

การเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์
แบบต่อเนื่อง

นางสาวพรชนก แก้วเทวี



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONVERSION OF USED LUBRICATING OIL TO LIQUID FUEL ON SPENT FCC CATALYST IN
CONTINUOUS REACTOR

Miss Pornchanok Kaewtawee



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบน
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์
แบบต่อเนื่อง

โดย

นางสาวพรชนก แก้วเทวี

สาขาวิชา

ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร. ธรารพงษ์ วิทิตสานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรินทร์ ชวศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร. ธรารพงษ์ วิทิตสานต์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชชากร จารุศิริ)

พรชนก แก้วเทวี : การเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (CONVERSION OF USED LUBRICATING OIL TO LIQUID FUEL ON SPENT FCC CATALYST IN CONTINUOUS REACTOR) อ.ที่
 ปรักษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์, 95 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ศึกษาที่ภาวะอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 380-450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 3-9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50-150 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคิดเป็นร้อยละ 30-60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ ออกแบบการทดลองโดยการออกแบบการทดลองเชิงประกอบแบบสองระดับประสมกลาง เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวองค์ประกอบที่ดีที่สุด วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ภาวะที่เหมาะสมที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-Expert พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 44.65 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ ผลจากการทดลองจริงในสภาวะที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเท่ากับ 96.47 โดยน้ำหนัก และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลเท่ากับ 43 โดยน้ำหนัก



สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5772068623 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS:

PORNCHANOK KAEWTAWEE: CONVERSION OF USED LUBRICATING OIL TO LIQUID FUEL ON SPENT FCC CATALYST IN CONTINUOUS REACTOR. ADVISOR: PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., 95 pp.

This research aims to studies the pyrolysis of lubricating oil to liquid fuels using spent FCC in the continuous reactor under the temperature of 380-450 °C, flow rate of lubricating oil 3-9 mL/min, nitrogen gas flow rate of 50-150 mL/min, and spent FCC catalyst of 30-60 %v/v. The design of experiment were used to determine the parameters which were effect to liquid yield and their composition. The substantial of products was analysed by Distillation Simulation Gas Chromatography to determine the liquid oil composition. The optimum condition calculated by Design Expert program was found in the experiment of 9 mL/min of initial lubricating oil with flow rate of nitrogen 50 mL/min and catalyst volume 44.65 % volume of reactor at temperature of 450 °C. This condition gave liquid yield of 96.47 %wt whereas the liquid product distribution gave the highest of diesel like fraction 43 %wt.



Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้และแสดงความคิดเห็น พร้อมทั้งแนวทางการแก้ปัญหาที่เป็นประโยชน์สำหรับใช้ในการศึกษาค้นคว้า ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในหลักสูตรปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความรู้ และข้อเสนอแนะตลอดมา

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวศิริ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชากร จารุศิริ คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบริษัท ไทโยต้าสระบุรี จำกัด ที่อนุเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วสำหรับงานวิจัย บริษัท ไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีสำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานชีวมวล ณ โครงการพัฒนาที่ดินของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่อบรมสั่งสอนและให้การสนับสนุนในทุกๆด้านเสมอมา ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่าน เป็นแหล่งอ้างอิงสำหรับที่ผู้สนใจต่อยอด และเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ตระหนักถึงทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้สามารถนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่สังคมโดยรวม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 น้ำมันหล่อลื่น.....	4
2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน	4
2.1.2 สารเพิ่มคุณภาพ	6
2.1.3 กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น	8
2.1.4 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น.....	9
2.1.5 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น	12
2.2 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว	13
2.2.1 ผลกระทบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว	14
2.2.2 การจัดการเกี่ยวกับน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว	14
2.3 กระบวนการไพโรไลซิส	15

2.3.1	สภาวะที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไฟโรไลซิส.....	15
2.3.2	ปฏิกิริยาในการไฟโรไลซิส.....	15
2.3.3	ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิส.....	16
2.3.4	ลักษณะการให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์.....	16
2.4	การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง.....	16
2.5	ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	17
2.6	ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	18
2.6.1	ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์.....	18
2.6.2	ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์.....	19
2.7	ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์.....	19
2.7.1	สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์.....	20
2.7.2	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์.....	22
2.8	การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	23
2.9	ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพพลูอิดซ์.....	24
2.10	ซีโอไลต์.....	25
2.10.1	สมบัติสำคัญของซีโอไลต์.....	26
2.10.2	การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์.....	27
2.10.3	ลักษณะที่เหมาะสมกับการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	28
2.11	ปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอน.....	30
2.11.1	กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน.....	30
2.11.2	กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา.....	32
2.12	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3	เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	35

3.1 เครื่องปฏิกรณ์และส่วนประกอบ	35
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	37
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์	37
3.4 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	41
3.5 การดำเนินงานวิจัย.....	41
3.6 วิธีการทดลอง.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	45
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว.....	45
4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเชื้อเพลิงของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว	45
4.1.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว.....	46
4.1.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว	46
4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	47
4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา	47
4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา	48
4.2.3 การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ขนาด และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา	49
4.3 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบน ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	51
4.3.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิง เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้ แล้ว.....	51
4.3.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ซีเอสที่ได้ จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	55
4.4 ผลจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิง เหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	59

4.4.1	อิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	60
4.4.2	อิทธิพลของอัตราการไหลของสารตั้งต้นต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิง เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยา เอพซีซีใช้แล้ว	62
4.4.3	อิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่ง ปฏิกิริยา เอพซีซีใช้แล้ว	64
4.4.4	อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจาก การไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้ แล้ว.....	66
4.5	คำนิยามหาภาวะที่เหมาะสมจากปฏิกิริยาไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิง เหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วโดยโปรแกรม Design-Expert	67
4.6	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว	69
4.6.1	องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว.....	69
4.6.2	องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว	72
4.6.3	คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว	73
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	74
5.1	สรุปผลการทดลอง	74
5.2	ข้อเสนอแนะ	75
	รายการอ้างอิง	76
	ภาคผนวก ก. ข้อมูลการทดลอง.....	80
	ภาคผนวก ข. การหาค่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว	85
	ภาคผนวก ค. การออกแบบการทดลองเชิงประกอบสองระดับและการใช้โปรแกรม Design Expert	89

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์95



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	ระบบและอุณหภูมิที่ใช้วัดความชื้นใสของน้ำมันหล่อลื่น.....	10
ตารางที่ 3.1	ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	42
ตารางที่ 3.2	ตารางการทดลองโดยการออกแบบการทดลองเชิงประกอบสองระดับประสม กลาง.....	42
ตารางที่ 4.1	องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว.....	45
ตารางที่ 4.2	สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว.....	47
ตารางที่ 4.3	องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี.....	49
ตารางที่ 4.4	พื้นที่ผิวขนาดและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	50
ตารางที่ 4.5	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้ แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	51
ตารางที่ 4.6	ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	54
ตารางที่ 4.7	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว บน ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	56
ตารางที่ 4.8	ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซลจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้ แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	59
ตารางที่ 4.9	ขอบเขตการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert.....	67
ตารางที่ 4.10	ภาวะที่เหมาะสมของการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลบบน ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่ได้จากโปรแกรม.....	68
ตารางที่ 4.11	ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรมเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง.....	69
ตารางที่ 4.12	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว.....	71
ตารางที่ 4.13	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จาก กระบวนการไพโรไลซิส.....	71

ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิง เหลว	72
ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน ค่าความหนืด และค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ เชื้อเพลิงเหลว.....	73



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	ขั้นตอนการกลั่นน้ำมันดิบ	5
รูปที่ 2.2	กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น	8
รูปที่ 2.3	พลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยาที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	18
รูปที่ 2.4	ภาพจำลองขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่มีตัวรองรับ	22
รูปที่ 2.5	โมเดลโครงร่างผลึกของซีโอไลต์	26
รูปที่ 2.6	โครงสร้างแบบไบเดทเทคของแอลกอฮอล์และไฮโดรคาร์บอนบนตำแหน่งกรด บรอนสเตทของซีโอไลต์	26
รูปที่ 2.7	โครงสร้างตำแหน่งกรดของซีโอไลต์	27
รูปที่ 2.8	การเลือกจำเพาะต่อรูปทรงสารตั้งต้นของซีโอไลต์	29
รูปที่ 2.9	การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างผลิตภัณฑ์ของซีโอไลต์	30
รูปที่ 2.10	การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างทรานซิชันของซีโอไลต์	30
รูปที่ 3.1	เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	35
รูปที่ 3.2	แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	36
รูปที่ 3.3	หน้าจอแสดงแผงควบคุมอุณหภูมิ	36
รูปที่ 3.4	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น	38
รูปที่ 3.5	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์	39
รูปที่ 3.6	เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน	40
รูปที่ 3.7	กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	40
รูปที่ 3.8	เครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ	41
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงอุณหภูมิการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว	46
รูปที่ 4.2	XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี	48
รูปที่ 4.3	SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี	50

รูปที่ 4.4	Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว	53
รูปที่ 4.5	Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว	54
รูปที่ 4.6	Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซล	58
รูปที่ 4.7	Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซล	58
รูปที่ 4.8	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	60
รูปที่ 4.9	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	60
รูปที่ 4.10	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่อัตราการไหลต่างๆ	62
รูปที่ 4.11	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่อัตราการไหลต่างๆ	62
รูปที่ 4.12	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่อัตราการไหลต่างๆของแก๊สไนโตรเจน	64
รูปที่ 4.13	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่อัตราการไหลต่างๆของแก๊สไนโตรเจน	64
รูปที่ 4.14	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ	66
รูปที่ 4.15	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ	66
รูปที่ 4.16	โครมาโทแกรมขององค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส	70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันอัตราการใช้น้ำมันหล่อลื่นในยานพาหนะ อุตสาหกรรม และกิจกรรมอื่นๆ นับวันจะเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร ประเทศไทยมีปริมาณการใช้น้ำมันหล่อลื่น [1] สูงถึง 400-450 ล้านลิตรต่อปี ในส่วนนี้ 30% จะถูกเผาไหม้หรือตกค้างในเครื่องยนต์ แต่อีก 70% จะเหลือทิ้งเป็นน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ทำให้ในแต่ละปีประเทศไทยมีน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วไม่ต่ำกว่า 300 ล้านลิตร โดยทั่วไปน้ำมันหล่อลื่นประกอบด้วยน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและสารเพิ่มคุณภาพ เมื่อผ่านการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นจะมีคุณสมบัติการหล่อลื่นลดลงและมีการปนเปื้อนของโลหะจากเครื่องยนต์ ทำให้น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วมีความสกปรก ความหนืดสูง และประกอบด้วยโลหะหนักและสารพิษที่เกิดการสะสมขึ้น เช่น ตะกั่ว นิเกิล สังกะสี โทลูอิน เป็นต้น ทำให้น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจัดเป็นของเสียอันตราย การกำจัดโดยทั่วไปจะใช้วิธีการเผาในเตาเผา ซึ่งวิธีนี้ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศและยังเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง จึงทำให้น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบางส่วนถูกปล่อยลงสู่ธรรมชาติ [2] ทำให้เกิดการสะสมเป็นตะกอนอยู่ตามแหล่งน้ำต่างๆซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นที่จะต้องผ่านการกำจัดอย่างถูกวิธี

เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วประกอบด้วย อะลิฟาติก อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และยังมีค่าความร้อนสูง จึงทำให้น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ใหม่ เพราะนอกจากจะเป็นการลดปริมาณสารพิษที่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ จึงมีความพยายามค้นคว้าและวิจัยเพื่อนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่เป็นน้ำมันชนิดหนักมาแปรสภาพใหม่เป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยกระบวนการไพโรไลซิส กระบวนการไพโรไลซิส [3] คือ การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ความร้อน ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจนหรือมีออกซิเจนปริมาณน้อย โดยจะเกิดการแตกของพันธะโมเลกุลในองค์ประกอบ จากสายโซ่พันธะเคมียาวกลายเป็นสายโซ่สั้น ส่วนที่เป็นองค์ประกอบคาร์บอนระเหยได้จะกลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิงและบางส่วนที่ถูกควบแน่นก็จะกลายเป็นน้ำมันเหลว กระบวนการไพโรไลซิสได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถใช้วัตถุดิบได้หลากหลายไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ หรือกำจัดน้ำ และกระบวนการไพโรไลซิสใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าได้ดี ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกับการนำไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนและความหนืดต่ำ

จากการศึกษางานวิจัยส่วนใหญ่การทำไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจะทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพวกเชื้อเพลิงเหลวจะผสมกับน้ำมันหนักในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเป็นการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวปานกลางในการเกิดปฏิกิริยา โดยจะสามารถทำการแตกสายโซ่ของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้กลายเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง และมีสมบัติใกล้เคียงผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปิโตรเลียม อิทธิพลของตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิ อัตราการไหลของสารตั้งต้น อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พร้อมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ เพื่อนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ ลดการเกิดมลพิษจากการกำจัดที่ผิดวิธี และเป็นแนวทางในการจัดการของเสียอันตราย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอพซีซีใช้แล้ว

1.2.2 ศึกษาภาวะเหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมาจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบที่ดีที่สุด

1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1.3.1 ศึกษาทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.3.2 ศึกษาการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องมือ และเครื่องทดสอบพร้อมทั้งตรวจสอบความพร้อมในการใช้งาน

1.3.3 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้ว ใช้อุณหภูมิในการเผา (calcine) 500°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง [4]

1.3.4 ศึกษาองค์ประกอบ และสมบัติทางกายภาพของสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

- ศึกษาอุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยเทคนิค thermo gravimetric analysis (TGA)

- ศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (distillation simulation gas chromatography, DGC)

- วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยเทคนิค gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)

- ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)
- วิเคราะห์หาองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-ray fluorescence spectrometry (XRF)
- ตรวจสอบลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค scanning electron microscope (SEM)
- วิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน (BET)

1.3.5 ออกแบบการทดลองเชิงตัวประกอบแบบสองระดับ (2^k factorial design) มีตัวแปรที่จะศึกษา ประกอบด้วย [5]

- อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 380-450 องศาเซลเซียส
- อัตราการไหลของสารตั้งต้น 3-9 มิลลิลิตรต่อนาที
- อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50-150 มิลลิลิตรต่อนาที
- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคิดเป็นร้อยละ 30-60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์

1.3.6 ดำเนินการทดลอง วิเคราะห์ร้อยละผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

- วิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบเชื้อเพลิงเหลวในช่วงคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น
- วิเคราะห์ค่าความร้อนและความหนืด
- วิเคราะห์องค์ประกอบที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงเหลวด้วยเทคนิค gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)
- วิเคราะห์ผลการทดลอง และหาภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิงเหลวมากที่สุด โดยใช้วิธีพื้นผิวการตอบสนอง (response surface methodology)

1.3.7 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมในการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วให้น้ำมันชนิดเบาหรือเชื้อเพลิงเหลวและได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีสมบัติใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์น้ำมันปิโตรเลียม เพื่อลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นแนวทางการจัดการของเสีย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำมันหล่อลื่น

สารหล่อลื่นถ้าแบ่งตามสถานะจะสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด [6], [7] ได้แก่ ของแข็ง สารกึ่งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ของเหลวเป็นสถานะของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กันมากที่สุดในจำนวนสถานะของสารหล่อลื่นทั้งหมด รองลงมาคือสารกึ่งของแข็ง เช่น จาระบี การที่สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะมีความสามารถในการแยกผิววัตถุทั้งสองได้อย่างสมบูรณ์และสามารถรับแรงกระแทกได้มาก น้ำมันหล่อลื่นหรือเรียกกันทั่วไปว่า ‘น้ำมันเครื่อง’ ได้จากการกลั่นในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม โดยทั่วไปจะนำไปหล่อลื่นเครื่องจักรกลที่มีลักษณะปิด และส่วนที่เคลื่อนไหวในรถยนต์ เช่น เฟืองท้าย เพลา ลูกเบี้ยว ห้องเกียร์ และลูกสูบ เป็นต้น น้ำมันหล่อลื่นประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆคือ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base oil) และสารเพิ่มคุณภาพ (Additives)

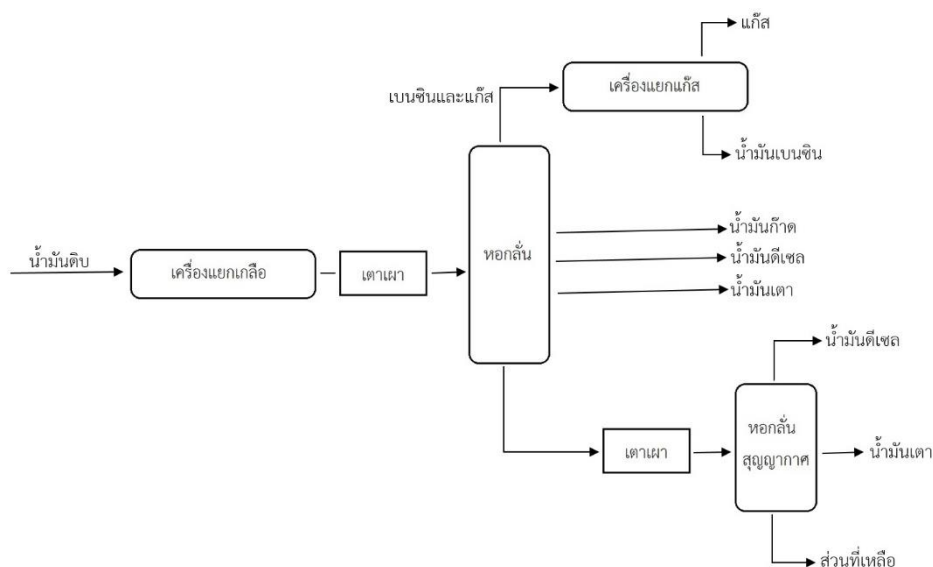
2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน [8] ที่ใช้กันมีอยู่ 3 ประเภทได้แก่ น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ น้ำมันแร่ และน้ำมันสังเคราะห์ น้ำมันแร่จะนิยมใช้เป็นส่วนใหญ่เพราะราคาถูกและคุณภาพดีเพียงพอ ส่วนน้ำมันชนิดอื่นๆจะใช้ในงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางอย่างเท่านั้น

- **น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืชหรือสัตว์ (Vegetable or Animal Base Oil)** น้ำมันจากพืชที่นิยมใช้ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันละหุ่ง เป็นต้น ส่วนน้ำมันจากสัตว์ที่นิยมใช้ ได้แก่ น้ำมันหมู น้ำมันปลา เป็นต้น แต่น้ำมันชนิดนี้ไม่นิยมใช้ในปัจจุบันเนื่องจากมีความคงทนทางเคมีต่ำ และเสื่อมสภาพได้ง่ายขณะใช้งาน ทำให้ต้องนำไปผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเพื่อเพิ่มมูลค่าให้สูงขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงไม่นิยมใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานแต่จะใช้เป็นสารเพิ่มคุณภาพ เพื่อใช้กับงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางประการในการหล่อลื่น เช่น ใช้เพื่อเพิ่มความลื่น และใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการรวมตัวกับน้ำ เป็นต้น

- **น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมหรือน้ำมันแร่ (Mineral Base Oil)** น้ำมันประเภทนี้นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากคุณภาพดีและราคาถูก ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบในหอกลั่น เนื่องจากส่วนหนักที่มีจุดเดือดสูงจะไม่ระเหยเป็นไอและเหลือน้ำมันเตา ไช และยางมะตอย ส่วนเหล่านี้จะถูกนำมาทำเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 หลังจาก

ออกจากหอกลั่นสุญญากาศแล้วก็จะนำไปผ่าน กระบวนการต่าง ๆ เพื่อแยกส่วนที่ไม่ต้องการออกให้ เหลือน้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติตามต้องการ



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการกลั่นน้ำมันดิบ

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากปิโตรเลียมแยกตามคุณสมบัติได้ 3 ประเภท ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำมันดิบที่นำมาใช้ ได้แก่ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนประเภทไม่อิ่มตัว น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบมาตรฐานพาราฟินิก และน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบมาตรฐานแนฟธิก

- น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic Base Oil) เป็นน้ำมันที่ดัชนีความหนืดสูงมาก จึงมีความคงตัวในอุณหภูมิสูงๆ ได้ดีไม่เสื่อมสลายง่ายและมีการระเหยต่ำ ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมี โดยเป็นการรวมตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำให้ได้น้ำมันที่มีความหนืดเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่น สารเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิตส่วนใหญ่มาจากน้ำมันปิโตรเลียมทำให้มีราคาค่อนข้างสูง น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานพิเศษเฉพาะที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ เช่น ดัชนีความข้นใสสูง มีการระเหยต่ำ และจุดไหลเทต่ำ เป็นต้น น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป แบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม

- กลุ่มไฮโดรคาร์บอนคาร์บอนสังเคราะห์ เช่น โอลิฟินโอลิโกเมอร์ อัลคิลเตตระโรมาติก และโพลีบิวทีน
- กลุ่มเอสเทอร์อินทรีย์ เช่น ไดเบสิกเอซิดเอสเทอร์ หรือที่เรียกว่า ไดเอสเทอร์
- พอลิไกลคอลส์

- ฟอสเฟตเอสเทอร์
- น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์อื่นๆ เช่น ซิลิโคน

2.1.2 สารเพิ่มคุณภาพ

วัสดุหรือสารเคมีที่เติมลงในสารหล่อลื่น เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆและเพิ่มสมรรถนะในการหล่อลื่นสูงขึ้น สารเพิ่มคุณภาพ [9] ที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายชนิด โดยสารเพิ่มคุณภาพแต่ละชนิดจะมีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเฉพาะอย่างแบ่งตามผลที่มีต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานออกได้เป็น 3 ชนิด คือสารเพิ่มคุณภาพที่ให้คุณสมบัติใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน สารเพิ่มคุณภาพที่ปรับปรุงคุณสมบัติที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้นและสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในขณะทำงาน สำหรับสารเพิ่มสารคุณภาพที่นิยมใช้งานโดยทั่วไป เช่น

- **สารลดจุดไหลเท (Pour point depressants)** เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการยับยั้งการเกิดผลึกไขทำให้น้ำมันไม่สามารถไหลได้ที่อุณหภูมิต่ำทำให้จุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นต่ำลง จึงสามารถใช้งานอุณหภูมิต่ำๆ โดยทั่วไปเมื่อเติมสารนี้ลงในน้ำมันหล่อลื่นจะช่วยลดอุณหภูมิของจุดไหลเทลง สำหรับสารที่ใช้เป็นลดจุดไหลเทจะเป็นพวกพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น พอลิเมทาคริเลต (Polymethacrylates) ทำหน้าที่ตกผลึกร่วมกับไขเพื่อป้องกันไม่ให้ผลึกเติบโต และอัลคิลแอโรแมติกพอลิเมอร์ (Alkylaromatic polymers) ทำหน้าที่ในการดูดกลืนผลึกของไขเมื่อเกิดขึ้นเพื่อป้องกันไม่ให้ผลึกเติบโตและยึดติดกัน

- **สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity index improvers)** เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยไม่ให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงมากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สารที่ใช้เพิ่มค่าดัชนีความหนืดจะเป็นพวกโพลีเมอร์น้ำหนักโมเลกุลสูงและมีโครงสร้างเป็นลูกโซ่ยาว (Long chain) ไตแก เมทาคริเลตพอลิเมอร์ (Methacrylate polymers) , โอลิฟินพอลิเมอร์ (Olefin polymers) และอะคริเลตพอลิเมอร์ (Acrylate polymers) เป็นต้น เนื่องจากโพลีเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลยืดออกและเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลขึ้นทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเพิ่มความหนืดสัมพัทธ์ของน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูงมากกว่าการเพิ่มความหนืดสัมพัทธ์ของน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิต่ำ

- **สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation inhibitors)** เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยลดตะกอนเมื่อความหนืดและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเกิดออกซิเดชัน สารเพิ่มคุณภาพที่นิยมใช้ได้แก่ สังกะสีไดไทโอฟอสเฟต (Zinc dithiophosphate) การเกิดออกซิเดชันเกิดจาก เมื่อน้ำมันหล่อลื่นได้รับความร้อนและสัมผัสกับอากาศจะเกิดปฏิกิริยา

ระหว่างน้ำมันหล่อลื่นและออกซิเจนในอากาศ และผลของการเกิดออกซิเดชันทำให้ความหนืดและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นทำให้เกิดตะกอน

- **สารป้องกันการเกิดฟอง (Defoamants)** เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำมันหล่อลื่นเกิดฟองอากาศในขณะที่ทำหน้าที่หล่อลื่นชิ้นส่วนเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกล เนื่องจากภายในฟองอากาศมีส่วนประกอบของออกซิเจนและเมื่อฟองแตกสัมผัสกับพื้นผิวของชิ้นส่วนเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดออกซิเดชันขึ้น สารที่นิยมใช้เป็นสารป้องกันการเกิดฟอง คือ ซิลิโคนพอลิเมอร์ (Silicone polymer) และพอลิเมอร์อินทรีย์ (Organic polymer) ดังนั้นเมื่อใส่สารป้องกันการเกิดฟองจะส่งผลให้โมเลกุลของสารเข้าไปติดกับฟองอากาศทำให้ฟองอากาศรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยขึ้นที่บริเวณผิวจนแตกออกในที่สุด

- **สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion inhibitors)** เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยในการปกป้องพื้นผิวของชิ้นส่วนเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลที่ต้องการหล่อลื่นจากการถูกกัดกร่อน สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารป้องกันการกัดกร่อน คือ สังกะสีไดทีโอซเฟต และสารที่มีซัลเฟอร์และฟอสฟอรัส

- **สารป้องกันการเกิดสนิม (Rust inhibitor)** เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยป้องกันสนิมที่เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นส่วนโลหะที่มีการหล่อลื่นได้แก่ อะไมด์ซักซิเนต (Amine succinates) และอัลคาไลเอิร์ทซัลโฟเนต (Alkaline earth sulfonates) สารประกอบที่ใช้จะต้องยึดติดกับผิวของโลหะได้ดี โดยสารป้องกันการเกิดสนิมจะทำปฏิกิริยากับผิวโลหะเกิดเป็นฟิล์มเคลือบบนผิวเพื่อไม่ให้น้ำเข้าถึงผิวโลหะ

