโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีน ประกอบด้วย อุณหภูมิระหว่าง 400 – 480 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 10 – 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 – 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ HZSM-5, ซิลิกาบนอะลูมินา และ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสัดส่วนโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาบนซีโอไลต์ HZSM-5 ต่าง ๆ กัน โดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก พบว่าภาวะที่ให้ร้อยละ ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ดีที่สุดคือ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 45 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีสัดส่วนโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา ( $\text{Si/Al} = 44$ ) จะให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลวถึง 69.20 % และค่าการกระจายตัวเป็นผลิตภัณฑ์โดยเป็นแนฟทาถึงร้อยละ 43.60 %

ธารินี กิตติเรืองทอง [43] ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ของเหลวจากลิกไนต์โดยใช้ กระบวนการร่วมของพอลิพรอพิลีนกับลิกไนต์โดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลาปาล์ม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ พบว่าภาวะที่มีแนวโน้มที่ดีที่สุดในการให้ ปริมาณของเหลวสูงสุดคือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิพรอพิลีนต่อลิกไนต์เป็น 12 ต่อ 3 (กรัม) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 62 บาร์ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยให้ปริมาณของเหลว 53.36 % แก๊ส 18.89 % และกากของแข็ง 27.75 % โดยน้ำหนัก

จากการวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์ Simulated Distillation Gas Chromatography พบว่าแนวโน้มที่ดีที่สุดในการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จำพวกแนฟทาและคีโรซีนได้สูงที่สุด คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิพรอพิลีนต่อลิกไนต์เป็น 12 ต่อ 3 (กรัม) ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส

ความดันแก๊สไฮโดรเจน 62 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยที่น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา และเปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ให้ผลของการกระจายตัวเป็นผลิตภัณฑ์ค่าใกล้เคียงกัน โดยให้ผลของการกระจายตัวเป็นผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย แนฟทา 35.6 % เครือซีน 7.41 % แก๊ส 28.95 %

ธราพงษ์ วิจิตรานต์ [44] ศึกษาการแตกตัวพอลิพอรฟิลินและพอลิสไตรีนภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน พบว่าพอลิสไตรีนแตกตัวเป็นของเหลว 89.93% ภายใต้ความดันไฮโดรเจน 30 กก./ตร.ซม. อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.45 กรัมต่อ 15 กรัมของพอลิสไตรีน องค์ประกอบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี ให้ แนฟทา 23.83% เครือซีน 1.80% แก๊ส ออยล์ 25.18% และโมเลกุลสายโซ่ยาว 39.12% ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น toluene ethylbenzene diphenylpropane และ cumene

พูนสุข พึ่งธรรม [45] ศึกษาการแตกตัวพอลิพอรฟิลินด้วยไฮโดรเจนโดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน พบว่าเหล็กบนถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยที่อุณหภูมิ 435 องศาเซลเซียส ความดันก๊าซไฮโดรเจน 30 กก./ตร.ซม. และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีปริมาณแนฟทา 40-65% เครือซีน 12-14% ก๊าซออยล์ 10-13% และโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว 4-5%

นฤภัทร ตั้งมันคงวรกุล [46] ศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิสไตรีนใช้แล้ว โดยศึกษาการละลายพอลิสไตรีนในตัวทำละลาย benzene และ cyclohexane พบว่า cyclohexane เป็นตัวทำละลายที่เหมาะสม ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ cyclohexane ต่อพอลิสไตรีนเป็น 73:27 ภาวะที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาไพโรไลซิสคือ อุณหภูมิ 350°C ความดัน 45 lb/in<sup>2</sup> เวลา 300 นาที สามารถเปลี่ยนพอลิสไตรีนเป็นผลิตภัณฑ์ได้ร้อยละ 71 ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือ ethylbenzene, toluene และ cumene ตามลำดับ

อรดา วงศ์สุภลักษณ์ [47] ศึกษาการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลท์ชนิด HZSM-5 เหล็กบนถ่านกัมมันต์ และ Co-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 75 มิลลิลิตร โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ 350-400 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60-180 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เหล็กบนถ่านกัมมันต์และ Co-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าภาวะที่เหมาะสม

ในการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้ แล้วที่ให้แนวโน้มของค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ดีที่สุดเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิด HZSM-5 คือ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน 88.3 และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 370 องศาเซลเซียสเวลา 120 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน 88.7 และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Co-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> พบว่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 370 องศาเซลเซียสเวลา 90 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน 91.2

ปนัดดา เมธาคุณวุฒิ [48] ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อพอลิเมอโรเซชันของพอลิสไตรีนที่ใช้แล้วพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของ Fe (5%)-Sn(5%)-F(2%) บนmolecular sieve ภาวะที่เหมาะสมภายใต้ความดันไฮโดรเจน คือ อุณหภูมิ 350°C ความดัน 400 lb/in<sup>2</sup> เวลา 90 นาที ส่วนภาวะที่เหมาะสมภายใต้ความดันไนโตรเจน คืออุณหภูมิ 350°C ความดัน 300lb/in<sup>2</sup> เวลา 90 นาที ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ของทั้งสองภาวะ คือ ethylbenzene, toluene, isopropyl benzene และ xylene

## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (Micro-reactor) รูปทรงกระบอก ปริมาตร 75 มิลลิลิตร ทำจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม SS 316 โดยด้านบนมีชุดฝาปิดทำจากสแตนเลส มีชุดอุปกรณ์สำหรับอัดแก๊ส และวาล์วนิรภัย สามารถทำการทดลองภายใต้ภาวะที่ทนความร้อนได้ถึง 500 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะพาสคาล มีเทอร์โมคัปเปิลทางด้านบนสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ ภายในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างทำการทดลอง แสดงดังรูป 3.1



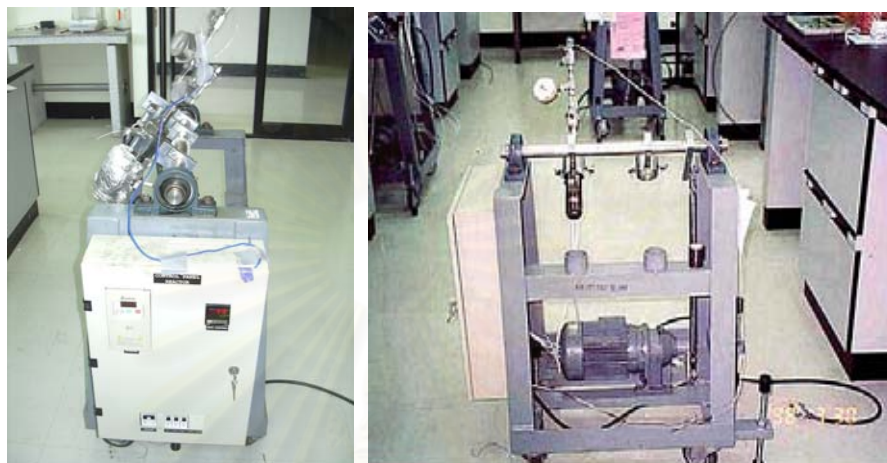
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ปริมาตร 75 มิลลิลิตร (Micro-reactor)

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

3.1.3 ขดลวดความร้อนแบบ Injection แรงดัน 230 โวลต์ กำลัง 400 วัตต์

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

3.1.5 ชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยมีมอเตอร์เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนแกนหมุนให้เครื่องปฏิกรณ์เกิดการแกว่ง สามารถปรับความเร็วรอบการเขย่าได้จากชุดควบคุมความเร็วดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดทดลองประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล และเครื่องเขย่า

3.1.6 ชุดกรองสุญญากาศ ประกอบด้วยชุดเครื่องแก้วต่อกับเครื่องดูดอากาศ เพื่อทำการกรองแยกแบบสุญญากาศ สำหรับแยกส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็ง โดยผ่านการกรองโดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว แสดงดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดกรองสุญญากาศ

- 3.1.7 เครื่องชั่งน้ำหนัก ซึ่งได้ละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 3.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก ซึ่งได้ละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3.1.9 นาฬิกาจับเวลา
- 3.1.10 ตู้อบ
- 3.1.11 ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)
- 3.1.12 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี(Gas Chromatography) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation) Varian CP-3800 พร้อมเครื่องตรวจวิเคราะห์แบบ FID และคอลัมน์ CP-SIL 5 CP สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887 [49] แสดงดังรูป 3.4
- 3.1.13 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer สำหรับวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น  
(Simulated Distillation Gas Chromatography : Varian CP-3800)



รูปที่ 3.5 เครื่อง FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer)

### 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

- 3.2.1 เม็ดพลาสติกพอลิพรอพิลีน
- 3.2.2 เม็ดพลาสติกพอลิสไตรีน
- 3.2.3 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว จากโรงซ่อมบำรุงรถไฟสถานีบางซื่อ
- 3.2.4 Toluene (Commercial grade: ความบริสุทธิ์ 80% minimum)
- 3.2.5 แก๊สไฮโดรเจน 99.99% จากบริษัท TIG Trading จำกัด
- 3.2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ (Fe/Activated carbon)
- 3.2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ประเภท HZSM-5
- 3.2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-โมลิบดีนัม บนอะลูมินา (Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

### 3.3 การดำเนินการวิจัย

- 3.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของพอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีน ได้แก่ คาร์บอน , ไฮโดรเจน
- 3.3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วก่อนการทดลอง
- 3.3.3 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์

โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 5 ส่วนการทดลองดังนี้

1. การศึกษาหาภาวะเงื่อนไขเบื้องต้นที่เหมาะสมที่จะใช้ในการทำการทดลองต่อไปได้แก่
  - 1.1 การศึกษาหาเปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ที่ 1, 5, 10 เปอร์เซ็นต์
  - 1.2 การศึกษาหาอัตราส่วนของพอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีนที่เหมาะสม
  - 1.3 การศึกษาหาอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและพลาสติกผสม
2. การศึกษาหาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

โดยทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ 4 ตัวแปร ( $2^4$  Factorial experimental design) ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิ เวลา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความดันแก๊สไฮโดรเจน ดังตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

ตัวแปร	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
1. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	390	450
2. เวลา (นาที)	45	90
3. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)	0.15	1.5
4. ความดันแก๊สไฮโดรเจน (บาร์)	1	10

3. การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ ตาม ASTM D2887 เป็นแก๊สโซลีน (Gasoline) เคโรซีน (Kerosene) แก๊สออยล์เบา (Light gas oil) แก๊สออยล์ (Gas oil) และกากน้ำมันหนัก (Long residue)

3.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยา ดังนี้

390, 410, 430 และ 450 องศาเซลเซียส

3.2 ศึกษาเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ดังนี้

45, 60, 75, 90 และ 105 นาที

3.3 ศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ดังนี้

0.15, 0.50, 0.80, 1.20, 1.50 กรัม และไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

3.4 ศึกษาผลของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นที่มีผลต่อปฏิกิริยา ดังนี้

1, 5 และ 10 บาร์ และไม่เติมไฮโดรเจน



4. การศึกษาเปรียบเทียบการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ
  - 4.1 เหล็กบนถ่านกัมมันต์
  - 4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM - 5
  - 4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni - Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
  - 4.4 Thermal cracking
5. วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบและสารตั้งต้น

พอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีน นำไปอบในตู้อบแบบ Dry Oven ที่มีอุณหภูมิ ประมาณ 80 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่แล้วเก็บในตู้ดูดความชื้น เพื่อใช้เตรียมไว้ทดลองต่อไป น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว วิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยเครื่อง (Simulated Distillation Gas Chromatography)

ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ มีวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังนี้

1. ชั่งถ่านกัมมันต์ 50 กรัม และ Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O 15.63 กรัม
2. รินน้ำกลั่นลงไปในถ่านกัมมันต์ที่ชั่งน้ำหนักเตรียมไว้จนเปียกชุ่มแล้วนำไปเข้าเครื่องดูดแบบสูญญากาศเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
3. ละลาย Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O ที่ชั่งน้ำหนักเตรียมไว้ ด้วยน้ำกลั่นปริมาตรพอประมาณจนละลายหมดให้มีปริมาตรใกล้เคียงกับปริมาตรของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมไว้
4. เมื่อไล่อากาศออกจากถ่านกัมมันต์แล้ว ค่อย ๆ เติมสารละลาย Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> ที่เตรียมไว้ลงบนถ่านกัมมันต์ กวนให้สารละลายผสมกับถ่านกัมมันต์อย่างทั่วถึงลงในของผสมแล้วทิ้งไว้ 15 นาที แล้วจึงนำถ่านกัมมันต์ที่กำลัง impregnate ไปเข้าเครื่องดูดแบบสูญญากาศ เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 คืน
5. นำของผสมถ่านกัมมันต์และสารละลาย Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนแห้งเหมือนถ่านกัมมันต์เริ่มต้นแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

6. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการ Impregnate แล้วไป reduction ด้วยแก๊สไฮโดรเจนด้วยอัตรา 120 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
7. วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว (Surface Area) โดยใช้เครื่อง BET

### 3.4.2 ขั้นตอนทำการทดลอง

3.4.2.1 นำพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วใส่ในเครื่องปฏิกรณ์รวม 15 กรัม และใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ตามที่ต้องการทดลอง แล้วประกอบเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับส่วนประกอบต่างๆ แสดงดังรูป 3.1

3.4.2.2 นำเครื่องปฏิกรณ์ไปใส่อากาศที่อยู่ภายในออกโดยผ่านแก๊สไฮโดรเจน จากนั้นอัดแก๊สไฮโดรเจนจนได้ความดันที่ต้องการ ทำการตรวจสอบรอยรั่วของแก๊สด้วยน้ำสบู่ตามข้อต่อของเครื่องปฏิกรณ์

3.4.2.3 นำเครื่องปฏิกรณ์ต่อเข้ากับชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ เทอร์โมคัปเปิลและอุปกรณ์ขดลวดความร้อน จากนั้นหุ้มด้วยฉนวน เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง

3.4.2.4 ทำการทดลองตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด เมื่อครบกำหนดแล้วนำฉนวนและขดลวดความร้อนออก ใช้พัดลมเป่าเครื่องปฏิกรณ์จนอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง

3.4.2.5 แยกผลิตภัณฑ์น้ำมันออกจากกากของแข็งด้วยการกรองแบบสุญญากาศ

3.4.2.6 นำผลิตภัณฑ์น้ำมันและกากของแข็งที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก.

3.4.2.7 นำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatography เพื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันในช่วงคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆ และวิเคราะห์องค์ประกอบสารเคมีที่เกิดขึ้น

3.4.2.8 คำนวณร้อยละการเปลี่ยนของสารตั้งต้น

$$\text{การเปลี่ยน (\% conversion)} = \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดขึ้น} \times 100}{\text{น้ำหนักสารตั้งต้นที่เริ่มต้น}}$$

$$\text{การเปลี่ยน (\% Overall gasoline yield)} = \% \text{ ของน้ำมันที่ได้} \times \% \text{ ของแก๊สไฮโดรเจน}$$

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเปลี่ยนแปลงไปเป็นน้ำมันทั้งในเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพเพื่อประโยชน์ในการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนการใช้้ำมันเชื้อเพลิงในอนาคตต่อไปได้ โดยศึกษาถึงอิทธิพลของ อัตราส่วนของพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีน อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นต่อพลาสติก อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง เวลาที่ใช้ในปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น โดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตลอดจนศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวที่มีผลต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของน้ำมัน

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น

##### 4.1.1 องค์ประกอบธาตุของเม็ดพลาสติก

วิเคราะห์เม็ดพลาสติกแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) เฉพาะธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจน ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHN/O Analyser (Perkin Elmer PE2400 series II) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1

##### 4.1.2 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยเครื่อง Simulated distillation gas chromatograph ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.2

##### 4.1.3 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (Surface Area) ที่ตรวจวัดด้วยเครื่อง BET Surface Area พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีร้อยละของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน จะให้พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของเม็ดพลาสติก

wt%	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (% wt. dry basis)	
	Polypropylene	Polystyrene
C	84.78	91.87
H	15.22	8.13
C:H	5.56	11.32

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

องค์ประกอบ	% SELECTIVITY
gasoline	0.00
kerosene	0.50
light gas oil	3.72
gas oil	8.48
long residue	87.25

จากตาราง 4.1 แสดงการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของพอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีนที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้น ในงานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุ พบว่าพอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีนมีองค์ประกอบเป็นคาร์บอน และไฮโดรเจน เท่านั้น มีปริมาณคาร์บอนคงตัว 84.78 % และ 91.87 % และ ส่วนการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ดังตารางที่ 4.2 พบว่ามีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น กากน้ำมันหนักมากถึง 87.25 % ซึ่งจะเห็นว่าน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมีสารที่เป็นสารโมเลกุลขนาดใหญ่และไม่พบปริมาณของแก๊สโซลีนเลยซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของงานวิจัยที่ต้องการสังเคราะห์ขึ้น

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

ร้อยละของเหล็กบนถ่านกัมมันต์	พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด ( $S_{BET}$ ) ตารางเมตร/กรัม
Activated carbon	950
1 % Fe/AC	790
5 % Fe/AC	774
10 % Fe/AC	529

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อร้อยละของเหล็กมากขึ้นจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวรูพรุนน้อยลงเนื่องจากปริมาณโลหะที่เติมลงไปมากขึ้นจะไปบดบังและแทรกซึมเข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์มากขึ้นจึงทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงแต่ในทางการกระตุ้นทางเคมีซึ่งจะมีส่วนช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิวของโลหะให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการดูดซับและเกิดปฏิกิริยากับสารตั้งต้นได้ดีขึ้น

#### 4.2 อิทธิพลของตัวแปรเบื้องต้นที่มีผลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาและหาภาวะที่ดีที่สุดในการเกิดกระบวนการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในภาวะของตัวแปรต่าง ๆ กัน โดยศึกษาถึงภาวะที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากกระบวนการแตกตัวทั้งในเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพ ซึ่งผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีลักษณะเป็นน้ำมันซึ่งสามารถหาร้อยละของการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ หรือร้อยละการเปลี่ยน แล้วนำผลิตภัณฑ์น้ำมันไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยศึกษาจากค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่อง Simulated distillation gas chromatograph และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ว่ามีหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่เป็นประโยชน์ในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อย่างไร

### การทดลองแบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ

1. การศึกษาหาภาวะเงื่อนไขเบื้องต้นที่เหมาะสมที่จะใช้ในการทำการทดลองต่อไป
2. การศึกษาหาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์
3. การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ ตาม ASTM D2887 เป็นแก๊สโซลีน (Gasoline) เคโรซีน (Kerosene) แก๊สออยล์เบา (Light gas oil) แก๊สออยล์ (Gas oil) และกากน้ำมันหนัก (Long residue)
4. การศึกษาเปรียบเทียบการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์กับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ
5. วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

ในการทดลองศึกษาภาวะเบื้องต้นเพื่อหาแนวโน้มที่เหมาะสมในการนำมาทดลองต่อไปโดยได้ศึกษาถึง

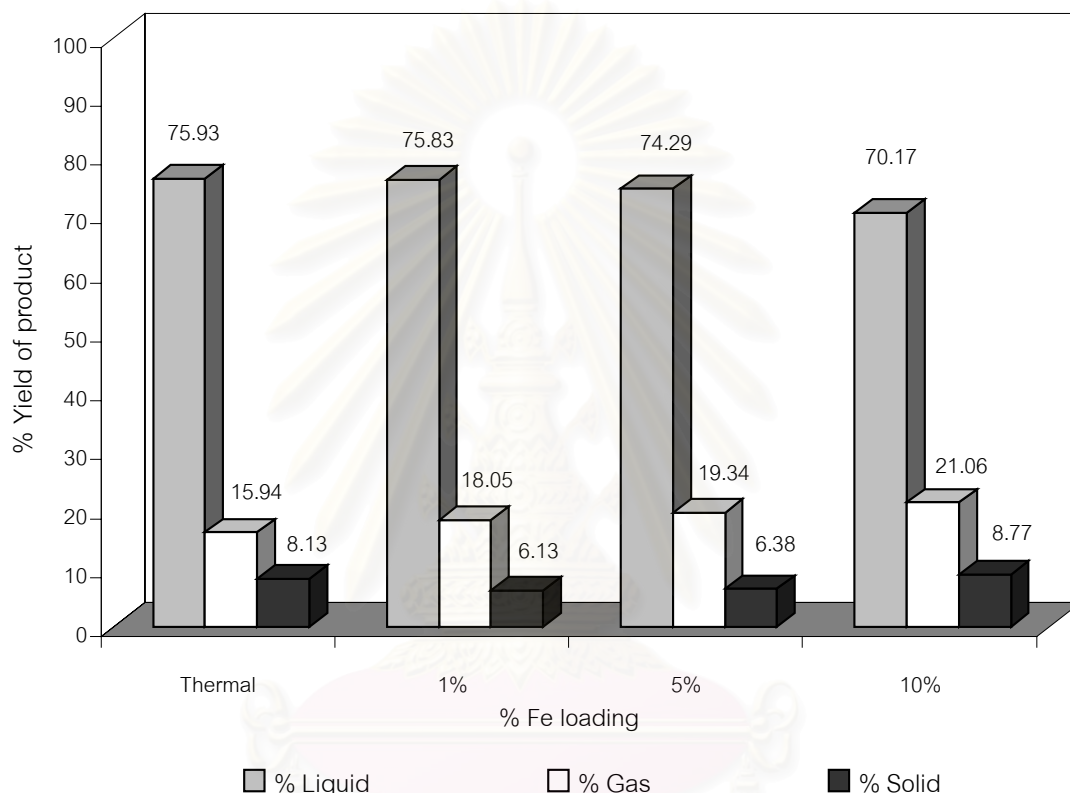
1. เปอร์เซ็นต์เหล็กบนถ่านกัมมันต์ระหว่าง 1 % – 10 %
2. อัตราส่วนของพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีน
3. อัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อพลาสติก

#### 4.2.1 ผลของเปอร์เซ็นต์เหล็กบนถ่านกัมมันต์

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์และทำการเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์เหล็กเป็น 1%, 5%, 10% และไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทำการศึกษาที่ภาวะต่าง ๆ ดังนี้

1	อัตราส่วนของพอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีน	50 : 50
2	อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกับพลาสติก	50 : 50
3	อุณหภูมิที่ทำการทดลอง	430 องศาเซลเซียส
4	เวลาที่ทำปฏิกิริยา	60 นาที
5	ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา	0.5 กรัม
6	ความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้น	10 บาร์

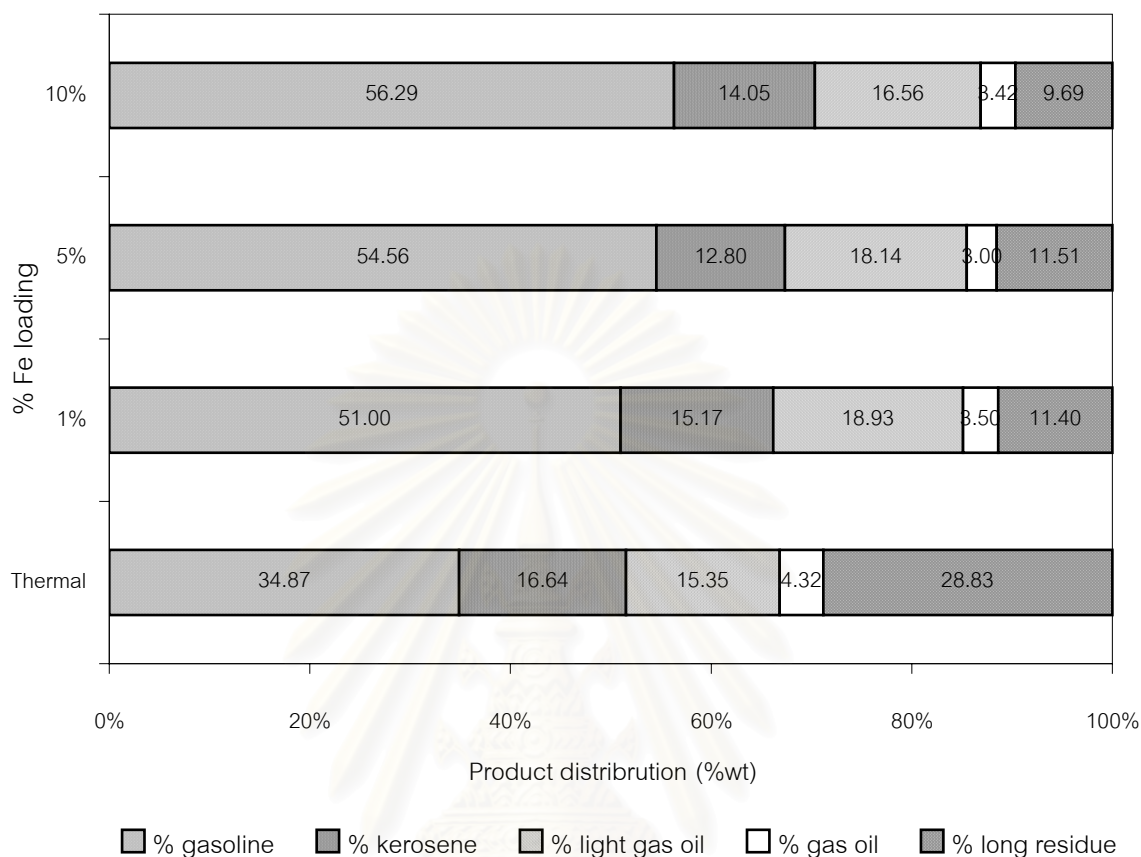
เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์มากขึ้นจาก 1%, 5%, 10% จะให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันต่ำลง โดยปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากกระบวนการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่า คือ 75.83%, 74.29% และ 70.17 % ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของเหล็กที่มากขึ้นจะช่วยให้สารตั้งต้นแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์มากขึ้นจนกลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กหรือเป็นแก๊สได้มากขึ้นจึงทำให้ได้ปริมาณของน้ำมันต่ำลง ส่วนระบบที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีปริมาณน้ำมันเป็น 75.93 %



