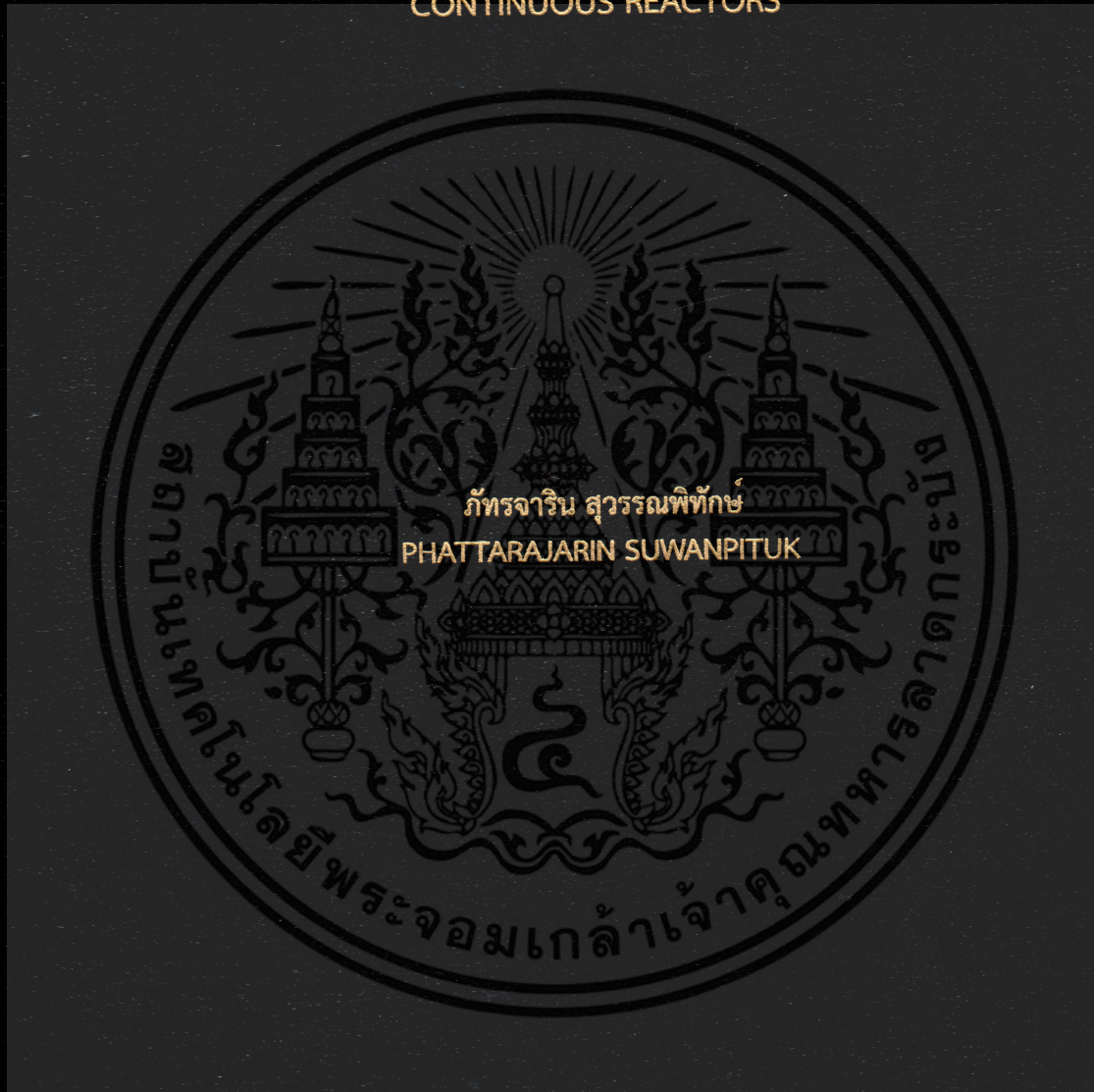


การแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา  
เอฟซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง

THERMAL AND CATALYTIC CRACKING OF  
USED LUBRICATING OILS BY SPENT FCC CATALYSTS IN BATCH AND  
CONTINUOUS REACTORS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-020-201

การแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา  
เอฟซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง

THERMAL AND CATALYTIC CRACKING OF  
USED LUBRICATING OILS BY SPENT FCC CATALYSTS IN BATCH AND  
CONTINUOUS REACTORS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMUTL-2017-EN-M-020-201  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMAL AND CATALYTIC CRACKING OF  
USED LUBRICATING OILS BY SPENT FCC CATALYSTS IN BATCH AND  
CONTINUOUS REACTORS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

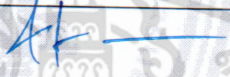




FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว  
ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง  
Thesis Title Thermal and Catalytic Cracking of Used Lubricating Oils by Spent FCC  
Catalysts in Batch and Conditions Reactors  
นักศึกษา นางสาวภัทรจาริน สุวรรณพิทักษ์  
รหัสประจำตัว 56601462  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-201

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ศ.ดร.ธราพงษ์	วิฑิตศานต์	
ผศ.ดร.กุลนันท์	เกียรติกิตติพงษ์	
ดร.ณัฐนนท์	ไพบุลย์ศิลป์	
ผศ.ดร.สันติ	วัฒนานุสรณ์	
รศ.ดร.อัญชลีพร	วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560 เวลา 09.00-11.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง
นักศึกษา	นางสาวภัทรจาริน สุวรรณพิทักษ์
รหัสประจำตัว	56601462
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มมูลค่าน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว โดยการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 70 มิลลิลิตร เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีปริมาณดีเซลสูงสุด ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390, 410 และ 430 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 30, 45 และ 60 นาที ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1, 3 และ 5 บาร์เกจ และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลองในเชิงปริมาณ คือ ผลของตัวแปรต่างๆ ที่ศึกษาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว และในเชิงคุณภาพ คือ องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามคาบจุดเดือด (Simulated Distillation Gas Chromatograph) ตามมาตรฐาน ASTM D2887 พบว่าภาวะเหมาะสมที่ร้อยละผลได้ของดีเซลในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุด คือ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ร้อยละโดยน้ำหนักของแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็งที่ได้ เท่ากับ 10.24, 86.74 และ 3.02 ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ประกอบด้วยแนฟทา 29.80 เคโรซีน 22.34 ดีเซล 28.04 และกากน้ำมันหนัก 6.51 ร้อยละโดยน้ำหนัก สำหรับการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ใช้อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 3 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ ร้อยละ 30 และ 60 โดยปริมาตร และแก๊สไฮโดรเจน 50 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าภาวะเหมาะสมที่ร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดคือ อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 60 (%v/v) และอัตราการป้อนแก๊สไฮโดรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ร้อยละโดยน้ำหนักของแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็งที่ได้ เท่ากับ 20.16, 66.32 และ 13.52 ตามลำดับ ร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวประกอบด้วยแนฟทา 18.90 เคโรซีน 12.60 ดีเซล 25.89 และ กากน้ำมันหนัก 8.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	Thermal and Catalytic Cracking of Used Lubricating Oils by Spent FCC Catalysts in Batch and Continuous Reactors
<b>Student</b>	Miss Phattarajarin Suwanpituk
<b>Student ID.</b>	56601462
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Chemical Engineering
<b>Year</b>	2017
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr.Anchaleeporn Waritswat Lothongkum

### ABSTRACT

This research is value added of used lubricating oils (ULOs) and spent fluid catalytic cracking (FCC) catalysts via thermal and catalytic cracking of ULOs in a 70-ml stainless steel micro-reactor. The optimal conditions to obtain the maximum amount of diesel in liquid hydrocarbons were investigated. The operating conditions were varied as follows: reaction temperature 390, 410 and 430 °C, reaction time 30, 45 and 60 min, initial hydrogen gas pressure in the micro-reactors 1, 3 and 5 barg, and spent FCC catalysts loading 1, 3 and 5 wt% of spent FCC catalysts to ULOs. The quantitative results were the effects of the parameters on yields of gas, liquid product, and solid. The qualitative results were the distributions in liquid product characterized by simulated distillation gas chromatograph and software based on ASTM D2887. The optimal conditions that attained high amount of diesel in liquid products were at 390 °C, 45 min, initial hydrogen gas pressure 1 barg, and 3 wt% of spent FCC catalysts to ULOs. According to the results of cracked ULOs, 10.24 wt% of gas, 86.74 wt% of liquid product, and a small amount of solid of 3.02 wt% were observed. The liquid product composed of 29.79 wt% of naphtha, 22.34 wt% of kerosene, 28.04 wt% of diesel, and 6.57 wt% of long residues. The experiments were subsequently studied in a 3-L continuous reactor at the temperature of 390 °C by varying ULOs 3 and 9 ml/min, spent FCC catalysts loading with respect to the volume of the reactor 30 and 60 %v/v, and the N<sub>2</sub> carrier gas 50 and 150 ml/min. The cracked ULOs contained 20.16 wt% of gas, 66.32 wt% of liquid product, and a small amount of solid of 13.52 wt%. The liquid product composed of 18.90 wt% of naphtha, 12.60 wt% of kerosene, 25.89 wt% of diesel, and 8.96 wt% of long residues.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรู้ แนวทาง คำปรึกษา และช่วยเหลือในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่อนุญาตให้ใช้ศูนย์การเรียนรู้และบริการวิชาการ เครื่องข่ายแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท เอเอสเค อินเทอร์เน็ต เนชั่นแนล จำกัด ที่อนุเคราะห์น้ำมันน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว สำหรับใช้ในการทำงานวิจัย

กราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ครู อาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา ครู อาจารย์ที่เคารพ และผู้มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวนาม

ภัทรจาริน

สุวรรณพิทักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปีโตรเลียม.....	5
2.1.1 แก๊สธรรมชาติ.....	5
2.1.2 น้ำมันดิบ.....	6
2.1.3 สมบัติของน้ำมันดิบ.....	8
2.2 น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป.....	9
2.2.1 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น.....	12
2.2.2 สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน.....	12
2.2.3 มาตรฐานน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน.....	15
2.2.4 น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป.....	18
2.2.5 สารเติมแต่งหรือสารเพิ่มคุณภาพ.....	19
2.2.6 การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นอุตสาหกรรมและน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์.....	21
2.2.7 การจัดการน้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพที่ใช้แล้ว.....	21
2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	22
2.3.1 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	23
2.3.2 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	24
2.3.3 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์.....	25
2.3.4 การป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	26
2.3.5 การฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่.....	26
2.3.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.7 ชนิดของซีโอไลต์.....	27
2.3.8 โครงสร้างของซีโอไลต์ .....	28
2.3.9 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ .....	29
2.3.10 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ในงานอุตสาหกรรม .....	30
2.4 ปฏิริยาทางเคมีของตัวเร่งปฏิริยาเอพซีซี .....	31
2.4.1 การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน (Thermal cracking).....	32
2.4.2 การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิริยา (Catalytic cracking).....	33
2.4.3 การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking).....	35
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
2.5.1 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่น.....	36
2.5.2 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการแตกโมเลกุลของสารตั้งต้นชนิดอื่นๆในเครื่องปฏิกรณ์ แบบต่อเนื่อง .....	37
บทที่ 3 เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการทดลอง.....	40
3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี .....	40
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง .....	41
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์.....	44
3.3.1 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว .....	44
3.3.2 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิริยาเอพซีซีใช้แล้ว .....	46
3.4 การดำเนินการวิจัย.....	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล.....	54
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการแตกโมเลกุล .....	54
4.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการแตกโมเลกุล.....	54
4.1.2 สมบัติทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการแตกโมเลกุล.....	54
4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของตัวเร่งปฏิริยาเอพซีซี.....	56
4.2.1 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิริยาเอพซีซีด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometry: XRF).....	56
4.2.2 โครงสร้างผลึกของตัวเร่งเอพซีซีด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD) .....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3	พื้นที่ผิว ขนาด และปริมาตรของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีด้วยเทคนิค บรูนเนอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์: บีอีที (Brunauer, Emmett and Teller: BET Method).....	58
4.2.4	ความเป็นกรดบนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว .....	58
4.3	ผลของตัวแปรของกระบวนการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับ ตัวเร่งเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะต่อร้อยละของแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว .....	59
4.3.1	ผลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา.....	59
4.3.2	ผลของเวลาการทำปฏิกิริยา.....	61
4.3.3	ผลของความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นในการทำปฏิกิริยา.....	63
4.3.4	ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วใน การทำปฏิกิริยา.....	65
4.3.5	ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ เป็นดีเซล จากการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.....	67
4.4	ผลของตัวแปรของกระบวนการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับ ตัวเร่งเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ต่อร้อยละของแก๊ส ผลิตภัณฑ์ ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว.....	68
4.4.1	ผลของอัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในการทำปฏิกิริยา.....	69
4.4.2	ผลของอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในการทำปฏิกิริยา.....	70
4.4.3	ผลของอัตราการป้อนแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) ในการทำปฏิกิริยา.....	72
4.4.4	ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ เป็นดีเซล จากการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	74
4.4.5	เปรียบเทียบปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบใน ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วย ความร้อนร่วมกับตัวเร่งเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง...	75
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	80
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	80
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	81
บรรณานุกรม.....		84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก. ข้อมูลการทดลอง.....	92
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็งที่ได้จากการ แตกโมเลกุลของน้ำมันน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที และความดันแก๊สของไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ .....	94
ภาคผนวก ค. การวิเคราะห์เชิงสถิติและตัวอย่างการคำนวณ .....	96
ภาคผนวก ง. การวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์.....	101
ภาคผนวก จ. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Surface area and porosimetry analyzer .....	104
ภาคผนวก ฉ. การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการแตกโมเลกุลของ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว.....	107
ภาคผนวก ช. ตัวอย่างการคำนวณการลงทุนในอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า .....	108
ภาคผนวก ซ. การคำนวณอัตราการใช้พลังงาน (Space time) เพื่อหาระยะเวลาการทำ ปฏิกิริยาที่เหมาะสม .....	109
ประวัติผู้เขียน.....	110

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งกลุ่มน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานตามดัชนีความหนืดโดยมาตรฐานของสถาบันปิโตรเลียมอเมริกัน .....	16
2.2 การแบ่งน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ตามมาตรฐานวิศวกรรมยานยนต์ .....	17
2.3 การแบ่งน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ตามมาตรฐานของสถาบันปิโตรเลียมอเมริกัน .....	18
2.4 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างๆ .....	24
2.5 ประเภทปฏิกิริยาและปฏิกิริยาทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี .....	31
2.6 เปรียบเทียบสมบัติของการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนและการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา .....	34
3.1 การกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวปิโตรเลียมตามคาบจุดเดือดตามมาตรฐาน ASTM D2887 .....	45
3.2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ .....	49
3.3 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง .....	52
4.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการแตกโมเลกุล .....	54
4.2 ค่าความเป็นกรด – เบส ของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน น้ำมันหล่อลื่นอุตสาหกรรมและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่ใช้ในการวิจัย .....	55
4.3 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่ และตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความร้อน .....	56
4.4 พื้นที่ผิว ขนาด และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่ และตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความร้อน .....	58
4.5 การวัดความเป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความร้อน .....	59
4.6 เปรียบเทียบการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง ..	76
4.7 ผลการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง .....	79
5.1 เปรียบเทียบสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลกับองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่เป็นดีเซลที่ได้จากการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว .....	82
ก.1 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ 4 ตัวแปร สำหรับการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว .....	92
ค.1 สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา .....	96
ง.1 วิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (Simulated distillation gas chromatograph) .....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของแก๊สธรรมชาติ .....	6
2.2 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบแบบ Complex refinery .....	7
2.3 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟิน .....	8
2.4 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทแนฟทีน .....	8
2.5 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทแอโรแมติกส์ .....	9
2.6 การกลั่นน้ำมันดิบ .....	10
2.7 กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันแร่ .....	11
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์บางชนิด .....	13
2.9 ผลของความดันต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ SAE 40 .....	14
2.10 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อระดับพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดปฏิกิริยา .....	22
2.11 การเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา .....	23
2.12 โครงสร้างทรงสี่หน้าของ $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$ .....	27
2.13 ซีโอไลต์ชนิดต่างๆ .....	28
2.14 โครงสร้างทศยภูมิของซีโอไลต์ .....	29
3.1 ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการแตกโมเลกุล .....	40
3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วก่อนการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความร้อน .....	40
3.3 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบกะปริมาตร 70 มิลลิลิตร (ข) ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและหน้าจอแสดงผลแบบดิจิทัลพร้อมและ (ค) ชุดควบคุมแกว่งของเครื่องปฏิกรณ์ .....	42
3.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร .....	43
3.5 ชุดกรองสุญญากาศ .....	44
3.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น .....	45
3.7 เครื่องวัดความเป็นกรด - เบส (pH meter) .....	46
3.8 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน Surface area and porosimetry analyzer .....	46
3.9 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometer: XRF) ..	47
3.10 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD) .....	48
4.1 กราฟวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer) .....	55
4.2 XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดวายเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่ และตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความร้อน .....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตี X อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ผลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็งที่เวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ .....	60
4.4 ผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ.....	61
4.5 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ .....	62
4.6 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ.....	63
4.7 ผลของความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก.....	64
4.8 ผลของความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก.....	65
4.9 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ.....	66
4.10 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในการทำปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ.....	67
4.11 กราฟ Residual plots แบบ Four in one ของข้อมูลร้อยละผลได้ขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลที่ได้จากการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ .....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ผลของอัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วต่อปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 60 โดยปริมาตร และแก๊สตัวพา (N <sub>2</sub> ) 50 มิลลิลิตรต่อนาที.....	69
4.13 ผลของอัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วต่อผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 60 โดยปริมาตร และแก๊สตัวพา (N <sub>2</sub> ) 50 มิลลิลิตรต่อนาที.....	70
4.14 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วต่อปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 9 มิลลิลิตรต่อนาที องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนแก๊สตัวพา (N <sub>2</sub> ) 50 มิลลิลิตรต่อนาที.....	71
4.15 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วต่อผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 9 มิลลิลิตรต่อนาที องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนแก๊สตัวพา (N <sub>2</sub> ) 50 มิลลิลิตรต่อนาที.....	72
4.16 ผลของอัตราการป้อนแก๊สตัวพา (N <sub>2</sub> ) ต่อปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 9 มิลลิลิตรต่อนาที เซลเซียส และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 60 โดยปริมาตร.....	73
4.17 ผลของอัตราการป้อนแก๊สตัวพา (N <sub>2</sub> ) ต่อปริมาณผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 9 มิลลิลิตรต่อนาที เซลเซียส และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 60 โดยปริมาตร.....	74
4.18 กราฟ Residual plots แบบ Four in one ของข้อมูลร้อยละผลได้องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลจากการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งเอพซีซีที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	75
4.19 ผลของปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง จากแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส.....	76
4.20 ผลของปริมาณของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวจากแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส.....	78
ค.1 รูปตารางของ 2 Level factorial design .....	98
ค.2 ตัวแปรและหน่วยที่ใช้ในการทดลอง.....	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ Xi อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.3 ข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง.....	99
ค.4 Half-normal probability plot ของร้อยละผลได้ดีเซลจากปฏิกิริยาแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว.....	98
ง.1 แสดงโครมาโทแกรมจากการแยกของผลิตภัณฑ์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887 .....	102
ง.2 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ น้ำมันตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887.....	102



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XII อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การพัฒนาอุตสาหกรรมในยุคไทยแลนด์ 4.0 (Thailand 4.0) ได้รับการขับเคลื่อนอย่างรวดเร็วจากภาครัฐและทุกภาคส่วนโดยมุ่งสู่การพัฒนาทางสังคมที่ยั่งยืนและการเพิ่มศักยภาพของประชากร รัฐบาลต้องจัดทำนโยบายและพัฒนาประเทศในด้านต่างๆ เพื่อให้ประชาชนมีรายได้เพิ่มขึ้นและให้ประเทศหลุดพ้นจากกลุ่มประเทศรายได้ปานกลาง (Middle income trap) และพร้อมรับการเปลี่ยนแปลงและการเติบโตที่จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนโครงสร้างของเศรษฐกิจภายในประเทศไปสู่เศรษฐกิจที่เติบโตด้วยนวัตกรรมและฐานความรู้ ทุกภาคส่วนต้องปรับปรุงและปฏิรูปกระบวนการให้เกิดการพัฒนาตามแผนที่วางไว้ ด้วยเหตุผลนี้กระทรวงพลังงานจึงทบทวนนโยบายพลังงานของประเทศให้เป็นไปตามนโยบายพลังงาน 4.0 (Energy 4.0) ที่จะสนับสนุนการก้าวไปสู่ไทยแลนด์ 4.0 โดยประเด็นสำคัญมีดังนี้ (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2560)

1. การยกระดับประสิทธิภาพของพลังงานของประเทศในปัจจุบัน
2. การนำนวัตกรรมต่างๆ ที่เหมาะสมมาช่วยลดการใช้พลังงานเพื่อลดการนำเข้าพลังงานให้สามารถพึ่งพาตนเองได้

จากนโยบายดังกล่าวทำให้เกิดการผลักดันด้านการพัฒนาและการค้นหาแหล่งพลังงานใหม่ๆ ให้เพียงพอกับการใช้ของภาคอุตสาหกรรมและประชากรที่เพิ่มขึ้น เพราะหากความเจริญและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมและจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นไม่สอดคล้องกับทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่ก็อาจทำให้เกิดปัญหาทั้งปัญหามลภาวะและการขาดแคลนแหล่งพลังงานในอนาคต ดังนั้นพลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทน (Alternative energy) ที่เป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) รวมทั้งการเพิ่มมูลค่าและการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า (Value added and maximization of resources) จึงมีความสำคัญอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ (บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2553; ศูนย์ข่าวพลังงาน. 2560)

น้ำมันหล่อลื่นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ใช้ในการหล่อลื่นเครื่องจักรอุตสาหกรรมและเครื่องยนต์ทุกประเภท จากรายงานของสำนักงานคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง พบว่าประเทศไทยมีการใช้น้ำมันหล่อลื่นประมาณ 343 ล้านลิตรต่อปี และมีอัตราการขยายตัวร้อยละ 1.5 (สำนักงานคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง. 2557) ปัญหาของน้ำมันหล่อลื่นของประเทศไทย ได้แก่ การผลิตน้ำมันหล่อลื่นปลอม และน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานจนขาดคุณสมบัติที่สำคัญต่อการใช้งานมักถูกกำจัดอย่างไม่ถูกวิธี เช่น การลักลอบทิ้งลงดิน น้ำมันหล่อลื่นจะซึมผ่านและเกิดการปนเปื้อนในชั้นน้ำใต้ดิน หรือแทรกตัวสะสมอยู่ในช่องว่างในดิน ทำให้ดินบริเวณนั้นไม่สามารถนำมาใช้ทำการเพาะปลูกได้ การลักลอบทิ้งก่อให้เกิดปัญหามลภาวะซึ่งยากแก่การแก้ไข (กรมควบคุมมลพิษ. 2560)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานโดยใช้สารละลาย มีค่าใช้จ่ายสูงและไม่ได้เกิดมูลค่าเพิ่ม ในประเทศไทยน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการบำบัดไม่เหมาะแก่การนำกลับไปผลิตน้ำมันหล่อลื่นเพื่อใช้ใหม่ แต่เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นมีโครงสร้างเป็นสารไฮโดรคาร์บอนและองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับน้ำมันเชื้อเพลิง จึงสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในเตาเผาสำหรับอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ หรือนำไปผสมกับน้ำมันดิบในกระบวนการกลั่นของโรงกลั่นน้ำมัน วิธีดังกล่าวเป็นการสร้างมูลค่าและเป็นการจัดการของเสียของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ดีกว่าวิธีอื่นๆ ในระดับหนึ่ง เพราะช่วยลดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้

การศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมีอยู่พอสมควร ซึ่งอาจเป็นการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนหรือด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาหรือทั้งการใช้ความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ ประกอบด้วยเนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์เบา และโมเลกุลขนาดใหญ่อีกมากกว่าร้อยละ 30 (Merai, Y.P. 2015) อุณหภูมิการแตกโมเลกุลและเวลาการทำปฏิกิริยาเป็นตัวแปรที่สำคัญ หากอุณหภูมิสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส พบว่าการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่จะเกิดแก๊สมากกว่าของเหลว และองค์ประกอบของเนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์เบาในผลิตภัณฑ์ของเหลวจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด (Permsubscul, A. et al. 2006; พีรพจน์ เพทายพนากิจ และคณะ. 2556)

งานวิจัยนี้เป็นการเพิ่มมูลค่าน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดยนำมาแตกโมเลกุลด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 390 - 430 องศาเซลเซียส เวลา 30 - 60 นาที ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 - 5 บาร์เกจ และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ร้อยละ 1 - 5 โดยน้ำหนัก โดยมีเป้าหมายคือได้ปริมาณดีเซลในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการแตกโมเลกุลสูงที่สุด จากนั้นใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมศึกษาต่อในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ด้วยปริมาณน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่างกัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

1.2.2 ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ และศึกษาผลของปริมาณน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว และอัตราการป้อนแก๊สตัวพา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาองค์ประกอบและสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

1.3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความร้อนโดยการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมง

1.3.3 ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ขนาด 70 มิลลิลิตร ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่

- อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390, 410 และ 430 องศาเซลเซียส
- เวลาการทำปฏิกิริยา 30, 45 และ 60 นาที
- ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1, 3 และ 5 บาร์เกจ
- อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก

1.3.4 วิเคราะห์และคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักของแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง

1.3.5 วิเคราะห์และคำนวณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ คือ แนฟทา เคโรซีน ดีเซล และกาน้ำมันหนัก ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามคาบจุดเดือด (Simulated Distillation Gas Chromatograph) ตามมาตรฐาน ASTM D2887

1.3.6 ใช้ข้อมูลภูมิการทำปฏิกิริยาจากการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่ได้ปริมาณดีเซลในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุด ศึกษาต่อในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่

- อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 3 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาที
- อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 30 และ 60 โดยปริมาตร
- อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 50 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที

1.3.7 วิเคราะห์และคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักของแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง

1.3.8 วิเคราะห์และคำนวณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ คือ แนฟทา เคโรซีน ดีเซล และกาน้ำมันหนัก ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามคาบจุดเดือดตามมาตรฐาน ASTM D2887

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 แนวทางการสร้างมูลค่าเพิ่มของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดยการแตกโมเลกุลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง

1.4.2 การสร้างมูลค่าเพิ่มของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

1.4.3 แนวทางการจัดการของเสียอย่างมีประสิทธิภาพ และให้เกิดประโยชน์สูงสุด ได้แก่ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ปิโตรเลียม (บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2553)

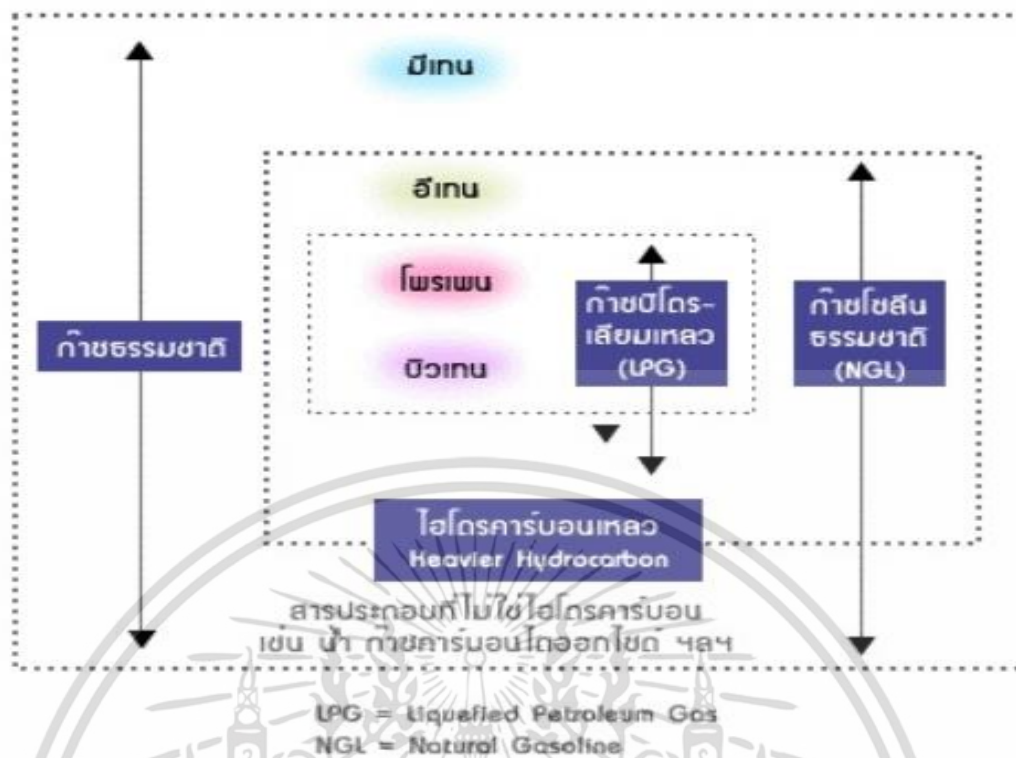
ปิโตรเลียมเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด คือ คาร์บอน และไฮโดรเจน อาจมีธาตุโลหะชนิดอื่น เช่น กำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจนปนอยู่ด้วย ปิโตรเลียมมีสภาพเป็นได้ทั้งของเหลว แก๊ส หรือของแข็ง ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของปิโตรเลียม นอกจากนี้ความร้อนและความกดดันของสภาพแวดล้อมที่ปิโตรเลียมถูกกักเก็บก็มีส่วนในการกำหนดสถานะของปิโตรเลียม ปิโตรเลียมแบ่งได้เป็นน้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติ น้ำมันดิบเป็นของเหลวที่ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดเล็กที่ระเหยง่าย ส่วนแก๊สธรรมชาติเป็นปิโตรเลียมที่อยู่ในรูปของแก๊สที่อุดมภูมิและความดันที่ผิวโลก (บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2553) เมื่อน้ำมันดิบมากลั่นจะได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม การคมนาคมขนส่ง และครัวเรือน และยังสามารถนำมาผลิตเคมีภัณฑ์ต่างๆ เช่น ปุ๋ยเคมี ยาปราบศัตรูพืช พลาสติก และยางสังเคราะห์ เป็นต้น

#### 2.1.1 แก๊สธรรมชาติ (บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2553; PTTPLC. 2555)

เป็นแก๊สที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มักพบอยู่ร่วมกับแหล่งน้ำมันดิบ เป็นแก๊สผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิมัลต์หลายชนิด ได้แก่ แก๊สมีเทน (Methane:  $\text{CH}_4$ ) ร้อยละ 70 ขึ้นไป แก๊สอีเทน (Ethane:  $\text{C}_2\text{H}_6$ ) โพรเพน (Propane:  $\text{C}_3\text{H}_8$ ) และบิวเทน (Butane:  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) นอกจากนี้ยังมีแก๊สเฉื่อยที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ฮีเลียม และความชื้น แหล่งแก๊สธรรมชาติที่พบในประเทศไทยทั้งบนบกและในทะเล (บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2553) ส่วนใหญ่แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. แก๊สชนิดแห้ง (Lean gas) ประกอบด้วยแก๊สมีเทนเกือบทั้งหมด มีแก๊สอีเทน แก๊สโพรเพน และแก๊สบิวเทนน้อยมากหรือแทบไม่มีเลย และไม่มีคอนเดนเสท
2. แก๊สชนิดเปียก (Wet gas) ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรคาร์บอนหลายชนิดผสมกัน และมีคอนเดนเสท

องค์ประกอบในแก๊สธรรมชาติที่ถูกแยกเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของแก๊สธรรมชาติ (PTTPLC. 2555)

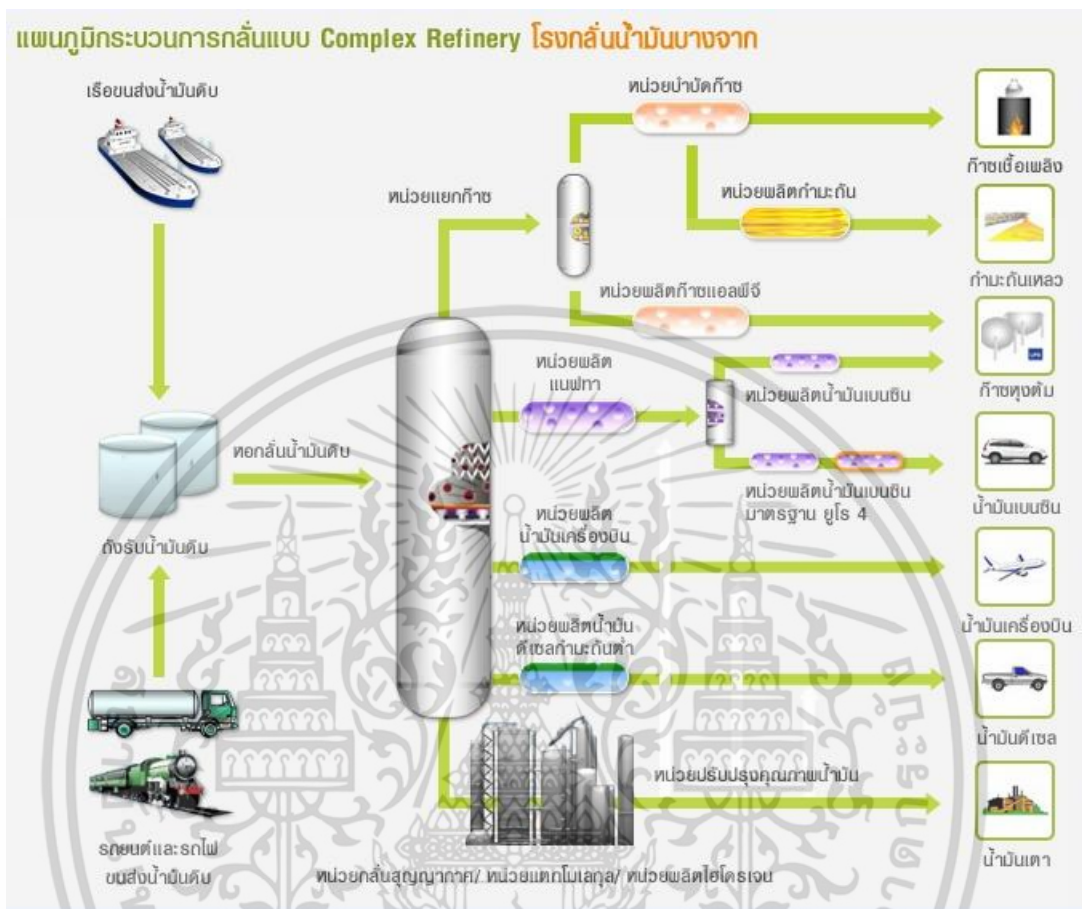
### 2.1.2 น้ำมันดิบ (ธุรกิจบางจาก. 2560; Jame, G.S. 2006; บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน).2553; WIKIMEDIA COMMONS. 2014)