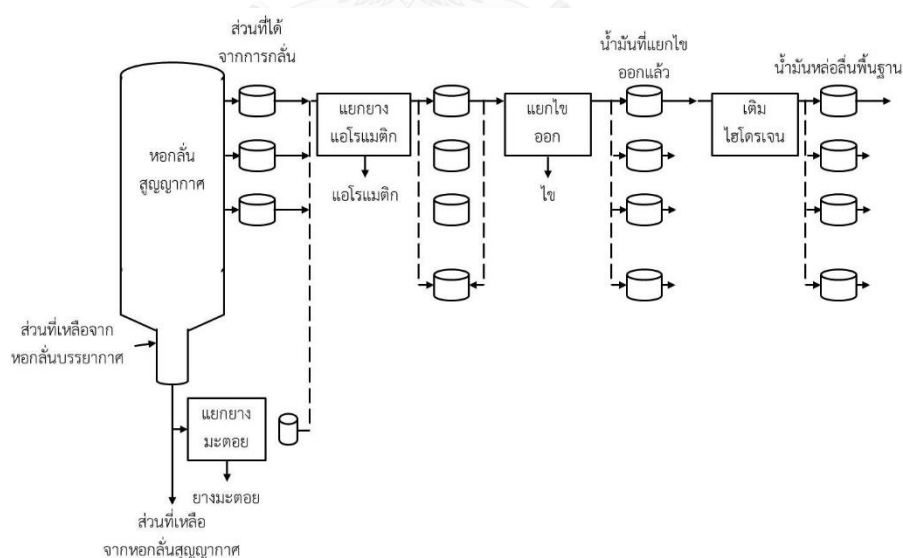
- **สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (Detergents and dispersants)** เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวของชิ้นส่วนเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลที่มีการหล่อลื่นและช่วยกระจายทำให้ไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นโคลนหรือตะกอนซึ่งจะอุดช่องทางน้ำมันโดยจะไปรวมกันอยู่ด้านหลังของแหวนลูกสูบในเครื่องยนต์ทำให้แหวนติดตายได้ สารที่นิยมใช้เป็นสารชะล้างได้แก่ สบู่อินทรีย์ (Organic soaps) บาริเยม (Barium) แคลเซียม (Calcium) และแมกนีเซียมซัลโฟเนต (Magnesium sulfonates) เป็นต้น ส่วนสารที่นิยมใช้เป็นสารกระจายสิ่งสกปรก ได้แก่ พอลิเมอร์ซัคซิไมด์ (Polymeric succinimides) เบนซิลไมด์ (Benzylamides) เป็นต้น

- **สารป้องกันการสึกหรอ (Antiwear additives)** เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยลดความเสียดทานและการสึกหรอภายใต้สภาวะการหล่อลื่นแบบเบานดารี (Boundary lubrication) คือในสภาวะที่ฟิล์มของน้ำมันแยกผิวสัมผัสได้อย่างสมบูรณ์ไม่สามารถคงอยู่ได้ สารป้องกันการสึกหรอที่ใช้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

- สารที่ใช้ลดความเสียดทานและการสึกหรอสำหรับสภาวะการทำงานเบาเรียกว่า สารเพิ่มคุณภาพสำหรับการหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี (Boundary lubrication additives) ได้แก่ กรดไขมัน (Fatty acids) และน้ำมันไขมัน (Fatty oils)
- สารที่ใช้ลดความเสียดทานและการสึกหรอภายใต้สภาวะความดันสูงมาก เรียกว่า Extreme pressure additive (EP) โดยทำปฏิกิริยาทางเคมีกับผิวโลหะ ทำให้เกิดเป็นฟิล์มเคลือบที่ผิวป้องกันการสัมผัสโดยตรงของผิวโลหะได้แก่ สารประกอบของ ซัลเฟอร์ คลอรีน หรือฟอสฟอรัส ตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวรวมกัน

2.1.3 กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น

กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น [10] แสดงในรูปที่ 2.2 เป็นการนำน้ำมันแร่ที่ก้นหอกกลั่นบรรยากาศมากลั่นภายใต้สุญญากาศ เพื่อแยกน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชั้นออกมา ชนิดและปริมาณน้ำมันแร่ที่แยกได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาผ่านกระบวนการกลั่น คือ น้ำมันแร่ที่มีไขสูงจะได้จากน้ำมันดิบพวกพาราฟิน จึงจะต้องผ่านกระบวนการกำจัดไข น้ำมันแร่ชนิดนี้คุณภาพจะไม่ดีพอที่จะใช้ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่น เพราะต้องผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อกำจัดสารที่ไม่ต้องการออก



รูปที่ 2. 2 กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น

จากรูปที่ 2.2 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่แยกออกมา นำมาผ่านกระบวนการเพื่อแยกส่วนที่ไม่ต้องการออกให้มีความบริสุทธิ์และมีคุณภาพดีขึ้น โดยกระบวนการต่างๆมีดังนี้

- **การกลั่น (Distillation)** ในหอกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิงจะมีหอกลั่นบรรยากาศเพื่อแยกผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงต่างๆ ส่วนในโรงกลั่นน้ำมันหล่อลื่นจะนำส่วนที่เหลือไปผ่านหอกลั่นสุญญากาศเพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นส่วนที่หนักๆ กลั่นตัวออกมา

- **การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)** เป็นการกำจัดสารอะโรมาติกด้วยตัวทำละลาย เพื่อให้ น้ำมันที่ใช้มีดัชนีความข้นใสสูงขึ้น สีสดใสนั้น และเพื่อไม่ให้เกิดการรวมตัวกันกับออกซิเจน ตัวทำละลายส่วนใหญ่ที่ใช้คือฟีนอล

- **ไฮโดรรีไฟนิง (Hydrotreating)** เป็นการทำให้ น้ำมันหล่อลื่นมีสีสวยขึ้น สีคงตัวได้นาน เหม่าลดลง และมีอายุการใช้งานยาวนาน โดยจะทำการเติมไฮโดรเจนเพื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างโมเลกุลของสารประกอบกำมะถัน ไนโตรเจน กรด และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว

- **การแยกไข (Dewaxing)** เพื่อให้จุดไหลเทต่ำ ทำให้สามารถใช้งานในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำหรือใช้ในฤดูหนาวได้ดี

- **การแยกแอสฟัลต์ (Asphalt Separation)** เป็นการแยกเอาสารจำพวกยางมะตอยออกจาก น้ำมันหล่อลื่นส่วนหนักๆ

2.1.4 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านออกมาจากโรงกลั่นในแต่ละกระบวนการผลิตจะมีการควบคุมคุณสมบัติให้ได้ตามต้องการ ทำให้ น้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกใช้จึงจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติเพื่อให้สามารถเลือกชนิดได้ตรงตามการใช้งาน คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันหล่อลื่น [11], [12] มีดังนี้

- **ความหนืดหรือความข้นใส (Viscosity)** หมายถึงความใสหรือความข้นของน้ำมัน เป็นคุณสมบัติของของไหลที่วัดในรูปของความต้านทานการไหล เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดเนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัสและมีผลต่อการเกิดความร้อน เนื่องจาก น้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดต่ำสามารถไหลได้ง่ายและจะเกิดฟิล์มบางส่วน ในขณะที่ น้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงจะเกิดฟิล์มหนาและไหลยากขึ้น ค่าความหนืดจะไม่คงที่แปรผันกับสภาวะการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุณหภูมิและความดัน ในด้านของอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่น คือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ของเหลวเกิดการขยายตัวโมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนห่างกัน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลงและเป็นผลให้ความหนืดลดลง ในส่วนของความดันจะเห็นผลได้ชัดเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเมื่อความดันเพิ่มโมเลกุลของน้ำมันก็จะถูกบีบให้เข้าใกล้กัน ทำให้แรงยึดติดระหว่าง

โมเลกุลเพิ่มขึ้น และเป็นผลให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นด้วย หน่วยวัดความข้นใสมีหลากหลายระบบและอุณหภูมิที่ใช้วัดก็แตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ระบบและอุณหภูมิที่ใช้วัดความข้นใสของน้ำมันหล่อลื่น

ลำดับ	ระบบ	หน่วยความข้นใส	อุณหภูมิที่ใช้วัด
1	ระบบสากล (เมตริก)	เซนติสโตก ; cSt	40°C และ 100°C
2	อเมริกา	วินาทีเซย์โบลต์ ; SUS หรือ SSU	100°F และ 210°F
3	สหราชอาณาจักร	เรดวูด No.1 ; Rw.1	70°F, 100°F, 140°F และ 210°F
4	เยอรมนี และประเทศ ในยุโรป	อิงเลอร์ ; E°	20°C, 50°C และ 100°C

- **ดัชนีความหนืด (Viscosity index)** ความหนืดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิต่ำความหนืดจะสูง (มีความข้น) และที่อุณหภูมิสูงความหนืดจะต่ำ (มีความใส) จากการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถนำมาวัดได้เป็น 'ดัชนีความหนืด' เมื่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากส่งผลให้ความหนืดเปลี่ยนแปลงน้อยแสดงว่าน้ำมันมีค่า VI สูง ส่วนอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยและการเปลี่ยนแปลงความหนืดมาก แสดงว่าน้ำมันมีค่า VI ต่ำ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กับเครื่องยนต์ควรมีความหนืดคงที่ทั้งอุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง แต่การผลิตให้มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ทำได้ยาก จึงต้องปรับปรุงโดยการเติมสารเพิ่มคุณภาพบางชนิดลงไป

- **กากคาร์บอน (Carbon residue)** คือ สิ่งที่ตกค้างที่อยู่หลังการเผาไหม้น้ำมันหล่อลื่นในสถานะที่กำหนดจะคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก ในการใช้งานปริมาณกากคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นจะไม่ค่อยมีความสำคัญนัก เนื่องจากในการใช้งานน้ำมันหล่อลื่นจะไม่มีเผาไหม้โดยตรง แต่ปริมาณกากคาร์บอนจะมีความสำคัญกับน้ำมันเชื้อเพลิง เพราะมีการเผาไหม้โดยตรง ดังนั้นการหาปริมาณกากคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะเป็นการหาสำหรับหล่อลื่นพื้นฐาน เพื่อดูว่ากระบวนการผลิตเป็นไปตามที่กำหนดหรือไม่

- **สี (Color)** สีของน้ำมันหล่อลื่นจะแตกต่างกันไปตามชนิดของน้ำมันดิบ วิธีการกลั่น การผลิต ปริมาณและชนิดของสารเพิ่มคุณภาพ โดยสีของน้ำมันหล่อลื่นที่เห็นเมื่อมีแสงผ่านจะมีสีต่างกัน เช่น สีเหลืองใส สีแดง สีน้ำตาล สีดำ เป็นต้น ดังนั้นในด้านการใช้งานสีจึงไม่มีความสำคัญนัก ยกเว้นกรณีที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา

- **ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (Density and gravity)** ความหนาแน่น หมายถึงมวลของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนด ส่วนความถ่วงจำเพาะหมายถึงอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันและความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน ในสหรัฐอเมริกากำหนดค่าความถ่วงจำเพาะในรูปของหน่วยองศา ATP (American petroleum institute) โดยค่าความถ่วงจำเพาะใช้เป็นตัวช่วยในการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าพบว่าน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้แล้วมีความถ่วงจำเพาะลดลง (ค่าองศา ATP เพิ่มขึ้น) แสดงว่ามีน้ำมันเชื้อเพลิงเข้ามาผสม แต่ถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นแสดงว่ามีสิ่งแปลกปลอม เช่น เหม่าหรือสารที่เกิดจากการรวมตัวกับออกซิเจนผสมอยู่

- **จุดวาบไฟและจุดติดไฟ (Flash and fire point)** อุณหภูมิที่ทำให้น้ำมันสามารถระเหยกลายเป็นไอเพียงพอที่ผิวและสามารถเกิดการลุกไหม้เมื่อโดนเปลวไฟ แต่ที่อุณหภูมินี้ไม่เพียงพอที่จะทำให้การลุกไหม้คงอยู่และดำเนินต่อไป ทำให้เปลวไฟดับลงได้เองในทันที อุณหภูมิ ณ จุดนี้เรียกว่า ‘จุดวาบไฟ’ แต่ถ้ามีการให้ความร้อนต่อไปอีกส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดการลุกไหม้ได้ต่อเนื่องเป็นเวลา 5 วินาที อุณหภูมิ ณ จุดนี้เรียกว่า ‘จุดติดไฟ’ ซึ่งจุดติดไฟมักจะสูงกว่าจุดวาบไฟประมาณ 10 ถึง 20 องศาเซลเซียส จุดวาบไฟของน้ำมันหล่อลื่นจะแปรผันกับความหนืด คือเมื่อความหนืดสูงก็จะมีจุดวาบไฟสูง ค่าทั้งสองนี้มีความสำคัญไม่เพียงเฉพาะในด้านความอันตรายจากการลุกไหม้ แต่ยังมีผลในด้านการระเหยของน้ำมันด้วย น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจะมีค่าจุดวาบไฟสูงเนื่องจากการมีการละลายของน้ำมันอื่นๆหรือน้ำมันเชื้อเพลิงอื่นๆผสมลงไป

- **จุดไหลเท (Pour point)** จุดที่อุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้น้ำมันยังคงไหลได้ภายใต้สภาวะที่กำหนด ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวโน้มของน้ำมันที่จะหยุดไหลจากระบบป้อน ถ้าอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นต่ำกว่าจุดไหลเท น้ำมันหล่อลื่นก็จะแข็งและเกาะกันเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงทำให้ น้ำมันไม่สามารถไหลต่อไปได้ ซึ่งสามารถทำให้ลดลงได้โดยการเติมสารที่เรียกว่า Pour point depressant สารนี้จะช่วยป้องกันการเจริญเติบโตของผลึกซีฟี่นึ่งที่จะกลายเป็นผลึกแข็งต่อไป แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นสูงกว่าจุดไหลเทไซท์ที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นก็จะหลอมตัวเข้ากับน้ำมันทำให้ น้ำมันสามารถไหลได้ ความสำคัญของจุดไหลเทอยู่ที่สภาวะการนำไปใช้งาน เช่น น้ำมันหล่อลื่นตู้เย็น หรือน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ในพื้นที่ที่มีสภาพอากาศอุณหภูมิหนาวจัด ต้องเลือกใช้ใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำเพื่อให้ น้ำมันสามารถไหลได้ถึงแม้อุณหภูมิของอากาศโดยรอบจะต่ำ

- **ตัวเลขความเป็นกลาง (Neutralization number)** โดยทั่วไปน้ำมันหล่อลื่นจะมีสภาพความเป็นกรดเล็กน้อย ซึ่งสภาพความเป็นกรดนี้จะวัดเป็นปริมาณของเบสมาตรฐานที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำมันมีสภาพเป็นกลาง โดยการวัดความเป็นกรดนี้จะวัดในรูปของจำนวนเบสทั้งหมด (Total base number, TBN) และสภาพความเป็นกรดจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำมันหล่อลื่นถูกใช้งานเป็นเวลานาน

เนื่องจากเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจนทำให้เกิดกรดอินทรีย์ ดังนั้นจึงเติมสารเพิ่มคุณภาพที่มีความเป็นด่างเข้าไป เพื่อให้สารที่เกิดจากการเผาไหม้ที่มีสภาพเป็นกรดเปลี่ยนสภาพเป็นกลาง

- **ความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน** น้ำมันหล่อลื่นเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีความซับซ้อน เมื่อสารไฮโดรคาร์บอนสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศจะทำให้เกิดปฏิกิริยากันและจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วในที่มีอุณหภูมิสูง ส่งผลให้สมบัติของน้ำมันเปลี่ยนแปลงไป เช่น กรด ความเหนียว ดังนั้นน้ำมันที่ดีควรที่จะรวมตัวหรือทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ยาก

2.1.5 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น

โดยทั่วไปน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้มีหลายชนิด ทั้งที่ใช้หล่อลื่นเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลต่างๆ โดยหน้าที่หลักและประโยชน์ของการใช้น้ำมันหล่อลื่น [13] มีดังนี้

- **หล่อลื่น** ฟิล์มหรือเยื่อบางๆของน้ำมันหล่อลื่นที่เคลือบที่ผิวโลหะหรือชิ้นงานจะทำหน้าที่ช่วยลดการเสียดสีกันโดยตรง โดยมีผลทำให้ระยะเวลาในการใช้งานนานขึ้นและยังช่วยลดการสึกหรอ น้ำมันหล่อลื่นที่ดีต้องมีคุณสมบัติในการคงความหนาของฟิล์มให้คงที่ตลอดเวลาแม้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

- **ระบายความร้อน** การช่วยระบายความร้อนที่ดีเป็นคุณสมบัติที่สำคัญข้อหนึ่งของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์ ซึ่งทำหน้าที่ลดอุณหภูมิหรือระบายความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบอกสูบ และช่วยระบายความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีที่ผิวของชิ้นส่วนต่างๆ

- **รักษาความสะอาด** โดยสามารถชะล้างหรือขจัดคราบสกปรกต่างๆบนผิวของชิ้นงานได้

- **ป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อน** น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องไม่มีสารที่ก่อให้เกิดอันตรายในการกัดกร่อน และเมื่อมีสารจากภายนอกที่เป็นผลทำให้เกิดการกัดกร่อน เช่น แก๊สไอเสีย ละอองน้ำหรือไอน้ำ น้ำมันหล่อลื่นจะต้องทำให้กรดนั้นเจือจาง เพื่อที่จะไม่สามารถกัดกร่อนโลหะของชิ้นงานได้

- **กระจายความสกปรก** สิ่งสกปรกที่หลุดออกที่เป็นผลจากสมบัติการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงาน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีก็ต้องทำหน้าที่กระจายสิ่งสกปรก เพื่อไม่ให้สิ่งสกปรก รวมตัวกัน เพราะการรวมตัวกันของสิ่งสกปรกจะทำให้เกิดยางเหนียวอุดตันในชิ้นงาน

- **ป้องกันการรั่วซึม** ช่วยรักษากำลังอัดในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ โดยน้ำมันหล่อลื่นจะแทรกเข้าไปประหว่งลูกสูบ แหวนลูกสูบ และกระบอกสูบ เป็นการสร้างแรงอัดให้กับเครื่องยนต์ และช่วยป้องกันแก๊สที่เป็นส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศ ไม่ให้ผ่านช่องว่างระหว่างแหวนเพื่อไม่ให้กำลังอัดของเครื่องยนต์ที่อยู่บริเวณบนหัวลูกสูบรั่วไหลออกจากห้องเผาไหม้ จนทำให้เครื่องยนต์ไม่มีกำลัง

2.2 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

น้ำมันหล่อลื่น หรือน้ำมันเครื่องโดยทั่วไปนิยมใช้ในยานพาหนะ [14] ในอุตสาหกรรมและกิจการอื่นๆ จึงเกิดเป็นน้ำมันเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก มีปริมาตรไม่ต่ำกว่า 300 ล้านลิตรต่อปี เมื่อน้ำมันหล่อลื่นที่ถูกใช้งานคุณสมบัติการหล่อลื่นจะลดลง และมีการปนเปื้อนของโลหะจากเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพไปเรื่อยๆจนในที่สุดไม่อยู่ในสภาพที่สามารถใช้งานได้อีก ลักษณะของการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นถูกจำแนกได้ 3 ลักษณะ ดังนี้

- **การเสื่อมสภาพของตัวเนื่อน้ำมันที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน**เกิดจากน้ำมันหล่อลื่นรวมตัว กับออกซิเจนหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเฉพาะน้ำมันพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่เมื่อรวมตัวกับออกซิเจนแล้วจะเกิดความเป็นกรดทำให้เนื่อน้ำมันเสื่อมสภาพเร็วขึ้นและทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นส่วนที่เป็นโลหะเกิดยางเหนียวและโคลน ซึ่งอาจทำให้ระบบหมุนเวียนอุดตันทำให้ความหนืดของน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการรวมตัวกับออกซิเจน เมื่ออุณหภูมิในการใช้งานสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นและหากมีเศษโลหะอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น เศษโลหะเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาได้อีกด้วย ผลของการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้เนื่อน้ำมันพื้นฐานสูญเสียคุณสมบัติในการหล่อลื่น และสูญเสียคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน

- **สารเพิ่มคุณภาพในน้ำมันหมดไปหรือเสื่อมสภาพลง** สารเพิ่มคุณภาพในน้ำมันช่วยให้เนื่อน้ำมันหล่อลื่นมีคุณสมบัติที่ดีและเหมาะสมกับสภาพการใช้งานก็จริง แต่สารเหล่านี้ก็มีวันหมดและเสื่อมคุณภาพ หากใช้หมดหรือเปลี่ยนสภาพไปเป็นสารอื่นแล้วก็จะไม่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติอีกต่อไป

- **สารอื่นหรือสิ่งสกปรกเข้าไปปะปน** สารปนเปื้อนที่เมื่อเข้าไปปะปนกับระบบอาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นได้ เช่น น้ำจากภายนอกกระบบเมื่อเข้าไปปะปนกับน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้คุณภาพของน้ำเข้าไปแทรกตัวในเนื่อน้ำมันทำให้เนื่อน้ำมันหล่อลื่นมีลักษณะขุ่นขาว ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนไปและไม่เหมาะที่จะใช้งานต่อ จึงได้มีการเติมสารเพิ่มคุณภาพลงไปเพื่อให้เนื่อน้ำมันแยกตัวออกจากชั้นน้ำมันและถูกถ่ายทิ้ง นอกจากนี้ฝุ่นผงและเขม่าโดยเฉพาะพวกเศษโลหะถ้าเข้ามาปะปนอยู่กับน้ำมันหล่อลื่นเป็นจำนวนมากจะทำให้ไปขัดสีผิวโลหะของเครื่องจักรทำให้เกิดรอยขีดข่วนและเกิดการสึกหรอ และทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสูงขึ้นด้วย นอกจากนั้นพวกน้ำมันเชื้อเพลิงถ้าเล็ดลอดไปปะปนจะทำให้เนื่อน้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดลดลงส่งผลให้น้ำมันหล่อลื่นไม่เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังไม่ให้สิ่งอื่นภายนอกเข้าไปปะปนกับน้ำมันหล่อลื่น ถึงแม้จะเป็นน้ำมันหล่อลื่นต่างชนิดกันก็ไม่ควรจะนำมาผสมกันเพราะอาจทำให้คุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นเสื่อมลงได้

2.2.1 ผลกระทบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วส่งผลกระทบต่อด้านต่างๆ [15] ดังนี้

- **ผลกระทบต่อมนุษย์** หากสัมผัสกับน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นประจำ ผิวจะแตกแห้ง ระคายเคือง เป็นผื่นแดง เนื่องจากน้ำมันจะไปชะล้างไขมันออกจากผิวหนัง เป็นผลให้เกิดการติดเชื้อและแพ้ได้ง่าย แต่หากสูดดมรับไอระเหยของน้ำมันหล่อลื่นในกรณีที่เครื่องยนต์มีการใช้งาน จะมีอาการวิงเวียน คลื่นไส้ อ่อนเพลีย ง่วงนอน และเกิดการระคายเคืองต่อหลอดลมและปอด หากรับประทานเข้าสู่ร่างกาย สารเพิ่มคุณภาพที่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ ปวดท้อง และท้องเสีย

- **ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม** การทิ้งน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วลงในแหล่งน้ำหรือท่อน้ำสาธารณะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในแหล่งน้ำ เพราะน้ำมันจะลอยตัวบนผิวน้ำกั้นไม่ให้ออกซิเจนและแสงอาทิตย์ผ่านลงไปได้เป็นการทำลายแหล่งอาหาร การวางไข่ของสัตว์น้ำ และทำลายทัศนียภาพ หากน้ำมันหล่อลื่นรั่วไหลลงดิน พื้นดินบริเวณนั้นจะเสียคุณค่าในการเพาะปลูก และถ้ามีการเผา น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ควันที่เกิดจากการเผาเป็นควันพิษที่มีโลหะหนักและออกไซด์ของโลหะฟุ้งกระจายสู่บรรยากาศ

2.2.2 การจัดการเกี่ยวกับน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

มีวิธีการกำจัดหลายวิธี [16] ได้แก่

- **ผสมกับน้ำมันดิบนำเข้าโรงกลั่นน้ำมัน** ขั้นตอนก่อนเข้ากระบวนการจะต้องทำความสะอาดเบื้องต้น แต่พบว่าวิธีนี้มีโอกาสเกิดการกักตุนอนุภาคในโรงกลั่นสูง และจะต้องมีกระบวนการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น วิธีนี้จึงไม่คุ้มค่าที่จะดำเนินการ

- **นำเข้ากระบวนการกลั่นหรือกรอง** เป็นวิธีที่ต้องคำนึงถึงมาตรฐานและคุณภาพของโรงกลั่นและน้ำมันที่ได้ โรงกลั่นในประเทศไทยมีการกรองน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเกิดขึ้นหลายโรง แต่ยังไม่พบว่าโรงใดสามารถกำจัดกากของเสียแล้วเป็นที่ยอมรับได้

- **ใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในเตาเผา** เป็นการนำน้ำมันเชื้อเพลิงมาผสมกับน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในอัตราส่วนประมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก วิธีการนี้ต้องคำนึงในเรื่องกากของเสียและมลพิษทางอากาศที่จะเกิดขึ้น

- **กำจัดโดยการเผาในเตาเผาขยะ** กรมโรงงานมีโครงการที่จะสร้างแผนเพื่อติดตั้งเตาเผาแต่ต้องใช้เงินลงทุนสูงมากซึ่งไม่เหมาะสมกับสภาพเศรษฐกิจในประเทศ ปัจจุบันจึงต้องยืดเวลาในการสร้างโครงการออกไป อย่างไรก็ตามการกำจัดด้วยวิธีนี้จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงมลพิษที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ

- การกำจัดน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในเตาเผาซีเมนต์ เป็นเตาที่ให้ความร้อนสูงถึง 1,450 องศาเซลเซียส สามารถเผาให้สารอินทรีย์ถูกทำลายได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่มีกากให้กำจัด วิธีนี้เป็นการนำพลังงานมาใช้ประโยชน์ได้ดีและลดการใช้เชื้อเพลิง ทำให้วิธีนี้ถูกยอมรับเพราะไม่กระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.3 กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส [17] คือกระบวนการแตกตัวและสลายตัวของสารประกอบด้วยความร้อน ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจนหรือมีปริมาณออกซิเจนน้อยมาก ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 300 ถึง 650 องศาเซลเซียส ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามสภาวะคือ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว (ทั่วไปมีคุณสมบัติคล้ายน้ำมัน) และ แก๊ส อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในกระบวนการ เช่น อุณหภูมิ ความร้อน เป็นต้น โดยทั่วไปการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการคือของเหลวหรือน้ำมันส่วนแก๊สที่ได้นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

2.3.1 สภาวะที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิส

- อุณหภูมิ มีผลต่อการแตกตัวของวัตถุดิบ และปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้
- ความดัน มีผลต่อการแตกตัวของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ
- ความร้อน มีผลต่อเวลาที่ใช้ในกระบวนการ และการแตกตัวของวัตถุดิบ
- เวลา เวลาที่ใช้ในการเผามีผลต่อปริมาณการใช้เชื้อเพลิง และผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก

กระบวนการ

- ชนิดของถังปฏิกรณ์ มีผลต่ออัตราเร็วของการให้ความร้อนและเวลาที่ใช้ใน

กระบวนการ

- ระบบการป้อนสารตั้งต้น มีผลต่อการแตกตัวของวัตถุดิบที่จะป้อนเข้าไปใน

กระบวนการ

2.3.2 ปฏิกริยาในการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสมีปฏิกริยาที่เกิดขึ้นด้วยกัน 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกการสลายตัวของสารที่ระเหยง่ายออกจากวัตถุดิบ และขั้นที่สองเป็นการแตกตัวของวัตถุดิบเองโดยองค์ประกอบที่สามารถแตกตัวได้ที่สภาวะที่ใช้ในกระบวนการ โดยจะแตกตัวออกเป็นโมเลกุลที่เสถียรตามเวลาที่ให้หรือที่อุณหภูมิที่กำหนด จนเกิดการแตกตัวที่สมบูรณ์ของวัตถุดิบ โดยที่อุณหภูมิในแต่ละขั้นจะ

แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ อย่างไรก็ตามถ้ามีการให้ความร้อนและเวลายาวเกินไป สารที่ได้จากการแตกตัวของวัตถุดิบจะกลับมารวมตัวกันเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งอาจกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าที่ได้จากกระบวนการ หรืออาจเป็นของแข็งชั้นเหนียวติดอยู่ตามอุปกรณ์ต่างๆได้ ดังนั้นจึงต้องขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ การมีความรู้เกี่ยวกับวัตถุดิบที่ใช้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพและไม่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ และไม่ก่อให้เกิดการหยุดชะงักของกระบวนการผลิตเนื่องจากต้องซ่อมแซมอุปกรณ์