**รูปที่ 4.1** ผลของปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากกระบวนการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่เปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 1% - 10% ที่อัตราส่วน PP:PS 50:50 อัตราส่วน Lub:Plastic 50:50 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์

เมื่อทำการศึกษาผลของเปอร์เซ็นต์เหล็กว่ามีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่อง Simulated distillation gas chromatograph แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์เหล็กบนถ่านกัมมันต์เปลี่ยนแปลงจาก 1% , 5% , 10% ช่วงการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นและจะมีส่วนของผลิตภัณฑ์น้ำมันเป็นแก๊สไซลีน เคนซีนและแก๊สออกซินิดเบามาก เนื่องจาก

ปริมาณเหล็กที่มากขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่นั้นแตกตัวได้ดีขึ้นจึงมีปริมาณแก๊สโซลีนมากขึ้นด้วย



**รูปที่ 4.2** ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยเครื่อง Simulated distillation gas chromatograph ที่เปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 1% - 10% ที่อัตราส่วน PP:PS 50:50 อัตราส่วน Lub:Plastic 50:50 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์

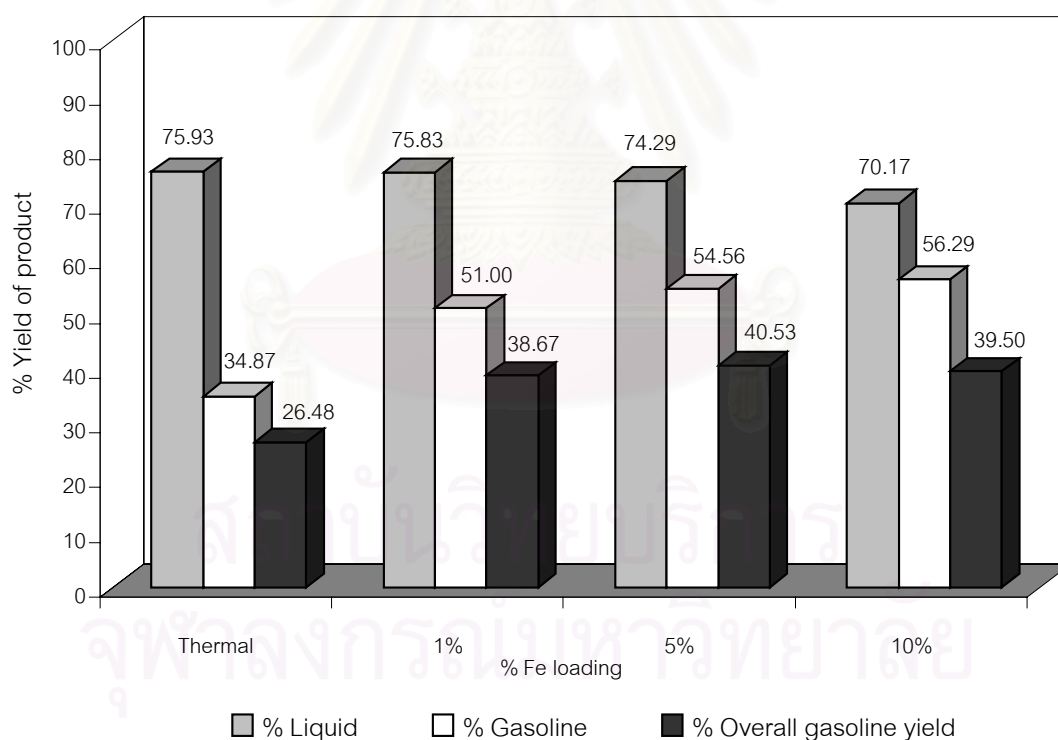
เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติม และไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าในกระบวนการที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนน้อยมากและมีส่วนที่เป็นของแข็งจำนวนมาก โดยในระบอบที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าจะมีกลไกการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) โดยมีการสลายตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ด้วยความร้อนภายใต้ความดัน ทำให้ได้โมเลกุลขนาดเล็กลง โดยเริ่มต้นจะเกิดอนุมูลอิสระ (free radical) และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ คือ แตกตัวออกเป็นโมเลกุลที่มีสายโซ่สั้นลง ต่อกันไปพร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ด้วย แต่เนื่องจากสารตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วผสมรวมกับพลาสติกซึ่งการแตกตัวด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่เพียงพอเนื่องจากโครงสร้างของน้ำมันหล่อลื่นซับซ้อน



ซ้อนเป็นโมเลกุลใหญ่ และยังมีมวลโมเลกุลสูงเป็นผลทำให้เกิดการแตกตัวได้ผลิตภัณฑ์น้อยและได้ของแข็งสูง

ส่วนในระบบที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนมาก เนื่องจากมีการแตกตัวของสารตั้งต้นโดยอิทธิพลร่วมกันของความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) โดยเมื่อเริ่มทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงจะมีการแตกตัวโดยความร้อนเป็นผลทำให้เกิดสายโซ่โมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงคือ ช่วงเคโรซีน และแก๊สออยล์ จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะไปแตกตัวโมเลกุลขนาดเล็กให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กลงอีกที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำ ๆ เป็นจำนวนมากขึ้นโดยสังเกตได้จากปริมาณแก๊สโซลีนที่มากขึ้นและจะได้ปริมาณแก๊สมากขึ้นด้วย

และจากการวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สโซลีนรวมทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปอร์เซ็นต์ของเหล็กมากขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณของน้ำมันลดลงและได้เปอร์เซ็นต์ของแก๊สโซลีนมากขึ้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบเป็นปริมาณแก๊สโซลีนทั้งหมดจากสารตั้งต้นจะได้ว่า เปอร์เซ็นต์เหล็กที่ 1% , 5% , 10% ไม่แตกต่างกันมากนักและเปอร์เซ็นต์เหล็กที่เหมาะสมในการทำการทดลองมากที่สุดคือ 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์



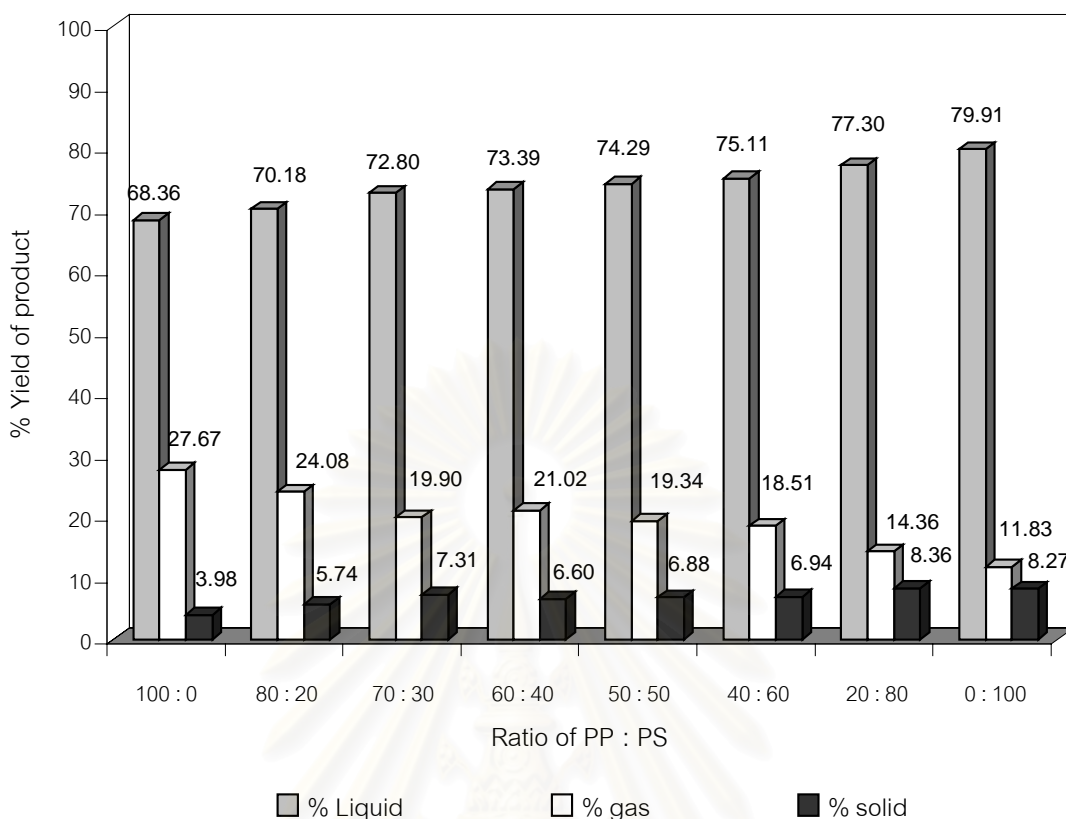
**รูปที่ 4.3** ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากเปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ระหว่าง 1% - 10% ที่อัตราส่วน PP:PS 50:50 อัตราส่วน Lub:Plastic 50:50 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์

#### 4.2.2 ผลของอัตราส่วนพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีน

การศึกษาถึงผลของอัตราส่วนของพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีนโดยทำการเปลี่ยนอัตราส่วนเพื่อศึกษาถึงแนวโน้มของปริมาณพอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีน ที่ 100 : 0 , 80 : 20 , 70 : 30 , 60 : 40 , 50 : 50 , 40 : 60 , 20 : 80 และ 0 : 100 โดยทำการศึกษาที่ภาวะต่าง ๆ ดังนี้

1	เปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์	5 %
2	อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกับพลาสติก	50 : 50
3	อุณหภูมิที่ทำการทดลอง	430 องศาเซลเซียส
4	เวลาที่ทำปฏิกิริยา	60 นาที
5	ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา	0.5 กรัม
6	ความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้น	10 บาร์

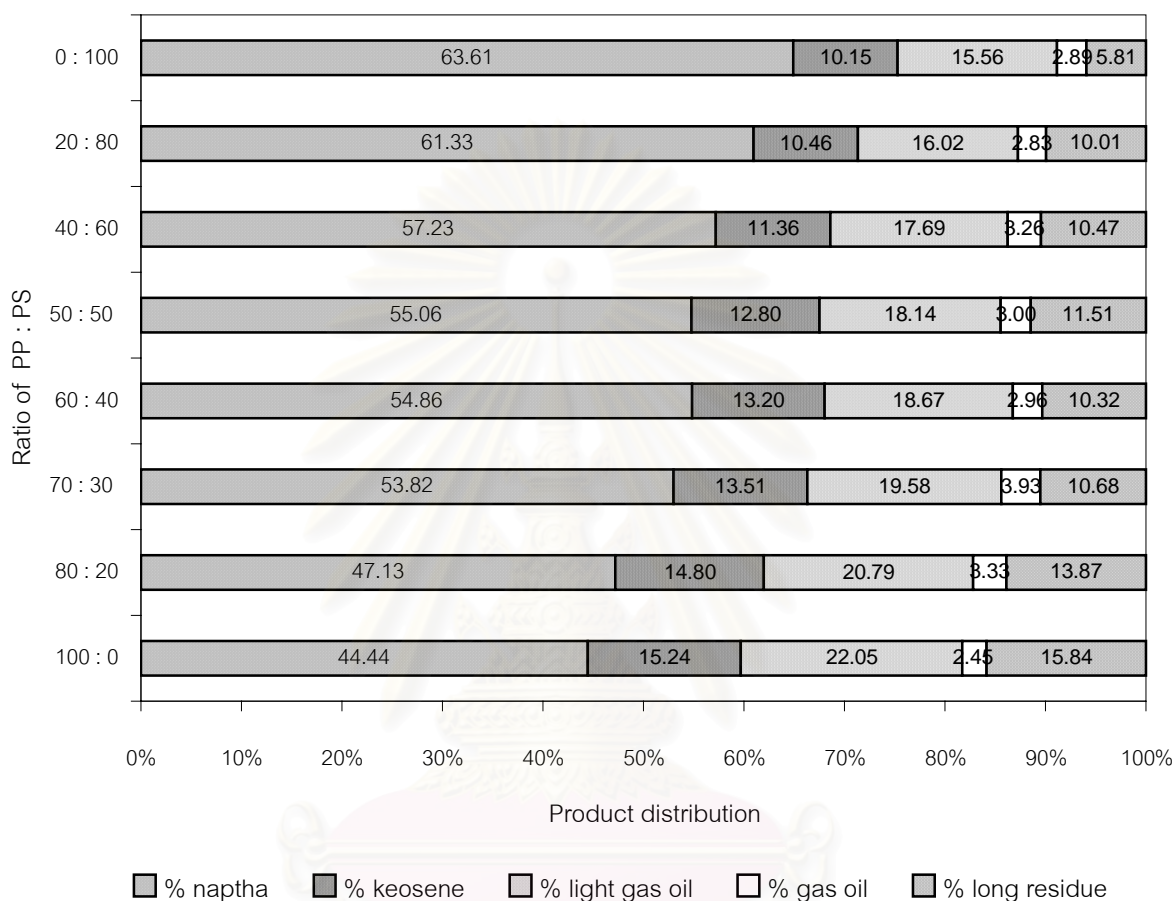
โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นน้ำมันทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ พบว่าเมื่อใช้พอลิพรอพิลีนเพียงอย่างเดียวจะให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันน้อยกว่าเมื่อใช้พอลิสไตรีนเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณพอลิสไตรีนมากขึ้นจะให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีแนวโน้มสูงขึ้น จากผลการทดลองเมื่อใช้อัตราส่วนพอลิพรอพิลีนกับพอลิสไตรีน 100 : 0 , 80 : 20 , 70 : 30 , 60 : 40 , 50 : 50 , 40 : 60 , 20 : 80 และ 0 : 100 น้ำหนักรวมประมาณ 15 กรัม จะให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันเป็น 68.36 % , 70.18 % , 72.80 % , 73.39 % , 74.29 % , 75.11% , 77.30% , 79.91% ตามลำดับ แสดงผลดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้พอลิสไตรีนในปริมาณที่มากขึ้นทำให้การเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำมันได้มากขึ้นเนื่องจากพอลิพรอพิลีนเป็นพลาสติกที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าและเป็นโมเลกุลสายโซ่ตรงทำให้แตกตัวได้ง่ายกว่าจึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สเป็นจำนวนมากขึ้นด้วยและโดยในการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวโดยความร้อนในช่วงแรก พอลิพรอพิลีนที่มีหมู่เมทิลเกาะอยู่บนสายโซ่หลัก ทำให้มีโครงสร้างแบบหลวม ๆ มีโอกาสที่จะแตกตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางจำพวกเคโรซีนและแก๊สออยล์จากอิทธิพลของความร้อน และได้รับอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการแตกย่อยโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจนได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจำพวกแก๊สโซลีน ส่วนพอลิสไตรีนซึ่งเป็นพลาสติกที่มีโครงสร้างซับซ้อนกว่าเป็นโมเลกุลใหญ่กว่าจึงแตกตัวเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กได้น้อยกว่าจึงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนได้น้อยและได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมากกว่าการใช้พอลิพรอพิลีนเพียงอย่างเดียว



**รูปที่ 4.4** ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของพอลิพรอพิลีนกับพอลิสไตรีนในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อัตราส่วน Lubricant : Plastics 50:50 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 10 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่อง Simulated distillation gas chromatograph แสดงผลดังรูป 4.5 พบว่า เมื่อทำการทดลองโดยใช้พอลิพรอพิลีนเพียงอย่างเดียวจะให้ปริมาณแก๊สโซลีนน้อยกว่าการใช้พอลิสไตรีนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเมื่อพอลิพรอพิลีนได้รับความร้อนในช่วงแรก โครงสร้างของพอลิพรอพิลีนที่มีโครงสร้างเป็น isotactic ที่มีหมู่ของ  $\text{CH}_3$  เกาะอยู่ที่สายโซ่หลัก จะเกิดการแตกตัวจากการให้ความร้อนเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งจะทำให้อนุมูลอิสระดังกล่าวไปดึงไฮโดรเจนอะตอมที่บริเวณ tertiary hydrogen บนสายโซ่หลักของพอลิพรอพิลีน ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระของไฮโดรเจน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อเนื่องกันไปจนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนคาร์บอนขนาดเล็กลงได้เป็นสายโซ่โมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางโดยผลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยส่งเสริมให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง (Catalytic cracking) ได้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลงได้ต่อไปเรื่อย ๆ จนเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนมากขึ้นไป จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์

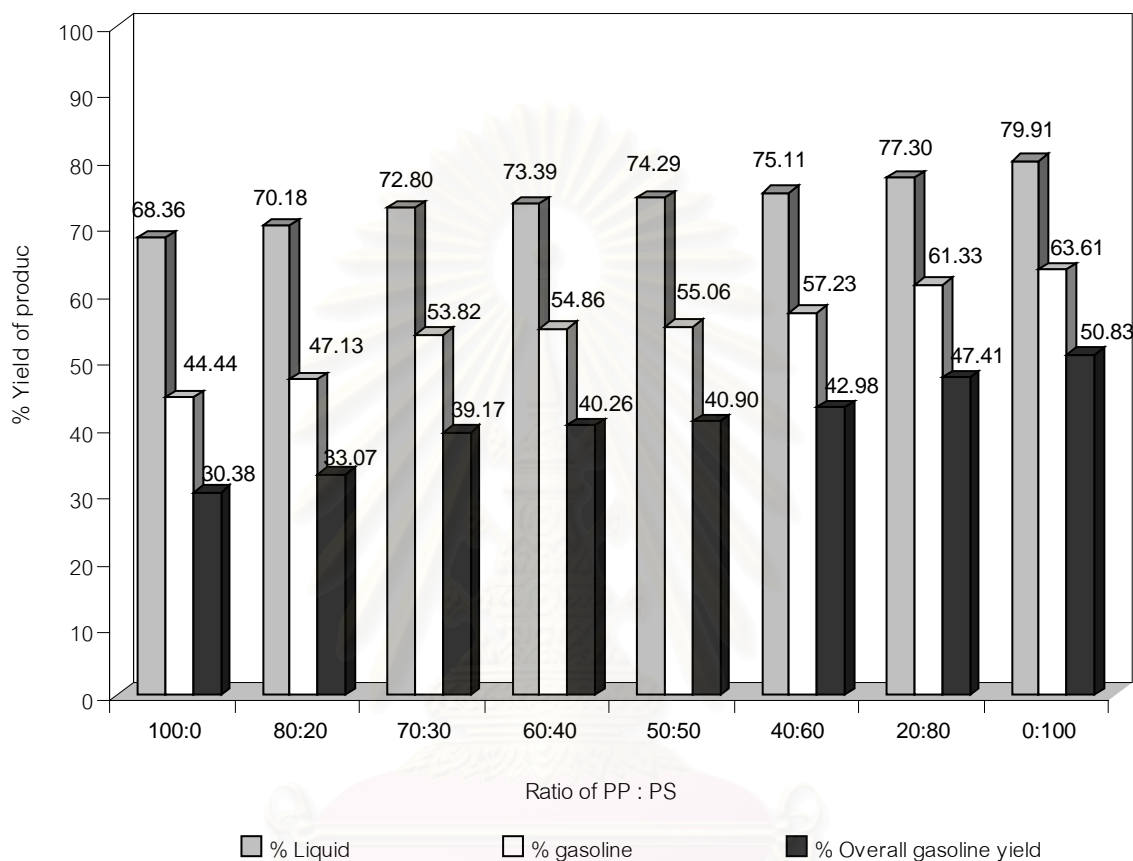
แก๊สโซลีนในปริมาณที่น้อย เมื่อมีการใช้พอลิสไตรีนผสมเข้าไปมากขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณของแก๊สโซลีนมากขึ้นเนื่องจากพอลิสไตรีนเป็นโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่กว่าพอลิพรอพิลีนและมีหมู่เบนซีนเป็นองค์ประกอบด้วยซึ่งเป็นหมู่ของสารที่ต้องการให้เป็นผลิตภัณฑ์



**รูปที่ 4.5** ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulate Distillation G.C. ที่อัตราส่วนพอลิพรอพิลีนกับพอลิสไตรีนต่าง ๆ กัน อัตราส่วน Lubricant : Plastics 50 : 50 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม

และจากการวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สโซลีนรวมทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิสไตรีนมากขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณของน้ำมัน ปริมาณแก๊สโซลีนมากขึ้น และปริมาณแก๊สโซลีนรวมทั้งหมดจากสารตั้งต้นมากขึ้นด้วย แต่เนื่องจากในปัจจุบันปริมาณของพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน และพอลิสไตรีนที่มีการผลิตใช้ในประเทศไทยปี 2547 พบว่ามีปริมาณการใช้ที่มีแนวโน้มสูงขึ้นและมากเมื่อเทียบกับพลาสติกชนิดอื่น ๆ ซึ่งถ้าคิดเป็นอัตราส่วนเฉพาะของพอลิพรอพิลีนกับพอลิสไตรีนจะเป็น 70 : 30 อีกทั้งขยะพลาสติกในปัจจุบันก็ไม่ได้จัด

แยกเป็นชนิดแต่ละชนิดอย่างชัดเจนดังนั้นก็จะเป็นเหตุผลที่เลือกนำเอาพลาสติกทั้งสองชนิดนี้มาทำการแตกตัวให้เป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีคุณค่า และเลือกนำเอาอัตราส่วนพอลิพรอพิลีนกับพอลิสไตรีน เป็น 70:30 ไปทำการทดลองต่อไป ซึ่งเหตุผลหนึ่งจากปริมาณการใช้ปริมาณพลาสติกและขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นภายในประเทศไทยด้วย



**รูปที่ 4.6** ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากอัตราส่วนระหว่างพอลิพรอพิลีนกับพอลิสไตรีนต่าง ๆ กัน ที่อัตราส่วน Lubricant : Plastics 50 : 50 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.2.3 ผลของอัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อพลาสติก