น้ำมันดิบเป็นของผสมไฮโดรคาร์บอนที่มีองค์ประกอบซับซ้อน ประมาณร้อยละ 97 เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (Saturated aliphatic hydrocarbons) มีทั้งที่เป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่สุดไปจนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ แบ่งได้เป็น 4 ประเภท ตามปริมาณไข (Wax) และแอสฟัลต์ (Asphalt) ในน้ำมันดิบ ได้แก่ พาราฟินเบา พาราฟิน แนฟทีน และแอโรแมติกส์ นอกจากนี้ยังมีสารอินทรีย์ที่มีกำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจน เป็นองค์ประกอบ น้ำมันดิบอาจมีแก๊สธรรมชาติละลายอยู่ และอาจมีสารประกอบกำมะถัน สารประกอบของโลหะวาเนเดียม นิกเกิล โครเมียม เจือปนอยู่บ้าง น้ำมันดิบแต่ละแหล่งมีลักษณะและสมบัติแตกต่างกันออกไป เช่น สี ความหนืด และความหนาแน่น ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทต่างๆ ที่ผสมอยู่ น้ำมันดิบอาจมีความหนืดตั้งแต่ระดับเดียวกันกับน้ำจนถึงความหนืดระดับขมอย ส่วนความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.79 - 0.95 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2553) คุณภาพของน้ำมันดิบจึงแตกต่างกัน น้ำมันดิบที่มีความหนาแน่นต่ำ หรือที่เรียกว่า น้ำมันเบา (Light crude oil) มีราคาสูง เพราะกลั่นได้ง่ายและมีต้นทุนการกลั่นต่ำ ในทางตรงกันข้าม น้ำมันดิบที่หนืดข้น และมีความหนาแน่นสูง หรือที่เรียกว่า น้ำมันหนัก (Heavy crude oil) กลั่นยาก และมีต้นทุนการกลั่นสูงจึงมีราคาถูก ปัจจุบันการเพิ่มมูลค่าของน้ำมันดิบชนิดน้ำมันหนักทำได้

โดยใช้กระบวนการกลั่นแบบหลายขั้นตอน (Complex refinery) (ธุรกิจบางจาก. 2560) ดังรูปที่ 2.2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ทางปัญญาของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีหน่วยแตกตัวโมเลกุลน้ำมัน (Cracking unit) สามารถเปลี่ยนน้ำมันชนิดหนักเป็นน้ำมันชนิดเบาที่มีมูลค่าสูงกว่า



รูปที่ 2.2 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบแบบ Complex refinery (ธุรกิจบางจาก 2560)

น้ำมันดิบแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามสมบัติและชนิดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบอยู่ ได้แก่

- น้ำมันดิบพื้นฐานพาราฟินหรือน้ำมันดิบชนิดที่มีไขมาก (Paraffinic base crudes) มีปริมาณพาราฟินประเภทสายตรงมาก น้ำมันเบนซินที่ได้จะมีค่าออกเทนต่ำ ส่วนน้ำมันก๊าดที่ได้จะมีคุณภาพสูง ไม่มีไขมาก น้ำมันดีเซลที่ได้จะมีค่าซีเทนสูงเหมาะสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลความเร็วรอบสูง น้ำมันหล่อลื่นที่ได้จะมีดัชนีความหนืด (Viscosity index: VI) สูง
- น้ำมันดิบพื้นฐานแนฟทีน หรือน้ำมันดิบชนิดที่มีปริมาณยางมะตอยหรือแนฟทีนสูง (Asphaltic/Naphthenic base crudes) มีสารประกอบของกำมะถันสูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดิบพื้นฐานพาราฟินและน้ำมันดิบพื้นฐานผสมซึ่งแทบจะไม่มีสารประกอบของกำมะถัน น้ำมันเบนซินที่มีแนฟทีนอยู่ด้วยจะมีค่าออกเทนสูง สำหรับน้ำมันก๊าดและน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดีเซลที่ได้จะมีคุณภาพปานกลาง ส่วนน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จะมีดัชนีความหนืดต่ำจนถึงปานกลาง กากที่ได้จากการกลั่นภายใต้สุญญากาศทำเป็นยางมะตอยได้

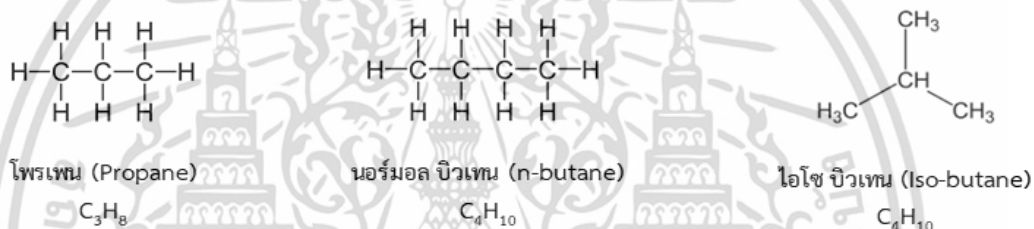
- น้ำมันดิบพื้นฐานผสม (Mixed base crudes) มีทั้งพาราฟิน แนฟทีน และแอโรแมติกส์

### 2.1.3 สมบัติของน้ำมันดิบ (บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2553; สมชาย

อัคราร์ตงพงศ์. 2554; Tony, R. 2010; WIKIMEDIA COMMONS. 2014)

น้ำมันดิบโดยทั่วไปมีสีดำหรือสีน้ำตาล มีกลิ่นคล้ายน้ำมันเชื้อเพลิงสำเร็จรูป สารประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันดิบ ได้แก่

1. พาราฟิน (Paraffins) เป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลเชื่อมต่อกันเป็นเส้นตรง สูตรเคมีทั่วไป คือ  $C_nH_{2n+2}$  เช่น โพรเพน (Propane:  $C_3H_8$ ) นอร์มอลบิวเทน ไอโซบิวเทน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟิน (WIKIMEDIA COMMONS. 2014)

2. แนฟทีน (Naphthenes) เป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นวง จึงเรียกอีกชื่อว่าไซโคลพาราฟิน (Cycloparaffins) ส่วนใหญ่ในน้ำมันดิบจะมีแนฟทีนที่เป็นวงขนาดห้าและหกเหลี่ยม ดังรูปที่ 2.4 สูตรเคมีทั่วไป คือ  $C_nH_{2n}$  เช่น ไซโคลเพนเทน (Cyclopentane:  $C_5H_{10}$ ) ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane:  $C_6H_{12}$ )



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทแนฟทีน (LPG Production Storage and Transportation. 2016)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แอโรแมติกส์ (Aromatics) เป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวหรือไม่เสถียร มีคาร์บอน 6 อะตอม ยึดต่อกันเป็นวงแหวนด้วยพันธะคู่และพันธะเดี่ยวสลับกัน อาจมีหนึ่งวงแหวนหรือมากกว่าก็ได้ ดังรูปที่ 2.5 สูตรเคมีทั่วไป คือ  $C_nH_{2n-6}$  แอโรแมติกส์ที่มีวงแหวนเดียว ได้แก่ เบนซีน (Benzene:  $C_6H_6$ ) โทลูอิน (Toluene:  $C_7H_8$ ) เป็นต้น มักพบในน้ำมันเบนซินรถยนต์ แอโรแมติกส์ที่มี 2 วง ได้แก่ แนฟทาลีน (Naphthalene) มักพบในน้ำมันก๊าดและน้ำมันดีเซล แอโรแมติกส์ที่มีหลายวงแหวนติดกัน (Polynuclear aromatics) จะพบในส่วนกลั่นหนัก (สมชาย อัครารัตนพงศ์. 2554) เป็นส่วนสำคัญของแอสฟัลทีน (Asphaltenes) ในกากน้ำมันและในยางมะตอย



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทแอโรแมติกส์ (WIKIMEDIA COMMONS. 2014)

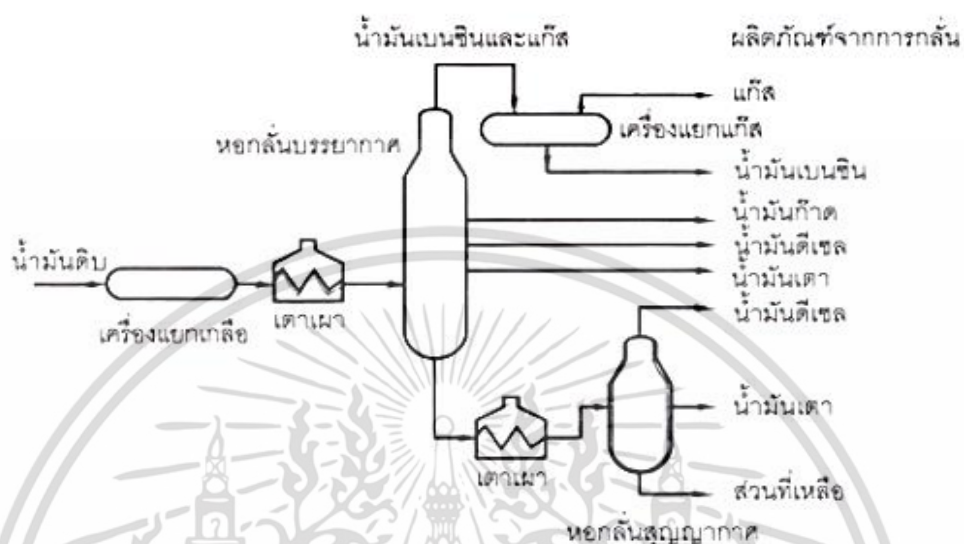
2.2 น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป (กรมควบคุมมลพิษ. 2560; ปราโมทย์ ไชยเวช. 2552; รอบรู้เรื่องเครื่องยนต์. 2554; สำนักงานคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง. 2557; Joan E.D. 2004; Lenick, O. et al. 1989; SK LUBRICANTS CO., LTD. 2013; Tony, R. 2010; Jame, G.S. 2006)

น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป (Lube oils หรือ Lubricating oils) ผลิตจากการผสมน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base oils) กับสารเพิ่มคุณภาพ (Additives) ในปริมาณต่างๆ (Lenick, O. et al. 1989; Tony, R. 2010) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีความสำคัญต่อคุณภาพและหน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น เช่น ทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดหรือความข้นใสที่ต้องการ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมี 3 ชนิด ได้แก่

1. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ (Vegetable or Animal oils) เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากการกลั่นไขมันพืชหรือไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันละหุ่ง น้ำมันปาล์ม น้ำมันหมู น้ำมันปลา น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ที่ได้จากธรรมชาติมีความคงตัวทางเคมีต่ำและเสื่อมสภาพได้ง่าย จึงต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ส่งผลให้ราคาของน้ำมันกลุ่มนี้สูง แต่ในปัจจุบันราคาของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มาจากน้ำมันปาล์มมีราคาถูกลง เนื่องจากมีผลผลิตทางการเกษตรสูงขึ้น และนอกจากนี้ น้ำมันปาล์มหรือน้ำมันจากพืชสามารถสลายตัวได้ตามธรรมชาติและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม สะดวกต่อการบำบัด น้ำมันปาล์มเมื่อผ่านกระบวนการทางเคมีจะมีความหนืดช่วงกว้างมากกว่าน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันแร่ ทำให้สามารถนำมาใช้งานได้กว้างขวางกว่าน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันแร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันแร่ (Mineral oils) เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากส่วนหนืดของการกลั่นน้ำมันดิบที่เหลือจากการกลั่นแยกส่วนเบาออกโดยหอกลั่นบรรยากาศ (Atmospheric distillation column) (รอบรู้เรื่องเครื่องยนต์. 2554) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การกลั่นน้ำมันดิบ (รอบรู้เรื่องเครื่องยนต์. 2554)

รูปที่ 2.7 แสดงกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นจากน้ำมันดิบ เริ่มจากการนำส่วนที่ออกจากส่วนล่างของหอกลั่นบรรยากาศไปกลั่นในหอกลั่นสุญญากาศ (Vacuum distillation column) เพื่อไม่ให้เกิดการแตกตัวที่อุณหภูมิสูง สมบัติสำคัญที่ถูกควบคุมโดยการกลั่นสุญญากาศ คือ ความหนืด จุดวาบไฟ (Flash point) และกากคาร์บอน (Carbon residues) ส่วนที่ได้จากการกลั่นสุญญากาศมีความหนืดต่างกัน จะผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อแยกส่วนที่ไม่ต้องการออก ให้เหลือผลิตภัณฑ์หรือน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสมบัติตามต้องการ (Jame, G.S. 2006) ตัวอย่างของกระบวนการ ได้แก่

กระบวนการแยกยางมะตอยออกด้วยสารละลายโพรเพน (Propane de-asphalting)

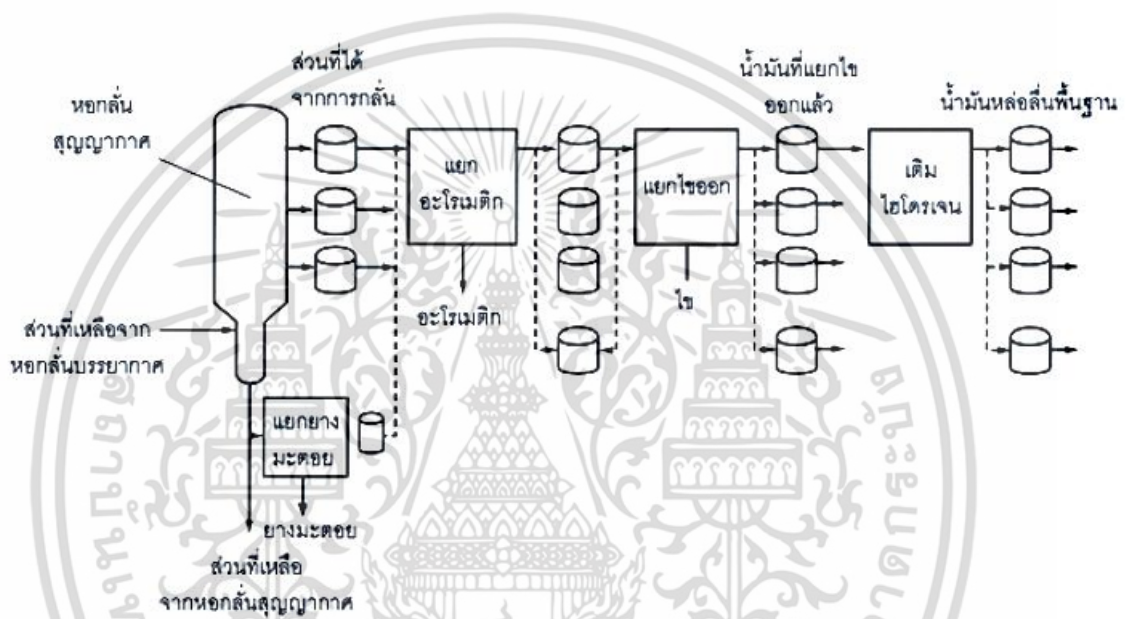
กระบวนการแยกสารประกอบอะโรแมติกส์ (Aromatic compounds) ออกจากสารประกอบที่ไม่ใช่อะโรแมติกส์ (Non-aromatic compounds) ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ได้แก่ การเพิ่มดัชนีความหนืด การเพิ่มเสถียรภาพด้านความร้อนและการรวมตัวกับออกซิเจน หากน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จะเสื่อมสภาพเร็วเนื่องจากเกิดยางเหนียว (Gum)

กระบวนการแยกไข (Dewaxing) เพื่อลดจุดไหลเท และสามารถใช้งานน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานได้ที่อุณหภูมิต่ำ

กระบวนการเติมไฮโดรเจน (Hydro - finishing หรือ Hydrotreating) เพื่อทำให้น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานบริสุทธิ์ขึ้นโดยการกำจัดกรด สารประกอบของไฮโดรเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของสารที่ไม่เสถียร ทำให้น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานคงตัว และเพื่อเอกละอองเป็นเอกละอองที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของสารที่ทำให้สีของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจาง น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จึงมีสีสวย กระบวนการนี้หากใช้น้ำมันดิบที่มีพาราฟิน (Paraffinic oils) จะเรียกกระบวนการ Hydro - finishing หากใช้น้ำมันดิบที่มีแนฟทีน (Naphthenic oils) จะเรียกกระบวนการ Hydrofining หรือ Hydrotreating (ปราโมทย์ ไซยเวช. 2552; SK LUBRICANTS Co., Ltd. 2013)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันแร่ที่ได้ยังเป็นของผสมของสารประกอบหลายตัว และมีสมบัติเฉลี่ยของของผสม จึงไม่สามารถเลือกเฉพาะสารที่มีสมบัติที่ดีที่สุดได้ หรือถ้าเลือกได้จะได้ผลผลิตต่ำ ซึ่งทำให้การผลิตไม่คุ้มค่า น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันแร่จึงมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน จึงมีการพัฒนาน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากการสังเคราะห์ (สำนักงานคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง. 2557)



รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันแร่ (รอปูรู้เรื่องเครื่องยนต์. 2554)

3. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากการสังเคราะห์ (Synthetic base oil) ได้จากการนำกลุ่มของพอลิเมอร์หรือสารสังเคราะห์ประเภทปิโตรเคมี มาผ่านกระบวนการทางเคมีและเติมสารเติมแต่ง เพื่อควบคุมโครงสร้าง ขนาดของโมเลกุล และความหนืดให้เหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารหล่อลื่น ข้อดีของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากการสังเคราะห์เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันแร่ คือ สามารถนำไปใช้ได้ในช่วงกว้างกว่าน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันแร่ คือ สามารถใช้ได้ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและสูง นอกจากนี้ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากการสังเคราะห์บางประเภทยังให้สมบัติเฉพาะ เช่น สามารถผสมเข้ากับน้ำได้ ไม่ติดไฟ เป็นต้น สารที่มีบทบาทสำคัญเป็นพวกพอลิอัลฟาโอเลฟินส์ (Polyalphaolefins: PAO) ซึ่งสามารถใช้ได้กับงานเฉพาะอย่างและราคาไม่สูงมาก

แม้ว่าน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากการสังเคราะห์ จะมีสมบัติโดยทั่วไปดีกว่าน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันแร่ แต่สำหรับการนำไปใช้งานบางประเภท น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากการสังเคราะห์ อาจจะยังไม่มีสมบัติที่เหมาะสมทุกด้าน เช่น การป้องกันการกัดกร่อน การรับแรงกด เป็นต้น จึงต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับปรุงคุณภาพโดยสารเติมแต่งทั้งในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากการสังเคราะห์และน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันแร่เพื่อให้มีสมบัติตามต้องการ

### 2.2.1 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น (ปราโมทย์ ไชยเวช. 2552; Awad, A.N., Shahad S.M. 2014; Valvoline Technical Services. 2016)

การใช้น้ำมันหล่อลื่นช่วยลดความฝืดจากแรงเสียดทานที่เกิดระหว่างผิวสัมผัสเนื่องจากหน้าผิวสัมผัสมีความขรุขระ และช่วยลดความสึกหรอของเครื่องจักรด้วยการเคลือบบนผิวสัมผัสเพื่อทำหน้าที่เป็นซีลรับแรงดันแทนชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่ไม่ต้องรับแรงเฉือนหรือแรงกดโดยตรง นอกจากนี้เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นมีสมบัติในการไหล จึงเป็นตัวกลางพาความร้อนที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ร้อนจัด (Hot spots) หรือตำแหน่งที่มีการสัมผัสระหว่างผิวของเครื่องจักรไปยังส่วนอื่น จึงลดการสะสมความร้อน และป้องกันความเสียหายของเครื่องจักรจากความร้อนที่สูงเกินไป (Overheating) (Valvoline Technical Services. 2016; ปราโมทย์ ไชยเวช. 2552; Awad, A.N., Shahad S.M., 2014) หากมีสิ่งปนเปื้อนหรือเศษโลหะที่เกิดจากการสึกหรอที่บริเวณที่น้ำมันหล่อลื่นไหลผ่าน น้ำมันหล่อลื่นจะพาสิ่งปนเปื้อนและเศษโลหะที่เกิดจากการขัดสีออกมาเพื่อลดโอกาสการสึกหรอหรืออุดตันในระบบที่แรงดันภายในคงที่ และยังช่วยป้องกันสิ่งปนเปื้อนจากภายนอกเข้าไปทำให้เกิดความเสียหาย สำหรับเครื่องจักรที่ไม่ได้ยึดติดกันสมบูรณ์ อากาศภายนอกจะเข้ามาและส่งผลกระทบต่อควบคุมแรงดัน โดยปกติน้ำมันหล่อลื่นจะแยกตัวออกจากน้ำและเคลือบอยู่บนผิวของโลหะจึงช่วยลดความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมบนชิ้นส่วนของเครื่องจักร หรือการสึกหรอที่เกิดจากสารที่เป็นกรดได้ นอกจากนี้ในเครื่องยนต์ที่การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จะเกิดคราบเขม่า ซึ่งหากเกิดการรวมตัวและสะสมในปริมาณมากจะเป็นคราบหรือของแข็งติดบนชิ้นส่วนของเครื่องจักรและขัดขวางการทำงาน จะก่อให้เกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจึงมีการเติมสารชะล้างและกระจายคราบเขม่า (Anti-dispersants) ในน้ำมันหล่อลื่นเพื่อป้องกันการสะสมของคราบเขม่าในเครื่องจักรและช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องจักรได้

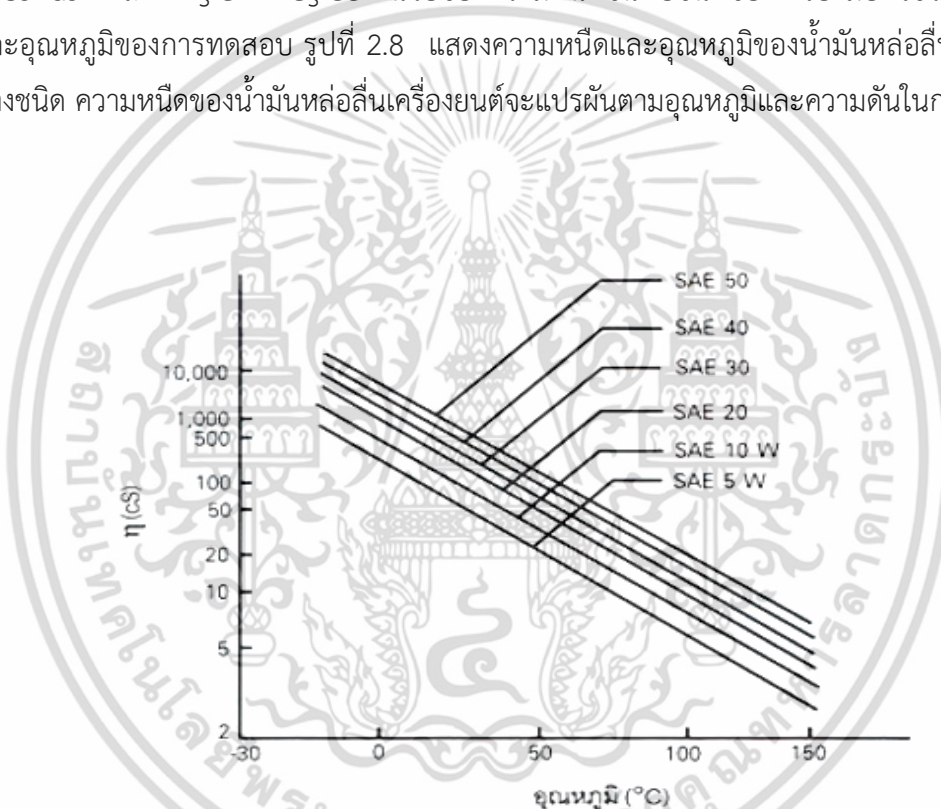
### 2.2.2 สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (รอบรู้เรื่องเครื่องยนต์. 2554; Awad, A.N., Shahad, S.M. 2014; Machinery Lubrication. 2012)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ที่ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นอุตสาหกรรมและน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์มีหลายชนิด แต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกใช้ต้องรู้สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานแต่ละชนิดนั้น สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีดังนี้ (รอบรู้เรื่องเครื่องยนต์. 2554)

1. ความหนืด เป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญที่สุดที่จะพิจารณาเป็นอย่างแรกในการเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานให้เหมาะกับงาน น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีความหนืดต่ำจะให้ฟิล์มหล่อลื่นที่บางทำให้รับแรงกดได้ต่ำ แต่สามารถแทรกตัวไปตามส่วนต่างๆ ที่ต้องการหล่อลื่นได้อย่างรวดเร็วและระบายความร้อนได้ดี ส่วนน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีความหนืดสูงจะให้ฟิล์มหล่อลื่นที่หนาจึงสามารถ
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

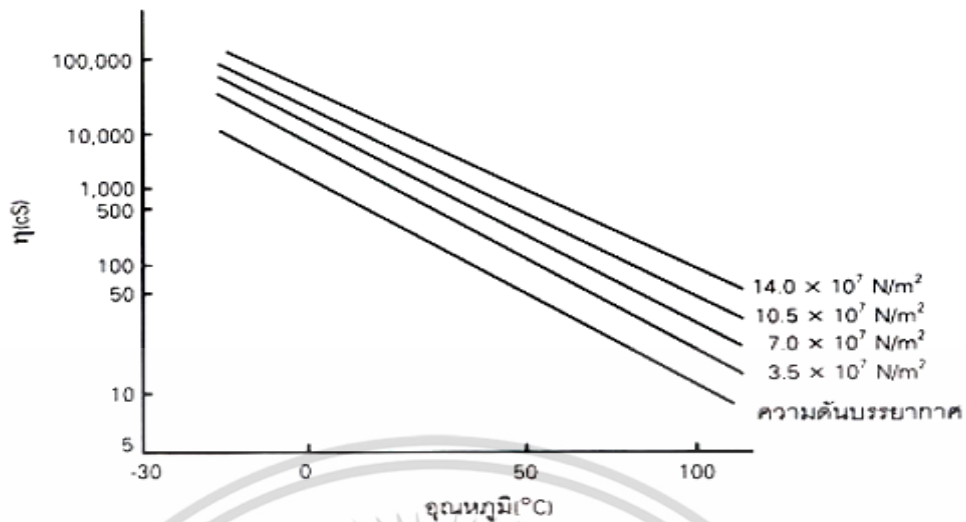
รับแรงกดได้สูง แต่จะเสียพลังงานในการระบายความร้อนออกจากฟิล์มน้ำมันได้ช้า ความหนืดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute viscosity) หรือความหนืดเชิงพลศาสตร์ (Dynamic viscosity) ของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานค่อนข้างกว้างคือ 2 - 400 cP การกำหนดค่าความหนืดอีกรูปแบบหนึ่งคือ ความหนืดเชิงจลนศาสตร์ (Kinematic viscosity) โดยความหนืดเชิงจลนศาสตร์เท่ากับความหนืดเชิงพลศาสตร์หารด้วยความหนาแน่นของน้ำมันหรือของไหลนั้นๆ หน่วยของความหนืดเชิงจลนศาสตร์ที่นิยมคือ Stoke (St) ( $1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$ ) หน่วยของความหนืดอื่นๆ ได้แก่ Saybolt Universal Seconds (SUS), Saybolt Furlo Seconds (SFS), Redwood Seconds และ Engler Degree หน่วยของความหนืดขึ้นกับชนิดของเครื่องมือที่ใช้วัดความหนืดและอุณหภูมิของการทดสอบ รูปที่ 2.8 แสดงความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์บางชนิด ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์จะแปรผันตามอุณหภูมิและความดันในการใช้งาน



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์บางชนิด (รอบรู้เรื่องเครื่องยนต์. 2554)

สำหรับผลของความดันต่อความหนืดจะเห็นได้ชัดเมื่อความดันสูงขึ้น เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์จะเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.9 แสดงผลของความดันต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ SAE 40



รูปที่ 2.9 ผลของความดันต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ SAE 40 (รอบรู้เรื่องเครื่องยนต์. 2554)

2. ดัชนีความหนืด เป็นค่าที่แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดเชิงจลนศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีค่าดัชนีความหนืดสูง ค่าความหนืดจะเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีค่าดัชนีความหนืดต่ำ (Machinery Lubrication. 2012) ดัชนีความหนืดมีความสำคัญในการบ่งชี้ประสิทธิภาพการหล่อลื่น โดยเฉพาะการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นในบริเวณที่ภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงมากระปรกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟิน มีดัชนีความหนืดสูงกว่าประเภทแอมัลกัส

3. ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1298

4. กากคาร์บอน (Carbon residues) คือ ปริมาณสารคาร์บอนที่คงเหลือหลังจากน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานระเหยออกหมด ปริมาณกากคาร์บอนคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักภายหลังการเผาไหม้น้ำมันหล่อลื่นในภาวะที่กำหนด น้ำมันหล่อลื่นที่มีปริมาณกากคาร์บอนสูงมีแนวโน้มในการเกิดควันและคราบเขม่าคาร์บอนเกาะสะสมในห้องเผาไหม้ บริเวณร่องแหวนลูกสูบ และหัวฉีด ปริมาณกากคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นจะไม่ค่อยมีผลต่อการใช้งานมากเท่ากับปริมาณกากคาร์บอนในน้ำมันเชื้อเพลิงเนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นไม่ได้เกิดการเผาไหม้โดยตรง

5. สี น้ำมันหล่อลื่นมีสีตั้งแต่ใสมาก เหลือง แดง น้ำตาล จนถึงดำ ความแตกต่างของสีของน้ำมันหล่อลื่นเป็นผลมาจากชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่น รวมทั้งวิธีการกลั่นและวิธีการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ชนิดและปริมาณของสารเพิ่มคุณภาพ สีของน้ำมันหล่อลื่นไม่มีความสำคัญนักต่อการใช้งาน

6. จุดวาบไฟ (Flash point) และจุดติดไฟ (Fire point) ของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานอยู่ในช่วง 160 – 320 องศาเซลเซียส ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าว น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานสามารถระเหยเป็นไอ และหาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมผัสเปลวไฟจะลุกไหม้ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะลุกไหม้อย่างต่อเนื่อง จุดวาบไฟของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานแปรผันกับความหนืด น้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดสูง จะมีจุดวาบไฟสูง

7. จุดไหลเท (Pour point) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีปริมาณไขละลายอยู่สูง เมื่ออุณหภูมิลดลง ไขจะตกผลึกและเกาะกันเป็นโครงสร้าง ส่งผลต่อความหนืดหรือความต้านทานการไหลของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน จนอาจไม่สามารถไหลได้

8. ตัวเลขความเป็นกลาง (Neutralization number) โดยทั่วไปน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจะมีสภาพความเป็นกรดเล็กน้อย ซึ่งวัดจากปริมาณของเบสมาตรฐานที่ใช้ในการทำให้ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีสภาพเป็นกลาง โดยวัดในรูปของจำนวนเบสทั้งหมด (Total base number) หากน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีความเป็นกรดสูง จะกัดกร่อนชิ้นส่วนโลหะทำให้เกิดความเสียหายได้

9. ปริมาณกำมะถัน (Sulfur contents) ที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน เมื่อเกิดการสันดาปจะได้ออกไซด์ของกำมะถัน คือ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) และแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) จึงมีกลิ่นเหม็น และสามารถกัดกร่อนโลหะได้ การทดสอบปริมาณกำมะถันใช้มาตรฐาน ASTM D226

10. ความร้อนของการเผาไหม้ (Heat of combustion) ของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D240

11. ปริมาณเถ้า (Ash) ที่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D482

12. ความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจน สมบัติความเป็นกรดและความหนืดจะเปลี่ยนแปลง ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ดีควรมีความต้านทานในการรวมตัวหรือความต้านทานต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนสูง

### 2.2.3 มาตรฐานน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง, 2554)

การทดสอบคุณภาพหลักของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน เช่น ความหนืด การเผาไหม้ จะทำการทดสอบกับเครื่องยนต์มาตรฐาน แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่ระบุในมาตรฐานต่างๆ ได้แก่ มาตรฐานน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและมาตรฐานน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ มาตรฐานของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ระบุระดับคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่น แบ่งได้ดังนี้