2.3.3 ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาพัฒนาใช้มากที่สุด โดยเฉพาะของเสียปิโตรเคมีหรือขยะพลาสติก ทั้งนี้เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ได้ทั้ง แก๊ส น้ำมัน และสารปิโตรเคมีอื่นๆ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าและคุ้มค่า อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่สามารถได้ผลผลิตภายในเครื่องปฏิกรณ์เดียว

2.3.4 ลักษณะการให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้กับวัตถุดิบที่เป็นของเหลวหรือใช้ในการผลิตเชื้อเพลิง จะมีความแตกต่างกันไปตามชนิดและองค์ประกอบของวัตถุดิบ รวมถึงเทคโนโลยีที่ใช้ โดยเครื่องปฏิกรณ์สามารถแบ่งตามลักษณะการให้ความร้อนออกเป็น 4 ลักษณะ ดังนี้

- **ลักษณะที่ 1** คือการให้ความร้อนในปริมาณหนึ่ง ทำให้ส่วนหนึ่งของวัตถุดิบแตกตัวและคายความร้อนออกมาเพื่อให้ความร้อนกับวัตถุดิบในส่วนที่เหลือ โดยจะแตกตัวต่อเนื่องภายในเครื่องปฏิกรณ์เดียวกัน
- **ลักษณะที่ 2** คือการให้ความร้อนโดยตรงจากแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ หรือการแตกตัวของวัตถุดิบจากเครื่องปฏิกรณ์อื่นๆมาที่เครื่องปฏิกรณ์หลัก
- **ลักษณะที่ 3** คือการให้ความร้อนโดยตรงผ่านตัวกลางเฉื่อยที่ป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์หลัก เช่น การป้อนแก๊สเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์พร้อมกับการป้อนวัตถุดิบ
- **ลักษณะที่ 4** คือการให้ความร้อนผ่านผนังเครื่องปฏิกรณ์ที่ใส่วัตถุดิบ และให้ความร้อนถ่ายเทความร้อนจากผนังเครื่องปฏิกรณ์สู่วัตถุดิบ

2.4 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง

วิเคราะห์เพื่อหาค่าองค์ประกอบและสมบัติที่ประกอบอยู่ในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว [18] ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยโปรแกรมจะแยกจำลองจุดเดือด (Boiling range)

ของน้ำมันเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตน้ำมันสำเร็จรูป โดยสามารถแบ่งน้ำมันตามคาบจุดเดือดได้ดังนี้

- พวกที่มีคาบจุดเดือดตั้งแต่จุดเริ่มต้น (Initial boiling point, IBP) ถึง 200 องศาเซลเซียส คือ แนฟทา (Naphtha fraction) หรือแกโซลีน (Gasoline fraction) ส่วนนี้เป็นส่วนที่ใช้ในการผลิตน้ำมันเบนซิน

- พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 200 ถึง 250 องศาเซลเซียส คือ น้ำมันก๊าด หรือเคโรซีน (Kerosene fraction) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงในตะเกียงสำหรับให้แสงสว่าง และเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ของเครื่องบินไอพ่น

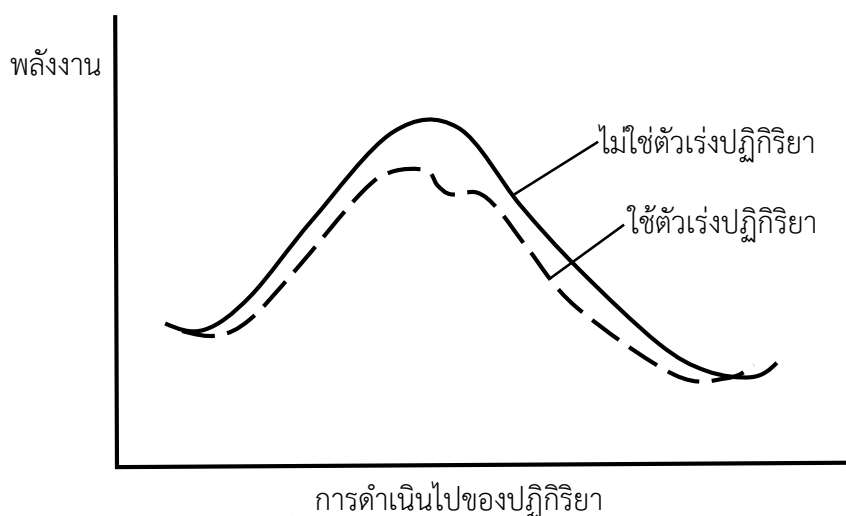
- พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส คือ แก๊สออยล์เบา (Light gas oil fraction) ส่วนนี้เป็นส่วนที่ใช้ในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์

- พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 350 ถึง 370 องศาเซลเซียส คือ แก๊สออยล์ (Gas oil fraction) ส่วนนี้นำไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล

- พวกที่มีคาบจุดเดือด 370 องศาเซลเซียสขึ้นไป คือ กากน้ำมัน (Long residue) นำไปใช้เป็นน้ำมันเตา สำหรับอุตสาหกรรมที่ต้องใช้กระบวนการเผาไหม้ กระบวนการให้ความร้อน เช่น โรงงานถลุงเหล็ก โรงงานรีดเหล็ก เป็นต้น อีกทั้งยังนำไปผลิตเป็นยางมะตอย และผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่น

2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา [19] คือ สารที่เติมลงในปฏิกิริยาแล้วทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate) เร็วขึ้น โดยมีกลไกที่ทำให้พลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยาลดลงเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังรูปที่ 2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นหรือรบกวนให้สมดุลของปฏิกิริยาให้เปลี่ยนไป ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาคือตัวที่ทำหน้าที่เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยสมดุลของปฏิกิริยายังคงที่ ตามทฤษฎีแล้วเมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาจะคงอยู่เท่าเดิม โดยไม่มีการแปรสภาพ แต่ในทางปฏิบัติแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือองค์ประกอบได้ เช่นเกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของออกซิเจนต่อโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยา โลหะออกไซด์บางชนิดที่อุณหภูมิสูง หรือการสัมผัสกับสารตั้งต้นในระหว่างเกิดปฏิกิริยา ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยาคือจะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการอุตสาหกรรมปิโตรเคมีต่างๆ เช่น Catalytic cracking, Catalytic reforming หรือใช้ในการกำจัดของเสียรวมถึงสารพิษในกระบวนการในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ และสามารถช่วยลดสถานะที่รุนแรงในการเกิดปฏิกิริยาได้ เป็นต้น



รูปที่ 2.3 พลังงานการกระตุ้นของปฏิกิริยาที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

2.6 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา

การที่จะแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา [20] นั้น นิยมทำโดยการพิจารณาว่าตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้นอยู่ในวัฏภาคเดียวกันหรือไม่ จึงทำให้แบ่งตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือถ้าสารตั้งต้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในวัฏภาคเดียวกันจัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) แต่ถ้าสารตั้งต้นกับตัวเร่งอยู่คนละวัฏภาคกันจัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst)

2.6.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้น ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยากระจายตัวในสารตั้งต้นได้ดี และทุกอะตอมของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้สารตั้งต้นสามารถเข้าถึงตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาได้ทุกทิศทาง จึงไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวนมากก็ทำให้การเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพได้ อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์สามารถเคลื่อนที่ในสารที่ทำปฏิกิริยาได้รวดเร็ว ทำให้เกิดการชนกันกับสารที่เข้าทำปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้แทบไม่มีปัญหาเรื่องการแพร่ของสารตั้งต้นไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา และสามารถทำปฏิกิริยาภายใต้ภาวะที่ไม่รุนแรงมาก ข้อดีอื่นๆ คือ มีการเลือกจำเพาะสูง ควบคุมจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาได้ง่าย และกลไกการเร่งปฏิกิริยาสามารถเข้าใจได้ง่าย แต่

ข้อเสีย คือ การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก มีราคาสูง และมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ทำให้เสื่อมสภาพได้ง่ายหากใช้ในภาวะที่มีอุณหภูมิสูง

2.6.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวิวัฒนาการแตกต่างกับสารตั้งต้น มีสถานะเป็นของแข็งส่วนใหญ่ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้จะนิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม เพราะสามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง จึงสามารถใช้งานในภาวะที่มีอุณหภูมิสูงได้ ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์คือ สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ใช้ได้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิหรือความดันสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์มีอายุการใช้งานยาวนาน และตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 องค์ประกอบคือ องค์ประกอบว่องไวช่วยในการทำปฏิกิริยา (Active component) และตัวรองรับ (Support) หรือ ตัวพา (Carrier) เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงเพื่อให้ง่ายต่อการกระจายตัวของสารว่องไวในการทำปฏิกิริยามากขึ้น แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัวมีสารว่องไวเพียงอย่างเดียว อีกหนึ่งองค์ประกอบที่ช่วยเสริมการเร่งปฏิกิริยาให้ดีขึ้นคือ โพรโมเตอร์ (Promoter) เป็นสารที่ใส่ในปริมาณน้อยๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ หรือ สมบัติทางเคมีของสารว่องไวหรือตัวรองรับ ซึ่งอาจเพิ่มกัมมันตภาพและเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังช่วยเพิ่มสัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา (Selectivity)

- สารว่องไว แบ่งตามหน้าที่ได้ 4 กลุ่มคือ

โลหะ มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยาไฮโดรจิโนลิซิส

โลหะออกไซด์ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) และปฏิกิริยารีดอกซ์ กลุ่มแรกคือ สารประกอบเชิงซ้อนของโมลิบดีนัม และออกไซด์ของโลหะผสม ออกไซด์ประเภทนี้มีโครงสร้างเป็นแบบไอออนิก มีจำนวนออกซิเจนไม่แน่นอน โดยออกซิเจนจะเคลื่อนย้ายออกมาจากโครงผลึกได้ กลุ่มที่สองคือกลุ่มที่เร่งปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจนออก (Dehydrogenation) ได้แก่ Fe_2O_3 , ZnO , Cr_2O_3 , Al_2O_3 เป็นต้น

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้เร่งปฏิกิริยาได้หลายชนิด โดยจะประกอบด้วยธาตุสองชนิดขึ้นไปจับกันอย่างแข็งแรงด้วยอะตอมของออกซิเจน เช่น สารประกอบซิลิกา-อะลูมินา และซีโอไลต์ชนิดต่างๆกรดในตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเป็นชนิดบรอนสเตต (Bronstate acid) หรือชนิดลิวอิส (Lewis acid) หรืออาจมีกรดทั้งสองชนิดรวมกัน ปฏิกิริยาที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ขึ้นกับความแรงและธรรมชาติของกรด แต่ไม่ขึ้นกับชนิดของอะตอมที่มีอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา

โลหะและกรด เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำหน้าที่สองอย่าง โดยทั้งสององค์ประกอบต่างก็เร่งขั้นตอนในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาแต่เร่งในขั้นตอนที่แตกต่างกัน เช่น แพลตทินัมบนตัวรองรับที่เป็นกรด

- **ตัวรองรับหรือตัวพา** สมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวรองรับที่จะต้องมียคือ มีพื้นที่ผิวหน้าสูงสำหรับสารกัมมันต์ ซึ่งบางครั้งอาจทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยา ส่วนใหญ่ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีหลายเฟส โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะจับอยู่บนตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวสูง เช่น ซิลิกา (Silica, SiO_2) หรืออะลูมินา (Alumina, Al_2O_3), ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) และซีโอไลต์ (Zeolites) เป็นต้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องกระจายตัวได้ดีบนตัวรองรับ

2.7.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

สามารถแบ่งสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้ 3 ประเภท คือ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติเชิงเร่ง

สมบัติทางกายภาพ

- **พื้นที่ผิว (Surface area)** เป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวสูงจะมีตำแหน่งที่ว่างไวในการเกิดปฏิกิริยามาก ส่งผลให้มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาสูง

- **ขนาดรูพรุน (Pore size)** เป็นสมบัติที่ช่วยเพิ่มค่าการเลือกจำเพาะของปฏิกิริยา โดยขนาดของรูพรุนจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของโมเลกุลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ สามารถแบ่งขนาดรูพรุนออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้ รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2 นาโนเมตร

- **ความหนาแน่น (Density)** เป็นสมบัติในการระบุลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ความหนาแน่นอนุภาค (Partical density) ความหนาแน่นเนื้อของแข็ง (Solid density)

- **ความทนทานต่อการอัด (Crush strength)** เป็นแรงต่ำสุดที่กดทับอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา ในแนวตั้งหรือแนวรัศมีจนเกิดการเสียรูปหรือแตกออกเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก เป็นสมบัติที่มีความสำคัญในการช่วยคานคองแรงที่ใช้กดอัดเพื่อไม่ให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสียรูปหรือแตกหัก ที่อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันภายในเครื่องปฏิกรณ์

- **ความต้านทานการสึกหรอ (Attrition resistance)** เป็นสมบัติที่แสดงความต้านทานของตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะเกิดการสึกหรอหรือแตกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก เนื่องจากเกิดการกระทบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา หรือกระทบกับผนังของเครื่องปฏิกรณ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดการแตกอาจหลุดลอยออกจากระบบหรือหลุดติดไปกับผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะทำให้สูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยาและทำให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาลดลง

สมบัติทางเคมี

- **องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมี** ธาตุองค์ประกอบเป็นสมบัติที่กำหนดสมบัติทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากธาตุองค์ประกอบแต่ละตัวมีโครงสร้างอิเล็กตรอนที่แตกต่างกัน จึงส่งผลต่อการจัดเรียงอะตอมเป็นโครงผลึก ทำให้เกิดลักษณะผลึกและระนาบที่หลากหลายแตกต่างกันไป ซึ่งการจัดเรียงอะตอมจะส่งผลต่อสมบัติการดูดซับสารตั้งต้น

- **สภาพกรด** มีความสำคัญในการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สภาพกรดบรอนสเตด มีความสามารถในการให้โปรตอน และสภาพกรดลิวอิส มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอน

- **สภาพเบส** ตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวชันชนิดเบสไม่นิยมนำมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากตำแหน่งเบสมีความอ่อนไหวกับความชื้น คาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจนในอากาศ การนำตัวเร่งปฏิกิริยารีดิวชันไปใช้จะต้องนำไปกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง เพื่อกำจัดสารเหล่านี้ออกจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสภาพเบสสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สภาพเบสบรอนสเตด มีความสามารถในการรับโปรตอน และสภาพเบสลิวอิส มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอน

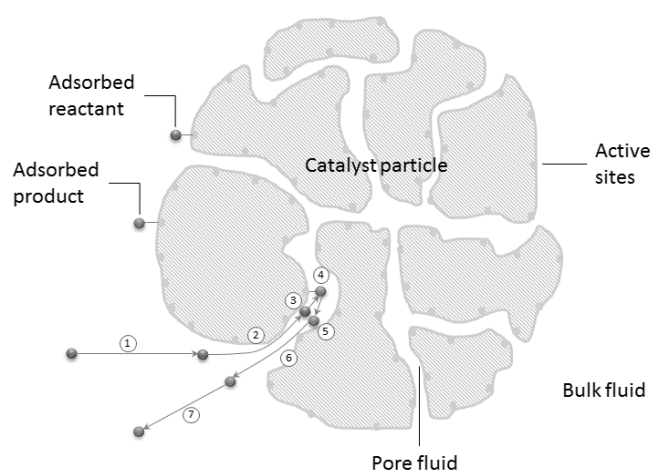
สมบัติเชิงเร่ง

- **ความว่องไว** ความว่องไวจะบอกความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ได้จากความเร็วในการดำเนินปฏิกิริยาเทียบกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้

- **การเลือกจำเพาะ** เป็นความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาในการเลือกผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

- **เสถียรภาพ** ประกอบไปด้วยเสถียรภาพเชิงเคมี เป็นความต้านทานการสลายตัวและการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา เสถียรภาพเชิงความร้อน เป็นความต้านทานของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อใช้ภายใต้ภาวะที่มีอุณหภูมิสูง และเสถียรภาพเชิงกล เป็นความต้านทานด้านความแข็งแรงและการสึกหรอของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.7.2 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์



รูปที่ 2.4 ภาพจำลองขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่มีตัวรองรับ

ขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ [21]

ขั้นตอนที่ 1. การแพร่ของสารตั้งต้นจากภายนอก (External diffusion) ขั้นตอนนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็นการแพร่ไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 2. การแพร่ของสารตั้งต้นเข้าภายในรูพรุน (Internal pore diffusion) ขั้นตอนนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็นการแพร่ของสารตั้งต้นจากบริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากรูพรุนมีขนาดเล็กและรูปร่างไม่แน่นอนตลอดรูพรุน ทำให้ระหว่างการแพร่มีการชนกันเองระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น หรือการชนกันของโมเลกุลกับผนังรูพรุน

ขั้นตอนที่ 3. การดูดซับ (Adsorption) ขั้นตอนนี้มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เนื่องจากเป็นการดูดซับของสารตั้งต้นบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารตั้งต้นจะแพร่ไปถึงตำแหน่งกระตุ้นที่อยู่ภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสาร

ตั้งต้นที่เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) กับผิวหน้าของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent)

ขั้นตอนที่ 4. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) หลังจากเกิดการดูดซับแล้วสารตั้งต้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนที่ 5. การคาย (Desorption) ขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขั้นสุดท้าย ซึ่งการคายซับเป็นกระบวนการย้อนกลับของการดูดซับ โดยเป็นการหลุดออกของสารผลิตภัณฑ์จากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด

ขั้นตอนที่ 6. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ออกจากภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการย้อนกลับของขั้นตอนการแพร่ของสารตั้งต้นเข้าภายในรูพรุน ต่างกันเพียงแค่สารที่ออกมาเป็นสารผลิตภัณฑ์ไม่ใช่สารตั้งต้น

ขั้นตอนที่ 7. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์จากผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยามายังด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นกระบวนการย้อนกลับของขั้นตอนการแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น และต่างกันเพียงแค่สารที่ออกมาเป็นสารผลิตภัณฑ์ไม่ใช่สารตั้งต้น

การเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยามีวิธพันธ์ุ กระบวนการสำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ กระบวนการการดูดซับ โดยกระบวนการดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

- การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) เป็นการดูดซับด้วยแรงอย่างอ่อนหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ ระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ความดันต่ำโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้แบบชั้นเดียว (Monomolecular layer) และดูดซับแบบหลายชั้น (Multi molecular layer) ที่ความดันสูง การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างไม่จำเพาะเจาะจงและเกิดการผันกลับได้ง่าย นั่นคือ สารต่างๆสามารถถูกดูดซับบนผิวได้ และการแยกสารที่ถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับได้ง่ายโดยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน ซึ่งจะทำให้เกิดการคายสารที่ดูดซับออกมา (Desorption)

- การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) การดูดซับแบบนี้จะมีการเกิดปฏิกิริยาเคมีจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับและมีความร้อนเกิดขึ้นสูง การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่ทำให้สารถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น โดยจะเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจงใช้เวลาดูดซับนานและไม่สามารถเกิดผันกลับได้ (Irreversible)

2.8 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการสูญเสียความว่องไว (Activity) ในการเข้าทำปฏิกิริยาและสูญเสียความสามารถในการเลือกจำเพาะ (Selectivity) มีสาเหตุจากสิ่งต่างๆ ดังนี้

- **การเป็นพิษ (Poisoning)** เกิดจากมีสิ่งแปลกปลอม (Impurity) เข้าไปเจือปนอยู่ภายในสารที่นำมาใช้ในปฏิกิริยา ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวลดลง

- **การอุดตัน (Fouling)** เป็นปัญหาเกิดขึ้นจากฝุ่น ผง ละอองหรือพวกสารคาร์บอนที่เกิดจากปฏิกิริยามาเกาะหรืออุดตันอยู่ในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ความว่องไวและความสามารถในการเลือกจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

- **การรวมตัว (Sintering)** ความร้อนจากปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตทำให้โลหะเกิดการหลอมเหลว และเมื่ออุณหภูมิลดลงโลหะที่หลอมเหลวจะรวมตัวกันมีขนาดใหญ่และแข็งขึ้น ทำให้ตำแหน่งที่ว่องไวหรือบริเวณเร่งของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง หรือมีผลทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป ความว่องไวในตัวเร่งปฏิกิริยาจึงลดลง

- **การสูญเสียสารที่ว่องไว (Loss of active species)** เกิดจากการระเหยของสารประกอบบางตัวในตัวเร่งปฏิกิริยาออกไป ซึ่งสารนั้นอาจจะเป็นสารที่ว่องไวจึงส่งผลให้ความว่องไวลดลง

2.9 ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิดไคซ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิดไคซ์ [22], [23] หรือที่เรียกกันว่า ‘ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี’ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกใช้ในกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิดไคซ์ (Fluid catalytic cracking) โดยแรกเริ่มมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Aluminum chloride catalyst) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดช่วยแตกพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอน ทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนและต้องมีการจัดการของเสีย จึงมีการพัฒนามาใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกา-อะลูมินา (Silica-alumina catalyst) แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกา-อะลูมินา มีโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบอสัณฐาน (Amorphous structure) จึงมีความจำเพาะต่อการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สอินทรีย์ต่ำและทำให้เกิดโค้ก (Coke) ปริมาณสูง ดังนั้นจึงมีการพัฒนาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรียวมาจนกระทั่งมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดวาย (Zeolite Y) เพื่อช่วยเพิ่มความจำเพาะต่อการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สอินทรีย์ และมีการนำ ซีโอไลต์ชนิดแซดเอสเอ็ม-ไฟว์ (ZSM-5) มาใช้เพื่อเพิ่มทั้งค่าออกเทนและผลได้ของโอเลฟินส์เบา (Yield of light olefins) เช่น โพรพิลีน และบิวทิลีน หลังจากนั้นจึงเริ่มมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความทนทานต่อการปนเปื้อนของโลหะนิกเกิลและวาเนเดียมในน้ำมันดิบมากขึ้น เพื่อให้มีความยืดหยุ่นต่อกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิดไคซ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีเป็นของแข็งที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ขนาดอนุภาคเฉลี่ยช่วง 60 ถึง 80 ไมโครเมตร มีองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน คือ ซีโอไลต์ เมทริกซ์ สารเติม และตัวประสาน

ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์มีความว่องไวและความจำเพาะมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกา-อะลูมินา ซึ่งความว่องไวและความจำเพาะที่มากกว่านี้ช่วยเพิ่มผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวและช่วย

เพิ่มความสามารถในการแตกตัว นอกจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ยังสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง มีโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบผลึกที่มีรูปแบบแน่นอน และมีความเสถียรมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกา-อะลูมินา จึงทำให้สามารถควบคุมผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการได้

2.10 ซีโอไลต์

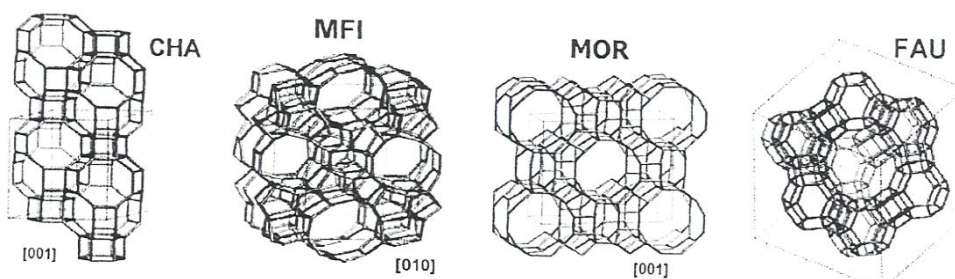
ซีโอไลต์ [24] เป็นองค์ประกอบสำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี มีความจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ และมีความไวในการเกิดปฏิกิริยา สมบัติของซีโอไลต์ขึ้นกับธรรมชาติและโครงสร้างผลึก เช่น ความเป็นกรด ความจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ และเสถียรภาพ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของซีโอไลต์ โดยตรงเมื่อนำไปใช้ในการเร่งปฏิกิริยา

ซีโอไลต์ มีสูตรโครงสร้างทั่วไปคือ $M_{x/n}[(AlO_2)_x(SiO_2)_y] \cdot nH_2O$ เป็นออกไซด์ผสมของซิลิกอน และอลูมิเนียมหรือสารประกอบอะมิโนซิลิเกต จัดเรียงตัวของหน่วยพื้นฐาน $[SiO_4]^{4-}$, $[AlO_4]^{5-}$ และทรงสี่หน้า เชื่อมต่อกันผ่านอะตอมออกซิเจนอย่างเป็นระเบียบเกิดโครงร่างผลึกสามมิติ (Framework) มีขนาดรูพรุนแน่นอน อะลูมิเนียมทรงสี่หน้าในโครงผลึกของซิลิเกตทำให้พื้นผิวของซีโอไลต์มีประจุลบ โดยจะถูกดุลด้วยไอออนประจุบวก เช่น น้ำ และโซเดียมไอออน (Na^+) จึงทำให้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกได้ดี ซีโอไลต์มีขนาดรูพรุนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 10 อังสตรอม จึงถูกจัดเป็นโมเลกุลาร์ซีฟ (Molecular sieves) ชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติการคัดกรองโมเลกุลของเหลวหรือแก๊สที่มีขนาดเล็ก อีกทั้งยังมีปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวสูงประมาณ 500 ตารางเมตรต่อกรัม

ซีโอไลต์สามารถจำแนกได้หลายชนิดขึ้นกับเกณฑ์ที่ใช้ เช่น พิจารณาจากแหล่งกำเนิด แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาติและซีโอไลต์สังเคราะห์ หรืออาจจำแนกโดยการพิจารณาจากอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกอนต่ออลูมิเนียม แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนซิลิกอนต่ออลูมิเนียมต่ำ ($1 < Si/Al < 2$) ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนซิลิกอนต่ออลูมิเนียมปานกลาง ($2 < Si/Al < 5$) และซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนซิลิกอนต่ออลูมิเนียมสูง ($Si/Al < 5$) แต่การจำแนกซีโอไลต์ที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางคือการจำแนกตามวงของออกซิเจนที่ล้อมรอบรูพรุน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ซีโอไลต์รูพรุนขนาดเล็ก กลาง ใหญ่ เป็นซีโอไลต์ที่โครงสร้างรูพรุนประกอบด้วยวงออกซิเจนชนิด 8, 10 และ 12 อะตอมออกซิเจน ตามลำดับ

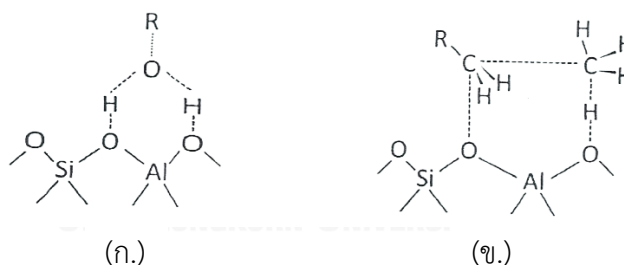
โครงร่างผลึกของซีโอไลต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมแสดงดังรูปที่ 2.5 แต่ละมุมคือตำแหน่งของอะตอมซิลิกอนหรืออลูมิเนียม เส้นตรงที่เชื่อมต่อกันแทนด้วยอะตอมของออกซิเจน โครงร่างผลึกแต่ละชนิดเรียกแทนด้วย Framework type code เป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ตามระบบ IUPAC Commission on Zeolite Nomenclature เช่น FUA โครงร่างผลึกกลุ่มฟูจาไซต์ (Faujasite) เช่น ซีโอไลต์ชนิด X (Linde type X), ซีโอไลต์ชนิด Y (Linde type Y) และ USY (Ultrastable Y)