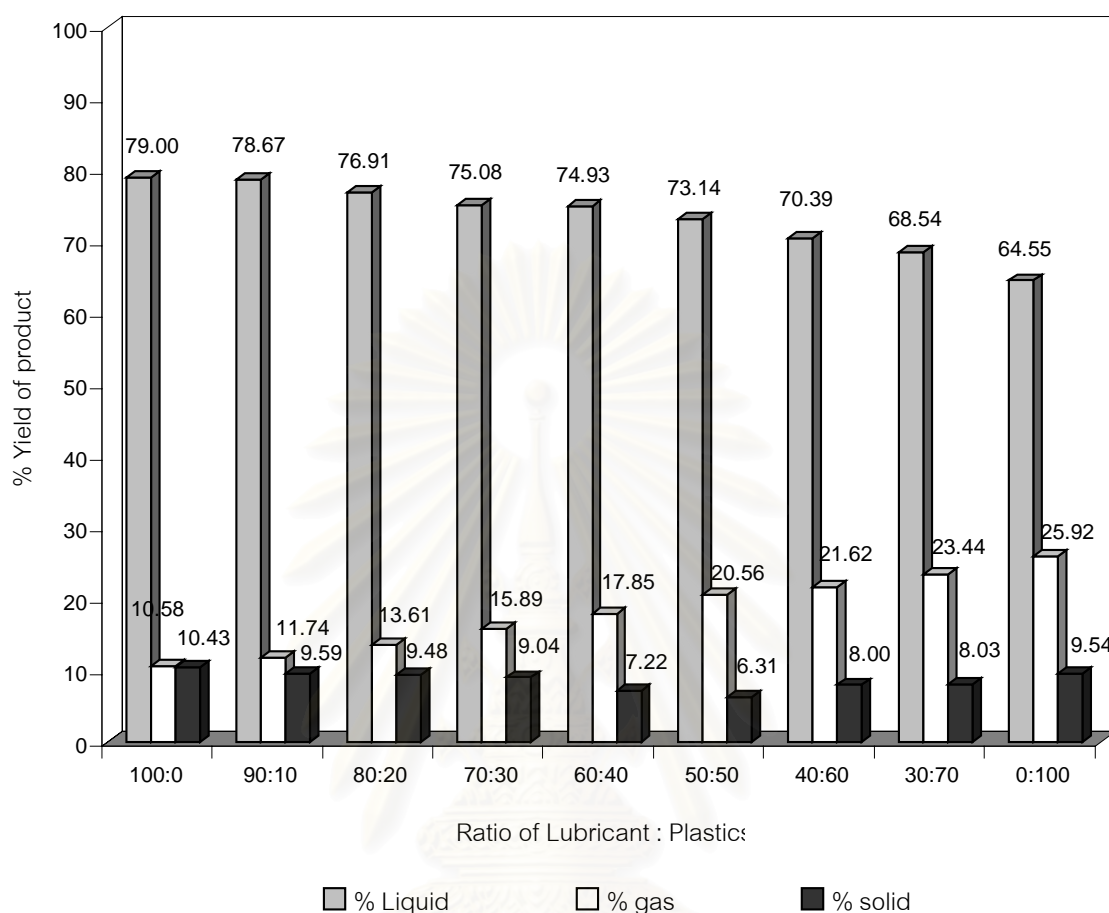
การศึกษาถึงผลของอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อพลาสติกโดยทำการเปลี่ยนอัตราส่วน ที่ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70 และ 0 : 100 โดยทำการศึกษาที่ภาวะต่าง ๆ ดังนี้

1.	เปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์	5	%
2.	อัตราส่วนของพอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีน	50	: 50
3.	อุณหภูมิที่ทำการทดลอง	430	องศาเซลเซียส
4.	เวลาที่ทำปฏิกิริยา	60	นาที
5.	ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา	0.5	กรัม
6.	ความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้น	10	บาร์

โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกับพลาสติกผสมที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นน้ำมันทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นเพียงอย่างเดียวจะได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันมากเมื่อเพิ่มปริมาณของพลาสติกลงไปจะทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันน้อยลงและได้ปริมาณของแก๊สมากขึ้น จากผลการทดลองเมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกับพลาสติก 100 : 0 , 90 : 10 , 80 : 20 , 70 : 30 , 60 : 40 , 50 : 50 , 40 : 60 30 : 70 และ 0 : 100 น้ำหนักรวมประมาณ 15 กรัม ให้อายุของผลิตภัณฑ์น้ำมันเป็น 79.00 % , 78.67 % , 76.91 % , 75.08 % , 74.93 % , 73.14% , 70.39% , 68.54% และ 64.55% ตามลำดับ แสดงผลดังรูปที่ 4.7 ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่เติมปริมาณของพลาสติกลงไปมากขึ้นจะทำให้การแตกตัวเป็นสารผลิตภัณฑ์ได้ง่ายขึ้น เพราะพลาสติกที่ใช้เป็นพลาสติกที่มีโมเลกุลขนาดเล็กสามารถแตกตัวได้ง่ายกว่าเมื่อเวลานานขึ้นจะส่งผลทำให้โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวเกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะมีบทบาทในการช่วยการแตกตัวของโมเลกุลขนาดกลางให้เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กจนกลายเป็นแก๊สมากขึ้นจึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง

นอกจากนี้การที่เติมปริมาณของพลาสติกลงไปมากขึ้นจะทำให้การแตกตัวของพลาสติกสามารถให้ไฮโดรเจนแก่น้ำมันหล่อลื่นได้ แต่เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน การแตกตัวจึงเป็นไปได้ยาก ต้องใช้ความร้อนสูง ความดันสูง และใช้เวลานาน เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก หากในการทำปฏิกิริยาทำที่อุณหภูมิต่ำเกินไปก็จะไม่สามารถทำให้น้ำมันหล่อลื่นสามารถแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ ดังนั้นการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันจึงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพอลิพรอพิลีน และ

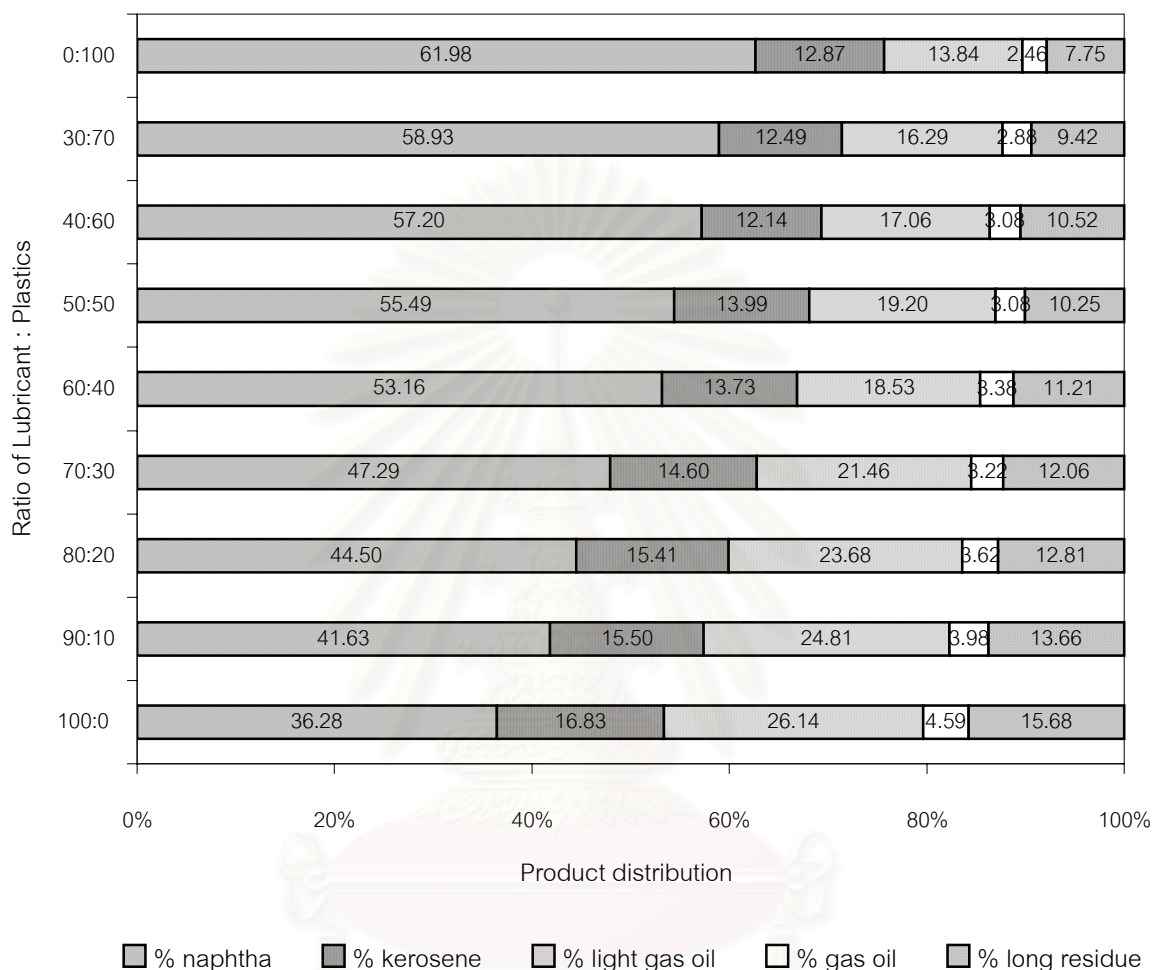
พอลิस्टาไร์นเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากมีโมเลกุลที่ไม่ซับซ้อนและโครงสร้างโมเลกุลมีการเกาะกันอยู่อย่างหลวม ๆ สามารถแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กได้ง่ายกว่าน้ำมันหล่อลื่น



**รูปที่ 4.7** ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกับพลาสติกในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อัตราส่วน PP : PS 70:30 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 10 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อหาค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่อง Simulated distillation gas chromatograph แสดงผลดังรูป 4.8 พบว่า เมื่อทำการทดลองโดยใช้น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเพียงอย่างเดียวจะให้ปริมาณของแก๊สโซลีนน้อยเพราะน้ำมันหล่อลื่นเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่การแตกตัวจำเป็นต้องใช้ที่อุณหภูมิสูงและเวลานานดังนั้นเมื่อใช้น้ำมันหล่อลื่นเพียงอย่างเดียวจึงแตกตัวเป็นแก๊สโซลีนได้น้อยโดยผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สออกยล์มากกว่าซึ่งยังเป็นสารโมเลกุลขนาดใหญ่อยู่ เมื่อเติมปริมาณของพลาสติกมากขึ้นจะได้ปริมาณของแก๊สโซลีนมากขึ้นและได้กากน้ำมันหนักน้อยลงทั้งนี้เนื่องมาจากพลาสติกที่ใช้

เป็นพลาสติกที่มีขนาดโมเลกุลขนาดเล็กสามารถแตกตัวให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กได้ง่ายอีกทั้งยังช่วยให้ไฮโดรเจนแก๊สน้ำมันหล่อลื่นทำให้น้ำมันหล่อลื่นแตกตัวได้ดีขึ้นเมื่อรวมกับพลาสติกจึงได้ปริมาณของแก๊สโซลีนมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของพลาสติกมากขึ้น

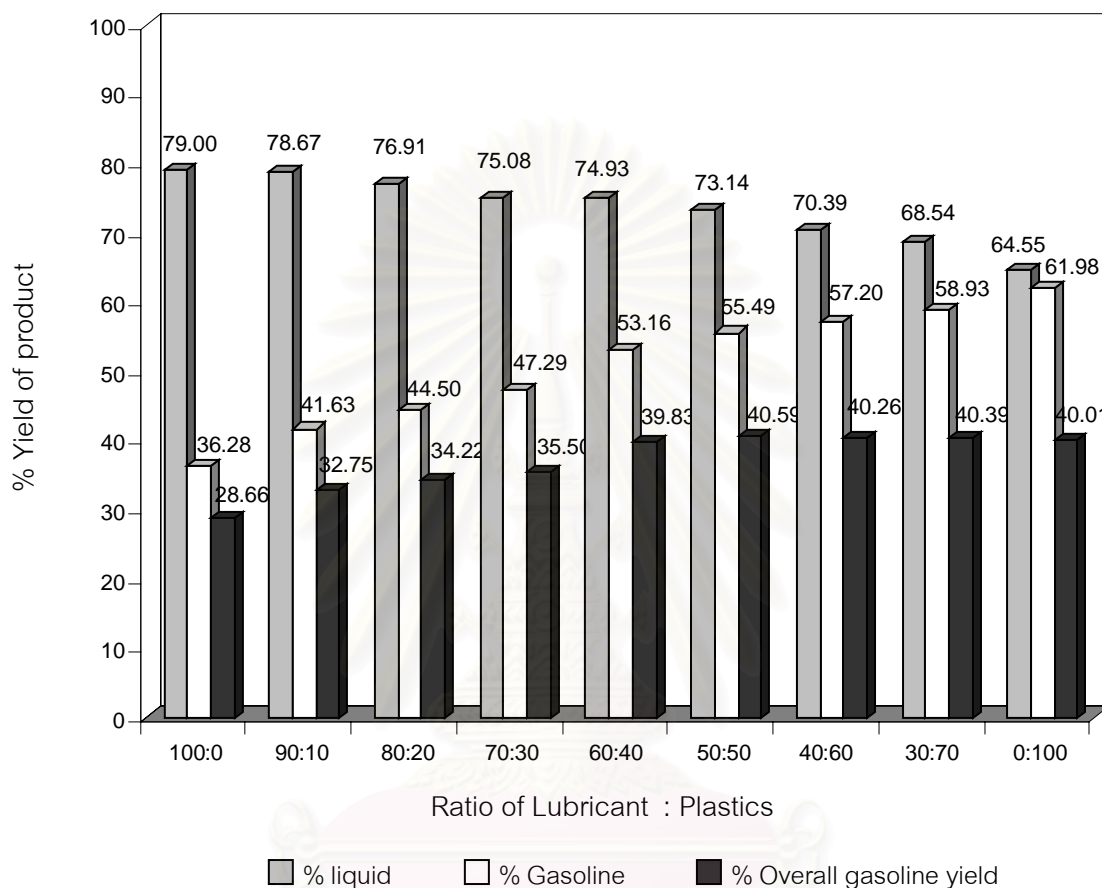


**รูปที่ 4.8** ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulate Distillation G.C. ที่อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกับพลาสติกในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม

และจากการวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สโซลีนรวมทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของพลาสติกมากขึ้นจะได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันน้อยลง ปริมาณแก๊สโซลีนเพิ่มขึ้นและเมื่อพิจารณาถึงแก๊สโซลีนรวมทั้งหมดจากสารตั้งต้นพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 60:40 เพราะเมื่อเพิ่มอัตราส่วนให้พลาสติกมากขึ้นก็จะทำให้ปริมาณของแก๊สโซลีนรวมมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และเมื่อพิจารณาถึงการเลือกนำอัตราส่วนไปใช้ในการทดลองกับเครื่อง



ปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องจำเป็นต้องพิจารณาถึงปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นควรจะมากกว่าปริมาณของพลาสติก เพื่อที่จะสามารถเดินเครื่องปฏิกรณ์ได้อย่างต่อเนื่องและสามารถที่จะใส่ปริมาณของพลาสติกแล้วหลอมเหลวได้ทันทีก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์และเมื่อหยุดเครื่องปฏิกรณ์จะไม่ทำให้สารตั้งต้นนั้นแข็งตัวได้ดังนั้นอัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อพลาสติกที่เหมาะสมคือ 60 : 40



**รูปที่ 4.9** ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกับพลาสติกผสมในสัดส่วนต่างๆ กัน ที่อัตราส่วนของ PP : PS 70 : 30 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม

จากการศึกษาเบื้องต้นสามารถสรุปภาวะที่จะนำมาทดลองได้ว่า

1. เปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ที่จะนำมาใช้ในการทดลองคือ 5 %
2. อัตราส่วนของพอลิพรอพิลีนกับพอลิสไตรีนที่นำมาใช้ในการทดลองคือ 70 : 30
3. อัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกับพลาสติกผสมที่นำมาใช้ในการทดลองคือ 60 : 40

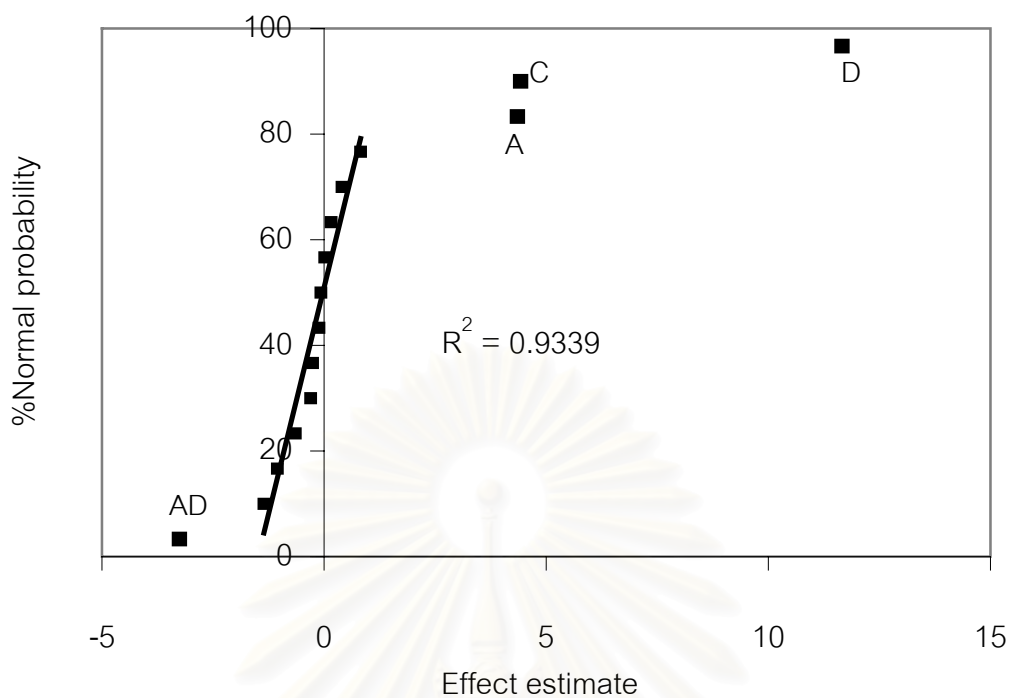
#### 4.3 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรกระบวนการต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนที่ได้จากการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

การแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ได้ออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียลเป็นแบบ  $2^4$  แฟกทอเรียล 2 เรพลิเคต แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วง 66.15 – 83.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และจากรูปที่ 4.10 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ นำมาสร้างเป็น Normal probability plot พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง คือ อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาและอันตรกิริยาระหว่างเวลาและอุณหภูมิซึ่งแสดงว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบเช่นเดียวกันว่า อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างเวลาและอุณหภูมิ ซึ่งมีค่า  $F_0$  ที่ได้จากการคำนวณคือ 336.81, 46.87, 48.51, 26.29 มีค่ามากกว่าค่า  $F_c$  ที่ได้จากรายการคือ 4.60 ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นการยืนยันว่า อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา และผลของอันตรกิริยาระหว่างเวลาและอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักในการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.4 แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ ( $2^4$  factorial design)

ตัวแปร	( A )	( B )	( C )	( D )	liquid
การทดลองที่	Catalyst (g)	Pressure(bar)	Time(mins)	Temp ( °C)	% Yield
1	0.15	1	45	390	83.75
2	1.5	1	45	390	82.35
3	0.15	10	45	390	83.46
4	1.5	10	45	390	82.56
5	0.15	1	90	390	80.62
6	1.5	1	90	390	80.01
7	0.15	10	90	390	81.28
8	1.5	10	90	390	79.64
9	0.15	1	45	450	68.55
10	1.5	1	45	450	65.32
11	0.15	10	45	450	68.27
12	1.5	10	45	450	67.23
13	0.15	1	90	450	69.84
14	1.5	1	90	450	67.87
15	0.15	10	90	450	67.28
16	1.5	10	90	450	66.15



**รูปที่ 4.10** Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนจากการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

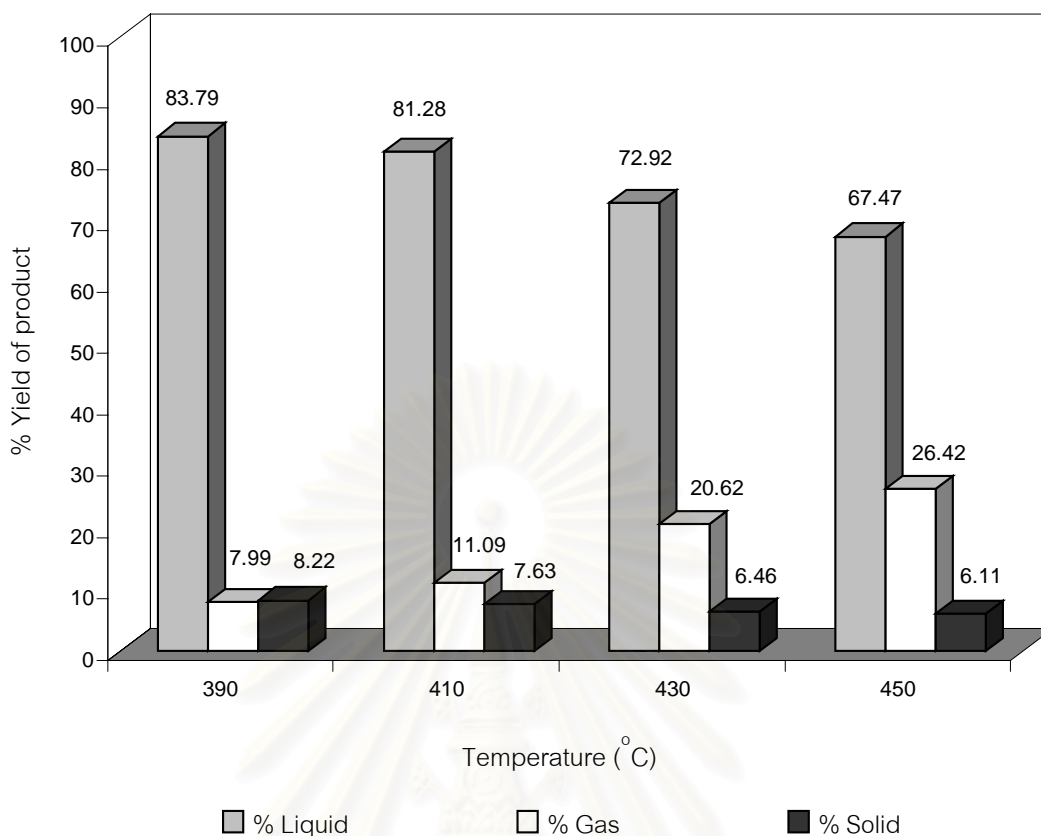
**ตารางที่ 4.5** แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนที่ได้จากการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

Source	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	$F_o$	P-value	$F_c$
D	543.479	1	543.48	336.81	0.0000	4.60
A	75.635	1	75.64	46.87	0.0000	
C	78.284	1	78.28	48.51	0.0000	
AD	42.430	1	42.43	26.29	0.0003	
Error	17.75	11	1.61			
Total	757.58	15				

4.4 ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ ตาม ASTM D2887 เป็นแก๊สโซลีน (Gasoline) เคโรซีน (Kerosene) แก๊สออยล์เบา (Light gas oil) แก๊สออยล์ (Gas oil) และกากน้ำมันหนัก (Long residue)