การแบ่งประเภทของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานตามค่าดัชนีความหนืด (Viscosity index: VI) ตามมาตรฐานของสถาบันปิโตรเลียมอเมริกัน (American Petroleum Institute: API) แบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งกลุ่มน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานตามดัชนีความหนืดโดยมาตรฐานของสถาบันปิโตรเลียมอเมริกัน (สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง. 2554)

กลุ่ม	ปริมาณกำมะถัน (wt%)	ความอิมัตว (wt%)	ดัชนีความหนืด (VI)
I	> 0.03	< 90	$80 \leq VI < 120$
II	$\leq 0.03$	$\geq 90$	$80 \leq VI < 120$
III	$\leq 0.03$	$\geq 90$	$\geq 120$
IV	All polyalphaolefins: PAO		
V	Other base oils		

1. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานกลุ่ม I มีปริมาณกำมะถันมากกว่าร้อยละ 0.03 โดยน้ำหนัก ค่าความอิมัตวน้อยกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก และมีค่าดัชนีความหนืดที่ 80 - ต่ำกว่า 120 โดยระบุชื่อตามความหนืด น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานความหนืด 23 - 27 cst เรียกว่า 150SN ใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตทุกประเภท น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานความหนืด 28 - 32 cst เรียกว่า 500SN ใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำหรับรถยนต์เกือบทุกประเภท และน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานความหนืดสูงกว่า 32 cst เรียกว่า 150BS ใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรมหนักและเครื่องจักรที่มีแรงเสียดทานสูง เช่น อุตสาหกรรมการสังเคราะห์ยาง เครื่องยนต์ของรถบรรทุก เครื่องจักรรถไฟ เครื่องยนต์เรือเดินทะเล น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานกลุ่ม I นิยมนำไปใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานตามมาตรฐานของสมาคมวิศวกรรมยานยนต์

2. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานกลุ่ม II ผลิตโดยกระบวนการไฮโดรแครกกิง มีสมบัติป้องกันการเกิดออกซิเดชันที่ดีกว่ากลุ่ม I เนื่องจากโมเลกุลส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนอิมัตวเกือบทั้งหมด มีปริมาณกำมะถันน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 0.03 โดยน้ำหนัก ค่าความอิมัตวสูงกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก และมีค่าดัชนีความหนืดที่ 80 - ต่ำกว่า 120 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานกลุ่ม II มีสีใสคล้ายน้ำ

3. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานกลุ่ม III มีปริมาณกำมะถันน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 0.03 โดยน้ำหนัก ค่าความอิมัตวสูงกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก และมีค่าดัชนีความหนืดมากกว่า 120 จึงเหมาะที่จะนำไปผลิตน้ำมันหล่อลื่นเกรดสูงสำหรับเครื่องยนต์ หรือน้ำมันสำหรับเครื่องจักรอุตสาหกรรมที่ต้องการเสถียรภาพด้านความหนืด

4. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานกลุ่ม IV เป็นน้ำมันสังเคราะห์จากสารพอลิอัลฟาโอเลฟินส์ (Polyalphaolefins: PAO) ซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ที่ผลิตจากมอนอเมอร์ประเภทโอเลฟินส์หรืออัลคีน และนำมาผ่านกระบวนการทางเคมีให้ได้น้ำมันหล่อลื่นที่มีโครงสร้างเป็นระเบียบ เพื่อสมบัติในการหล่อลื่นที่สูง ทนต่อสภาวะความเป็นกรดได้ดี มีความคงตัวสูง ไม่แตกตัวง่ายในสภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิสูง หรือมีสภาวะความเป็นกรด หรือความชื้นสูง แต่ข้อเสียคือเข้ากับสารเคมีหรือสารเติมแต่งยาก และไม่เกาะบนผิวโลหะเมื่ออุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานกลุ่ม V ได้จากสารประเภทเอสเทอร์ ที่พบมากในปัจจุบัน เช่น ฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate ester) มีสมบัติทนความร้อนสูง การเกาะผิวโลหะได้ดี เนื่องจากโมเลกุลเล็กจึงแทรกไปยังส่วนต่างๆ ข้อจำกัดของสารประเภทเอสเทอร์คือจะทำปฏิกิริยากับน้ำที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นสภาวะการปฏิบัติงานของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานกลุ่ม V ควรปราศจากน้ำ

การแบ่งประเภทของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ตามค่าความหนืดตามมาตรฐานของสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ (Society of Automotive Engineering: SAE) แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การแบ่งน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ตามมาตรฐานวิศวกรรมยานยนต์ (ปราโมทย์ ไชยเวช, 2552)

	หน่วย	ความหนืด			
		อุณหภูมิ -17 องศาเซลเซียส		อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	
		ต่ำสุด	สูงสุด	ต่ำสุด	สูงสุด
10W	centipoises	1,200	< 2,400	-	-
	centistokes	1,300	2,600	-	-
	SSU	6,000	12,000	-	-
20	centistokes	-	-	5.7	9.6
	SSU	-	-	45	58

จากตารางที่ 2.2 ตัวเลขหน้าอักษร W (Winter grad: W) แสดงการวัดค่าความหนืดในเขตหนาว ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ต่ำลงมาถึงจุดเยือกแข็ง ตั้งแต่ 0 องศาเซลเซียส จนถึง -17 องศาเซลเซียส และตัวเลขเดี่ยว แสดงการวัดค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

การแบ่งน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ตามระดับสมรรถนะของน้ำมันหล่อลื่น (Performance level) ตามมาตรฐานของสถาบันปิโตรเลียมอเมริกัน (American Petroleum Institute: API) แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การแบ่งน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ตามมาตรฐานของสถาบันปิโตรเลียมอเมริกัน  
(Valvoline Technical Services. 2016)

	เครื่องยนต์ ปี พ.ศ.		เครื่องยนต์ ปี พ.ศ.
SH	เหมาะกับน้ำมันเบนซินสำหรับเครื่องยนต์เบนซินที่ผลิตในปี พ.ศ. 2537 - 2539	CG - 4	เหมาะกับน้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันต่ำสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลความเร็วรอบสูงที่ใช้งานหนัก และผลิตหลังปี พ.ศ. 2537
SJ	เหมาะกับน้ำมันเบนซินสำหรับเครื่องยนต์เบนซินที่ผลิตในปี พ.ศ. 2540 - 2544	CH - 4	เหมาะกับน้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันต่ำ (ต่ำกว่าร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก) สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลความเร็วรอบสูงที่ใช้งานหนัก และผลิตหลังปี พ.ศ. 2541
SL	เหมาะกับน้ำมันเบนซินสำหรับเครื่องยนต์เบนซินคุณภาพสูงรุ่นใหม่ และผลิตหลังปี พ.ศ. 2544	CI - 4	สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลคุณภาพสูงรุ่นใหม่ที่ผ่านมาตรฐานมลพิษ และผลิตหลังปี พ.ศ. 2545

สัญลักษณ์ S (Service station classifications) สำหรับเครื่องยนต์เบนซิน

C (Commercial service compression ignition) สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล

2.2.4 น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป (บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน). 2559; ประชาสัมพันธ์ แต่กติก. 2547; ระบุเรื่องเครื่องยนต์. 2554; PC Lube. 2010)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อผ่านกระบวนการเติม 2.2.5 สารเติมแต่งหรือสารเพิ่มคุณภาพ จะได้น้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป ซึ่งสามารถแบ่งตามการใช้งานเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. น้ำมันหล่อลื่นอุตสาหกรรม (Industrial lubricating oils) ได้แก่
  - น้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic oils)
  - น้ำมันเกียร์อุตสาหกรรม (Industrial gear oils)
  - น้ำมันเครื่องมือลม (Air tool oils)
  - น้ำมันเครื่องอัดลม (Compressor oils)
  - น้ำมันเครื่องทำความเย็น (Refrigerating oils)
  - น้ำมันเทอร์ไบน์ (Turbine oils)
  - น้ำมันถ่ายเทความร้อน (Heat transfer oils)
  - น้ำมันอุตสาหกรรมอื่น ๆ
2. น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Automotive lubricating oils) ได้แก่
  - น้ำมันเครื่อง (Engine oils)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- น้ำมันเกียร์ (Gear oils)
- น้ำมันเกียร์อัตโนมัติ (Automatic transmission fluid)

## 2.2.5 สารเติมแต่งหรือสารเพิ่มคุณภาพ (กรมควบคุมมลพิษ. 2560; ธุรกิจบางจาก. 2560; Lenick, O. et al. 1989; Machinery Lubrication. 2012)

สารเติมแต่งเพื่อการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน โดยทั่วไปเป็นสารประกอบทางเคมี สารเติมแต่งแต่ละชนิด เติมเพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเฉพาะด้าน แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ตามผลที่มีต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Machinery Lubrication. 2012) ได้แก่ สารเติมแต่งเพื่อสมบัติใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่ปรับปรุงสมบัติที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้น และสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่ลดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการซึ่งเกิดในช่วงการทำงาน การที่จะเติมสารเติมแต่งชนิดใดและปริมาณเท่าใดลงไปนน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะของการนำไปใช้งาน โดยต้องคำนึงถึงผลข้างเคียงที่จะเกิดขึ้นด้วย เนื่องจากสารเติมแต่งบางชนิดแม้ว่าจะทำให้สมบัติประการใดประการหนึ่งดีขึ้น แต่อาจจะทำให้สมบัติประการอื่นลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากใส่มากเกินไป หรือหากสารเติมแต่งนั้นไปทำปฏิกิริยากับสารเติมแต่งด้วยกัน จึงต้องมีปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานทำงานได้อย่างดีที่สุด และต้องมีการทดสอบให้แน่ใจว่าไม่มีผลข้างเคียงที่ไม่ต้องการเกิดขึ้น ดังนั้นในบางกรณีจึงไม่มีความจำเป็นที่ต้องเติมสารเติมแต่ง สารเติมแต่งที่นิยมใช้มีดังนี้ (ธุรกิจบางจาก. 2560)

1. สารลดจุดไหลเท (Pour point depressants) ช่วยป้องกันการเกิดไขเพื่อให้ น้ำมันไหลได้ และใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ สารลดจุดไหลเทเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูง โดยทั่วไปมี 2 ชนิด คือ อัลคิลแอโรแมติกส์พอลิเมอร์ (Alkylaromatic polymers) ทำหน้าที่ดูดกลืนผลึกของไขเมื่อเกิดขึ้น เพื่อป้องกันไม่ให้ผลึกขยายขนาดและยึดติดกัน และพอลิเมทาคริเลต (Polymethacrylates) ทำหน้าที่ตกผลึกร่วมกับไขเพื่อป้องกันไม่ให้ผลึกขยายขนาด เมื่อเติมสารลดจุดไหลเทโดยทั่วไป อุณหภูมิจุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจะลดลงประมาณ 11 ถึง 17 องศาเซลเซียส (Lenick, O. et al. 1989)

2. สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity index improvers: VII) ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืดเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงและมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาว ที่นิยมใช้ เช่น เมทาคริเลตพอลิเมอร์ (Methacrylate polymers) โอลิฟินพอลิเมอร์ (Olefin polymers) และอะคริเลตพอลิเมอร์ (Acrylate polymers) เป็นต้น สายโซ่ของพอลิเมอร์ที่เป็นสารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด จะจับตัวเป็นก้อนที่ปลายโซ่ของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสายโซ่จะคลายออก ทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงไม่มาก

3. สารป้องกันการเกิดฟอง (Defoamer) ช่วยป้องกันการเกิดฟองอากาศเมื่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานหมุนเวียนขณะใช้งานในระบบ โดยโมเลกุลของสารป้องกันการเกิดฟองจะเข้าจับกับฟองอากาศ ทำให้ฟองอากาศขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ลอยขึ้นบนผิวและ

แตกออก สารป้องกันการเกิดฟองที่นิยมใช้ คือ ซิลิโคนพอลิเมอร์ (Silicone polymers) และพอลิเมอร์อินทรีย์ (Organic polymers)

4. สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation inhibitors) ช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและออกซิเจนในอากาศ การเกิดออกซิเดชันจะทำให้ความเข้มข้นและความหนืดของกรดอินทรีย์ในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดยางเหนียวและตะกอน สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน เช่น สังกะสีไดไทโอฟอสเฟต (Zinc dithiophosphate)

5. สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion inhibitors) ช่วยป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในระบบ เช่น การกัดกร่อนจากกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในตัวของตัวเอง และการกัดกร่อนจากสารปนเปื้อนที่ถูกพาไปโดยน้ำมัน สารป้องกันการกัดกร่อนที่ใช้ทั่วไป เป็นสารตัวเดียวกับสารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน เช่น สังกะสีไดไทโอฟอสเฟต และสารที่มีซัลเฟอร์และฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ

6. สารป้องกันสนิม (Rust inhibitors) ช่วยป้องกันสนิมที่อาจเกิดขึ้นบริเวณผิวของชิ้นส่วนโลหะที่ถูกหล่อลื่นด้วยน้ำมัน โดยทั่วไปจึงเป็นสารประกอบที่สามารถยึดติดกับผิวของโลหะได้ สารป้องกันสนิมจะทำปฏิกิริยากับผิวโลหะเกิดเป็นฟิล์มเกาะติดกับผิวของโลหะจึงป้องกันไม่ให้น้ำเข้าถึงผิวโลหะ สารที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ เอมีนซักซิเนต (Amine succinates) และอัลคาไลเอิร์ทซัลโฟเนต (Alkaline earth sulfonates)

7. สารชะล้างและสารกระจายสิ่งสกปรก (Detergents and dispersants) ช่วยชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวของโลหะหรือชิ้นส่วนของโลหะ และกระจายไม่ให้อัดตัวกันเป็นตะกอน ซึ่งสำคัญสำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์สันดาปภายใน ได้แก่ เครื่องยนต์เบนซิน และเครื่องยนต์ดีเซล สารชะล้างสิ่งสกปรกที่ใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ สบู่อินทรีย์ (Organic soaps) และแบเรียม (Barium) แคลเซียมและแมกนีเซียมซัลโฟเนต (Calcium and magnesium sulfonates) เป็นต้น ส่วนสารกระจายสิ่งสกปรกจะทำหน้าที่กระจายหรือทำให้สารที่จะรวมตัวกันเป็นตะกอนแขวนลอยอยู่ในน้ำมัน สารที่ใช้ ได้แก่ พอลิเมอร์ซัคซิไนด์ (Polymeric succinimides) และเบนซิลไมด์ (Benzylamides) เป็นต้น (Machinery Lubrication. 2012)

8. สารป้องกันการสึกหรอ (Antiwear additives) เป็นสารลดความเสียหายและการสึกหรอภายใต้การหล่อลื่นแบบบาวนด์ลารี (Boundary lubrication) ในภาวะที่ฟิล์มของน้ำมันแยกจากผิวสัมผัส สารป้องกันการสึกหรอแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารป้องกันการสึกหรอสำหรับเครื่องจักรที่ทำงานเบา หรือเรียกว่าสารเพิ่มคุณภาพสำหรับการหล่อลื่นแบบบาวนด์ลารี (Boundary lubrication additives) ได้แก่ กรดไขมัน (Fatty acids) และน้ำมันระเหยยาก (Fatty oils) และสารป้องกันการสึกหรอสำหรับเครื่องจักรที่ทำงานหนัก หรือเรียกว่าสารรับแรงกดอัด (Extreme pressure additives: EP) สารนี้จะทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวโลหะและเกิดเป็นฟิล์มเคลือบที่ผิวโลหะ สารรับแรงกดอัดโดยทั่วไปเป็นสารประกอบของซัลเฟอร์ คลอรีน หรือฟอสฟอรัส สารใดสารหนึ่งหรือหลายชนิดรวมกัน

## 2.2.6 การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นอุตสาหกรรมและน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (กรมควบคุมมลพิษ. 2560)

น้ำมันหล่อลื่นอุตสาหกรรมและน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์หากสัมผัสกับอากาศ ความชื้น และน้ำที่เกิดจากการปนเปื้อนในระหว่างการใช้งาน รวมทั้งเมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการเสื่อมสภาพ เช่น การเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีสภาพเป็นกรด มีสีคล้ำ และความหนืดเปลี่ยนแปลง การเสื่อมสภาพเนื่องจากการปนเปื้อนของสารอื่นหรือสิ่งสกปรก หรือสารเติมแต่งในน้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพ ปัจจัยบางอย่างสามารถควบคุมให้เกิดขึ้นน้อยลงได้โดยการติดตั้งหน่วยทำความสะอาด หรือระบบกรองให้กับน้ำมันหล่อลื่น ข้อเสนอแนะเพื่อยืดอายุการใช้งานของเครื่องจักร ควรเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นในระยะเวลาที่เหมาะสม และไม่ใช้น้ำมันหล่อลื่นที่เสื่อมสภาพ

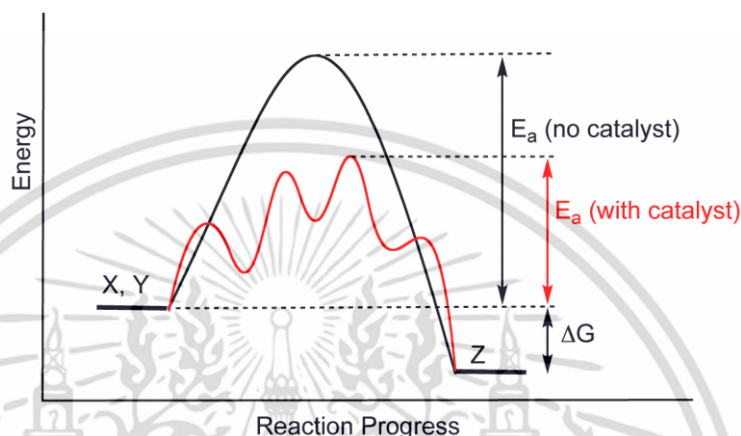
## 2.2.7 การจัดการน้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพที่ใช้แล้ว (กรมควบคุมมลพิษ. 2560)

เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นประกอบด้วยสารอินทรีย์ประเภทไฮโดรคาร์บอน ตัวทำละลาย โลหะหนัก เป็นต้น การกำจัดน้ำมันหล่อลื่นที่เสื่อมสภาพอย่างไม่ถูกวิธีจะเป็นอันตรายต่อมนุษย์ สิ่งมีชีวิตต่างๆ และสิ่งแวดล้อม วิธีการจัดการน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในปัจจุบัน ได้แก่

1. การกำจัดด้วยเตาเผาของเสียอันตราย แบ่งออกเป็น การเผาให้แตกตัวเป็นไอที่อุณหภูมิ 800 – 850 องศาเซลเซียส และการเผาไอที่อุณหภูมิ 1,100 - 1,400 องศาเซลเซียส
2. การนำกลับมาใช้ใหม่โดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย ด้วยกระบวนการแปรสภาพตัวทำละลายใช้แล้ว เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นให้กลับมาใช้งานได้อีกครั้ง ได้เป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันหล่อลื่นเกรดรอง ซึ่งสามารถนำไปใช้ที่โรงงานอุตสาหกรรมเดิม หรือใช้ในโรงงานอื่นที่ไม่มี ความจำเป็นใช้น้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณภาพสูง
3. การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในเตาเผาสำหรับอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น โดยผสมกับเชื้อเพลิงในอัตราส่วนร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก แต่วิธีการนี้ส่งผลเสียด้านมลพิษทางอากาศ และการกำจัดกากของเสียอันตรายที่เกิดขึ้น
4. การนำไปผสมกับน้ำมันดิบในกระบวนการกลั่นของโรงกลั่นน้ำมัน

### 2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Bartholomew, C.H. and Farrauto, R.J. 2006; Satterfield, C.N. 1991; Robertson, A.J.B. 1975; Wachnik, W.H. 2015; SINGHCBT. 2015)

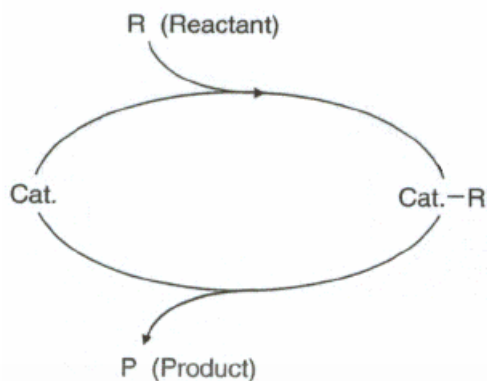
ตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานและวิถีของปฏิกิริยาเคมี (Chemical path) โดยลดระดับพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา (Activation energy:  $E_a$ ) ทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อระดับพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดปฏิกิริยา (SINGHCBT. 2015)

ปฏิกิริยาบางประเภทอาจเกิดได้ช้ามากที่ภาวะปกติ แต่หากเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น การเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้น อุณหภูมิ การเกิดปฏิกิริยา เวลาการเกิดปฏิกิริยา ความดัน และพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มค่าการแปลงผันทางเคมี (Chemical conversion) ของสารตั้งต้น และเพิ่มค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ได้อย่างเฉพาะเจาะจง (Selectivity) การเร่งปฏิกิริยาเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างง่าย แสดงดังรูปที่ 2.11 (Wachnik, W.H. 2015)

- ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดโครงสร้างเชิงซ้อนและเข้าทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น เกิดสารมัธยันตร์ (Intermediates)
- สารมัธยันตร์จะเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (Desired products) และผลพลอยได้ (By-products)
- ตัวเร่งปฏิกิริยาจะกลับไปเริ่มทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นใหม่อีกครั้ง



รูปที่ 2.11 การเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Wachnik, W.H. 2015)

### 2.3.1 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา (จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547; Kannan, M. and Saravanan, C.G. 2015; Xiao, F.S. and Meng, X. 2016; Yang, W.C. 2003)

ตัวเร่งปฏิกิริยา แบ่งได้ดังนี้

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalysts) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยามีวัฏภาคเดียวกันกับสารตั้งต้น ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาและค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์สูง แต่มีข้อจำกัดในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ ผลพลอยได้ และสารตั้งต้นที่เหลือ
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalysts) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยามีวัฏภาคต่างกับสารตั้งต้น ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาและค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์สูง ใช้ได้ดีในภาวะที่อุณหภูมิหรือความดันสูง การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ ผลพลอยได้ และสารตั้งต้นที่เหลือทำได้ง่าย สามารถฟื้นฟูสภาพได้ง่าย (Simple regeneration)
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ (Enzymatic catalysts) หรือตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ (Biocatalysts) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความจำเพาะเจาะจงต่อการเลือกทำปฏิกิริยา ใช้เวลาทำปฏิกิริยาสั้น ภาวะของการทำปฏิกิริยาไม่รุนแรง ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมยาและอาหาร

ตารางที่ 2.4 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างๆ (ดัดแปลงจาก จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547)

ปัจจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยา เอกพันธ์	ตัวเร่งปฏิกิริยา วิวิธพันธ์	ตัวเร่งปฏิกิริยา เอนไซม์
ความว่องไวเมื่อเทียบในปริมาณที่เท่ากัน	สูง	แปรค่าได้	สูงมาก
ค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์	สูง	แปรค่าได้	สูงมาก
ภาวะการทำปฏิกิริยา	ไม่รุนแรง	รุนแรง	ไม่รุนแรง
อายุการใช้งาน	แปรค่าได้	นาน*	แปรค่าได้
ความว่องไวต่อการเกิดภาวะเป็นพิษของ ตัวเร่งปฏิกิริยา	ต่ำ	สูง	-
การแพร่ของสารตั้งต้นเข้าไปในรูพรุนของ ตัวเร่งปฏิกิริยา และการแพร่ของ ผลิตภัณฑ์ออกจากรูพรุนของตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ไม่มีข้อจำกัด	มีข้อจำกัดขึ้นกับ ขนาดรูพรุนของ ตัวเร่งปฏิกิริยา	-
การฟื้นฟูสภาพเพื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยา กลับมาใช้ใหม่	ทำได้ยาก	ทำได้ง่าย	ทำได้ยาก

หมายเหตุ \* ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์สามารถฟื้นฟูสภาพและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงมีอายุการใช้งาน  
นานกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์

### 2.3.2 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา (จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547; วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ 2554; Kannan, M. and Saravanan, C.G. 2015; Si, H.O. 2009; Tani, H. et al. 2011; Weitkamp, J. 2000)

1. ความว่องไว (Activity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อเข้าสู่  
สมดุลในการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ ชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อความ  
ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (Kannan, M. and Saravanan, C.G. 2015)

2. ความเป็นกรด (Acidity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ความสามารถในการถ่ายโอนโปรตอน  
( $H^+$ ) ของตัวเร่งปฏิกิริยาให้กับสารตั้งต้น ซึ่งสำคัญต่อการเร่งปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลของ  
สารประกอบไฮโดรคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ตำแหน่งกัมมันต์ (Active sites) คือ ตำแหน่งของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยา ในการเกิดปฏิกิริยาสารตั้งต้นจะแพร่เข้ามาสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตำแหน่งกัมมันต์

4. พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Surface area) และความพรุน (Porosity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความไวของปฏิกิริยา (Reaction activity) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวและความพรุนสูงทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดี

5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (Pore diameter) ช่วยเลือกเกิดปฏิกิริยาที่ต้องการ ขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาต้องเหมาะสมกับขนาดของโมเลกุลของสารตั้งต้นและขนาดโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ตามระบบ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) แบ่งรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาออกเป็น 3 ชนิด (Weitkamp, J. 2000)

- รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร
- รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนระหว่าง 2 - 50 นาโนเมตร
- รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร

### 2.3.3 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Deutschmann, O. et al. 2009; Hagen, J. 2006 )

ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาและค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยามีวิวิธพันธุ์จะลดลงหลังการใช้งานไประยะหนึ่ง อาจขดเซยการเสื่อมสภาพแบบชั่วคราวโดยการเพิ่มอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา แต่ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยายังไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ ต้องฟื้นฟูสภาพโดยการเผา (Calcination) ไค้ที่เกาะอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไอน้ำหรืออากาศร้อน สาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ได้แก่

1. การเกิดภาวะเป็นพิษบนตำแหน่งกัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst poisoning due to blocking of active sites) จากการดูดซับทางเคมีขององค์ประกอบหรือสารประกอบบางชนิดที่เป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โลหะและ/หรือไอออนของโลหะ (Pb, Hg, Sb, Cd) แอมโมเนีย น้ำเบสอินทรีย์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไทโอฟิน และสารประกอบที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา เช่น NO, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>

2. การอุดตันในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวรองรับ (Catalyst fouling) สาเหตุที่พบบ่อย คือ การอุดตันของไค้ซึ่งเกิดจากการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ทำให้พื้นที่ผิวในการเร่งปฏิกิริยา (Effective surface areas) ลดลง

3. การสลายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาจากความร้อน (Thermal degradation) และการเผาผนึกหรือการซินเทอร์ริง (Sintering) จากการรวมตัวของผลึกโลหะขนาดเล็กที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียพื้นที่ผิวในการเร่งปฏิกิริยาและตำแหน่งกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนในหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อผู้ยู่ได้เห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การระเหิดขององค์ประกอบที่ว่องไว (Volatization of active components) เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา  $P_2O_5$ ,  $MoO_3$  และ  $Bi_2O_3$  ที่ใช้ในปฏิกิริยาการแตกตัว เกิดการสูญเสียองค์ประกอบที่ว่องไวเนื่องจากอุณหภูมิการทำปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิการระเหิดขององค์ประกอบเหล่านี้

### 2.3.4 การป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (Deutschmann, O. et al. 2009)

การป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้โดย

- กำจัดสารปนเปื้อนในสารตั้งต้นก่อนป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์
- ลดปริมาณสารประกอบที่มีความเป็นเบสสูง เช่น เอมีน (Amines) และไพริมิดีน (Pyrimidines)
- หลีกเลี่ยงการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเพื่อป้องกันการเกิดโค้กและการเกิดฟอสฟอรัส
- ลดปริมาณอนุมูลอิสระ (Free radicals) โดยติดตั้งตัวกรองหรืออุปกรณ์ดักจับอนุมูลอิสระ

### 2.3.5 การฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (ชุตติมาพร วรณวงษ์. 2557; Bartholomew, 1982; Matar, S. et al., 1989; Nielsen, R. 1971; Trimm, D.L. 2001)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เสื่อมสภาพหากต้องการนำกลับมาใช้งาน ต้องฟื้นฟูสภาพโดยการปรับสภาพพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

1. การปรับสภาพพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เสื่อมสภาพจากสารพิษ โดยการทำให้ปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน แก๊สไฮโดรเจน หรือสารออกซิไดส์ เช่น  $KMnO_4$  เพื่อกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์บนพื้นผิวของโลหะมีตระกูลที่เป็นองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น Ni, Cu, Pt อย่างไรก็ตามการฟื้นฟูหรือปรับสภาพพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีนี้ อาจทำให้เกิดการขึ้นเธรอร์ริงของโลหะขึ้นได้

2. การปรับสภาพพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เสื่อมสภาพจากการเกิดโค้ก โดยการเผาโค้กที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจน หรือไอน้ำ (Trimm, D.L. 2001)

3. การปรับสภาพพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เสื่อมสภาพจากการขึ้นเธรอร์ริง (ชุตติมาพร วรณวงษ์. 2557) เช่น การปรับสภาพพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา  $Pt/Al_2O_3$  ที่เสื่อมสภาพจากการขึ้นเธรอร์ริง โดยการทำให้ปฏิกิริยาคลอรีเนชัน (Chlorination) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 การดูดซับของออกซิเจนบนพื้นผิวของโลหะแพลทินัม

ขั้นที่ 2 การดูดซับของคลอรีนบนพื้นผิวของโลหะแพลทินัม

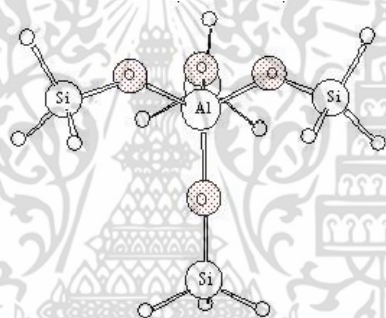
ขั้นที่ 3 สารประกอบแพลทินัมคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมไตรคลอไรด์ เกิดสารประกอบเชิงซ้อน  $PtCl_2(AlCl_3)_2$

ขั้นที่ 4 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Oxychloroplatinum complex)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ (Zeolites) (วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. 2558)

ซีโอไลต์ คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ ประกอบด้วยซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม ( $\text{SiO}_4$  หรือ  $\text{AlO}_4$ ) สร้างพันธะกันเป็นโครงสร้างทรงสี่หน้า (Tetrahedron) ดังรูปที่ 2.12 โดยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ โครงสร้างทรงสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่และเกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอม =  $1 \times 10^{-10}$  เมตร) ซีโอไลต์มีสมบัติดูดน้ำได้ดี มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง รวมทั้งสามารถดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์หลายชนิดทั้งที่ไม่มีพิษและสารพิษต่างๆ ที่อาจก่อให้เกิดภาวะปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.12 โครงสร้างทรงสี่หน้าของ  $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$  (วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. 2558)

### 2.3.7 ชนิดของซีโอไลต์ (วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. 2558; Jha, B. and Singh, D.N. 2016)

ซีโอไลต์แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural or Mineral zeolites) ซึ่งมีมากกว่า 35 ชนิด และซีโอไลต์จากการสังเคราะห์ (Synthetic zeolites) ซึ่งมีประมาณ 100 ชนิด

1. ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ส่วนมากพบจากการทำเหมืองแร่ เป็นกลุ่มของผลึกอะลูมิโนซิลิเกตของโมนและไดวาเลนต์เบส (Mono and divalent bases) อาจมีการสูญเสียผลึกน้ำบางส่วนหรือทั้งหมด โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Faujasite, Erionite, Offretite, Chabazite และ Clinoptilolite (Jha, B. and Singh, D.N. 2016) เป็นต้น ซีโอไลต์ธรรมชาติเดิมนำมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง และเป็นตัวกรองในอุตสาหกรรมกระดาษ หลังจากนั้นเนื่องจากมีสมบัติการเป็นโมเลกุลาร์ซีฟ (Molecular sieves) และสามารถแลกเปลี่ยนประจุได้ จึงนำมาใช้เป็นตัวดูดซับโมเลกุลาร์ซีฟ (Molecular sieve adsorbents) ใช้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการกำจัดน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมการแยกแก๊สธรรมชาติหรืออุตสาหกรรมการแยกแก๊สแอมโมเนีย

2. ซีโอไลต์จากการสังเคราะห์ ด้วยการทำปฏิกิริยาของออกไซด์ต่างๆ เช่น  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Na_2O$  และ  $K_2O$  ในระบบที่มีน้ำ ซีโอไลต์ที่ได้จึงมีผลึกน้ำในองค์ประกอบ การสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดได้ตั้งแต่เป็นเจลไปจนถึงเป็นของแข็งที่มีรูพรุน เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ซีโอไลต์ A ซีโอไลต์ Y ซีโอไลต์ F ซีโอไลต์ M และซีโอไลต์ USY (Ultra-Stable-Y) เป็นต้น

ปัจจุบันตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ USY ชนิด Faujasite ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนขนาดใหญ่ จึงยอมให้สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ผ่านเข้าออกได้ และเนื่องจากมีความเป็นกรดสูง จึงเหมาะสำหรับเร่งปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่

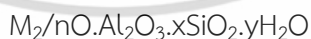
ซีโอไลต์แต่ละชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน เช่น รูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ซีโอไลต์ชนิดต่างๆ (Jha, B. and Singh, D.N. 2016)