มีเซลล์หน่วยแบบลูกบาศก์รูปทรงแปดหน้าขนาด 7.4×7.4 อังสตรอม เชื่อมถึงกันในแนวกันทั้ง 3 มิติ จึงเกิดเป็นโพรงขนาดใหญ่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 12 อังสตรอม



รูปที่ 2.5 โมเดลโครงร่างผลึกของซีโอไลต์

เมื่อซีโอไลต์แลกเปลี่ยนประจุบวกกับโปรตอน ซีโอไลต์จะมีสภาพเป็นกรดเรียกตำแหน่งของกรดที่เกิดขึ้นว่า Bridging hydroxyl group หรือตำแหน่งของกรดบรอนสเตท เป็นตำแหน่งที่กรดมีความแรงสูง สามารถเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของแอลกอฮอล์ การแตกสลายไฮโดรคาร์บอนไอโซเมโรเซชัน และแอลคิเลชัน โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาผ่านโครงสร้างแบบไบเดทเทตบนพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 2.6



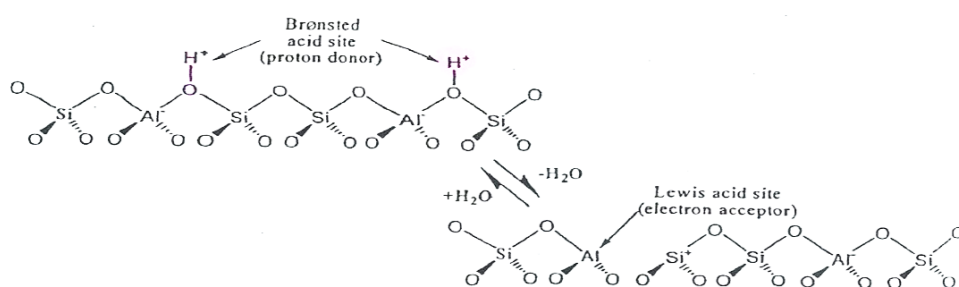
รูปที่ 2.6 โครงสร้างแบบไบเดทเทตของแอลกอฮอล์และไฮโดรคาร์บอนบนตำแหน่งกรดบรอนสเตทของซีโอไลต์

(ก.) โครงสร้างแบบไบเดทเทตของแอลกอฮอล์ (ข.) ไฮโดรคาร์บอนบนตำแหน่งกรดบรอนสเตทของซีโอไลต์

2.10.1 สมบัติสำคัญของซีโอไลต์

สมบัติของซีโอไลต์ที่ช่วยเร่งปฏิกิริยามี 2 ประการ คือ สมบัติการเลือกจำเพาะและความเป็นกรด ดังนั้นสารตั้งต้นจะต้องมีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนของซีโอไลต์จึงจะสามารถแพร่เข้าไปเกิดปฏิกิริยาภายในรูพรุนได้ ในส่วนของสมบัติความเป็นกรดของซีโอไลต์แบ่งได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้

- **ชนิดของตำแหน่งกรด** คือ กรดลิวอิส (Lewis acid) และกรดบรอนสเตท (Bronsted acid) มีตำแหน่งกรดเป็น Si-OH-Al เป็นตำแหน่งที่สำคัญในการเร่งปฏิกิริยาในหลายปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพ 2.7 ตำแหน่งกรดบรอนสเตทที่อุณหภูมิสูง (Bronsted acid site) สามารถเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นตำแหน่งกรดลิวอิส (Lewis acid site) ได้โดยเกิดการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้าง โดยถือเป็นการปรับสภาพของซีโอไลต์



รูปที่ 2.7 โครงสร้างตำแหน่งกรดของซีโอไลต์

- **ปริมาณของตำแหน่งกรด** ขึ้นกับอัตราส่วนของ Si/Al หากปริมาณอะลูมิเนียมต่ำจะส่งผลให้ซีโอไลต์มีตำแหน่งกรดมากขึ้น ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มลักษณะการชอบน้ำให้แก่ซีโอไลต์ ซีโอไลต์จะดูดซับสารตั้งต้นบนพื้นผิวมากขึ้น แต่บางครั้งอาจเกิดการอุดตันภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาได้

- **ความแรงของตำแหน่งกรด** กำหนดด้วยอัตราส่วนของ Si/Al โดยถ้าลดปริมาณอะลูมิเนียมลงจะทำให้ความแรงของตำแหน่งกรดเพิ่มขึ้นแต่ในกรณีที่มีอัตราส่วนของ Si/Al ต่ำมาก จะไม่มีผลต่อความแรงของตำแหน่งกรด

2.10.2 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์

เนื่องจากซีโอไลต์มีสมบัติการเป็นกรดและมีการเลือกจำเพาะสูง มีเสถียรทางความร้อนทั้งในภาวะที่มีและไม่มีน้ำ จึงสามารถใช้ความร้อนฟื้นฟูสภาพของซีโอไลต์และสามารถนำกลับมาเพื่อใช้ใหม่ได้โดยการเผา (calcination) นิยมนำซีโอไลต์มาใช้งาน 4 ประเภทหลักๆ ดังนี้

- **ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา** ก่อนจะนำไปใช้ต้องมีการปรับปรุงสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของซีโอไลต์เพื่อให้สามารถใช้ได้อย่างเหมาะสมกับปฏิกิริยานั้นๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด UltrastableY (USY) นำมาใช้ในกระบวนการไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) กระบวนการแตกตัว (Cracking) และกระบวนการแอลคิลเลชันของสารไฮโดรคาร์บอนในโรงกลั่นน้ำมัน

- **ใช้เป็นสารดูดซับ** เนื่องจากซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นรูพรุนทำให้มีสมบัติการเลือกจำเพาะ จึงดูดซับสารต่างๆ ได้ตามขนาดของรูพรุน นอกจากนี้ยังนำซีโอไลต์มาใช้ในการแยกสาร (Separation) ทำให้บริสุทธิ์ (Purification) และทำให้แห้ง (Dehydration) เนื่องจากซีโอไลต์ดูดซับและคายน้ำได้ เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนน้ำในรูพรุนของซีโอไลต์จะระเหยออกไป แต่เมื่อซีโอไลต์สัมผัสกับไอน้ำอีกครั้งความสามารถในการดูดซับน้ำจะเกิดขึ้นอีก

- **เป็นสารลดความกระด้างของน้ำ** ซีโอไลต์จะมีประจุบวกของโลหะแอลคาไลเกาะอยู่หลวมๆ จึงสามารถที่จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน จึงทำให้ความกระด้างของน้ำลดลง

- **ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน** จึงสามารถนำซีโอไลต์มาใช้ในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสีย โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแอมโมเนียกับโลหะโซเดียมที่อยู่ในรูพรุน รวมทั้งสามารถใช้กำจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่อยู่ในไอเสียที่เกิดจากเครื่องยนต์ให้กลายเป็นแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจน เป็นการช่วยลดมลพิษที่ออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

2.10.3 ลักษณะที่เหมาะสมกับการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

- **ความเสถียรทางความร้อน (Thermal stability)** ในอุตสาหกรรมปฏิกิริยาเคมีส่วนใหญ่ มักใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูงประมาณ 300-600°C ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงต้องมีความเสถียรในสภาวะที่ทำให้ปฏิกิริยาเป็นเวลานานและต่อเนื่อง เนื่องจากซีโอไลต์เป็นผลึกและเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต จึงมีความเสถียรต่อความร้อนสูง และเมื่อแยกประเภทตามค่า Si/Al แล้ว ซีโอไลต์มีค่า Si/Al สูงจะทนความร้อนได้ดีกว่าซีโอไลต์ที่มีค่า Si/Al ต่ำ แต่ถ้าแยกตามขนาดของรูพรุน ซีโอไลต์ที่มีขนาดรูพรุนเล็กจะทนต่อความร้อนได้สูงกว่าโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ แต่ด้วยความที่ซีโอไลต์ส่วนใหญ่มีความเสถียรจึงใช้ได้ทั้งปฏิกิริยาดูดความร้อนและปฏิกิริยาคายความร้อน

- **พื้นที่ผิวในการเร่งปฏิกิริยาสูง (high surface area)** ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธีพ่นธูจะมีบริเวณเร่งอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้นจึงส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธีพ่นธูมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวสัมผัสซึ่งพื้นที่ผิวในรูพรุน (Internal surface) จะมีบริเวณเร่งอยู่ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่โครงสร้างมีรูพรุนขนาดเล็กจะให้ผลดีกว่าโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ เนื่องจากโครงสร้างขนาดเล็กทำให้ผิวที่ด้านนอก (External surface) เพิ่มมากขึ้นโดยจะช่วยให้สารแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนได้มากขึ้นด้วย

- **ปฏิกิริยาระดับโมเลกุล (Molecular reactor)** การเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์สารตั้งต้นจะแพร่และถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุน จากนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ตรงบริเวณที่ถูกดูดซับ สิ่งที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนจะมีขนาดจำกัดและใกล้เคียงกับขนาดของโมเลกุล

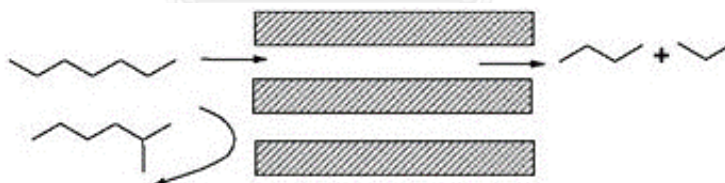
สำหรับที่เป็นปฏิกิริยาโมเลกุลเดี่ยว (Monomolecular Reaction) คือสารตั้งต้นเดี่ยวเกิดปฏิกิริยาทุกๆ โพรง เป็นผลให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงน้อยและเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับสารตั้งต้นไว้ ส่งผลให้ความเข้มข้นสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็ว ส่วนปฏิกิริยาโมเลกุลเชิงคู่ (Bimolecular Reaction) จะเกิดการชนกันของโมเลกุลของสารตั้งต้น 2 ตัว เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาและรูพรุนจะทำหน้าที่คล้าย Molecular Reaction ที่จะเพิ่มความเข้มข้นให้สารตั้งต้นชนกันมากขึ้น

- การคัดสรรขนาดและรูปร่าง (Shape selectivity aspect) เป็นสมบัติที่มีในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์แต่ไม่เกิดขึ้นในตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่น ๆ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์บริเวณเร่งอยู่ภายในรูพรุนด้วยขนาดที่จำกัด ทำให้สารที่แพร่ผ่านจะต้องเข้าไปในรูพรุนให้ได้ก่อน ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นก็ต้องออกทางรูพรุนได้อีกด้วย ขนาดของรูพรุนจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่เข้ามาควบคุม

รูปร่างของโมเลกุลที่เกิดขึ้นทั้งหมดในปฏิกิริยานั้น ๆ ซึ่งสามารถแบ่งได้ใน 3 ลักษณะ ได้แก่

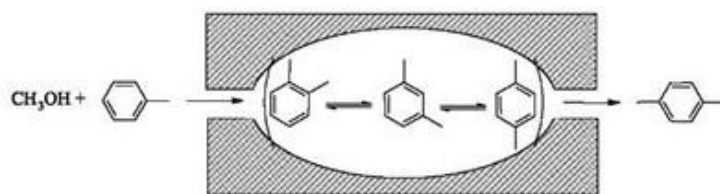
การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างสารตั้งต้นของซีโอไลต์ (Reactant shape selectivity)

แสดงในรูปที่ 2.8 สารตั้งต้นที่มีขนาดโมเลกุลและโครงสร้างเล็กกว่าหรือใกล้เคียงขนาดรูพรุนของซีโอไลต์จะสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในโครงสร้างซีโอไลต์แล้วเกิดปฏิกิริยา สารตั้งต้นที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนจะแพร่ผ่านเข้าไปไม่ได้ การแพร่ของสารตั้งต้นขึ้นกับอุณหภูมิ เนื่องจากการแพร่ภายในรูพรุนจะดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



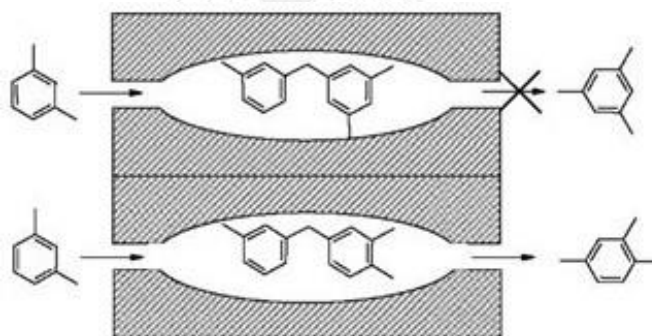
รูปที่ 2.8 การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างสารตั้งต้นของซีโอไลต์

การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างผลิตภัณฑ์ (Product shape selectivity) สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแล้วได้ผลิตภัณฑ์มากกว่าหนึ่งชนิดภายในรูพรุนของซีโอไลต์ ผลิตภัณฑ์ที่จะแพร่ออกจากรูพรุนได้จะต้องมีขนาดโมเลกุลและมีโครงสร้างความเกะกะน้อยกว่าขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ เมื่อขนาดผลึกใหญ่ขึ้นทำให้มีระยะทางในการแพร่มากขึ้น ดังนั้นการเลือกจำเพาะต่อรูปร่างของผลิตภัณฑ์ก็สูงขึ้น ซึ่งการเลือกจำเพาะต่อรูปร่างของผลิตภัณฑ์เป็นสมบัติที่ขึ้นกับขนาดของผลึกซีโอไลต์ ตัวอย่างการเลือกจำเพาะต่อรูปร่างของผลิตภัณฑ์แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างผลิตภัณฑ์ของซีโอไลต์

การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างสถานะทรานซิชัน (Transition-state shape selective)
 ขนาดช่องว่างภายในรูพรุนของซีโอไลต์เป็นสิ่งที่กำหนดโครงสร้างของสารที่เกิดขึ้นที่สถานะทรานซิชัน โดยทรานซิชันเป็นสมบัติที่ไม่ขึ้นกับขนาดของผลิตภัณฑ์ซีโอไลต์ เช่น ปฏิกิริยา Disproportionation ของเมตา-ไซลีน จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น 1,3,5-ไตรเมทิลเบนซีน จะต้องใช้พื้นที่ภายในรูพรุนมากกว่า 1,2,4-ไตรเมทิลเบนซีน เมื่อเลือกใช้ซีโอไลต์ชนิด FUA จะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น 1,3,5-ไตรเมทิลเบนซีน แต่ถ้าเลือกใช้ซีโอไลต์ชนิด MOR ที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่า จะได้ 1,2,4-ไตรเมทิลเบนซีน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างทรานซิชันของซีโอไลต์

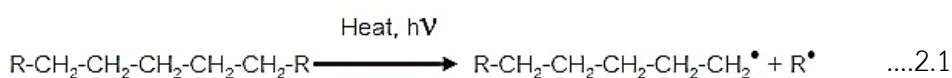
2.11 ปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอน

2.11.1 กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน

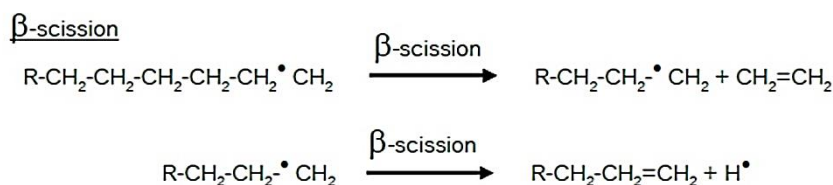
กระบวนการนี้ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงในการเปลี่ยนสารไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง [25] หากต้องการให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการต้องมีการควบคุมให้เกิดการแตกตัวอย่างพอดี กล่าวคือเมื่อให้ความร้อนมากเกินไปจะทำให้ไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กมากจนกลายเป็นแก๊ส C_1-C_4 ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการและไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ การแตกตัวด้วยความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อปฏิกิริยาโดยเฉพาะส่วนที่มีแขนโอเลฟิน (Olefin) และไดโอเลฟิน (Diolen) ทำให้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ทำปฏิกิริยากันเอง โดยจะเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันและ

คอนเดนเซชันทำให้กากน้ำมันจากกระบวนการนี้ไม่ค่อยอยู่ตัว อาจเกิดตะกอนน้ำมันได้ง่ายและมีความหนืดเพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นการทำปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดโค้ก (Coke) กระบวนการนี้ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

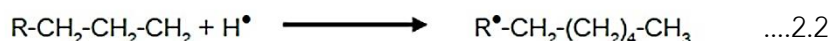
- **ขั้นเริ่มต้น (Initiation step)** เป็นขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนี้จะไปทำให้พันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนแตกออกเกิดเป็นอนุมูลอิสระที่จะไปทำปฏิกิริยาในขั้นต่อไป ดังแสดงในสมการที่ 2.1



- **ขั้นการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (Propagation step)** อนุมูลอิสระจากขั้นเริ่มต้นเข้าไปทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ไอโซเมอร์เปลี่ยนรูปและแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง ทำให้เกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ นอกจากนั้นอนุมูลอิสระจากขั้นเริ่มต้นสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นและเกิดเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ได้ โดยจะทำให้โมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ ดังสมการที่ 2.2



Chain transfer



- **ขั้นสิ้นสุดหรือหยุดปฏิกิริยา (Termination step)** อนุมูลอิสระจะไปทำหน้าที่หยุดปฏิกิริยาต่อเนื่อง โดยจะไปทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจเกิดได้ทั้งที่เป็นโมเลกุลใหม่ โมเลกุลเดี่ยวหรือแตกไปเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล ดังสมการที่ 2.3



2.11.2 กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

กระบวนการนี้เกิดปฏิกิริยาด้วยการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้โดยจะช่วยแตกย่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลงและมีโครงสร้างเหมาะสมเพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ตามที่ต้องการ [26] นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยายังช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้รวดเร็วขึ้นอีกด้วย

เมื่อสารไฮโดรคาร์บอนสัมผัสกับตำแหน่งที่เป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยา ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดโมเลกุลที่เกิดจากการเปลี่ยนสารไฮโดรคาร์บอนไปเป็นสารตัวกลาง (Intermediate) เมื่อสารตัวกลางเกิดขึ้นแล้วจะปรากฏตัวในช่วงระยะเวลาสั้นๆ เนื่องจากสามารถเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เสถียรกว่าอย่างรวดเร็วในขั้นตอนสุดท้าย โดยสารตัวกลางที่เกิดขึ้นจะเป็นสารประกอบที่มีประจุบวกหรือเรียกว่าคาร์โบเนียมไอออน (Carbonium ions, $R-CH_2^+$)

คาร์โบเนียมไอออนเกิดขึ้นได้จากการเติมโปรตอน (Proton, H^+) ให้กับโอเลฟินส์ ดังสมการ 2.4 ซึ่งโอเลฟินส์นี้อาจมาจากสารป้อนหรือถูกผลิตผ่านปฏิกิริยาการแตกตัวทางความร้อน และเกิดจากการตั้งไฮไดรด์ (Hydride Ion, H^-) จากพาราฟิน ดังสมการที่ 2.5 โดยไอออนเหล่านี้จะเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนกับตำแหน่งที่เป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยา



ความเสถียรของคาร์โบเนียมไอออนขึ้นกับธรรมชาติของหมู่แอลคิล (Alkyl group) ที่ติดกับประจุบวก ซึ่งเสถียรภาพของคาร์โบเนียมไอออนเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ ดังนี้ ไอออนตติยภูมิ (Tertiary ions) ไอออนทุติยภูมิ (Secondary ions) ไอออนปฐมภูมิ (Primary ions) และไอออนที่คาร์บอนอะตอมแรก (Methyl ions) ไอออนปฐมภูมิและไอออนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มจะจัดเรียงตัวแบบไอออนตติยภูมิ เพื่อเพิ่มความเสถียรทำให้ได้ผลผลิตที่มีโมเลกุลเป็นกิ่งก้านมากขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นผ่านคาร์โบเนียมไอออน คือ ปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking reaction) ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization reaction) ปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจน (Hydrogen transfer reaction) ธรรมชาติและความแรงของตำแหน่งกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาต่างๆ เหล่านี้

สำหรับคาร์โบเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า เบตา-ซิสชัน (β -scission) เนื่องจากคาร์โบเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่ความเสถียรจะน้อยกว่าคาร์โบเนียมไอออนที่

มีขนาดเล็ก ดังนั้นที่ตำแหน่งพันธะคาร์บอน-คาร์บอนจึงถูกทำให้แตกหักได้ง่ายจนเกิดเป็นสารประกอบอัลคีน (ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน) และคาร์โบเนียมปฐมภูมิ

ในทางปฏิบัติกระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา จะเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันมากเกินไปเป็นเหตุให้เกิดการเกาะติดของคาร์บอนบนตัวเร่ง ทำให้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง แต่คาร์บอนเหล่านี้ถูกกำจัดได้เกือบหมดด้วยการเผา ทำให้ความว่องไวปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาคืนสภาพเดิม

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Kim และคณะ [27] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน (Pyrolysis) ของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับยานยนต์ที่ใช้แล้วด้วย Thermogravimetric analysis (TGA) โดยในการศึกษานั้นจะให้อัตราความร้อนที่ 0.50, 1.00 และ 2.00 องศาเซลเซียสต่อนาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีการหมุนวน พบว่าน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่แตกตัวที่อุณหภูมิระหว่าง 400 ถึง 460 องศาเซลเซียส ตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาคือพลังงานกระตุ้น ซึ่งพลังงานกระตุ้นจะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามการดำเนินไปของการสลายตัวทางความร้อน

งานวิจัยของ Fuentes และคณะ [28] ศึกษาการแตกตัวและการเผาไหม้ของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ในบรรยากาศไนโตรเจน และอัตราส่วนที่แตกต่างของ ไนโตรเจน:ออกซิเจน (N_2 และ $N_2:O_2$ ผสมที่ 4:1 และ 9:1) น้ำหนักที่แตกต่าง (12.5 และ 5 มิลลิกรัม) ให้ความร้อน 5 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที ดำเนินการใน tubular reactor ที่อุณหภูมิ 500 และ 800 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาการสลายตัวทางความร้อน การหาชนิดของสารประกอบที่ระเหยเป็นไอและสารประกอบกึ่งระเหยเป็นไอจากการแตกตัวและการเผาไหม้ของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ผลจากการดำเนินการพบว่าการแตกตัวและการเผาไหม้มีได้ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการแรกการระเหยเป็นไอของน้ำมันจะขึ้นอยู่กับมวลเริ่มต้นและอัตราความร้อน และกระบวนการที่สองมีการสลายตัวพบว่ากระบวนการในการเผาไหม้ต่างจากกระบวนการในการแตกตัว

งานวิจัยของ วิสา มานะสมบูรณ์พันธ์ [29] ศึกษาการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้ไนโตรเจนเป็นแก๊สพาเมื่ออุณหภูมิการทดลองอยู่ในช่วง 50–100 องศาเซลเซียส ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ผลของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี วิเคราะห์ความหนืดโดยมาตรฐาน ASTM D445-11 ซึ่งภาวะที่ให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดคือ ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์สูงสุดมากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

งานวิจัยของกฤษณ์ ปิ่นเวหา [4] ศึกษาถึงกระบวนการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วโดยทำการทดลอง ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร กระบวนการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วนี้จะทำการศึกษาที่ภาวะอุณหภูมิ 410-450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ใช้แล้วร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก ปริมาณสารตั้งต้นจำนวน 20 กรัม ภาวะที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 46 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.12 โดยน้ำหนัก ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 78.42 โดยน้ำหนัก แก๊สไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 16.84 โดยน้ำหนัก กากของแข็งร้อยละ 4.74 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณเนฟทาร้อยละ 33.26 โดยน้ำหนัก เคโรซีนร้อยละ 19.70 โดยน้ำหนัก ดีเซลร้อยละ 32.25 โดยน้ำหนัก โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวร้อยละ 5.37 โดยน้ำหนัก และพบว่ามีหมู่ฟังก์ชันหลักเป็นพวกแอมติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเมื่อเทียบกับหมู่ ฟังก์ชันหลักใน น้ำมันเบนซินออกเทน 95 แล้วพบว่ามีหมู่อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่คล้ายกัน

งานวิจัยของจากรู นาดกรณกุล [5] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการไพโรไลซ์น้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ศึกษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 400-450 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมัน 3-9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50-150 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 30-60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าได้เชื้อเพลิงเหลวที่มีสัดส่วนของดีเซลมากที่สุดร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 400 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมัน 3 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 102.5 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 48.2 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

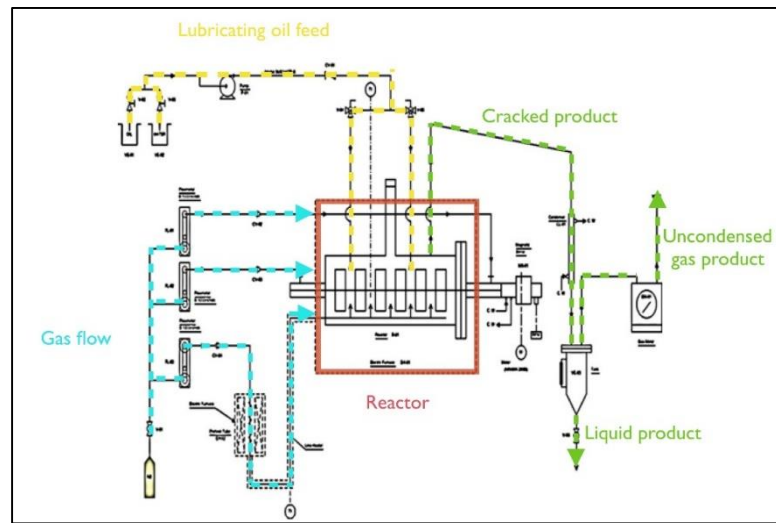
งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอพซีซีใช้แล้ว และศึกษาภาวะเหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมาจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบที่ดีที่สุด พร้อมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ โดยมีเครื่องมือและวิธีการทดลองดังนี้

3.1 เครื่องปฏิกรณ์และส่วนประกอบ



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง จากรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยเครื่องนี้มีปริมาตรความจุที่ 3 ลิตร ตัวเตาปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิมถูกจัดวางในลักษณะแนวนอน สามารถทนความร้อนได้ถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่ฝาปิดด้านหน้ามีไบกวนเพื่อสอดเข้าด้านในตัวเครื่อง ส่วนด้านบนของเครื่องจะมีที่สำหรับใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา และช่องสำหรับใส่เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (เทอร์โมคัปเปิล) โดยจะวัดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิด้านข้างของผนังเครื่องปฏิกรณ์และอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.2 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

3.1.2 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล มีหน้าจอแสดงอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 3.3 โดยทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังขดลวดให้ความร้อนในส่วนต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์ สามารถตัดการจ่ายกระแสเมื่อได้อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้โดยแบ่งการควบคุมอุณหภูมิออกเป็น

- ควบคุมอุณหภูมิภายใน
- ควบคุมอุณหภูมิประเก็นทั้งสองข้าง



รูปที่ 3.3 หน้าจอแสดงแผงควบคุมอุณหภูมิ

3.1.3 ขดลวดความร้อนแบบ Injection ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ กำลัง 400 วัตต์ แรงดัน 220 โวลต์ เพื่อทำความร้อนให้แก่เครื่องปฏิกรณ์