#### 4.4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน

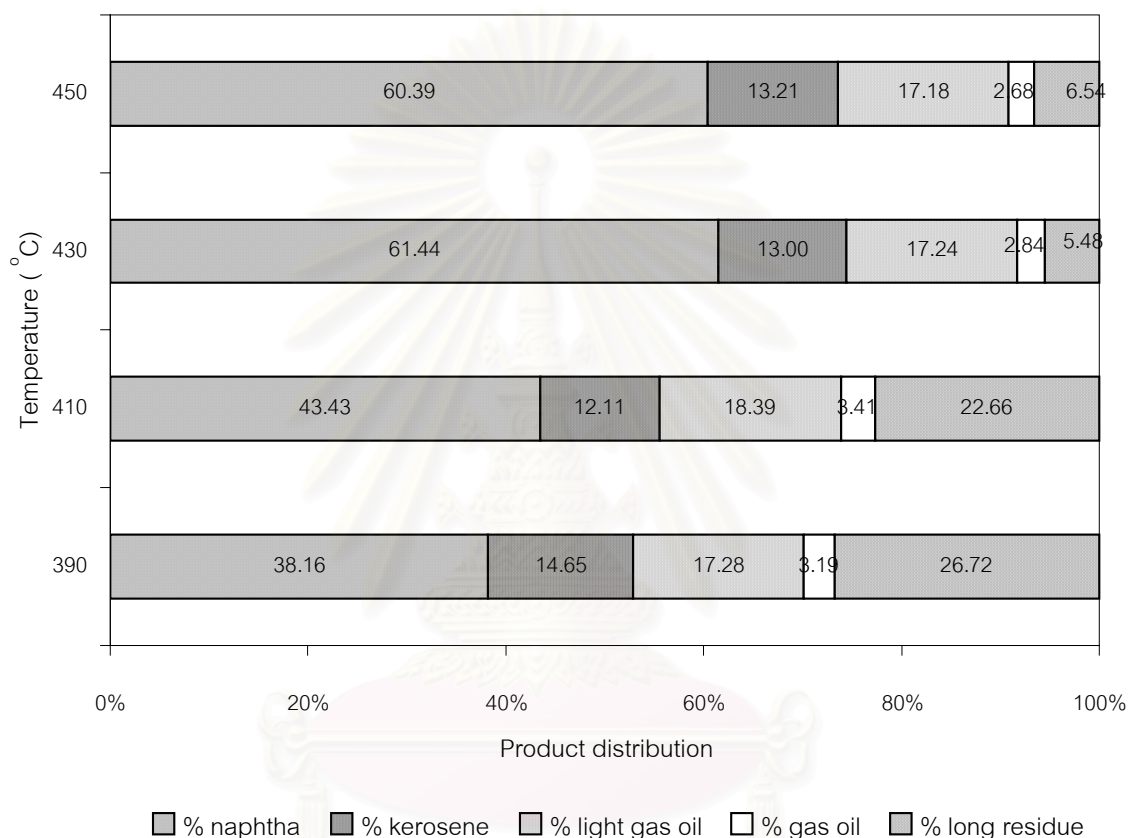
การศึกษาดังกล่าวถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อกระบวนการแตกตัวของ พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์โดยใช้อัตราส่วนของพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีนเป็น 70 : 30 อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อพลาสติกเป็น 60 : 40 ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 390, 410, 430 และ 450 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันแก๊สไฮโดรเจน 10 บาร์ ที่เวลาทำการทดลอง 90 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์จำนวน 0.5 กรัม น้ำหนักรวม 15 กรัม พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 90 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์จำนวน 0.5 กรัม ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นน้ำมันชั้นหนืดคิดเป็น 83.79 % แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของระบบเป็น 410 และ 430 องศาเซลเซียส โดยภายใต้ภาวะการทดลองเดียวกันจะให้น้ำมันที่มีความหนืดลดลง และมีปริมาณ 81.28 % และ 72.92 % และพบว่า มีปริมาณของแข็งลดลง จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่น้อยลงต่างจากที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส อย่างชัดเจนซึ่งมาจากการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยมีการแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและแตกตัวได้ดีที่อุณหภูมิตั้งแต่ 430 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของระบบเป็น 450 องศาเซลเซียสภายใต้ภาวะการทดลองเดียวกันพบว่าได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันคิดเป็น 65.14 % โดยพบว่าเกิดแก๊สไฮโดรคาร์บอนในปริมาณมากขึ้น ถึง 26.42 % เนื่องมาจากอิทธิพลของการแตกตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการแตกย่อยโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจนได้โมเลกุลขนาดเล็กเกินไป จนอยู่ในรูปแก๊สไฮโดรคาร์บอน  $C_1 - C_4$  จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เกิดเป็นแก๊สมากขึ้นที่อุณหภูมิ 430, 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับและได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของน้ำมันน้อยลงด้วย



**รูปที่ 4.11** ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิระหว่าง 390 - 450 องศาเซลเซียส อัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน Lubricant : Plastics 60 : 40 ความดันแก๊สไฮโดรเจน 10 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม

เมื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อหาค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่อง Simulated distillation gas chromatograph ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูป 4.12 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณแก๊สโซลีนจะเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการที่พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วสามารถเกิดการแตกตัวได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางจำพวกเคโรซีนและแก๊สออยล์ ต่อจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะมีบทบาทในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กจำพวกแก๊สโซลีน โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมากจะส่งเสริมให้เกิดการแตกตัวด้วยความร้อนทำให้เกิดการแตกตัวอย่างรุนแรงจนได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจำพวกแก๊สไฮโดรคาร์บอน จากรูปที่ 4.12 สังเกตที่อุณหภูมิ 390 และ 410 องศาเซลเซียสจะให้ปริมาณของแก๊สโซลีนน้อย คือ 38.16 % และ 43.13 % ตามลำดับ แต่จะให้ปริมาณของแก๊สโซลีนที่แตกต่างกันมากตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส คือ 61.44 % และจะให้ปริมาณของแก๊สโซลีนเริ่มคงที่ เมื่ออุณหภูมิ 450 องศา

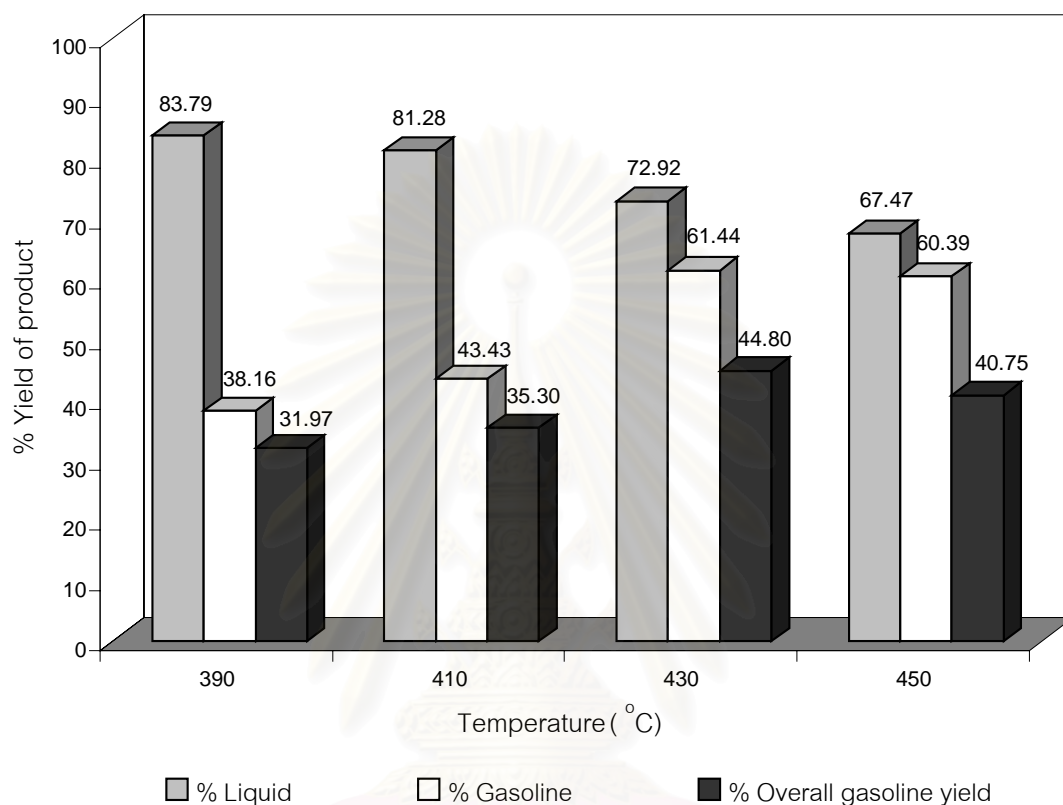
เซลเซียส คือ 60.39 % ดังนั้นการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์สามารถแตกตัวได้ดีที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป และเมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะคงยังมีบทบาทในการแตกตัวให้ได้สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงได้อีกจึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่หรือลดลงเล็กน้อยและได้ปริมาณของแก๊สไฮโดรคาร์บอนมากขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวด้วย



**รูปที่ 4.12** ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulate Distillation G.C. ที่อุณหภูมิระหว่าง 390 - 450 องศาเซลเซียส อัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน Lubricant : Plastics 60 : 40 ความดันแก๊สไฮโดรเจน 10 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม

โดยจากการวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณน้ำมันลดลงและปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอนมากขึ้นและจากการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว โดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีองค์ประกอบที่ดีที่สุด คือ อุณหภูมิที่ 430 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน

72.92 % แก๊สไฮโดรคาร์บอน 20.62 % กากของแข็ง 6.46 % มีองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นแก๊สโซลีน 44.80% เคโรซีน 9.48 % แก๊สออยล์เบา 12.57 % แก๊สออยล์ 2.07 % โมเดกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว 4.00 %



**รูปที่ 4.13** ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากอุณหภูมิ 390 – 450 องศาเซลเซียส อัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน Lubricant : Plastics 60 : 40 ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

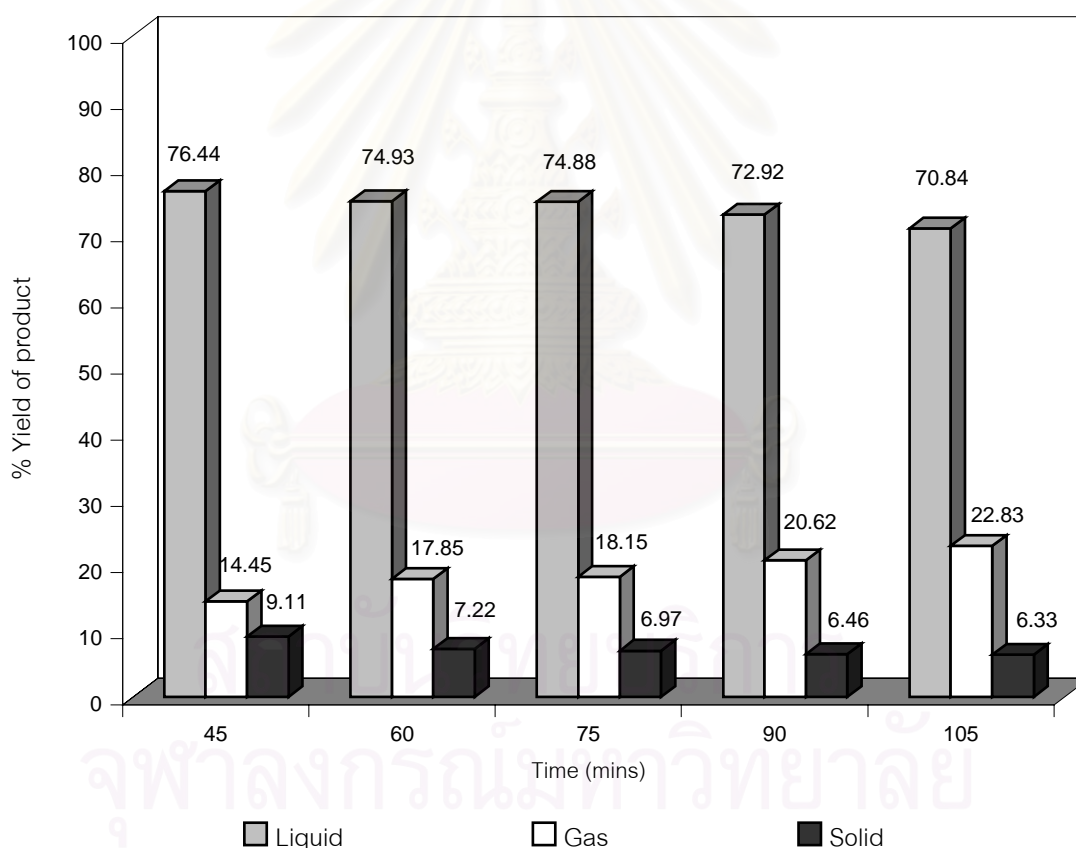


#### 4.4.2 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการทดลองที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน

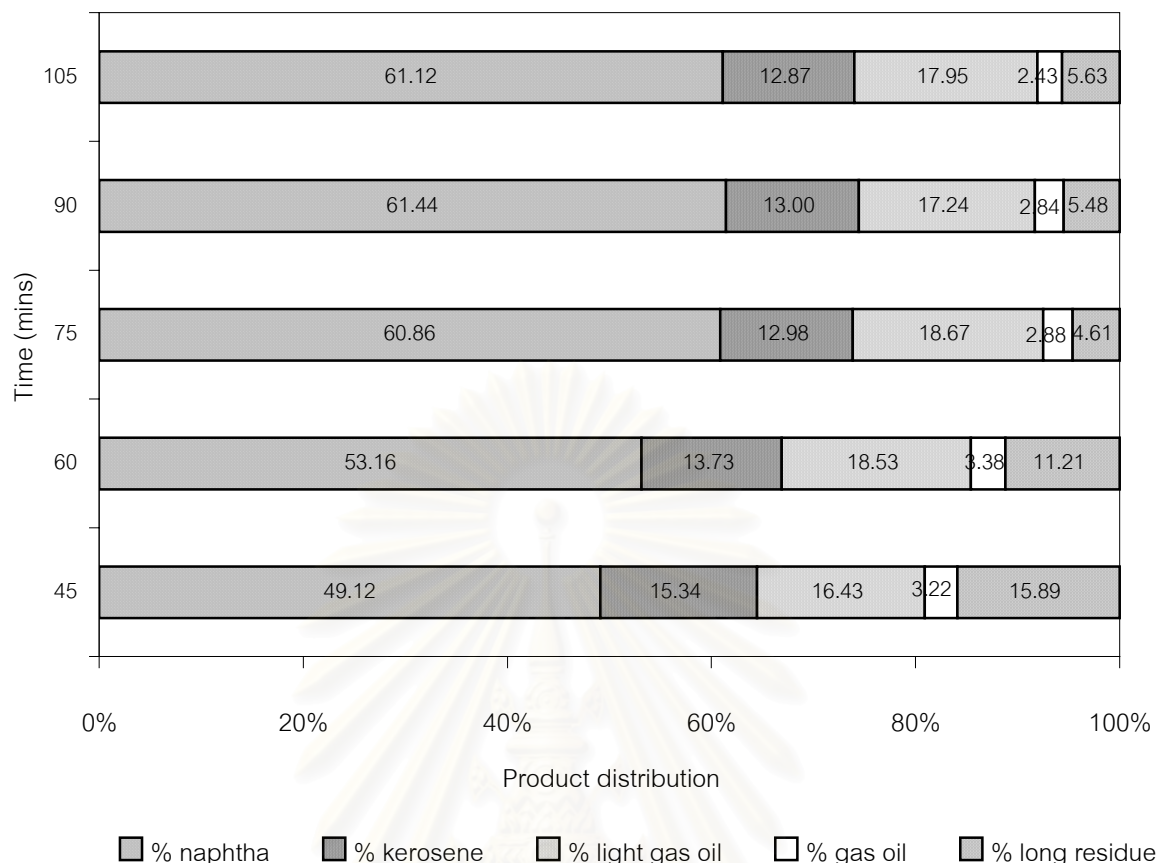
การศึกษาถึงอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยทำการศึกษามวลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน ระหว่าง 45 – 105 ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ใช้อัตราส่วนระหว่างพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีน 70 : 30 อัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นต่อพลาสติก 60 : 40 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ จำนวน 0.5 กรัม ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ น้ำหนักรวม 15 กรัม จากผลการทดลองแสดงดังรูป 4.14 ที่เวลา 45, 60, 75, 90, 105 นาที พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้เป็น 76.44 %, 74.93 %, 74.88 %, 72.92 %, 70.84 % ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จะลดลงโดยเปลี่ยนเป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้นเนื่องมาจากการให้ความร้อนแก่ระบบเป็นเวลานานจะส่งผลให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวเกิดการแตกตัวเป็นสารโมเลกุลขนาดเล็กลง ส่วนโมเลกุลขนาดกลางจะมีตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปช่วยในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางที่ได้จากการแตกตัวจากความร้อน โดยเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนก็จะแตกตัวจนมีขนาดเล็กและอยู่ในสภาพที่เป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก ส่วนที่เวลาทำการทดลองมากกว่า 105 นาที จะให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเวลานานมากขึ้นทำให้สารตั้งต้นเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแก๊สได้มากขึ้น โดยพบเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ดีที่สุดคือที่ 45 นาที แต่หากทำการทดลองโดยลดเวลาลงจาก 45 นาทีเป็น 30 นาที จะให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมากกว่าที่ 45 นาทีแต่จะมีลักษณะชั้นเหนียวหนืดซึ่งเกิดจากการที่เวลาน้อยยังไม่เพียงพอต่อการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นซึ่งเป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลขนาดใหญ่

เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาทำการวิเคราะห์เพื่อค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องมือ Simulated Distillation Gas Chromatography แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูป 4.15 พบว่าเมื่อใช้เวลาทำการทดลองต่าง ๆ กัน พบว่า เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น จะมีปริมาณของแก๊สโซลีนมากขึ้น โดยในช่วงเวลา 45 – 75 นาทีนั้นร้อยละของแก๊สโซลีนเพิ่มขึ้นเนื่องจากในช่วงแรกของปฏิกิริยาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจะเกิดการแตกตัวไปเป็นสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางจำพวกเคโรซีนและแก๊สออยล์ ซึ่งหลังจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้าไปมีบทบาทในการเกิด Catalytic cracking ของเคโรซีนและแก๊สออยล์ทำให้ได้ขนาดของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่เล็กลงดังจะพบได้ว่ามีปริมาณแก๊สโซลีนที่สูงขึ้นและจะเริ่มมีแนวโน้มคงที่ในช่วง 75 – 105 นาที ทั้งนี้เนื่องมาจากในช่วงเวลาที่เริ่มต้นนั้นมีปริมาณสารตั้งต้นอยู่มากทำให้เห็นความแตกต่างของแก๊สโซลีนที่เพิ่มขึ้นในช่วงเวลาเริ่มต้นและหลังจาก 75 นาทีการแตกตัวจะเริ่มเป็นการแตกตัวของสารโมเลกุลใหญ่เช่นกาน้ำมันหนักกลายเป็นโมเลกุลขนาดกลางและเล็ก และเนื่องจากเมื่อสารอยู่ในระบบเป็นเวลานาน สารไฮโดรคาร์บอน

แตกตัวเป็นจำนวนมาก ความดันภายในจึงสูงขึ้นจนถึงระดับที่สามารถไประงับหรือขัดขวางการเคลื่อนที่ของสารภายในสังเกตได้จากปริมาณความดันในเครื่องปฏิกรณ์ที่มากขึ้นอย่างต่อเนื่องจนทำให้การแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลเป็นขนาดเล็กลงจึงทำได้ค่อนข้างยากดังนั้นร้อยละของแก๊สโซลีนที่ได้ในช่วงหลัง 75 นาทีจึงไม่แตกต่างกันมากนัก แต่หากใช้เวลานานขึ้นที่เวลา 105 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาก็ยังจะมีบทบาทในการเกิด Catalytic cracking ของโมเลกุลแก๊สโซลีนต่อไปอีก ทำให้ปริมาณแก๊สโซลีนลดลงเพราะได้ปริมาณของแก๊สไฮโดรคาร์บอนมากขึ้นนั่นเอง ส่วนการพิจารณาจากสารตั้งต้นมีทั้งสารที่เป็นโมเลกุลขนาดเล็กและใหญ่รวมกันจึงทำให้ใช้เวลาในการแตกตัวนานกว่าการใช้พลาสติกเพียงอย่างเดียวและจะใช้เวลาน้อยกว่าใช้ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นเพียงอย่างเดียวฉะนั้นจะเห็นได้ว่าปริมาณพลาสติกที่เติมเข้าไปจะไปช่วยให้ไฮโดรเจนแก่น้ำมันหล่อลื่นทำให้น้ำมันหล่อลื่นแตกตัวได้ง่ายขึ้นกว่าที่จะแตกตัวด้วยน้ำมันหล่อลื่นเพียงอย่างเดียวและใช้เวลาในการแตกตัวน้อยลงด้วย

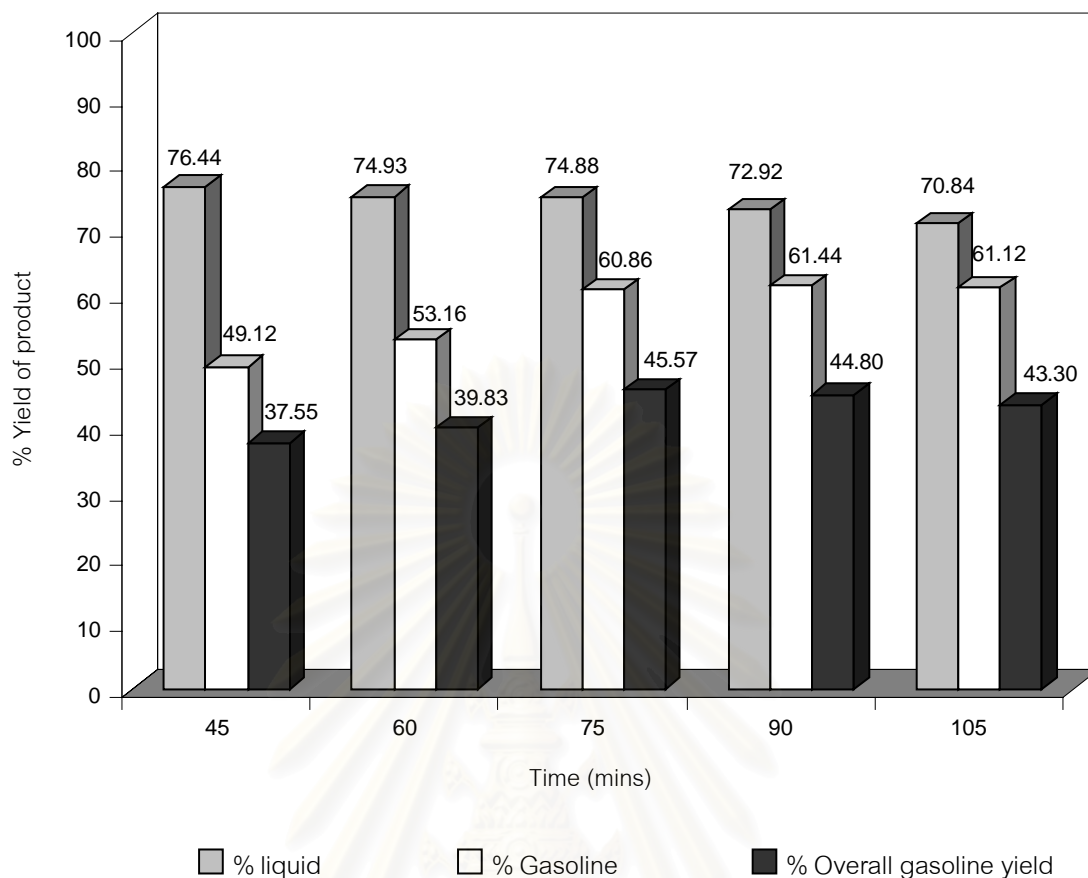


**รูปที่ 4.14** ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการทดลองระหว่าง 45 – 105 นาที อัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน Lubricant : Plastics 60 : 40 คุณสมบัติที่ทำการทดลอง 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 10 บาร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม



**รูปที่ 4.15** ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulate Distillation G.C. ที่เวลาในการทดลองระหว่าง 45 - 105 นาที อัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน Lubricant : Plastics 60 : 40 ความดันแก๊สไฮโดรเจน 10 บาร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ จำนวน 0.5 กรัม

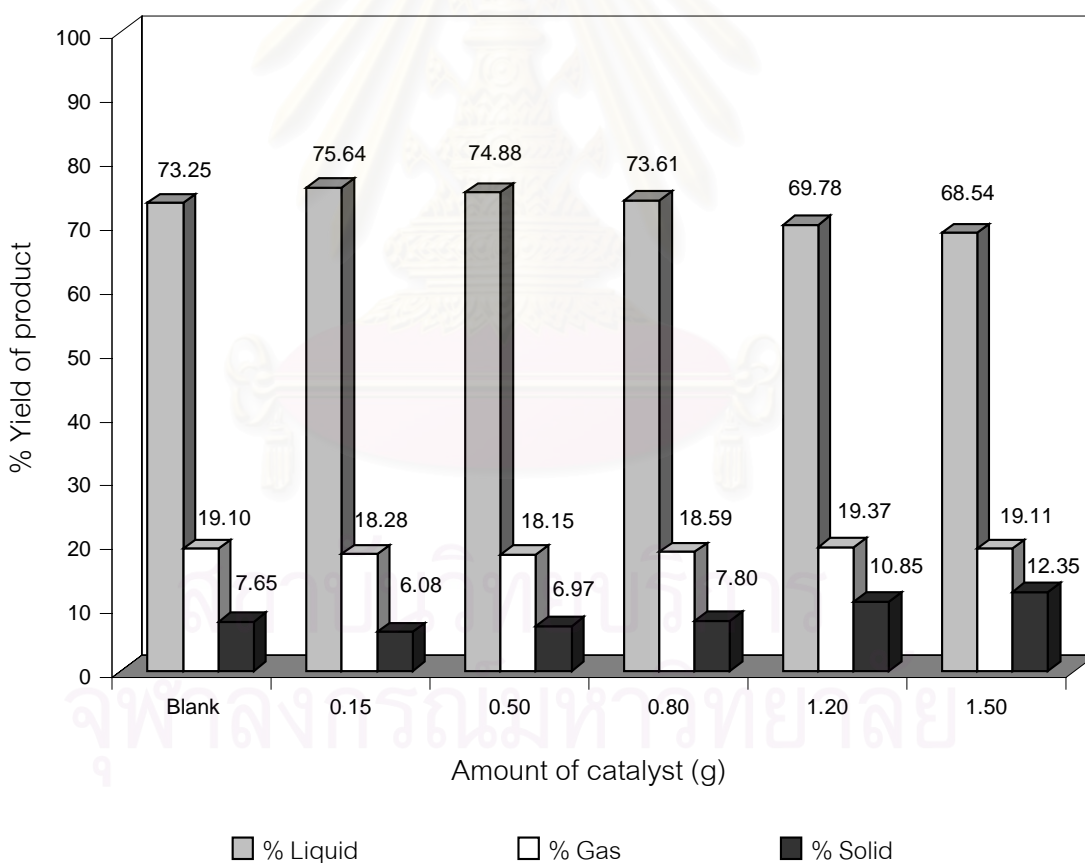
โดยจากการวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลานานขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณน้ำมันลดลงและปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอนมากขึ้นและจากการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ส่งผลต่อการแตกตัวของพอลิพารฟิน พอลิไดรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ โดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีองค์ประกอบที่ดีที่สุด คือ เวลาที่การทำปฏิกิริยา 75 นาที อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 430 องศาเซลเซียส ความดัน 10 บาร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ จำนวน 0.5 กรัม ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 74.22 % แก๊สไฮโดรคาร์บอน 18.19 % กากของแข็ง 6.97 % โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอน 45.57 % เคโรซีน 9.72 % แก๊สออยล์เบา 13.98 % แก๊สออยล์ 2.16 % โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว 3.45 %