### 2.3.8 โครงสร้างของซีโอไลต์ (วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. 2558)

ซีโอไลต์ประกอบด้วยผลึกของอะลูมิโนซิลิเกตที่มีผลึกของโลหะอัลคาไลน์หรือโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท โดยมากจะเป็นโลหะโซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม สตรอนเชียม และแบเรียม โครงสร้างหลักของซีโอไลต์จะมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบ 3 มิติ ของอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $AlO_4$ ) และซิลิคอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $SiO_4$ ) ประกอบด้วยอะลูมิโนซิลิเกต โดยมีการเชื่อมต่อกันระหว่างอะตอมของออกซิเจน สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์เป็นดังนี้



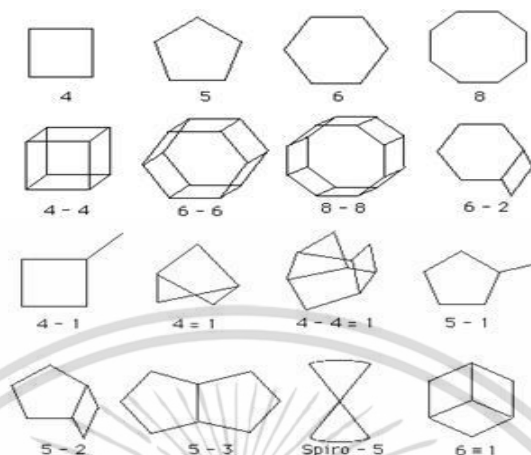
n คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M) โดยมากมีค่าเท่ากับ 1 และ 2 ของโลหะอัลคาไลน์หรือโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท ตามลำดับ

x คือ จำนวนโมลของ  $SiO_2$  โดยมากมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2

y คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์

องค์ประกอบอีกส่วนหนึ่งของซีโอไลต์คือไอออนบวก ทำหน้าที่ดุลประจุลบที่เกิดจากอะลูมิเนียมในรูปทรงหลายหน้าเมื่ออะลูมิเนียมที่มีประจุบวกสามเข้ามาแทนที่ซิลิคอนที่มีประจุบวกในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงสี่หน้า ดังรูปที่ 2.14 จึงจำเป็นต้องมีประจุบวกจากภายนอกเข้ามาดุลประจุ ซึ่งทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติเป็นกรด



รูปที่ 2.14 โครงสร้างทศนิยมของซีโอไลต์ (วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. 2558)

### 2.3.9 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ (วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. 2558; Auerbach, S.M. et al. 2003; Jha, B. and Singh, D.N. 2016)

สมบัติของซีโอไลต์ที่สำคัญมีดังนี้

1. เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) ส่วนใหญ่การเกิดปฏิกิริยาเคมีในอุตสาหกรรมใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 300- 600 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการจึงต้องมีเสถียรภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงในเวลานาน ซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่เป็นผลึกแข็ง จึงมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง พบว่าซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาและอะลูมินา (Si/Al) สูง และมีขนาดรูพรุนเล็ก จะทนความร้อนได้สูงกว่าซีโอไลต์ที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ และเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) ที่อุณหภูมิสูง เช่น ปฏิกิริยาการแตกโมเลกุล (Cracking) ปฏิกิริยารีฟอร์มมิง (Reforming) และเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ที่อุณหภูมิต่ำ เช่น ปฏิกิริยาการเติมหมู่อัลคิล (Alkylation) ปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชัน (Isomerization)

2. พื้นที่ผิวในการเร่งปฏิกิริยาสูง (High surface area) พื้นที่ส่วนใหญ่ของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ พื้นที่ผิวภายในรูพรุน (Internal surface) ซึ่งมีตำแหน่งกัมมันต์อยู่ หากตัวเร่งปฏิกิริยามีรูพรุนและความพรุนสูงจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กจะให้ผลดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ เนื่องจากโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กทำให้พื้นที่ผิวทั้งหมดในการเร่งปฏิกิริยาสูง

3. ปฏิกิริยาระดับโมเลกุล (Molecular reaction) สารตั้งต้นจะแพร่และถูกดูดซับในรูพรุนของซีโอไลต์ และเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ที่บริเวณที่ถูกดูดซับ สำหรับปฏิกิริยาแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลเดี่ยว สารตั้งต้นโมเลกุลเดี่ยวที่อยู่ภายในแต่ละรูพรุน จะเกิดปฏิกิริยาในทุกๆ รูพรุนในลักษณะเดียวกัน ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงได้น้อย รูพรุนทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์สามารถดูดซับสารตั้งต้นไว้จนมีความเข้มข้นสูงและเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้เร็ว ส่วนปฏิกิริยาแบบโมเลกุลเชิงคู่ (Bimolecular reaction) ต้องใช้สารตั้งต้น 2 โมเลกุล เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา โดยรูพรุนจะทำหน้าที่คล้ายกับกรณีการเกิดปฏิกิริยาแบบโมเลกุลเดี่ยวคือช่วยดูดซับสารตั้งต้น และเพิ่มโอกาสในการชนกันของโมเลกุลได้มากขึ้น

4. การคัดเลือกรูปร่างและขนาด (Shape and size selectivity) หากรูปร่างโมเลกุลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์แตกต่างจากรูปร่างของรูพรุนของซีโอไลต์และมีขนาดใหญ่กว่า สารตั้งต้นจะไม่สามารถแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาในรูพรุนได้ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นก็จะไม่สามารถแพร่ออกจากรูพรุนได้เช่นกัน ดังนั้นรูปร่างและขนาดของรูพรุนจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทในการควบคุมทั้งรูปร่างและขนาดของโมเลกุลที่เกิดขึ้นทั้งหมดในปฏิกิริยานั้นๆ

### 2.3.10 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ในงานอุตสาหกรรม (วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ 2554; Jha, B. and Singh, D.N. 2016)

ซีโอไลต์มีสมบัติเป็นกรด (Acid property) และการเลือกจำเพาะสูง (Selective property) มีเสถียรภาพทางความร้อนและเสถียรภาพทางความร้อนในภาวะที่มีน้ำ (Thermal and hydrothermal stability) จึงสามารถฟื้นฟูสภาพด้วยความร้อน (Thermal regeneration) และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการเผา (Calcination) ในบรรยากาศที่มีออกซิเจน ส่วนใหญ่ซีโอไลต์ถูกใช้งาน 4 ประเภทหลัก ดังนี้

1. เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ใช้ในปฏิกิริยาการแตกตัว ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ปฏิกิริยาอัลคิลเลชัน ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน เป็นต้น โดยมีการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและเคมีของซีโอไลต์ให้เหมาะสมกับปฏิกิริยามากขึ้น ในปัจจุบันซีโอไลต์ USY ใช้สำหรับปฏิกิริยาการแตกตัว ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน และปฏิกิริยาอัลคิลเลชันของไฮโดรคาร์บอนในโรงกลั่นน้ำมัน

2. เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) ซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นรูพรุน มีสมบัติการเลือกจำเพาะ สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้ตามขนาดและโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด จึงนำซีโอไลต์มาใช้เป็นตัวดูดซับในการแยกสาร การทำให้บริสุทธิ์ (Purification) และการทำให้แห้ง (Dehydration) ซีโอไลต์สามารถดูดซับและคายน้ำได้ เมื่อให้ความร้อนแก่ซีโอไลต์ น้ำในรูพรุนจะระเหยออกไป และเมื่อซีโอไลต์สัมผัสกับไอน้ำก็สามารถดูดซับน้ำได้อีก

3. เป็นสารลดความกระด้างของน้ำ (Water softener) เนื่องจากซีโอไลต์มีประจุบวกของโลหะอัลคาไลน์หรือโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท เช่น โซเดียม หรือโพแทสเซียม

4. เป็นสารแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) ซีโอไลต์สามารถใช้กำจัดแก๊สแอมโมเนียจากน้ำเสีย โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแก๊สแอมโมเนียกับโลหะโซเดียมที่อยู่ในรูพรุนของซีโอไลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ปฏิกริยาทางเคมีของตัวเร่งปฏิกริยาเอพซีซี (ปราโมทย์ ไชยเวช. 2552; ธารพงษ์ วิทิตศานต์. 2553; Sedeghbeigi, R. 1995)

ปฏิกริยาของตัวเร่งปฏิกริยาเอพซีซีได้แก่ ปฏิกริยาการแตกตัว ปฏิกริยาไอโซเมโรเซชัน ปฏิกริยาไฮโดรจีเนชัน ปฏิกริยาอัลคิเลชัน ปฏิกริยาไซโคลเซชันเพื่อเปลี่ยนโอเลฟินส์เป็นแนฟทีน ปฏิกริยาดีไฮโดรจีเนชัน ปฏิกริยาดีอัลคิเลชัน และปฏิกริยาคอนเดนเซชัน ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ประเภทปฏิกริยาและปฏิกริยาทางเคมีของตัวเร่งปฏิกริยาเอพซีซี (Sedeghbeigi, R. 1995)

ประเภทปฏิกริยา	ปฏิกริยาทางเคมี
<p><b>ปฏิกริยาการแตกโมเลกุล</b></p> <p>ปฏิกริยาการแตกตัวของ พาราฟินเป็น โอเลฟินส์ และ พาราฟินขนาดเล็ก</p> <p>โอเลฟินส์แตกตัวเป็น อนุภาคของโอเลฟินส์ขนาดเล็ก</p> <p>แอโรแมติกส์ที่มีสายโซ่กิ่ง</p> <p>แนฟทีน (ไซโคลพาราฟิน) แตกตัวเป็น โอเลฟินส์ และสารประกอบวงเบนซีนขนาดเล็ก</p>	$C_{10}H_{22} \rightarrow C_3H_6 + C_7H_{16}$ $C_8H_{16} \rightarrow C_5H_{10} + C_3H_6$ $ArC_{10}H_{21} \rightarrow ArC_5H_9 + C_5H_{12}$ $Cyclo-C_{10}H_{20} \rightarrow C_6H_{12} + C_4H_8$
<p><b>ปฏิกริยาไอโซเมโรเซชัน</b></p> <p>โอเลฟินส์ มีการเปลี่ยนรูปเป็น ไอโซโอเลฟินส์</p> <p>พาราฟินมีการเปลี่ยนรูปเป็น ไอโซพาราฟิน</p>	$1-C_4H_8 \rightarrow trans-2-C_4H_8$ $n-C_4H_{10} \rightarrow iso-2-C_4H_{10}$
<p><b>ปฏิกริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจน</b></p> <p>ไซโคลแอโรแมติกส์เซชัน หรือ รีฟอร์มมิง</p> <p>โอเลฟินส์ ที่มีการเปลี่ยนรูปเป็น พาราฟินส์ และ แอโรมาติกส์</p>	$Naphthene + Olefin \rightarrow Aromatic + Paraffin$ $C_6H_{12} + 3C_5H_{10} \rightarrow C_6H_6 + 3C_5H_{12}$ $4C_6H_{12} \rightarrow 3C_6H_{14} + C_6H_6$
<p><b>ปฏิกริยาทรานส อัลคิเลชัน หรือปฏิกริยาการถ่ายโอนหมู่อัลคิล</b></p>	$C_6H_4(CH_3)_2 + C_6H_6 \rightarrow 2C_6H_5CH_3$
<p><b>ปฏิกริยาไซโคลเซชันของโอเลฟินส์เป็นแนฟทีน</b></p>	$C_7H_{14} \rightarrow CH_3-cyclo-C_6H_{11}$

เอกสารนี้เผยแพร่โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ประเภทปฏิกิริยาและปฏิกิริยาทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี (Sedeghbeigi, R. 1995) (ต่อ)

ประเภทปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาทางเคมี
ปฏิกิริยาการจัดไฮโดรเจน	$n\text{-C}_8\text{H}_{18} \rightarrow \text{C}_8\text{H}_{16} + \text{H}_2$
ปฏิกิริยาการตั้งหมู่อัลคิล	$\text{Iso-C}_3\text{H}_7\text{-C}_6\text{H}_5 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_6$
ปฏิกิริยาการกลั่นตัวของไอน้ำ	$\text{Ar-CH=CH}_2 + \text{R}_1\text{CH} + \text{CHR}_2 \rightarrow \text{Ar-Ar} + 2\text{H}$

ปฏิกิริยาที่สำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีได้แก่ การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน และการแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 2.4.1 การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน (Thermal cracking)

เป็นการแตกโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่เป็นโมเลกุลขนาดเล็กลงโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงที่พอเหมาะต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ หากอุณหภูมิของการแตกโมเลกุลสูงเกินไปจะเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นโมเลกุลขนาดเล็กจนเกิดเป็นแก๊ส  $\text{C}_1\text{-C}_4$  ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาประเภทอนุมูลอิสระ (Free radical) แบบห่วงโซ่ ประกอบด้วยปฏิกิริยา 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ขั้นเริ่มต้น (Initiation) การแตกพันธะของอะตอมคาร์บอนทำให้เกิดอนุมูลอิสระ
2. ขั้นปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (Chain-carrying) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องโดยการเปลี่ยนรูปไอโซเมอร์ และแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดย่อยพร้อมกับการเกิดอนุมูลอิสระใหม่ และอนุมูลอิสระบางตัวอาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนตัวอื่น เกิดเป็นอนุมูลอิสระใหม่ต่อไปเรื่อยๆ
3. ขั้นการหยุดปฏิกิริยา (Termination) อนุมูลอิสระจะหยุดการแตกตัวเมื่อเกิดการทำปฏิกิริยากันเอง เกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่โมเลกุลเดี่ยวหรือ โมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล

สรุปการเกิดปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ดังนี้

1. พาราฟินจะแตกโมเลกุลและถูกตั้งไฮโดรเจนออก เกิดเป็นพาราฟินที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง, โอเลฟินส์ และไฮโดรเจน
2. โอเลฟินส์จะเกิดปฏิกิริยาได้ 2 แบบ
  - 2.1 แตกตัวและและถูกตั้งไฮโดรเจนออก เกิดเป็นพาราฟินที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง โอเลฟินส์ ไดโอเลฟินส์ และไฮโดรเจน
  - 2.2 โอเลฟินส์จะทำปฏิกิริยากับไดโอเลฟินส์ เกิดเป็นไซคลิกโอเลฟินส์ หรือโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไม่เหมาะสมหรือไม่ควรตีพิมพ์ออกนอกห้องสมุดฯ กรุณาแจ้งเจ้าหน้าที่ห้องสมุดฯ เพื่อทำการแก้ไขเอกสารฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไม่เหมาะสมหรือไม่ควรตีพิมพ์ออกนอกห้องสมุดฯ กรุณาแจ้งเจ้าหน้าที่ห้องสมุดฯ เพื่อทำการแก้ไขเอกสารฉบับนี้

3. แอโรแมติกส์จะเกิดปฏิกิริยาการแตกพันธะเกิดเป็น พาราฟิน โอลิฟินส์ และแอโรแมติกส์ และแอโรแมติกส์บางส่วนจะรวมตัวกันเกิดโค้ก
4. แนฟทีนจะเกิดการทำให้ปฏิกิริยากับโอลิฟินส์ และแนฟทีนบางส่วนจะถูกดึงไฮโดรเจน ออกเกิดเป็นสารแอโรแมติกส์ต่างๆ

ความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยานั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลที่ป้อนเข้าทำปฏิกิริยา โมเลกุลขนาดใหญ่จะเกิดการแตกเป็นโมเลกุลใหม่ และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องอื่นๆตามมา ดังนั้นสารตั้งต้นที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น กากน้ำมันหนักจะแตกตัวได้เร็วโดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูง แต่ถ้าเป็นสารตั้งต้นที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะต้องใช้อุณหภูมิสูงมากจึงจะได้ปฏิกิริยาที่ต้องการ โดยที่สมบัติของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแตกโมเลกุลด้วยความร้อน เช่น

- แก๊สที่ออกจากหอก้นจะประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอน ( $C_1 - C_4$ ) แก๊สไฮโดรเจน และ แก๊สเฉื่อยเล็กน้อย ( $N_2, CO, CO_2$ )
- เบนซินที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอน ( $C_5$ ) ที่มีโอลิฟินส์ร้อยละ 40 – 50 โดยน้ำหนัก และไดโอลิฟินมากเช่นกัน ยังไม่พร้อมใช้งานเนื่องจากมีค่าออกเทนสูง จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้
- แก๊สออยล์ที่ประกอบด้วยโอลิฟินส์และแอโรแมติกส์ที่มีความหนาแน่นสูง มีค่าซีเทนต่ำ หากจะนำไปใช้งานจำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ โดยส่วนใหญ่แล้วจะนำไปผสมกับน้ำมันดีเซล และน้ำมันเตา เพื่อนำไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง
- กากน้ำมันที่มีปริมาณของแอสฟัลต์ทีน (Asphaltene) สูง

#### 2.4.2 การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking)

การแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อแตกพันธะของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็ก ได้โครงสร้างที่เหมาะสมจะนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกพันธะโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยแก๊สที่มีองค์ประกอบของสารแอโรแมติกส์และโอลิฟินส์สูง ทำให้ได้องค์ประกอบเบนซินที่มีค่าออกเทนสูง เกิดเป็นน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กากน้ำมันชนิดใส แต่การแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดโค้กเกาะบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลต่อพื้นที่ผิวรูพรุนและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงจนเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่ง กำจัดโค้กด้วยการเผาโดยไอน้ำหรืออากาศร้อน เพื่อฟื้นฟูตัวเร่งปฏิกิริยาให้กลับคืนสู่สภาพเดิม แต่การเผาโค้กออกจะก่อให้เกิดความยุ่งยากในการออกแบบกระบวนการ เพื่อเป็นการแก้ปัญหาจึงได้มีการปรับปรุงการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีอาศัยอุปกรณ์พิเศษพาตัวเร่งปฏิกิริยาให้เคลื่อนที่ไป (Thermofor-Moving bed) และวิธีการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นผงละเอียดจนสามารถไหลได้คล้ายของไหล เรียกว่า กระบวนการฟลูอิดแคตตาลิติกแครกกิง (Fluid catalytic cracking; FCC) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาของกระบวนการแตกโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นตามลำดับดังนี้

1. เกิดคาร์บอนเนียมไอออนที่อาจเกิดจากโอเลฟินส์, พาราฟิน หรือแอโรแมติกส์
2. เกิดปฏิกิริยาห่วงโซ่ของคาร์บอนเนียมไอออน และเกิดการแตกโมเลกุลของคาร์บอนเนียมไอออนจนเกิดการเปลี่ยนรูปไอโซเมอร์
3. เกิดปฏิกิริยาหยุดห่วงโซ่ (Termination) โดยคาร์บอนเนียมไอออนจะทำปฏิกิริยากันเอง
4. เกิดปฏิกิริยาขั้นที่สอง โดยการลดไฮโดรเจนในแนฟทีนเพื่อให้เป็นแอโรแมติกส์ และเกิดโค้ก

จากขั้นตอนของปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถอธิบายผลความแตกต่างของการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนและการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 2.6

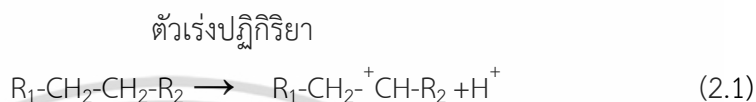
ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบสมบัติของการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนและการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Sedeghbeigi, R. 1995)

ชนิดไฮโดรคาร์บอน	การแตกโมเลกุลด้วยความร้อน	การแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา
พาราฟิน	- ผลิตภัณฑ์หลักคือ $C_2$ - ผลิตภัณฑ์รองคือ $C_1, C_3$ ถึง $C_6$ เล็กน้อย	- ผลิตภัณฑ์หลักคือ $C_3$ ถึง $C_6$ - ผลิตภัณฑ์รองคือ โอเลฟินส์เล็กน้อยในสายโซ่ของ $C_4$
โอเลฟินส์	- เกิดปฏิกิริยาแตกพันธะคู่และโครงสร้างคอนข้างช้า - เกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจน และโอเลฟินส์ในระดับตติยภูมิ - แอโรแมติกส์ที่เกิดจากอะลิฟาติกปริมาณน้อยที่อุณหภูมิ 923 องศาฟาเรนไฮต์	- เกิดปฏิกิริยาแตกพันธะคู่และเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างรวดเร็ว - เกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจนเป็นหลักและเกิดโอเลฟินส์ในระดับตติยภูมิ - แอโรแมติกส์ที่เกิดจากอะลิฟาติกปริมาณสูงที่อุณหภูมิ 923 องศาฟาเรนไฮต์
แนฟทีน	- อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าพาราฟิน	- อัตราการเกิดปฏิกิริยาค้ำพาราฟินเมื่อมีโครงสร้างเหมือนกัน
แอโรแมติกส์	- ปฏิกิริยาเกิดภายในโมเลกุล	- ปฏิกิริยาเกิดที่โครงสร้างของวงแหวนที่เด่นชัด

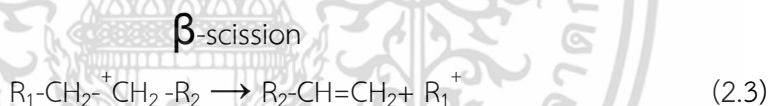
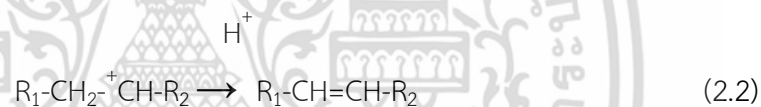
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking) (ธราพงษ์ วิทิตสานต์. 2553)

การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่รวมระหว่างการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและการเติมแก๊สไฮโดรเจน ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีกิ่งจำนวนมาก เกิดเป็นพาราฟินและแนฟทีน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเริ่มต้นจากการเกิดไอออนคาร์บอนเนียมบริเวณพื้นผิวที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการที่ (2.1)



ไอออนคาร์บอนเนียมอาจมีการจัดเรียงตัวใหม่และกำจัดโปรตอนออกจากโอเลฟินส์ หรือแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้าได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินส์และไอออนคาร์บอนเนียมตัวใหม่ จากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนและการตั้งไฮโดรเจน โอเลฟินส์ที่ผ่านการเติมไฮโดรเจนจะกลายเป็นสารประกอบประเภทพาราฟิน ดังสมการที่ (2.2) - (2.4)



การเติมแก๊สไฮโดรเจนทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่อิ่มตัว และการเติมแก๊สไฮโดรเจนบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกำจัดโคกบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วย การแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมนี้เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์สูง จึงต้องควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างเหมาะสม เพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโคก และทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา หรือทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหายรวมทั้งไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.5.1 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่น

**ประชารัตน์ แต่มักดี (2547)** ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วผสมกับพลาสติกพอลิพรอพิลีน (PP) และพลาสติกพอลิสไตรีน (PS) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ขนาด 70 มิลลิลิตร ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน วัตถุประสงค์ที่ใช้ทั้งหมด 15 กรัม (น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว PP และ PS) ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 50 : PP 25 : PS 25 (PP : PS เท่ากับ 50 : 50) และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 60 : PP 28 : PS 12 (PP : PS เท่ากับ 70 : 30) อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ร้อยละ 1, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ต่อวัตถุดิบ 0.15 - 1.5 (0.1 - 1.5 กรัม ของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ต่อวัตถุดิบ 15 กรัม) อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390-450 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 45 - 105 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-10 บาร์เกจ พบว่าภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 50 : PP 25 : PS 25 อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลา 75 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ ได้แก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง 17.37, 75.65 และ 6.98 ร้อยละโดยน้ำหนัก ตามลำดับ (ผลิตภัณฑ์ของเหลวประกอบด้วยเนฟทาร้อยละ 46.34 เคโรซีน 10.02 แก๊สออยล์เบา 11.98 แก๊สออยล์หนัก 2.76 และกากน้ำมันหนัก 4.55 โดยน้ำหนัก)

**จินตนา สุมารินทร์ (2549)** ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ (Fe/AC) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ ร้อยละ 0.1 - 1.0 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 - 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสายป้อน 0.34 - 3.30 กรัมต่อนาที พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแตกตัว คือ อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 430 - 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสายป้อน 2.77 กรัมต่อนาที ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 57.21 - 57.36 โดยน้ำหนัก ซึ่งประกอบด้วยเนฟทาร้อยละ 18.81 - 20.31 เคโรซีน 3.96 - 4.01 แก๊สออยล์เบา 11.27 - 11.87 แก๊สออยล์หนัก 2.40 - 2.64 และกากน้ำมันหนัก 19.22 - 20.28 โดยน้ำหนัก

**กฤษณิ ปิ่นเวหา (2554)** ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้ว ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 250 มิลลิลิตร ภายใต้ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 1.12 โดยน้ำหนัก (ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.224 กรัม ต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 20 กรัม) อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส และเวลาการทำปฏิกิริยา 46 นาที ได้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้นร้อยละ 93.8 โดยน้ำหนัก ร้อยละของแก๊ส 16.84 ผลิตภัณฑ์ของเหลว 78.42 และ

ของแข็ง 4.74 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวประกอบด้วยแกโซลีน เคโรซีน แก๊ส ออยล์เบา และกากน้ำมันหนักร้อยละ 28.79, 17.06, 27.92 และ 4.65 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

**ผศดร เสรีวัฒนวุฒิ และอิศเรศ วงศ์วิทยาวณิช (2554)** ศึกษาการแตกโมเลกุลของ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์ แบบต่อเนื่องภายใต้ความดันบรรยากาศ พบว่าเมื่ออัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 2 กรัมต่อนาที อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ที่ประกอบด้วยแกโซลีนร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก และแก๊สออยล์เบาร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก (หรือ ร้อยละ 20 และ 45 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ)

**พีรพจน์ เพทายพนากิจ และคณะ (2556)** ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา USY ซีโอไลต์ที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ พบว่าที่ อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา USY ซีโอไลต์ที่ใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 30 นาที และความดันของแก๊ส ไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์เกจ ได้แก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ร้อยละ 25.66, 68.54 และ 5.80 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ คำนวณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวประกอบด้วยแกโซลีน เคโรซีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์หนัก และกากน้ำมันหนัก ร้อยละ 37.25, 21.50, 14.38, 15.00 และ 11.87 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นอกจากนี้ทดสอบผลของความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1, 3 และ 5 บาร์เกจ ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ และเวลาคงที่ พบว่าไม่มีผลต่อผลได้ของของเหลว และองค์ประกอบในของเหลว

## 2.5.2 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการแตกโมเลกุลของสารตั้งต้นชนิดอื่นๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ แบบต่อเนื่อง

**Chew, T.L. et al. (2009)** ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันปาล์มและน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ REY (Rare earth-Y) บริสุทธิ์ ซีโอไลต์ REY ที่ใช้ H-ZSM5 เป็นสารเติมแต่ง (REY/H-ZSM5) และซีโอไลต์เบต้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องภายใต้ความดันบรรยากาศ ภาวะที่ทำปฏิกิริยา คือ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 กรัมต่อกรัมน้ำมันพืช อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และเวลา 20 วินาที สำหรับน้ำมันปาล์มที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซีโอไลต์ REY บริสุทธิ์ ได้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้นร้อยละ 72.9 โดยน้ำหนัก ปริมาณแก๊ส 16.2 ผลิตภัณฑ์เหลว 48.1 และน้ำ 8.6 โดยน้ำหนัก สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา REY/H-ZSM5 ได้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้นร้อยละ 95.9 โดยน้ำหนัก ปริมาณแก๊ส 28.4 ผลิตภัณฑ์เหลว 59.3 และน้ำ 8.2 โดยน้ำหนัก ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์เบต้า ได้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้นร้อยละ 83.6% ปริมาณแก๊สร้อยละ 20.0 ผลิตภัณฑ์เหลว 56.5 และน้ำ 7.1 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหลวที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิดประกอบด้วยแกโซลีน เคโรซีน และแก๊สออยล์เบา ร้อยละ 34.5 - 40.9, 9.49 - 15.9 และ 2.5 - 5.6 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

สำหรับน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ REY บริสุทธิ์ ได้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้นร้อยละ 70.9 โดยน้ำหนัก ร้อยละของปริมาณแก๊ส 15.9 ผลิตภัณฑ์เหลว 47.4 และน้ำ 7.6 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา REY/H-ZSM5 ได้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้นร้อยละ 82.8 โดยน้ำหนัก ร้อยละของปริมาณแก๊ส 20.5 ผลิตภัณฑ์เหลว 55.3 และน้ำ 7.0 โดยน้ำหนัก ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์เบต้าได้ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้น 79.5 โดยน้ำหนัก ปริมาณแก๊ส 20.1 ผลิตภัณฑ์เหลว 53.2 และน้ำ 6.2 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิดประกอบด้วยแกโซลีน เคโรซีน และแก๊สออยล์เบา ร้อยละ 33.0 - 38.6, 9.9 - 13.0 และ 3.7 - 5.1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

Bielansky, P. et al. (2010) ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันเมล็ดเรปด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ REUSY (Rare-earth Ultra-stable Y zeolite) ที่เคลือบด้วยซีโอไลต์ ZSM5 (REUSY/ZSM5) ในเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาในภาวะของไหลระดับ pilot plant ภายใต้ความดันบรรยากาศ ภาวะที่ทำปฏิกิริยา คือ อัตราการป้อนสารตั้งต้น 3 ลิตรต่อชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 9 - 11 กิโลกรัม อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 550 องศาเซลเซียส ได้ผลได้ของเชื้อเพลิงร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรคาร์บอนและแกโซลีน ร้อยละ 23 และ 42 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และสำหรับการแตกโมเลกุลของน้ำมันเมล็ดเรปผสมกับแก๊สออยล์ที่ได้จากการกลั่นสุญญากาศ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของน้ำมันเมล็ดเรปต่อแก๊สออยล์ที่ได้จากการกลั่นสุญญากาศ ได้ผลได้ของแก๊สไฮโดรคาร์บอนลดลง เพราะออกซิเจนในโครงสร้างไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันเมล็ดเรป ทำให้เกิดน้ำเพิ่มขึ้นมาก แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ไม่มีผลต่อผลได้ของแกโซลีน

Junming, X. et al. (2010a) ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันถั่วเหลืองด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น CaO และอะลูมินา ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องภายใต้ความดันบรรยากาศ ภาวะที่ทำปฏิกิริยา คือ อัตราการป้อนสารตั้งต้น 50 กรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิทำปฏิกิริยาต่อเนื่องระหว่าง 480 - 520 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ต่อน้ำมันถั่วเหลืองร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ได้ปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งร้อยละ 10.6, 77.4 และ 12.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ องค์ประกอบในของเหลวประกอบด้วยร้อยละของแกโซลีน 8.7 และแก๊สออยล์เบา 68.7 wt% และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ต่อน้ำมันถั่วเหลืองเป็น 3.0 โดยน้ำหนัก ปริมาณของเหลวที่ลดลงเหลือร้อยละ 63.9 โดยน้ำหนัก ในขณะที่แก๊สและของแข็งเพิ่มเป็นร้อยละ 16.8 และ 19.3 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบในของเหลวมีร้อยละของแกโซลีน 9.7 และแก๊สออยล์เบา 54.2 โดยน้ำหนัก และในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมินาต่อน้ำมันถั่วเหลืองร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ได้ปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งร้อยละ 12.1, 79.6 และ 8.3 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และขององค์ประกอบในของเหลวประกอบด้วยร้อยละของแกโซลีน 6.3 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สออกไซด์เบา 73.3 โดยน้ำหนัก พบว่าของเหลวที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสมีค่าความเป็นกรดต่ำกว่าของเหลวที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยา  $Al_2O_3$  ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด

**Junming, X. et al. (2010b)** ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโค เช่น น้ำมันตุง และน้ำมันสบู่ดำ ด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องภายใต้ความดันบรรยากาศ ภาวะที่ทำให้การทดลอง คือ อัตราการป้อนสารตั้งต้น 50 กรัมต่อชั่วโมง ใช้อุณหภูมิทำปฏิกิริยาต่อเนื่องระหว่าง 450 - 500 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อใช้น้ำมันตุงเป็นสารตั้งต้น ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ต่อน้ำมันตุงร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ได้ร้อยละของของเหลว 81 และของแข็ง 7.5 โดยน้ำหนัก ส่วนกรณีที่ใช้น้ำมันสบู่ดำเป็นสารตั้งต้น ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ต่อน้ำมันสบู่ดำร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ได้ร้อยละของของเหลว 76 และของแข็ง 10 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกโมเลกุลมีสมบัติคล้ายกับน้ำมันดีเซล

**Tani, H. et al. (2011)** ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันปาล์มด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา MgO บนตัวรองรับซิลิกา และ FCC ที่ใช้แล้ว ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องภายใต้ความดันบรรยากาศ ภาวะที่ทำให้ปฏิกิริยา คือ อัตราการป้อนสารตั้งต้น 13.5 กรัมต่อชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา MgO บนตัวรองรับซิลิกา ได้ร้อยละของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่ 5.1 ของเหลว 65.9 และของแข็ง 5.6 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เพราะตัวเร่งปฏิกิริยา MgO ส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ของกรดไขมันอิสระเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ที่ใช้แล้ว ได้ร้อยละของปริมาณแก๊ส 11.7 ของเหลว 48.3 โดยน้ำหนัก และของแข็ง 19.9 โดยน้ำหนัก

### บทที่ 3

## เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเพื่อหาภาวะที่ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีองค์ประกอบดีเซลสูงสุด โดยศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 70 มิลลิลิตร และใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมจากการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร โดยพิจารณาผลของปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ และแก๊สตัวพาไนโตรเจน ต่อร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์ของเหลว

### 3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี

1. น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วจากบริษัท เอเอสเค อินเทอร์เน็ต จำกัด (รูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการแตกโมเลกุล

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจากโรงงานกลั่นน้ำมันในประเทศก่อนการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความร้อน (รูปที่ 3.2)