3.1.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล (เทอร์โมคัปเปิล) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร เป็นแบบเค (K-type) วัดอุณหภูมิในส่วนต่างๆของเครื่องปฏิกรณ์ และแสดงผลที่แผงควบคุมอุณหภูมิ

3.1.5 ชุดควบคุมอัตราการไหลของแก๊สตัวพา ใช้แก๊สเป็นตัวพาในผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นออกจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยส่วนควบคุมการไหลของแก๊สจะอยู่ทางด้านประเกนทั้งสองข้างของเครื่องปฏิกรณ์

3.1.6 อุปกรณ์ควบคุมแน่นผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

- อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เป็นแบบไหลสวนกัน จะแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอของผลิตภัณฑ์และน้ำหล่อเย็นในขณะที่ไหลสวนกัน

- เครื่องทำน้ำหล่อเย็น (Cooling tower) เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สให้กลายเป็นของเหลว

3.1.7 ปั๊ม เป็นแบบชนิดโรตารี (Rotary pump) ใช้สำหรับป้อนสารตั้งต้นเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.2.2 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด ทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.2.3 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle furnace) ปริมาตร 7 ลิตร อุณหภูมิสูงสุด 1,200

องศาเซลเซียส

3.2.4 ครุชีเบิล (Crucible)

3.2.5 เครื่องแก้ว: ปีกเกอร์ กระจกทวง ขวดใส่ผลิตภัณฑ์

3.2.6 กระจกกรอง

3.2.7 นาฬิกาจับเวลา

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์

3.3.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Distillation simulation gas chromatography; DGC) แสดงดังรูปที่ 3.4 เป็นเครื่องมือที่ใช้แยกจำลองจุดเดือดเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ โดยใช้มาตรฐานการวิเคราะห์ตาม ASTM D2887 ประกอบด้วย 2 ส่วน

- เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี Agilent GC7890 capillary column DB-1 ขนาด 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร มี 100% Dimethylpolysiloxane ทน 0.25 ไมโครเมตร เป็นวัฏภาคหนึ่ง
- ซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulation distillation software)



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

3.3.2 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph Spectrophotometer; GC-MS) แสดงดังในรูปที่ 3.5 จาก Agilent 7890B HP-INNOWax column ขนาด 30 เมตร × 0.25 มิลลิเมตร ทน 0.25 ไมโครเมตร แก๊สตัวพาคือแก๊สฮีเลียม ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของสาร อาศัยหลักการเดียวกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแต่สำหรับโมเลกุลของสารเชิงเดี่ยวที่ถูกแยกจากเครื่องที่ผ่านโครมาโทกราฟีแล้ว จะถูกพาเข้าสู่เครื่องแมสสเปคโตรมิเตอร์



รูปที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

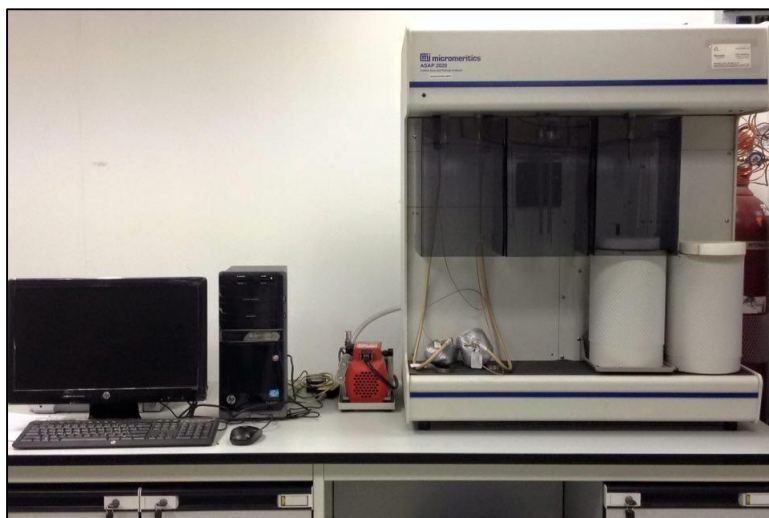
3.3.3 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer; TGA) ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น TG 209 F3 ใช้วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการวัดน้ำหนักของสารที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

3.3.4 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometer; XRF) ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยอาศัยหลักการวัดปริมาณของรังสีเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ปล่อยออกมาจากธาตุแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง

3.3.5 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer; XRD) ใช้วิเคราะห์ความเป็นผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึกของสารตัวอย่าง

3.3.6 เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN analyzer) หรือเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (Elemental Analyzer) ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN ใช้วิเคราะห์หาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน โดยอาศัยหลักการเผาไหม้อย่างรวดเร็วเพื่อเปลี่ยนธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในตัวอย่างไปเป็นแก๊สที่สัมพันธ์กับธาตุนั้นๆ

3.3.7 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (Surface area and porosity analyzer) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 รุ่น Micromeritic ASAP2020 ใช้ในการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน

3.3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-5800 LV ยี่ห้อ JEOL แสดงในรูปที่ 3.7 ใช้วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่าง



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.3.9 เครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ รุ่น 848 Trinoplus ยี่ห้อ Metrohm แสดงในรูปที่ 3.8 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว



รูปที่ 3.8 เครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ

3.4 สารตั้งต้นและสารเคมี

- 3.4.1 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจากบริษัท โตโยต้าสระบุรี จำกัด
- 3.4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจากบริษัท ไทยออยล์ จำกัด (มหาชน)
- 3.4.3 แก๊สไนโตรเจน 99.99% จากบริษัท บางกอกอินดัสเทรียลแก๊ส จำกัด
- 3.4.4 ตัวทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 (ACS for analysis)
- 3.4.5 โทลูอีน (Toluene) เกรดการค้า

3.5 การดำเนินงานวิจัย

- 3.5.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยา
- 3.5.2 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการทดลอง โดยการนำไปเผา (Calcine) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นและเก็บในตู้ดูดความชื้น
- 3.5.3 ออกแบบการทดลองโดยการออกแบบการทดลองเชิงประกอบสองระดับประสมกลาง ในการทดลองใช้ระดับของตัวแปร 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ ระดับสูง และระดับกลาง โดยมีตัวแปรที่จะศึกษา 4 ตัวแปร คือ อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และตารางการทดลองโดยการออกแบบการทดลองเชิงประกอบสองระดับประสมกลาง โดยมีการทำซ้ำของตัวแปรระดับกลาง 5 ครั้ง แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปร	ระดับ			หน่วย
	ต่ำ	กลาง	สูง	
อุณหภูมิ ; A	380	415	450	องศาเซลเซียส
อัตราการไหลของ สารตั้งต้น ; B	3	6	9	มิลลิลิตรต่อนาที
อัตราการไหลของ แก๊สไนโตรเจน ; C	50	100	150	มิลลิลิตรต่อนาที
ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา ; D	30	45	60	ร้อยละปริมาตรของ เครื่องปฏิกรณ์

ตารางที่ 3. 2 ตารางการทดลองโดยการออกแบบการทดลองเชิงประกอบสองระดับประสมกลาง

การทดลองที่	A	B	C	D
1	380	3	50	30
2	450	3	50	30
3	380	9	50	30
4	450	9	50	30
5	380	3	150	30
6	450	3	150	30
7	380	9	150	30
8	450	9	150	30
9	380	3	50	60
10	450	3	50	60
11	380	9	50	60

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) ตารางการทดลองโดยการออกแบบการทดลองเชิงประกอบสองระดับประสมกลาง

การทดลองที่	A	B	C	D
12	450	9	50	60
13	380	3	150	60
14	450	3	150	60
15	380	9	150	60
16	450	9	150	60
17	415	6	100	45
18	415	6	100	45
19	415	6	100	45

3.5.4 ทำตามการทดลองที่ออกแบบไว้และวิเคราะห์ผลสถิติที่เป็นของเหลว

3.5.5 ทหาภาวะที่เหมาะสม โดยใช้โปรแกรม Design Expert

3.5.6 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและผลที่ได้จากการทดลองจริง และนำผลสถิติของเหลวที่ได้ไปทดสอบสมบัติของเชื้อเพลิง

3.6 วิธีการทดลอง

3.6.1 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ให้ได้ตามปริมาตรที่ต้องการ จดบันทึก

3.6.2 ชั่งน้ำหนักน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่ผ่านการกรองเพื่อนำสิ่งสกปรกออกแล้ว ด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง ก่อนป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์

3.6.3 เตรียมเครื่องปฏิกรณ์ให้พร้อมใช้งาน โดยปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ หุ้มฉนวนกันความร้อน เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง จากนั้นต่ออุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบดิจิตอลเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ และต่อระบบน้ำเย็นเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3.6.4 เปิดช่องสำหรับใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตวงไว้

3.6.5 ตั้งค่าอุณหภูมิโดยการปรับตั้งค่าที่ชุดควบคุมเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดให้ความร้อน จากนั้นเปิดระบบใบกวนและระบบน้ำหล่อเย็น เปิดแก๊สไนโตรเจนและปรับอัตราการไหลตามที่ต้องการ

3.6.6 เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการ เริ่มป้อนน้ำมันหล่อลื่นให้แล้วเข้าสู่ระบบตามอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่ตั้งค่าไว้ จดบันทึกอุณหภูมิ น้ำหนักน้ำมันหล่อลื่นให้แล้ว และน้ำหนักผลิตภัณฑ์ทุกๆ 1 ชั่วโมง

3.6.7 เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้และบันทึกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ นำไปกรองด้วยกระดาษกรองแล้วเก็บตัวอย่างในขวดเก็บสารเคมี

3.6.8 หลังจากเก็บตัวอย่างครบ 5 ชั่วโมง ปิดเครื่องและรอให้เครื่องปฏิกรณ์เย็น ทำความสะอาดและล้างเครื่องปฏิกรณ์ด้วยสารละลายโทลูอิน

3.6.9 นำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์

3.6.10 คำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว ดังสมการ

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว} = \frac{\text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้}}{\text{น้ำหนักสารตั้งต้นที่หายไป}} \times 100$$



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยกระบวนการไพโรไลซิส เพื่อทำการศึกษาดังกล่าวที่มีอิทธิพลต่อการไพโรไลซิส และศึกษาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบที่ดีที่สุด ทำการออกแบบการทดลองโดยการออกแบบการทดลองเชิงประกอบสองระดับประสมกลาง (2^k experimental design) ในการทดลองใช้ระดับของตัวแปร 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง โดยมีตัวแปรที่จะศึกษา 4 ตัวแปร คือ อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ตลอดจนผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้นำไปวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Distillation simulation gas chromatography; DGC) เป็นเครื่องมือที่ใช้โปรแกรมแยกจำลองจุดเดือดเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์โดยใช้มาตรฐานการวิเคราะห์ตาม ASTM D2887

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเชื้อเพลิงของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

วิเคราะห์องค์ประกอบโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Distillation simulation gas chromatography; DGC) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

จุดเดือด (°C)	องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
IBP-200	แนฟทา (C_5-C_{12})	3
200-250	เคโรซีน ($C_{12}-C_{15}$)	0
250-370	ดีเซล ($C_{15}-C_{33}$)	2
370-FBP	กากน้ำมัน (>33)	95

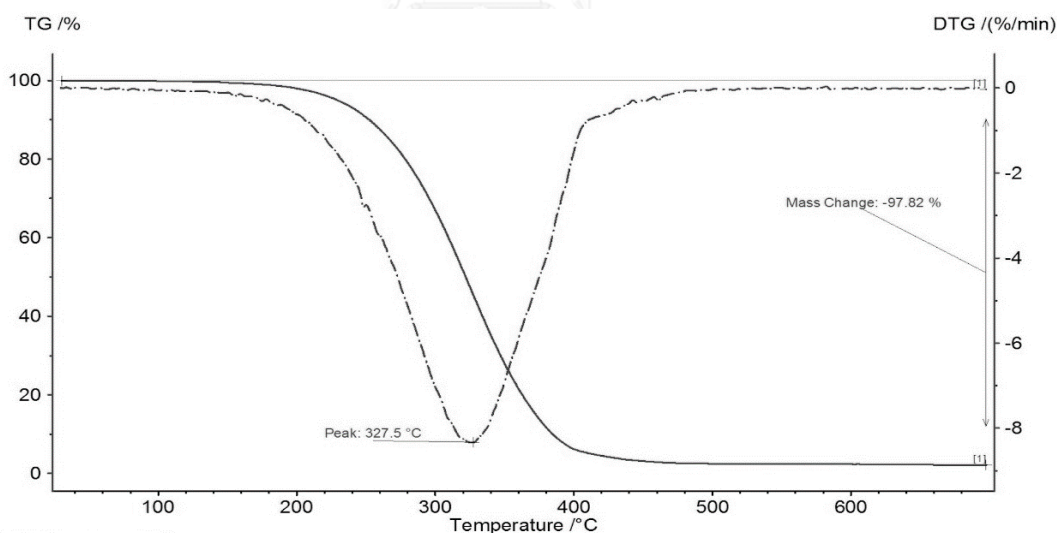
IBP : จุดเดือดเริ่มต้น (Initial Boiling Point), FBP : จุดเดือดสุดท้าย (Final Boiling Point)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่นพบว่า ในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วองค์ประกอบที่พบมากที่สุดคือกากน้ำมันซึ่งพบมากถึงร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ถือเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา นอกจากนั้นพบแนฟทาร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

ซึ่งมาจากการแตกโมเลกุลในเครื่องยนต์เบื้องต้น ดีเซลร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และไม่พบปริมาณของ เคโรซีนเป็นองค์ประกอบในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

4.1.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

วิเคราะห์อุณหภูมิการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.2 โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 28 - 700 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน พบว่าโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเริ่มแตกตัวที่ 200 องศาเซลเซียส และอัตราการแตกโมเลกุล สูงสุดที่ 327.5 องศาเซลเซียส เนื่องจากได้กำหนดอุณหภูมิการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว เริ่มต้นที่ 320 องศาเซลเซียส แต่ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิดังกล่าวมีการแตกตัวของโมเลกุลแต่ เป็นการแตกตัวที่ไม่สมบูรณ์จึงทำให้สารกลับมารวมตัวกันเกิดเป็นไข ดังนั้นจึงกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้น ของการทดลองเพิ่มขึ้นและใช้อุณหภูมิที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ 380, 415 องศาเซลเซียสและใช้อุณหภูมิสูงสุด 450 องศาเซลเซียส เนื่องจากเมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 450 องศาเซลเซียสเกิดการ แยกสลายไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมาก



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงอุณหภูมิการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

4.1.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว พบว่ามีความหนืดสูงจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนโดยตรงแต่มีค่าความร้อนสูง ดังนั้นต้องผ่านกระบวนการ

แปรรูปหรือกระบวนการทางปฏิกิริยาเคมี เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงเชื้อเพลิงทางการค้า

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

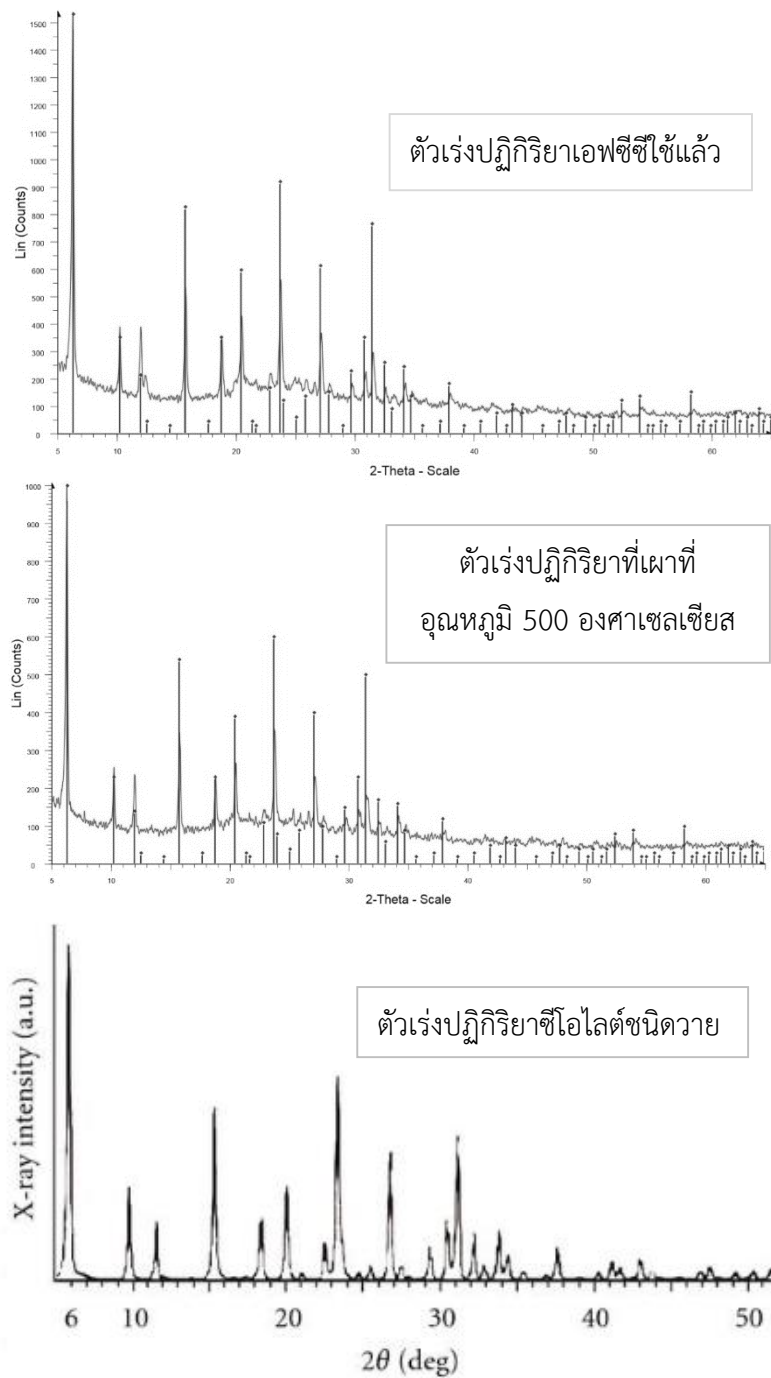
สมบัติ	ผล
ความหนืด : ASTM D445, 40 °C (mm ² /s)	45.6
ค่าความร้อน (cal/g)	11,582

4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ก่อนนำมาใช้งานจึงต้องนำตัวเร่งปฏิกิริยามาปรับสภาพพื้นผิวโดยการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อเป็นการไล่สิ่งเจือปนบนพื้นผิวและภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากการเผาจะตั้งทิ้งไว้ให้เย็นและเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น และจึงนำตัวเร่งปฏิกิริยามาวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังต่อไปนี้

4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา

โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction; XRD) จากรูปที่ 4.2 พบว่าการปรับสภาพพื้นผิวด้วยการเผาไม่ทำให้โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลง รูปแบบของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งก่อนเผาและหลังเผามีรูปแบบของความเป็นผลึกแบบเดียวกัน แต่พบว่าความเข้มของพีคซิลิกาเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการเผาช่วยทำให้ผลึกซิลิกาที่มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น นอกจากนั้นรูปแบบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยแสดงลักษณะของพีคที่ปรากฏใกล้เคียงกับพีคของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดควาย จึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีองค์ประกอบของซีโอไลต์ชนิดควาย



รูปที่ 4.2 XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี

4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา

วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence spectroscopy, XRF) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณซิลิกาและอลูมิเนียมมีมากสามารถยืนยันได้ว่าตัวเร่ง

ปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยคือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีองค์ประกอบของซีไลต์ และปริมาณโลหะชนิดอื่น ๆ มีปริมาณลดลงเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพแล้วพื้นที่ผิว รูปร่าง และขนาดของรูพรุน จะมีลักษณะดีขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว		ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส, 4 ชั่วโมง	
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Na	0.854	Na	0.868
Al	43.368	Al	43.707
Si	32.202	Si	32.948
P	0.07	P	0.085
S	0.666	S	0.645
Cl	3.08	Cl	1.963
K	0.153	K	0.141
Ca	0.125	Ca	0.12
Ti	2.078	Ti	1.964
Fe	3.485	Fe	3.397
Sr	0.054	Sr	0.056
Y	0.031	Y	0.027
Zr	0.079	Zr	0.08
La	13.755	La	13.999

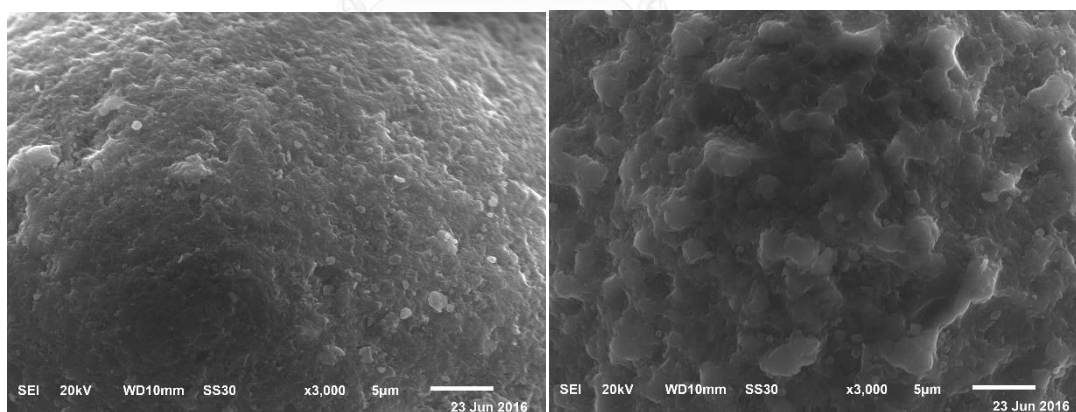
4.2.3 การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ขนาด และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

วิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ขนาด และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน (N_2 physisorption) หรือเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller; BET ผลวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วหลังปรับสภาพพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก 118.26 เป็น 119.91 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 0.12 เป็น 0.13 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 4.35 เป็น 4.46

นาโนเมตร เนื่องจากการปรับสภาพพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการเผาเป็นการช่วยสลายสิ่งเจือปนที่เกาะอยู่บนผิวและในรูพรุน เป็นการช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อเสริมการแตกตัวในการเกิดปฏิกิริยาให้ดีขึ้น นอกจากนี้เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีทั้งก่อนและหลังเผาไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM) แสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งจะแสดงภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีจากโดยภาพ (ก.) คือตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วและภาพ (ข.) คือตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ผ่านการเผาแล้วจะมีรูพรุนมากขึ้นกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ยังไม่ได้เผา

ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิวขนาดและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวรูพรุน (ตร.ม./กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลบ.ซม./กรัม)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (นาโนเมตร)
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ใช้แล้ว	118.26	0.12	4.35
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ ผ่านการเผา	119.91	0.13	4.46



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 4.3 SEM ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี

(ก.) ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว (ข.) ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีหลังการปรับสภาพ

4.3 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ออกแบบการทดลองเชิงประกอบแบบสองระดับประสมกลางเพื่อวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆ โดยมีตัวแปรตอบสนอง 2 ตัวแปรคือ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลในเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ อุณหภูมิ อัตราการไหลของสารตั้งต้น อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

4.3.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยออกแบบการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียล แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวในตารางที่ 4.5 พบว่าค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวอยู่ในช่วงร้อยละ 29.6 ถึง 99.5 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

การทดลองที่	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว (โดยมวล)	ค่าเฉลี่ยของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว
	A	B	C	D		
1.1	450	9	150	30	88.09	88.5
1.2					89	
2.1	450	9	50	60	88.5	87.9
2.2					87.2	
3.1	450	3	150	60	80.73	79.9
3.2					79.03	
4.1	380	9	150	60	38.6	38.0
4.2					37.3	

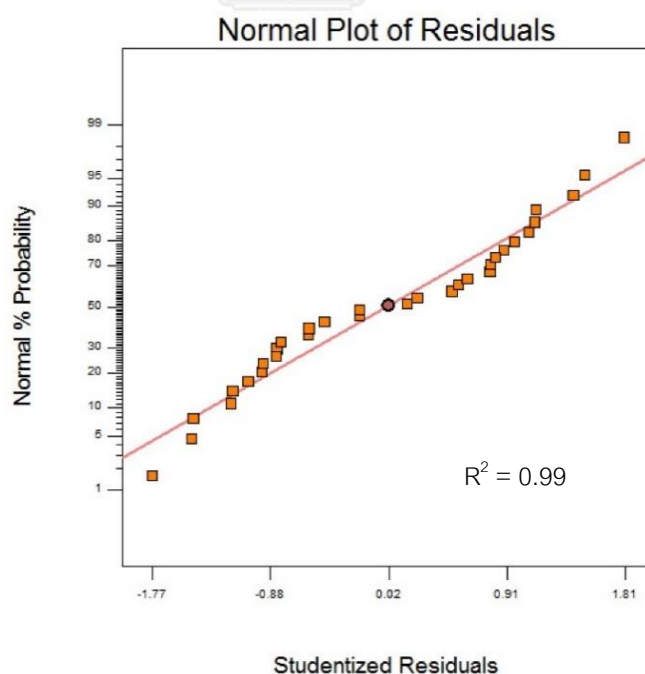
ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

การทดลองที่	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว (โดยมวล)	ค่าเฉลี่ยของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว
	A	B	C	D		
5.1	380	3	150	60	99.83	99.4
5.2					98.83	
6.1	450	9	50	30	93.25	92.1
6.2					90.87	
7.1	380	3	150	30	44.03	43.1
7.2					42.18	
8.1	380	3	50	60	89.28	88.1
8.2					86.98	
9.1	450	9	150	60	84.14	85.6
9.2					87	
10.1	380	9	50	60	42.19	41.5
10.2					40.73	
11.1	380	9	50	30	11.07	10.3
11.2					9.54	
12.1	450	3	50	30	96.46	96.8
12.2					97.23	
13.1	380	9	150	30	28.96	29.6
13.2					30.25	
14.1	450	3	150	30	91.67	92.6
14.2					93.5	
15.1	380	3	50	30	68.87	69.0
15.2					69.22	

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

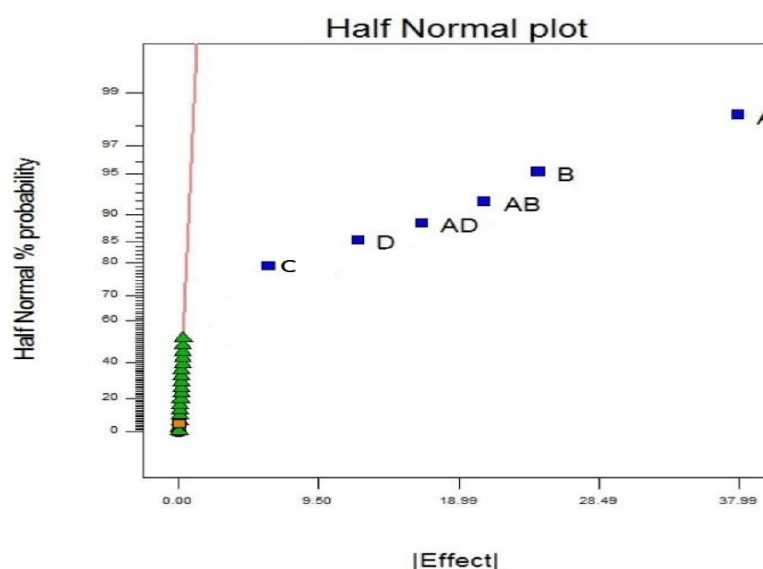
การทดลองที่	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว (โดยมวล)	ค่าเฉลี่ยของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว
	A	B	C	D		
16.1	450	3	50	60	99.35	99.5
16.2					99.64	
17	415	6	100	45	81.78	83.14
18					81.71	
19					85.92	

เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-expert สำหรับศึกษาและวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) ของตัวแปรต่างๆ การคำนวณจะบอกถึงปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ซึ่งปัจจัยนั้นจะต้องมีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05



รูปที่ 4.4 Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

เมื่อนำข้อมูลไปสร้าง Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว แสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่นำมาศึกษา โดยเป็นการตรวจสอบความถูกต้องโดยการวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่เหลือจากข้อมูลที่สมการทำนาย เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าค่า $R^2 = 0.99$ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าข้อมูลที่นำมาศึกษามีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนได้



รูปที่ 4.5 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

ตารางที่ 4.6 ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F value	Prob > F value
Model	25023.24	14	1787.37	1486.77	<0.0001
A	11542.88	1	11542.88	9601.55	<0.0001
B	4757.51	1	4757.51	3957.38	<0.0001
C	102.24	1	102.24	85.05	<0.0001
D	1190.48	1	1190.48	990.26	<0.0001
AB	3425.02	1	3425.02	2848.99	<0.0001

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F value	Prob > F value
AD	2180.31	1	2180.31	1813.62	<0.0001
Residual	20.44	17	1.2		
Total	25043.67	31			

รูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่นำมาสร้าง Half normal probability plot จากรูปพบว่าตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงมากคือ อุณหภูมิ (A) อัตราการไหลของสารตั้งต้น (B) อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (C) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (D) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลของสารตั้งต้น (AB) และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (AD) แสดงให้เห็นว่าตัวแปรต่างๆ เหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ตารางที่ 4.6 แสดงถึงปัจจัยที่มีค่า Prob > F Value น้อยกว่า 0.05 พบว่าอุณหภูมิ อัตราการไหลของสารตั้งต้น อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลของสารตั้งต้น และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวอย่างมีนัยสำคัญ

4.3.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยออกแบบการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียล แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลในตารางที่ 4.7 พบว่าค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลอยู่ในช่วงร้อยละ 33.5 ถึง 47.5 โดยน้ำหนัก

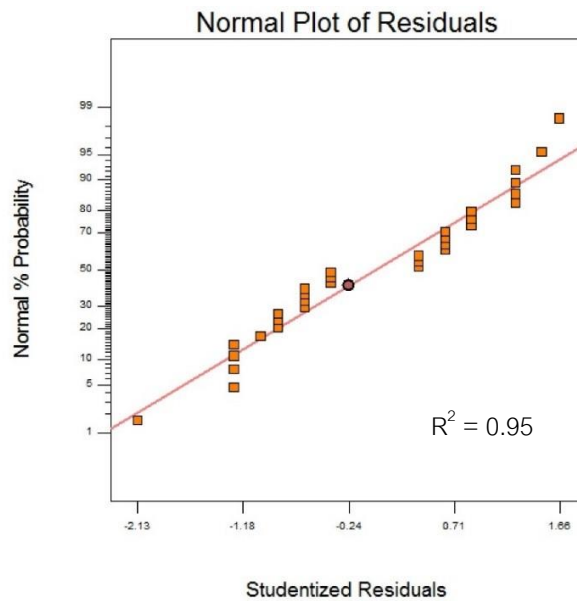
ตารางที่ 4.7 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

การทดลอง ที่	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของ ดีเซล (โดย น้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยของร้อยละ ผลได้ผลิตภัณฑ์ ดีเซล
	A	B	C	D		
1.1	450	9	150	30	33	33.5
1.2					34	
2.1	450	9	50	60	35	35.5
2.2					36	
3.1	450	3	150	60	40	41
3.2					42	
4.1	380	9	150	60	48	47.5
4.2					47	
5.1	380	3	150	60	42	41
5.2					40	
6.1	450	9	50	30	37	36.5
6.2					36	
7.1	380	3	150	30	40	41
7.2					42	
8.1	380	3	50	60	42	42.5
8.2					43	
9.1	450	9	150	60	43	43.5
9.2					44	
10.1	380	9	50	60	45	44.5
10.2					44	
11.1	380	9	50	30	45	46
11.2					47	

ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

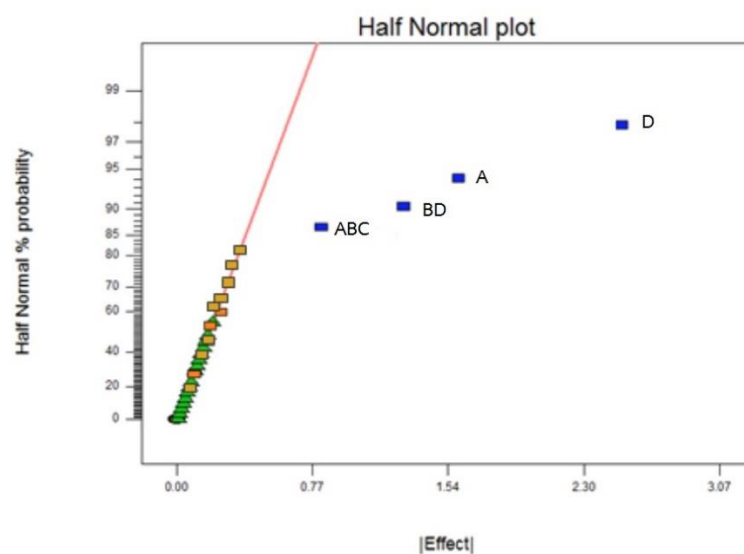
การทดลอง ที่	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของ ดีเซล (โดยน้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยของร้อยละ ผลได้ผลิตภัณฑ์ ดีเซล
	A	B	C	D		
12.1	450	3	50	30	43	43.5
12.2					44	
13.1	380	9	150	30	37	36
13.2					35	
14.1	450	3	150	30	41	40.5
14.2					40	
15.1	380	3	50	30	39	40.5
15.2					42	
16.1	450	3	50	60	43	42.5
16.2					42	
17	415	6	100	45	36	34.6
18					34	
19					34	

เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-expert สำหรับศึกษาและวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) ของตัวแปรต่างๆ การคำนวณจะบอกถึงปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ซึ่งปัจจัยนั้นจะต้องมีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05



รูปที่ 4.6 Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซล

เมื่อนำข้อมูลไปสร้าง Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่น่ามาศึกษา โดยเป็นการตรวจสอบความถูกต้องโดยการวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่เหลือจากข้อมูลที่เหมาะสมการทำนาย เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าค่า $R^2 = 0.95$ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าข้อมูลที่น่ามาศึกษามีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนได้



รูปที่ 4.7 Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซล

ตารางที่ 4.8 ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซลจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

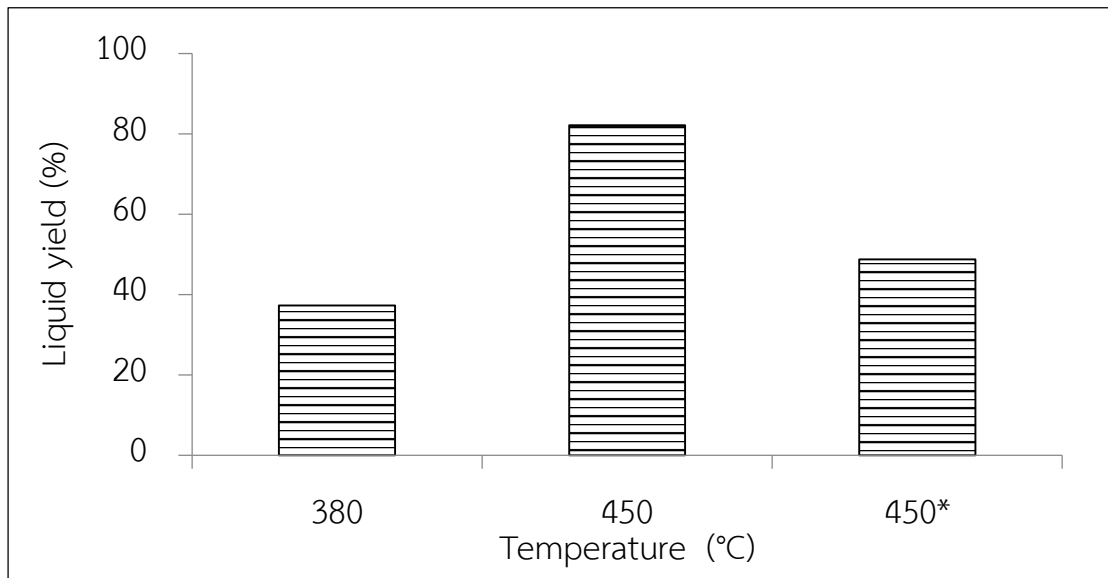
Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F value	Prob > F value
Model	456.91	13	35.15	31.53	<0.0001
A	63.28	1	63.28	56.78	<0.0001
D	52.53	1	52.53	47.13	<0.0001
BD	38.28	1	38.28	34.35	<0.0001
ABC	30.03	1	30.03	26.94	<0.0001
Residual	20.06	18	1.11		
Total	476.97	31			

รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่นำมาสร้าง Half normal probability plot จากรูปพบว่าตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงมากคือ อุณหภูมิ (A) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (D) อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของสารตั้งต้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (BD) และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลของสารตั้งต้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ABD) แสดงให้เห็นว่าตัวแปรต่างๆ เหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ตารางที่ 4.8 แสดงถึงปัจจัยที่มีค่า Prob > F Value น้อยกว่า 0.05 พบว่าอุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของสารตั้งต้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลของสารตั้งต้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวอย่างมีนัยสำคัญ

4.4 ผลจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

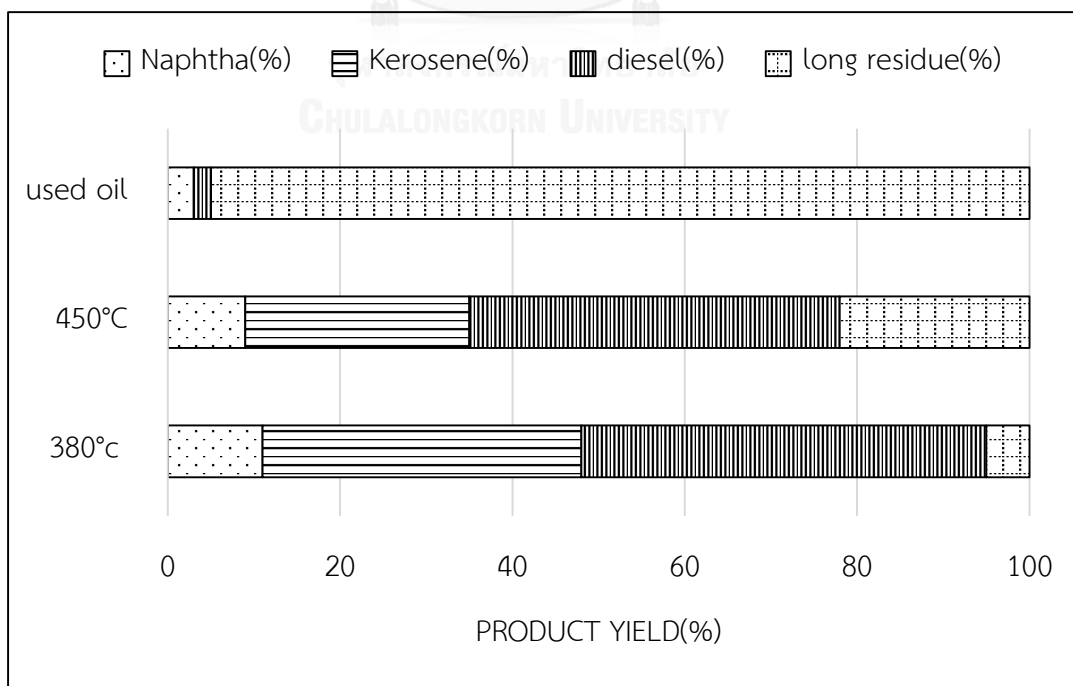
หลังจากวิเคราะห์การทดลองโดยวิธี ANOVA แล้ว จึงทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากการไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง และต่อไปจะเป็นการศึกษาว่าปัจจัยเหล่านั้นส่งผลอย่างไร โดยการเปรียบเทียบผลค่าต่ำและสูงของแต่ละปัจจัยต่อไปนี้

4.4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว



รูปที่ 4.8 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

(อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380 และ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา(*))



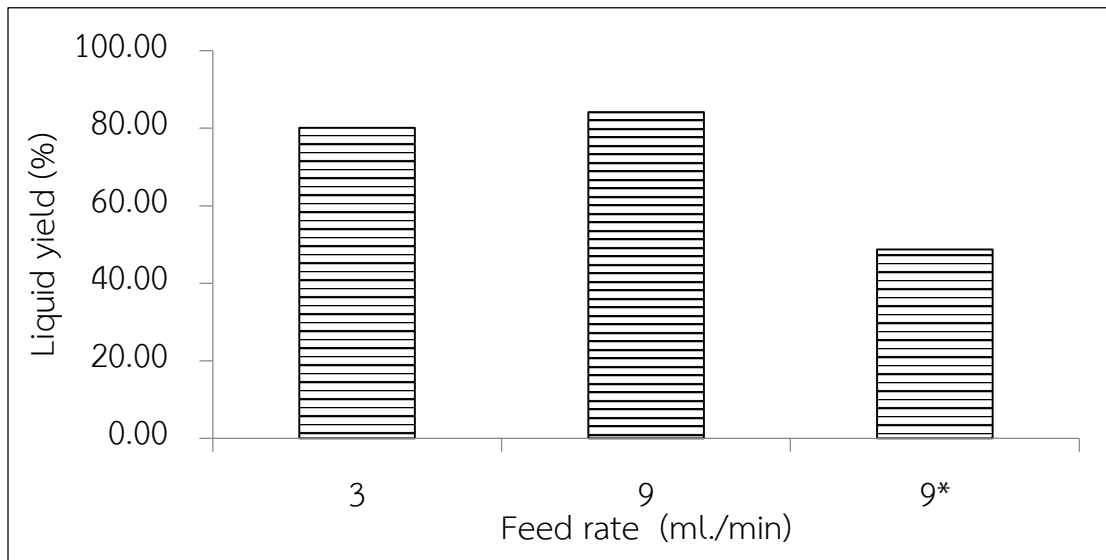
รูปที่ 4.9 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

(อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380 และ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตร ต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดย ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์)

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการ ไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ร้อยละผลได้ของ ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แสดงในรูปที่ 4.8 ทำการศึกษาที่อุณหภูมิในการทำ ปฏิกิริยา 380 และ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการ ไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของ เครื่องปฏิกรณ์พบว่า ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวคิดเป็นร้อยละ 37.3 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 380 องศาเซลเซียสเป็น 450 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะการ ทดลองเดียวกันได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 82.16 โดยน้ำหนัก เนื่องจากอิทธิพล ของการแยกสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงมีบทบาทอย่างมากต่อการแยกสลายของน้ำมันหล่อลื่น ใช้แล้วที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ โดยเมื่อได้รับความร้อนสูงต่อเนื่องทำให้เกิดการ แยกตัวไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็กและจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามามี บทบาททำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นจึงส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสูงมากขึ้น และเมื่อพิจารณา องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลว จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 380 องศาเซลเซียสเป็น 450 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลลดลงจากร้อยละ 47 โดยน้ำหนัก เป็น ร้อยละ 43 โดยน้ำหนัก เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงอิทธิพลของการสลายด้วยความร้อนทำให้เกิดการแตก โมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ไปเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กมากจนกลายเป็นแก๊ส ปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลลดลงและส่งผลให้กาน้ำมันมีปริมาณสูงขึ้น เนื่องจากตัวเร่ง ปฏิกิริยาเอพซีซีแตกย่อยโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จนได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นอัลคีนปริมาณมาก ทำให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยา Polymerization ซึ่งปฏิกิริยา นี้ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นกาน้ำมัน

จากผลการทดลองพบว่าผลที่ได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวทั้งหมดจากการ ไพโรไลซิสบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 17.53 โดย น้ำหนัก และที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 35.33 โดยน้ำหนัก

4.4.2 อิทธิพลของอัตราการไหลของสารตั้งต้นต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว



รูปที่ 4.10 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่อัตราการไหลต่างๆ

(อัตราการไหลของสารตั้งต้น 3 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*))



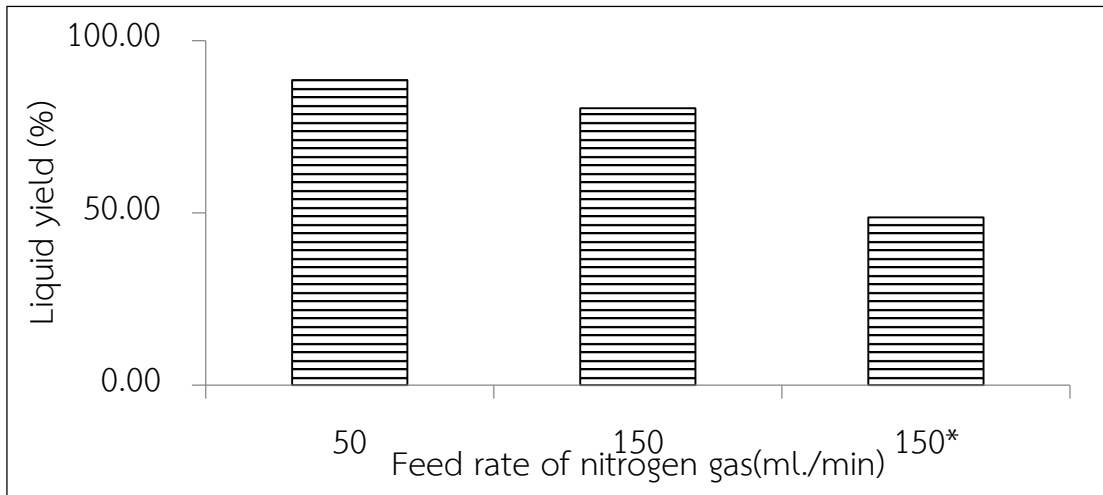
รูปที่ 4.11 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่อัตราการไหลต่างๆ

(อัตราการไหลของสารตั้งต้น 3 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์)

การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสารตั้งต้น แสดงในรูปที่ 4.10 ทำการศึกษาที่อัตราการไหลของสารตั้งต้น 3 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจะได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 80.14 โดยน้ำหนักเป็นร้อยละ 84.14 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของสารตั้งต้นมากขึ้นทำให้สารมีปริมาณมากและยังมีปริมาตรช่องว่างภายในเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้สารมีพื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อนจึงเกิดการแตกพันธะจากสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนขนาดโมเลกุลเล็กมากขึ้น และรูปที่ 4.11 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วพบว่า เมื่ออัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเพิ่มขึ้นจะได้ผลิตภัณฑ์ดีเซลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 40 โดยน้ำหนักเป็นร้อยละ 43 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของสารตั้งต้นสูงขึ้น ระดับความสูงของน้ำมันที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์จึงมีมากขึ้น ทำให้เกิดการแตกโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเข้ามาทำให้ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางแตกเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ดีเซลเพิ่มมากขึ้น

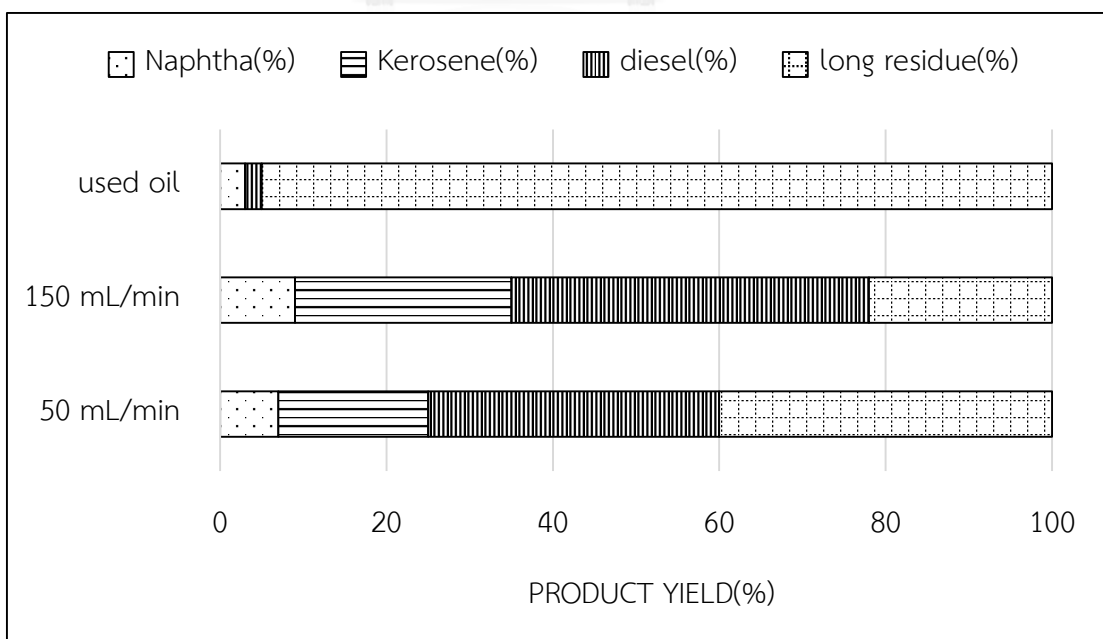
จากผลการทดลองพบว่าผลที่ได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวทั้งหมดจากการไพโรไลซิสบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่อัตราการไหลของสารตั้งต้น 3 มิลลิลิตรต่อนาที เท่ากับร้อยละ 32.06 โดยน้ำหนัก และที่อัตราการไหลของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที เท่ากับร้อยละ 36.18 โดยน้ำหนัก

4.4.3 อิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว



รูปที่ 4.12 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่อัตราการไหลต่างๆของแก๊สไนโตรเจน

(อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*))



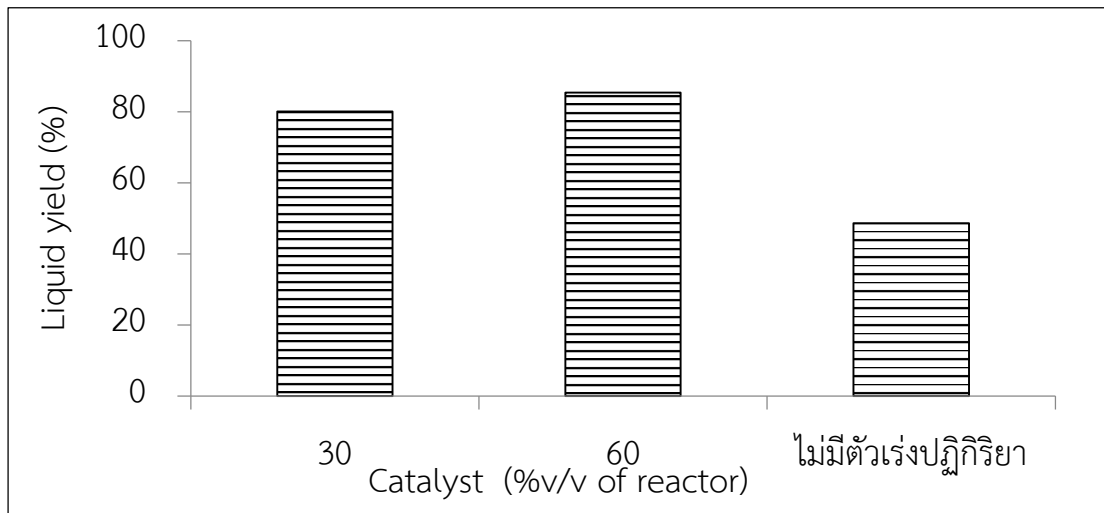
รูปที่ 4.13 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่อัตราการไหลต่างๆของแก๊สไนโตรเจน

(อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์)

การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนแสดงในรูปที่ 4.12 ทำการศึกษาที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าเมื่ออัตราการป้อนแก๊สตัวพาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวลดน้อยลงจาก 88.5 เป็น 80.35 โดยน้ำหนัก เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่สูงขึ้นทำให้เวลาในการควบแน่นไอรระเหยให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวน้อยเกินไป ทำให้ไอรระเหยถูกพาออกจากระบบในรูปแก๊ส และรูปที่ 4.13 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนแก๊สตัวพาในการทำปฏิกิริยาทำให้เวลาในการทำปฏิกิริยาของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ทำให้การเกิดปฏิกิริยายังเกิดได้ไม่สมบูรณ์ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลจึงลดน้อยลง และยังคงเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่อยู่โดยปริมาณดีเซลลดลงจากร้อยละ 44 โดยน้ำหนักเป็นร้อยละ 43 โดยน้ำหนัก

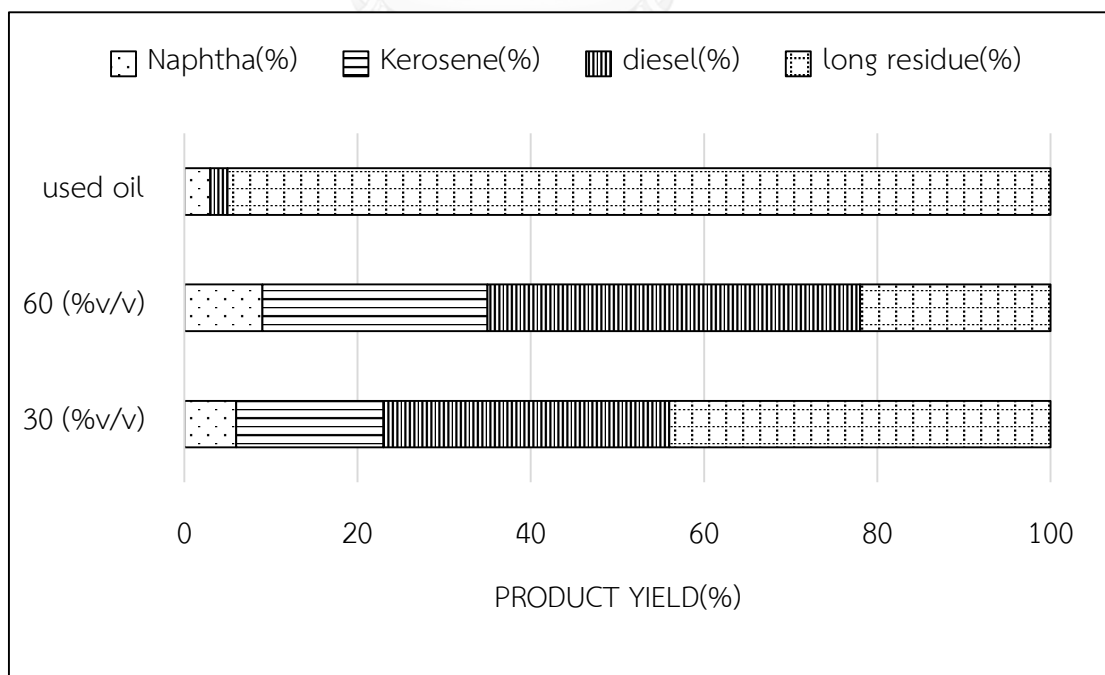
จากผลการทดลองพบว่าผลที่ได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวทั้งหมดจากการไพโรไลซิสบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที เท่ากับร้อยละ 38.94 โดยน้ำหนัก และที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที เท่ากับร้อยละ 34.55 โดยน้ำหนัก

4.4.4 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว



รูปที่ 4.14 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ

(ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 30 และ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.15 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ

(ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 30 และ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส)

การศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงในรูปที่ 4.12 ทำการศึกษาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 30 และ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นทำให้ได้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 80.09 โดยน้ำหนักเป็นร้อยละ 85.42 โดยน้ำหนัก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเร่งให้เกิดการแตกย่อยของโมเลกุลของสารประกอบ และช่วยลดพลังงานการกระตุ้นจึงทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์มากขึ้น และรูปที่ 4.15 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวพบว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ได้ปริมาณร้อยละผลได้ของดีเซลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 33 โดยน้ำหนักเป็นร้อยละ 43 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพในการสนับสนุนให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจนเกิดเป็นไอออนที่มีขนาดเล็กและจากนั้นเกิดการเลือกจำเพาะรูปร่างของสารตั้งต้น ทำให้ได้องค์ประกอบดีเซลเพิ่มขึ้นและองค์ประกอบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวลดน้อยลงและในส่วนที่ไม่ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวช่วยในการแตกตัวของสาร เมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้ต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาและได้ผลิตภัณฑ์น้อยกว่าที่ต้องการ

จากผลการทดลองพบว่าผลที่ได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวทั้งหมดจากการไพโรไลซิสบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 30 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ เท่ากับร้อยละ 26.43 โดยน้ำหนัก และที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ เท่ากับร้อยละ 36.73 โดยน้ำหนัก

4.5 คำแนะนำภาวะที่เหมาะสมจากปฏิกิริยาไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วโดยโปรแกรม Design-Expert

ตารางที่ 4.9 ขอบเขตการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Unit
Temp.	is in rang	380	450	°C
Oil feed rate	is in rang	3	9	ml/min

ตารางที่ 4.9 (ต่อ) ขอบเขตการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Unit
Temp.	is in rang	380	450	°C
Oil feed rate	is in rang	3	9	ml/min

เมื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นไขแล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว โดยจะพิจารณาค่าตอบสนอง 2 ค่าคือ ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว และค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลโดยพิจารณาให้ได้ค่ามากที่สุด การหาภาวะที่เหมาะสมแสดงในตารางที่ 4.9 และสำหรับภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert แสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ภาวะที่เหมาะสมของการไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นไขแล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่ได้จากโปรแกรม

ตัวแปร	สภาวะจากโปรแกรม
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	450
อัตราการไหลของสารตั้งต้น (มิลลิลิตรต่อนาที)	9
อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)	50
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยปริมาตร)	44.65
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	98.13
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	44

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมของการไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นไขแล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจากโปรแกรม นำค่าที่ได้มาทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากโปรแกรมกับค่าที่ได้จากการทดลอง ดังตารางที่ 4.11 พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม

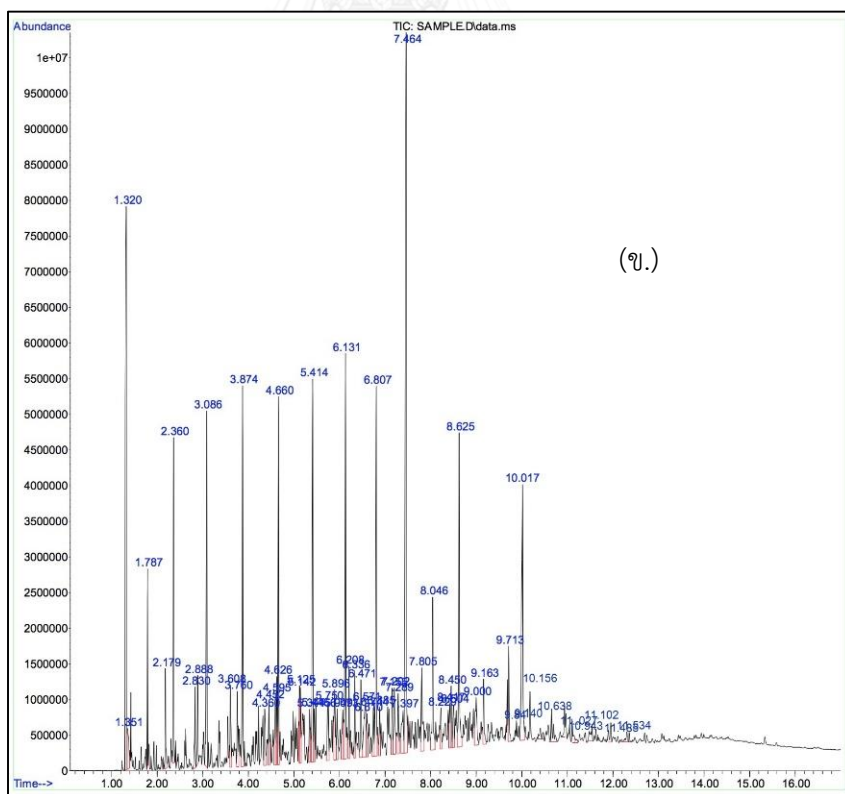
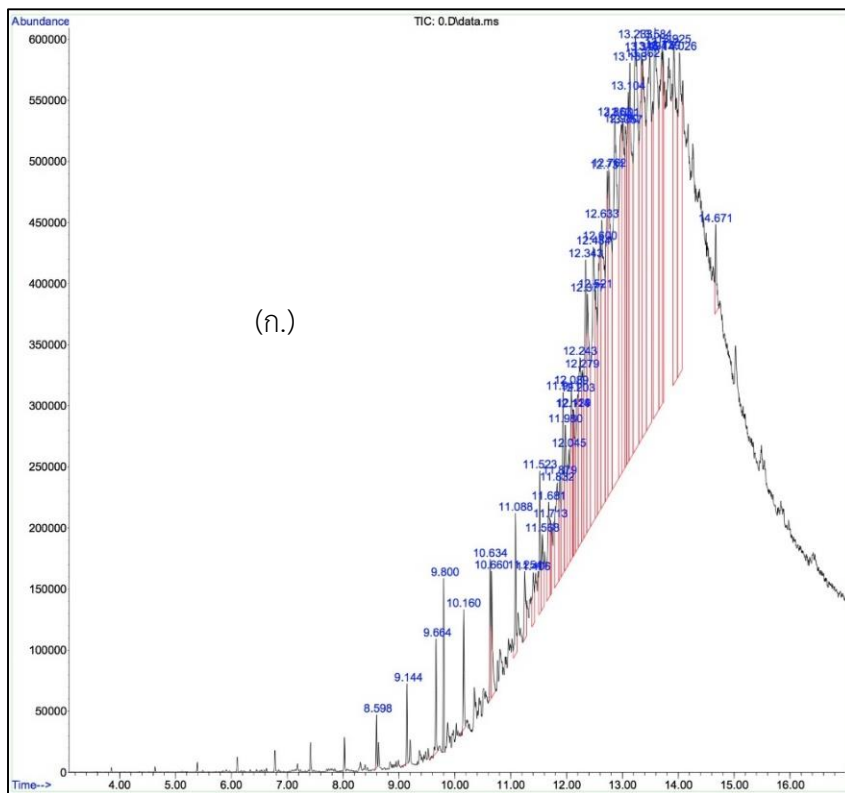
ตารางที่ 4.11 ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรมเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง

ตัวแปร	สภาวะจากโปรแกรม	ทดลองจริง
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	450	450
อัตราการไหลของสารตั้งต้น (มิลลิลิตรต่อนาที)	9	9
อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)	50	50
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยปริมาตร)	44.65	40
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	98.13	96.47
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	44	43

4.6 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

4.6.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 40 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ วิเคราะห์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.16 และแสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบตารางที่ 4.13 และ 4.14



รูปที่ 4.16 โครมาโทแกรมขององค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

เวลา (นาทีก)	สารประกอบ	จำนวนคาร์บอน (อะตอม)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
8.59	Heptadecane	17	0.15
9.14	Octadecane	18	0.22
9.66	Nonadecane	19	0.38
10.15	Eicosane	20	0.39
10.63	Heneicosane	21	0.51
11.09	Docosane	22	0.54
11.52	Tricosane	23	0.63
12.2	Tetracosane	24	1.24

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

เวลา (นาทีก)	สารประกอบ	จำนวนคาร์บอน (อะตอม)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
1.78	Heptane	7	0.99
2.35	Octane	8	1.31
3.08	Nonane	9	0.90
3.87	Decane	10	3.30
4.61	Undecane	11	4.20
5.41	Dodecane	12	3.02
9.84	Tetradecane	14	5.00
10.14	Eicosane	20	1.75
10.58	Heneicosane	21	3.90
11.12	Docosane	22	2.16

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ แต่ละองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วแสดงดังรูปที่ 4.16 (ก.) และตารางที่ 4.12 และผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 40 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ แต่ละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวแสดงดังรูปที่ 4.16 (ข.) และตารางที่ 4.13 พบว่าการกระจายองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วแตกต่างจากผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส ซึ่งองค์ประกอบคาร์บอนในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวมีปริมาณโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายสั้นมากกว่าในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจะได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟินแซนตรงเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนอยู่ในช่วงของแนฟทา (C_5-C_{12}) ไปถึงแก๊สออยล์ ($C_{15}-C_{33}$) ถือเป็นองค์ประกอบที่เหมาะสมในการที่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วผ่านกระบวนการไพโรไลซิสบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายยาวในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจะถูกแตกพันธะด้วยความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา

4.6.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ตามมาตรฐาน ASTM D3176 โดยเครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN 200 แสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

ชนิดน้ำมัน	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)			
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน (โดยผลต่าง)
น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว	6.84	14.78	0.01	0.19
ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว	6.94	15.27	0.04	0.06

องค์ประกอบธาตุ CHNO ในสูตรอย่างง่าย แสดงในตารางที่ 4.14 พบว่าในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณ

คาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วประมาณร้อยละ 6.84 โดยน้ำหนักแห้ง และประมาณร้อยละ 6.94 โดยน้ำหนักแห้งในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว มีปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 14.78 โดยน้ำหนักแห้งในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและมีร้อยละ 15.27 โดยน้ำหนักแห้งในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนักแห้งในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและมีร้อยละ 0.04 โดยน้ำหนักแห้งในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว และปริมาณออกซิเจนในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวลดน้อยลงเมื่อเทียบกับปริมาณออกซิเจนในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว จากร้อยละ 0.19 โดยน้ำหนักแห้ง เป็นร้อยละ 0.06 โดยน้ำหนักแห้ง

4.6.3 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน ค่าความหนืด และค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

ชนิดของน้ำมัน	ค่าความร้อน (cal/g)	ค่าความหนืด (mm ² /s)	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)
น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว	11582	45.6	4.85
ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว	10511.5	5.8	0.8
ดีเซลมาตรฐาน	10740.7	3.2	0.45

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 40 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ แสดงในตารางที่ 4.15 พบว่าค่าความร้อนและค่าความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วลดลงจาก 11,582 cal/g เป็น 10,511.5 เพียงเล็กน้อย และ 4.85 mg KOH/g เป็น 0.8 mg KOH/g ตามลำดับ แต่ค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวลดลงมากจาก 45.6 mm²/s เป็น 5.8 mm²/s เนื่องจากการแตกตัวของโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสูงลงมาเป็นโมเลกุลต่ำลงจึงทำให้ความหนืดลดลง แต่ก็ยังมีความหนืดมากกว่าดีเซลมาตรฐาน ดังนั้นการจะนำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวมาใช้งานจึงต้องนำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวไปกลั่นแยกสัดส่วนของเชื้อเพลิงที่มีอยู่เป็นประเภท เช่น แก๊โซลีนและดีเซลต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ทำการศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ซึ่งในงานวิจัยสนใจภาวะที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ดีเซลมากที่สุด งานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองโดยการออกแบบการทดลองเชิงประกอบแบบสองระดับประสมกลาง ตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 380-450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 3-9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50-150 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคิดเป็นร้อยละ 30-60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ นำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสนี้วิเคราะห์ในเชิงปริมาณเพื่อหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว และวิเคราะห์เชิงคุณภาพโดยการหาค่าประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น เป็นเครื่องมือที่ใช้โปรแกรมแยกจำลองจุดเดือดเพื่อวิเคราะห์หาค่าประกอบของผลิตภัณฑ์ พบว่าน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่มีโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่สามารถแตกตัวให้เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดเล็กได้ โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการไพโรไลซิส ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลของสารตั้งต้น อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และหาภาวะที่เหมาะสมที่ตอบสนองต่อการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยโปรแกรม Design-Expert พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 44.65 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ ผลจากการทดลองจริงในสภาวะที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเท่ากับ 96.47 โดยน้ำหนัก และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลเท่ากับ 43 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีมีส่วนทำให้ไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วแตกสลายกลายเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กที่เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงดีเซลที่ใช้ในปัจจุบัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆที่สามารถทำให้สมบัติของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวมีค่าใกล้เคียงผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมมากที่สุด
2. ศึกษาวิธีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการมาแปรรูปเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
3. ศึกษาการแยกองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว



รายการอ้างอิง

- 1] ประเสริฐ เทียนนิมิตร.2554. เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น.ซีเอ็ดยูเคชั่น.กรุงเทพมหานคร
- [2] กรมควบคุมมลพิษ.อันตรายจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว [ออนไลน์]. 2554. Available from: http://www.pcd.go.th/info_serv/haz_lubri.html#s3.
- [3] Kim SS, Chun, B.H., S.H. Pyrolysis kinetics of waste automobile lubricating oil. Fuel. 2000;79.
- [4] กุณฑนี ปิ่นเวหา. การแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2554.
- [5] จารุ นาถกรณกุล. ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องของน้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาดีโรไมต์: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2556.
- [6] Available from: http://www.suriyothai.ac.th/library/studentshow/2549/m6-6/no11-14-16-49/lubricant_oil1.
- [7] Available from: http://www.chaiwbi.com/0drem/web_children/2545/m5302/oil.html. [17 มิถุนายน 2554]
- [8] ปราโมทย์ ไชยเวช. ปีโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : สุนทรออฟเซต 2537.
- [9] อัจฉาญ ฉนรงค์.ชนิดของสารหล่อลื่นและสารเพิ่มคุณภาพ [ออนไลน์],Available from: <http://www.thailandindustry.com/guru/view.php?id=14153>. [24 มกราคม 2559]
- [10] น้ำมันหล่อลื่น .[ออนไลน์]. Available from: http://www.doeb.go.th/v5/show_km.php?tid=50. [26 ธันวาคม 2558]
- [11] Prasad Y.S BNN, Mathews J.F. and R.L. Eager R.L. Catalytic Conversion of Canola Oil to Fuels and Chemical Feedstocks Part I. Effect of Process Conditions on the Performance of HZSM-5 Catalyst. The Canadian Journal of Chemical Engineering.64:278-84.
- [12] C.N. S. Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice. 2 nd Ed,McGraw- Hill. 1991.
- [13] Available from: http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm. [17 มิถุนายน 2559]

- [14] Available from:
http://www.chaiwbi.com/0drem/web_children/2545/m5302/oil.html. [17 มิถุนายน 2554].
- [15] พันัส งามกนกวรรณ. ปัญหาน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว[ออนไลน์] [29 สิงหาคม 2558].
 Available from: <http://www.diw.go.th>
- [16] ธนศ ทองแก้ว. การจัดการน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว : ทำอย่างไรให้ถูกต้องและปลอดภัย.
 [ออนไลน์]. 2556.
- [17] ปานเพชร ชินินทร.2554 เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น. ซีเอ็ดดูเคชั่น กรุงเทพมหานคร.
- [18] ปราโมทย์ ไชยเวช. ปีโตรเลียมเทคโนโลยี.2548 กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์สุนทรอพเพช.
- [19] Available from: <http://library.kmitnb.ac.th/fulltext/tech41/16005.html> [24 มิถุนายน 2559].
- [20] นพิตา หิฎุชีระนันท์ และ ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย. เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Technology).2556, กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [21] บุศรินทร์ เชมชะปะบุตร, เอกสารประกอบการเรียนวิชา Chemistry of Catalytic Processes.
- [22] Harding RH, A.W. Peters, and J.R.D. Nee. New developments in FCC catalyst technology. Applied Catalysis A: General. 2001;221:389-96.
- [23] Sadeghbeigi R. FCC Catalysts. United Kingdom: Butterworth-Heinemann publications2012.
- [24] Lappas AA, S. Bezergianni, and I.A. Vasalos. Production of biofuels via co-processing in conventional refining processes. Catalysis Today. 2009;145(1-2):55-62.
- [25] วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ์. คะตะไลซิสแบบเฮทเทอโรจีเนียส หลักทฤษฎีและการประยุกต์. กรุงเทพฯ:ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย2534.
- [26] Sadeghbeigi R. Chemistry of FCC reactions. United Kingdom: Butterworth-Heinemann publications2012.
- [27] Kim SS, Chun, B.H., Kim, S.H. . Non-isothermal pyrolysis of waste automobile lubricating oil in a stirred batch reactor. Chemical Engineering Journal. 2003;93:225–31.

- [28] Fuentes MJ, Font, R., Gomez-Rico, M.F., Marti n-Gullo. Pyrolysis and combustion of waste lubricant oil from diesel cars: Decomposition and pollutants. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2007;79:215–26.
- [29] วิสา มานะสมบูรณ์พันธ์. การแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2555.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.
ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ตัวแปรและสัญลักษณ์ของตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปร	สัญลักษณ์
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	A
อัตราการไหลของสารตั้งต้น (มิลลิลิตร/นาทีก)	B
อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตร/นาทีก)	C
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์)	D

ตารางที่ ก.2 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว เป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

การทดลอง	ตัวแปร				น้ำหนักสารตั้งต้นที่หายไป (กรัม)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ (กรัม)	ผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
	A	B	C	D			
1	450	9	150	30	2215.8	1951.88	88.09
2	450	9	150	30	2215.3	1971.62	89
3	450	9	50	60	2325.8	2058.27	88.5
4	450	9	50	60	2327.5	2029.58	87.2
5	450	3	150	60	575	464.2	80.73
6	450	3	150	60	577.76	456.6	79.03
7	380	9	150	60	2315.2	893.61	38.6
8	380	9	150	60	251.2	93.7	37.3
9	380	3	150	60	515	514.15	99.83
10	380	3	150	60	537.16	531.09	98.87

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่น
ใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

การ ทดลอง	ตัวแปร				น้ำหนักสารตั้ง ต้นที่หายไป (กรัม)	น้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ เหลวที่ได้ (กรัม)	ผลได้ของ ผลิตภัณฑ์เหลว (ร้อยละโดย น้ำหนัก)
	A	B	C	D			
11	450	9	50	30	2045.8	1907.75	93.25
12	450	9	50	30	2036.6	1850.67	90.87
13	380	3	150	30	693.7	305.47	44.03
14	380	3	150	30	680.7	287.13	42.18
15	380	3	50	60	544.2	485.84	89.28
16	380	3	50	60	544.7	473.78	86.98
17	450	9	150	60	2068.5	1741.2	84.14
18	450	9	150	60	2233.8	1943.41	87
19	380	9	50	60	2298.8	969.81	42.19
20	380	9	50	60	2295.7	934.04	40.73
21	380	9	50	30	2235.7	247.48	11.07
22	380	9	50	30	2621.8	250.12	9.54
23	450	3	50	30	652.6	629.53	96.46
24	450	3	50	30	600.45	583.87	97.23
25	380	9	150	30	2263.4	655.54	28.96
26	380	9	150	30	2264.8	685.1	30.25
27	450	3	150	30	492.51	451.5	91.67
28	450	3	150	30	480.5	449.27	93.5
29	380	3	50	30	539.6	371.6	68.87
30	380	3	50	30	565.28	391.29	69.22
31	450	3	50	60	554.02	550.4	99.35

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

การทดลอง	ตัวแปร				น้ำหนักสารตั้งต้นที่หายไป (กรัม)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ (กรัม)	ผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
	A	B	C	D			
32	450	3	50	60	550.18	548.2	99.64
33	415	6	100	45	1192.5	975.23	81.78
34	415	6	100	45	1191.78	973.8	81.71
35	415	6	100	45	1178.4	1012.46	85.92

ตารางที่ ก.3 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

การทดลอง	ตัวแปร				องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	A	B	C	D	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล	กากน้ำมัน
1	450	9	150	30	6	17	33	44
2	450	9	150	30	9	20	34	37
3	450	9	50	60	7	18	35	40
4	450	9	50	60	9	15	36	40
5	450	3	150	60	11	30	40	19
6	450	3	150	60	14	27	42	17
7	380	9	150	60	10	40	48	2
8	380	9	150	60	11	37	47	5
9	380	3	150	60	13	36	42	9
10	380	3	150	60	15	37	40	8
11	450	9	50	30	6	20	37	37
12	450	9	50	30	5	18	36	41

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

การทดลอง	ตัวแปร				องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	A	B	C	D	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล	กากน้ำมัน
13	380	3	150	30	14	40	40	6
14	380	3	150	30	15	38	42	5
15	380	3	50	60	14	38	42	6
16	380	3	50	60	16	35	43	6
17	450	9	150	60	9	26	43	22
18	450	9	150	60	12	28	44	16
19	380	9	50	60	12	38	45	5
20	380	9	50	60	14	35	44	7
21	380	9	50	30	11	31	45	13
22	380	9	50	30	14	28	47	11
23	450	3	50	30	11	31	43	15
24	450	3	50	30	12	32	44	12
25	380	9	150	30	8	25	37	30
26	380	9	150	30	9	27	35	29
27	450	3	150	30	18	26	41	15
28	450	3	150	30	19	27	40	14
29	380	3	50	30	14	41	39	6
30	380	3	50	30	12	40	42	6
31	450	3	50	60	12	30	43	15
32	450	3	50	60	10	29	42	19
33	415	6	100	45	11	33	36	20

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

การทดลอง	ตัวแปร				องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	A	B	C	D	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล	กากน้ำมัน
34	415	6	100	45	15	27	34	24
35	415	6	100	45	10	28	34	28



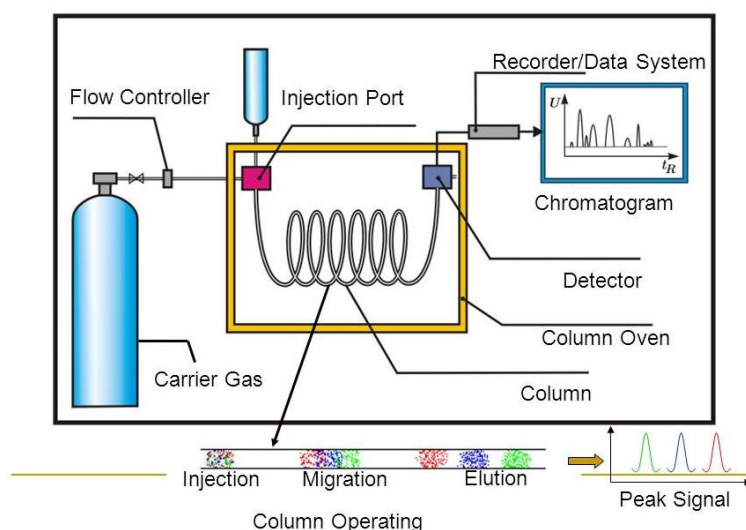
ภาคผนวก ข.

การหาค่าประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography; GC)

แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคของการแยกทางโครมาโทกราฟีที่ใช้แก๊สเฟสเคลื่อนที่ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีสามารถแยกและวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีองค์ประกอบที่มีความซับซ้อน มีความเฉพาะเจาะจง ให้ผลเที่ยงตรงและรวดเร็ว จึงนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในการศึกษา การวิจัย และอุตสาหกรรม มีเทคนิคในการวิเคราะห์ 2 วิธี คือ การใช้เฟสอยู่กับที่เป็นของแข็ง เรียก Gas-solid chromatography (GSC) และการใช้เฟสอยู่กับที่เป็นของเหลว เรียก Gas-liquid chromatography (GLC) ซึ่ง GLC เป็นเทคนิคที่นิยมมากกว่า สารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ ดังนั้นวิธีการจึงไม่ใช้เทคนิคสำหรับการวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ เพราะสารประกอบอินทรีย์ไม่สามารถกลายเป็นไอได้

ที่ Inlet สารตัวอย่างถูกทำให้กลายเป็นไอ แล้วจะถูกแก๊สตัวพาพาเข้าไปยังคอลัมน์ ซึ่งแก๊สตัวพาจะเป็นแก๊สเฉื่อย อาศัยหลักการที่สารที่มีสมบัติคล้ายคลึงกันละลายกันได้ดี (Likes dissolve likes) แก๊สโครมาโทกราฟีใช้วิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ การวิเคราะห์ทางคุณภาพสามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวอย่างได้โดยการเทียบค่ารีเทนชันไทม์ (Retention time)



รูปที่ ข.1 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยทั่วไปมีดังนี้

1. แก๊สตัวพา (Carrier gas)

แก๊สตัวพาต้องเฉื่อยต่อสารตัวอย่าง คือไม่ทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง ทำหน้าที่พาโมเลกุลของสารตัวอย่างออกจากคอลัมน์สู่ตัวตรวจวัด การเลือกตัวพาเป็นสิ่งสำคัญซึ่งจะมีผลต่อกระบวนการแยกและสมรรถนะของตัวตรวจวัดแก๊สที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจายต่ำ (Distribution coefficient) เช่น ไฮโดรเจนและฮีเลียม จะให้ผลของการแยกดีกว่าแก๊สที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และอาร์กอน ดังนั้นแก๊สไฮโดรเจนและฮีเลียม จึงเหมาะที่จะเป็นแก๊สตัวพา แก๊สที่นำมาใช้ต้องบริสุทธิ์ถึง 99.9995% เนื่องจากหากมีสารปนเปื้อน ความชื้น ออกซิเจน และแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่ปะปนมาในปริมาณน้อยๆก็อาจเกิดการทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่างหรืออาจทำให้คอลัมน์เสื่อมคุณภาพ (Deterioration) และมีผลต่อสมรรถนะของตัวตรวจวัด

2. Gas Traps และ Filters

ช่วยทำให้ระบบของแก๊สที่จะใช้ใช้งานสะอาดและบริสุทธิ์ มีลักษณะเป็น Cartridge คือ Molecular Sieve Trap ใช้ดูดความชื้น, Oxygen Trap จับแก๊สออกซิเจน และ Hydrocarbon Filter จับแก๊สไฮโดรคาร์บอนและไอของน้ำมัน

3. ตัวควบคุมอัตราการไหล (Flow Regulator) ช่วยควบคุมอัตราการไหลของแก๊สตัวพา

4. ส่วนที่ฉีดสาร (Injection System)

เมื่อตัวอย่างของเหลวเข้าสู่บริเวณ Inlet ที่มีความร้อนสูงพอที่จะทำให้ตัวอย่างกลายเป็นไอแล้วเข้าคอลัมน์ด้วยแก๊สตัวพา จะเรียกระบบของการพาว่า Sample inlet system หรือ Injection mode ในระบบการพาตัวอย่างเข้าสู่คอลัมน์โดยแก๊สตัวพาถูกควบคุมด้วย Electronic pneumatic control (EPC) ทำให้อัตราการไหลคงที่และสม่ำเสมอ

5. คอลัมน์ (Column)

คอลัมน์ถือเป็นหัวใจสำคัญของการทำงานด้วยระบบโครมาโทกราฟี เพราะการแยกองค์ประกอบในตัวอย่างจะมีความจำเพาะเจาะจงสูงและมีประสิทธิภาพดีได้ขึ้นอยู่กับคอลัมน์ ที่ใช้ในเครื่องโครมาโทกราฟี แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

5.1 Packed column ทำด้วยสเตลเลสหรือแก้ว ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 ถึง 6 มิลลิเมตร มีความยาว 1 ถึง 3 เมตร บรรจุด้วยเฟสอยู่กับที่ (Packing material) โดยเฟสอยู่กับที่มีลักษณะสม่ำเสมอ (Uniform)