**รูปที่ 4.16** ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากเวลาในการทดลองระหว่าง 45 – 105 นาที อัตราส่วนของ PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน Lubricant : Plastics 60 : 40 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

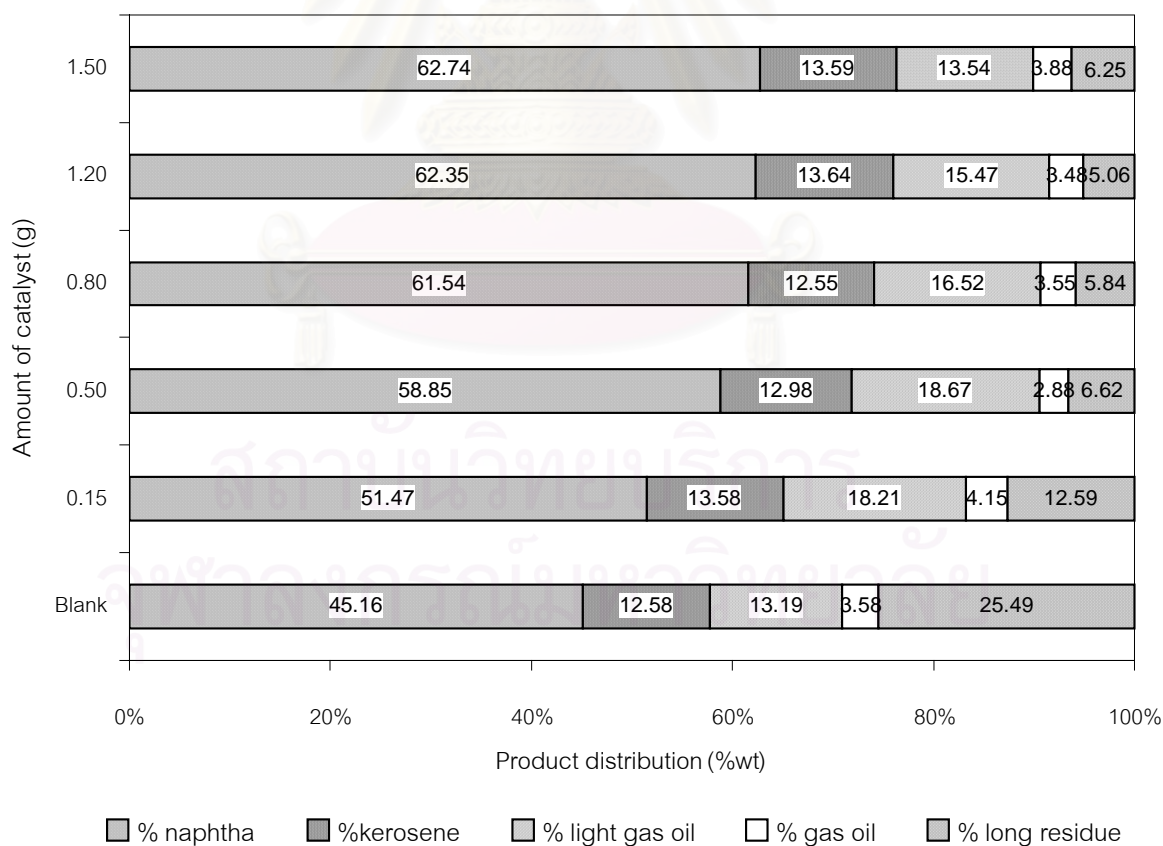
4.4.3 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน การศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน ระหว่าง 0.15 – 1.5 กรัม และไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ใช้อัตราส่วนพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีน 70 : 30 อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นต่อพลาสติก 60 : 40 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ น้ำหนักรวม 15 กรัม จากผลการทดลองแสดงดังรูป 4.17 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.15 – 1.5 กรัม ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากการที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่ลงไปมากขึ้นจะทำให้เกิดการแตกตัวของสารตั้งต้นได้ดี ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้าไปมีบทบาทในการแตกตัวของสารตั้งต้นให้เป็นสารผลิตภัณฑ์ได้มากจึงทำให้สารตั้งต้นนั้นแตกตัวจากโมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นโมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็กลงจนอาจจะเล็กลงเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนในปริมาณที่มากขึ้นจึงทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันต่ำลง



รูปที่ 4.17 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง 0.15 – 1.5 กรัม อัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน Lubricant : Plastics

60 : 40 อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 10 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 75 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์

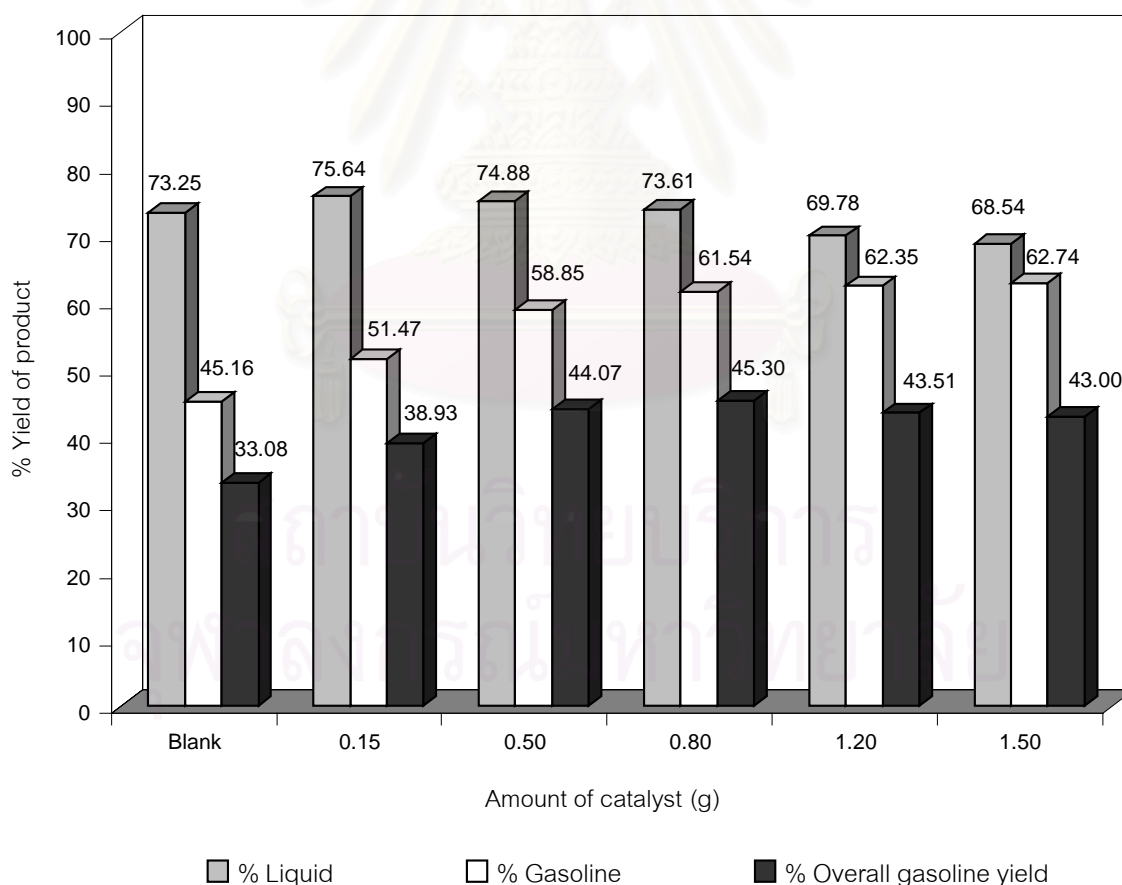
เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาทำการวิเคราะห์เพื่อค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องมือ Simulated Distillation Gas Chromatography แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูป 4.18 พบว่าเมื่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นอาจจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวหรือ active site สำหรับการแตกตัวสารโมเลกุลใหญ่ เช่น กากน้ำมันหนักให้เป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง เช่น แก๊สโซลีน เคโรซีนและแก๊สออยล์เบาเพิ่มขึ้นในช่วง 0.15 – 0.80 กรัม เนื่องจากสารตั้งต้นยังมีปริมาณมากเพียงพอสำหรับการแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน แต่ถ้าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ 1.20 – 1.50 กรัมจะได้ปริมาณของแก๊สโซลีนมากกว่าเพียงเล็กน้อยซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการแตกตัวสารไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางเป็นขนาดเล็ก ทำให้เกิดเป็นแก๊สมากยิ่งขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบการแตกตัวเมื่อมีการเติมและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนในการแตกตัวของสารเป็นอย่างมาก เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีทั้ง active site และความร้อนที่ช่วยในการแตกตัวสารตั้งต้น ขณะที่เมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะมีเพียงความร้อนเท่านั้น ซึ่งอาจต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นถึงจะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ



รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulate Distillation G.C. ที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง 0.15 – 1.5 กรัม อัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน

Lubricant : Plastics 60 : 40 อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 10 บาร์ เป็นเวลา 75 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์

จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.20 - 1.50 กรัม อาจให้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันต่ำกว่า 0.15 – 0.80 กรัม แต่การกระจายตัวของแก๊สโซลีนที่ได้สูงกว่าเพียงเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบหาผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยรวมแล้วพบว่าการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1.20 – 1.50 กรัม จะได้ปริมาณแก๊สโซลีนรวมทั้งหมดน้อยกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 0.80 กรัม ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา 0.80 กรัม จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิพโรพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ที่ภาวะอัตราส่วนพอลิพโรพิลีนกับพอลิสไตรีน 70 : 30 อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกับพลาสติกผสม 60 : 40 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 75 นาที และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 73.61 % แก๊สไฮโดรคาร์บอน 18.59 % กากของแข็ง 7.80 % โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณแก๊สโซลีน 45.30 % เคโรซีน 9.24 % แก๊สฮอยล์เบา 12.16% แก๊สฮอยล์ 2.61 % โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว 4.30 %



รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง 0.15 – 1.5 กรัม อัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน Lubricant : Plastics 60 : 40 อุณหภูมิ

ที่ทำการทดลอง 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 10 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 75 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์

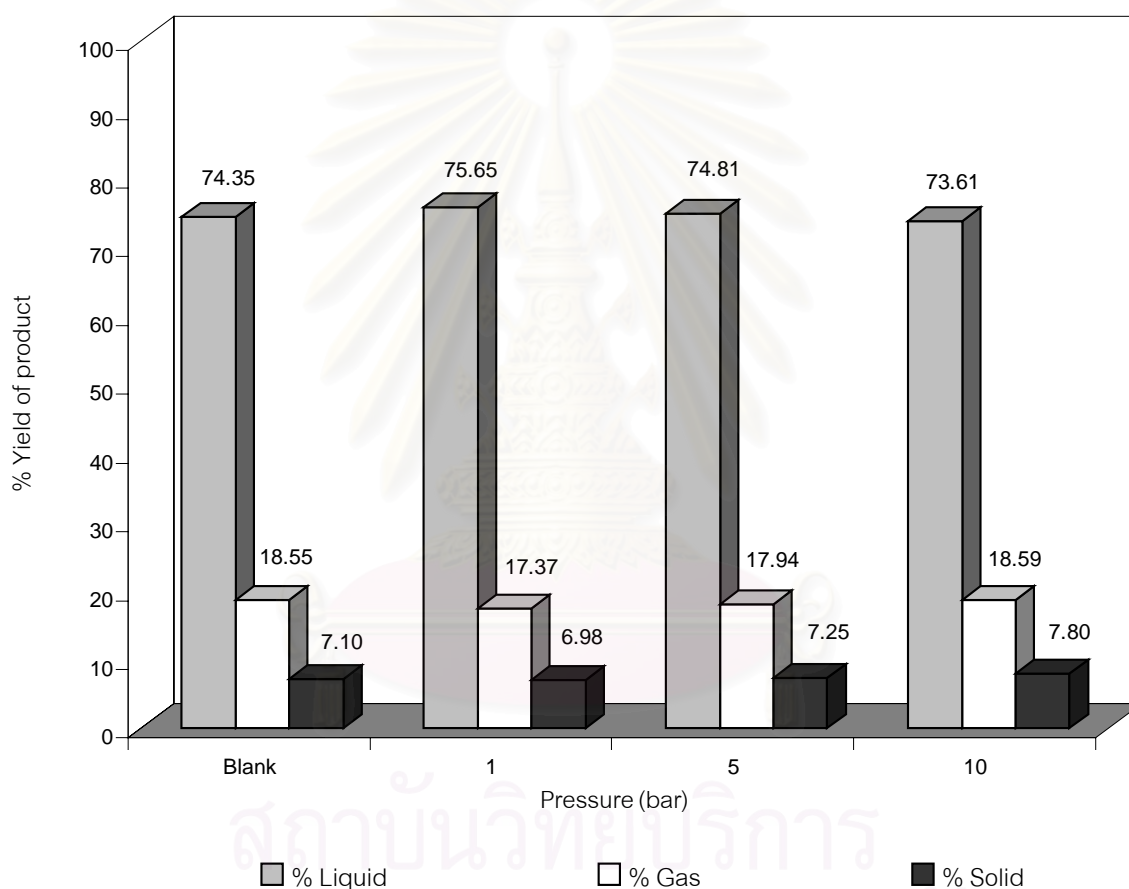
#### 4.4.4 อิทธิพลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน

การศึกษาถึงอิทธิพลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่มีผลต่อการแตกตัวของพอลิพروفพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว เพื่อศึกษาผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 , 5 , 10 บาร์ และไม่ใช้ความดันไฮโดรเจน เมื่อใช้อัตราส่วนของพอลิพروفพิลีนต่อพอลิสไตรีนเป็น 70 : 30 อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อพลาสติกเป็น 60 : 40 อุณหภูมิทำการทดลอง 430 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 75 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ จำนวน 0.80 กรัม น้ำหนักรวม 15 กรัม จากการศึกษาอิทธิพลของความดันแก๊สไฮโดรเจนแสดงผลการทดลองดังรูป 4.20 พบว่า ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก ที่ความดัน 5 บาร์มีร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันน้อยกว่าที่ 1 บาร์เล็กน้อย และเมื่อเพิ่มความดันเป็น 10 บาร์ พบว่า ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงอีก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อความดันสูงขึ้น ทำให้ความหนืดของน้ำมันภายในเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของน้ำมันช้าลง การถ่ายโอนความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้ได้รับพลังงานความร้อนน้อยลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือการแตกตัวของสารภายในจึงลดลง และจากการเติมความดันไฮโดรเจนเข้าไปในระบบ เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมีโครงสร้างซับซ้อนและเกาะตัวอย่างแน่นหนา การเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ที่จะส่งผลต่อการทำให้น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วแตกตัวเป็นโมเลกุลสายโซ่ขนาดกลางเป็นไปได้ยาก จึงจำเป็นต้องเพิ่มแก๊สไฮโดรเจนให้กับระบบเพื่อส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยา Hydrocracking และปฏิกิริยา Hydrogenation เพื่อให้เกิดการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ขนาดสั้นลง นอกจากนี้พบว่าที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ถึง 10 บาร์ ให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันแตกต่างกันไม่มาก และเมื่อทำการเปรียบเทียบการแตกตัวโดยไม่อัดแก๊สไฮโดรเจน พบว่า เมื่อไม่มีการอัดแก๊สไฮโดรเจนนั้นให้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันสูงกว่าเล็กน้อย แต่การกระจายตัวของแก๊สไฮโดรเจนไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากไม่เติมแก๊สไฮโดรเจนจะทำให้ไม่มีไฮโดรเจนที่จะเข้าไปช่วยให้ถ่านกัมมันต์นั้นมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีและการเติมไฮโดรเจนจะทำให้อนุมูลอิสระได้รับไฮโดรเจนและเกิดปฏิกิริยาได้ดีจึงทำให้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงได้

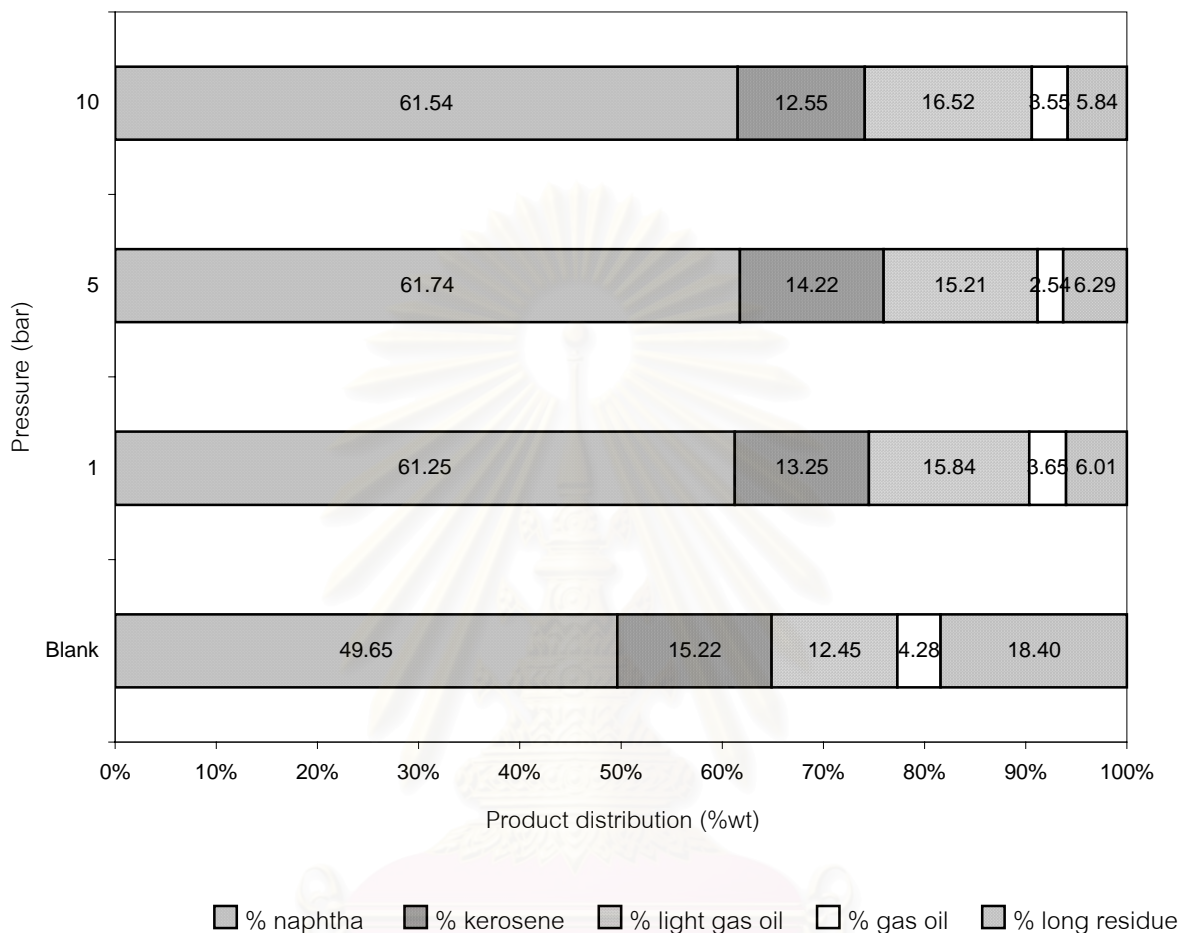
เมื่อทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือด โดยใช้เครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatograph แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูป 4.21 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันของแก๊สไฮโดรเจนให้กับระบบที่อุณหภูมิคงที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน และแก๊สไฮโดรคาร์บอนในปริมาณที่มากขึ้น แต่ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ซึ่งมีผลมาจากการที่



แก๊สไฮโดรเจนไปมีบทบาทในการส่งเสริมปฏิกิริยา Hydrocracking ของพลาสติกและน้ำมันหล่อลื่นให้เป็นสายโซ่โมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง โดยในช่วงแรกเมื่อเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระและเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบลูกโซ่โดยอิทธิพลของความร้อนในช่วงแรก จากนั้นความดันแก๊สไฮโดรเจนจึงไปมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยา Hydrocracking จนได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง รวมถึงจะมีส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยา Hydrogenation ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างอิ่มตัวด้วย จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเข้ามามีอิทธิพลในการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางที่ได้จากการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนให้มีขนาดเล็กลงอีก และจากกระบวนการ Hydrocracking จึงได้ปริมาณของแก๊สโซลีนมากด้วย



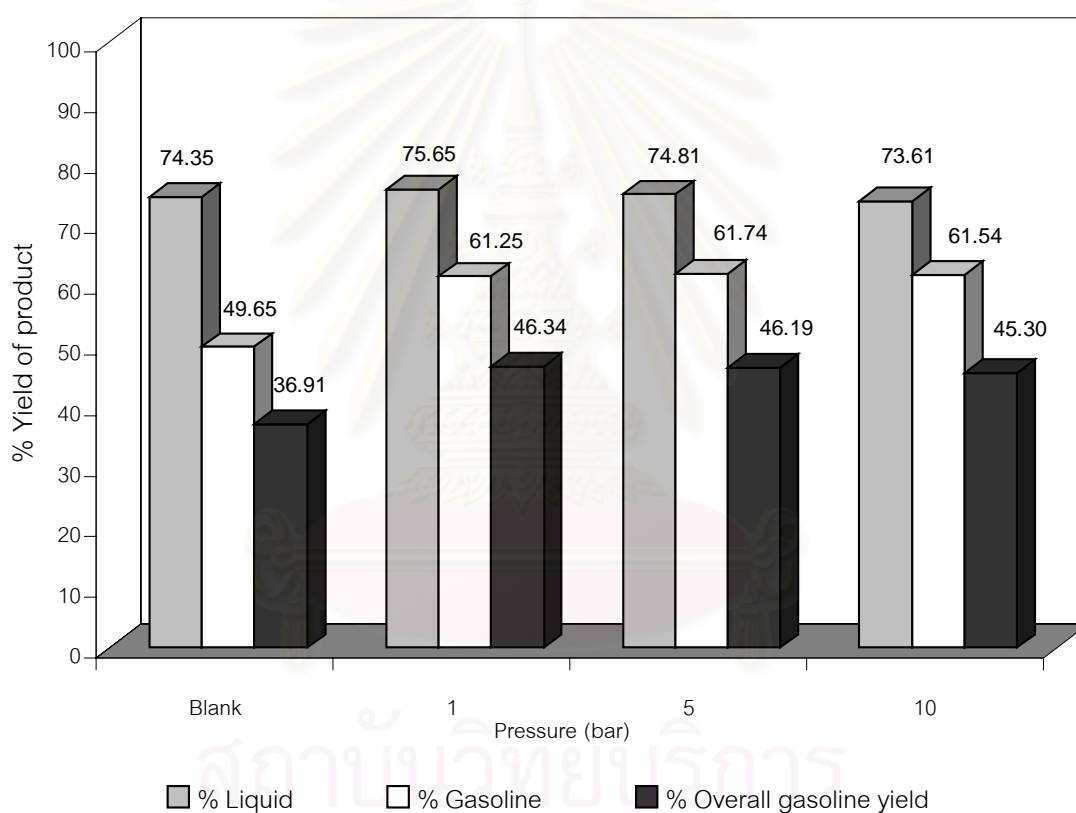
**รูปที่ 4.20** ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นระหว่าง 1 – 10 บาร์ ภาวะอัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน Lubricant : Plastics 60 : 40 อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 430 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 75 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.80 กรัม