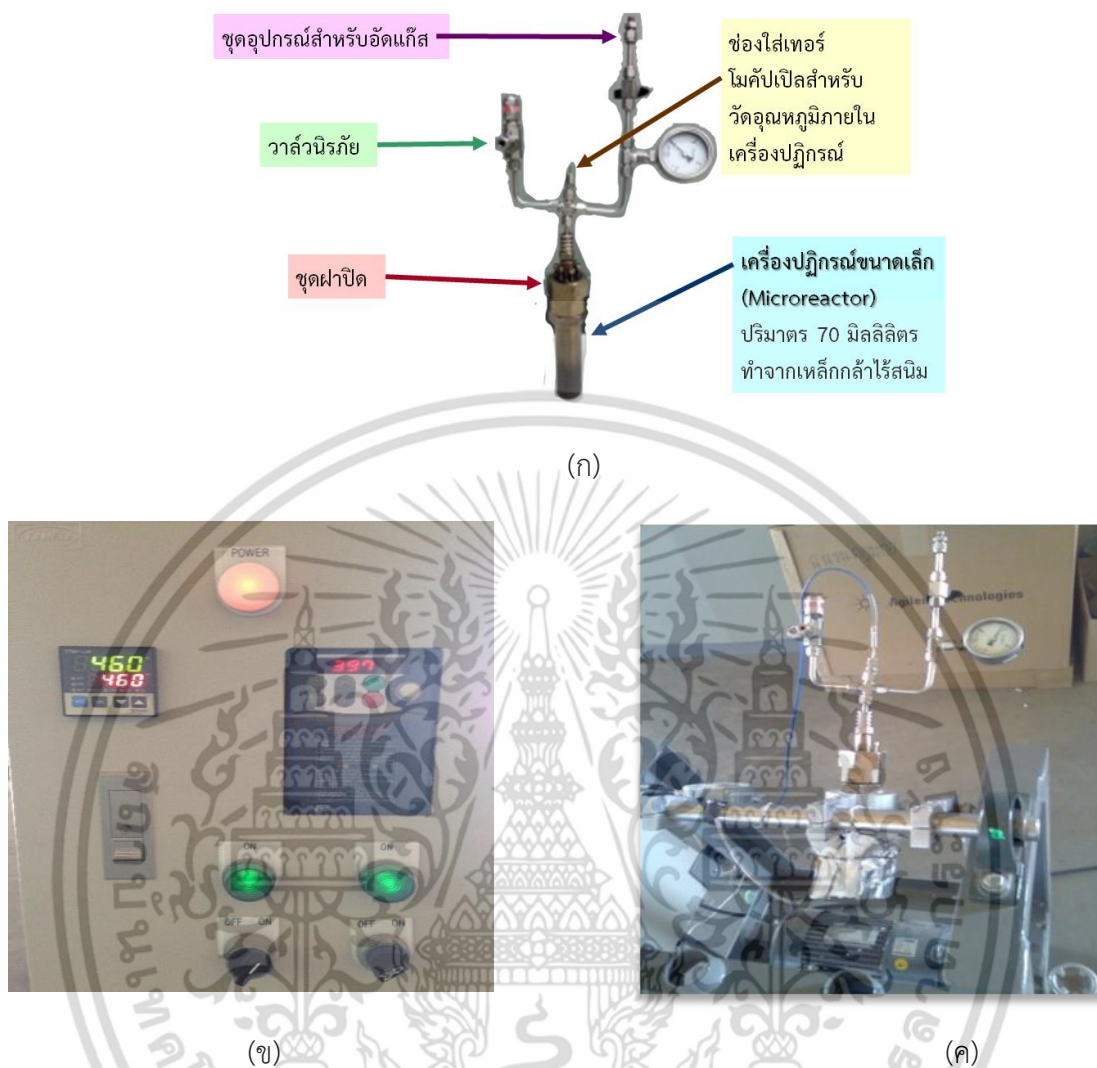
รูปที่ 3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.99% จากบริษัท บางกอกอินดัสเทรียล แก๊ส จำกัด
4. โทลูอีน (Toluene) เกรดการค้า จากบริษัท โกลบอล เคมี เทรดดิ้ง จำกัด
5. อะซีโตน (Acetone) เกรดการค้า จากบริษัท โกลบอล เคมี เทรดดิ้ง จำกัด

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องปฏิกรณ์ทรงกระบอกแบบกะ ปริมาตร 70 มิลลิลิตร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม SS 316 แสดงดังรูปที่ 3.3 (ก) ด้านบนฝาปิดต่อกับชุดอุปกรณ์สำหรับการอัดแก๊สและวาล์วนิรภัย สามารถใช้ได้ถึงอุณหภูมิสูงสุด 600 องศาเซลเซียส และความดันสูงสุด 10 เมกะพาสคัล การวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบเค (K-type) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร ทำงานร่วมกับชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ  $\pm 10$  องศาเซลเซียส ที่ต่อเข้ากับขดลวดความร้อน แรงเคลื่อนไฟฟ้า 230 โวลต์ และกำลัง 400 วัตต์ การแสดงผลของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ผ่านหน้าจอบทวิจิตอลดังรูปที่ 3.3 (ข) ชุดควบคุมการแกว่งของเครื่องปฏิกรณ์ดังรูปที่ 3.3 (ค)



รูปที่ 3.3 ชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (ชัยพร จิ้งโชติกะพิศิฐ. 2558)

(ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบกะปริมาตร 70 มิลลิลิตร (ข) ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและหน้าจอแสดงผลแบบดิจิทัล และ (ค) ชุดควบคุมการแกว่งของเครื่องปฏิกรณ์

2. เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม จัดวางในลักษณะแนวนอน คล้ายแคปซูล ภายในเครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วยไบควอนทำหน้าที่กระจายตัวเร่งปฏิกิริยากับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเพื่อเร่งปฏิกิริยาการแตกโมเลกุล เครื่องปฏิกรณ์สามารถทนความร้อนได้ถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.4 บริเวณด้านบนของตัวเครื่องปฏิกรณ์เชื่อมต่อเข้ากับชุดควบคุมดังนี้

2.1 เทอร์โมคัปเปิลแบบเค (K-type) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ อุณหภูมิประเก็นสองด้าน และอุณหภูมิแก๊สตัวพา โดยทำงานร่วมกับชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมอุณหภูมิการจ่ายกระแสไฟฟ้าในระดับ  $\pm 10$  องศาเซลเซียส ที่ต่อเข้ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดความร้อนเป็นแบบระบบฉีด (Injection) โดยมีแรงดัน 230 โวลต์ และกำลัง 400 วัตต์ เพื่อแสดงผลอุณหภูมิและความเร็วผ่านยังหน้าจอรระบบดิจิทัล

2.2 ชุดควบคุมแก๊สตัวพาแก๊สไนโตรเจน

2.3 ชุดอุปกรณ์ควบแน่นผลิตภัณฑ์ (Condenser) ประกอบด้วย ส่วนการแลกเปลี่ยนความร้อนของผลิตภัณฑ์ (Heat exchanger) แบบไหลสวนทางกัน ส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำที่มาจากหอทำความเย็น (Cooling tower)



รูปที่ 3.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร

3. ชุดกรองสูญญากาศสำหรับในกระบวนการแยกส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็ง ประกอบด้วยชุดเครื่องแก้วที่ต่อเข้ากับปั๊มดูดอากาศ ดังรูปที่ 3.5 เพื่อทำการแยกนั้นทำผ่านการกรองโดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว (Glass microfiber filter: GFP 40 mm)



รูปที่ 3.5 ชุดกรองสุญญากาศ

4. เครื่องสำหรับชั่งน้ำหนักละเอียด (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง)
5. เครื่องสำหรับชั่งน้ำหนักละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
6. นาฬิกาจับเวลา
7. ตู้อบความร้อน (Oven)
8. โถแก้วดูดความชื้น (Desiccator)
9. เต้าเผา
10. เครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ เช่น บีกเกอร์ กรวยกรอง แท่งแก้วคนสาร กระบอกตวง เป็นต้น
11. ขวดใส่ตัวอย่าง

### 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

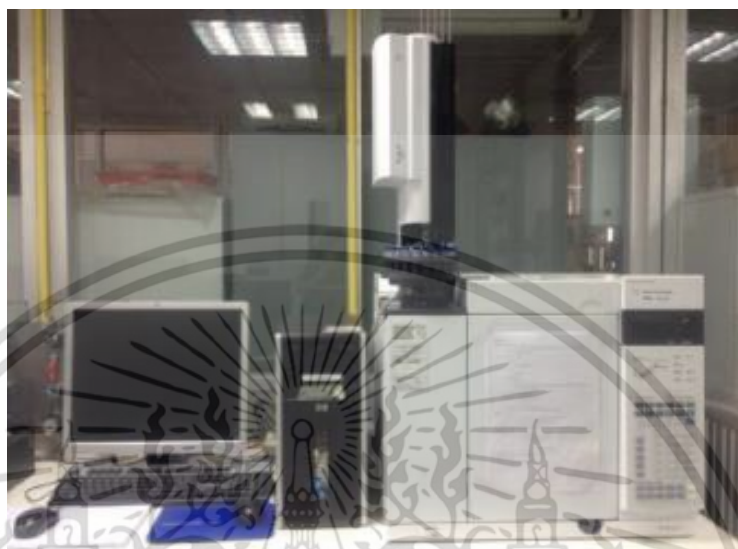
#### 3.3.1 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

1. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer: TGA) เป็นเครื่องมือสำหรับศึกษาสมบัติทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุกับเวลาหรือความร้อนที่เพิ่มขึ้นภายใต้บรรยากาศที่กำหนด

2. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated distillation gas chromatograph) Agilent รุ่น 7890A แสดงดังรูปที่ 3.6 ใช้วิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวประเภทปิโตรเลียมตามคาบจุดเดือดของสาร ตามมาตรฐาน ASTM D2887 (ตารางที่ 3.1) โดยมีเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ เป็นดีเทคเตอร์ โดยใช้คอลัมน์แบบแคปิลลารี (Capillary column) ขนาด 0.25 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 530 ไมครอน ความยาว 10 เมตร มีเฟสคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Stationary phase) เป็น Dimethylpolysiloxane ความหนาของชั้นฟิล์มของเฟสคงที่ที่อยู่ในคอลัมน์ขนาด 2.65 ไมครอน ซึ่งสามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิ - 60 ถึง 350 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7890A

ตารางที่ 3.1 การกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวปิโตรเลียมตามคาบจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887 (ปรามอทย์ ไทยเวท. 2548)

จุดเดือด (°C)	องค์ประกอบ	จำนวนคาร์บอน (อะตอม)
IBP ≤ 200	แนฟทา (Naphtha)	5 - 11
200 ≤ 250	เคโรซีน (Kerosene)	11 - 14
250 ≤ 370	ดีเซล (Diesel)	14 - 22
370 ≤ FBP	กากน้ำมันหนัก (Long residues)	> 22

หมายเหตุ IBP : Initial Boiling Point (จุดเดือดเริ่มต้น)

FBP : Final Boiling Point (จุดเดือดสุดท้าย)

3. เครื่องวัดความเป็นกรด - เบส (pH meter) Ultra basic benchtop รุ่น UB-10 (รูปที่ 3.7) สำหรับวัดความเป็นกรด-เบส ของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว โดยอาศัยหลักการของความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electrical potential) ที่เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดวัด (Indicator electrode) ซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายแล้วเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เป็นค่า pH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดความเป็นกรด - เบส (pH meter) ยี่ห้อ Ultra basic benchtop รุ่น UB-10

### 3.3.2 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

1. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (Surface area and porosimetry analyzer) ยี่ห้อ Micromeritic รุ่น ASAP2020 (รูปที่ 3.8) เครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาด และปริมาตรของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว โดยอาศัยหลักการการดูดซับแก๊สบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ การดูดซับของแก๊สเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่ว พื้นผิวไม่จำเพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งด้วย แก๊สไนโตรเจน ( $N_2$  physisorption)



รูป 3.8 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน Surface area and porosimetry analyzer ยี่ห้อ Micromeritic รุ่น ASAP2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometer: XRF) ยี่ห้อ Bruker รุ่น S8 Tiger (รูปที่ 3.9) สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว โดยอาศัยหลักการจะอาศัยหลักการของรังสีเอกซ์ โดยจะยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวเร่งปฏิกิริยาธาตุต่างๆที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาจะดูดกลืนรังสีเอกซ์แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คายหรือฟลูออเรสเซนซ์ออกมานั้นจะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยานั้นๆ โดยใช้ดีเทคเตอร์วัดค่าพลังงานที่ออกมาจากตัวอย่าง



รูปที่ 3.9 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometer: XRF) ยี่ห้อ Bruker รุ่น S8 Tiger

3. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance (รูปที่ 3.10) สำหรับใช้ในการวิเคราะห์รายละเอียดความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว โดยอาศัยหลักการอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาค จะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว สามารถแยกแยะประเภทและชนิดว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดโดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัด



รูปที่ 3.10 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

### 3.4 การดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วจากงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมา เพื่อเลือกภาวะที่จะใช้ในการทดลองให้เหมาะสม
2. วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการทดลอง
  - 2.1 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer เพื่อหาอุณหภูมิที่น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วมีอัตราการแตกโมเลกุลสูงสุด เพื่อกำหนดอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่จะศึกษา
  - 2.2 วิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ พร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887
  - 2.3 ค่าความเป็นกรด - เบส น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ด้วยเครื่อง Ultra basic benchtop รุ่น UB-10
3. จัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์การทดลองในกระบวนการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปรับสภาพพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

5. วิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความร้อน

5.1 วิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาด และปริมาตรของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเครื่อง Autosorb

5.2 วิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์

5.3 วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์

5.4 วิเคราะห์ความเป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

6. ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล ระดับ 2 (2-Level factorial experimental design) สำหรับการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว กำหนดตัวแปรที่ศึกษา ดังตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 - 5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 390 - 430 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 30 - 60 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน บาร์เกจ 5 - 1 ด้วยโปรแกรม Minitab 16

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

ตัวแปร		ระดับ	
		ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
A	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	1	5
B	อุณหภูมิ (°C)	390	430
C	เวลา (min)	30	60
D	ความดันของแก๊สไฮโดรเจน (barg)	1	5

หมายเหตุ : กำหนดค่าตัวแปรในช่วงใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นที่ผ่านมา

7. ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ และการกระจายตัวขององค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลว โดยการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

7.1 การแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 70 มิลลิลิตร

7.1.1 กรองของแข็งออกจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยกระดาษกรองใยแก้ว

7.1.2 ใช้ฟอยล์อะลูมิเนียมเ็นยมาทำถุงใส่กระดาษทิชชูและกระดาษกรองใยแก้วแล้วอบไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

7.1.3 ใส่น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วและตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วตามปริมาณที่ต้องการศึกษาลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ซึ่งน้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์ก่อนการทดลองแล้วประกอบส่วนต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์

7.1.4 ไล่อากาศที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ออกโดยผ่านแก๊สไฮโดรเจน 3 ครั้ง จากนั้นอัดแก๊สไฮโดรเจนตามความดันที่ต้องการศึกษา (น้ำหนักของแก๊สไฮโดรเจนน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักของแก๊สทั้งหมด)

7.1.5 ต่อเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ เทอร์โมคัปเปิล และขดลวดความร้อน จากนั้นหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง เปิดชุดควบคุมอุณหภูมิ ตั้งอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา และเริ่มจับเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาหลังจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา

7.1.6 ทำการทดลองที่อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390, 410 และ 430 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 30, 45 และ 60 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1, 3 และ 5 บาร์เกจ ดังตารางที่ 3.3

7.1.7 เมื่อถึงเวลาที่ต้องการศึกษา ถอดฉนวนและขดลวดให้ความร้อนออก ใช้พัดลมเป่าเครื่องปฏิกรณ์ให้อุณหภูมิต่ำๆ ลดลงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง เนื่องจากถ้าอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจะทำให้แก๊สและของเหลวจากการแตกโมเลกุลกลายเป็นของแข็งได้ จากนั้นปล่อยให้แก๊สที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ออก เนื่องจากถ้าปล่อยให้แก๊สที่อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้ไอบางส่วนที่ยังไม่ควบแน่นเป็นของเหลวถูกปล่อยออกไปด้วย

7.1.8 เปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ ชั่งน้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์หลังการทดลอง คำนวณปริมาณแก๊สที่ได้จากสมการที่ (3.1)

ปริมาณแก๊ส = น.น.ของเครื่องปฏิกรณ์ก่อนการทดลอง - น.น.เครื่องปฏิกรณ์หลังการทดลอง (3.1)

7.1.9 ชั่งน้ำหนักของฟอยล์อะลูมิเนียม ทิชชู และกระดาษกรองใยแก้ว ที่ถูกอบไล่ความชื้นแล้วจากข้อที่ 6.2 แล้วจึงแยกของเหลวออกจากของแข็งด้วยการกรองใยแก้วผ่านการกรองแบบสุญญากาศ ใช้โหลอินชิตล้างคราบน้ำมันที่ติดอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาบนกระดาษกรองใยแก้ว เช็ดทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะอาดเครื่องปฏิกรณ์ด้วยทิงซ์ จากนั้นนำของแข็ง กระดาษกรองใยแก้วและกระดาษทิงซ์ห่อด้วยพอยล์ อะลูมิเนียม อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนัก คำนวณปริมาณของแข็งที่ได้ จากสมการที่ (3.2)

ปริมาณของแข็ง = น.น.ของกระดาษกรองใยแก้ว กระดาษทิงซ์ พอยล์ ของแข็งหลังการอบ - น.น.ของกระดาษกรองใยแก้ว กระดาษทิงซ์ พอยล์ก่อนอบ - น.น.ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว (3.2)

#### 7.1.10 คำนวณปริมาณของเหลวที่ได้ จากสมการที่ (3.3)

ปริมาณของเหลว = น.น.ของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว - น.น.ของแก๊ส - น.น.ของของแข็ง (3.3)

7.1.11 ละลายของเหลวที่ได้ด้วยสารละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 100 โดยปริมาตร เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887 และคำนวณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้

7.1.12 วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองที่ภาวะที่ดีที่สุด ได้แก่

- ค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D240
- ความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445
- ค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D664

7.1.13 เปรียบเทียบกับน้ำมันน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการแตกโมเลกุลและน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม

7.2 การแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร

7.2.1 ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล ระดับ 2 (2-Level factorial experimental design) สำหรับการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว กำหนดตัวแปรที่ศึกษา ดังตารางที่ 3.3 ได้แก่ อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 3 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 50 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 30 และ 60 โดยปริมาตร ด้วยโปรแกรม Minitab 16

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

ตัวแปร		ระดับ	
		ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
A	อัตราการป้อนน้ำมัน (ml/min)	3	9
B	อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์ (%v/v)	50	60
C	อัตราการป้อนแก๊สตัวพา (ml/min)	50	150

หมายเหตุ : กำหนดค่าตัวแปรในช่วงใกล้เคียงกับงานวิจัยที่เคยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ของศูนย์การเรียนรู้และบริการวิชาการเครือข่ายแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี

7.2.2 ชั่งน้ำหนักน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง และชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วตามปริมาณที่ต้องการศึกษาลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

7.2.3 ต่อเครื่องปฏิกรณ์ ปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์และปิดฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง จากนั้นต่อเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์

7.2.4 เติมตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องแล้วปิดฝาให้เรียบร้อย

7.2.5 เปิดไบกวอนพร้อมป้อนแก๊สตัวพาด้วยอัตราที่ต้องการ โดยปรับตั้งค่าที่ชุดควบคุม หลังจากนั้นปรับกระแสไฟฟ้าจากหน้าจอบ่อยเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ชุดหลอดให้ความร้อน รอจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ

7.2.6 ทำการทดลองที่อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 3 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาการทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง อัตราการป้อนแก๊สตัวพา (แก๊สไนโตรเจน) 50 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 30 และ 60 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส

7.2.7 เริ่มทำการจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์คงที่ตามที่กำหนด เก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้ แยกผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวออกจากกากตะกอนของแข็งที่หลุดออกมา โดยการกรองผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยอุปกรณ์การกรองแบบสุญญากาศ ใช้กระดาษกรองเพื่อแยกส่วนที่เป็นของเหลว นำไปให้ความร้อนเพื่อระเหยน้ำที่เกิดการปนเปื้อนจากการเก็บผลิตภัณฑ์ เก็บผลิตภัณฑ์ของเหลวไว้ในขวด เพื่อรอการวิเคราะห์

7.2.8 นำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวละลายด้วยสารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 100 โดยปริมาตร เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887 และคำนวณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได

7.2.9 วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองที่ภาวะที่ดีที่สุดได้แก่

- ค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D240
- ความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445
- ค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D664

7.2.10 เปรียบเทียบกับน้ำมันน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการแตกโมเลกุลและน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม

7.2.11 คำนวณร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงของเหลว ดังสมการที่ (3.4 - 3.5)

$$\text{ร้อยละผลได้น้ำมัน (\% oil yield)} = \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้}}{\text{น้ำหนักสารตั้งต้น}} \times 100 \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละผลได้ของดีเซลทั้งหมด (\% overall diesel yield)} \\ = \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว} \times \text{ร้อยละผลได้องค์ประกอบในของเหลวที่เป็นดีเซล} \quad (3.5) \end{aligned}$$

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของตัวแปรต่อการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวต่อไป โดยหาภาวะการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ดีเซลสูงสุดในผลิตภัณฑ์ของเหลว

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการแตกโมเลกุล

##### 4.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการแตกโมเลกุล

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการแตกโมเลกุลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatograph) ตามมาตรฐาน ASTM D2887 แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการแตกโมเลกุลมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกากน้ำมันหนัก หรือ Long residues โดยพบมากถึงร้อยละ 88.49 โดยน้ำหนัก กากน้ำมันดังกล่าวเป็นสารไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ที่ยังไม่สามารถนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้ จึงจำเป็นต้องแตกโมเลกุลเพื่อให้ได้สารไฮโดรคาร์บอนที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น แนฟทา เคโรซีน และดีเซล

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการแตกโมเลกุล

จุดเดือด	องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)
IBP $\leq$ 200	แนฟทา (Naphtha) ( $C_5 - C_{11}$ )	2.62
200 $\leq$ 250	เคโรซีน (Kerosene) ( $C_{11} - C_{14}$ )	1.65
250 $\leq$ 370	ดีเซล (Diesel) ( $C_{14} - C_{22}$ )	4.47
370 $\leq$ FBP	กากน้ำมันหนัก (Long Residues) ( $> C_{22}$ )	88.49

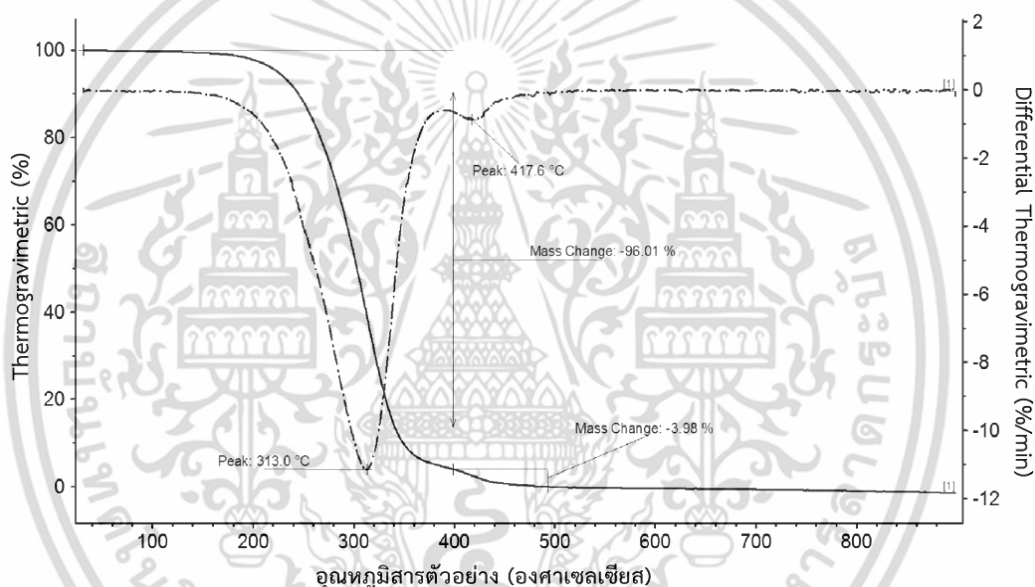
หมายเหตุ IBP : Initial Boiling Point (จุดเดือดเริ่มต้น)

FBP : Final Boiling Point (จุดเดือดสุดท้าย)

##### 4.1.2 สมบัติทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วก่อนการแตกโมเลกุล

รูปที่ 4.1 แสดงกราฟวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer) ช่วงจุดเดือดปกติของน้ำมันหล่อลื่นทั่วไปอยู่ระหว่าง 380 - 500 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองนี้เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านกระบวนการสันดาปด้วยความร้อนในเครื่องยนต์ และเครื่องจักรอุตสาหกรรม ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วนั้นเปลี่ยนแปลงไป จึงจำเป็นต้องศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยเทคนิคทางความร้อน พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วสลายตัวได้ที่อุณหภูมิ 345 องศาเซลเซียส และจะสลายตัวสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 417.6 องศาเซลเซียส สอดคล้องงานวิจัยของ อรริษา เอกสกุลบัณฑิต (2555) ซึ่งศึกษาการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยความร้อนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่าอุณหภูมิที่เริ่มแตกโมเลกุลและให้องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิงคือช่วงอุณหภูมิเริ่มต้น 380 – 450 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการทดลองนี้ อุณหภูมิที่จะใช้ในการทดลองคือ 390, 410 และ 430 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.1 กราฟวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer)

ตารางที่ 4.2 ค่าความเป็นกรด - เบส ของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน น้ำมันหล่อลื่นอุตสาหกรรมและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่ใช้ในการวิจัย

ชนิดน้ำมัน	ค่าความเป็นกรด - เบส
น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน	8
น้ำมันหล่อลื่นอุตสาหกรรม	8.5-9
น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำมันหล่อลื่นมีการเติมสารเติมแต่งและผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ทำให้มีค่าความเป็นกรดสูงขึ้นเนื่องจากกระบวนการสันดาปด้วยความร้อนและการสลายตัวของสารเติมแต่ง อีกทั้งการปนเปื้อนจากสารอื่น ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความเป็นกรด - เบส (pH) ของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในการวิจัย

## 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี

### 4.2.1 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometry: XRF)

พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ผ่านการใช้งานมาแล้วจะมีคราบสกปรกและโค้กเจือปนหรืออุดตันบริเวณรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา จึงจำเป็นต้องทำการปรับสภาพพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้พร้อมในการใช้งาน ซึ่งวิธีการปรับสภาพพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีหลายวิธี เช่น การปรับสภาพพื้นที่ผิวด้วยเคมี การปรับสภาพพื้นที่ผิวด้วยตัวทำละลาย หรือการใช้ความร้อนในการขจัดสิ่งสกปรกเพื่อปรับสภาพพื้นที่ผิว เป็นต้น ในที่นี้ใช้การเผาตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเพื่อปรับสภาพพื้นที่ผิวและกำจัดโค้กที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นส่วนสำคัญในการศึกษาการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากสารองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นตัวบ่งบอกสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ววิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แสดงดังตารางที่ 4.3 จากการวิเคราะห์พบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี คือ อะลูมินาและซิลิกา

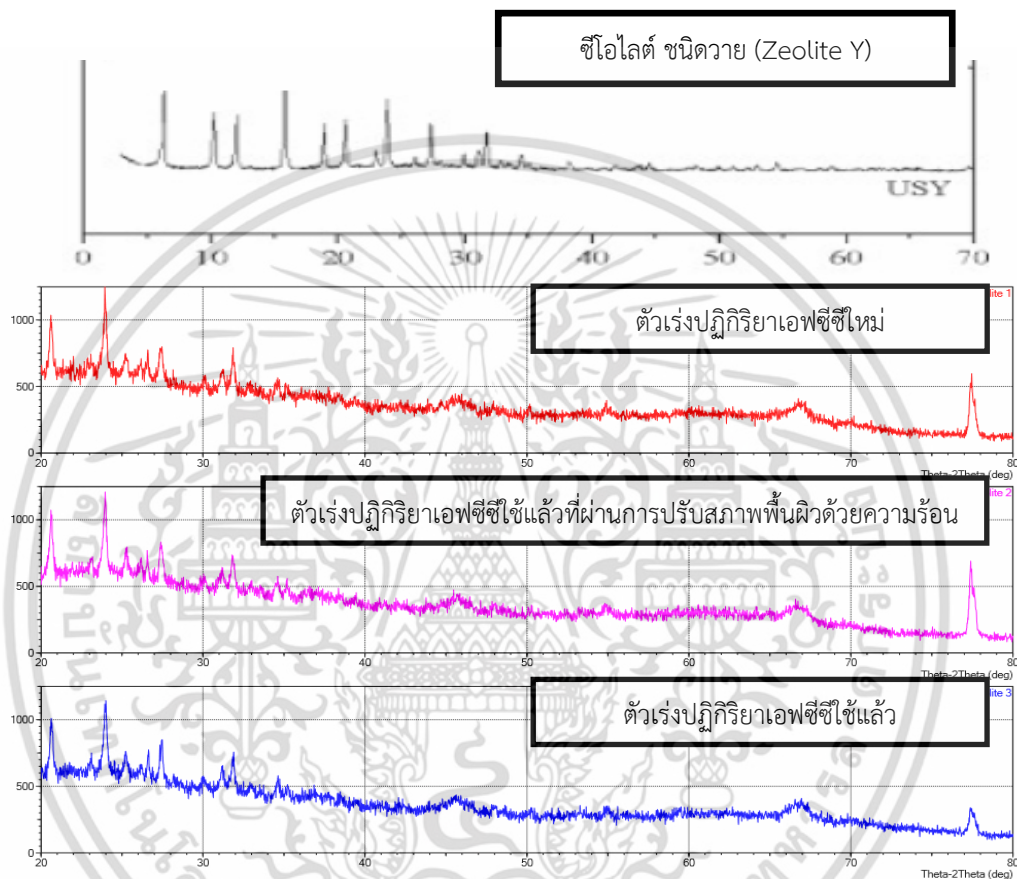
ตารางที่ 4.3 ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่ และตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นที่ผิวด้วยความร้อน

องค์ประกอบ	ตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่	ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้แล้วก่อนการปรับสภาพพื้นที่ผิว	ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้แล้วที่ปรับสภาพพื้นที่ผิวที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส
Al	45.48	49.7	43.71
Si	43.97	41.7	32.95
La	1.64	3.03	1.74
Ce	1.09	1.25	0.86
Fe	1.55	1.038	0.726
ธาตุอื่น	6.27	3.282	20.014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้พบว่า การปรับสภาพพื้นผิวด้วยการเผาทำให้องค์ประกอบหลักทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี คือ โลหะหนักชนิดอะลูมินา และซิลิกา ลดลง

#### 4.2.2 โครงสร้างผลึกของตัวเร่งเอพซีซีด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD)



รูปที่ 4.2 XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดวาย (Salahudeen, N. et al. 2014) เทียบกับ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่ และตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความร้อน

รูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่และตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวและตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ผลการวิเคราะห์พบว่า การปรับสภาพพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยการเผาไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก โดยวิเคราะห์จากรูปแบบของ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว และตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว พบว่าลักษณะ Peak ตำแหน่ง  $2\theta$  ระหว่าง 10 – 35 องศา และความเข้มของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Peak ใกล้เคียงกัน จากกราฟแสดงว่าการเผาทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้แล้วเกิดการปรับสภาพโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่ ซึ่งบ่งบอกถึงสมบัติเชิงคุณภาพที่ดีของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีในการทดลองนี้ด้วย ลักษณะ Peak ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีสอดคล้องกับลักษณะ Peak ตำแหน่ง  $2\theta$  ช่วงเดียวกันของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ชนิด วาย (Zeolite Y)

#### 4.2.3 พื้นที่ผิว ขนาด และปริมาตรของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีด้วยเทคนิค บรุนเนอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์: บีอีที (Brunauer, Emmett and Teller: BET Method)

พื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี สามารถวัดด้วยการวัด ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ ( $N_2$  physisorption) ลงบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วนำมา คำนวณโดยเข้าสู่ตรรกศาสตร์ของ BET เพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ผลการ วิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาด และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิว ขนาด และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่ และตัวเร่งปฏิกิริยา เอพซีซีใช้แล้วก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความร้อน

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวทั้งหมด (ตารางเมตรต่อกรัม)	ปริมาตรของรูพรุน (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่	111.33	0.17	366.49
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	101.50	0.09	364.34
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่ ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความร้อน	108.39	0.10	364.60

กระบวนการปรับสภาพพื้นผิวด้วยการเผาทำให้พื้นที่ผิวทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่ แต่ปริมาตรของรูพรุนและขนาดยังคงใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว

#### 4.2.4 ความเป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

การวัดความเป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิว แสดงดังตารางที่ 4.5 โดยใช้หลักการเปรียบเทียบการดูดซับและคายซับของแก๊สแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) บนตำแหน่งที่เป็นกรดและเบสบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

**ตารางที่ 4.5** การวัดความเป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนและหลังการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความร้อน

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	ความแรงของตำแหน่งกรด (มิลลิโมลของ H <sup>+</sup> /กรัม)
ตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่	0.49
ก่อนปรับสภาพ	0.24
หลังผ่านการปรับสภาพพื้นผิว	0.37

การปรับสภาพพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาใช้แล้วด้วยการเผาทำให้ความแรงของตำแหน่งกรดเพิ่มขึ้น แต่ยังไม่ใกล้เคียงกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่

### 4.3 ผลของตัวแปรของกระบวนการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะต่อร้อยละของแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว

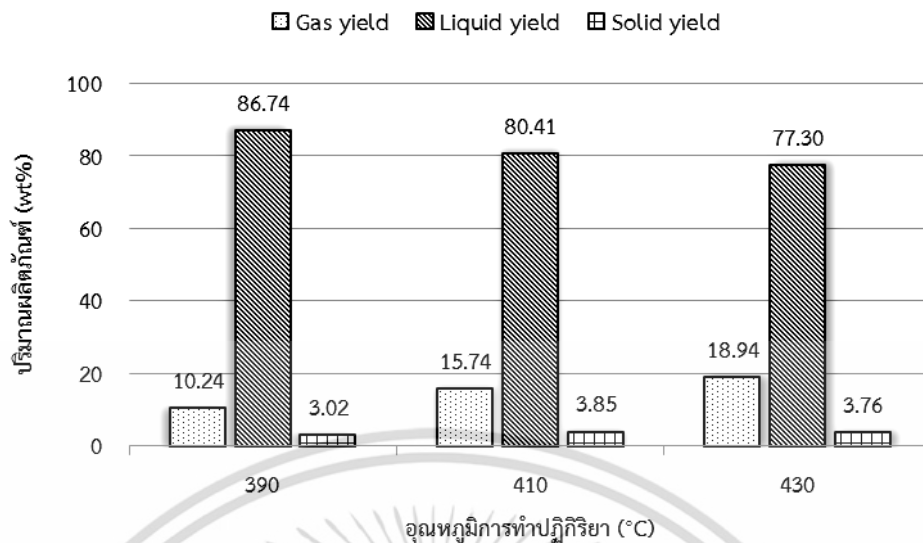
ตัวแปรที่ศึกษา คือ

- อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390, 410 และ 430 องศาเซลเซียส
- เวลาในการทำปฏิกิริยา 30, 45 และ 60 นาที
- ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1, 3 และ 5 บาร์เกจ
- อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก

#### 4.3.1 ผลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา

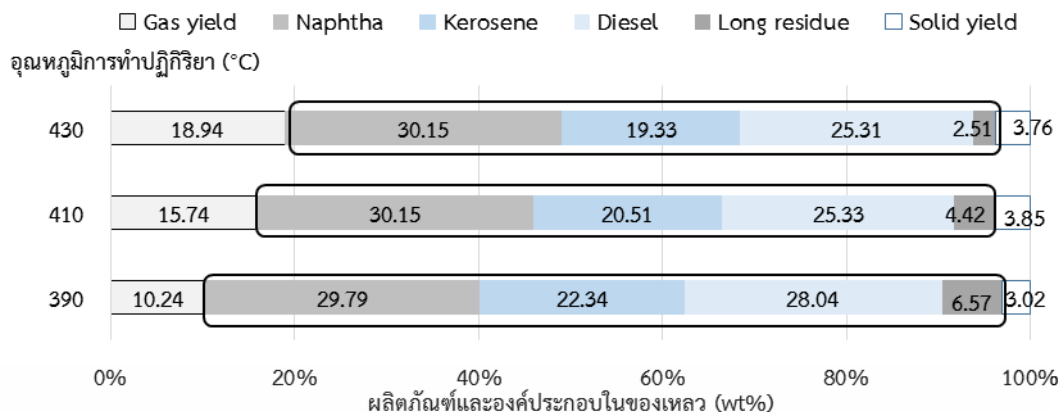
รูปที่ 4.3 แสดงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ พบว่าที่อุณหภูมิ 390, 410 และ 430 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 86.74, 80.41 และ 77.30 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 10.24, 15.74 และ 18.94 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากทั้งความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกลายเป็นโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น ซึ่งคือกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน ขณะเดียวกันสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลยาวเกิดการแตกโมเลกุลเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและเล็ก ซึ่งโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กล่าอาจเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน C<sub>1</sub> – C<sub>4</sub> (ประชาติร์ตัน แต่ภักดี. 2547; ปราโมทย์ไชยเวช. 2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็งที่เวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ

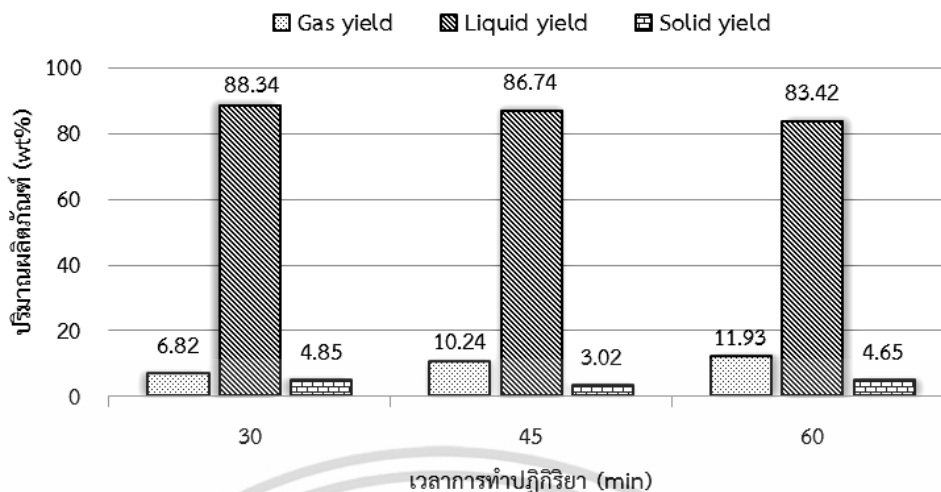
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ดังรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางจำพวกดีเซลและเคโรซีนมากขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาจะแตกโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กกลายเป็นแนฟทา ที่อุณหภูมิ 390, 410 และ 430 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลร้อยละ 28.40, 25.33 และ 25.32 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในที่นี้องค์ประกอบในของเหลวที่เป็นดีเซลเป็นปริมาณที่สนใจในงานวิจัยนี้ ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมงานวิจัยนี้ในการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วคือ อุณหภูมิที่ 390 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 86.74 โดยน้ำหนัก และมีองค์ประกอบดีเซลร้อยละ 28.04 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ

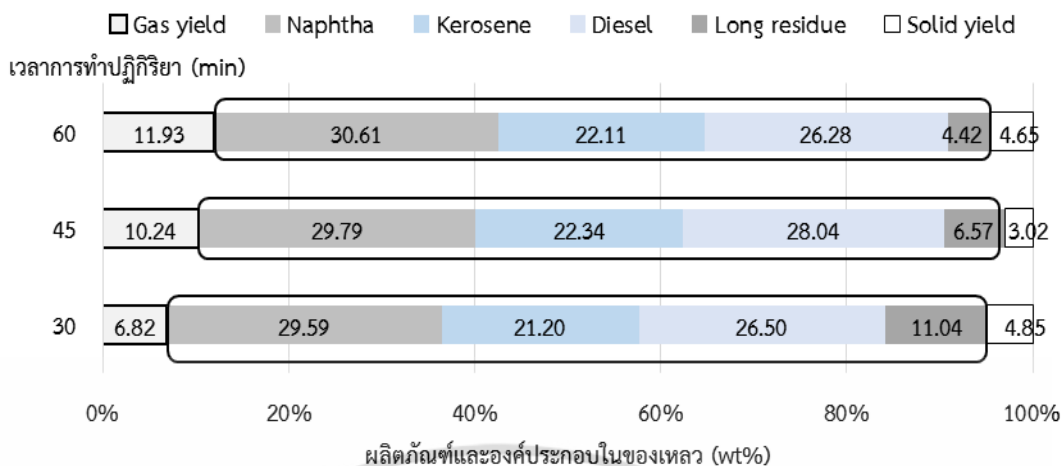
#### 4.3.2 ผลของเวลาการทำปฏิกิริยา

รูปที่ 4.5 แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณร้อยละแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 30, 45 และ 60 นาที อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพิซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ พบว่าได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเป็นร้อยละ 88.34, 86.74 และ 83.42 ตามลำดับ เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง แต่ได้ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากการให้ความร้อนแก่ระบบเป็นเวลานาน จะส่งผลให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวเกิดการแตกโมเลกุลขนาดกลาง และตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในการส่งเสริมการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กซึ่งเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน



รูปที่ 4.5 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และความดันของแก๊สไฮโดรเจน เริ่มต้น 1 บาร์เกจ

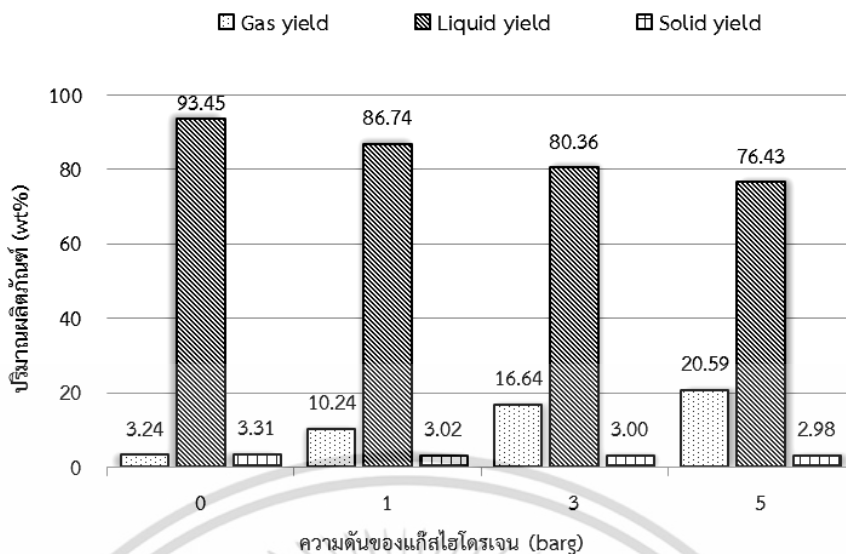
จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ได้องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลสูงสุตร้อยละ 28.04 โดยน้ำหนัก เนื่องจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น จะทำให้สารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่เกิดการแยกสลายเป็นโมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็กมากขึ้น เวลาในการทำปฏิกิริยาพอเหมาะจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกโมเลกุล ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 30 นาที สารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่แตกโมเลกุลเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางซึ่งยังไม่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเนื่องจากเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอ แต่เมื่อเพิ่มเวลาการทำปฏิกิริยาเป็น 45 นาที โมเลกุลสายประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางเกิดการแตกโมเลกุลต่อเนื่องจนได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคือดีเซล และเมื่อเพิ่มเวลาการทำปฏิกิริยาเป็น 60 นาที สารไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางแตกโมเลกุลต่อเนื่องจนเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กที่เป็นแก๊ส ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาสำหรับงานวิจัยนี้ คือ 45 นาที องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นเคโรซีน และดีเซลสูงสุดที่ร้อยละ 22.34 และ 28.04 โดยน้ำหนักตามลำดับ



**รูปที่ 4.6** ผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ

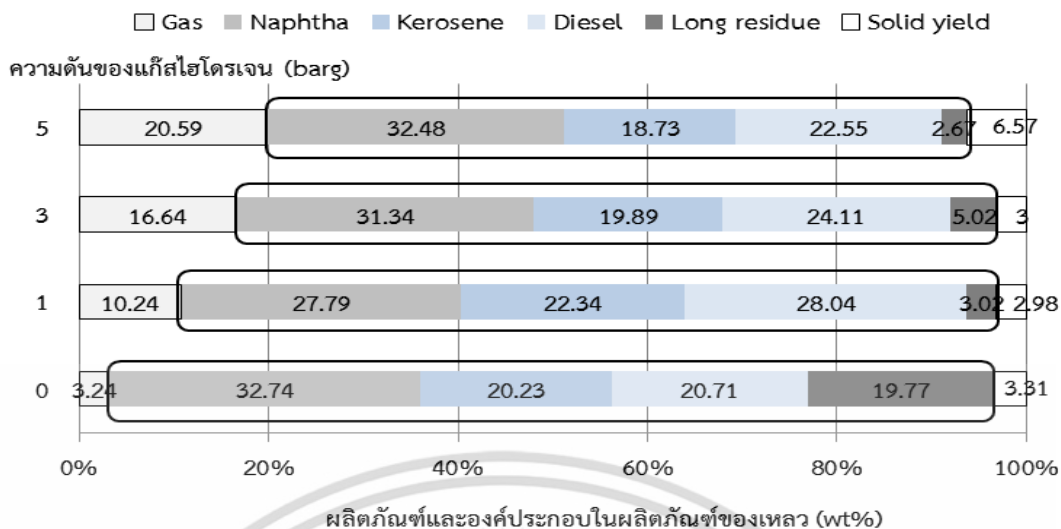
#### 4.3.3 ผลของความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นในการทำปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลของความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 0, 1, 3 และ 5 บาร์เกจในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณร้อยละแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พบว่า ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลโดยไม่เติมแก๊สไฮโดรเจน สูงกว่าการแตกโมเลกุลโดยการเติมแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ 1, 3 และ 5 บาร์เกจ ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลว 93.45, 86.74, 80.36 และ 76.43 ตามลำดับ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจน (Hydrocracking) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วให้ดีขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีโมเลกุลขนาดกลางแตกเป็นโมเลกุลขนาดเล็กดีขึ้น เมื่อเพิ่มความดันปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอนจึงมากขึ้นแต่ปริมาณของเหลวลดลง



รูปที่ 4.7 ผลของความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

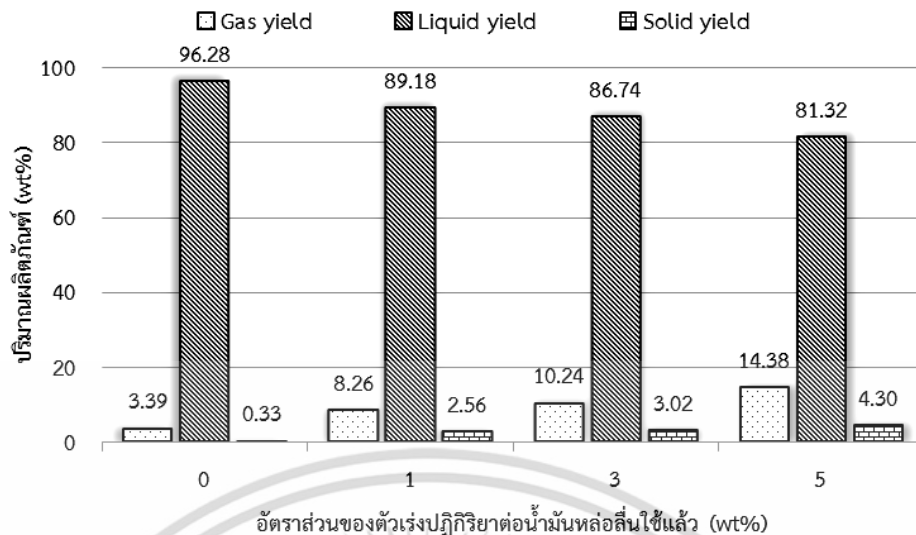
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทำปฏิกิริยาโดยการไม่เติมและเติมแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ 1, 3 และ 5 บาร์เกจ แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ ได้องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลสูงสุตร้อยละ 28.04 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบการไม่เติมแก๊สไฮโดรเจนได้องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลร้อยละ 20.71 โดยน้ำหนัก และร้อยละของกาน้ำมันหนักสูงถึง 19.77 โดยน้ำหนัก ดังนั้นความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้คือ ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ 1 บาร์เกจ ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 86.74 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีองค์ประกอบของเคโรซีนและดีเซลสูงสุดที่ร้อยละ 22.34 และ 28.04 โดยน้ำหนัก



**รูปที่ 4.8** ผลของความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

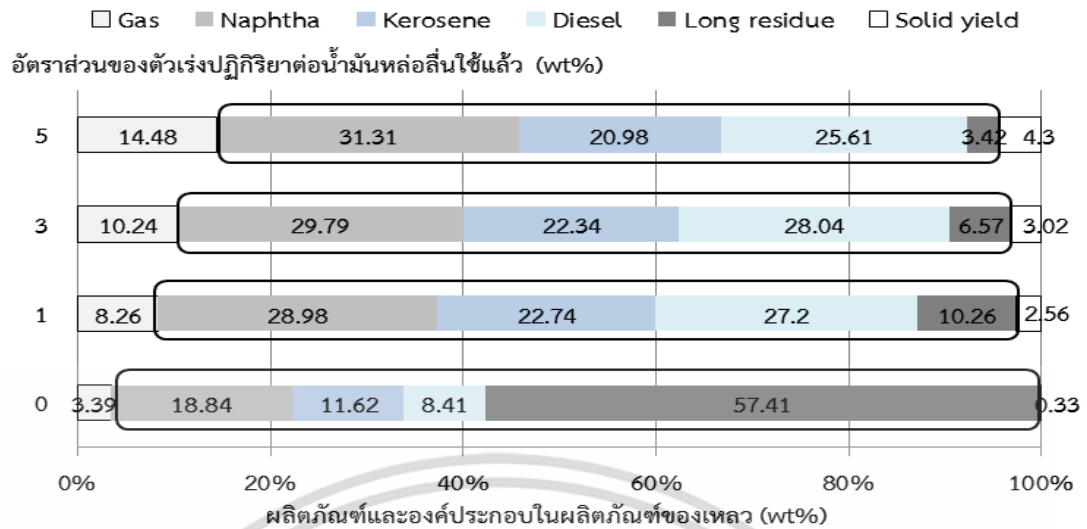
#### 4.3.4 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในการทำปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณร้อยละแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ 1 บาร์เกจ เปรียบเทียบกับการเติมและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อไม่เติมตัวเร่ง และเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก เป็น 96.28, 89.18, 86.74 และ 81.32 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจะมีบทบาทในการแตกโมเลกุลของสารตั้งต้นให้เป็นสารผลิตภัณฑ์ได้มาก ทำให้สารตั้งต้นโมเลกุลขนาดใหญ่แตกตัวกลายเป็นโมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็กลงจนเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนในปริมาณที่มากขึ้นจึงทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง



**รูปที่ 4.9** ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทำปฏิกิริยาโดยไม่เติมและเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ได้ร้อยละขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลสูงสุด 28.04 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับการแตกโมเลกุลโดยไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งได้ร้อยละขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลเป็น 8.41 โดยน้ำหนัก การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีพื้นที่ผิว และความเป็นกรดบนผิวช่วยให้เกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้มากขึ้นเพื่อทำให้ไฮโดรคาร์บอนขนาดโมเลกุลใหญ่แตกตัวเป็นขนาดเล็กลงได้ดีขึ้น แต่หากเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วนมากเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลขนาดใหญ่เป็นโมเลกุลขนาดเล็กได้เพิ่มขึ้นเกิดเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน ผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง ดังนั้นอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ คือ อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 86.74 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีองค์ประกอบของดีเซลร้อยละ 28.04 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.10 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในการทำปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ

#### 4.3.5 ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซล จากการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

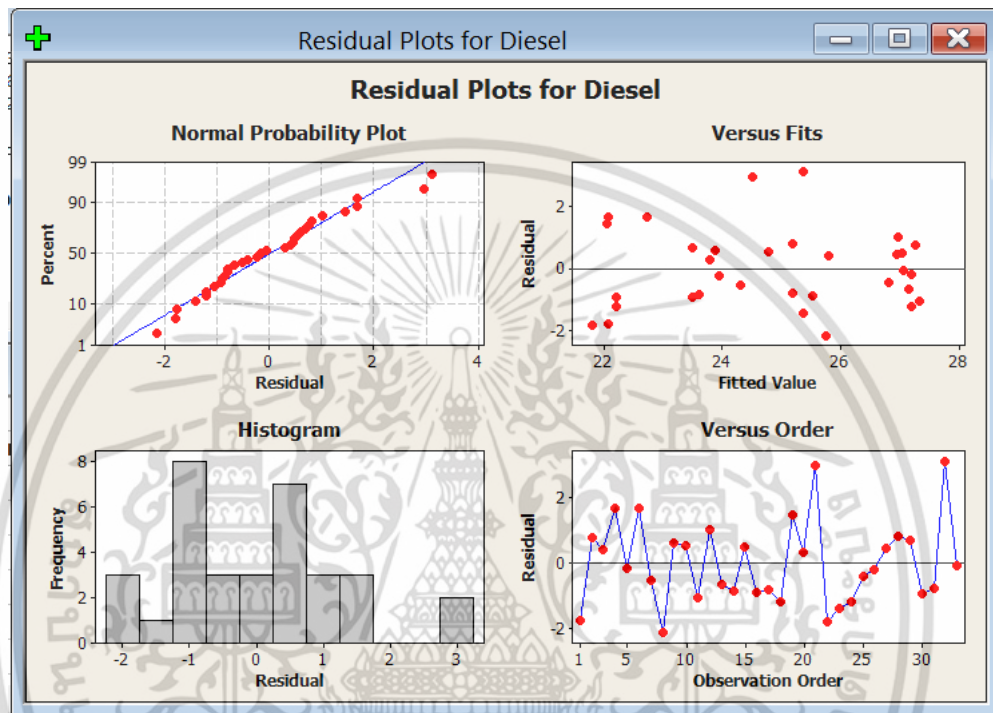
จากบทที่ 3 ได้มีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ (2-Level factorial experimental design) โดยใช้โปรแกรม Minitab 16 มีทั้งหมด 4 ตัวแปร ดังนี้ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา เวลาการทำปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว เมื่อวิเคราะห์โดยโปรแกรมพบว่าต้องทำการทดลองทั้งหมด 36 ครั้ง ข้อมูลดังภาคผนวก (ก) และนำผลการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซล และการศึกษาภาวะที่ได้องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลจากการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

จากการออกแบบการทดลองเพื่อดูแนวโน้มของการทำการทดลอง พบว่าร้อยละองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลที่ร้อยละ 20.04 - 28.04 โดยน้ำหนัก เมื่อพล็อตกราฟ Residual plots ดังรูปที่ 4.11 พบว่า กราฟ Normal probability plot แสดงการกระจายตัวของผลการทดลองในแนวโน้มเข้าหาเส้นปกติ (Idea normal) กราฟ Versus fits แสดงการกระจายตัวของข้อมูลแบบสมมาตรในแนวแกนนอน แต่มีการกระจายตัวของข้อมูลออกจากเส้นปกติในบางค่าเล็กน้อย กราฟ Histogram แสดงข้อมูลที่มีแนวโน้มของกราฟแท่งในรูปแบบเป็นเส้นโค้งระฆังคว่ำปกติ พบความถี่ของชั้นข้อมูลที่เบี่ยงเบนไปเล็กน้อย แต่ยังอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ที่ค่าเฉลี่ยโดยส่วนใหญ่อยู่

บริเวณตรงกลางของกราฟ และกราฟ Versus order แสดงข้อมูลที่มีกระจายแบบสุ่มและมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อผู้ลงทะเบียนเข้าใช้งานเอกสารนี้ ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยฯ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายบริการลูกค้า

กระจายตัวอย่างสมมาตรรอบค่ากลางแสดงว่าผลการวิเคราะห์ที่อยู่ภายใต้ความแปรผันจากสาเหตุธรรมชาติ จากข้อมูลการกระจายตัวของกราฟสรุปว่า การกระจายตัวของผลการวิเคราะห์การแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ กระจายตัวแบบปกติ แต่มีการกระจายตัวของข้อมูลออกจากเส้นปกติเล็กน้อย เนื่องจากการแปรผันจากสาเหตุธรรมชาติ



รูปที่ 4.11 กราฟ Residual plots แบบ Four in one ของข้อมูลร้อยละผลได้ขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลที่ได้จากการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

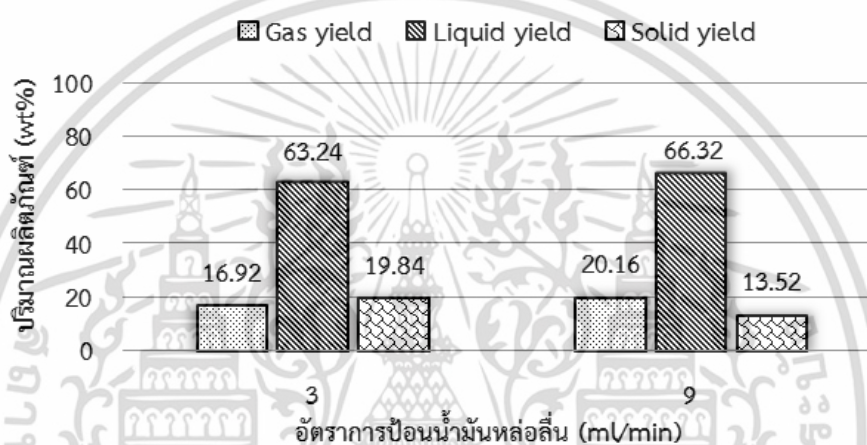
4.4 ผลของตัวแปรของกระบวนการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องต่อร้อยละของแก๊สผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ตัวแปรที่ศึกษาคือ

- อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 3 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาที
- อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 30 และ 60 โดยปริมาตร
- อัตราการป้อนแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) 50 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

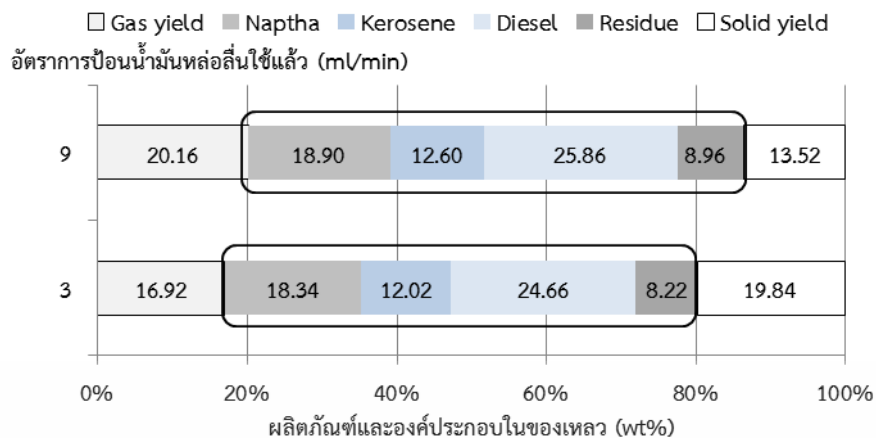
#### 4.4.1 ผลของอัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในการทำปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเริ่มต้น 3 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วร้อยละ 60 โดยปริมาตร พบว่าอัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ที่ 9 มิลลิลิตรต่อนาที ได้แก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุด และกากของแข็งร้อยละ 20.16, 66.32 และ 13.52 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่ออัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเป็นการเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเกิดเป็นแก๊ส และผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4.12 ผลของอัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วต่อปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 60 โดยปริมาตร และแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) 50 มิลลิลิตรต่อนาที

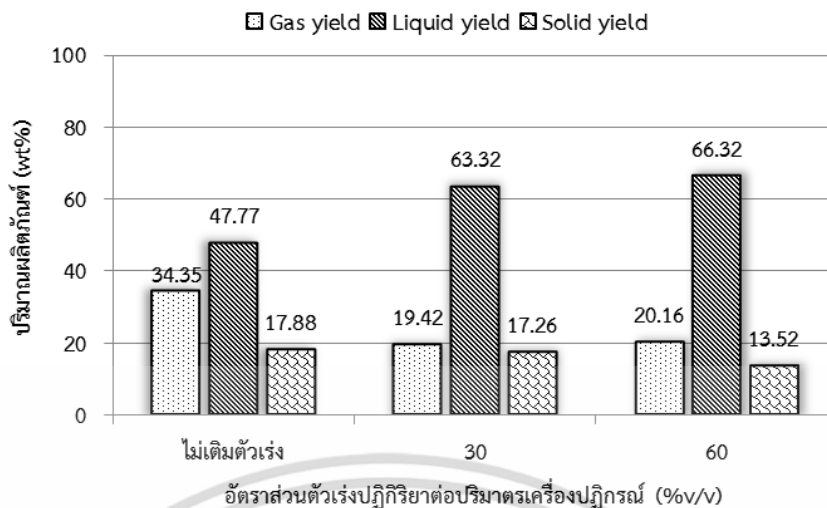
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ดังรูปที่ 4.13 พบว่าที่อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว 9 มิลลิลิตรต่อนาที ได้องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลสูงสุตร้อยละ 25.86 โดยน้ำหนัก ซึ่งสูงกว่าอัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่ 3 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากการเพิ่มอัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วนอกจากจะส่งผลต่อปริมาณแก๊ส และผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นแล้ว ยังส่งผลต่อองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ให้กลายเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็ก ดังนั้นอัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เหมาะสมที่ให้ผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดคือ อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่น 9 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 66.32 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีองค์ประกอบของดีเซลร้อยละ 25.86 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.13 ผลของอัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วต่อผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อขนาด เครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 60 โดยปริมาตร และแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) 50 มิลลิลิตรต่อนาที

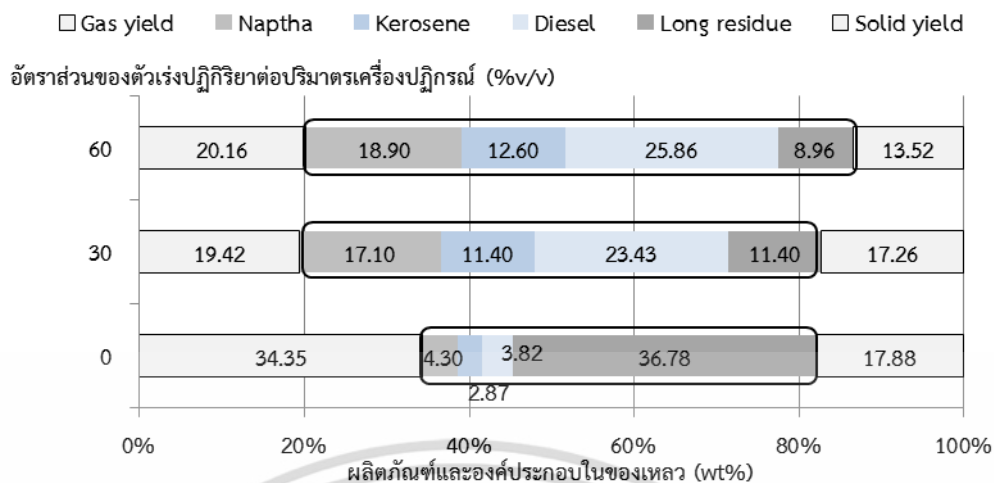
#### 4.4.2 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วในการทำปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเริ่มต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) 50 มิลลิลิตรต่อนาที และเปรียบเทียบกับไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากับเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 30 และ 60 โดยปริมาตร พบว่าอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 60 โดยปริมาตร ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดร้อยละ 66.32 โดยน้ำหนัก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากขึ้นจะส่งผลต่อการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วได้ดีขึ้น เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้าไปมีบทบาทในการแตกโมเลกุลของสารตั้งต้นที่เป็นโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารผลิตภัณฑ์โมเลกุลขนาดเล็กลง จึงทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้น



**รูปที่ 4.14** ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 9 มิลลิลิตรต่อนาที องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) 50 มิลลิลิตรต่อนาที

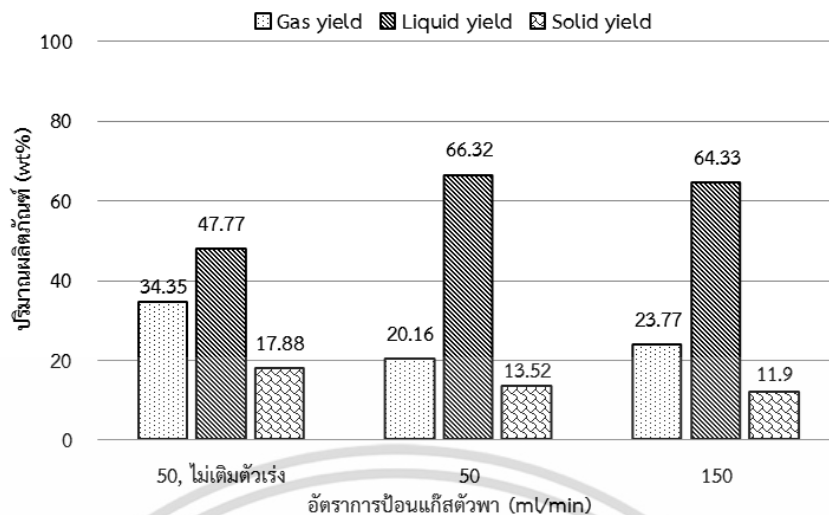
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวดังรูปที่ 4.15 พบว่าที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 60 โดยปริมาตร ได้องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลสูงสุทธ้อยู่ที่ 25.86 โดยน้ำหนัก หากเปรียบเทียบกับผลการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลร้อยละ 3.82 โดยน้ำหนัก เนื่องจาก ปฏิกิริยาที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกลไกที่เกิดขึ้นจะมีเพียงการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียว ในขณะที่การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งเสริมการแตกโมเลกุลของสารโมเลกุลขนาดกลางที่ได้จากการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนในช่วงแรกให้มีขนาดเล็กลงไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจำพวกดีเซลมากขึ้น ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 60 โดยปริมาตร ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 66.32 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีองค์ประกอบของดีเซลร้อยละ 25.86 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.15 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 9 มิลลิลิตรต่อนาที องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) 50 มิลลิลิตรต่อนาที