5.2 Open tubular column หรือ Capillary column มีลักษณะเป็นหลอดคาปิลารีที่ทำด้วยซิลิกาหลอม (Fused silica) เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 ถึง 0.7 มิลลิเมตร ความยาว 10 ถึง 100 เมตร ขดเป็นวงกลมซ้อนๆกัน

6. ตู้อบให้ความร้อน (Oven)

อุณหภูมิของคอลัมน์เป็นสิ่งสำคัญในการทำงาน ดังนั้นคอลัมน์จึงต้องติดตั้งอยู่ในตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิ อุณหภูมิปกติของตู้อบที่ใช้จะต่ำกว่าอุณหภูมิ Injector ประมาณ 10 ถึง 20 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิของคอลัมน์มีผลต่อคาร์เท็นชันและการแยก โดยอุณหภูมิคงที่จะให้รีเทนชันไทม์คงที่ อุณหภูมิมีผลทำให้ไอของสารตัวอย่างอยู่ในเฟสของแก๊ส ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้สารตัวอย่างละลายอยู่ในเฟสอยู่กับที่ลดลง เป็นผลให้สารตัวอย่างถูกชะได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งถ้ามีสารผสมหลายตัวจะทำให้สารเหล่านั้นถูกชะออกจากคอลัมน์ในเวลาใกล้เคียงกัน จึงทำให้การแยกได้ไม่ดีแต่เมื่อใช้อุณหภูมิต่ำสารตัวอย่างจะใช้เวลาส่วนใหญ่อยู่ในเฟสอยู่กับที่ ทำให้การชะเกิดขึ้นช้า รีเทนชันไทม์มีค่ามากแต่ทำให้การแยกดีขึ้น

7. ตัวตรวจวัด (Detectors)

สารตัวอย่างที่ถูกแยกออกจากคอลัมน์จะถูกพาออกมายังดีเทคเตอร์ ซึ่งดีเทคเตอร์จะทำหน้าที่วัดขนาดสารว่ามีปริมาณมากน้อยเท่าไร ดีเทคเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไปในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีในปัจจุบัน คือ

7.1 Thermal conductivity detector (TCD) จัดเป็น Universal detector สามารถตรวจหาสารได้ทุกชนิดที่ให้การนำความร้อนแตกต่างจากแก๊สตัวพา หลักการคือ วัดการลดขนาดความร้อนจากการสูญเสียความร้อนของใยเส้นลวดในดีเทคเตอร์

7.2 Flame ionization detector (FID) ดีเทคเตอร์ชนิดนี้เป็นดีเทคเตอร์มาตรฐานที่ถูกใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ทุกชนิดสามารถเกิดไอออไนซ์ (ionization) ได้ในเปลวไฟ ดีเทคเตอร์ FID สามารถวิเคราะห์สารประกอบที่มีความเข้มข้นน้อยๆได้ดีกว่า TCD ถึง 1,000 เท่า

8. ส่วนประมวลผล และบันทึกข้อมูล (Data processing and recorder)

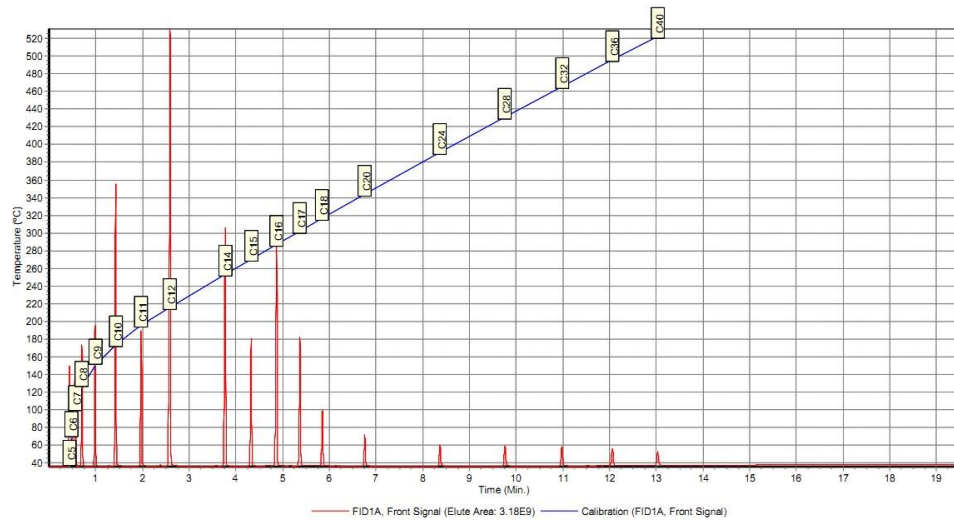
การบันทึกข้อมูลและประมวลผลทำได้โดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ที่บริษัทผู้ผลิตเครื่องมือเป็นผู้สร้างขึ้น ทำให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องและเที่ยงตรง

ข้อควรระวังในการใช้งานเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

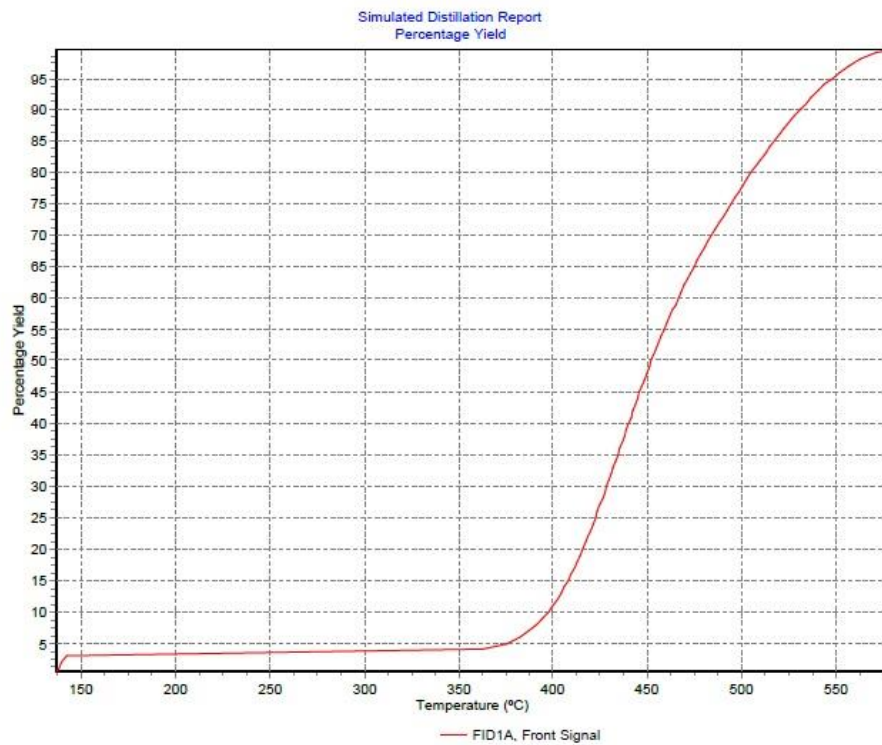
1. ตรวจสอบระบบท่อแก๊สทั้งหมดให้ถูกต้อง
2. ต้องตรวจสอบ Septum เนื่องจากหากเกิดการรั่วจะทำให้ระบบไม่พร้อมใช้งาน
3. ตั้งค่าอุณหภูมิให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ใช้
4. เลือกใช้คอลัมน์ให้เหมาะสมกับสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์

กราฟแสดงการกระจายตัวตามจุดเดือด

โครมาโทแกรมที่จะเปลี่ยนเป็นกราฟการกระจายตัวตามคาบจุดเดือด (Boiling point distribution plot) ด้วยโปรแกรมจำลองการกลั่นเทียบเท่ากับโครมาโทแกรมของสารมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM D2887 ดังแสดงในรูปที่ ข.2 และ ข.3



รูปที่ ข.2 โครมาโทแกรมจากการแยกองค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ



รูปที่ ข.3 กราฟการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

ภาคผนวก ค.

การออกแบบการทดลองเชิงประกอบสองระดับและการใช้โปรแกรม Design Expert

การออกแบบการทดลองเชิงประกอบสองระดับ

การออกแบบเชิงตัวประกอบแบบสองระดับ นิยมใช้ในการทดลองที่มีปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งต้องการศึกษาผลรวมที่มีผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่สำคัญมากที่สุดคือ กรณีปัจจัย k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วยสองระดับ แต่ระดับเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ และในสองระดับที่กล่าวถึงจะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ ก็ได้ใน 1 เปรกติที่ปริบูรณ์ สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ และจะเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่าการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k

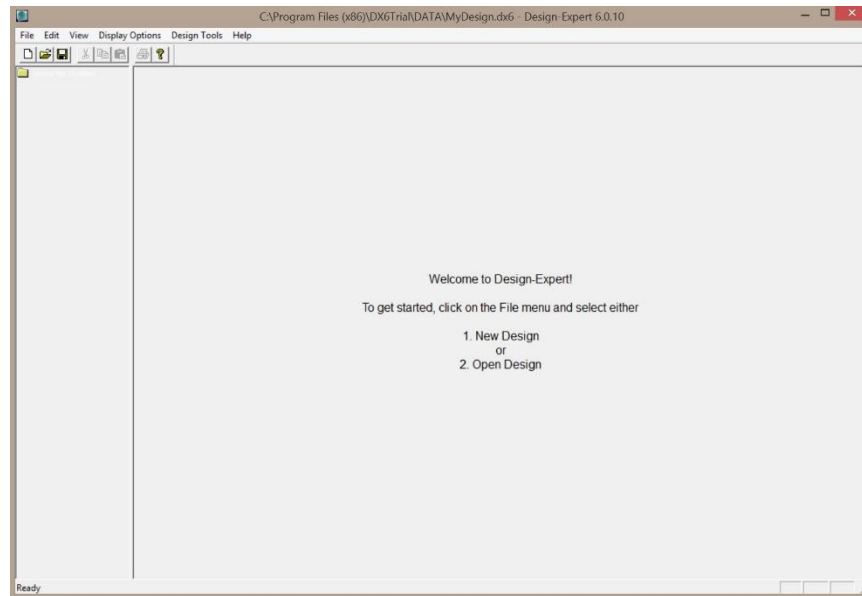
การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับมีประโยชน์ต่องานวิจัยในช่วงแรกเมื่องานวิจัยมีหลายปัจจัยที่ต้องการตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้ช่วยให้การทดลองลดจำนวนลงดังนั้นจึงไม่น่าแปลกใจที่การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับจะถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เสมือนเป็นการกรองปัจจัยที่มีอยู่จำนวนมากให้ลดน้อยลง เนื่องจากปัจจัยของการทดลองประกอบด้วย 2 ระดับผลที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกมาทำการทดลองซึ่งสมมติฐานสามารถยอมรับได้

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ คือการออกแบบที่ประกอบด้วย 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ เรียกการออกแบบชนิดนี้ว่าการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k “ต่ำ” และ “สูง” เป็นตัวกำหนดระดับปัจจัยแต่ละตัว การออกแบบสามารถแสดงผลของปัจจัยด้วยตัวอักษรลาตินตัวใหญ่ ระดับต่ำและสูงจะแทนด้วยเครื่องหมาย - และ + ตามลำดับ

การใช้โปรแกรม Design Expert

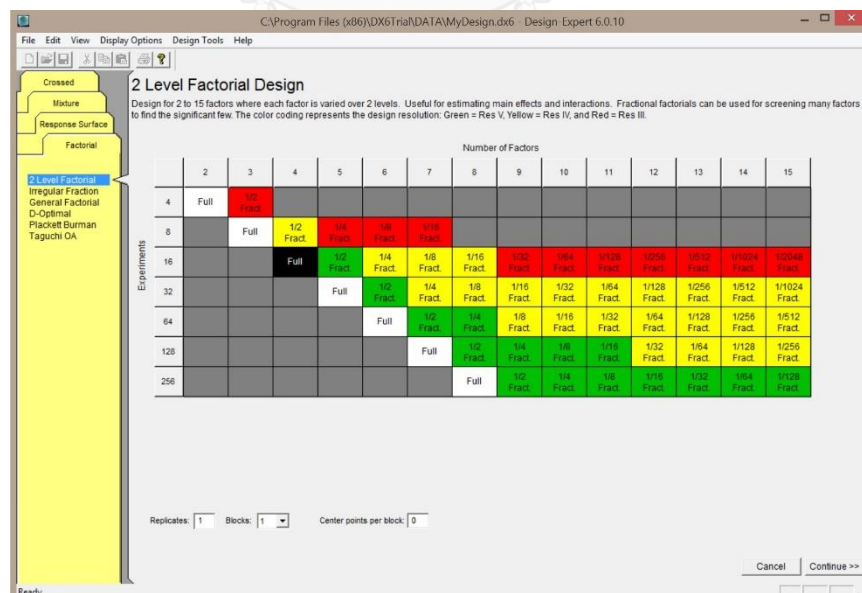
โปรแกรม Design Expert รุ่น 6.0.10 สำหรับออกแบบการทดลองโดยมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. เมื่อเข้าสู่โปรแกรม จะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 โปรแกรม Design Expert

2. เลือกแบบจำลองและกำหนดตัวแปรเพื่อออกแบบการทดลอง ดังรูปที่ ค.2 โดยคลิกไปที่ File เลือก New Design เลือกแบบจำลองตามจำนวนตัวแปรที่ต้องการศึกษา คลิกที่แบบจำลองแบบ 2^4 ซึ่งในงานวิจัยนี้มี 4 ตัวแปร คือ อุณหภูมิ อัตราการไหลของสารตั้งต้น อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเลือกเรียบร้อยแล้วคลิก Continue

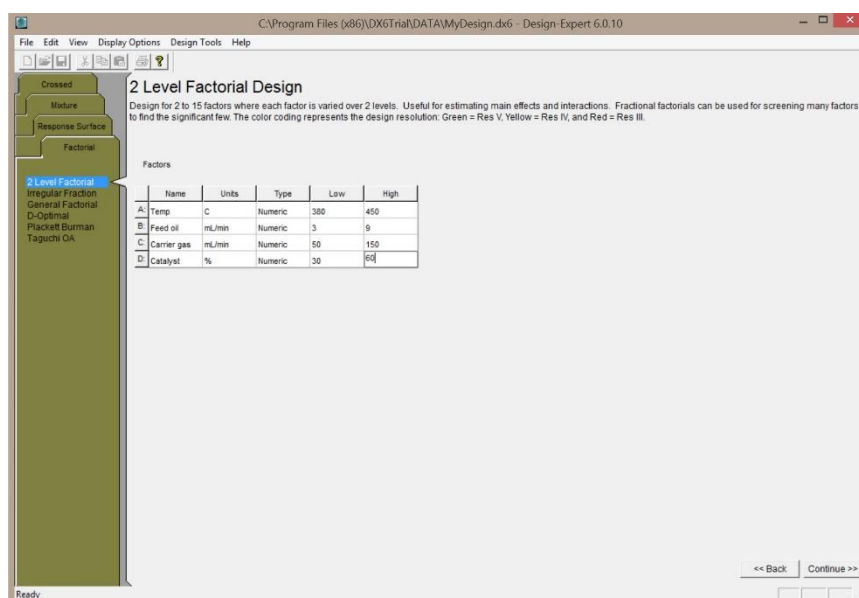


รูปที่ ค.2 ตาราง 2 Level Factorial Design

3. เมื่อเลือกแบบจำลองแล้วจะปรากฏหน้าต่างซึ่งแสดงในรูปที่ ค.3 แล้วใส่ข้อมูลของตัวแปรที่ต้องการศึกษาลงไปตามช่องที่กำหนดดังนี้

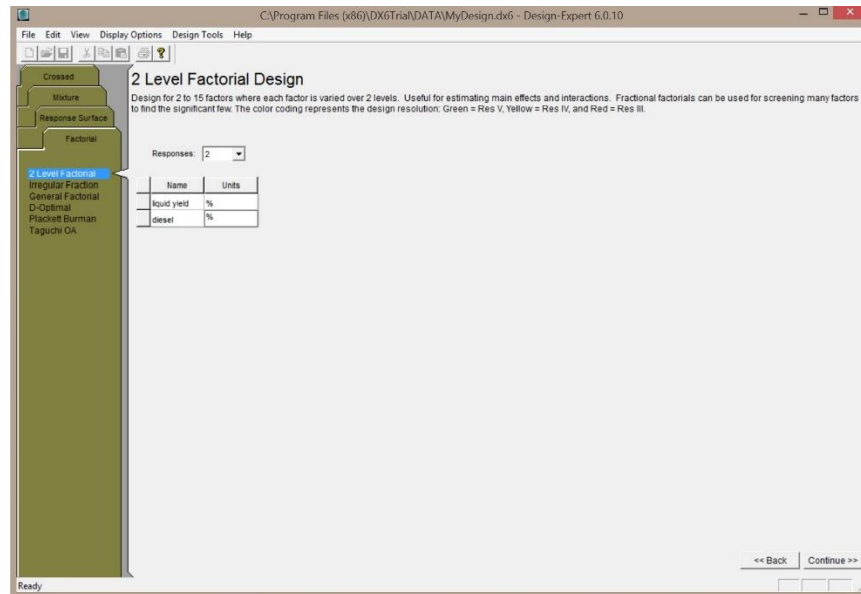
- Name: ชื่อตัวแปร
- Units: หน่วยของตัวแปร
- Low: ค่าต่ำสุดของตัวแปร
- High: ค่าสูงสุดของตัวแปร

หลังจากกรอกข้อมูลครบเรียบร้อยแล้วคลิก Continue



รูปที่ ค.3 การกำหนดตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัย

4. เลือกตัวแปรตอบสนอง (Response) แสดงในรูปที่ ค.4 กรอกชื่อพร้อมทั้งหน่วยของตัวแปรตอบสนอง แล้วกด Continue



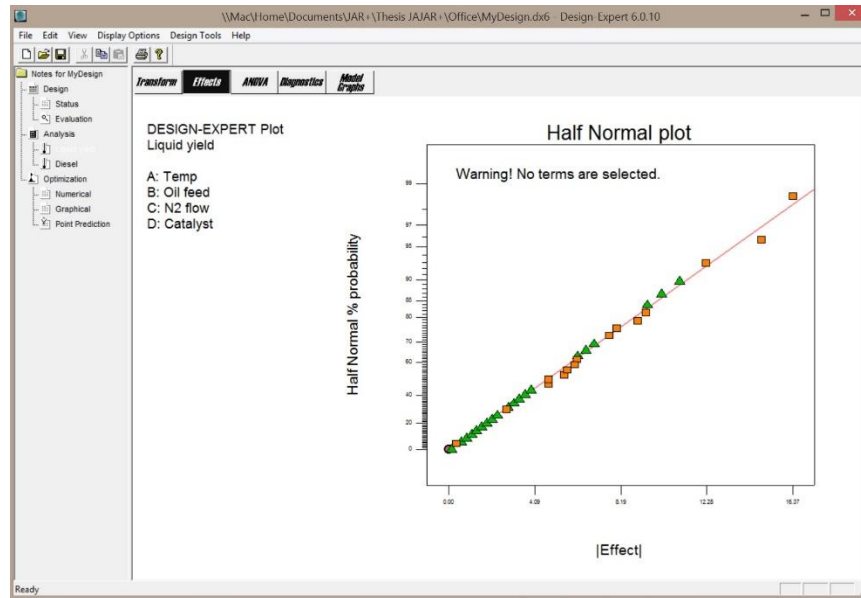
รูปที่ ค.4 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง

5. เมื่อกรอกข้อมูลครบถ้วนแล้วโปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง ดังภาพที่ ค.5 โดยจะแสดงข้อมูลของลำดับการทดลอง ค่าของตัวแปรและมีช่องว่างเพื่อให้กรอกค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง และเมื่อกรอกค่าของตัวแปรตอบสนองครบแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ผลการทดลอง

Std	Run	Block	Factor 1 A.Temp C	Factor 2 B.Oil feed ml/min	Factor 3 C.N2 flow ml/min	Factor 4 D.Catalyst %	Response 1 Liquid yield	Response 2 Diesel
35	1	Block 1	415.00	6.00	100.00	45.00		
7	2	Block 1	450.00	9.00	50.00	30.00		
1	3	Block 1	380.00	3.00	50.00	30.00		
22	4	Block 1	380.00	9.00	50.00	60.00		
16	5	Block 1	380.00	3.00	150.00	30.00		
13	6	Block 1	380.00	9.00	150.00	30.00		
37	7	Block 1	415.00	6.00	100.00	45.00		
17	8	Block 1	380.00	3.00	50.00	60.00		
3	9	Block 1	450.00	3.00	50.00	30.00		
10	10	Block 1	380.00	9.00	150.00	60.00		
9	11	Block 1	380.00	3.00	150.00	30.00		
27	12	Block 1	450.00	3.00	150.00	60.00		
23	13	Block 1	450.00	9.00	50.00	60.00		
24	14	Block 1	450.00	9.00	50.00	60.00		
31	15	Block 1	450.00	9.00	150.00	60.00		
14	16	Block 1	380.00	9.00	150.00	30.00		
15	17	Block 1	450.00	9.00	150.00	30.00		
6	18	Block 1	380.00	9.00	50.00	30.00		
34	19	Block 1	415.00	6.00	100.00	45.00		
2	20	Block 1	380.00	3.00	50.00	30.00		
36	21	Block 1	415.00	6.00	100.00	45.00		
26	22	Block 1	380.00	3.00	150.00	60.00		
32	23	Block 1	450.00	9.00	150.00	60.00		
20	24	Block 1	450.00	3.00	50.00	60.00		
8	25	Block 1	450.00	9.00	50.00	30.00		
28	26	Block 1	450.00	3.00	150.00	60.00		
21	27	Block 1	380.00	9.00	50.00	60.00		
29	28	Block 1	380.00	9.00	150.00	60.00		
25	29	Block 1	380.00	3.00	150.00	60.00		

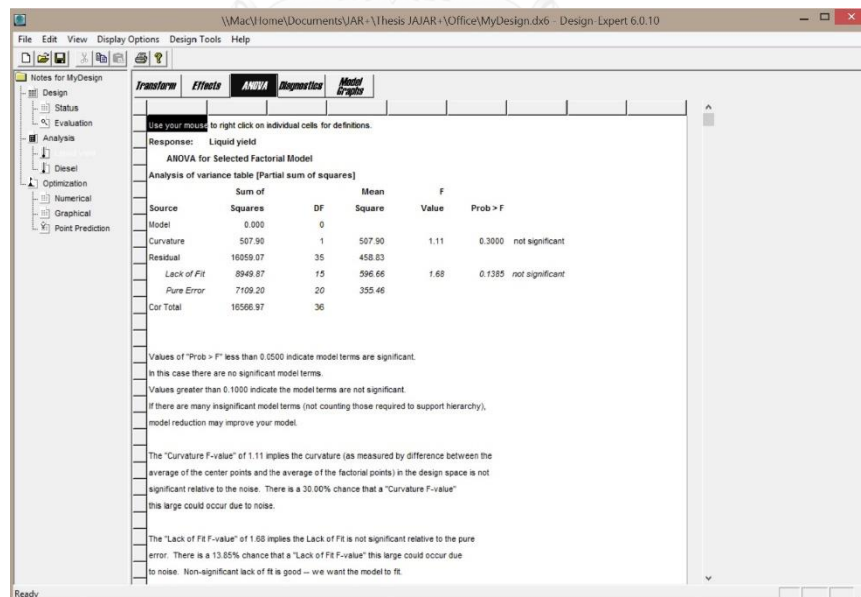
รูปที่ ค.5 จำนวนการทดลองทั้งหมดและค่าตัวแปรที่ต้องการศึกษา

6. วิเคราะห์ผลตัวแปรตอบสนองโดย ที่แถบเครื่องมือด้านข้างในส่วนของ Analysis คลิกเลือกตัวแปรตอบสนอง Liquid yield หรือ Diesel จากนั้นเลือก Effects ที่แถบด้านบน แสดงดังรูปที่ ค.6



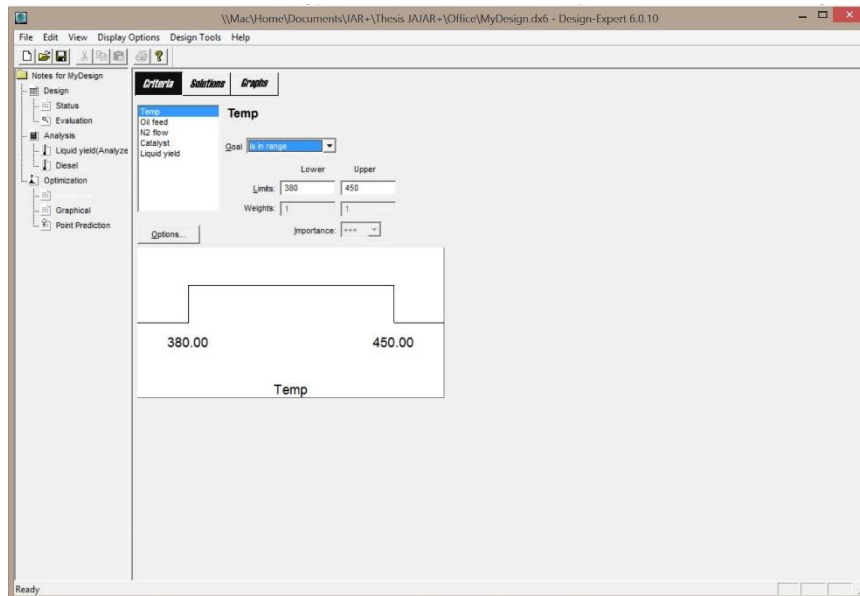
รูปที่ ค.6 แสดงผล Half Normal plot

เลือก ANOVA จะแสดงผลของความแปรปรวน ดังรูปที่ ค.7 อ่านค่าและวิเคราะห์ผลจากตาราง



รูปที่ ค.7 ผล ANOVA ของการวิเคราะห์

7. เมื่อวิเคราะห์ผลครบทุกตัวแปรตอบสนองแล้ว จากนั้นจะหาภาวะที่เหมาะสม โดยที่แถบด้านข้างของหน้าต่างเลือก Numerical ดังรูปที่ ค.8 กำหนดค่าตัวแปรตอบสนองที่ต้องการ แล้วคลิก Solution ที่แถบด้านบนหน้าต่าง จะแสดงผลการคำนวณเพื่อหาภาวะที่เหมาะสม ดังรูปที่ ค.9



รูปที่ ค.8 กำหนดตัวแปรตอบสนองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสม

Number	Temp	Oil feed	N2 flow	Catalyst	Desirability
1	406.55	3.37	144.31	26.57	1.000
2	427.66	7.78	83.51	41.96	1.000
3	426.35	6.17	90.16	46.13	1.000
4	439.49	4.77	118.67	36.32	1.000
5	407.62	6.10	131.01	42.65	1.000
6	394.03	4.43	136.39	51.02	1.000
7	432.86	4.56	65.71	44.94	1.000
8	385.31	8.56	146.17	47.15	1.000
9	426.92	8.24	91.50	57.02	1.000
10	444.48	5.91	74.02	34.66	1.000

รูปที่ ค.9 ผลจากการคำนวณภาวะที่เหมาะสม

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพรชนก แก้วเทวี เกิดเมื่อวันที่ 27 พฤศจิกายน 2532 ที่จังหวัดสระบุรี สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนแก่งคอย สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอน ปลายจากโรงเรียนอัสสัมชัญคอนแวนต์ ลำนารายณ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตร บัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในปีการศึกษา 2554 เข้าศึกษาต่อในระดับวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 และสำเร็จการศึกษาในปี การศึกษา 2559