**รูปที่ 4.21** ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulate Distillation G.C. ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นระหว่าง 1 – 10 บาร์ ภาวะอัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน Lubricant : Plastics 60 : 40 อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 430 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 75 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.80 กรัม

จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.22 พบว่าความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 - 10 บาร์ นั่นคือร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันและร้อยละการกระจายของแก๊สโซลีนที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนักจึงอาจกล่าวได้ว่าความดันของแก๊สไฮโดรเจนไม่มีผลต่อการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนแล่น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ตามผลการทดลองในส่วนของ Experimental design แต่เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะที่ไม่มีการอัดแก๊สไฮโดรเจน พบว่าร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนที่ได้จะให้ผลดีกว่า ดังนั้นการเติมไฮโดรเจนมีผลต่อ

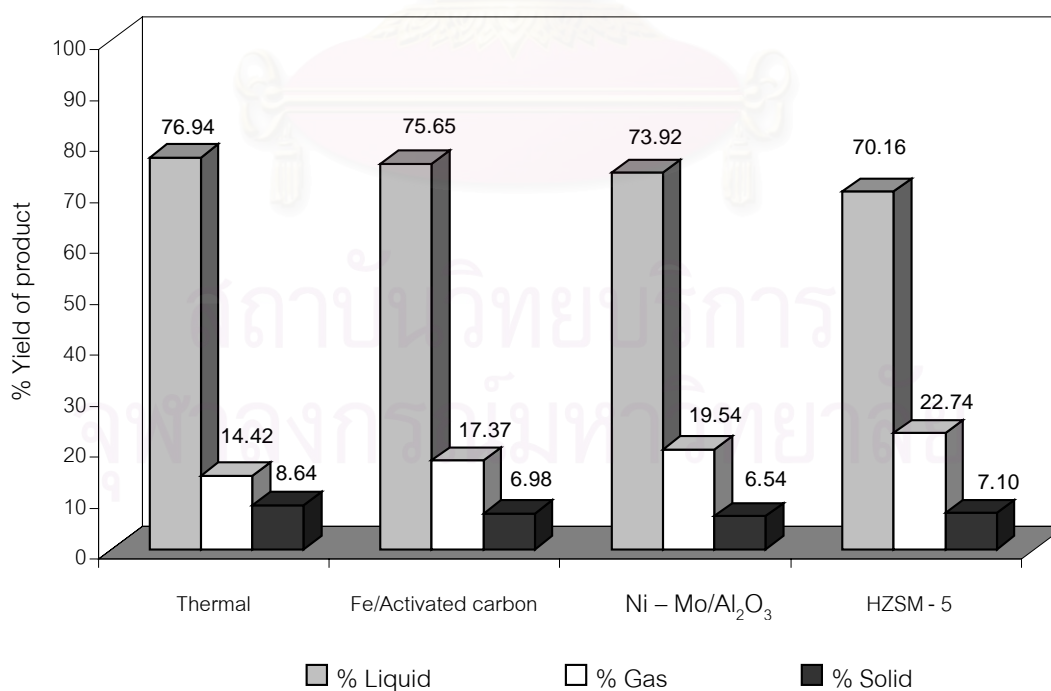
การแตกตัวของสารตั้งต้น แต่เมื่อเพิ่มความดันไฮโดรเจนจะทำให้การแตกตัวของสารตั้งต้นไม่แตกต่างกัน ดังนั้นที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ จึงเป็นความดันที่เหมาะสมในการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ อัตราส่วนของพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีนเป็น 70 : 30 อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อพลาสติกเป็น 60 : 40 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลา 75 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ จำนวน 0.80 กรัม ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 75.65 % แก๊สไฮโดรคาร์บอน 17.37% กากของแข็ง 6.98 % โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณแก๊สโซลีน 46.34 % เครือซีน 10.02 % แก๊สฮออยล์เบา 11.98 % แก๊สฮออยล์ 2.76 % โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว 4.55 %



**รูปที่ 4.22** ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้นระหว่าง 1 – 10 บาร์ ภาวะอัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน Lubricant : Plastics 60 : 40 อุณหภูมิ ที่ทำการทดลอง 430 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 75 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.80 กรัม

#### 4.5 การเปรียบเทียบผลของการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่น ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์กับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ

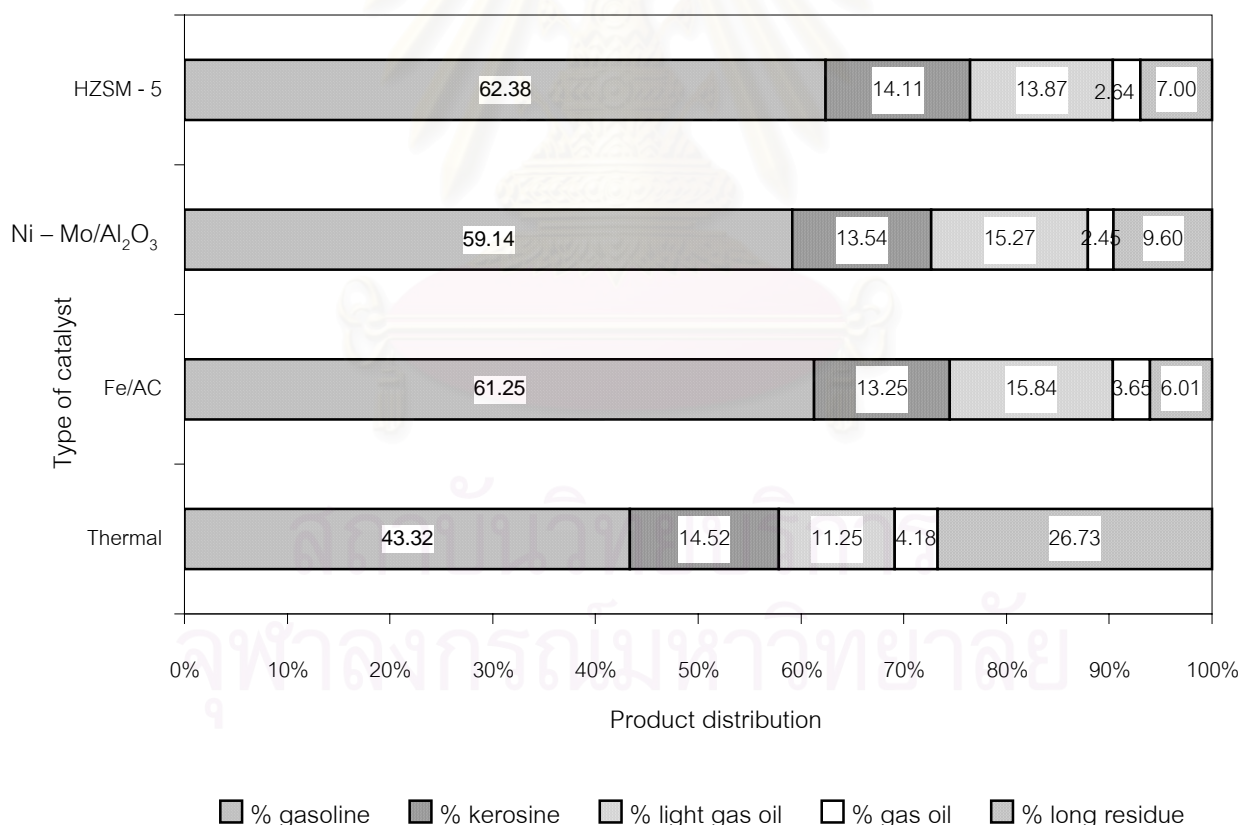
การศึกษาถึงการเปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด คือ Fe/Activated carbon, Ni - Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HZSM-5 และแบบ Thermal cracking แสดงดังรูปที่ 4.23 จะเห็นได้ว่ากระบวนการแบบ Thermal cracking ให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันมากที่สุด เนื่องจากการแตกตัวแบบความร้อนเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและความดันไฮโดรเจน จะไม่สามารถทำให้สารตั้งต้นที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่แตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กได้ซึ่งถ้าต้องการจะให้ได้สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจะต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน ส่วนการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 ให้ปริมาณของแก๊สมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 มีการแตกย่อยบริเวณ end - chain และมีพื้นที่ผิวมาก มีความแก่ของกรดสูงและโครงสร้างแบบ microporous รูพรุนขนาดเล็กมาก ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นโมเลกุลขนาดเล็กได้ดี จำพวกแก๊สไฮโดรคาร์บอน C<sub>1</sub> - C<sub>4</sub> มากจึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Fe/Activated carbon, Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันใกล้เคียงกันและได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5



รูปที่ 4.23 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน ภาวะอัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน Lubricant : Plastics 60 : 40

อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 430 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 75 นาที ความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 1 บาร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.80 กรัม

เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาทำการวิเคราะห์เพื่อค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องมือ Simulated Distillation Gas Chromatography แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูป 4.24 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด ให้ปริมาณของแก๊สโซลีน เคโรซีน และแก๊สออยล์เบา ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันแต่ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 ให้ปริมาณของแก๊สโซลีนมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ รองลงมาคือ Fe/activated carbon และ Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจาก HZSM-5 มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากและมีความแก่ของกรดสูง จึงทำให้สารตั้งต้นสามารถแตกตัวได้ดีจึงได้ปริมาณของแก๊สโซลีนมาก และมีโครงสร้างเป็นแบบ microporous รูพรุนขนาดเล็กมากจึงทำให้เกิดการแตกตัวเป็นสารโมเลกุลขนาดเล็กจนเป็นแก๊สจำนวนมาก ส่วนการแตกตัวแบบ Thermal cracking ให้ปริมาณของแก๊สโซลีนต่ำปริมาณของกากน้ำมันหนักมากทั้งนี้เนื่องจากการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวต้องใช้เวลาและอุณหภูมิสูงจึงจะสามารถแตกตัวของสารตั้งต้นได้และอาจจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ

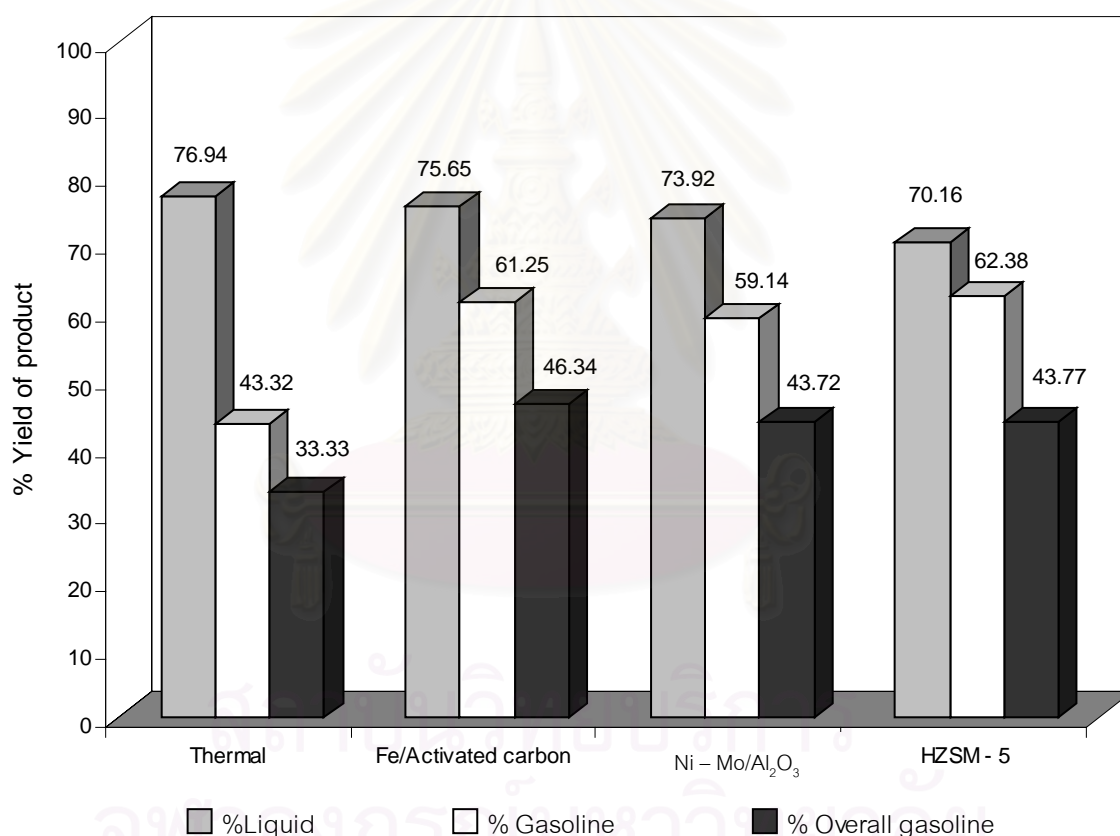


รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulate Distillation G.C. ที่ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน ภาวะอัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน

Lubricant : Plastics 60 : 40 อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 430 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 75 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.80 กรัม

เมื่อเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/Activated carbon กับ Ni - Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จะพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/Activated carbon มีแก๊สโซลีนมากกว่าทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าอะลูมินา จึงน่าจะเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่น ๆ

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบหาปริมาณของแก๊สโซลีนทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/Activated carbon ให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ในการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมากที่สุด รองลงมาคือ HZSM-5, Ni - Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Thermal cracking ตามลำดับ



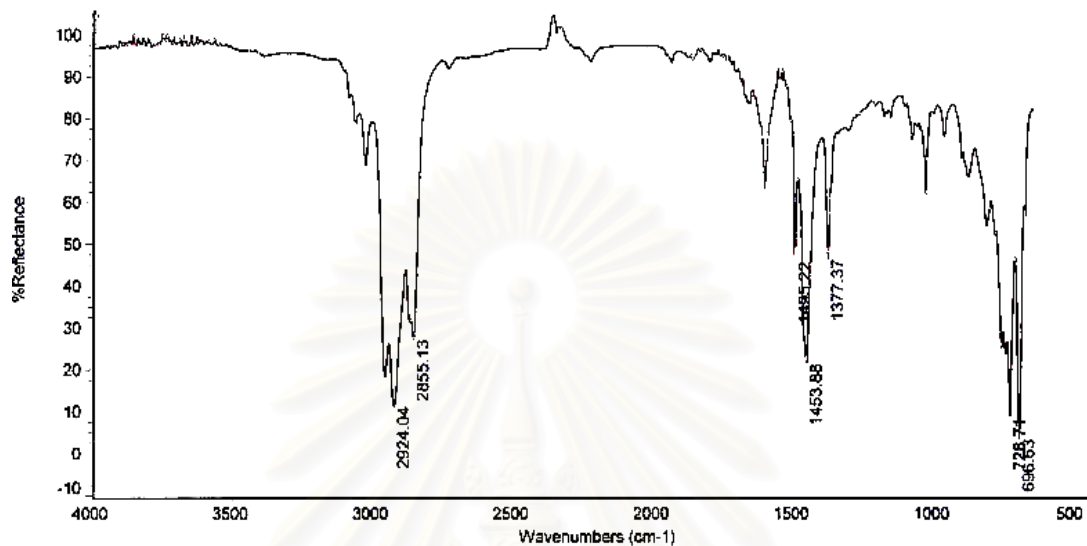
รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ กัน ภาวะอัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน Lubricant : Plastics 60 : 40 อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 430 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 75 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.80 กรัม

#### 4.6 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการทดลอง

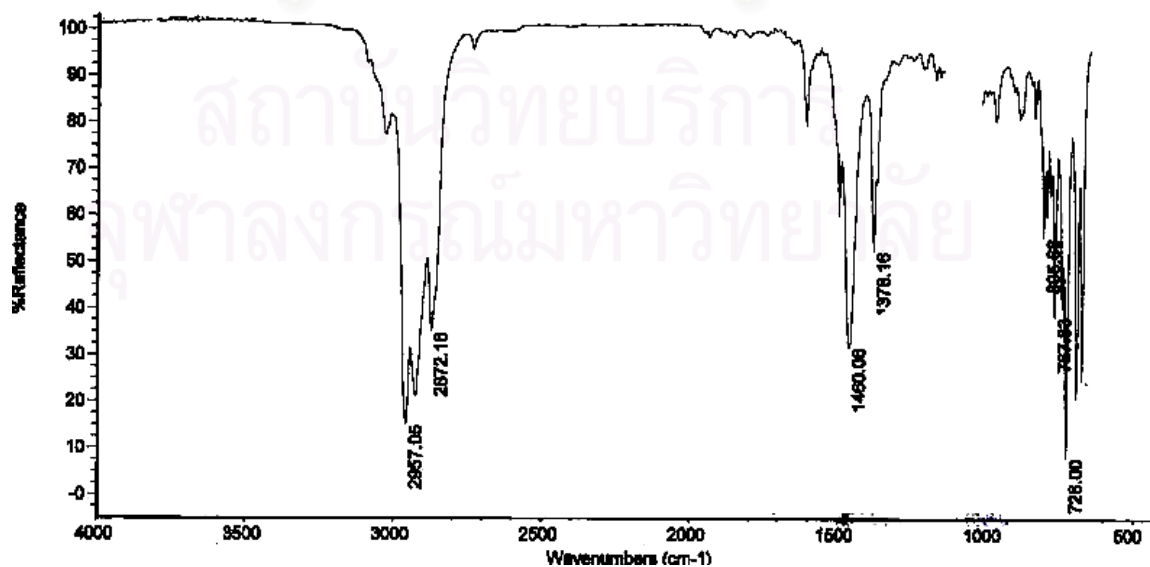
การแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์เมื่อทำการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมแล้วนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันหลักที่เป็นสายโซ่แอโรแมติก (Long chain aromatic) เป็นองค์ประกอบหลักจำนวนมาก โดยเมื่อทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันของระบบที่ใช้พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ภายใต้ภาวะการทดลอง อัตราส่วนของพอลิพรอพิลีน ต่อพอลิสไตรีน 70 : 30 อัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นต่อพลาสติก 60 : 40 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาที่ใช้ในการทดลอง 75 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ จำนวน 0.80 กรัม พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดขึ้นมีหมู่ฟังก์ชันเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะลิฟาติกที่มีโครงสร้างเป็นวงที่มีคาร์บอน 5 – 6 โมเลกุล และแสดงความเป็นแอโรแมติก (Aromatic compound) แสดงดังรูป 4.26 จะเห็นพิกที่เห็นได้ชัดเจนที่  $1600\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งจะแสดงเป็นพันธะคู่ของ C=C ในแอโรแมติก พิกที่  $1495\text{ cm}^{-1}$  และ  $1454\text{ cm}^{-1}$  แสดงเป็นหมู่ฟังก์ชันของเมทิล (methyl group) ส่วนพิกที่เห็นชัดเจนที่  $700\text{ cm}^{-1}$  และ  $730\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง วงแหวนเบนซีน ส่วนที่  $3000\text{ cm}^{-1}$  และ  $3100\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง C=H ในแอโรแมติกด้วย แสดงว่าพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็ก ๆ ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์มีส่วนช่วยให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนเหล่านั้นมีขนาดเล็กลงดังจะพบว่ามีหมู่ฟังก์ชันเป็นเมทิล (methyl group) แทนที่อยู่บนวงแหวนไฮโดรคาร์บอนด้วยส่วนความเป็นแอโรแมติกเกิดขึ้นเนื่องมาจากการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมทำให้ได้สารประกอบแอโรแมติก

เมื่อนำน้ำมันเบนซิน ออกเทน 95 มาทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันหลักที่เป็นสายโซ่แอโรแมติก (Long chain aromatic) เป็นองค์ประกอบหลักจำนวนมากจำพวกอะลิฟาติกที่มีโครงสร้างเป็นวงที่มีคาร์บอน 5 – 6 โมเลกุล และแสดงมีความเป็นแอโรแมติก (Aromatic compound) ดังรูป 4.27 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ จะเห็นได้ว่ามีหมู่ฟังก์ชันที่คล้ายกัน

แสดงว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวนั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงได้ดีและมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.26 FTIR spectrum จากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจำนวน 15 กรัม อัตราส่วน PP : PS 70 : 30 อัตราส่วน Lub :Plastics 60 : 40 อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 430 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 75 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ จำนวน 0.80 กรัม





## รูปที่ 4.27 FTIR spectrum จากผลิตภัณฑ์น้ำมันเบนซินออกเทน 95

### 4.7 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

ศิริธิดา (2547) ศึกษาถึงกระบวนการแตกตัวของ อะคลิโรไนไทรล์ บิวตะไดอิน สไตรีน (ABS) และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ น้ำหนักรวม 20 กรัม พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเกิดกระบวนการแตกตัว คือ อัตราส่วนของ ABS ต่อน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว คือ 60 : 40 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ จำนวน 1.0 กรัม อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 450 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 100 psi และใช้เวลาในการทดลอง 90 นาที

ส่วนงานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ น้ำหนักรวม 15 กรัม พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเกิดกระบวนการแตกตัว คือ อัตราส่วนระหว่างพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีน 70 : 30 อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อพลาสติก 60 : 40 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 % จำนวน 0.80 กรัม อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์ และใช้เวลาในการทดลอง 75 นาที

จากผลการวิจัยและงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน สามารถเปรียบเทียบภาวะที่ใช้ในการทดลองและผลการทดลองในตาราง 4.5

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

การทดลอง	ศิริธา [2547]	งานวิจัยนี้
สารตั้งต้น	ABS และ น้ำมันหล่อลื่น ใช้แล้ว	พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว
ตัวเร่งปฏิกิริยา	เหล็กบนถ่านกัมมันต์	เหล็กบนถ่านกัมมันต์
อัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นต่อ พลาสติก	60 : 40	60 : 40
อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	450 องศาเซลเซียส	430 องศาเซลเซียส
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	90 นาที	75 นาที
ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น	100 psi	1 บาร์
ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยา	5 % Fe/A.C.	5 % Fe/A.C.
ผลิตภัณฑ์ที่ได้		
น้ำมัน	60.52	75.65
แก๊ส	24.21	17.37
ของแข็ง	13.50	6.98
องค์ประกอบผลิตภัณฑ์โดยรวม		
- แก๊สไฮโดรเจน	38.60 %	46.34 %
- เคนซีน	7.14 %	10.02 %
- แก๊สออกซิลซีนิดเบา	12.20 %	11.98 %
- แก๊สออกซิล	1.40 %	2.76 %
- โมเลกุลไฮโดรคาร์บอน สายโซ่ยาว	3.15 %	4.55 %

## สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โดยการแตกตัวเป็นของเหลวจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วจำเป็นต้องทำในภาวะที่ใช้อุณหภูมิและความดันสูง เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเป็นสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่รวมถึงต้องมีการเติมแก๊สไฮโดรเจนให้กับน้ำมันหล่อลื่นด้วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแตกตัวได้ดี ดังนั้นจึงได้นำพอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีนซึ่งมีความสามารถในการแตกตัวด้วยความร้อนไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก และแตกตัวให้ไฮโดรเจนแก่น้ำมันหล่อลื่นได้ดีมาผสมลงในปฏิกิริยาการแตกตัวซึ่งสามารถเกิดการแตกตัวเป็นของเหลวได้ดี ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณ และคุณภาพของเหลวที่ได้จากการแตกตัวเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของสารตั้งต้นประกอบด้วย เปรอร์เซนต์เหล็กบนถ่านกัมมันต์ อัตราส่วนของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจน และผลของการใช้ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ผลิตรภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวสามารถนำไปวิเคราะห์ในเชิงปริมาณเพื่อหาร้อยละของผลิตรภัณฑ์ของเหลว และทำการวิเคราะห์ของเหลวในเชิงคุณภาพโดยวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของผลิตรภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดต่าง ๆ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Simulated distillation gas chromatograph) ผลการทดลองสามารถสรุปถึงภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ดังนี้