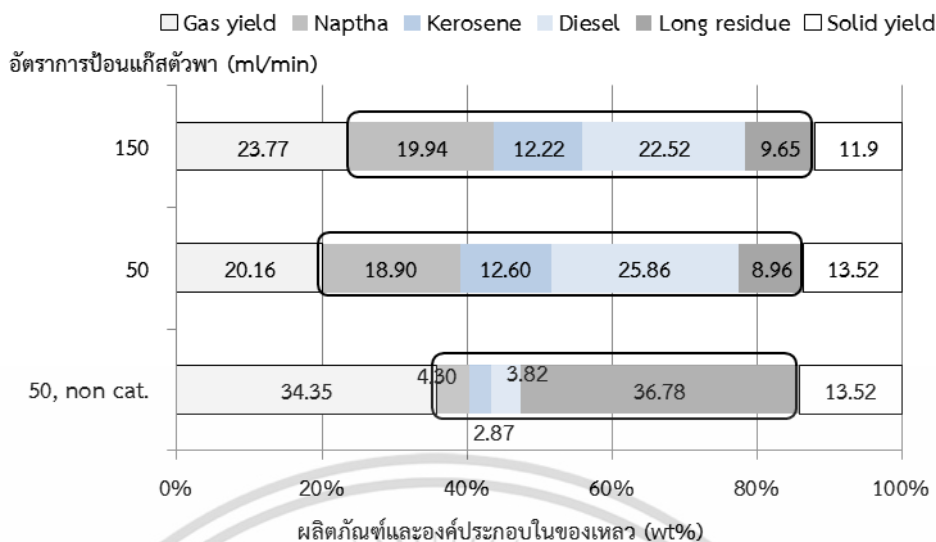
#### 4.4.3 ผลของอัตราการป้อนแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) ในการทำปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 9 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการป้อนแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) 50 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าที่อัตราการป้อนแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) 50 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดร้อยละ 66.32 โดยน้ำหนัก และเมื่อทำการเพิ่มอัตราการป้อนแก๊สตัวพาเป็น 150 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากการเติมปริมาณแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) ที่มากเกินไปทำให้การแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วขนาดโมเลกุลใหญ่เป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่เป็นแก๊ส ทำให้ได้ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง ซึ่งการเติมแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) ร่วมกับการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยส่งเสริมให้อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์เร็วขึ้น ลดเวลาในการทำปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงกว่าการแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยแก๊สตัวพาเพียงอย่างเดียว



**รูปที่ 4.16** ผลของอัตราการป้อนแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) ต่อปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 9 มิลลิลิตรต่อนาที เซลเซียส และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 60 โดยปริมาตร

จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ดังรูปที่ 4.17 พบว่าที่อัตราการป้อนแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) 50 มิลลิลิตรต่อนาที ได้องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลสูงสุดร้อยละ 25.86 โดยน้ำหนัก และเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการป้อนแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) 150 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นผลมาจากการทดลองในอุณหภูมิคงที่แก๊สตัวพา ( $N_2$ ) ที่เติมเข้าไปนั้น ช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลได้เป็นอย่างดี และเมื่อมีความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยทำให้เกิดการแตกโมเลกุลได้อย่างสมบูรณ์ แต่หากเติมแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) ในปริมาณมากจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่ลดลง ดังนั้นอัตราการป้อนแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) ที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้คือ อัตราการป้อนแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) ที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 66.32 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีองค์ประกอบของดีเซลร้อยละ 25.86 โดยน้ำหนัก

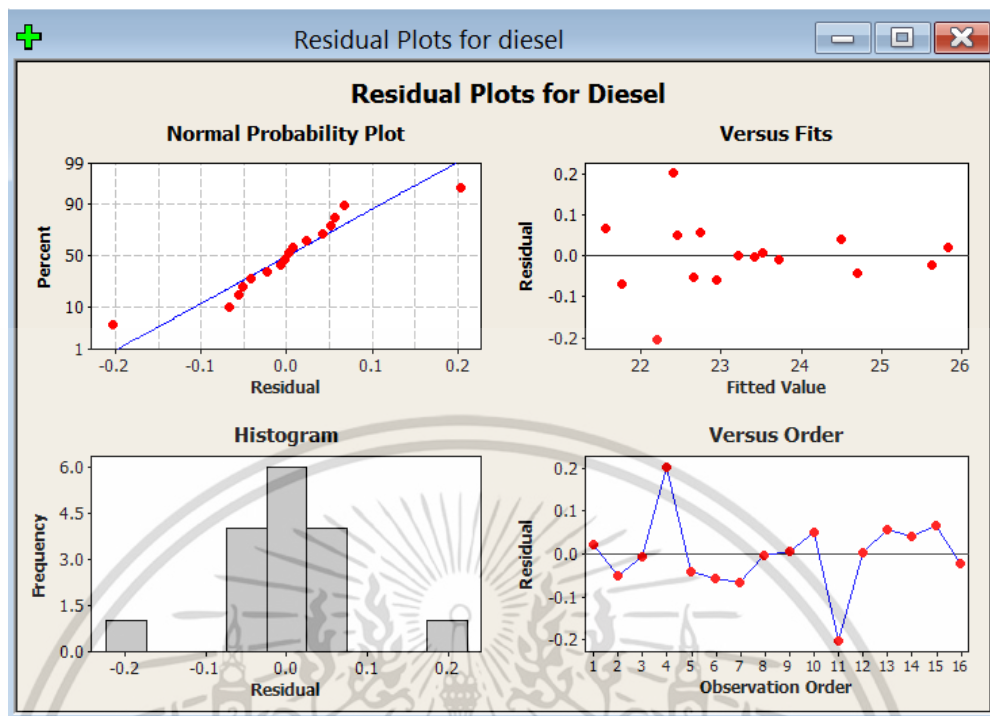


รูปที่ 4.17 ผลของอัตราการป้อนแก๊สตัวพา ( $N_2$ ) ต่อปริมาณผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 9 มิลลิลิตรต่อนาที เซลเซียส และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อขนาดเครื่องปฏิกรณ์ร้อยละ 60 โดยปริมาตร

#### 4.4.4 ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซล จากการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

การวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซล และการศึกษาภาวะที่ได้องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลจากการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ (2-Level factorial experimental design) โดยใช้โปรแกรม Minitab 16 พบว่าร้อยละองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลที่ร้อยละ 20.43 – 25.86 โดยน้ำหนัก เมื่อพล็อตกราฟ Residual plots ดังรูปที่ 4.18 พบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ ดังนั้นกราฟ Normal probability plot แสดงให้เห็นว่าข้อมูลเรียงตามเส้นแนวโน้มที่ใกล้เคียงเส้นปกติ แสดงว่าค่าการกระจายของผลการวิเคราะห์มีการกระจายตัวสม่ำเสมอและใกล้เคียงกัน กราฟ Versus fits แสดงกระจายตัวของข้อมูลแบบไม่สมมาตร และไม่เสถียรของค่าความแปรปรวน กราฟ Histogram แสดงข้อมูลกราฟแท่งที่มีรูปแบบเส้นโค้งระฆังคว่ำปกติ และกราฟ Versus order แสดงข้อมูลที่มีกระจายแบบสุ่มและมีการกระจายตัวอย่างสมมาตรรอบค่ากลาง แสดงว่าผลการวิเคราะห์ที่อยู่ภายใต้ความแปรผันจากสาเหตุธรรมชาติ จากข้อมูลการกระจายตัวของกราฟทั้งหมดสรุปว่า การกระจายตัวของผลการวิเคราะห์การแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง กระจายตัวแบบปกติ แต่มีการกระจายตัวของข้อมูลออกจากเส้นปกติเล็กน้อย เนื่องจากการแปรผันจากสาเหตุธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟ Residual plots แบบ Four in one ของข้อมูลร้อยละผลได้อังคค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลจากการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

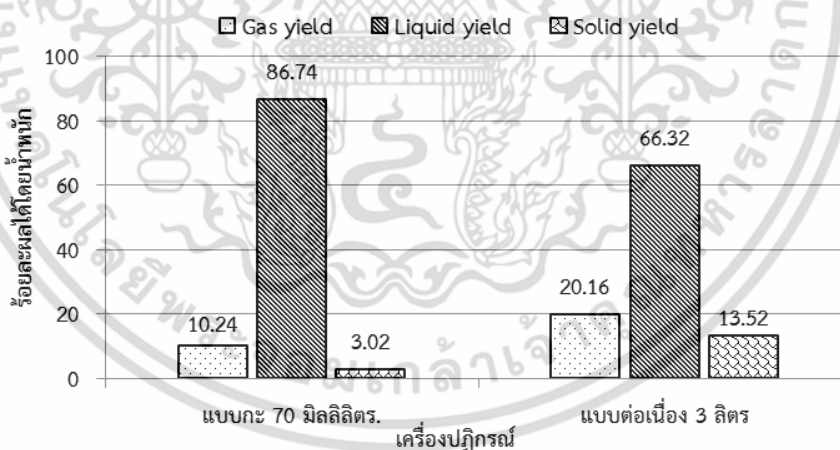
#### 4.5 เปรียบเทียบปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และองคค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง

การเปรียบเทียบดังกล่าวนี้เป็นการเปรียบเทียบปริมาณของผลิตภัณฑ์และองคค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการแตกโมเลกุลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ทำการเปรียบเทียบได้แก่ ผลิตภัณฑ์ของเหลว และองคค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซล ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง

ตัวแปร	เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
อัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	33 : 1 กรัม	1 : 1.12 กรัม
ชนิดของแก๊สตัวพา/ความดันแก๊สเริ่มต้น	ของแก๊สไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> )	แก๊สไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )

จากรูปที่ 4.19 พบว่าการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงกว่าการแตกโมเลกุลในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องคือ ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวย้อยละ 86.74 และ 66.32 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ คิดเป็นอัตราส่วนการเพิ่มร้อยละ 30.79 โดยน้ำหนัก เนื่องจากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่แตกโมเลกุลได้เป็นแก๊สและของแข็ง โดยอัตราส่วนการเพิ่มของปริมาณแก๊สและของแข็งคิดเป็นร้อยละ 49.2 และ 77.66 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากพื้นที่การเกิดปฏิกิริยาและเวลาการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวเป็นสายโซ่สั้นเพิ่มขึ้นอีก

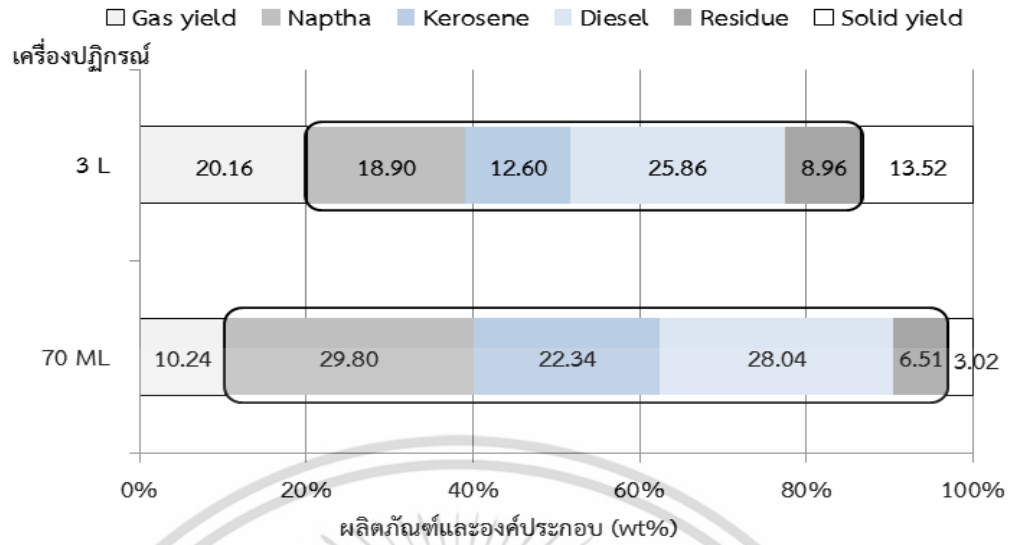


รูปที่ 4.19 ผลของปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง จากแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส

การแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะกับเครื่องปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง พบปริมาณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลสูงสุตร้อยละ 28.04 และ 25.86 โดยน้ำหนัก คิดเป็นอัตราส่วนการเพิ่มร้อยละ 8.43 โดยน้ำหนัก และได้ปริมาณกากน้ำมันหนักเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละ 6.51 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลสูงขึ้น แต่หากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปกับปริมาณสารตั้งต้น ซึ่งในที่นี้คือน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วน้อยกว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนเกิดการทำปฏิกิริยากันเองได้แก๊สเพิ่มขึ้น และร้อยละของของเหลวและองค์ประกอบในของเหลวที่เป็นดีเซลและผลิตภัณฑ์อื่นๆน้อยลง

จากรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าทั้งปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ที่ได้จากการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ขนาด 70 มิลลิลิตร ให้ผลิตภัณฑ์ในเชิงปริมาณมากกว่าการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร เนื่องมาจากปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่มากเกินไปกับน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาบางส่วนเกิดการทำปฏิกิริยากันเอง สารตั้งต้นที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วมีปริมาณน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดความไม่สมดุลในการทำปฏิกิริยาส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วน้อยลง และการเติมแก๊สไฮโดรเจนช่วยส่งเสริมการแตกโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ดีกว่าการเติมแก๊สไนโตรเจน อย่างไรก็ตามเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องดำเนินการทดลองของแก๊สตัวพาที่ความดันสูง จึงจำเป็นต้องใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวพาเพื่อความปลอดภัย และปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลวและองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้น ปริมาณใกล้เคียงกับการแตกโมเลกุลโดยเติมแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เชษฐา จีระชญานิษฐ์. (2555) ศึกษาการไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่าการป้อนแก๊สไนโตรเจนซึ่งเป็นแก๊สตัวพา ช่วยส่งเสริมการแตกโมเลกุลของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วที่เป็นกากน้ำมันหนักได้เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.20 ผลของปริมาณของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวจากแตกโมเลกุล น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบต่อเนื่อง

องค์ประกอบ		ก่อนการแตกโมเลกุล	หลังการแตกโมเลกุล เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	หลังการแตกโมเลกุล เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
ปริมาณแก๊ส (wt%)		-	10.24	20.16
ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว (wt%)		100	86.74	66.32
องค์ประกอบ ในผลิตภัณฑ์ ของเหลว (wt%)	แนฟทา	2.62	29.80	18.90
	เคโรซีน	1.65	22.34	12.60
	ดีเซล	4.47	28.04	25.89
	กากน้ำมันหนัก	88.49	6.51	8.96
ปริมาณของแข็ง (wt%)		-	3.02	13.52
ค่าการแปลงผันสารตั้งต้น (%)		-	92.57	88.75
ค่าความเป็นกรด (mg-KOH/g)		6	7.4	8.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มและนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้งจากการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้ที่แล้ว ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วแตกโมเลกุลจากน้ำมันหนักได้เป็นองค์ประกอบในของเหลวที่เป็นดีเซล อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วหลังได้รับการปรับสภาพพื้นผิวด้วยการให้ความร้อนโดยการเผาช่วยส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดอย่างสมบูรณ์เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี มีรูพรุนและโพรงที่มีขนาดใหญ่เพียงพอกับการแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ และมีโครงสร้างผลึกที่มีคุณสมบัติของ ความเป็นกรด ความจำเพาะต่อรูปร่าง และเสถียรภาพ โดยลดการเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ส่งผลให้ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงขึ้น องค์ประกอบที่เป็นเชื้อเพลิงดีเซลที่ได้จึงมีสมบัติเหมาะสมกับเครื่องยนต์ดีเซล

จากการศึกษาการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว โดยได้ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ โดยการทดลองนี้แบ่งเป็นสองส่วนคือ

- การแตกโมเลกุลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ
- การแตกโมเลกุลในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

ผลของการศึกษาสรุปได้ดังนี้

- ภาวะที่เหมาะสมของการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ คืออุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส เวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

- ภาวะที่เหมาะสมของการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส คือ อัตราการป้อนน้ำมันหล่อลื่น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลววิเคราะห์ด้านสมบัติ เช่น ค่าความร้อน ค่าความหนืด และค่าความหนาแน่น เป็นต้น เปรียบเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิง เพื่อดูแนวโน้มความเป็นไปได้ของการนำไปใช้งานจริง เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซลมีสมบัติเช่นเดียวกับน้ำมันเชื้อเพลิง แสดงดังตารางที่ 5.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลกับองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่เป็นดีเซลที่ได้จากการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

องค์ประกอบ	เชื้อเพลิงดีเซล Su Shiung Lam, A. D. (2012)	กฤษณีย์ ปีนเวหา (2554)	Kanna n, M. และคณะ (2014)	Naz, A. และคณะ (2014)	Nasim, N.M. และคณะ (2014)	งานวิจัยนี้
อุณหภูมิ (°C)		410	300	500	330	390
ตัวเร่งปฏิกิริยา		เอฟซีซีใช้แล้ว	อะลูมิน่า	ซีโอไลต์	-	เอฟซีซีใช้แล้ว
ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว (wt%)		78.42				86.74
องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว (wt%)	แนฟทา	28.79				29.80
	เคโรซีน	17.06				22.34
	ดีเซล	27.92				28.04
	กากน้ำมันหนัก	4.65				6.51
ปริมาณของแข็ง (wt%)		4.74				3.02
ร้อยละการเปลี่ยนแปลง (%)		91.19		80 - 90	69	92.64
ค่าความร้อน (KJ/Kg)	36 - 48	45.2	33		42.50	
ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (cSt)	1 - 4	5.41	11.10	4.68	3.49	
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	720 - 850	906	909	848	818	
จุดวาบไฟ (°C)	50		30	64	57	
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	720 - 850	906	909	848	818	
จุดวาบไฟ (°C)	50		30	64	57	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ในการแตกโมเลกุลน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเพื่อเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ในเรื่องของความคุ้มค่าของการลงทุนในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า (ดังภาคผนวก ข)
3. วิเคราะห์สมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองในภาวะที่ดีที่สุด ได้แก่ ค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D240 ค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445 และค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D664
4. สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องควรคำนวณ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Space time) เพื่อคำนวณหาระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม ดังสมการที่ 5.1 (ภาคผนวก ข)

$$\tau = \frac{V}{v_0} = \frac{C_{A0} X_A}{-r_A} \quad (5.1)$$

โดยที่

$V$  = ปริมาตรของถังปฏิกรณ์, มิลลิลิตร (ml)

$v_0$  = อัตราการไหลโดยปริมาตรของสาร, มิลลิลิตรต่อนาที (ml/min)

$C_{A0}$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร, โมลต่อมิลลิลิตร (mol/ml)

$X_A$  = คอนเวอร์ชันของสาร

$-r_A$  = อัตราเร็วของปฏิกิริยา, โมลต่อลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (mol/m<sup>3</sup> s)

## บรรณานุกรม

- กรวิภา วงษ์ผาบ กฤษณพล เส็กภูเขียว และกัญญาวีร์ อุ่นเสื่อ. 2553. “การแตกตัวของพลาสติกที่ใช้แล้ว ชนิดพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงด้วย USY ซีโอไลต์.” ปรินญาณิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- กรมควบคุมมลพิษ 2560. **อันตรายจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว** [Online]. Available : [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/haz\\_lubri.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/haz_lubri.html) [1 พฤษภาคม 2560].
- จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. **การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- จินตนา สุมารินทร์ ธราพงษ์ วิทิตสานต์ และวิชชากร จารุศิริ. 2550. “การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ไฮโดรเจนร่วมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ.” วารสารวิจัยพลังงาน. 4(1) : 52-58.
- ชุตีมาพร วรรณวงษ์. 2557. “การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนโคโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชัยพร จิงโชติกะพิสิฐ. 2558. “การสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ธราพงษ์ วิทิตสานต์. 2553. **ถ่านกัมมันต์ การผลิตและการนำไปใช้.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธุรกิจบางจาก 2560. **กลุ่มธุรกิจโรงกลั่นและการค้าน้ำมัน.** [Online]. Available : <https://www.bangchak.co.th/th/Refinery>.
- บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน). 2559. **แนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีด้านน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ปัจจุบันและอนาคต.** [Online]. Available : <http://www.bangchaklubricants.com/th/Article/detail/แนวโน้มการพัฒนาใช้น้ำมันหล่อลื่นเบนซิน> [31 มีนาคม 2560].
- บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2553. **สารานุกรมเปิดโลกปิโตรเลียมและพลังงานทดแทน.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : เกียวโด-เนชั่น-พรีนติ้ง เซอร์วิส จำกัด.
- บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2554. **สารานุกรมเปิดโลกปิโตรเคมี.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท มีเดีย เอกซ์เพอร์ทีส อินเตอร์เนชั่นแนล (ประเทศไทย) จำกัด.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ประชารัตน์ แต่ภักดี. 2547 “การแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปราโมทย์ ไชยเวช. 2552. **ปิโตรเลียมเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ผนิศร เสรีวัฒนวุฒิ และอิศเรศ วงศ์วิทวณิช. 2554. “ไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.” ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิรพจน์ เพทายพนากิจ อรชา คุณค้ำ ปิยะนาถ สมมณี ธราพงษ์ วิทิตสานต์ และ อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ. 2556. “การแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา USY ซีโอไลต์ที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.” TH-ENG-09 หน้า 46-51. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. “ก้าวเข้าสู่ยุคใหม่แห่งการจัดการพลังงานทางเลือกและสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน” วันที่ 17-18 ตุลาคม 2556 ณ โรงแรมพูลแมนขอนแก่น ราชอาเธอร์คิด จังหวัดขอนแก่น.
- รอบรู้เรื่องเครื่องยนต์. 2554. **น้ำมันหล่อลื่น**. [Online]. Available : [http://www.chaiwbi.com/0drem/web\\_children/2545/m5302/oil.html](http://www.chaiwbi.com/0drem/web_children/2545/m5302/oil.html). [17 มิถุนายน 2554].
- รวีวรรณ สวัสดิ์รักษา ธราพงษ์ วิทิตสานต์ และวิชชุกร จารุศิริ. 2552. “การแตกตัวด้วยความร้อนเชิงตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันสปูดำไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวบน HZSM-5.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. 2558. **เคมีวัสดุ เคมีพื้นผิว และปฏิกิริยาเร่ง**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิลป์ดาราท ทัศนปริชญานนท์ ธราพงษ์ วิทิตสานต์ และวิชชกร จารุศิริ. 2550. “กระบวนการร่วมของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.” **วารสารพลังงาน**. 8(1) : 13-22.
- ศูนย์ข่าวพลังงาน. 2560. **สิ่งที่เหมือนและแตกต่างระหว่างพลังงานทดแทนกับพลังงานหมุนเวียน** [Online]. Available: <http://energynewscenter.com/index.php/article/detail/89> [13 กรกฎาคม 2560].
- สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง. 2554. **ตลาดน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน**. [Online]. Available: <http://www.doeb.go.th/knowledge/data/base-oil.pdf>. [มีนาคม 2554].
- สำนักงานคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง. 2557. **รายงานปริมาณการค้าน้ำมันเครื่อง ประจำปี พ.ศ. 2557**. [Online]. Available : <http://www.doeb.go.th/info/data/datadistribution/trade-volume.pdf>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สำนักงานนโยบายและแผนพัฒนาพลังงาน. 2560. **แนวนโยบาย Energy 4.0** [Online]. Available: <http://www.eppo.go.th/index.php/th/component/k2/item/11948-energy4>. [16 กุมภาพันธ์ 2560].
- Anwar, N., Ali, S.S., Anwar, Z., Khan Khattak, J.Z., Jabbar, A., Ansari, T.M. and Raza Naqvi, S.S. 2012. "Recycling of Automotive Lubricating Waste Oil and Its Quality Assessment for Environment-Friendly Use." **Research Journal of Environmental and Earth Sciences**. 4(1) : 912-916.
- Auerbach, S.M., Carrado, K.A., and Dutta, P.K. 2003. **Handbook of Zeolite Science and Technology**. New York : Marcel Dekker.
- Awad, A.N., Shahad S.M. 2014. "A Study of Enhancement of the Properties of Lubricant Oil." **American Journal of Chemistry**. 4(1) : 68-72.
- Bartholomew, C.H. and Farrauto, R. J. 2006. **Fundamentals of Industrial Catalytic Processes**. 2nd ed. USA : John Wiley & Sons.
- Beg, R.A., Sarker, M.R.I. and Pervez, R.M.d. 2010. "Production of Diesel Fuel From Used Engine Oil." **International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS**. 10(1) : 16.
- Casumano, J.A. 1978. **Catalysis in Coal**. New York : Academics Press.
- ChulaPedia 2553. **น้ำมันดิบ (Crude Oil)**. [Online]. Available: [http://www.chulapedia.chula.ac.th/index.php/\\_\(Crude\\_Oil\)](http://www.chulapedia.chula.ac.th/index.php/_(Crude_Oil)). [19 สิงหาคม 2553].
- Denton, J.E. 2004 . **Used Oil in Bunker Fuel: A Review of Potential Human Health Implications**. Office of Environmental Health Hazard Assessment California Environmental Protection Agency.
- Deutschmann, O., Knozinger, H., Kochloefl, K. and Turek, T. 2009. **Heterogeneous Catalysis and Solid Catalysts**. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Du, X., Zhang, H., LiX., Tan, Z., Liu, H. and Gao, X. 2013. "Cation location and migration in lanthanum-exchanged NaY zeolite." **Chinese Journal of Catalysis**. 34(1) : 1599-1607.
- Gates, B.C. 1992. **Catalytic Chemistry**. New York : John Wiley & Sons. Hagen, J. 2006.
- Hagen, J. 2015. **Industrial Catalysis: A Practical Approach**. 2nd ed. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Isah, A. G., Abdulkadir, M., Onifade, K. R., Musa, U., Garba, M. U., Bawa, A. A and Sani, Y. 2013. "Regeneration of Used Engine Oil." **Proceedings of the World Congress on Engineering 2013**. 1.
- Jame, G.S. 2006. **The Chemistry and Technology of Petroleum**. 4th ed. New York : Taylor and Francis Group.
- James, G. S. and Douglas, I. E. 2014. **Refining Used Lubricating Oils**. London : Taylor & Francis Group, LLC.
- Jungjaroenpanit, C. and Vitidsant, T. 2013. "Catalytic Pyrolysis of Used Cooking Oil by Magnesium Oxide Supported on Activated Carbon in Continuous Reactor." **International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences**. 1 : 429 – 432.
- Kannan, M. and Saravanan, C. G. 2015. "Behaviour of Zeolite 4A in The Extraction Process of the Diesel Like Fuel Obtained from Waste Engine Oil." **Journal of Engineering Science and Technology**. 10(1) : 1553–1559.
- Kannan, M. and Saravanan, C. G. 2015. "Characterization of alumina catalyst in the catalytic fuel reformer." **American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics**. 2328-3491 : 127-131.
- Khowatimya, F.A., Priastomoa, Y. Febriyantia, E., Riyantokob, H. and Trisunaryantia, W. 2014. "Study of Waste Lubricant Hydrocracking into Fuel Fraction Over the Combination of Y-Zeolite and ZnO Catalyst." **Procedia Environmental Sciences**. 20 : 225–234.
- Kugler, E.L., Kugler, Dadyburjor, D.B., Moore, H.F., Stiller, A.H. and Penn, J.H., 2001. **Effect of Pretreatment**. West Virginia: Oguz Bayraktar.
- LPG Production Storage and Transportation. 2016. **คุณสมบัติของก๊าซปิโตรเลียมเหลว**. [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/mithdynamite/>.
- Machinery Lubrication. 2012. **The Critical Role of Additives in Lubrication**. [Online]. Available : <http://www.machinerylubrication.com/Read/28980/additives-lubricationrole>. [Aug 2012].
- Matar, S., Manfred, J.M., Hassan, A.T. 1989. **Catalysis in Petrochemical Processes**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 46-48.
- Memoirs, M. 2555. **การดูดซับบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ ตอนที่ ๑ ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์**. [Online]. Available : <http://tamagozilla>.

- Merai, Y.P. 2015. "Re-refining of used lubricating oil." **International Journal of Scientific & Engineering Research**. 6(1) : 329–332.
- Moulijn, J.A., P.W.N.M. van Leeuwen and Santen, R.A.V. 1993. "An Integrated Approach to Homogeneous, Heterogeneous and Industrial Catalysis." **CATALYSIS**. 79(1) : 462.
- Naz, A., Ullah, M., Ali, S.D., Mahmood, T., Siddiq, M., Bano, A. and Tariq, Z. 2014. "Nano Catalytic Conversion of used Lubricating Oil into Diesel Fuel." **International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering**. 3(4) : 438-446.
- Nasim, M.N., Pervez, M.S., Yarasu, R.B., Lotia, N.V. 2014. "Recycling waste automotive engine oil as alternative fuel for diesel engine: A Review" **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)**. 2278-1684 : 46-50.
- PC Lube. 2010. น้ำมันเกรดเดี่ยว vs น้ำมันเกรดรวม. [Online]. Available : [http://www.pc-lube.com/\\_m/index.php#article/content/content.php?aid=538714990](http://www.pc-lube.com/_m/index.php#article/content/content.php?aid=538714990).
- Permsubscul, A., Vitidsant, T. and Damronglerd, S. 2007. "Catalytic cracking reaction of used lubricating oil to liquid fuels catalyzed by sulfated zirconia." **Korean Journal of Chemical Engineering**. 24(1) : 37-43.
- Pradthana. 2008. กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process). [Online]. Available : <https://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/> [19 มีนาคม 2008].
- PTTPLC. 2555. Knowledge: Basic of Natural Gas. [Online]. Available : [https://dscng.pttplc.com/\(S\(pol11xmkk2i5gqukzravpppt\)\)/Knowledge/Knowledge-inside?C=Mjk2](https://dscng.pttplc.com/(S(pol11xmkk2i5gqukzravpppt))/Knowledge/Knowledge-inside?C=Mjk2).
- Robertson, A.J.B. 1975. "The Early History of Catalysis" **Platinum Metals Rev.** 19(1) : 64-69.
- Robert, A. M. 2005. **Handbook of Petrochemical Production Processes**. New York : McGraw-Hill Companies, Inc.
- Robinson, P.R. 2006 **Petroleum Processing Overview**. Texas: PQ Optimization Services, Inc.
- Rothenberg G. 2008. **Catalysis, Concepts and Green Applications**. WEinheim: Wiley-VCH.
- Rui Feng, R., Qiao, K., Wang, Y. and Yan, Z. 2013. "Perspective on FCC catalyst in China Appl." **Petrochem Res.** 3(1) : 36–70.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Satterfield, C.N. 1991. **Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice**. New York: McGraw-Hill.
- Selukar, N. B., Wagh. S. M. 2014. "Gasoline and Diesel Synthesis from Waste Lubricating Oil: A Kinetic Approach." **IOSR Journal of Applied Chemistry**. 2278-5736 : 22-25.
- Sedeghbeigi, R. 1995. **Fluid Catalytic Cracking Handbook**. Texas: Gulf Publishing
- Si, H.O. 2009. **Surface Area, Pore Volume, and Pore Size Distribution from the Gas Sorption Isotherm**. New York : Taylor and Francis Group.
- SINGHCBT. 2015. **ตัวเร่งปฏิกิริยา – 1 ในปัจจัยที่ทำให้สารเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น**. [Online]. Available : <https://singhcbt.wordpress.com/2015/05/24/> [24 May 2015].
- Sharma, M.C. and Soni, N. 2014. "Production of Alternative Diesel Fuel from Waste Oils and Comparison with Fresh Diesel: A Review." **The International Journal of Engineering and Science**. 3(1) : 54-58.
- Su Shiung Lam, A. D. 2012. "Microwave-heated pyrolysis of waste automotive engine oil: Influence of operation parameters on the yield, composition, and fuel properties of pyrolysis oil." **Fuel**. 92(1) : 327-339.
- Tang, X. and Wei, F. 2007. "Waste Edible Oil Fluid Catalytic Cracking in a Downer Reactor." **The 12<sup>th</sup> International Conference on Fluidization - New Horizons in Fluidization Engineering**. 77(1) : 631-638.
- Tani, H., Hasegawa, T., Shimouchi, M., Asami, K. and Fujimoto, K. 2011. "Selective catalytic decarboxy-cracking of triglyceride to middle-distillate hydrocarbon." **Catalysis Today**. 164(1) : 410-414.
- Tony, R. 2010. "The Lube Base Oil Market in Asia." **4th Asia-Pacific Base Oil Conference**. 5-7.
- Trimm, D.L. 2001. "The regeneration or disposal of deactivated heterogeneous catalysts." **Applied Catalysis A: General**. 212 (1): 153-160.
- Valvoline Technical Services. 2016. **Physical Properties of Lubricants**. [Online]. Available: <http://vclindia.in/training/wbt%20final/PhysicalPropertiesofLubricants.pdf>.
- Vogt, E.T.C. and Weckhuysen, B.M. 2015. "Fluid catalytic cracking: recent developments on the grand old lady of zeolite catalysis." **Chem. Soc. Rev.** : 44.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Wachnik, W.H. 2015. **Catalytic cracking of hydrocarbons.** Environmental management Fundamentals of Chemical Technology and Chemicals Management Laboratory University of Warsaw Faculty of Chemistry.
- Wang, D., Xiao, R., Zhang, H. and He, G. 2010. "Comparison of catalytic pyrolysis of biomass with MCM-41 and CaO catalysts by using TGA–FTIR analysis." **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.** 89(1) : 171.
- Weitkamp, J. 2000. "Zeolites and catalysis." **Solid State Ionics.** 131 : 175-188.
- WIKIMEDIA COMMONS. 2014. File: **Benzene Representations.svg.** [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Benzene\\_Representations.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Benzene_Representations.svg). [21 May 2014].
- Xiao, F.S. and Meng, X. 2016. **Zeolites in Sustainable Chemistry Synthesis, Characterisation, Catalytic Applications.** by Xiao, F.S. 2<sup>n</sup> ed. London : Springer.
- Yang, W.C. 2003. **Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems.** Basel: Marcel Dekker AG.
- Yinghua, L., Lu, Y., Hui, X., Guishuo, W., Dan, L. and Changwei, H. 2015. "The production of diesel-like hydrocarbons from palmitic acid over HZSM-22 supported nickel phosphide catalysts." **Applied Catalysis B: Environmental.** 174-175 : 504–514.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ก.1 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ 4 ตัวแปร สำหรับการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