### 5.1 การแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์

1. การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมเบื้องต้น สำหรับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์จะให้ร้อยละผลิตรภัณฑ์ของเหลวได้มากกว่าการใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว (Thermal Cracking) และพบว่าปริมาณร้อยละของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ให้ร้อยละของผลิตรภัณฑ์ของเหลวไม่แตกต่างกันมากนัก โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละผลิตรภัณฑ์มากที่สุดคือ 5 % เหล็กบนถ่านกัมมันต์ และเมื่อใช้ปริมาณของพอลิพรอพิลีนมากขึ้นจะทำให้ได้ผลิตรภัณฑ์แก๊สมากขึ้นและได้ผลิตรภัณฑ์ของเหลวลดลง โดยอัตราส่วนของพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีนที่เหมาะสมคือ 70 : 30 และ

เมื่อใช้ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วมากจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากและเหมาะแก่การทดลองสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องได้ โดยอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วกับพลาสติกที่เหมาะสมคือ 60 : 40

- ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันและค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาของอุณหภูมิกับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา
- ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่ให้แนวโน้มของผลิตภัณฑ์น้ำมันและค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ดีที่สุด ดังนี้

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	430	องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยา	75	นาที
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	0.8	กรัม
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น	1	บาร์

โดยที่ภาวะการทดลองข้างต้นได้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน 75.65 ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊ส 17.37 และของแข็งที่ไม่ทำปฏิกิริยาร้อยละ 6.98 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณของแก๊สโซลีน 61.25 % เคโรซีน 13.25 % แก๊สออยล์เบา 15.84 % แก๊สออยล์ 3.65 % และกากน้ำมันหนัก 6.01 % โดยมีหมู่ฟังก์ชันหลักเป็น อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

## 5.2 การเปรียบเทียบผลของการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์ กับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ

การศึกษาถึงการเปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Fe/Activated carbon Ni Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> HZSM-5 และแบบ Thermal cracking พบว่า การแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว โดยวิเคราะห์เชิงปริมาณพบว่า

- ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Fe/Activated carbon จะได้ผลิตภัณฑ์ดังนี้
 

ผลิตภัณฑ์ของเหลว (น้ำมัน)	ร้อยละ 75.65
แก๊ส	ร้อยละ 17.37
ของแข็งส่วนที่เหลือ หรือไม่ทำปฏิกิริยา	ร้อยละ 6.98

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จะได้ผลิตภัณฑ์ดังนี้

ผลิตภัณฑ์ของเหลว (น้ำมัน)	ร้อยละ	73.92
แก๊ส	ร้อยละ	19.54
ของแข็งส่วนที่เหลือ หรือไม่ทำปฏิกิริยา	ร้อยละ	6.54

## 3. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 จะได้ผลิตภัณฑ์ดังนี้

ผลิตภัณฑ์ของเหลว (น้ำมัน)	ร้อยละ	70.16
แก๊ส	ร้อยละ	22.74
ของแข็งส่วนที่เหลือ หรือไม่ทำปฏิกิริยา	ร้อยละ	7.10

## 4. การแตกตัวแบบ Thermal cracking จะได้ผลิตภัณฑ์ดังนี้

ผลิตภัณฑ์ของเหลว (น้ำมัน)	ร้อยละ	76.94
แก๊ส	ร้อยละ	14.42
ของแข็งส่วนที่เหลือ หรือไม่ทำปฏิกิริยา	ร้อยละ	8.64

และเมื่อนำผลิตภัณฑ์ของเหลวมาวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatography พบว่า

## 1. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Fe/Activated carbon จะได้ผลิตภัณฑ์ดังนี้

แก๊สโซลีน	ร้อยละ	61.25
เคโรซีน	ร้อยละ	13.25
แก๊สออยล์ชนิดเบา	ร้อยละ	15.84
แก๊สออยล์	ร้อยละ	3.65
โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว	ร้อยละ	6.01

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จะได้ผลิตภัณฑ์ดังนี้

แก๊สโซลีน	ร้อยละ	59.14
เคโรซีน	ร้อยละ	13.54
แก๊สออยล์ชนิดเบา	ร้อยละ	15.27
แก๊สออยล์	ร้อยละ	3.45
โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว	ร้อยละ	9.60

### 3. ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 จะได้ผลิตภัณฑ์ดังนี้

แก๊สโซลีน	ร้อยละ 62.38
เคโรซีน	ร้อยละ 14.11
แก๊สออยล์ชนิดเบา	ร้อยละ 13.87
แก๊สออยล์	ร้อยละ 2.94
โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว	ร้อยละ 7.00

### 4. การแตกตัวแบบ Thermal cracking จะได้ผลิตภัณฑ์ดังนี้

แก๊สโซลีน	ร้อยละ 43.32
เคโรซีน	ร้อยละ 14.52
แก๊สออยล์ชนิดเบา	ร้อยละ 11.25
แก๊สออยล์	ร้อยละ 4.18
โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว	ร้อยละ 26.73

จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Fe/Activated carbon จะให้ผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด รองลงมาคือ HZSM-5, Ni Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> , Thermal cracking ตามลำดับ

### 5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในระดับต่อไป

1. พัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ให้เป็นแบบต่อเนื่องและขยายส่วนการผลิตในระดับที่ใหญ่ขึ้น เพื่อกำจัดพอลิพารฟิน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ
2. ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ ที่เหมาะสม โดยเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถสังเคราะห์เองได้ และราคาไม่แพง รวมถึงการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่
3. ศึกษาความเป็นไปได้และเศรษฐศาสตร์ในการผลิตเชื้อเพลิงหรือสารเคมีที่ได้จากการแตกตัวพอลิพารฟิน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

## รายการอ้างอิง

1. กรมส่งเสริมการส่งออก. ข้อมูลอุตสาหกรรมพลาสติก.กระทรวงอุตสาหกรรม,2541
2. Available from : <http://www.eppo.go.th/vrs/> “วารสารนโยบายพลังงาน ฉบับที่ 63 – 65”  
[ 2005 February 28 ]
3. รั้งสวรรค์ ปิ่นทอง.ประโยชน์และโทษของขยะมูลฝอย.2536
4. ปรีชา พหลเทพ. พอลิเมอร์ พิมพ์ครั้งที่ 7 กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยรามคำแหง.2536
5. เกริกชัย สุภาบุญจันท์. เม็ดพลาสติกเก่าจากการรีไซเคิล.จุฬาริวิจัย ปีที่ 18 ฉบับที่ 7  
(กรกฎาคม 2542) : 25-26
6. สำนักงานนโยบายอุตสาหกรรมรายสาขา 1. ข้อมูลและการคาดการณ์การบริโภคผลิตภัณฑ์พลาสติกภายในประเทศ กระทรวงอุตสาหกรรม,2546
7. R.J. Ehrig. Plastic Recycling Product and Process. New York : 1992.
8. Moore, Edward P.Jr. Polypropylene Handbook. Munich : Hanser, 1996
9. ศุภวรรณ์ ตันตยานนท์. ปีโตรเคมี. (2542) :6-1 –6-11,7-1 –7-5, 9-5 –9-8
10. นงเยาว์ ชูติวณิชกุล. อิทธิพลของฟิลล์และไมกาที่มีต่อสมบัติของพอลิพรอพิลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
11. Kenneth H.C. Recycling Chemistry & Industry. 14 (1989) : 440-442.
12. Mackey G.A.,Westphal R.C. Plastic Recycling. New York: Hanser Publisher, 1992.
13. Feldman D., Barbalata A. Synthetic polymer. London: Chapman & Hall, 1996.
14. Available : from <http://library.kmitnb.ac.th/fulltext/tech41/16005.html>  
[2005,February 1]
15. Chaiprasert P.,”One-Step Catalytic Hydrotreatment of Used Automotive Lubricating Oil.” Master Thesis, Program of Petrochemistry and Polymer Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 1999.
16. Division of Fuel, Ministry of Commerce. Monthly Report. Thailand, 1993-1994.
17. Available from : <http://www.doeb.go.th/dbd/data-stat/stat.html> [ 2005, February 9]
18. Charles N. Satterfield. Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice. New York : McGraw-Hill,1991.
19. James A. Casumano. Catalysis in Coal. New York : Academics Press, 1978.

20. Matar S., Manfred J.M., Hassan A.T. Catalysis in Petrochemical Processes. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, (1989) : 46-48.
21. วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. คະຕະไลซีสแบบเฮเทอโรจีเนียส : หลักทฤษฎีและการประยุกต์. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
22. Bansel R.C. Active Carbon. New York : Marcel Dekler, 1988.
23. Matlson J.S. and Mark V.B. Active carbon surface chemistry and adsorption from solution. New York : Marcel Dekker, 1971.
24. Harold H. Schobert, The Chemistry of Hydrocarbon fuel. New York : 1991.
25. วราวุฒิ ประชาสิทธิ์กุล. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2541.
26. Raseev S. Thermal and Catalytic Processes in Petroleum Refining. New York: Marcel Dekker, 2003.
27. ปราโมทย์ ไชยเวช. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : สุนทรออฟเซท. 2537
28. Gary J.H., Handwerk G.H. Petroleum of Refining:Technology and Economics. Vol.5 New York: Marcel Dekker, 1975.
29. Gary J.H., Handwerk G.H. Catalytic Hydrocracking and Hydroprocessing. New York:Marcel Dekker, 1984 : 144-147.
30. Hagen J. Industrial Catalysis. New York: Wiley-VCH, 1999.
31. วีระชัย เปรมโยธิน. เชื้อเพลิงและปิโตรเคมี. ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2534.
32. Serrano D.P., Aguado, J., Escola,J.M., Garagorri E. "Performance of a continuous screw kiln reactor for the thermal and catalytic conversion of polyethylene–lubricating oil base mixtures", Journal of Applied Catalysis B. 4, (2003) : 95 – 105
33. Kim, J.R, Yoon, J.H., Park, D.W. "Catalytic recycling of the mixture of polyoropylene and polystyrene", Journal of Polymer Degradation and Stability, 46, (2002) : 61 – 67
34. Walendziewski, J., Steininger, M. "Thermal and catalytic conversion of waste polyolefins", Journal of Catalysis, 65, (2001) : 323 – 330
35. Taghlei, M.M., Feng, Z., Huggines, F.E., Hulfmann G.P.", Journal of energy and Fuel, 48, (1999) : 1228 – 1232.



36. Serrano, D. P., Aguado, J., Escola, J. M. "Catalytic conversion of polystyrene over HZSM-5, HMCM-41 and amorphous  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  comparison with thermal cracking", Journal of Applied Catalysis B, 25, (2000) : 181-189.
37. Audisio G., Bertini F. "Catalytic degradation of polymer : Part 3 – Degradation of polystyrene", Polymer. Degradation. Stability, 29 (1990): 191-200.
38. Nakamura, I., Fujimoto, K. "Development of new disposable catalyst for waste plastics treatment for high quality transportation fuel", Journal of Catalysis, 27, (1996) : 175-179.
39. Weibing Ding, Jing Liang, and Laary L. Anderson. Catalysis and processes for heavy oil conversion. International Symposium on Advances in Catalysis and Processes for Heavy oil Conversion. (1997) : 428–432.
40. Wang, L., Yoo, J., Park, S., Heon J., Ho, T.L., Deuk K.L. "Optimization of pyrolytic coprocessing of waste plastics and waste motor oil into fuel oils using statistical pentagonal experimental design", Journal of Fuel , 78, (1999) : 809 – 813.
41. Serrano, D. P., Aguado, J., Escola, J. M. "Catalytic conversion of polystyrene over HZSM-5, HMCM-41 and amorphous  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  comparison with thermal cracking", Journal of Applied Catalysis B, 25, (2000) : 181-189.
42. สมสุข ไตรศุกิตติ. การเปลี่ยนพอลิเอทิลีนไปเป็นก๊าซโซลีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
43. ธาวิณี กิตติเรืองทอง. กระบวนการร่วมของพอลิพรอพิลีนและลิกไนต์โดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
44. ธราพงษ์ วิจิตรสานต์. การแตกตัวพอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีนภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน. รายงานการวิจัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช. 2544.
45. พูนสุข พึ่งธรรม. การแตกตัวพอลิพรอพิลีนด้วยไฮโดรเจนโดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

46. นฤภัทร ตังมั่นคงวรกุล. การแยกสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิสไตรีนใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
47. อราดา วงศ์ศุภลักษณ์. การแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2547.
48. ปณิตตา เมธาคุณวุฒิ. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อดีพอลิเมอไรเซชันของพอลิสไตรีนที่ใช้แล้วเป็นเอทิลเบนซีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
49. American Societies for Testing Material D2887-93. Standard Test Method for Boiling Range Distribution of Petroleum Fractions by Gas Chromatography. Annual book of ASTM Standards. 1993.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ก1 แสดงผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์เหล็กบนถ่านกัมมันต์ที่มีผลต่อการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

% Fe loading	% Yield liquid	% Yield gas	% Yield solid	% gasoline	% kerosene	% light gas oil	% gas oil	% long residue	gasoline overall
Thermal	75.93	15.94	8.13	34.87	16.64	15.35	4.32	28.83	26.48
1%	75.83	18.05	6.13	51.00	15.17	18.93	3.50	11.40	38.67
5%	74.29	19.34	6.38	54.56	12.80	18.14	3.00	11.51	40.53
10%	70.17	21.06	8.77	56.29	14.05	16.56	3.42	9.69	39.50

ตาราง ก2 แสดงผลการศึกษาอัตราส่วนพอลิพรอพิลีนกับพอลิสไตรีนที่มีผลต่อการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

Ratio PP:PS	% Yield liquid	% Yield gas	% Yield solid	% gasoline	% kerosene	% light gas oil	% gas oil	% long residue	gasoline overall
100:0	68.36	27.67	3.98	44.44	15.24	22.05	2.45	15.84	30.38
80:20	70.18	24.08	5.74	47.13	14.80	20.79	3.33	13.87	33.07
70:30	72.80	19.90	7.31	53.82	13.51	19.58	3.93	10.68	39.17
60:40	73.39	21.02	6.60	54.86	13.20	18.67	2.96	10.32	40.26
50:50	74.29	19.34	6.88	55.06	12.80	18.14	3.00	11.51	40.90
40:60	75.11	18.51	6.94	57.23	11.36	17.69	3.26	10.47	42.98
20:80	77.30	14.36	8.36	61.33	10.46	16.02	2.83	10.01	47.41
0:100	79.91	11.83	8.27	63.61	10.15	15.56	2.89	5.81	50.83

ตาราง ก3 แสดงผลการศึกษ้อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วต่อพลาสติกผสมที่มีต่อการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

Lub:Plastics	% Yield liquid	% Yield gas	% Yield solid	% gasoline	% kerosene	% light gas oil	% gas oil	% long residue	gasoline overall
100:0	79.00	10.58	10.43	36.28	16.83	26.14	4.59	15.68	28.66
90:10	78.67	11.74	9.59	41.63	15.50	24.81	3.98	13.66	32.75
80:20	76.91	13.61	9.48	44.50	15.41	23.68	3.62	12.81	34.22
70:30	75.08	15.89	9.04	47.29	14.60	21.46	3.22	12.06	35.50
60:40	74.93	17.85	7.22	53.16	13.73	18.53	3.38	11.21	39.83
50:50	73.14	20.56	6.31	55.49	13.99	19.20	3.08	10.25	40.59
40:60	70.39	21.62	8.00	57.20	12.14	17.06	3.08	10.52	40.26
30:70	68.54	23.44	8.03	58.93	12.49	16.29	2.88	9.42	40.39
0:100	64.55	25.92	9.54	61.98	12.87	13.84	2.46	7.75	40.01

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตาราง ก4** แสดงผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ 4 ตัวแปร ( $2^4$  factorial design) สำหรับการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ภาวะทดลองอัตราส่วน PP:PS 70:30 อัตราส่วน Lub:Plastics 60:40 และ% Fe loading 5 %

run order	Factor				Oil yield (%w)	Gas yield (%w)	Solid yield (%w)	gasoline (%w)	kerosene (%w)	light gas oil (%w)	gas oil (%w)	long residue (%w)	Gasoline overall (%w))
	Temperature (°C)	Time (min)	pressure (bar)	catalyst (g)									
1	390	45	1	0.15	83.75	7.65	8.60	22.24	7.19	15.85	3.24	51.48	18.63
2	390	45	1	1.5	82.35	8.04	9.61	33.25	8.41	18.47	3.52	36.35	27.38
3	390	45	10	0.15	83.46	7.37	9.17	24.63	7.64	16.10	3.88	47.75	20.56
4	390	45	10	1.5	82.56	7.86	9.58	35.28	9.71	8.13	3.84	33.04	29.13
5	390	90	1	0.15	80.62	10.15	9.23	31.47	7.52	16.12	3.42	41.47	25.37
6	390	90	1	1.5	80.01	11.32	8.67	40.13	10.47	16.58	3.82	29.00	32.11
7	390	90	10	0.15	81.28	11.25	7.47	33.82	9.14	16.44	3.61	36.99	27.49
8	390	90	10	1.5	79.64	11.75	8.61	42.50	10.50	19.14	3.54	24.32	33.85
9	450	45	1	0.15	68.55	20.34	11.11	52.91	14.10	20.25	2.14	10.60	36.27
10	450	45	1	1.5	65.32	20.77	13.91	57.04	15.02	15.42	2.80	9.72	37.26
11	450	45	10	0.15	68.27	21.59	10.14	53.12	12.12	17.26	2.53	14.97	36.27
12	450	45	10	1.5	67.23	18.37	14.40	56.45	13.14	19.27	3.10	8.04	37.95
13	450	90	1	0.15	69.84	19.54	10.62	57.24	13.55	17.84	3.17	8.20	39.98
14	450	90	1	1.5	67.87	20.14	11.99	60.16	13.24	18.42	2.54	5.64	40.83
15	450	90	10	0.15	67.28	21.41	11.31	58.24	13.21	18.06	2.14	8.35	39.18
16	450	90	10	1.5	66.15	19.70	14.15	60.50	13.34	17.34	2.37	6.45	40.02

ตาราง ก5 แสดงผลการศึกษากาภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

run order	Factor				Oil yield (%w)	Gas yield (%w)	Solid yield (%w)	gasoline (%w)	kerosene (%w)	light gas oil (%w)	gas oil (%w)	long residue (%w)	Gasoline overall (%w))
	Temperature (°C)	Time (min)	catalyst (g)	pressure (bar)									
1	390	90	0.5	10	83.79	7.99	8.22	38.16	14.65	17.28	3.19	26.72	31.97
2	410	90	0.5	10	81.28	11.09	7.63	43.43	12.11	18.39	3.41	22.66	35.3
3	430	90	0.5	10	72.92	20.62	6.46	61.44	13	17.24	2.84	5.48	44.8
4	450	90	0.5	10	67.47	26.42	6.11	60.39	13.21	17.18	2.68	6.54	40.75
5	470	90	0.5	10	65.14	28.64	6.22	60.25	12.54	18.47	2.41	6.33	39.25

ตาราง ก6 แสดงผลการศึกษากาภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

run order	Factor				Oil yield (%w)	Gas yield (%w)	Solid yield (%w)	gasoline (%w)	kerosene (%w)	light gas oil (%w)	gas oil (%w)	long residue (%w)	Gasoline overall (%w))
	Temperature (°C)	Time (min)	catalyst (g)	pressure (bar)									
1	430	45	0.5	10	76.44	14.45	9.11	49.12	15.34	16.43	3.22	15.89	37.55
2	430	60	0.5	10	74.93	17.85	7.22	53.16	13.73	18.53	3.38	11.21	39.83
3	430	75	0.5	10	74.88	18.15	6.97	60.86	12.98	18.67	2.88	4.61	45.57
4	430	90	0.5	10	72.92	20.62	6.46	61.44	13	17.24	2.84	5.48	44.8
5	430	105	0.5	10	70.84	22.83	6.33	61.12	12.87	17.95	2.43	5.63	43.3

ตาราง ก7 แสดงผลการศึกษากาภาวะปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

run order	Factor				Oil yield (%w)	Gas yield (%w)	Solid yield (%w)	gasoline (%w)	kerosene (%w)	light gas oil (%w)	gas oil (%w)	long residue (%w)	Gasoline overall (%w))
	Temperature (°C)	Time (min)	catalyst (g)	pressure (bar)									
1	430	75	0.15	10	75.64	18.28	6.08	51.47	13.58	18.21	4.15	12.59	38.93
2	430	75	0.5	10	74.88	18.15	6.97	58.85	12.98	18.67	2.88	6.62	44.07
3	430	75	0.8	10	73.61	18.59	7.8	61.54	12.55	16.52	3.55	5.84	45.30
4	430	75	1.2	10	69.78	19.37	10.85	62.35	13.64	15.47	3.48	5.06	43.51
5	430	75	1.5	10	68.54	19.11	12.35	62.74	13.59	13.54	3.88	6.25	43.00
6	430	75	-	10	73.25	19.1	7.65	45.16	14.58	14.19	3.58	22.49	33.08

ตาราง ก8 แสดงผลการศึกษากาภาวะความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

run order	Factor				Oil yield (%w)	Gas yield (%w)	Solid yield (%w)	gasoline (%w)	kerosene (%w)	light gas oil (%w)	gas oil (%w)	long residue (%w)	Gasoline overall (%w))
	Temperature (°C)	Time (min)	catalyst (g)	pressure (bar)									
1	430	75	0.8	1	75.65	17.37	6.98	61.25	13.25	15.84	3.65	6.01	46.34
2	430	75	0.8	5	74.81	17.94	7.25	61.74	14.22	15.21	2.54	6.29	46.19
3	430	75	0.8	10	73.61	18.59	7.80	61.54	12.55	16.52	3.55	5.84	45.30
4	430	75	0.8	-	74.35	18.55	7.1	49.65	15.22	12.45	4.28	18.4	36.91



ตาราง ก9 แสดงผลการศึกษาค่าการเปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการแตกตัวพอลิพารอฟิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

Type of catalyst	Factor				Oil yield (%w)	Gas yield (%w)	Solid yield (%w)	gasoline (%w)	kerosene (%w)	light gas oil (%w)	gas oil (%w)	long residue (%w)	Gasoline overall (%w))
	Temp. (°C)	Time (min)	catalyst (g))	pressure (bar)									
Thermal	430	75	0.80	1	76.94	14.42	8.64	43.32	14.52	11.25	4.18	26.73	33.33
Fe/AC	430	75	0.80	1	75.65	17.37	6.98	61.25	13.25	15.84	3.65	6.01	46.34
Ni-Mo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	430	75	0.80	1	73.92	19.54	6.54	59.14	13.54	15.27	2.45	9.60	43.72
HZSM - 5	430	75	0.80	1	70.16	22.74	7.10	62.38	14.11	13.87	2.64	7.00	43.77

## ภาคผนวก ข

## ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ

การวิเคราะห์เชิงสถิติได้วางรูปแบบการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ และอยู่ภายใต้สมมติฐานว่าตัวแปรและค่าการวิเคราะห์มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

## 1. สัญลักษณ์ของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

- 1.1 k หมายถึง จำนวนตัวแปรที่ทำการศึกษา
- 1.2 n หมายถึง จำนวนการทดลองที่ภาวะการทดลองเดียวกัน
- 1.3 อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ (A, B, C, D) แทนปัจจัยที่ต้องการศึกษา เช่น อุณหภูมิ เวลา เป็นต้น
- 1.4 อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่เขียนติดกัน (Combination) เช่น AB, AC, ABC หมายถึงอันตรกิริยาของแต่ละปัจจัย (Interaction)
- 1.5 อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กเขียนติดกัน เช่น ab, ac, abc หมายถึงการทดลองที่เกิดจากการรวมกันของอิทธิพลปัจจัยต่างๆ เรียกว่า Treatment combination การทดลองที่แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จะแทนแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยเป็น  $-1$  ที่ระดับต่ำ และ  $+1$  ที่ระดับสูง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สโซลีนจากปฏิกิริยาการแตกตัวพอลิพอรอฟิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ซึ่งออกแบบการทดลองเป็น  $2^4$  แฟกทอเรียล โดยกำหนดสัญลักษณ์และระดับของตัวแปร ดังนี้

ตาราง ข1 สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

ปัจจัย	ระดับ	
	-1 (ต่ำ)	+1 (สูง)
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม) , A	0.15	1.50
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์) , B	1	10
เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที) , C	45	90
อุณหภูมิที่ทำการทดลอง (องศาเซลเซียส) , D	390	450