Temp	Time	Pressure	Cat	Gas yield	Naphtha	Kerosene	Diesel	Long residue	Solid yield
430	30	1	5	11.28	30.68	22.57	20.3	7.43	7.74
390	45	1	3	10.26	29.77	22.36	28.04	6.57	3
430	30	5	5	8.29	29.83	21.39	26.22	6.63	7.64
430	60	1	1	13.21	29.73	20.01	24.41	6.9	5.74
390	30	1	5	9.63	28.24	20.06	27.03	6.31	8.73
430	30	1	1	10.38	31.43	21.78	23.77	6.73	5.91
390	30	5	5	11.43	29.3	21.35	23.8	6.44	7.68
390	60	5	5	13.58	28.79	19.95	23.61	6.33	7.74
430	60	5	1	14.38	29.37	19.34	24.49	6.29	6.13
410	45	3	3	15.74	30.15	20.51	25.33	4.42	3.85
390	30	1	1	10.68	29.41	21.11	26.5	4.43	7.87
390	30	1	1	10.68	29.41	21.11	26.5	4.43	7.87
430	30	5	1	8.47	30.97	21.46	24.68	6.61	7.81
390	60	1	5	10.26	30.49	22.26	27.55	4.61	4.83
430	60	1	5	13.31	30.14	20.03	21.31	7.37	7.84
430	60	5	5	15.67	28.62	19.84	22.8	6.34	6.73
430	60	1	5	13.49	30.09	20.01	21	7.43	7.98
430	30	1	1	10.67	31.41	21.83	23.5	6.56	6.03
390	30	5	1	13.23	29.3	19.77	24.1	7.12	6.48
410	45	3	3	13.46	30.1	20.53	27.5	4.45	3.96
430	30	1	5	11.36	30.98	22.61	20	7.37	7.68
390	60	1	1	11.3	29.33	19.84	26.28	5.7	7.55
390	45	1	3	10.28	29.79	22.34	28	6.57	3.02
390	30	1	1	10.68	29.41	21.11	26.5	4.43	7.87
390	30	5	5	11.17	29.5	21.42	23.72	6.53	7.66
390	60	1	5	11.93	30.61	22.11	27.41	4.42	4.65
430	30	5	5	8.3	29.92	21.37	26	6.71	7.7
430	60	5	1	14.91	29.22	19.26	24.2	6.41	6
430	60	5	5	15.67	28.74	19.77	22.58	6.61	6.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีเฉพาะที่มีการศึกษานี้ ไม่สามารถนำไปใช้กับกรณีอื่นได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ 4 ตัวแปร สำหรับการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

Temp	Time	Pressure	Cat	Gas yield	Naphtha	Kerosene	Diesel	Long residue	Solid yield
430	30	5	1	8.65	30.92	21.61	24.39	6.82	7.61
390	60	5	1	10.46	28.23	19.77	28.5	6.31	6.73
390	30	1	5	9.94	28.31	20.34	27	6.27	8.14
430	60	1	1	12.63	29.88	20.34	24.21	7.01	5.93



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณแก๊ส ผลผลิตของเหลว และของแข็งที่ได้จากการแตกโมเลกุลของน้ำมันน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที และความดันแก๊สของไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ

## การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักของเหลวที่ได้} &= \text{น้ำหนักของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว} - \text{น้ำหนักแก๊ส} - \text{น้ำหนักของแข็ง} \\ \text{ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว} &= \text{น้ำหนักของเหลวที่ได้} / \text{น้ำหนักของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว} \times 100 \\ \text{ปริมาณแก๊ส} &= \text{น้ำหนักแก๊สที่ได้} / \text{น้ำหนักของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว} \times 100 \\ \text{ปริมาณของแข็ง} &= \text{น้ำหนักของแข็งที่ได้} / \text{น้ำหนักของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว} \times 100 \end{aligned}$$

ตัวอย่าง การคำนวณปริมาณแก๊ส ผลผลิตของเหลว และของแข็งจากการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส และเวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที ภายใต้ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์เกจ

## ข้อมูลจากการทดลอง

ปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว	10.00	กรัม
ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา	0.30	กรัม
น้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์เปล่า	2314.32	กรัม
น้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์ก่อนการทดลอง	2324.62	กรัม
น้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์หลังการทดลอง	2323.60	กรัม
น้ำหนักกระดาษทิชชูและกระดาษกรองเปล่า	4.21	กรัม
น้ำหนักกระดาษทิชชูและกระดาษกรอง + กากของแข็งก่อนอบ	6.12	กรัม
น้ำหนักกระดาษทิชชูและกระดาษกรอง + กากของแข็งหลังอบ	4.51	กรัม

## วิธีการคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์เปล่า} &= 2314.32 \quad \text{กรัม} \\ \text{น้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์ก่อนการทดลอง*} &= 2314.32 + 10.00 + 0.30 \\ &= 2324.62 \quad \text{กรัม} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์หลังการทดลอง	=	2323.60	กรัม
ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น	=	2324.62 – 2323.60	
	=	<b>1.02</b>	กรัม
	=	<b>10.24</b>	wt%
ปริมาณของแข็งที่เกิดขึ้น	=	4.51 – 4.21 – 0.30	
	=	<b>0.30</b>	กรัม
	=	<b>3.02</b>	wt%
ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้	=	10.00 – 1.02 – 0.30	
	=	<b>8.67</b>	กรัม
	=	<b>86.74</b>	wt%
*น้ำหนักของแก๊สไฮโดรเจนน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักของแก๊สทั้งหมด			



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### การวิเคราะห์เชิงสถิติและตัวอย่างการคำนวณ

การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ เป็นการวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยอยู่ภายใต้สมมติฐานว่าตัวแปรและค่าการวิเคราะห์มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

#### 1. สัญลักษณ์ของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

1.1 k หมายถึง จำนวนตัวแปรที่ทำการศึกษา

1.2 n หมายถึง จำนวนการทดลองที่ภาวะการทดลองเดียวกัน

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

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

1.5 อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กเขียนติดกัน เช่น ab, ac, abc หมายถึงการทดลองซึ่งเกิดจากการรวมกันของอิทธิพลปัจจัยต่างๆ เรียกว่า Treatment combination

ในการทดลองที่แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จะแทนแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยเป็นระดับต่ำและระดับสูง โดยแทน  $-1$  ที่ระดับต่ำ และ  $+1$  ที่ระดับสูง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันถั่วเหลืองบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบส โดยทำการออกแบบการทดลองเป็นแบบ  $2^k$  แฟกทอเรียล แบบ 1 เรพลีเคต ซึ่งกำหนดสัญลักษณ์และระดับของตัวแปร ดังนี้

ตารางที่ ค.1 สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปร	ระดับ	
	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ( $^{\circ}\text{C}$ ), A	390	430
เวลาในการทำปฏิกิริยา (min), B	30	60
ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (bar), C	1	5
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%), D	1	5

ในการทดลองจะมีสัญลักษณ์ที่นำมาใช้แทนการทดลอง ซึ่งได้จากการรวมกันของอิทธิพลปัจจัยต่างๆ หมายถึง การทดลองที่ปรากฏสัญลักษณ์ของปัจจัยใด แสดงว่าทำการทดลองที่ระดับ  $+1$

ของปัจจัยนั้น และที่ระดับ  $-1$  จะไม่ปรากฏสัญลักษณ์นั้นในการทำการทดลอง ตัวอย่างเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(-1) แสดงว่า ได้ทำการทดลองที่ระดับ  $-1$  ในทุกปัจจัย

a แสดงว่า ทำการทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในระดับ  $+1$  และปัจจัยอื่นๆ ทำการทดลองที่ระดับ  $-1$  ดังนั้นภาวะการทดลองคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และอุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส

ab แสดงว่า ทำการทดลองที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในระดับ  $+1$  และปัจจัยอื่นๆ ทำการทดลองที่ระดับ  $-1$  ดังนั้นภาวะการทดลองคือ ปริมาณตัวเร่งในระดับ  $+1$  และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ส่วนปัจจัยอื่น ๆ ทำการทดลองในระดับ  $-1$

## 2. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ $2^k$

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลใช้เป็นอย่างมากในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับหลายปัจจัย โดยต้องการทำการศึกษาร่วมกันที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ ในกรณีที่มีปัจจัย  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ซึ่งระดับเหล่านี้อาจเกิดขึ้นจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดันหรือเวลา เป็นต้น หรืออาจเกิดได้จากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักรหรือคนงาน เป็นต้น จะทำการแทนระดับ 2 ระดับที่กล่าวมาเป็น “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นๆ โดยในการทดลอง 1 เปรกติที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น  $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  ข้อมูล ซึ่งจะเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่าการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$

ในการทดลองที่มีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการจะตรวจสอบ การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับจะมีประโยชน์มาก โดยจะช่วยให้จำนวนการทดลองลดลงให้น้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อสามารถศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง  $k$  ชนิดได้อย่างบริบูรณ์ ดังนั้นการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับจึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้ลดน้อยลง เนื่องจากแต่ละปัจจัยของการออกแบบ  $2^k$  ประกอบด้วย 2 ระดับ โดยสมมติว่าผลตอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง ซึ่งสมมติฐานนี้สามารถยอมรับได้สำหรับการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเมื่อเราเพิ่งเริ่มต้นทำการศึกษาระบบ

## 3. สูตรการคำนวณ

3.1 Contrast = ผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment  $\times$  สัมประสิทธิ์  
(-1 หรือ +1) ของตัวแปรหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปร

3.2 Effect estimate AB...K (EE)

$$EE = 2 (\text{Contrast AB...K})$$

3.3 Sum of squares AB...K (SS)

$$SS = 2 (\text{Contrast AB...K})^2$$

3.4 Total of sum of squares (SST)

$$SST = \sum \sum \sum y_{2ijk}^2 - y_{2...}^2, N = \text{จำนวนค่าสังเกตทั้งหมด}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 Mean of square error : (SSE )

$$SSE = SST - SS \text{ of Main effect}$$

3.6 Mean of Square (MS)

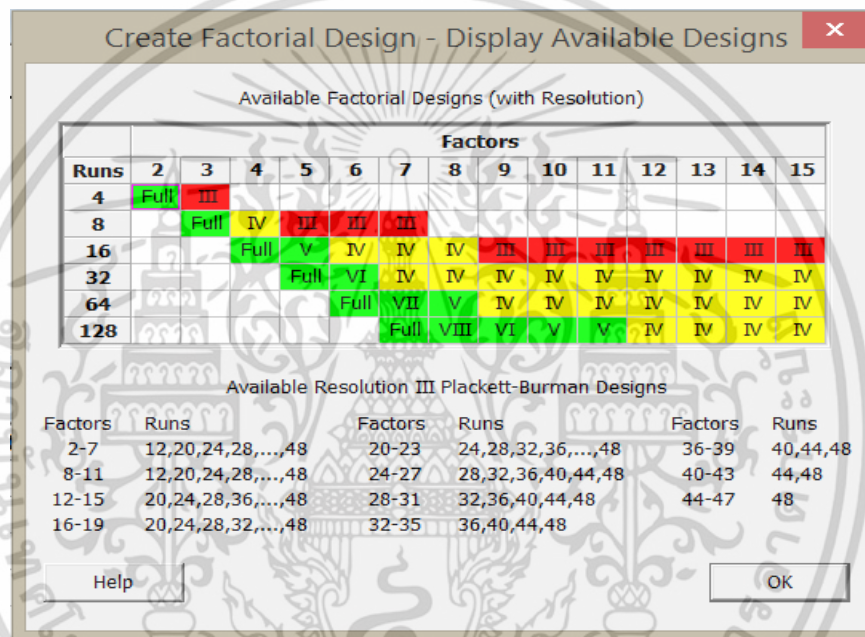
$$MS = SS / \text{Degree of freedom}$$

3.7 % Normal probability = (Cumulative frequency - 0.5) × 100

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

#### 4. การใช้โปรแกรม Minitab 16 ในการคำนวณ

4.1. เข้าสู่โปรแกรม คลิกไปที่ file ----> New design แสดงดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 รูปตารางของ 2 Level factorial design

4.2 เลือกจำนวนตัวแปรที่ใช้ในการทดลองเพื่อทำการศึกษาอิทธิพลตัวแปรเหล่านั้น โดยในการทดลองประกอบด้วยตัวแปร 4 ตัวแปร คืออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คลิกที่ Full ของช่อง 4 จากนั้นกรอกจำนวนที่ทำการทดลองซ้ำในช่อง Replicates และกรอกค่าจำนวนการทดลองของค่ากลาง ช่อง Center point per block ยกตัวอย่าง Replicates = 1, Center point per block = 3 กดที่ Continue จะปรากฏดังรูปที่ ค.2 เมื่อกรอกตัวแปรเสร็จคลิกที่ Continue

Create Factorial Design - Factors

Factor	Name	Type	Low	High
A	Temperature	Numeric	390	430
B	Time	Numeric	30	45
C	Perssure	Numeric	1	5
D	Cat.	Numeric	1	5

รูปที่ ค.2 ตัวแปรและหน่วยที่ใช้ในการทดลอง

3. จะปรากฏปัจจัยที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด เช่น การทดลองมีทั้งหมด 16 การทดลอง จากนั้นทำการกรอกข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดลงในช่องดังรูปที่ ค.3

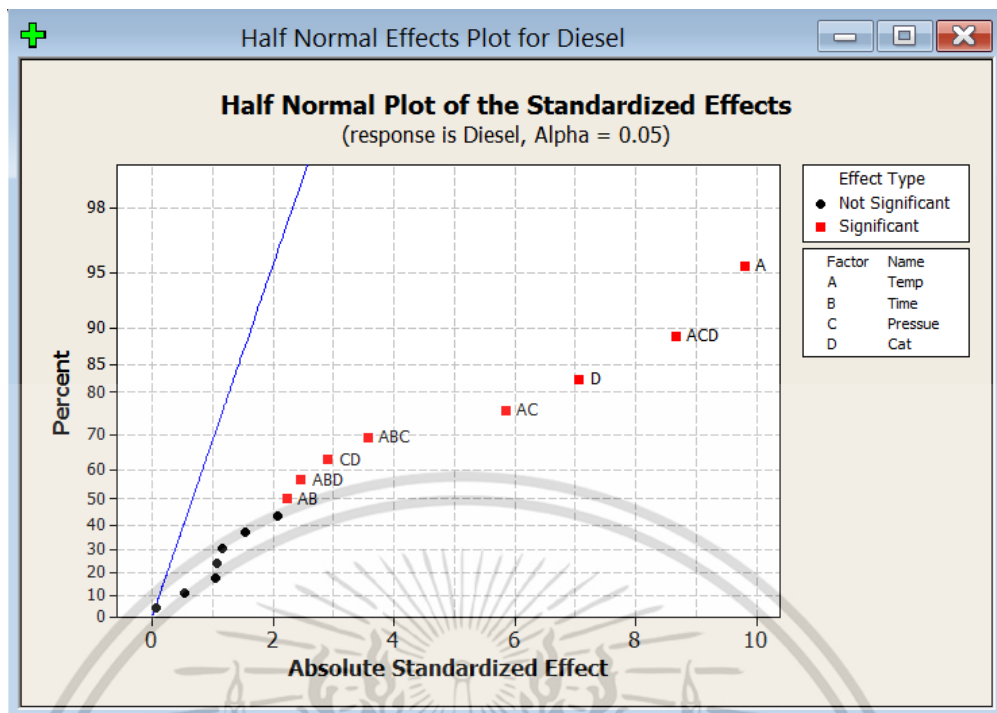
Worksheet 1 \*\*\*

	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
	Blocks	Temperature	Time	Perssure	Cat.	Gas yield	Liquid yield	Solid yield	Naphtha	Kerosene	Diesel	Long residue		
1	1	390	45	1	5									
2	1	430	45	1	5									
3	1	430	30	5	1									
4	1	430	30	1	5									
5	1	430	45	5	5									
6	1	390	30	1	1									
7	1	390	45	1	1									
8	1	430	45	1	1									
9	1	390	45	5	1									
10	1	390	30	5	5									
11	1	430	30	5	5									
12	1	390	45	5	5									
13	1	390	30	5	1									
14	1	390	30	1	5									
15	1	430	30	1	1									
16	1	430	45	5	1									
17														

รูปที่ ค.3 ข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

ทำการเลือกจุดที่มีผลต่อการทดลองในกราฟ Half-normal percent probability เพื่อให้แนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ ค.4 ยกตัวอย่างเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.4 Half-normal probability plot ของร้อยละผลได้ดีเซลจากปฏิกริยาแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### การวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์

#### ง.1 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatograph)

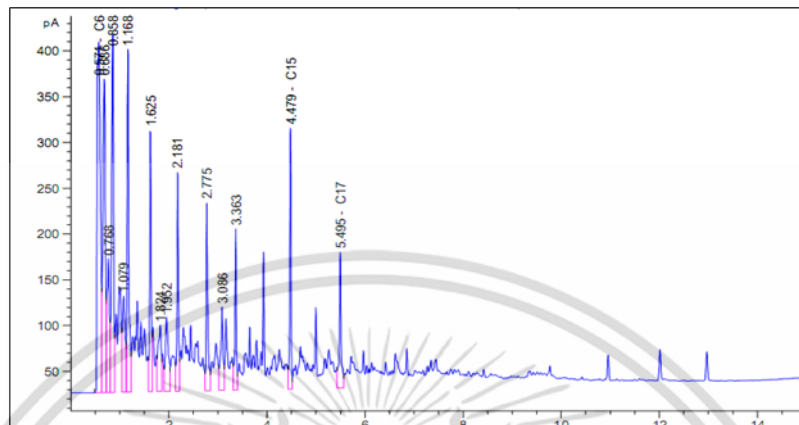
การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น (Simulated distillation gas chromatograph) โดยใช้หลักการวิเคราะห์หาองค์ประกอบตามคาบจุดเดือด ซึ่งแบ่งเป็นช่วงได้ดังนี้

#### ตารางที่ ง.1 วิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatograph)

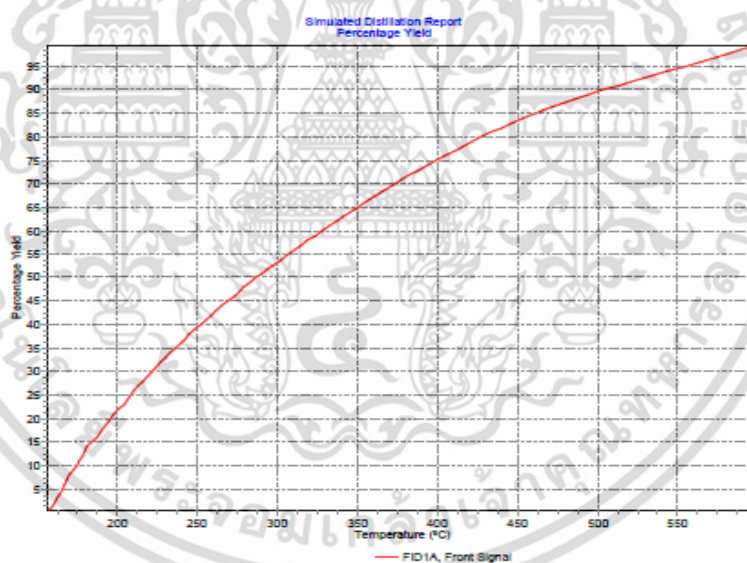
จุดเดือด ( $^{\circ}\text{C}$ )	องค์ประกอบ
IBP $\leq$ 200	แนฟทา (Naphtha) ( $\text{C}_5 - \text{C}_{11}$ )
200 $\leq$ 250	เคโรซีน (Kerosene) ( $\text{C}_{11} - \text{C}_{14}$ )
250 $\leq$ 370	ดีเซล (Diesel) ( $\text{C}_{14} - \text{C}_{22}$ )
370 $\leq$ FBP	กากน้ำมันหนัก (Long Residue) ( $> \text{C}_{22}$ )

วิธีในการวิเคราะห์ทำโดยเตรียมสารตัวอย่าง ซึ่งจะนำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ไปละลายในสารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ ( $\text{CS}_2$ ) ในอัตรา 1 ส่วนใน 100 ส่วนโดยปริมาตร จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบ ตามมาตรฐาน ASTM D2887 ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น ยี่ห้อ Agilent technologies รุ่น GC7890A ประกอบด้วยดีเทคเตอร์ชนิด FID ใช้ซอฟต์แวร์ Simulated distillation คอลัมน์ที่ใช้เป็น Capillary column มี stationary phase คือ CP-SIL 5CB ยาว 10 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 530 ไมโครเมตร และความหนาของฟิล์ม 2.65 ไมโครเมตร สภาวะที่ใช้ คือ อุณหภูมิหัวฉีด (Injector temperature) 298 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคอลัมน์ (Column temperature or oven temperature) 40 - 350 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการการเพิ่มอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิดีเทคเตอร์ (Detector temperature) 375 องศาเซลเซียส โดยมีแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สตัวพาที่อัตราการไหล 6.5 มิลลิลิตรต่อนาทีด้วย split ratio

โครมาโทแกรมที่ได้จากการแยกสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี เปลี่ยนเป็นกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือดด้วยโปรแกรม Simulated distillation โดยจะทำการเทียบกับโครมาโทแกรมของสารมาตรฐานตาม ASTM D2887 (Standard)



รูปที่ ง.1 แสดงโครมาโทแกรมจากการแยกของผลิตภัณฑ์น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887



รูปที่ ง.2 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ น้ำมันตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การคำนวณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

#### — ส่วนที่เป็นแก๊ส

ปริมาณแก๊สทั้งหมดที่ได้ = 10.24 wt%

#### — ส่วนที่เป็นของเหลว

ปริมาณของเหลวทั้งหมดที่ได้ (W) = 86.74 wt%

ร้อยละของเนฟทาจากการแตกโมเลกุลของเหลว = 34.3  

$$= \frac{86.74 \times 34.3}{100}$$

องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นเนฟทา = 29.79 wt%

ร้อยละของโครซีนจากการแตกโมเลกุลของเหลว = 25.75 wt%  

$$= \frac{86.74 \times 25.75}{100}$$

องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นเนฟทา = 22.34 wt%

ร้อยละของดีเซลจากการแตกโมเลกุลของเหลว = 32.3 wt%  

$$= \frac{86.74 \times 32.3}{100}$$

องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นดีเซล = 28.04 wt%

ร้อยละของกากน้ำมันหนักจากการแตกโมเลกุลของเหลว = 7.57 wt%  

$$= \frac{86.74 \times 7.57}{100}$$
  
 = 6.57 wt%

#### — ส่วนที่เป็นของแข็ง

ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ได้ = 3.02 wt%

#### — ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้น (% Conversion)

$$= \frac{\text{Long Residue}_{\text{ก่อนการแตกโมเลกุล}} - \text{Long Residue}_{\text{หลังการแตกโมเลกุล}}}{\text{Long Residue}_{\text{ก่อนการแตกโมเลกุล}}}$$

$$= \frac{88.49 - 6.57}{88.49}$$

$$= 92.57\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

# การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่อง Surface area and porosimetry analyzer

เครื่อง Surface area and porosimetry analyzer (ชุดิณณพณ์ ภริณณณภรณ์ และคณณะ. 2556)

เครื่อง Surface area and porosimetry analyzer ใช้วิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุนตัวของสารตัวอย่าง เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา เทคนิคของการวิเคราะห์ คือ การดูดซับด้วยแก๊ส (Gas adsorption) แก๊สจะทำหน้าที่เป็นสารถูกดูดซับ (Adsorbate) บนสารตัวอย่างซึ่งทำหน้าที่เป็นสารดูดซับ (Adsorbent) ภายใต้ภาวะควบคุม คือ อุณหภูมิการดูดซับต้องต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) ของแก๊สและต้องคงที่ และความดันที่จะเปลี่ยนไปจนเข้าสู่ความดันสมดุล (Equilibrium pressure) สำหรับการคายซับ (Desorption) ใช้หลักการเดียวกับการดูดซับ

เครื่อง Surface area and porosimetry analyzer ตรวจวัดและคำนวณค่าความแตกต่างระหว่างปริมาตรของแก๊สที่เข้าไป กับแก๊สที่อยู่ในช่องว่าง (Void space) รอบสารตัวอย่าง ค่าความแตกต่างดังกล่าว คือปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ความดันสมดุล และสามารถวิเคราะห์ค่าต่างๆ ดังนี้

- พื้นที่ผิวโดยวิธี Brunauer, Emmett and Teller (BET method) แบบจุดเดียว (Single point) และแบบหลายจุด (Multi point) สำหรับการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) และวิธีแลงเมียร์ (Langmuir method) สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption)
- การดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Adsorption isotherm)
- การกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนและการกระจายของพื้นที่ผิว
- ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด

การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยวิธีบีอีที (Brunauer, Emmett and Teller: BET) (จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษตานุรักษ์. 2547; สมชัย อัครทิวา. 2546; วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. 2558.)

การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยวิธีบีอีที คือ การดูดซับแก๊สไนโตรเจนของสารตัวอย่างที่อยู่ในสถานะของแข็งที่มีลักษณะเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น ภายใต้อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (Standard temperature and pressure: STP) แก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบางส่วนจะเคลือบบนผิวของสารตัวอย่างในลักษณะโมเลกุลชั้นเดียว (Monolayer) และบางส่วนจะเคลือบ

บนผิวของสารตัวอย่างในลักษณะโมเลกุลหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการของบีอีที (BET equation) ดังสมการที่ (จ.1)

$$\frac{P}{v(P_0 - P)} = \frac{1}{v_m C} + \left( \frac{C-1}{v_m C} \right) \frac{P}{P_0} \quad (\text{จ.1})$$

เมื่อ  $P$  คือ ความดันของแก๊สที่ใช้ขณะทำการทดลอง (mmHg)

$P_0$  คือ ความดันอิ่มตัวของแก๊สที่ถูกดูดซับ (mmHg)

$v$  คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับทั้งหมดที่ความดัน  $P$  ( $\text{m}^3$ )

$v_m$  คือ ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการคลุมผิวด้วยความหนา 1 ชั้นโมเลกุล ( $\text{m}^3$ )

$C$  คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

จากสมการที่ (จ.1) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $[P/v(P_0 - P)]$  กับ  $P/P_0$  จะได้กราฟเส้นตรง ถ้ากำหนดให้  $I$  คือ จุดตัดแกน  $Y$  ของเส้นตรง และ  $S$  คือ ค่าความชันของเส้นตรง

$$I = \frac{1}{v_m C} \quad \text{เมื่อ } P/P_0 = 0 \quad (\text{จ.2})$$

$$S = \frac{C-1}{v_m C} \quad (\text{จ.3})$$

จากสมการสามารถคำนวณค่า  $v_m$  ซึ่งสอดคล้องกับปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับเพียงชั้นเดียว ได้ดังสมการที่ (จ.4)

$$v_m = \frac{1}{I+S} \quad (\text{จ.4})$$

พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้จากสมการของบีอีที โดยนำปริมาตรของแก๊สที่ปกคลุมบนพื้นผิวของตัวดูดซับ หรือ  $v_m$  ที่ได้จากสมการที่ (จ.4) ไปคำนวณจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ 1 ชั้นโมเลกุล แล้วจึงนำไปคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะตัวเร่งปฏิกิริยาตามสมการที่ (จ.5)

$$S_{sp} = \frac{N_A a_{max} S_0}{W} \quad (\text{จ.5})$$

เมื่อ  $S_{sp}$  คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา (ตารางเมตรต่อกรัม)

$N_A$  คือ เลขอาโวกาโดร เท่ากับ  $6.02 \times 10^{23}$  (จำนวนโมเลกุลต่อกรัมโมล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$a_{\max}$  คือ จำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ 1 ชั้นโมเลกุล เท่ากับ  $v_m/22,414$

$S_0$  คือ พื้นที่ผิวหน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ เท่ากับ  $1.62 \times 10^{-20}$  (ตารางเมตร)

$W$  คือ น้ำหนักของสารหรือตัวดูดซับ (กรัม)

ในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่อง Surface area and porosimetry analyzer ยี่ห้อ Micromeritic รุ่น ASAP2020 วิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ พื้นที่ผิวทั้งหมด และปริมาตรและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรู



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

## การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการ แตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

การวิเคราะห์ความหนืด (ปราโมทย์ ไชยเวช. 2552; บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2553)

ความหนืด คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของเหลว กรณีของน้ำมันเชื้อเพลิง พบว่าความหนืดมีผลต่อการใช้งานน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ 3 ลักษณะ คือ ถ้าความหนืดสูง น้ำมันจะไหลผ่านปั๊ม ท่อ และหัวฉีดยากกว่าและไหลน้อยกว่า น้ำมันที่ถูกฉีดเข้าสู่ห้องเผาไหม้จะแตกเป็นฝอยน้อยกว่าและมีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งอาจส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ รวมทั้งน้ำมันจะเกาะติดผนังกระบอกสูบมากกว่า อย่างไรก็ตามแม้ว่าการเกาะติดที่มากกว่าจะช่วยในการหล่อลื่นผนังกระบอกสูบแต่จะเกิดเขม่าตกค้างมากและโอกาสไหลผ่านแหวนลูกสูบปกลงไปยังน้ำมันหล่อลื่นมากขึ้นด้วย การวัดความหนืดของของเหลวจะใช้เครื่องวัดความหนืด (Viscometer) โดยวัดการไหลของของเหลวปริมาณหนึ่งผ่านรูมาตรฐานที่อุณหภูมิที่กำหนด

## ภาคผนวก ข

## ตัวอย่างการคำนวณการลงทุนในอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า

## ตัวอย่างการคำนวณการลงทุนในอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า

ต้นทุน

น้ำมันหล่อลื่นชนิดเกรดดี

7 บาท/ลิตร

หน่วยการผลิต (unit) ต่อปริมาณการใช้น้ำมันหล่อ

อสีนใช้แล้ว (ลิตร)

3.5 : 1

ราคาขายน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 1 ลิตร

13 บาท/ลิตร

ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าโดยใช้น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว (บาท/ลิตร) : หน่วยการผลิต (Unit)

3.71 บาท/ลิตร\*

\* คำนวณตามปริมาณน้ำมันที่ใช้ผลิตไฟฟ้า (บาท: ลิตร)

กำไร

กำไรต่อราคาขายไฟฟ้าต่อหน่วยการผลิต

13 - 7 = 6 บาท/ลิตร

\*ปัจจุบันราคาขายไฟฟ้า 3.5 หน่วย ราคา 16.80 บาท

## ภาคผนวก ซ

## ตัวอย่างการคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Space time) เพื่อหาระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม

สมการและการคำนวณ

$$\tau = \frac{V}{v_0} = \frac{C_{A0} X_A}{-r_A}$$

โดยที่

$V$  = ปริมาตรของถังปฏิกรณ์, มิลลิลิตร (ml)

$v_0$  = อัตราการไหลโดยปริมาตรของสาร, มิลลิลิตรต่อนาที (ml/min)

$C_{A0}$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร, โมลต่อมิลลิลิตร (mol/ml)

$X_A$  = คอนเวอร์ชันของสาร

$-r_A$  = อัตราเร็วของปฏิกิริยา, โมลต่อลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (mol/m<sup>3</sup>s)

### ตัวอย่างการคำนวณ

ปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง 3000 มิลลิลิตร (ml)

อัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 9 มิลลิลิตรต่อนาที (ml/min)

$$\tau = \frac{V}{v_0} = \frac{3000}{9}$$

$$= 333 \text{ นาที หรือ } 5.5 \text{ ชั่วโมง}$$

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาว ภัทรจาริน สุวรรณพิทักษ์
วัน เดือน ปีเกิด	9 พฤษภาคม 2531
ที่อยู่	8/9 หมู่ 7 ถ.บางนา-ตราด กม. 9 ต.บางแก้ว อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ 10540
Email	Phattarajarin@purity.co.th
โทรศัพท์	061-8525916
<b>ประวัติการศึกษา</b>	
2550 – 2554	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
2556 – 2560	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
<b>ประวัติการทำงาน</b>	
2555 – ปัจจุบัน	บริษัท เครือเพรียวริตี้ กรุ๊ป จำกัด (มหาชน)
<b>ผลงานตีพิมพ์ในงานประชุมระดับนานาชาติ</b>	
	Anchaleeporn W. Lothongkum, Phattarajarin Suwanpituk and Piyanart Sommani. "Feasibility Thermal And Catalytic Cracking of Used Lubricating Oils by Spent FCC Catalysts" <i>Proceedings of The 7<sup>th</sup> International TIChE Conference (ITIChE 2017) : "Innovative Chemical Engineering and Technology toward a Sustainable Future"</i> Shangri-La Hotel, Bangkok, Thailand, October 18-20, 2017 (accepted).
<b>ประสบการณ์การอบรมผู้ตรวจประเมินภายในการจัดการความปลอดภัยกระบวนการผลิต</b>	
25 – 27 มกราคม 2560	บริษัท พีทีที ฟีนอล จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้