สัญลักษณ์แทนการทดลองซึ่งเกิดจากการรวมกันของอิทธิพลปัจจัยต่างๆ มีความหมาย คือ การทดลองที่ปรากฏสัญลักษณ์ของปัจจัยใด แสดงว่าทำการทดลองที่ระดับ +1 ของปัจจัยนั้น และปัจจัยที่ไม่ปรากฏสัญลักษณ์ทำการทดลองที่ระดับ -1 เช่น

- (-1) แสดงว่า ทำการทดลองที่ระดับ -1 ทุกปัจจัย
- a แสดงว่า ทำการทดลองที่ระดับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา +1 และปัจจัยอื่นๆทำที่ระดับ -1 ดังนั้นภาวะการทดลองคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1.50 กรัม เวลา 45 นาที อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บาร์
- ab แสดงว่า ทำการทดลองที่ระดับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา +1 และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น +1 ส่วนปัจจัยอื่นๆ ทดลองที่ระดับ -1

## 2. ความหมายของคำสำคัญ

อิทธิพลหลัก (Main effect) หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา

อันตรกิริยา (Interaction) หมายถึง การแสดงออกของระดับต่างๆในปัจจัยหนึ่งไม่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบกับจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่งของอีกปัจจัย

อิทธิพลแฟกทอเรียล (Factorial effect) หมายถึง อิทธิพลต่างๆ ทั้งอิทธิพลหลักและอันตรกิริยาทั้งหมดในการทดลองซึ่งจะมีเท่ากัน จำนวนการรวมตัว -1 หรือเท่ากับองศาความเป็นอิสระ (Degree of Freedom) ของสิ่งที่ทดลอง

## 3. สูตรการคำนวณ

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

$$2. \text{Effect Estimate}_{AB\dots K} \text{ (EE)} = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB\dots K})$$

3. Sum of Squares  $_{AB\dots K}$  (SS)

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

4. Total of Sum of Squares (SS<sub>T</sub>)

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

5. Sum of Squares Error ( $SS_E$ )

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{main effect}}$$

6. Mean of Square (MS)

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

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

8.  $F_o = MS_{\text{effect}} / MS_{\text{error}}$

#### 4. ตัวอย่างการคำนวณ

รูปแบบของ Treatment combinations อิทธิพลแพททอเรียล และค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณแสดงในตาราง ข2 โดย

เครื่องหมาย + และ - คือ +1 และ -1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการเปรียบเทียบ หรืออิทธิพลแพททอเรียลต่างๆ นั่นเอง ดังนั้นอิทธิพลแพททอเรียล A คือ การเปรียบเทียบระหว่างระดับ +1 และ -1 ของปัจจัย A

วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ เช่น

อิทธิพลแพททอเรียล A: ให้ค่า + แก่ Treatment combinations ที่มีสัญลักษณ์ a นอกนั้นให้ค่าเป็น -

อิทธิพลแพททอเรียล B: ให้ค่า + แก่ Treatment combinations ที่มีสัญลักษณ์ b นอกนั้นให้ค่าเป็น -

อิทธิพลอันตรกิริยา AB: ให้คูณสัมประสิทธิ์ของ A และ B เข้าด้วยกันได้เป็นสัมประสิทธิ์ของ AB

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข2 แสดงภาวะของตัวแปรและร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนที่ได้

Run	Treatment combination	Catalyst (g)	Pressure ( bar )	Time (mins)	Temperature ( °C)	Gasoline over all
1	1	0.15	1	45	390	18.63
2	a	1.5	1	45	390	27.38
3	b	0.15	10	45	390	20.56
4	ab	1.5	10	45	390	29.13
5	c	0.15	1	90	390	25.37
6	ac	1.5	1	90	390	32.11
7	bc	0.15	10	90	390	27.49
8	abc	1.5	10	90	390	33.85
9	d	0.15	1	45	450	36.27
10	ad	1.5	1	45	450	37.26
11	bd	0.15	10	45	450	36.27
12	cd	1.5	10	45	450	37.95
13	abd	0.15	1	90	450	39.98
14	acd	1.5	1	90	450	40.83
15	bcd	0.15	10	90	450	39.18
16	abcd	1.5	10	90	450	40.02

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข3 แสดงผลการคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละผลผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนที่ได้

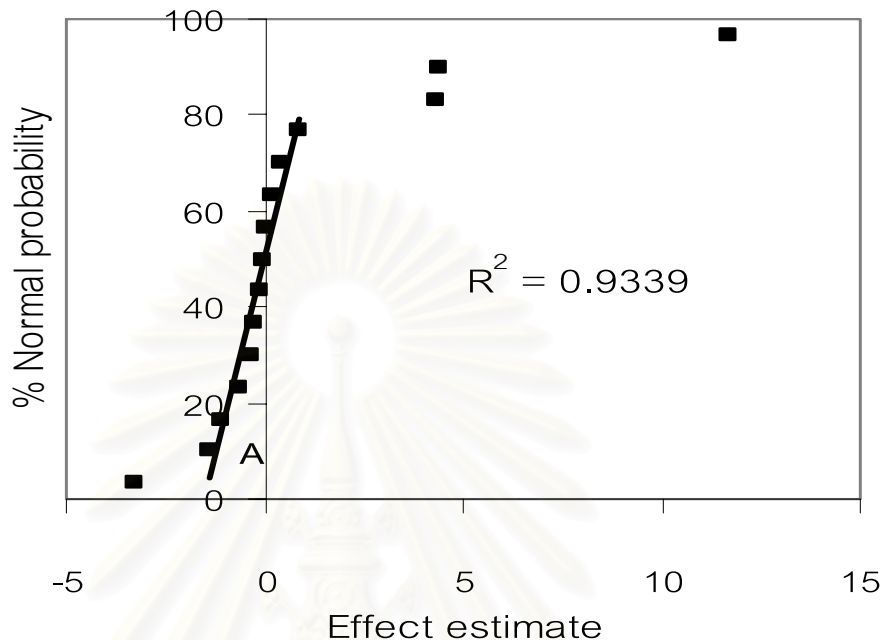
Run	rank	% Yield	1	a	b	ab	c	ac	bc	abc	d	ad	bd	cd	abd	acd	bcd	abcd
1	1	18.63	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1
2	a	27.38	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
3	b	20.56	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
4	ab	29.13	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
5	c	25.37	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
6	ac	32.11	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
7	bc	27.49	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
8	abc	33.85	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
9	d	36.27	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
10	ad	37.26	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
11	bd	36.27	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
12	cd	37.95	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
13	abd	39.98	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
14	acd	40.83	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
15	bcd	39.18	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
16	abcd	40.02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
sum		522.26	contrast	34.7874	6.6184	0.1171	35.3912	-5.215	-2.109	-0.909	93.2506	-26.05	-8.447	1.243	-10.857	3.2474	-2.471	-0.520
average		38.47	Ess_Eff	4.3484	0.8273	0.0146	4.4239	-0.651	-0.263	-0.11	11.6563	-3.256	-1.055	0.155	-1.3572	0.4059	-0.308	-0.065

ตาราง ข4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง normal probability (%) กับ absolute effect estimate (เรียงจากน้อยไปมาก)

Cumulative	Normal probability	absolute effect estimate
1	3.33	-3.257
2	10.00	-1.357
3	16.67	-1.056
4	23.33	-0.652
5	30.00	-0.309
6	36.67	-0.264
7	43.33	-0.114
8	50.00	-0.065
9	56.67	0.015
10	63.33	0.155
11	70.00	0.406
12	76.67	0.827
13	83.33	4.348
14	90.00	4.424
15	96.67	11.656

นำผลการคำนวณจากตาราง ข4 มาสร้าง Normal Probability Plot ได้ดังรูป ข1 พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง คือ ปัจจัย A แทน น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัย C แทน เวลา ปัจจัย D แทน อุณหภูมิ ปัจจัย AD แทนอันตรกิริยาระหว่างน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาและ อุณหภูมิ แสดงว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีน นอกจากนี้ เมื่อนำผลจากตาราง ข4 มาสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) แสดง ผลดังตาราง ข5 พบว่า ให้ผลเช่นเดียวกัน โดยปัจจัย A แทน น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัย C แทน เวลา ปัจจัย D แทน อุณหภูมิ ปัจจัย AD แทนอันตรกิริยาระหว่างน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิ ให้ค่า  $F_0$  คือ 46.87 48.51 336.81 และ 26.39 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า ค่า  $F_c$  คือ 4.60 ที่ความเชื่อมั่น 95% จึงเป็นการยืนยันว่า น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ใน

การเกิดปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิ เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนที่ได้อย่างมีนัยสำคัญ



**รูปที่ ข1** Normal Probability Plot ของร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนที่ได้จากการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

**ตารางที่ ข5** แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนที่ได้จากการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

Source	Sum of square	Degree of freedom	Mean square	F <sub>o</sub>	P-value	F <sub>c</sub>
D	543.479	1	543.48	336.81	0.0000	4.60
A	75.635	1	75.64	46.87	0.0000	
C	78.284	1	78.28	48.51	0.0000	
AD	42.430	1	42.43	26.29	0.0003	
Error	17.75	11	1.61			
Total	757.58	15				



## ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด  
(Boiling Distribution)

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatography จะวิเคราะห์ตามจุดเดือดของแต่ละสารดังต่อไปนี้

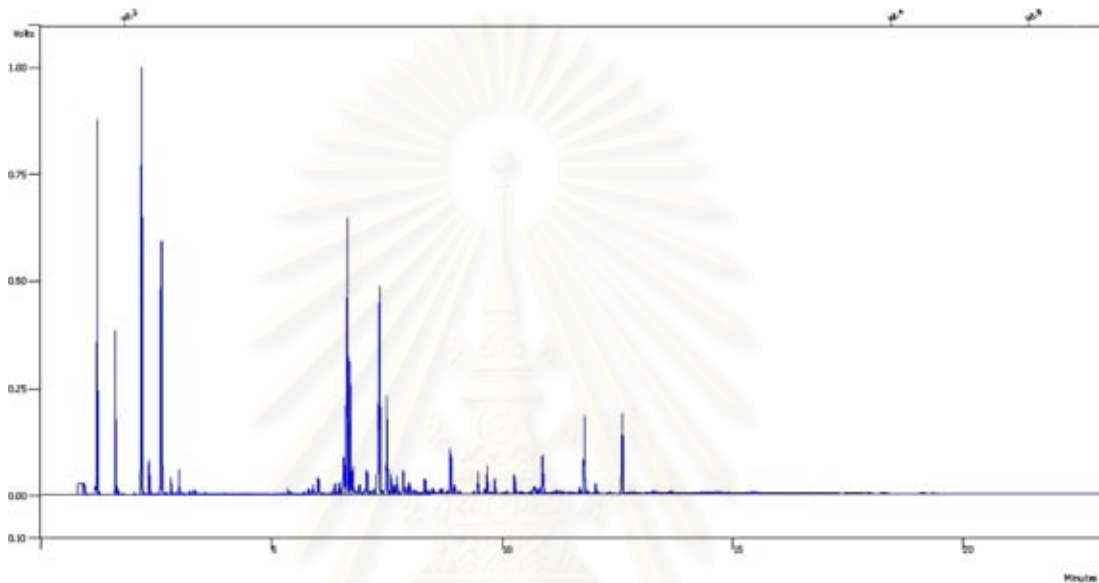
IBP – 200 °C	=	Gasoline
200°C – 250 °C	=	Kerosene
250°C – 350 °C	=	Light Gas Oil
350°C – 370 °C	=	Gas Oil
370°C – FBP	=	Long residue

การวิเคราะห์จะเริ่มจากการเตรียมสารตัวอย่าง โดยนำผลิตภัณฑ์น้ำมันไปละลายในสารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS<sub>2</sub>) ในอัตรา 1 ส่วนใน 100 ส่วนโดยปริมาตร จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Varian รุ่น CP-3800 สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันตามจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887 พร้อมทั้งดีเทคเตอร์แบบ FID ใช้ซอฟต์แวร์ Simulated Distillation คอลัมน์ที่ใช้เป็น Capillary column มี stationary phase คือ CP-SIL 5CB ยาว 15 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.25 มิลลิเมตร และความหนาของฟิล์ม 0.25 ไมครอน ภาวะที่ใช้คือ อุณหภูมิหัวฉีด 298 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคอลัมน์ 30-320 องศาเซลเซียส อุณหภูมิ ดีเทคเตอร์ 320 องศาเซลเซียส โดยมี carrier gas เป็น helium gas ที่อัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อ นาที ด้วย split ratio 2

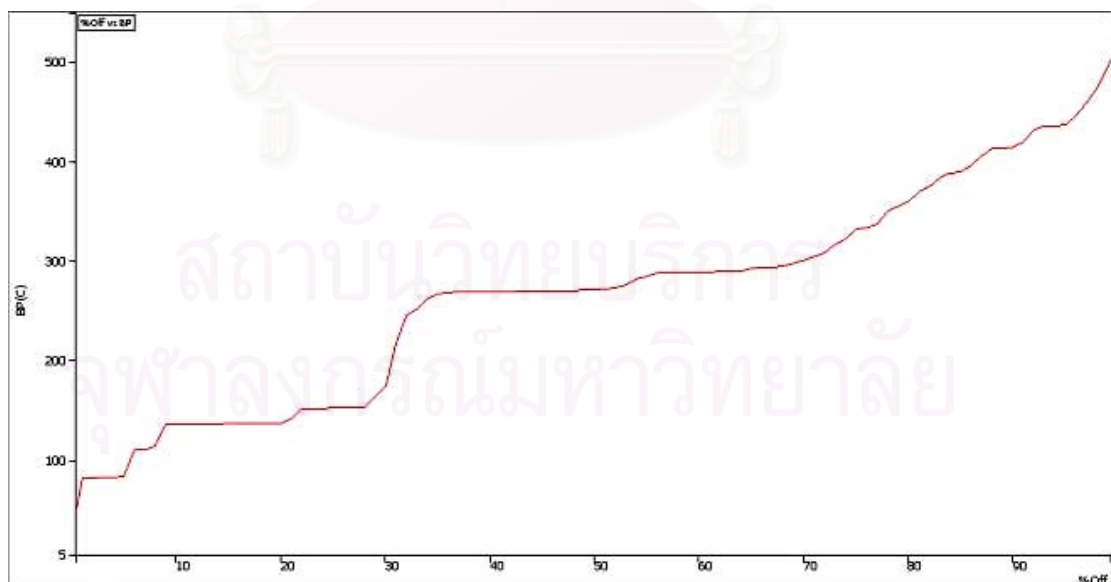
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือด

โครมาโทแกรมที่ได้จากการแยกสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ดังรูป ค1 จากนั้นนำไปเปลี่ยนเป็นกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือดด้วยโปรแกรม Simulated Distillation โดยจะทำการเทียบกับโครมาโทแกรมของสารมาตรฐานตาม ASTM D2887 (Standard) และโครมาโทแกรมของเครื่องเมื่อไม่มีการฉีดสารใดๆ (Blank) ดังรูป ค2

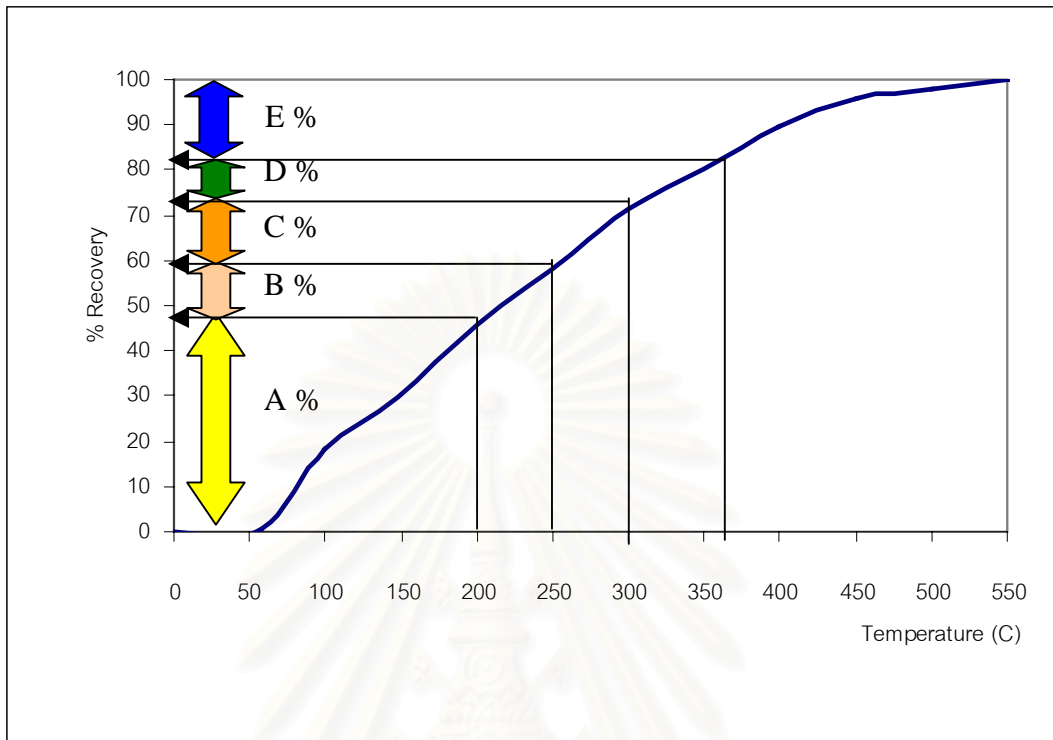


รูปที่ ค1 แสดงโครมาโทแกรมจากการแยกของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



รูปที่ ค2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน(%off) กับจุดเดือดของสารจากโปรแกรม Simulated Distillation

## ตัวอย่างการคำนวณ



**รูปที่ ค3** ตัวอย่างกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องมือ Simulated Distillation Gas Chromatography และการคำนวณปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ

การคำนวณหาปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบน้ำมันตามคาบจุดเดือด

ปริมาณ naphtha ที่อ่านจากกราฟ A %

$$\text{ดังนั้น \% naphtha ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = \frac{A \times W}{100}$$

ปริมาณ kerosene ที่อ่านจากกราฟ B %

$$\text{ดังนั้น \% kerosene ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = \frac{B \times W}{100}$$

ปริมาณ light gas oil ที่อ่านจากกราฟ C %

$$\text{ดังนั้น \% light gas oil ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = \frac{C \times W}{100}$$

ปริมาณ gas oil ที่อ่านจากกราฟ D %

$$\text{ดังนั้น \% gas oil ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = \frac{D \times W}{100}$$

ปริมาณ long residue ที่อ่านจากกราฟ E %

$$\text{ดังนั้น \% long residue ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = \frac{E \times W}{100}$$



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

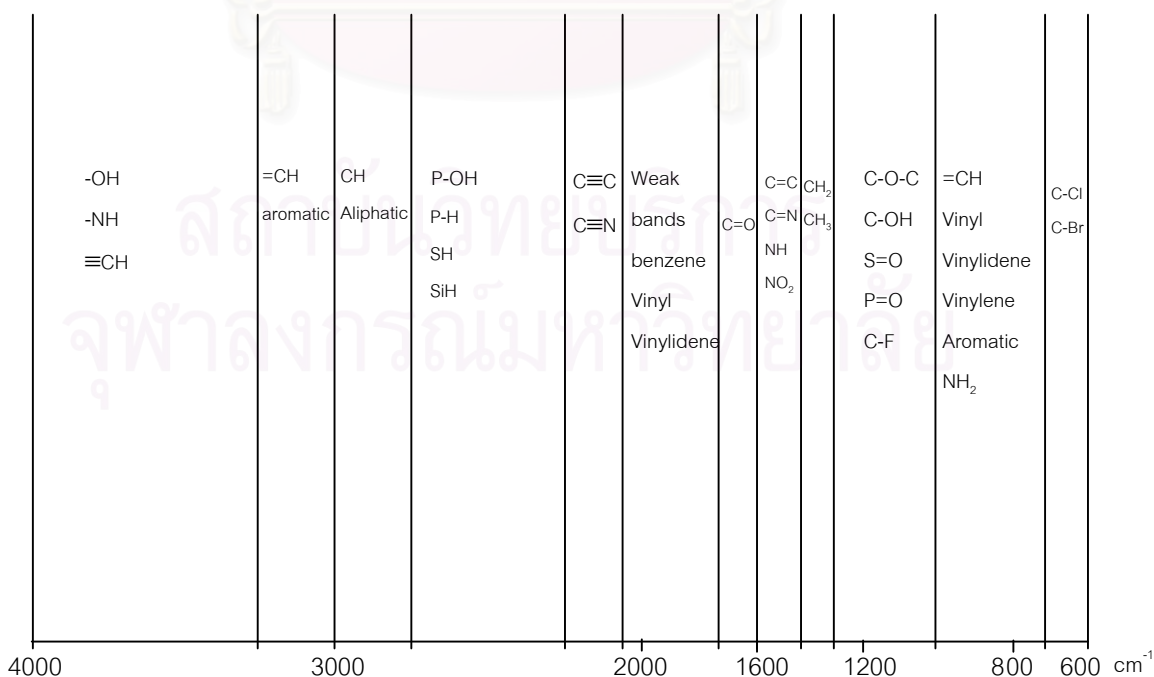
### การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย FT - IR

การแปลความหมายของการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer จะพิจารณาแถบการดูดกลืน Infrared Spectrum เป็น 3 ช่วง คือ

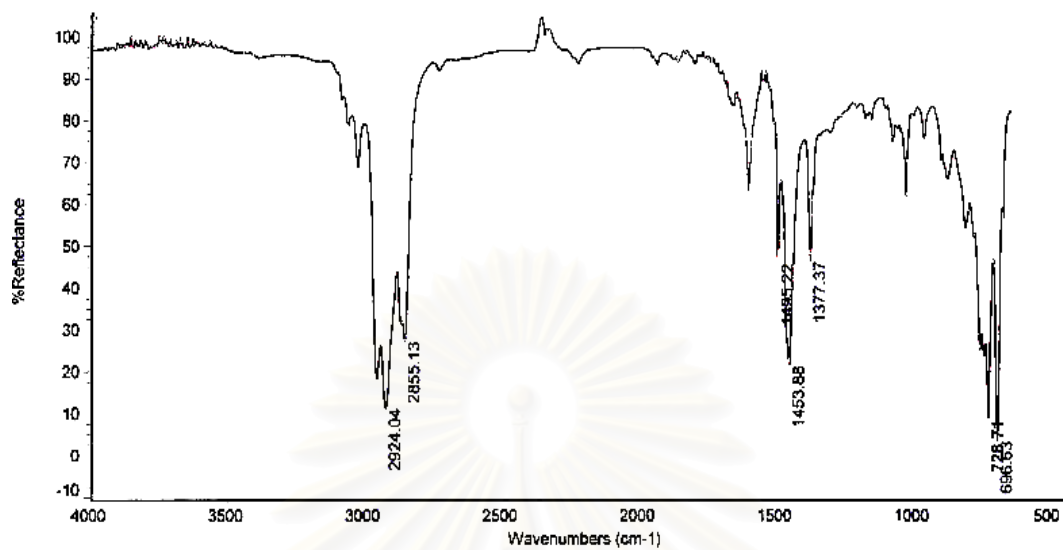
1. ย่านความถี่  $1300 - 1400 \text{ cm}^{-1}$  เรียกว่า Functional group regional เป็นย่านที่บอกถึงชนิดของหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล ซึ่งหากไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันใดในย่านนี้ จะเป็นการยืนยันว่าไม่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่ในโมเลกุลสารที่สนใจ แต่ทั้งนี้การแปลความหมายต้องทำอย่างระมัดระวังเนื่องจากโครงสร้างบางตัวอาจให้แถบดูดกลืนที่กว้างจนสังเกตได้ยาก

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

3. ย่านความถี่  $650 - 910 \text{ cm}^{-1}$  จะบ่งบอกถึงการจับตัวของหมู่แทนที่บนวงแหวนสารประกอบอะโรมาติก ซึ่งหากไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนบริเวณนี้ ย่อมแสดงว่าสารที่สนใจไม่มีองค์ประกอบเป็นอะโรมาติก



รูปที่ ง.1 แถบการดูดกลืนของ Infrared Spectra ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ



รูปที่ ง.2 ตัวอย่างแสดงค่าการดูดกลืนของแสงจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของ  
พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายประชาธน์ แต่ภักดี เกิดเมื่อวันที่ 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2524 ที่ กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนพิบูลวิทยาลัย จ. ลพบุรี เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีเมื่อ ปี พ.ศ. 2542 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค สาขาเคมีวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2546



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย