

ไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี
ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

นางสาวอรุณี เอกสกุลบัณฑิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

PYROLYSIS OF USED LUBRICATING OIL TO LIQUID FUELS ON FCC CATALYST
IN CONTINUOUS REACTOR

Miss Ornthicha Eaksakulbandit

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
โดย	นางสาวอรชชา เอกสกุลบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุกษาทร)

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

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.วิษชากร จารุศิริ)

อรรชิชา เอกสกุลบัณฑิต : ไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง. (PYROLYSIS OF USED LUBRICATING OIL TO LIQUID FUELS ON FCC CATALYST IN CONTINUOUS REACTOR) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์, 108 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 1250 มิลลิลิตร เพื่อศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ 380-420 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2-4 กรัมต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก ที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน และหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบที่เหมาะสม ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้นำไปวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Simulated distillation gas chromatograph) พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี คือ ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 4.09 โดยน้ำหนัก ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 78.86 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์แก๊สร้อยละ 12.17 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณเนฟทาร้อยละ 29.73 โดยน้ำหนัก และปริมาณดีเซลร้อยละ 21.10 โดยน้ำหนัก

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

537 23800 23 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : PYROLYSIS / USED LUBRICATING OIL / FCC CATALYST

ORNTHICHA EAKSAKULBANDIT : PYROLYSIS OF USED LUBRICATING
OIL TO LIQUID FUELS ON FCC CATALYST IN CONTINUOUS REACTOR.

ADVISOR : ASSOC. PROF. THARAPONG VITIDSANT , Ph.D., 108 pp.

This research aims to study pyrolysis of used lubricating oil to liquid fuels over fluid catalytic cracking catalyst in 1250 ml. continuous reactor to define the factors such as temperature of 380-420 °C substance feed rate of 2-4 g/min and weight of catalyst of 1-5% wt which affected to % yield of liquid oil products and % yield of product distribution. While liquid oil product were analyzed by simulated gas chromatograph. The results shown that the temperature of 420 °C feed rate of 2 g/min and FCC catalyst of 4.09 % wt were optimum condition gave the highest liquid oil products of 12.17 % wt while the product distribution at optimum condition were analyzed naphtha of 29.73 % wt and diesel of 21.10 % wt respectively.

Department : Chemical Technology..... Student's Signature

Field of Study : Chemical Technology... Advisor's Signature

Academic Year : 2012.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ฐราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา คอยดูแลและคอยให้คำแนะนำที่มีประโยชน์จนงานวิจัยสำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี และคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุกษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และ อาจารย์ ดร.วิซชากร จารุศิริ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์และที่กรุณามาสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ โครงการปฏิบัติการไทยเข้มแข็ง สำนักบริหารโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (National Research University : NRU) และศูนย์ความเป็นเลิศปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูงที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบุคลากรและเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้ความดูแลและคอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกเป็นอย่างดีในการใช้ห้องปฏิบัติการ รวมถึงอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ในห้อง CT330 และในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจอยู่เสมอ

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจ คอยมอบความรักความเป็นห่วงเป็นใย ให้คำปรึกษาในทุกๆด้าน และสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ปีโตรเลียม.....	3
2.2 น้ำมันหล่อลื่น.....	5
2.2.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน.....	5
2.2.2 สารเพิ่มคุณภาพ.....	7
2.3 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น.....	9
2.4 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น.....	12
2.5 การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น.....	14
2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	15
2.6.1 ความหมายของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	15
2.6.2 ชนิดของการเร่งปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยา.....	15
2.6.3 การเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์.....	16
2.7 ซีโอไลต์.....	21
2.7.1 โครงสร้างของซีโอไลต์.....	22
2.7.2 การทำงานของซีโอไลต์.....	22

บทที่	หน้า
2.7.3 ลักษณะที่เหมาะสมกับการใช้ไซโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	23
2.8 การวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	26
2.8.1 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน โดยวิธีบีอีที(BET).....	26
2.8.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray diffraction :XRD).....	27
2.8.3 เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF).....	28
2.9 ปฏิริยาการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอน.....	29
2.9.1 กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน (Thermal cracking).....	29
2.9.2 กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking).....	30
2.9.3 กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจน ร่วม (Hydrocracking)	32
2.10 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	37
3.2 สารตัวอย่างและสารเคมี.....	42
3.3 การดำเนินการวิจัย.....	42
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	45
3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบและสารตั้งต้น.....	45
3.4.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	45
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	48
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น.....	48
4.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว.....	48
4.1.2 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	49
4.1.3 การกำหนดภาวะที่ใช้ในไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว.....	53
4.2 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จาก ไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี	54

บทที่	ณ หน้า
4.2.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของ ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็น เชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี.....	54
4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของ ผลิตภัณฑ์แนฟทาที่ได้จากไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็น เชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี.....	59
4.2.3 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของ ผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็น เชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี.....	64
4.3 อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก ไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี	69
4.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิในการทดลองที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็น ผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	69
4.3.2 อิทธิพลของอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	72
4.3.3 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็น ผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	75
4.4 จำนวนหาภาวะเหมาะสมจากปฏิกิริยาการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว เป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี โดยโปรแกรม Design-Expert 7.0.....	78
4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการทดลอง.....	80
4.6 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน.....	82
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	84
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	85
รายการอ้างอิง.....	86
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง.....	89
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ.....	94

	ญ
	หน้า
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตาม จุดเดือด (boiling distribution).....	103
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย GC-MS.....	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	108

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบตามน้ำหนักของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในปิโตรเลียม	3
2.2	ตัวอย่างของสารว่องไวและปฏิกิริยาที่เร่ง	17
2.3	ตัวอย่างของตัวรองรับและโปรโมเตอร์.....	18
3.1	ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี.....	43
3.2	จำนวนการทดลองจากการออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับ.....	44
4.1	องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว.....	48
4.2	สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว.....	49
4.3	องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	50
4.4	พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วก่อนและหลังการเผา.....	52
4.5	ความแรงของตำแหน่งกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผา.....	53
4.6	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ภาวะต่าง ๆ จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2 ³ factorial design).....	55
4.7	ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี.....	57
4.8	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทาที่ภาวะต่าง ๆ จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2 ³ factorial design).....	60
4.9	ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทาที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี.....	62
4.10	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ภาวะต่าง ๆ จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2 ³ factorial design).....	65
4.11	ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี.....	67

ตารางที่	หน้า
4.12 ขอบเขตของการหาภาวะเหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert 7.0.....	78
4.13 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert 7.0.....	79
4.14 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert 7.0 เปรียบเทียบค่าที่ได้จาก การทดลองจริง.....	79
4.15 องค์ประกอบต่าง ๆ ที่พบในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่น ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	81
4.16 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน.....	83

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	สูตรโครงสร้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟิน.....	4
2.2	สูตรโครงสร้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแนฟทีน.....	4
2.3	สูตรโครงสร้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอโรมาติก.....	4
2.4	ส่วนประกอบของน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป.....	5
2.5	กระบวนการกลั่นน้ำมันแร่.....	6
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นบางชนิด.....	10
2.7	ผลของความดันต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40.....	10
2.8	โครงสร้างพื้นฐานของซีโอไลต์.....	22
2.9	พื้นผิวของซีโอไลต์.....	22
2.10	การทำงานของซีโอไลต์.....	22
2.11	การคัดขนาดของสารตั้งต้นในการเข้าทำปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบอัลเคน.....	24
2.12	การคัดสรรรูปร่างของสารมัธยันต์ของการเกิดปฏิกิริยา disproportionation ของ m-xylene.....	25
2.13	การคัดสรรรูปร่างของสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาอัลคิเลชันของเมทานอลไปเป็นโทลูอิน	26
2.14	กระบวนการทางเคมีของเชื้อเพลิง.....	32
3.1	เตาเผาอุณหภูมิสูง.....	37
3.2	ชุดกรองสุญญากาศ.....	38
3.3	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (simulated distillation gas chromatography: Varian CP-3800).....	39
3.4	เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (BET surface area).....	39
3.5	เครื่อง X-Ray fluorescence spectrometry (XRF).....	40
3.6	เครื่อง X-ray diffractometer (XRD).....	40
3.7	เครื่อง gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS).....	41
3.8	เครื่อง Chemisorption Analyzer รุ่น Micromeritics AutoChem II 2920.....	42
3.9	ชุดทดลอง.....	46
4.1	XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วก่อนการเผา.....	51

ภาพที่	หน้า
4.2 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส.....	51
4.3 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ultrastable Y, Dehydrated Dealuminated.....	51
4.4 half normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี.....	56
4.5 normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี.....	58
4.6 ค่าส่วนตกค้างและลำดับการทดลองของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี.....	59
4.7 half normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทาที่ได้จาก ไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี.....	61
4.8 normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เนฟทาที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี.....	63
4.9 ค่าส่วนตกค้างและลำดับการทดลองของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เนฟทาที่ได้จาก ไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี.....	64
4.10 half normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จาก ไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี.....	66
4.11 normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี.....	68
4.12 ค่าส่วนตกค้างและลำดับการทดลองของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จาก ไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี.....	69
4.13 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ 380 400 และ 420 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 4 กรัมต่อนาที บน ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....	70
4.14 ร้อยละผลได้ของการกระจายตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ ในผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 380 400 และ 420 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 4 กรัมต่อนาที บน ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....	71

ภาพที่	หน้า
4.15 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการใช้ ของสารตั้งต้นที่ 2 3 และ 4 กรัมต่อนาที่ ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส บนตัวเร่งปฏิกิริยา เอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....	72
4.16 ร้อยละผลได้ของการกระจายตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ ในผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อัตราการใช้ ไฮโดรเจนของสารตั้งต้นที่ 2 3 และ 4 กรัมต่อนาที่ ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส บนตัวเร่ง ปฏิกิริยาเอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....	74
4.17 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส และที่อัตราการใช้ ของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที่.....	75
4.18 ร้อยละผลได้ของการกระจายตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ ในผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดย ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส และ ที่อัตราการใช้ไฮโดรเจนของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที่.....	77
4.19 Interpreting spectra ที่ได้จากเครื่อง GC-MS.....	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย [1,8]

การขยายตัวทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531 เป็นต้นมา ทำให้เกิดความ ต้องการใช้น้ำมันหล่อลื่นสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเป็นวัสดุพิเศษที่ ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลในโรงงาน การขับเคลื่อนเครื่องยนต์ของยานพาหนะต่าง ๆ เช่น รถยนต์ รถไฟ เรือ และเครื่องบิน เป็นต้น เมื่อน้ำมันหล่อลื่นถูกใช้งานคุณสมบัติของสารประกอบที่ มีอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นจะเปลี่ยนไป เช่น โลหะหนักที่เป็นพิษและสารพิษที่เกิดการสะสมขึ้นใน ภายหลังการใช้งานอย่างหนัก อาทิ ตะกั่ว นิกเกิล สังกะสี โทลูอิน เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้ อาจก่อ ปัญหาร้ายแรงสำหรับการใช้งานอื่น ๆ ซึ่งน้ำมันเหล่านี้บางส่วนถูกนำไปบำบัดหรือรีไซเคิล แต่มี บางส่วนถูกปล่อยลงสู่ธรรมชาติ โดยจะไปสะสมเป็นตะกอนตามแหล่งน้ำต่าง ๆ ก่อให้เกิดมลภาวะ เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีความพยายามค้นคว้าและวิจัยนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วซึ่งเป็นน้ำมันชนิด หนักมาแปรสภาพให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีคุณค่าและนำกลับมาใช้ได้ อีก [1] โดยกระบวนการ ไพโรไลซิส คือกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ความร้อนในภาวะที่ปราศจาก ออกซิเจนหรือมีออกซิเจนในปริมาณที่น้อยมาก โดยเกิดการแตกของพันธะ โมเลกุลในองค์ประกอบ จากสายโซ่พันธะเคมียาว ๆ กลายเป็นสายโซ่สั้น ๆ ส่วนที่เป็นองค์ประกอบคาร์บอนระเหยได้จะ กลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิง บางส่วนที่ถูกควบแน่นจะกลายเป็นน้ำมันเหลว [8] ไพโรไลซิสเป็นวิธีที่มี ประโยชน์มากกว่าวิธีการอื่น ๆ และเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงในมุมมองที่เกี่ยวกับพลังงานคือ ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส เช่น แก๊ส น้ำมันเหลว และของแข็งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิง ได้ [8] งานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการไพโรไลซิสที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการแปรรูบน้ำมันหล่อลื่น ใช้แล้วด้วยกระบวนการไพโรไลซิสมักเป็นการแตกตัวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ที่มี ความยาวให้เป็น โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง ซึ่งหากมีการควบคุมกระบวนการที่ดี เช่น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในภาวะที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิง อาทิ แนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์

จากการศึกษางานวิจัยส่วนใหญ่การทำไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจะทำในเครื่อง ปฏิกรณ์แบบแบตช์ ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ต้องการพวกเชื้อเพลิงเหลวจะผสมอยู่กับน้ำมันหนักใน เครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเป็นการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ซึ่งสามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการออกจากน้ำมันหนักได้ โดย

เชื้อเพลิงเหลวจะออกมาในท่อขาออก ส่วนน้ำมันหนักจะอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์และยังเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวอย่างต่อเนื่องต่อไป นอกจากนี้ ในงานวิจัยได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวปานกลางในการเกิดปฏิกิริยา สามารถทำการแตกสายโซ่ของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้กลายเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลงและมีสมบัติใกล้เคียงผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปิโตรเลียม โดยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีมีสมบัติในการเลือกจำเพาะที่ดีจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นแนฟทา ขอบเขตงานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปร อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบที่เป็นแนฟทากับดีเซล สามารถใช้เป็นผลิตภัณฑ์ทดแทนการใช้น้ำมันปิโตรเลียมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
- 1.2.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมาจากอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบที่เป็นแนฟทากับดีเซล

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวที่เป็นแนฟทาและดีเซลจากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องและเป็นข้อมูลในการผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปิโตรเลียม [2,3]

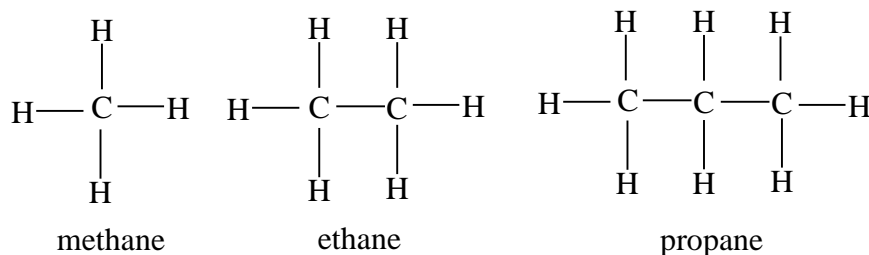
ปิโตรเลียม หรือเรียกอีกอย่างว่า “น้ำมันดิบ” เป็นของเหลวไวไฟที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วยสารผสมที่สลับซับซ้อนระหว่างสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่าง ๆ และสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นของเหลวอื่น ๆ ที่พบในชั้นธรณีวิทยาใต้ผิวโลก โดยปิโตรเลียมมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด คือคาร์บอนและไฮโดรเจน และอาจมีโลหะชนิดอื่นปนอยู่ด้วย เช่น กำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจน ซึ่งปิโตรเลียมเป็นได้ทั้ง 3 สถานะ คือของแข็ง ของเหลว และแก๊ส องค์ประกอบของปิโตรเลียม รวมถึงความดันและความร้อนของสถานะในการเกิดและการกักเก็บปิโตรเลียม โดยแบ่งสถานะได้เป็นสองชนิดหลัก คือน้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติ

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบตามน้ำหนักของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในปิโตรเลียม [2]

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
คาร์บอน	83-87
ไฮโดรเจน	10-14
ไนโตรเจน	0.1-2
ออกซิเจน	0.05-1.5
กำมะถัน	0.05-6
โลหะ	< 0.1

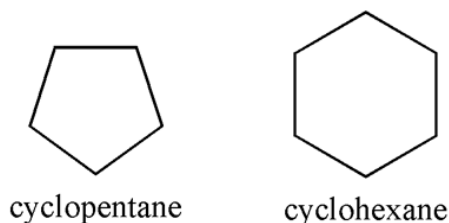
จากที่กล่าวมาข้างต้น น้ำมันดิบมีไฮโดรคาร์บอนที่เป็นสารประกอบระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนอยู่เป็นส่วนใหญ่ โดยมีโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน 3 ชนิดที่มีอยู่ในน้ำมันดิบ คือ

1. พาราฟิน (paraffins) เป็นอนุกรมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่เชื่อมต่อกันเป็นเส้น และมีสูตรทางเคมีทั่วไปคือ C_nH_{2n+2} เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$ เช่น มีเทน (methane, CH_4), อีเทน (ethane, C_2H_6) และ โพรเพน (propane, C_3H_8) เป็นต้น แสดงในภาพที่ 2.1



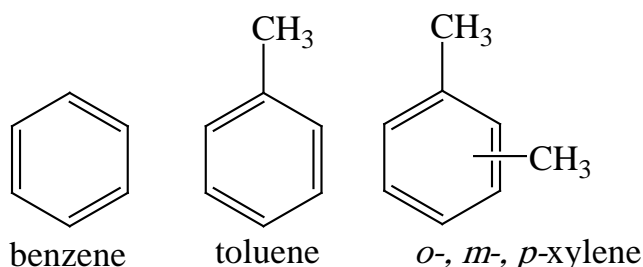
ภาพที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟิน [3]

2. แนฟทีน (naphthenes) เป็นอนุกรมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่เชื่อมต่อกันเป็นวง และมีสูตรทางเคมีทั่วไปคือ C_nH_{2n} เช่น ไซโคลเพนเทน (cyclopentanes, C_5H_{10}) และ ไซโคลเฮกเซน (cyclohexanes, C_6H_{12}) เป็นต้น แสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแนฟทีน [3]

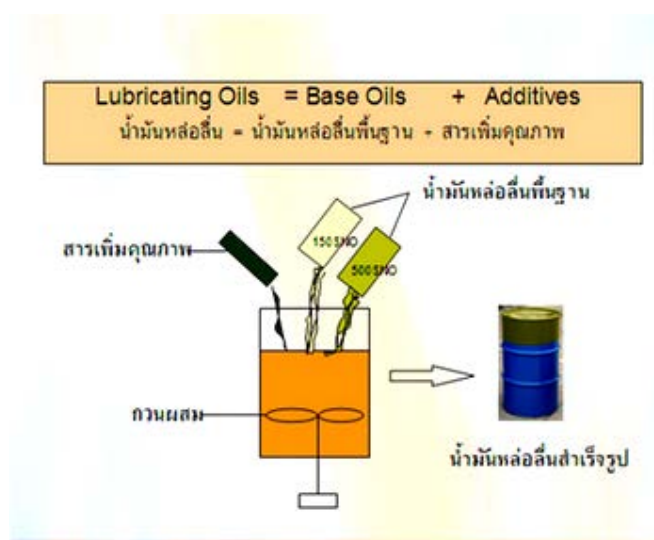
3. แอโรมาติก (aromatic) มีโครงสร้างโมเลกุลที่เชื่อมต่อกันเป็นวงไม่อิ่มตัว และมีสูตรทางเคมีทั่วไปคือ C_nH_{2n-6} เช่น เบนซีน (benzene, C_6H_6), โทลูอีน (toluene, C_7H_8) และ ไซลีน (xylene, C_8H_{10}) เป็นต้น แสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอโรมาติก [3]

2.2 น้ำมันหล่อลื่น (lubricating oil) [4]

น้ำมันหล่อลื่นเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นของเหลว มีหน้าที่หล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ และเครื่องจักรที่มีลักษณะปิด ส่วนประกอบที่สำคัญของน้ำมันหล่อลื่นประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (base oils) และสารเพิ่มคุณภาพ (additives) แสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ส่วนประกอบของน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป [4]

2.2.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (base oils)

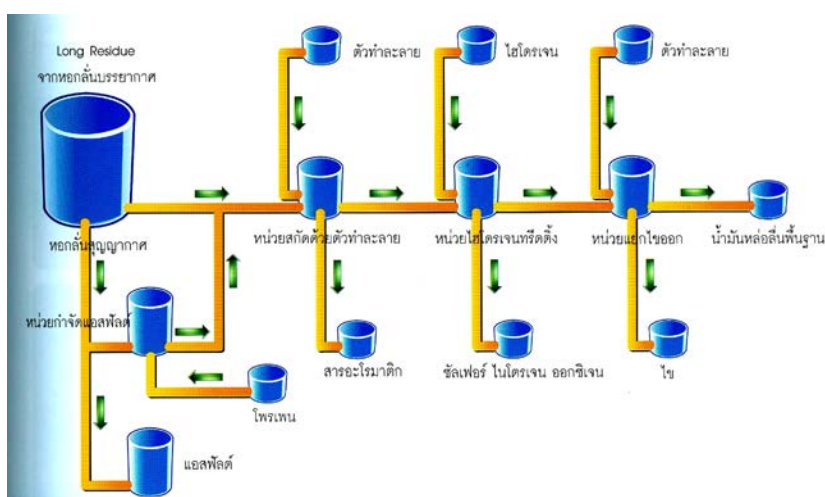
น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ใช้กันมีอยู่ 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ น้ำมันแร่ และน้ำมันสังเคราะห์ แต่ส่วนใหญ่จะใช้น้ำมันแร่เพราะมีคุณภาพดีเพียงพอและราคาถูก ส่วนน้ำมันชนิดอื่นจะใช้งานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ ๆ บางอย่างเท่านั้น

2.2.1.1 น้ำมันพืชหรือสัตว์ (vegetable / animal oil)

ในสมัยก่อนมีการใช้งานหลายอย่าง แต่เนื่องจากน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์มักมีความคงตัวต่ำ และเสื่อมสภาพได้ง่ายขณะใช้งานจึงต้องผ่านขบวนการปรับปรุงคุณภาพ ทำให้มีราคาสูงมากขึ้นจึงไม่เป็นที่นิยม น้ำมันพืชที่ใช้ ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง น้ำมันปาล์ม น้ำมันสัตว์ที่เคยใช้กัน ได้แก่ น้ำมันหมู น้ำมันปลา ซึ่งปัจจุบันใช้เฉพาะในงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางประการ เช่น ใช้เป็นตัวเพิ่มคุณภาพให้กับน้ำมันจากปิโตรเลียม เช่น เพิ่มความข้น เพิ่มความสามารถของน้ำมันในการรวมตัวกับน้ำ เป็นต้น

2.2.1.2 น้ำมันแร่ (mineral oils)

น้ำมันแร่เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ใช้กันมากที่สุดและเป็นน้ำมันคุณภาพดีที่มีราคาถูก น้ำมันแร่ได้จากการเอาส่วนที่อยู่ก้นหอกลั่นบรรยากาศ (atmospheric tower) มาผ่านกระบวนการกลั่นในหอกลั่นสุญญากาศ (vacuum tower) เพื่อแยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดไฮ และชนิดชั้นออกมา ส่วนที่เหลือเป็นกากจะนำไปผลิตยางมะตอย ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น น้ำมันแร่ที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้สุญญากาศนี้ ยังมีคุณภาพที่ไม่ดีพอที่จะนำมาผลิตน้ำมันหล่อลื่น จึงต้องผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อเอาสารที่ไม่ต้องการออกทำให้มีความคงตัวทางเคมี และทางความร้อนดีขึ้น ตัวอย่างของกระบวนการเหล่านี้ได้แก่ กระบวนการแยกยางมะตอยโดยใช้สารละลายโพรเพน (propane deasphalting) กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายเพื่อกำจัดสารที่ไม่อิ่มตัวพวกสารประกอบพวกเอโรมาติก (aromatic compounds) กำมะถัน และสารประกอบไนโตรเจน เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นได้แก่ การเพิ่มดัชนีความหนืด (viscosity index) และการเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและการรวมตัวกับออกซิเจน กระบวนการลำดับถัดไป คือการเติมไฮโดรเจน (hydrofining) เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดสีและสารที่ไม่เสถียรทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีสีจางลง และช่วยเพิ่มคุณสมบัติบางประการ ส่วนกระบวนการสุดท้ายก็คือ กระบวนการแยกเอาไขออก (dewaxing) เพื่อลดจุดไหลเทให้ต่ำลงให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นดังกล่าวแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 กระบวนการกลั่นน้ำมันแร่ [4]

2.2.1.3 น้ำมันพื้นฐานสังเคราะห์ (synthetic base oils)

เป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้น โดยกระบวนการทางเคมี น้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้กันมีอยู่หลายชนิด แต่ราคาค่อนข้างสูง มักจะใช้งานกับที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ เช่น ใช้งานที่อุณหภูมิสูงมากหรือที่อุณหภูมิต่ำมาก เช่นในประเทศเมืองหนาว เนื่องจากน้ำมันสังเคราะห์จะมีดัชนีความหนืดสูงมาก จึงมีความคงตัวในอุณหภูมิสูง ๆ ได้ดี ไม่เสื่อมสลายง่าย และมีการระเหยต่ำมาก เป็นต้น ปัจจุบันเริ่มมีความนิยมในการใช้น้ำมันเครื่องที่ผลิตจากน้ำมันพื้นฐานสังเคราะห์มากขึ้นแต่ก็มีราคาสูงกว่าน้ำมันเครื่องที่ผลิตจากน้ำมันพื้นฐานปิโตรเลียมอยู่มาก

2.2.2 สารเพิ่มคุณภาพ (additives)

คือวัสดุหรือสารเคมีที่เติมลงในสารหล่อลื่น เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ และเพิ่มสมรรถนะในการหล่อลื่นหรือระดับคุณภาพให้สูงขึ้น สารเพิ่มคุณภาพที่ใช้กันในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิด โดยสารเพิ่มคุณภาพแต่ละชนิดจะมีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเฉพาะอย่าง แบ่งตามผลที่มีต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานออกได้เป็น 3 ชนิด คือ 1) สารเพิ่มคุณภาพที่ให้คุณสมบัติใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน 2) สารเพิ่มคุณภาพที่ปรับปรุงคุณสมบัติที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้น 3) สารเพิ่มคุณภาพที่ทำหน้าที่ในการลดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ต้องการซึ่งเกิดในช่วงการทำงานลง สำหรับสารเพิ่มสารคุณภาพที่นิยมใช้งานโดยทั่วไป อาทิ

1. **สารลดจุดไหลเท (pour point depressants)** เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยยับยั้งการเกิดผลึกไข ซึ่งสารนี้จะช่วยให้จุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นต่ำลง จึงใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ๆ ได้ โดยสารที่ใช้ลดจุดไหลเทจะเป็นพวกโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีสองชนิด คือ อัลคิลแอโรมาติกโพลีเมอร์ (alkylaromatic polymers) ทำหน้าที่ในการดักกลืนผลึกของไขที่เกิดขึ้นเพื่อป้องกันไม่ให้ผลึกเติบโตและยึดติดกัน ชนิดที่สอง คือ โพลีเมทาคริเลต (polymethacrylates) ทำหน้าที่ดักผลึกพร้อมกับไขเพื่อป้องกันไม่ให้ผลึกเติบโต สำหรับอุณหภูมิของจุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นเมื่อเติมสารลดจุดไหลเท โดยจะทำให้อุณหภูมิลดลง 11 ถึง 17 องศาเซลเซียส

2. **สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (viscosity index improvers)** เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยไม่ให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงมาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยสารที่ใช้เพิ่มค่าดัชนีความหนืดจะเป็นพวกโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีโครงสร้างเป็นลูกโซ่ยาว (long chain) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเพิ่มความหนืดสัมพัทธ์ของน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูงมากกว่าการเพิ่มความหนืดสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากโพลีเมอร์ดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อ

อุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิสูงขึ้นโมเลกุลจะยึดออกและเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุล ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ได้แก่ เมทาคริเลตโพลิเมอร์ (methacrylate polymers) , โอลิฟินโพลิเมอร์ (olefin polymers) และอะคริเลตโพลิเมอร์ (acrylate polymers) เป็นต้น

3. สารป้องกันการเกิดฟอง (defoamants) เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยป้องกันการเกิดฟองอากาศที่ผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่นเมื่อน้ำมันถูกหมุนเวียนใช้ในระบบ โดยโมเลกุลของสารจะเข้าไปเกาะกับฟองอากาศทำให้ฟองอากาศเล็ก ๆ รวมตัวกันเป็นฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้น ลอยขึ้นบนผิวและแตกออกในที่สุด ได้แก่ ซิลิโคนโพลิเมอร์ (silicone polymer) และพวกรโพลิเมอร์อินทรีย์ (organic polymer)

4. สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (oxidation inhibitors) เมื่อน้ำมันหล่อลื่นได้รับความร้อนและสัมผัสกับอากาศจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันหล่อลื่นและออกซิเจนในอากาศเรียกว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และผลของการเกิดออกซิเดชันนี้ทำให้ความหนืดและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดตะกอน ได้แก่ สังกะสีไดทีโอซเฟต (zinc dithiophosphate)

5. สารป้องกันการกัดกร่อน (corrosion inhibitors) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นโดยน้ำมันหล่อลื่น พบว่าการกัดกร่อนเกิดจากกรดอินทรีย์ในตัวขนงน้ำมันหล่อลื่น และการกัดกร่อนที่เกิดจากสารปนเปื้อนที่ถูกพาไปโดยน้ำมันหล่อลื่น ได้แก่ สังกะสีไดทีโอซเฟต และสารที่มีซัลเฟอร์และฟอสฟอรัส

6. สารป้องกันการเกิดสนิม (rust inhibitor) เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยป้องกันสนิมที่เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นส่วนโลหะที่มีการหล่อลื่น โดยสารที่ใช้จะเป็นสารประกอบที่มีการยึดติดกับผิวของโลหะได้ดี สารป้องกันสนิมจะทำปฏิกิริยากับผิวโลหะเกิดเป็นฟิล์มเคลือบบนผิวเพื่อไม่ให้น้ำเข้าถึงผิวโลหะ ได้แก่ อะไมนัซซัคซิเนต (amine succinates) และอัลคาไลเอิร์ทซัลโฟเนต (alkaline earth sulfonates)

7. สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (detergents and dispersants) เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวของชิ้นส่วน และกระจายไม่ให้รวมตัวกันเป็นโคลนหรือตะกอนซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นจะอุดช่องทางน้ำมันหล่อลื่น และไปรวมกันอยู่ด้านหลังของแหวนลูกสูบ อาจทำให้แหวนติด ได้แก่ สบู่อินทรีย์ (organic soaps) และบาเรียม (barium) แคลเซียมและแมกนีเซียมซัลโฟเนต (magnesium sulfonates) เป็นต้น ส่วนสารกระจายสิ่งสกปรกจะทำหน้าที่ในการกระจาย

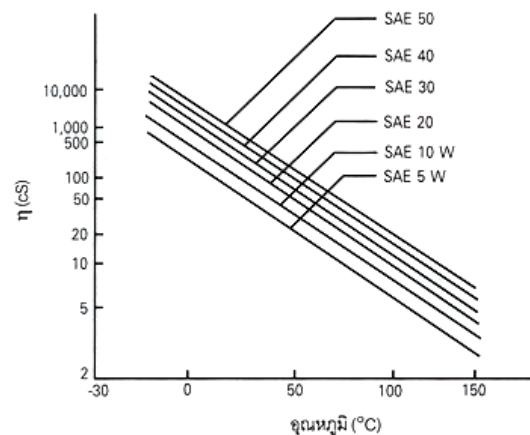
หรือทำให้สารที่จะรวมตัวกันเป็น โคลนแขวนลอยอยู่ในน้ำมัน ได้แก่ โพลิเมอร์อิมิด (polymeric succinimides) และ เบนซิลอิมิด (benzylamides) เป็นต้น

8. สารป้องกันการสึกหรอ (antiwear additives) เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยลดความเสียหายและการสึกหรอภายใต้สภาวะการหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี (boundary lubrication) คือในสภาวะที่ฟิล์มของน้ำมันที่แยกผิวสัมผัสได้อย่างสมบูรณ์ไม่สามารถคงอยู่ได้ สารป้องกันการสึกหรอที่ใช้กันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) สารที่ช่วยลดความเสียหายและการสึกหรอสำหรับสภาวะการทำงานเบา สารนี้อาจเรียกว่าสารเพิ่มคุณภาพสำหรับการหล่อลื่นแบบเบาน์ดารี (boundary lubrication additives) ได้แก่ กรดไขมัน (fatty acids) และน้ำมันไขมัน (fatty oils) 2) สารที่ช่วยลดความเสียหายและการสึกหรอภายใต้สภาวะความดันสูงมาก เรียกว่า extreme pressure additive (EP) โดยจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับผิวโลหะ ทำให้เกิดเป็นฟิล์มเคลือบที่ผิวโลหะป้องกันการสัมผัสโดยตรงของผิวโลหะ ได้แก่ สารประกอบของซัลเฟอร์ คลอรีน หรือฟอสฟอรัส ตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวรวมกัน

2.3 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

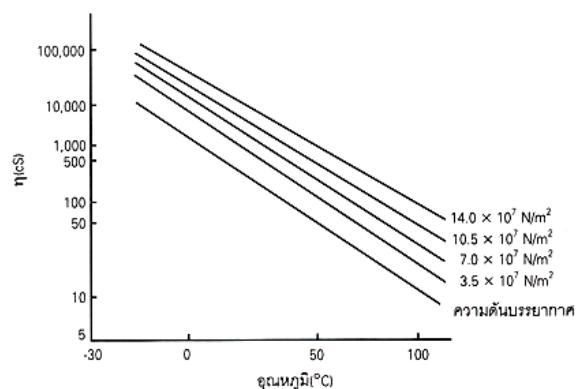
น้ำมันหล่อลื่นประเภทน้ำมันแร่ที่ใช้กันมีอยู่หลายชนิดโดยแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกัน ไปขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน จึงจำเป็นที่จะต้องทราบถึงคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นเพื่อให้สามารถเลือกชนิดของน้ำมันหล่อลื่นได้ตรงตามความต้องการ สำหรับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่สำคัญทั้งด้านฟิสิกส์และเคมี คือ

1. ความหนืด (viscosity) เป็นค่าที่บอกถึงคุณสมบัติการต้านการไหลหรือความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นว่ามีความหนืดมากน้อยเท่าไร ค่าความหนืดที่ใช้มีหลายมาตรฐาน เช่น ในน้ำมันหล่อลื่นอุตสาหกรรมจะบอกด้วยมาตรฐาน ISO ส่วนในน้ำมันหล่อลื่นยานยนต์แสดงด้วยมาตรฐาน SAE ส่วนมาตรฐานอื่นๆ ได้แก่ Saybolt Universal Seconds (SUS) Saybol Furlo Seconds (SFS) เป็นต้น โดยความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัส และมีผลต่อการเกิดความร้อนขึ้นระหว่างผิวสัมผัสที่มีการหล่อลื่นด้วยน้ำมันหล่อลื่น ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะไม่คงที่ แต่จะแปรผันตามสภาวะการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผันกับอุณหภูมิและความดันในการใช้งาน



ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นบางชนิด [4]

ภาพที่ 2.6 แสดงถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดเชิงพลศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่นพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นลดลง เนื่องจากความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมัน โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะมีการขยายตัวของของเหลวและโมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนออกห่างกัน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง และเป็นผลให้ความหนืดลดลงด้วย



ภาพที่ 2.7 ผลของความดันต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 [4]

ภาพที่ 2.7 แสดงผลของความดันที่มีต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ซึ่งความหนืดจะเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ $2 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ โดยผลของความดันที่มีต่อความหนืดนั้น จะเห็นได้ชัดเจนเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นมาก ซึ่งพบว่าโมเลกุลของน้ำมันจะถูกบีบให้เข้าใกล้กัน เมื่อความดันของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ทำให้แรงยึดติดระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น และทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อความดันเพิ่มเป็น $3.5 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ จะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของความหนืดที่ความดันบรรยากาศ

2. **ดัชนีความหนืด (viscosity index)** เป็นค่าที่บอกความสามารถของน้ำมันหล่อลื่นว่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นนั้นจะสามารถคงสภาพได้ดีเพียงใดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จึงได้มีการกำหนดดัชนีความหนืดขึ้นเพื่อใช้แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่มีผลมาจากอุณหภูมิ โดยใช้การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นในการหาดัชนีความหนืดกับน้ำมันหล่อลื่นที่เลือกสองชนิด เช่น น้ำมันหล่อลื่น Gulf Coast มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดกับอุณหภูมิมาก ให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 0 และน้ำมันหล่อลื่น Pennsylvanian มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดกับอุณหภูมิน้อย ให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 100

3. **กากคาร์บอน (carbon residue)** คือสิ่งที่ตกค้างอยู่หลังจากการเผาไหม้น้ำมันหล่อลื่นในสถานะที่กำหนดจะคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก ซึ่งในการใช้งานนั้นปริมาณกากคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นจะไม่ค่อยมีความสำคัญนัก เนื่องจากจะไม่มีคาร์บอนไหม้โดยตรงของน้ำมันหล่อลื่นในการนำไปใช้งาน แต่สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นปริมาณกากคาร์บอนจะมีความสำคัญเพราะจะมีการเผาไหม้โดยตรง ดังนั้นการหาปริมาณกากคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะเป็นการหาสำหรับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเพื่อดูว่ากระบวนการผลิตเป็นไปตามกำหนดหรือไม่

4. **สี (color)** ความแตกต่างของสีของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากชนิดของน้ำมันดิบที่แตกต่างกันที่นำมาใช้ในการผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่น ทั้งวิธีการกลั่นและผลิต จำนวนและชนิดของสารเพิ่มคุณภาพ โดยสีของน้ำมันหล่อลื่นที่เห็นเมื่อมีแสงผ่านนั้นจะมีสีต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ใสจนถึงดำ โดยอาจมีสีเหลือง แดง และน้ำตาล เป็นต้น ดังนั้นในการใช้งานสีของน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปจึงไม่มีความสำคัญนัก ยกเว้นกรณีที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา

5. **ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (density , gravity)** ความหนาแน่น หมายถึงมวลของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนด ส่วนความถ่วงจำเพาะ หมายถึงอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันและความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยค่าความถ่วงจำเพาะจะใช้เป็นตัวช่วยในการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าพบว่าน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้แล้ว มีค่าความถ่วงจำเพาะลดลง (ค่าองศา API เพิ่มขึ้น) แสดงว่าน้ำมันเชื้อเพลิงเข้ามาผสมกับน้ำมันหล่อลื่น แต่ถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นแสดงว่ามีสิ่งแปลกปลอม เช่น เหม่า หรือสารที่เกิดจากการรวมตัวกับออกซิเจนผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งในสหรัฐอเมริกา มักนิยามกำหนดค่าความถ่วงจำเพาะในรูปของหน่วยองศา API (American petroleum institute)

6. จุดวาบไฟและจุดติดไฟ (flash point , fire points) เป็นค่าอุณหภูมิต่ำที่สุดซึ่งน้ำมันหล่อลื่นที่อยู่ในสภาวะที่กำหนดสามารถก่อให้เกิดไอระเหยในปริมาณที่เพียงพอต่อการผสมกับอากาศและเกิดส่วนผสมที่พอเพียงต่อการติดไฟ เมื่อมีประกายไฟหรือเปลวไฟเข้ามาใกล้ ๆ ซึ่งจุดวาบไฟของน้ำมันหล่อลื่นใหม่จะแปรผันกับความหนืด โดยน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงจะมีจุดวาบไฟที่สูง นอกจากนี้ชนิดของน้ำมันดิบที่แตกต่างกันที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานก็มีผลต่อจุดวาบไฟด้วย โดยจุดวาบไฟและจุดติดไฟของน้ำมันจะใช้ในการควบคุมการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและจะใช้ในการพิจารณาในด้านความปลอดภัยในการใช้งาน

7. จุดไหลเท (pour point) เป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันหล่อลื่นจะเริ่มไหลภายใต้สภาวะที่กำหนด ในการทดสอบน้ำมันหล่อลื่นจะถูกปล่อยให้เย็นตัวลงในภาชนะ โดยปล่อยให้อุณหภูมิลดลงเป็นลำดับจนไม่มีน้ำมันหล่อลื่นไหล ทดสอบภายใน 5 วินาที แล้ววัดอุณหภูมินั้นเป็น pour point ความสำคัญของจุดไหลเทจะขึ้นอยู่กับสภาวะของการใช้งานเช่น ในประเทศหนาวจะต้องเลือกใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ เพื่อให้ น้ำมันสามารถไหลได้

8. ตัวเลขความเป็นกลาง (neutrallization number) น้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่เล็กน้อย ซึ่งสภาพความเป็นกรดนี้จะเป็นตัววัดปริมาณของเบสมาตรฐานที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำมันหล่อลื่นเป็นกลาง ซึ่งสภาพความเป็นกรดนี้จะทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซล จึงมักจะเติมสารเพิ่มคุณภาพที่มีคุณสมบัติที่เป็นด่าง เพื่อให้สารที่เกิดจากการเผาไหม้ที่มีสภาพเป็นกรดให้มีสภาพเป็นกลาง และผ่านการใช้งานเป็นเวลานาน เราสามารถตรวจสอบอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นได้จากการตรวจพบสารที่เป็นด่าง โดยสภาพความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจน (oxidation) ทำให้เกิดการอินทรีย์ขึ้น

2.4 หน้าทีของน้ำมันหล่อลื่น [4]

ปัจจุบันน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้มีหลายชนิด ทั้งที่นำไปหล่อลื่นเครื่องยนต์และเครื่องจักรต่าง ๆ โดยหน้าที่หลักและประโยชน์จากการใช้น้ำมันหล่อลื่นมีดังนี้

1. ช่วยในการหล่อลื่น น้ำมันหล่อลื่นมีกระบวนการในการสร้างฟิล์มบาง ๆ คล้ายของแข็ง (lubricant films) แทรกเข้าไประหว่างหน้าสัมผัสของโลหะทั้งสอง เพื่อไม่ให้โลหะทั้งสองสัมผัสกันโดยตรง เรียกกระบวนการนี้ว่า hydrodynamic lubrication (HDL) แต่การที่ฟิล์มของ

น้ำมันเครื่องจะแทรกตัวลงไปได้พอเหมาะและฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นจะรับแรงกดให้ชนะแรงกดอันรุนแรงของเครื่องยนต์ และที่ความเร็วรอบสูง ๆ ใต้จะขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของฟิล์ม น้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสม รวมถึงเกรดและคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการคงความหนาของเยื่อน้ำมันและฟิล์มน้ำมันให้เกือบคงที่ตลอดเวลาแม้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป จะต้องไม่บางเกินไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และไม่หนาเกินไปเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง

2. ช่วยในการระบายความร้อน คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ ในช่วงที่เครื่องยนต์กำลังทำงานจะเกิดความร้อนขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบอกสูบและชิ้นส่วนภายในต่าง ๆ ซึ่งจะต้องลดอุณหภูมิหรือระบายความร้อน โดยจะปั๊มน้ำมันหล่อลื่นส่งไปหล่อลื่นชิ้นส่วนต่าง ๆ เมื่อ น้ำมันหล่อลื่นไหลกลับก็จะพาเอาความร้อนกลับลงไปสู่อ่างน้ำมันหล่อลื่นด้วย จึงเป็นการระบายความร้อนให้ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องยนต์

3. ช่วยในการรักษาความสะอาด คือในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จะทำให้เกิดเขม่าและผงโลหะ อาจทำให้เกิดการอุดตันภายในชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ได้ ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นจึงมีหน้าที่ชะล้างเขม่าและป้องกันการรวมตัวกันของผงโลหะที่อาจทำให้เกิดการอุดตันได้ โดยน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจะไม่มีคุณสมบัติในข้อนี้จึงต้องผสมด้วยสารชะล้างทำความสะอาด (detergent) และสารช่วยกระจายเขม่าตะกอน (dispersant) เพื่อขจัดคราบเขม่าคาร์บอนออกจากผิวโลหะและกระจายเขม่าตะกอนให้แขวนลอยอยู่ในน้ำมัน โดยไม่ตกตะกอนและจับตัวเป็นก้อน ทำให้สามารถชะล้างสิ่งสกปรกมากระจายตัวอยู่ในเนื้อน้ำมันและจะถูกถ่ายออกเมื่อถึงเวลาเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น

4. ช่วยในการป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อน การเผาไหม้ในเครื่องยนต์จะทำให้เกิดความชื้นและไอน้ำที่เป็นสาเหตุให้เกิดสนิมกับชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่เป็นโลหะ ขณะเดียวกันการเผาไหม้เชื้อเพลิงก็ทำให้เกิดกรดกำมะถัน สามารถกัดกร่อนชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ให้สึกหรอได้ น้ำมันหล่อลื่นจึงมีหน้าที่ทำให้ไอน้ำและกรดกำมะถันเจือจางลงเพื่อช่วยป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อนได้ ดังนั้นฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นจะทำการเคลือบผิวของโลหะไว้ เพื่อไม่ให้โลหะในเครื่องยนต์สัมผัสกับออกซิเจนโดยตรง และน้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีสารป้องกันการเกิดสนิม และเป็นสารที่สามารถไล่น้ำออกจากฟิล์ม หรือสารป้องกันการรวมตัวกับกรด – ต่างต่าง ๆ ผสมอยู่ด้วย

5. ช่วยในการป้องกันการรั่วของกำลังอัด น้ำมันหล่อลื่นจะมีลักษณะเป็นฟิล์ม มีส่วนช่วยเคลือบผนังกระบอกสูบ เพื่อป้องกันก๊าซที่เป็นส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศ ไม่ให้เล็ดลอดผ่าน

ช่องว่างระหว่างแหวน ทำให้เครื่องยนต์สูญเสียกำลังอัด โดยน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงจะมีแผ่นฟิล์มเคลือบที่หนา การเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดจะมีผลต่อค่าเคลียร์เลนซ์ (clearance) ของช่องว่างระหว่างลูกสูบ แหวน และกระบอกสูบจนถึงความสึกหรอหลังจากใช้งานแล้ว

2.5 การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น [4]

เมื่อน้ำมันหล่อลื่นถูกส่งไปหล่อลื่นชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องยนต์และเครื่องจักรแล้วจะถูกรวบรวมนำกลับไปได้ใช้อีกเป็นระบบหมุนเวียนหรือระบบบรรจุตัว และนำไปใช้ในระบบการหล่อลื่น โดยที่ในระบบหมุนเวียนจะมีการแยกเอาสารปนเปื้อนที่เป็นของแข็งออก ผ่านการกรอง และมีการระบายความร้อน เพื่อช่วยลดอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นก่อนนำกลับไปได้ใช้ใหม่ ส่วนในระบบบรรจุตัวมีเพียงการระบายความร้อนก่อนนำกลับไปได้ใช้ใหม่ นอกจากนี้ น้ำมันหล่อลื่นของเครื่องจักรหรือเครื่องยนต์ยังมีหน้าที่ช่วยชะล้างและกระจายสิ่งสกปรกภายใน เมื่อน้ำมันหล่อลื่นหมดสภาพหลังจากถูกใช้งานมาในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จะมีการสูญเสียคุณสมบัติในการหล่อลื่น และหน้าที่อื่น ๆ ไป และเมื่อใช้น้ำมันหล่อลื่นต่อก็จะยิ่งเสื่อมสภาพลงไปเรื่อย ๆ โดยสาเหตุของการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นพอสรุปได้ดังนี้

1. การเสื่อมสภาพของตัวเนื่อน้ำมันที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

เกิดจากการที่น้ำมันหล่อลื่นรวมตัวกับออกซิเจน หรือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและเมื่อรวมตัวกับออกซิเจนแล้วจะเกิดความเป็นกรดขึ้น จะทำให้เนื่อน้ำมันเสื่อมสภาพเร็วมากขึ้น และทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะ เกิดยางเหนียวและโคลนซึ่งอาจทำให้ระบบหมุนเวียนน้ำมันอุดตันได้ ทำให้ความหนืดของน้ำมันก็จะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการรวมตัวกับออกซิเจนนี้จะถูกเร่งปฏิกิริยาโดยอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิในการใช้งานสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น และหากมีเศษโลหะอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น เศษโลหะเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อีกด้วย ผลของการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้เนื่อน้ำมันพื้นฐานสูญเสียคุณสมบัติในการหล่อลื่น และสูญเสียคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน

2. สารเพิ่มคุณภาพในน้ำมันถูกใช้หมดไปหรือเสื่อมสภาพไป

สารเพิ่มคุณภาพในน้ำมันหล่อลื่นมีอยู่หลายชนิดโดยสารเหล่านี้ช่วยให้น้ำมันหล่อลื่นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งาน แต่เนื่องจากสารเพิ่มคุณภาพเป็นสารเคมีที่เมื่อทำหน้าที่แล้ว

สารเพิ่มคุณภาพก็จะเปลี่ยนสภาพและเสื่อมสภาพในที่สุด โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเพิ่มคุณภาพที่ใส่เข้าไปและระยะเวลาในการใช้งานซึ่ง เมื่อถูกใช้หมดไปน้ำมันหล่อลื่นก็จะหมดคุณสมบัติในการทำงานของสารคุณภาพนั้น ๆ ไป

3. สารอื่นหรือสิ่งสกปรกจากภายนอกเข้าไปปะปน

สารปนเปื้อนที่เมื่อเข้าไปปะปนกับระบบอาจทำให้เกิดความเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นได้เช่น น้ำจากภายนอกหรือระบบอาจเข้าไปประหว่งเติมหรือเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่น หรือระหว่งที่เก็บรักษาน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ดีพอ และอาจเกิดจากน้ำที่ซึมเข้าไปในระบบเครื่องได้ โดยน้ำเมื่อไปปะปนกับน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้อนุภาคของน้ำเข้าไปแทรกตัวในเนื้อน้ำมัน ทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีลักษณะขุ่นขาว ทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนไปและไม่เหมาะที่จะใช้งานอีกต่อไป จึงได้มีการเติมสารเพิ่มคุณภาพลงไปเพื่อทำให้น้ำแยกตัวออกจากชั้นน้ำมันและถูกถ่ายทิ้งได้ นอกจากนี้ฝุ่นผงและเขม่าโดยเฉพาะพวกที่เป็นเศษโลหะถ้าเข้ามาปะปนอยู่กับน้ำมันหล่อลื่นเป็นจำนวนมากจะทำให้ไปขัดสีกับผิวของโลหะของเครื่องจักร ทำให้เกิดรอยขีดข่วนและเกิดการสึกหรอได้ นอกจากนั้นยังทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสูงขึ้นด้วย และพวกน้ำมันเชื้อเพลิงถ้าเล็ดลอดไปปะปนกับน้ำมันหล่อลื่นจะทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดลดลง ส่งผลให้น้ำมันหล่อลื่นไม่เหมาะกับการใช้งานอีกต่อไป ดังนั้นต้องระมัดระวังไม่ให้สิ่งอื่นภายนอกเข้าไปปะปนกับน้ำมันหล่อลื่น ถึงแม้จะเป็นน้ำมันหล่อลื่นต่างชนิดกันก็ไม่ควรจะนำมาผสมกันเพราะอาจทำให้คุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นเสื่อมลงได้

2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) [5,7]

2.6.1 ความหมายของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาคือ สารที่เพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น โดยที่ตัวมันเองไม่ถูกใช้อย่างถาวรในปฏิกิริยา

2.6.2 ชนิดของการเร่งปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยา

การเร่งปฏิกิริยาแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ 1) การเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (homogenous catalysis) ตัวเร่งปฏิกิริยาจะอยู่ในเฟสเดียวกับสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ ส่วนใหญ่มักเป็นสารละลายที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นละลายอยู่ด้วยกัน 2) การเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์

(heterogeneous catalysis) ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีเฟสต่างกับสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ ส่วนใหญ่ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นของแข็ง และสารตั้งต้นเป็นแก๊สหรือของเหลว

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งตามสถานะเทียบกับสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์มี 2 ประเภท คือ

1) ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogenous catalysts) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยา มีข้อดีคือ ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูง และสามารถเลือกเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการได้ง่ายกว่า นอกจากนี้สภาวะที่ใช้ในการทดลองไม่รุนแรง จึงศึกษากลไกของปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีต่าง ๆ และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการแพร่ของสารตั้งต้นไปหาตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากอยู่ในวัฏภาคเดียวกัน แต่มีข้อเสียคือ ในสภาวะที่ใช้ความร้อนและความดันสูงมักสลายตัวและเสียสภาพ นอกจากนี้การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก วิธีการส่วนใหญ่ที่ใช้คือ การกลั่นหรือการสกัดด้วยตัวทำละลาย และการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ทำได้ยากกว่า และอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์นั้นสั้นกว่า

2) ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalysts) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยา เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง สารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวหรือแก๊ส ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์คือ การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ทำได้ง่าย สามารถใช้ได้ ในสภาวะที่มีอุณหภูมิหรือความดันสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และอาจนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่า

2.6.3 การเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ [7]

2.6.3.1 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 องค์ประกอบคือ องค์ประกอบว่องไวเพื่อช่วยในการทำปฏิกิริยา (active component) และตัวรองรับ (support) หรือตัวพา (carrier) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง เพื่อให้ง่ายต่อการกระจายตัวของสารว่องไวในการทำปฏิกิริยามากขึ้น แต่บางตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีสารว่องไวเพียงอย่างเดียว ซึ่งตัวอย่างของสารว่องไวและปฏิกิริยาที่เร่ง แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของสารว่องไวและปฏิกิริยาที่เร่ง [7]

สารกัมมันต์	ธาตุ/สารประกอบ	ปฏิกิริยาที่เร่ง
โลหะ	Fe, Co, Ni, Cu, Ru, Rh, Pd, Ir, Pt, Au	Hydrogenation, steam reforming, hydrocarbon reforming, dehydrogenation, oxidation
ออกไซด์	ออกไซด์ของ V, Mu, Fe, Cu, Mo, W, rare earth, Al, Si, Sn, Pb, Bi	Complete and partial oxidation of hydrocarbons and CO, acid-catalyzed reactions (e.g. cracking, isomerization, alkylation), methanol synthesis
ซัลไฟด์	ซัลไฟด์ของ Co, Mo, W, Ni	Hydrogenation, hydrotreating (hydro desulfurization, hydrodenitrogenation, hydrodeoxygenation)
คาร์ไบด์	คาร์ไบด์ของ Fe, Mo, W,	Hydrogenation

ตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัวอาจมีองค์ประกอบที่ช่วยเสริมการเร่งปฏิกิริยาให้ดีขึ้นเรียกว่า โปรโมเตอร์ (promoter) โดยเป็นสารที่ใส่ในปริมาณน้อย ๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือสมบัติทางเคมีของสารว่องไวหรือตัวรองรับ ซึ่งอาจเพิ่มกัมมันตภาพ (activity) เสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา และสัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา (selectivity) ซึ่งตัวอย่างของตัวรองรับและโปรโมเตอร์ แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างของตัวรองรับและโปรโมเตอร์ [7]

องค์ประกอบ	ชนิดของวัสดุ	ตัวอย่าง
ตัวรองรับ	Metal oxides	Transition metal and Group IIIS (Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , BaO , TiO_2 , ZrO_2)
	Metal oxides	Alkali or alkaline earth (K_2O , PbO)
	Metal oxides, carbons	(Al_2O_3 , SiO_2 , MgO) zeolites and activated carbon
		Transition metal oxides (MoO_2 , CuO)
โปรโมเตอร์	Metal sulfides	Transition metal sulfides (MoS_2 , Ni_3S_2)

1. สารว่องไว

สารว่องไวแบ่งตามหน้าที่หลักได้เป็น 4 กลุ่มคือ โลหะ โลหะออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด และโลหะบนกรด

1.1 โลหะ มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน ปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยาไฮโดรจิโนลิซิส โดยการที่โลหะเร่งปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนได้ เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สไฮโดรเจนถูกดูดซับแบบแตกตัว (dissociative adsorption) บนโลหะได้ และเกิดปฏิกิริยาได้ทันที พันธะที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าไม่แข็งแรงเกินไป โดยโมเลกุลของแก๊สไฮโดรเจนจะแตกตัวได้ทันทีบน แพลเลเดียม นิกเกิล โคบอลต์ และเหล็ก ตามลำดับ แต่จะแตกตัวได้ช้าบนทองแดง ดังนั้นทองแดงจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ดีนักในการเร่งปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน

1.2 โลหะออกไซด์ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) และปฏิกิริยารีดอกซ์ กลุ่มแรกได้แก่ สารประกอบเชิงซ้อนของโมลิบดีนัม และ

ออกไซด์ของโลหะผสม ออกไซด์ประเภทนี้มีโครงสร้างเป็นแบบไอออนิกซึ่งมีจำนวนออกซิเจนไม่แน่นอน (nonstoichiometric ionic) ซึ่งออกซิเจนจะเคลื่อนย้ายออกมาจากโครงผลึกได้ กลุ่มที่สอง ได้แก่ กลุ่มตัวเร่งปฏิกิริยาที่เร่งปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจนออก (dehydrogenation) ซึ่งออกซิเจนสามารถจับอยู่กับโลหะอย่างแข็งแรงและต้องไม่ถูกรีดิวซ์โดยไฮโดรเจนในอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ Fe_2O_3 , ZnO , $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็นต้น

1.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะเร่งปฏิกิริยาได้หลายชนิดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะประกอบด้วยธาตุสองชนิดขึ้นไปจับกันอย่างแข็งแรงด้วยอะตอมของออกซิเจน เช่น สารประกอบของซิลิกา-อะลูมินา และซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ ชนิดของกรดอาจเป็นกรดชนิดบรอนสเตด (Bronstate acid) หรือกรดชนิดลิวอิส (Lewis acid) หรือทั้งสองแบบรวมกัน ปฏิกิริยาที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นกับความแรงและธรรมชาติของกรด แต่ไม่ขึ้นกับชนิดของอะตอมที่มีอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยามากนัก

1.4 โลหะและกรด เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำหน้าที่สองอย่าง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะประกอบด้วยโลหะและองค์ประกอบที่เป็นกรด ทั้งสององค์ประกอบต่างก็เร่งขั้นตอนในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา แต่เร่งในขั้นตอนที่แตกต่างกัน เช่น แพลตทินัมบนตัวรองรับที่เป็นกรด

2. ตัวรองรับหรือตัวพา

ตัวรองรับหรือตัวพา มีสมบัติที่สำคัญที่สุดคือ การมีพื้นที่ผิวหน้าสูงสำหรับสารกัมมันต์ ซึ่งบางครั้งอาจทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่พบบ่อยจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีหลายเฟส โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาจับอยู่บนตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวสูง ตัวอย่างเช่น ซิลิกา (silica, SiO_2) หรืออะลูมินา (alumina, Al_2O_3), ซีโอไลต์ (zeolites) ไททาเนีย (TiO_2) ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาต้องกระจายตัวได้ดีบนตัวรองรับ โดยสมบัติของตัวรองรับมีดังต่อไปนี้

1) มีพื้นที่ผิวสูงและมีความพรุน ซึ่งขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานด้วย โดยต้องมีความพรุนรวมถึงขนาดรูพรุนและการกระจายของรูพรุนพอเหมาะ การมีพื้นที่ผิวสูงหมายถึงมีรูพรุนที่มีขนาดเล็ก แต่ถ้ารูพรุนเล็กเกินไปจะทำให้เกิดการอุดตันได้ โดยเฉพาะในกรณีที่มีปริมาณของโลหะตัวเร่งสูง

2) ต้องเฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการให้เกิด

- 3) มีความแข็งแรงเชิงกล เช่น ทนต่อการบีบอัด (compression) หรือการขูดขีด (attrition)
- 4) มีเสถียรภาพหรือทนต่อสภาวะต่าง ๆ ได้ในระหว่างการทำปฏิกิริยาและในช่วงของการเปลี่ยนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
- 5) มีราคาถูก จะทำให้ลดต้นทุนในการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยา

2.6.3.2 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

1. การแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น (external diffusion) เป็นการแพร่ของสารตั้งต้นไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนนี้ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

2. การแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน (internal pore diffusion) เป็นการแพร่ของสารตั้งต้นที่บริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากรูพรุนมีขนาดที่เล็กมากและมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนตลอดรูพรุน ทำให้ระหว่างการแพร่แบบนี้จะมีการชนกันเองระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น หรือการชนกันของโมเลกุลกับผนังของรูพรุน ซึ่งขั้นตอนนี้ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

3. การดูดซับ (adsorption) เป็นการดูดซับของสารตั้งต้นบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารตั้งต้นแพร่ไปถึงตำแหน่งกระตุ้นซึ่งอยู่ในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วเกิดการดูดซับซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ในการเร่งปฏิกิริยาการดูดซับจะเป็นการดูดซับทางเคมีเสมอ คือเกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้นซึ่งเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) และผิวหน้าของของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent)

4. ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) หลังเกิดการดูดซับแล้วสารตั้งต้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์

5. การคาย (desorption) เป็นการหลุดของสารผลิตภัณฑ์จากผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งการคายซับเป็นกระบวนการย้อนกลับของการดูดซับ

6. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ออกจากภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นการย้อนกลับของขั้นตอนการแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน ยกเว้นเพียงแต่สารที่ออกมาเป็นสารผลิตภัณฑ์ไม่ใช่สารตั้งต้น

7. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์จากผิวหน้าด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการย้อนกลับของขั้นตอนการแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น ยกเว้นเพียงแต่สารที่ออกมาเป็นสารผลิตภัณฑ์ไม่ใช่สารตั้งต้น

2.7 ซีโอไลต์ (zeolite) [5,7]

ซีโอไลต์คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) ซึ่งหน่วยย่อยของซีโอไลต์จะประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอม และอะตอมของออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยพบว่า อะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมจะอยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ โดยโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุมโดยใช้ออกซิเจนร่วมกัน ทำให้ได้โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล แสดงในภาพที่ 2.8 ดังนั้นซีโอไลต์จึงเป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่เชื่อมต่อกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ มีขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10^{-10} เมตร) แสดงในภาพที่ 2.9 นอกจากซิลิกอนหรืออะลูมิเนียม และออกซิเจน ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม แกะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก

การจัดประเภทของซีโอไลต์จะแบ่งตามลักษณะองค์ประกอบของโพรงและช่องว่างเหล่านั้น ซึ่งจากโครงสร้างที่เฉพาะตัวของซีโอไลต์ทำให้ถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายอย่าง แต่เดิมมักถูกนำมาใช้ประโยชน์เฉพาะในด้านของสมบัติการดูดซับของโมเลกุล (Molecular sieve) ปัจจุบันพบว่าซีโอไลต์มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งซีโอไลต์ประเภทที่มีการแทนที่ตำแหน่งของอะตอมซิลิกอนด้วยอะลูมิเนียมหรือธาตุอื่น ๆ ทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดลักษณะและขนาดของโพรงและช่องว่างต่าง ๆ ที่มีอยู่ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในโพรงซีโอไลต์มีค่าการเลือกเกิด (selectivity) ที่สูง ทำให้สมบัติในการเร่งปฏิกิริยาของซีโอไลต์มีความเฉพาะตัวและเป็นที่น่าสนใจอย่างมาก ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของซีโอไลต์นอกจากจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการยึดจับ และการถ่ายทอดโปรตอนแล้วยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการแพร่ของโมเลกุล ในโพรงของซีโอไลต์อีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนด้วยไอออนของโลหะจะทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติการเร่งปฏิกิริยามากขึ้น ซึ่งไอออนโลหะที่ใส่เข้าไปจะเป็นชนิดเดียวหรือหลายชนิดที่เรียกว่า Cocation ก็ได้

2.7.1 โครงสร้างของซีโอไลต์ [5,7]

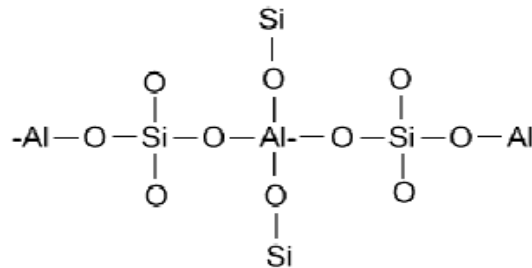
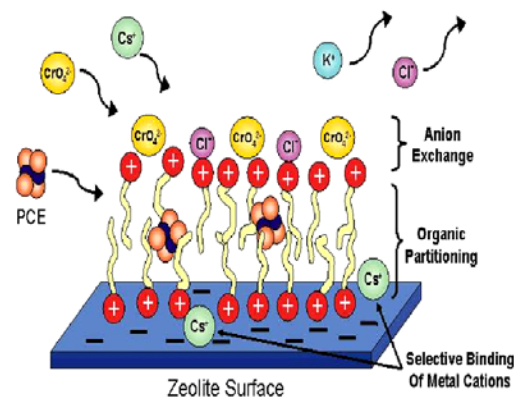


Figure 1: Basic Zeolite Structure

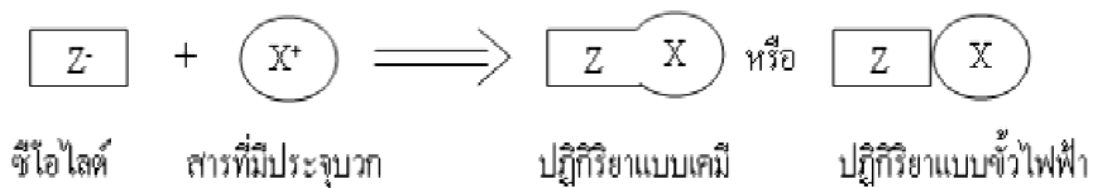
ภาพที่ 2.8 โครงสร้างพื้นฐานของซีโอไลต์ [5]



ภาพที่ 2.9 พื้นผิวของซีโอไลต์ [7]

2.7.2 การทำงานของซีโอไลต์ [5]

การทำงานของซีโอไลต์จะทำงานในลักษณะของปฏิกิริยาเคมี โดยการแลกเปลี่ยนไอออน หรือเป็นปฏิกิริยาแบบขั้วไฟฟ้าคือ เมื่อใส่ซีโอไลต์ลงในน้ำ ซีโอไลต์จะทำหน้าที่เป็นประจุลบหรือขั้วลบ Z⁻ แล้วไปจับกับสารที่มีประจุบวกหรือขั้วบวก X⁺ ที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น แอมโมเนียมและซัลไฟต์ หรือโลหะหนักเป็นต้น แสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การทำงานของซีโอไลต์ [5]

2.7.3 ลักษณะที่เหมาะสมกับการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [5]

1. ความเสถียรทางความร้อน (thermal stability)

ปฏิกิริยาเคมีส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูงประมาณ 300-600°C โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต้องมีความเสถียรในสถานะที่ทำให้ปฏิกิริยาเป็นเวลานานและต่อเนื่อง นอกจากนี้ ซีโอไลต์เป็นผลึกและเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต จึงมีความเสถียรต่อความร้อนสูง เมื่อแยกประเภทตามค่า Si/Al แล้ว ซีโอไลต์ที่มีค่า Si/Al สูงจะทนความร้อนได้ดีกว่าซีโอไลต์ที่มีค่า Si/Al ต่ำ และถ้าแยกตามขนาดของรูพรุน ซีโอไลต์ที่มีขนาดรูพรุนเล็กจะทนต่อความร้อนได้สูงกว่า โครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดใหญ่แต่ด้วยความที่ซีโอไลต์ส่วนใหญ่มีความเสถียร จึงใช้ได้ทั้งปฏิกิริยา ดูดความร้อน เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (cracking) และปฏิกิริยา รีฟอร์มมิง (reforming) ซึ่งเกิดที่อุณหภูมิที่สูง และปฏิกิริยาคายความร้อน เช่น ปฏิกิริยาแอลคิลเลชัน (alkylation) และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) ซึ่งเกิดที่อุณหภูมิต่ำ

2. พื้นที่ผิวในการเร่งปฏิกิริยาสูง (high surface area)

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์จะมีบริเวณเร่งอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์จะสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวสัมผัสมากและจากการที่ซีโอไลต์มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงโดยพื้นที่โดยส่วนใหญ่คือ พื้นที่ผิวในรูพรุน (internal surface) ซึ่งมีบริเวณเร่งอยู่ และการใช้โครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดเล็กจะให้ผลดีกว่าโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ เนื่องจากโครงสร้างขนาดเล็กทำให้พื้นที่ผิวด้านนอก (external surface) เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งช่วยให้สารแพร่ผ่านเข้าไปในรูได้มากขึ้นด้วย

3. ปฏิกิริยาระดับโมเลกุล (molecular reactor)

ในการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารตั้งต้นจะต้องถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนก่อน แล้วจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ในบริเวณที่ถูกดูดซับ โดยปฏิกิริยาทั้งหมดเกิดขึ้นภายในรูพรุนที่มีขนาดจำกัดและใกล้เคียงกับขนาดของโมเลกุล สำหรับปฏิกิริยาแบบโมเลกุลเดี่ยว (monomolecular reaction) อาจมีสารตั้งต้นเพียงตัวเดียวที่อยู่ภายในโพรง และเกิดปฏิกิริยาลักษณะเดียวกันในทุก ๆ โพรงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงได้น้อย และในการดูดซับสารตั้งต้นไว้ทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น และในปฏิกิริยาแบบโมเลกุลเชิงคู่ (bimolecular Reaction) ต้องอาศัยการชนกันของโมเลกุลของสารตั้งต้นอย่างน้อย 2 ตัว เพื่อให้

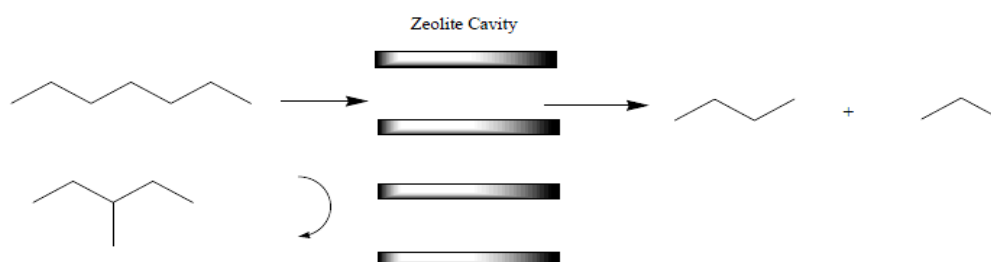
เกิดปฏิกิริยา ก็ได้รูพรุนที่ทำหน้าที่คล้าย molecular reaction ที่ช่วยเพิ่มความเข้มข้นให้กับสารตั้งต้น ทำให้โอกาสในการชนกันเกิดได้มากยิ่งขึ้น

4. การคัดสรรต่อขนาด และรูปร่าง (shape selectivity aspect)

การคัดสรรขนาดและรูปร่างเป็นความสามารถที่พบในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ แต่ไม่พบในตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่น ๆ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ มีบริเวณเร่งอยู่ภายในรูพรุนด้วยขนาดที่จำกัด ดังนั้นสารที่แพร่ผ่านเข้าไปจะต้องเข้าไปในรูพรุนให้ได้ก่อน ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นก็ต้องผ่านออกทางรูพรุนได้อีกด้วย จึงทำให้ขนาดของรูพรุนเป็นปัจจัยสำคัญที่เข้ามาควบคุม ทั้งขนาดและรูปร่างของโมเลกุลที่เกิดขึ้นทั้งหมดในปฏิกิริยานั้น ๆ ซึ่งสามารถแบ่งได้ใน 3 ลักษณะ ได้แก่

4.1 การคัดสรรโมเลกุลของสารตั้งต้น (reactant shape selectivity)

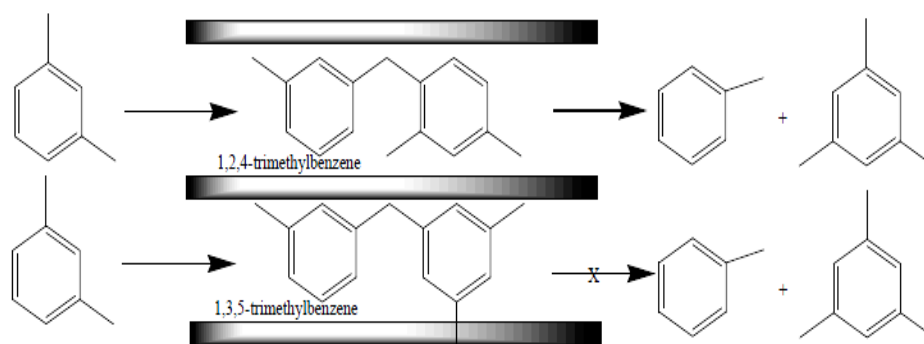
การคัดขนาดของสารตั้งต้นในการเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ต้องการ เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบอัลเคน ($C_6 - C_8$) มีทั้งโครงสร้างที่เป็นโซ่ตรงและโซ่กิ่ง ซึ่งโครงสร้างที่เป็นโซ่ตรงเป็นโครงสร้างที่มีค่าออกเทนสูงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดีกว่าโครงสร้างที่เป็นโซ่ตรง จึงมีการนำซีโอไลต์ไปใช้ในการแยกโครงสร้างที่เป็นโซ่ตรงโดยการดูดซับเข้าไปในรูพรุนที่เข้าไปได้เนื่องจาก kinetic diameter ของโครงสร้างที่เป็นโซ่ตรงเล็กกว่าโครงสร้างที่เป็นโซ่กิ่ง และเมื่อเข้าไปในรูพรุนแล้วก็จะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวเกิดขึ้น ซึ่งรูพรุนนี้โครงสร้างที่เป็นโซ่กิ่งไม่สามารถที่จะเข้าไปเกิดปฏิกิริยาได้เลย ซึ่งเป็นผลจากการคัดสรรสารตั้งต้นนั่นเอง แต่การคัดสรรก็ขึ้นกับการเลือกใช้ซีโอไลต์ด้วยเช่นกัน แสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 การคัดขนาดของสารตั้งต้นในการเข้าทำปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบอัลเคน [5]

4.2 การคัดสรรรูปร่างของสารมัธยันต์ (intermediate shape selectivity)

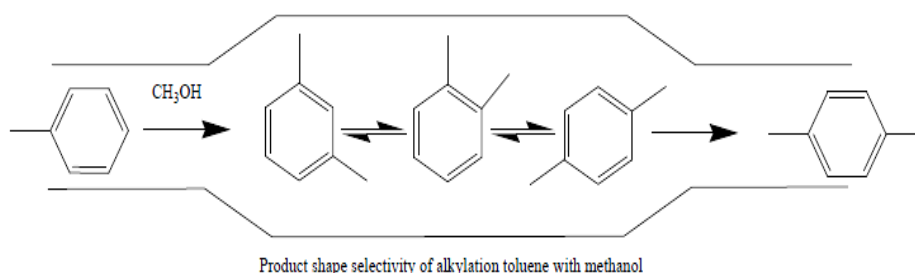
การเกิดปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์จะมีสารมัธยันต์ (intermediate) เป็นตัวที่กำหนดทิศทาง ดังนั้นการเลือกใช้ซีโอไลต์จึงมีผลต่อการคัดเลือกปฏิกิริยาด้วย เช่น การเกิดปฏิกิริยา disproportionation ของ m-xylene ซึ่งเกิดผลิตภัณฑ์ 2 ชนิด คือ 1,2,4-trimethylbenzene และ 1,3,5-trimethylbenzene ซึ่งเกิดจากสารมัธยันต์ที่ต่างกัน โดยปฏิกิริยาจะเกิดผ่าน bimolecular reaction ของ xylene ซึ่ง 1,3,5-trimethylbenzene เกิดจากสารมัธยันต์ที่มีความเกะกะมากกว่าสารมัธยันต์ของ 1,2,4-trimethylbenzene การที่จะแยกการเกิดปฏิกิริยาเป็นสารมัธยันต์จึงขึ้นกับการเลือกซีโอไลต์มาใช้แยกจากความต่างของความเกะกะที่เกิดขึ้น แสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 การคัดสรรรูปร่างของสารมัธยันต์ของการเกิดปฏิกิริยา disproportionation ของ m-xylene [5]

4.3 การคัดสรรรูปร่างของสารผลิตภัณฑ์ (product shape selectivity)

การจะเกิดปฏิกิริยาจากสารตั้งต้นเป็นสารผลิตภัณฑ์ได้นั้น สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนั้นต้องสามารถแพร่ผ่านรูพรุนของซีโอไลต์ให้ได้ หากว่าไม่สามารถแพร่ผ่านรูพรุนของซีโอไลต์ไปได้ อาจเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับในกรณีที่เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ หรืออาจเกิดปฏิกิริยาอื่น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แพร่ผ่านรูพรุนของซีโอไลต์ออกมาได้ ซึ่งโดยหลักการจะเหมือนกับที่ได้อธิบายไว้แล้ว ใน 2 กรณีข้างต้น แสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 การคัดสรรรูปร่างของสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาอัลคิเลชันของเมทานอล
ไปเป็นโทลูอิน [5]

2.8 การวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา [5]

การวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการอธิบายการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยอาศัยเทคนิคต่าง ๆ มาช่วยในการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.8.1 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน โดยวิธีบีอีที (BET)

การวัดพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน การกระจายตัวของรูพรุน และการศึกษารูปร่างของรูพรุนเป็นขั้นตอนหนึ่งของการศึกษาการเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากพื้นที่ผิวเป็นบริเวณที่อยู่ขององค์ประกอบกัมมันต์ที่ช่วยในการเกิดปฏิกิริยา การวัดพื้นที่ผิวภายในที่มีความพรุนทำได้โดยการศึกษาการดูดซับของแก๊สที่มีขนาดเล็ก เช่น แก๊สไนโตรเจนหรืออาร์กอน โดยอาศัยประโยชน์ของไอโซเทิร์มของการดูดซับทางกายภาพ หรือวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller Method) ที่อุณหภูมิของแก๊สเหลว ซึ่งขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ โดยการหาจำนวนโมเลกุลที่ใช้ในการเกิดการดูดซับชั้นเดียวสามารถนำมาหาพื้นที่ผิวภายในได้

สมมติฐานของไอโซเทอมสำหรับการดูดซับหลายชั้น

- ตัวดูดซับ (adsorbate) เกิดการดูดซับทางเคมีชั้นเดียวเท่านั้น
- มีการดูดซับของสาร 1 ตัวต่อหนึ่งจุดที่ว่างไว้
- ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ (ΔH_{abs}) ไม่ขึ้นกับปริมาณการดูดซับ
- การดูดซับ-คายซับอยู่ในภาวะสมดุล (equilibrium)

- สารที่ถูกดูดซับในชั้นที่ 1 ทำหน้าที่เป็นพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับในชั้นที่ 2 และต่อ ๆ ไป
- อัตราการดูดซับชั้น i เท่ากับอัตราการคายซับชั้น $i+1$
- ΔH_{abs} เท่ากันในชั้นต่าง ๆ และเท่ากับความร้อนที่เกิดจากการควบแน่น (ΔH_c)

สมการแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณที่ถูกดูดซับที่ความดันย่อยต่าง ๆ และปริมาณที่ถูกดูดซับแล้วเกิดเป็นการดูดซับชั้นเดียว คือสมการบีอ์ที ดังสมการที่ 2.1

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \quad (2.1)$$

- เมื่อ P คือ ความดันย่อยของแก๊สในโตรเจน
- P_0 คือ ความดันไออิ่มตัวของแก๊สในโตรเจน ณ อุณหภูมิที่ศึกษา
- V คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับที่ความดัน P
- V_m คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับที่ทำให้เกิดเป็นการปกคลุมชั้นเดียว
- C คือ ค่าคงที่

2.8.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray diffraction : XRD) [5]

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray diffraction) เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอกซ์ มาใช้ในการวิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียด เกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง

เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่น (λ) ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่าง ๆ กัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก

ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาของฟิล์มได้อีกด้วย

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ กับระยะห่างระหว่างระนาบผลึกและมุมตกกระทบสามารถเขียนในสมการที่ 2.2 เรียกว่า Bragg's Equation

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.2)$$

โดย n คือ อันดับของการสะท้อนมีค่าเป็นจำนวนเต็ม

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีที่ใช้

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

θ คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบของผลึก

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ก็คือ ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณ หรือ หาดังประกอบตัวอย่าง ที่เป็น amorphous ได้ เนื่องจากตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่สามารถให้ XRD คำนวณหาปริมาณสัดส่วนเป็นร้อยละของส่วนที่เป็น amorphous ในตัวอย่างได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

2.8.3 เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) [5]

เทคนิค X-Ray fluorescence spectrometry หรือ เทคนิค XRF เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลวและสารแขวนลอยได้

เทคนิค XRF อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา (fluoresced) เนื่องจากโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่นหรือพลังงาน เฉพาะสำหรับธาตุนั้น ๆ จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนเปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง ข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้

2.9 ปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอน [6]

ปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

2.9.1 กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน (Thermal cracking)

ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนคือการเปลี่ยนโมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็ก ๆ โดยใช้อุณหภูมิสูง การแตกตัวนี้ถ้าเป็นไปได้ควรแตกให้พอดี ๆ จึงเรียกว่ามีการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม เพราะถ้าแตกเป็นโมเลกุลเล็กเกินไป เช่น เป็น C_1 - C_4 จะเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้

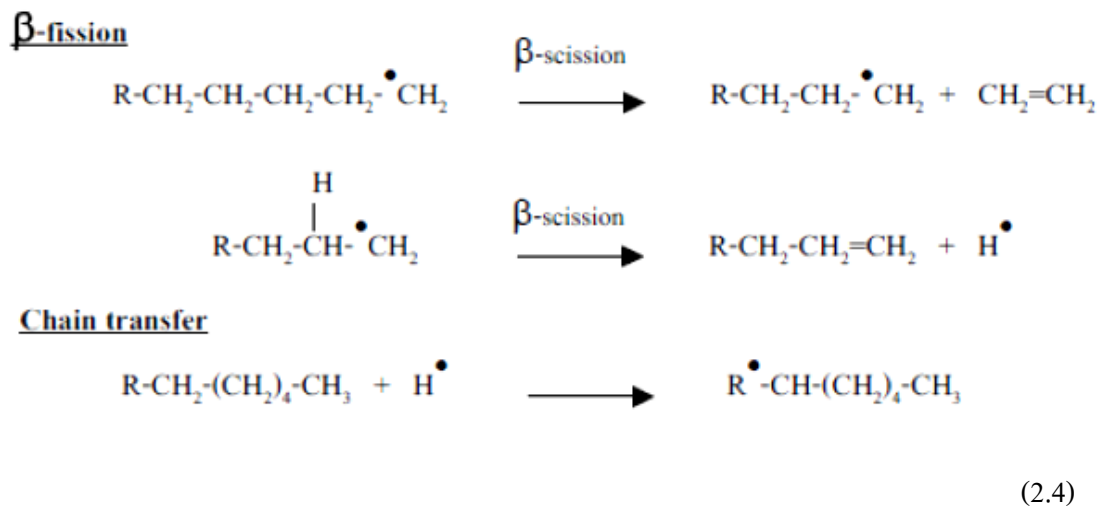
การแตกตัวด้วยความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อปฏิกิริยา โดยเฉพาะส่วนที่มีแขนโอเลฟิน (olefin) และไดโอเลฟิน (diolefin) ทำให้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ทำปฏิกิริยากันเองต่อไป โดยเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันและคอนเดนเซชัน กากน้ำมันจากกระบวนการนี้จึงไม่ค่อยอยู่ตัวอาจเกิดตะกอนน้ำมันได้ง่าย และมีความหนืดเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการทำปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดโค้ก (coke) ขึ้น

ปฏิกิริยากระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน จัดเป็นปฏิกิริยาประเภทราดิคอลเสรี (free radical) แบบเป็นห่วงโซ่ซึ่งมีปฏิกิริยา 3 ขั้น คือ

1. การเริ่มต้น (initiation) คือ การเกิดราดิคอลเสรีขึ้น โดยปฏิกิริยานี้จะทำให้พันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนแตกออกจากกัน และเกิดเป็นราดิคอลเสรี ซึ่งเป็นตัวเริ่มต้นของปฏิกิริยาอื่น ๆ ต่อไป



2. การเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (chain-carrying) โดยราดิคอลเสรีที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องคือ เกิดการเปลี่ยนรูปไอโซเมอร์และแตกตัวออกเป็นโมเลกุลย่อยต่อไป พร้อมกับเกิดราดิคอลเสรีตัวใหม่ขึ้น ในขณะที่ราดิคอลเสรีอาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นเกิดเป็นราดิคอลเสรีตัวใหม่ขึ้นอีก และได้โมเลกุลสารไฮโดรคาร์บอนที่เล็กลง โดยจะเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ



3. การหยุดปฏิกิริยา (termination) ราคีคอลเสรีจะหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่อง โดยการทำปฏิกิริยากันเองรวมเป็นสารไฮโดรคาร์บอน โมเลกุลใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจเกิดโมเลกุลใหญ่โมเลกุลเดียวหรือเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล



(2.5)

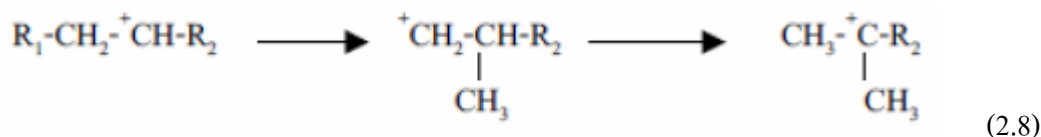
2.9.2 กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking)

กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นด้วยปฏิกิริยาของคาร์โบเนียมไอออน (carbonium ion) ซึ่งตรงกันข้ามกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน ซึ่งอาศัยราคีคอลอิสระ โดยราคีคอลอิสระของสารไฮโดรคาร์บอนเกิดจากการที่สารไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมไป แต่ตัวมันจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ส่วนคาร์โบเนียมไอออนเกิดจากการที่สารไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรไอออนที่มีประจุลบไป แต่ตัวมันจะมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาอาจสรุปได้ดังนี้

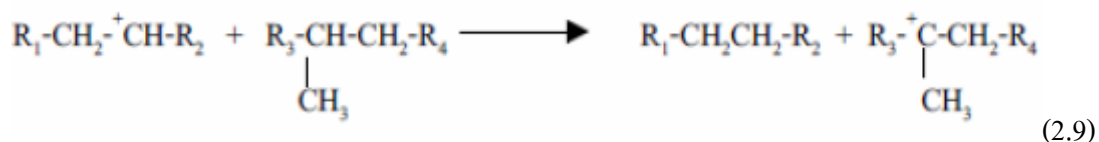
1. การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันทำให้เกิดสารประกอบอัลคีน ในสมการที่ 2.6 และปฏิกิริยาการเกิดคาร์โบเนียมไอออนบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ในสมการที่ 2.7 ซึ่งคาร์โบเนียมไอออนที่เกิดขึ้นมีความเสถียรแตกต่างกันกล่าวคือ ไอออนที่เป็นสารประกอบของคาที่สาม (tertiary ion) มีความเสถียรมากกว่าไอออนองศาที่สอง (secondary ion) และไอออนองศาที่สองมีความเสถียรมากกว่าไอออนองศาที่หนึ่ง (primary ion)



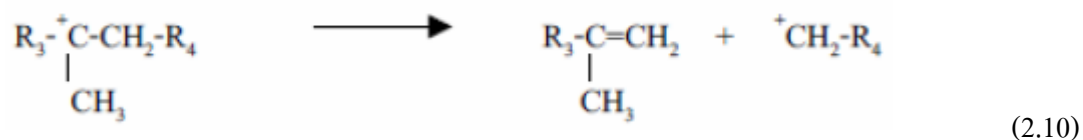
2. การเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิล (methyl group migration) ของคาร์โบเนียมไอออน



และปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ (hydride transfer) ในลำดับต่อไป



3. สำหรับคาร์โบเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า เบตา-ซิสชัน (β -scission) ได้เนื่องจากคาร์โบเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมีความเสถียรน้อยกว่าคาร์โบเนียมไอออนที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นตรงตำแหน่งพันธะคาร์บอน-คาร์บอนจึงถูกทำให้แตกหักได้ง่ายจนเกิดเป็นสารประกอบอัลคีนและคาร์โบเนียมไอออนองศาที่หนึ่ง



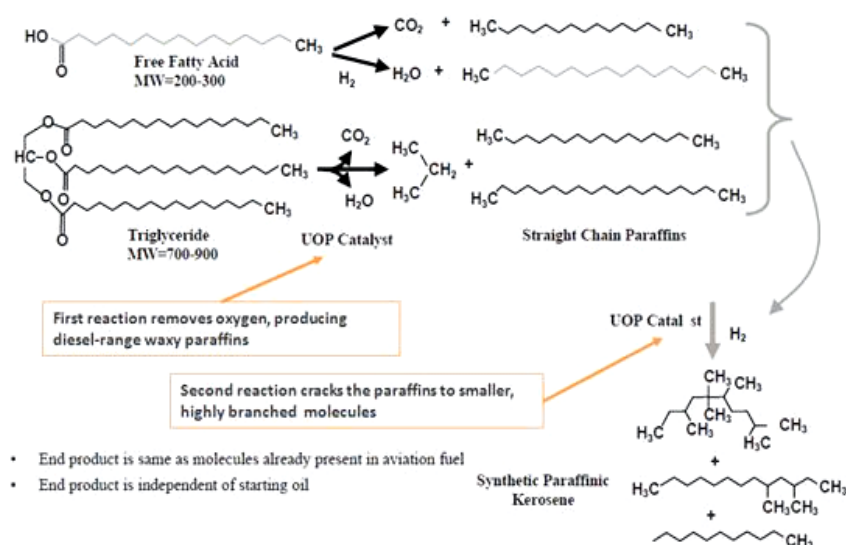
ในทางปฏิบัติกระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันมากเกินไป จึงเป็นเหตุให้เกิดการเกาะติดของคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นผลให้ความว่องไวปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง แต่คาร์บอนที่เกาะติดบนผิวของ

ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะถูกเผาไหม้ได้เกือบหมด ทำให้ความว่องไวปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยากลับคืนสภาพดีเช่นเดิม อย่างไรก็ตามคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้นั้นทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้โลหะ โนเบิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อออกซิไดซ์คาร์บอนมอนอกไซด์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์

2.9.3 กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking)

กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอน โดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นการรวมปฏิกิริยาเคมีเกี่ยวกับคาร์โบเนียมไอออนของกระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยากับปฏิกิริยาเคมีด้านการเติม ไฮโดรเจนผลก็คือ เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีแขนแตกแขนงมาก ปฏิกิริยาของพาราฟิน และแนพทีน เริ่มต้นจากการเกิดโอเลฟินขึ้นบริเวณที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว โอเลฟินก็จะไปทำให้เกิดคาร์โบเนียมไอออนที่บริเวณที่เป็นกรดต่อไป จากนั้นจะเกิดการแตกตัวแล้วจะเกิดการเติมไฮโดรเจนทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีอิ่มตัว นอกจากนั้นการเติมไฮโดรเจนบริเวณตำแหน่งที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยกำจัดโค้กซึ่งเป็นทำความสะอาดผิวของตัวเร่งปฏิกิริยานั่นเอง

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแล้วจะเป็นประเภทให้ความร้อน จึงทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ จึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิที่เพิ่มนี้ให้ดีเพราะถ้าคุมไม่อยู่อาจทำให้เกิดโค้ก และตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ



ภาพที่ 2.14 กระบวนการทางเคมีของเชื้อเพลิง

ภาพที่ 2.14 แสดงกระบวนการทางเคมีของเชื้อเพลิง ขั้นตอนนี้จะนำน้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์ขนาดความยาวสายโซ่น้ำมันดีเซล (diesel-range paraffins) มาแตกตัวด้วยไฮโดรเจนเพื่อให้ได้น้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์ขนาดความยาวสายโซ่น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน (kerosene-range paraffins) น้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผ่านขั้นตอนปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนจะถูกนำไปกลั่นทำให้ได้ผลผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน น้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซลสำหรับรถยนต์

2.10 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fuentes et al. [9] ศึกษาการแตกตัวและการเผาไหม้ของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วย thermogravimetric analysis (TGA) ในภาวะบรรยากาศไนโตรเจน และอัตราส่วนที่แตกต่างของไนโตรเจน:ออกซิเจน (N_2 และ $N_2: O_2$ ผสมที่อัตราส่วน 4:1 และ 9:1) น้ำหนักที่แตกต่าง (1.2.5 และ 5 มิลลิกรัม) และอัตราความร้อนที่แตกต่าง 5 10 และ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน การหาชนิดของสารประกอบที่ระเหยเป็นไอและสารประกอบกึ่งระเหยเป็นไอจากการแตกตัวและการเผาไหม้ของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจะดำเนินการที่ใน tubular reactor ที่อุณหภูมิ 500 และ 850 องศาเซลเซียส การแตกตัวและการเผาไหม้แสดงได้ 2 กระบวนการคือ ในกระบวนการแรกเป็นการระเหยเป็นไอของน้ำมันที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับมวลเริ่มต้นและอัตราความร้อน ส่วนในกระบวนการที่สองที่มีการสลายตัวซึ่งพบว่ากระบวนการในการเผาไหม้ต่างจากกระบวนการในการแตกตัว

Kim et al. [10] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นสำหรับยานยนต์ที่ใช้แล้วด้วย thermogravimetric analysis (TGA) โดยให้อัตราความร้อนที่ 0.50 1.00 และ 2.00 องศาเซลเซียสต่อนาทีในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่มีการหมุนวน พบว่าน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่แตกตัวที่อุณหภูมิระหว่าง 400-460 องศาเซลเซียส ตัวแปรที่สำคัญในการศึกษา คือ พลังงานกระตุ้น พบว่าพลังงานกระตุ้นนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อการสลายตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้น พลังงานกระตุ้นเท่ากับ 322.69 กิโลจูลต่อโมล ที่การเปลี่ยนแปลงเป็น 0.11-0.96 และอันดับของปฏิกิริยารวมเป็น 1.35 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันจะเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเมื่ออัตราการร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลของอัตราการร้อนที่มีต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมัน พบว่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันจะมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนคาร์บอนเล็กน้อยเมื่ออัตราการร้อนลดลงและผลการทดลองแสดงว่าพลังงานของการสลายตัวของสารอินทรีย์ลดลง และเป็นสาเหตุให้จำนวนคาร์บอนเพิ่มขึ้น

Kim et al. [11] ศึกษาถึงไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วทำให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว ดังนั้นรูปแบบของจลนพลศาสตร์ และลักษณะของการดูดซับของน้ำมันดิน ได้มีการศึกษาการทดลองโมเดลทางจลนพลศาสตร์ถูกสมมุติสำหรับกลไกของน้ำมันดิน เวลาที่เร็วที่สุดของน้ำมันดิน คือ 5 วันหลังจากไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว การทดลองไอโซเทอมของการดูดซับทำโดยเลือกตัวดูดซับที่ดีที่สุดสำหรับ 5 วัน พบว่าถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับอย่างเด่นชัดท่ามกลางตัวดูดซับตัวอื่นที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ การทดลองการดูดซับของน้ำมันดิน จะเห็นว่าถ่านกัมมันต์ช่วยปรับปรุง the optical intensity ของน้ำมันที่ได้จากการแตกตัว และลดสารประกอบออกซิเจนในน้ำมันที่ได้จากการแตกตัว ผลการทดลองของการวิเคราะห์ธาตุสนับสนุนการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันที่ได้จากการแตกตัว

คุณธานี ปิ่นเวหา [14] ศึกษาถึงกระบวนการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว โดยทำการทดลอง ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร กระบวนการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วนี้จะทำการศึกษาที่ภาวะอุณหภูมิ 410-450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก ปริมาณสารตั้งต้นจำนวน 20 กรัม ใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณและองค์ประกอบของน้ำมันที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง simulate distillation gas chromatography (DGC) ภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว คือที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 46 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.12 โดยน้ำหนัก ซึ่งในภาวะการทดลองข้างต้นจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 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 และพบว่ามีหมู่ฟังก์ชันหลักเป็นพวกแอมโรแมติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเมื่อเทียบกับหมู่ฟังก์ชันหลักใน น้ำมันเบนซินออกเทน 95 แล้วพบว่ามีหมู่แอมโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่คล้ายกัน

กมลวรรณ กิ่งพุทธรพงษ์ และ คณะ [15] ศึกษาถึงการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิเนียมเอชเอ็มเอส โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันหล่อลื่นต่อตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 10:1 เวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 30, 45, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ พบว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ร้อยละการให้ผลิตภัณฑ์ของของเหลว

และแก๊สมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นและส่วนที่เหลือมีปริมาณลดลง และเมื่อผสมตัวเร่งปฏิกิริยาบีตาลงไป ร้อยละห้าโดยน้ำหนักในตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิเนียม HMS พบว่ามีความแตกต่างของปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้เพียงเล็กน้อย

จินตนา สุมารินทร์ [16] ศึกษาถึงการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ ปฏิกิริยาดำเนินไปภายใต้อุณหภูมิ 390-450 องศาเซลเซียส อัตราเร็วการไหลเข้าของสาร 0.34-3.30 กรัมต่อนาที ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เติมลงไป 3-10 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1-10 โดยน้ำหนัก พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิ 430 ถึง 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 2.77 กรัมต่อนาที ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เติมลงไป 10 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งที่ใช้ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันร้อยละ 57.21-57.36 ของผลิตภัณฑ์รวม

นิทัศน์ วงษ์สวัสดิ์ [17] ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ และ แมกนีเซียมออกไซด์ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 1,250 มิลลิลิตร ใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทดลองที่อุณหภูมิ 390-440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 2-5 กรัมต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก นำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มาทดสอบปริมาณของน้ำมันชนิดเบาที่เกิดขึ้นด้วย simulated distillation gas chromatography (DGC) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 424 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2.21 กรัมต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดจากการแตกตัวร้อยละ 32.26 โดยน้ำหนัก มีปริมาณเนฟทาและดีเซลร้อยละ 11.54 และ 9.96 ตามลำดับ ส่วนภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 422 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2.9 กรัมต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดจากการแตกตัวร้อยละ 31.19 โดยน้ำหนัก มีปริมาณเนฟทาและดีเซลร้อยละ 12.16 และ 11.18 ตามลำดับ

วิษขากร จารุศิริ [18] ศึกษาการแปรรูปน้ำมันพืช น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และพลาสติกใช้แล้วให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนและด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการ

ทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงประกอบด้วย อุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน และอัตราการไหลของสารป้อนเข้า ได้แก่ น้ำมันพืช น้ำมันหล่อลื่น และพอลิพรอพิลีน อัตราส่วน 0.7 ต่อ 0.1 ต่อ 0.2 เมื่อนำผลิตภัณฑ์ของเหลวมาวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น พบว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 5 มิลลิเมตรต่อนาทีก อัตราการไหลของสารป้อนเข้า 1.23 กรัมต่อนาทีก บนตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ ให้ร้อยละของแกโซลีนสูงที่สุดร้อยละ 50.95 เคโรซีนร้อยละ 10.38 แก๊สออยล์ร้อยละ 21.68 และกากน้ำมันร้อยละ 16.99 โดยน้ำหนัก

อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล [19] ศึกษาการเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โคบอลต์และโมลิดินัมบนอะลูมินา และ HZSM-5 ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กรูปทรงกระบอก โดยใช้ความดันของแก๊สไฮโดรเจนในช่วง 5 ถึง 10 บาร์ อุณหภูมิระหว่าง 375-425 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 10-90 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โคบอลต์และโมลิดินัมบนอะลูมินา อยู่ในช่วงร้อยละ 1.00-5.00 โดยน้ำหนัก และ HZSM-5 อยู่ในช่วงร้อยละ 0.10-10.00 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นคืออุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และระยะเวลา โดยเมื่อเพิ่มปัจจัยทั้งสามจะพบว่าแก๊สผลิตภัณฑ์ แกโซลีน เคโรซีนและแก๊สออยล์เบาที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยภาวะที่ให้แกโซลีนสูงสุดคือที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ความดัน 5 บาร์ ระยะเวลา 60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โคบอลต์ และ โมลิดินัมบนอะลูมินา ร้อยละ 5.00 โดยน้ำหนัก และ HZSM-5 ร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นยังพบว่าเหล็กบนถ่านกัมมันต์ให้ปริมาณแกโซลีนสูงสุด

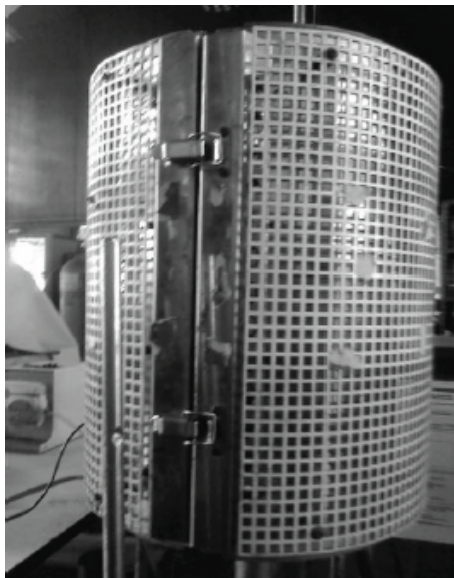
จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่นำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวจะทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ แต่ในงานวิจัยนี้เป็นการนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเหลวในเชิงพาณิชย์ต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เตาเผาอุณหภูมิสูง (tubular furnace) โดยมีลักษณะของเตาเผาอุณหภูมิสูงเป็นทรงกระบอกกลวง ให้ความร้อนได้สูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 เตาเผาอุณหภูมิสูง

2. เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10.5 เซนติเมตร และมีความยาว 19.5 เซนติเมตร

3. ชุดลดอุณหภูมิ (condenser) เพื่อลดอุณหภูมิของสารผลิตภัณฑ์และควบแน่นแก๊สที่เกิดขึ้น

4. ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล (temperature control) ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสไฟไปยังขดลวดความร้อนและตัดการจ่ายกระแสไฟเมื่อได้อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้

5. เทอร์โมคัพเพิล (thermocouple) ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิจริงภายในเครื่องปฏิกรณ์ เป็นชนิดเค (K-type) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร

6. ปั๊มเพอริสแตติก (peristaltic pump) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์
7. สายยาง masterflex ต่อเข้ากับปั๊มเพอริสแตติก
8. ไขพัดปั่นกวน (motor stirrer) ทำหน้าที่กวนให้สารตั้งต้นมีอัตราส่วนที่เสมอกันตลอดทั่วทั้งเครื่องปฏิกรณ์
9. นาฬิกาจับเวลา
10. เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
11. เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
12. ตู้อบ (dry oven) เพื่ออบไล่ความชื้นของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดที่ใช้ในงานวิจัย
13. ตู้ดูดความชื้น (desiccator)
14. ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ ประกอบด้วย เครื่องแก้วต่อกับเครื่องดูดอากาศ เพื่อกรองแยกแบบสุญญากาศ สำหรับแยกส่วนของกากน้ำมันในเครื่องปฏิกรณ์ออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็งโดยผ่านการกรองโดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ชุดกรองสุญญากาศ

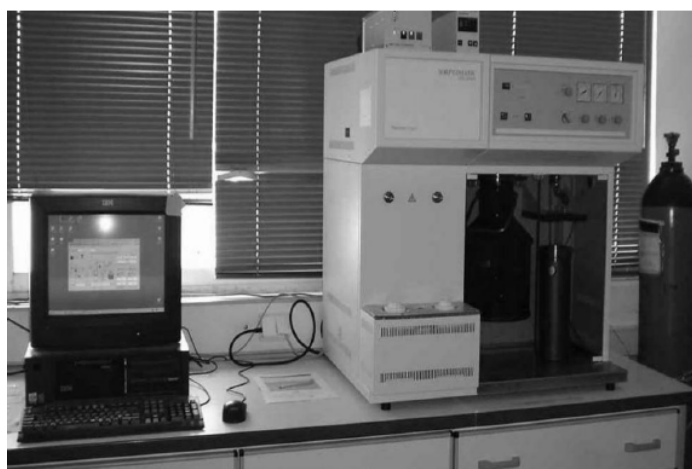
15. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (simulated distillation) พร้อมเครื่องตรวจวิเคราะห์แบบ FID และคอลัมน์ CP-SIL5CP สำหรับ

วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวตามคาบจุดเดือด โดยวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D2887 ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น (simulated distillation gas chromatography: Varian CP-3800)

16. เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (BET surface area) รุ่น ASAP 2020 สำหรับวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยานิคกรด โดยการวัดพื้นที่ผิวภายในที่มีความพรุน ทำได้โดยการศึกษาการดูดซับของแก๊สที่มีขนาดเล็ก เช่น แก๊สไนโตรเจนหรืออาร์กอน ใช้หลักการของไอโซเทิร์มของการดูดซับทางกายภาพ หรือวิธีบีอีที (BET = Brunauer-Emmett-Teller Method) ที่อุณหภูมิของแก๊สเหลว ซึ่งขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ โดยการหาจำนวนโมเลกุลที่ใช้ในการเกิดการดูดซับชั้นเดียวสามารถนำมาหาพื้นที่ผิวภายในได้ ดังภาพที่ 3.4



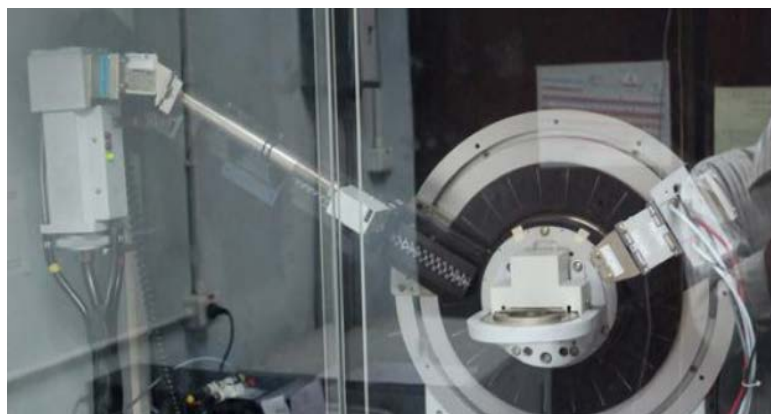
ภาพที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (BET surface area)

17. เครื่อง X-Ray fluorescence spectrometer (XRF) ใช้วิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยหลักการของการเปลวเบนรังสีเอ็กซ์พลังงานสูงเข้าไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมาและโฟตอนที่ปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดกันในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่นหรือพลังงานเฉพาะสำหรับธาตุนั้น จึงทำให้สามารถบอกชนิดของธาตุและปริมาณที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่อง X-Ray fluorescence spectrometry (XRF)

18. เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ใช้บ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของสารนั้น ๆ โดยอาศัยหลักการเปลวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่าง ๆ กัน ผลจากการวิเคราะห์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเพื่อระบุวิฤภาคขององค์ประกอบของสารตัวอย่าง และการที่สารตัวอย่างมีโครงสร้างหรือสารประกอบที่แตกต่างกัน ทำให้การเปลวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดในมุมที่มิต่างกัน ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 เครื่อง X-ray diffractometer (XRD)

19. เครื่อง gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) ของบริษัท Shimadzu รุ่น GC 2010 โดยมีเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น GCMSQP2010 เป็นดีเทคเตอร์ ใช้ capillary column ของบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น DB-1 ขนาด 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร มี 100% dimethylpolysiloxane หนา 0.25 ไมโครเมตรเป็นวัสดุภาคนิ่ง ซึ่งสามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 350 องศาเซลเซียส ใช้ในการทำนายชนิดขององค์ประกอบที่มีในผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยอาศัยการเปรียบเทียบ Fingerprint ของเลขมวล (mass number) ขององค์ประกอบนั้น ๆ ที่ตรวจวัดได้กับข้อมูลที่มีอยู่ใน Library และยังสามารถใช้วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพได้ ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่อง gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)

20. เครื่อง chemisorption analyzer อาศัยหลักการของการดูดซับทางเคมี (chemisorption) และการคายซับ (desorption) ระหว่าง probe molecules ของ NH_3 กับตำแหน่งที่ว่างไว้ (active sites) บนพื้นผิวหรือรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา และโปรแกรมที่ใช้ คือ temperature-programmed desorption (TPD) เพื่อวิเคราะห์หาค่าความแรงของตำแหน่งที่เป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเครื่องนี้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณซึ่งจะได้ข้อมูลเป็นปริมาณของตำแหน่งที่ว่างไว้ในแต่ละชนิดและในเชิงคุณภาพจะได้ข้อมูลเป็นชนิดของตำแหน่งที่ว่างไว้ ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 เครื่อง chemisorption analyzer รุ่น Micromeritics AutoChem II 2920

3.2 สารตัวอย่างและสารเคมี

1. น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว จากร้านบี-คิว จังหวัดกรุงเทพฯ จำนวน 5 ลิตร เก็บตัวอย่างในเดือนกันยายน 2554 และควรเติมแก๊สไนโตรเจนเพื่อป้องกันการเกิดออกซิไดซ์
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว จากบริษัท ไทยออยล์ จำกัด
3. Toluene (commercial grade ที่มีความบริสุทธิ์ 80%) จากบริษัท MERCK
4. Tetrahydrofuran (AR grade) จากบริษัท MERCK

3.3 การดำเนินการวิจัย

1. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีในเชิงคุณภาพและปริมาณของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วก่อนการทดลอง
2. วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ได้แก่ องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค X-Ray fluorescence spectrometry (XRF) วิเคราะห์โครงสร้างของผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค X-Ray diffraction และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค BET
3. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนการทดลองดังนี้

3.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่อุณหภูมิตั้งแต่ 380-420 องศาเซลเซียส

3.2 ศึกษาอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่มีผลต่อไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วตั้งแต่ 2-4 กรัมต่อนาที

3.3 ศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่ร้อยละ 1 - 5 โดยน้ำหนัก

4. ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (factorial design) โดยกำหนดตัวแปรที่มีสองระดับ และทำการทดลองครบทุกการทดลอง ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษามี 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด คือ 2^3 หรือ 8 การทดลอง จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการทดลอง อย่างมีนัยสำคัญ และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการทดสอบสมมติฐานของความ เป็นปกติโดยการสร้าง normal probability plot และการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (residue plot)

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี

ตัวแปร	ระดับ		หน่วย	
	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)		
A =	อุณหภูมิ	380	420	องศาเซลเซียส
B =	อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น	2	4	กรัมต่อนาที
C =	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	1	5	ร้อยละ โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลองจากการออกแบบแฟคทอเรียลสองระดับ

การทดลอง	ตัวแปร		
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) A	อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น (กรัมต่อนาที) B	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก) C
1.1	380	2	1
1.2			
2.1	420	2	1
2.2			
3.1	380	4	1
3.2			
4.1	380	2	5
4.2			
5.1	420	4	1
5.2			
6.1	380	4	5
6.2			
7.1	420	2	5
7.2			
8.1	420	4	5
8.2			
9.1	400	3	3
9.2			
9.3			

5. นำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี พร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น เพื่อหาค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือด

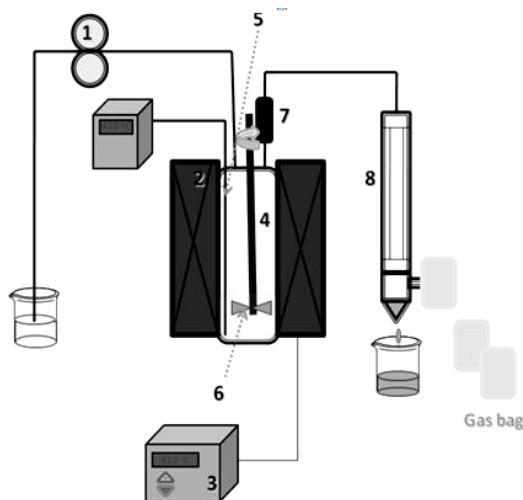
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบและสารตั้งต้น

1. วิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วก่อนไพโรไลซิสด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น
2. นำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนการเผาไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเทคนิค X-Ray fluorescence spectrometry (XRF) เทคนิค X-Ray diffractometer (XRD) วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว (surface area) โดยใช้เทคนิค BET และวิเคราะห์ความแรงของตำแหน่งกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเทคนิค NH_3 -TPD
3. นำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
4. นำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วหลังการเผาไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเทคนิค X-Ray fluorescence spectrometry (XRF) เทคนิค X-Ray diffractometer (XRD) วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว (surface area) โดยใช้เทคนิค BET และวิเคราะห์ความแรงของตำแหน่งกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเทคนิค NH_3 -TPD เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนการเผา

3.4.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. เตรียมสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาตามสภาวะการทดลองที่กำหนด โดยชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่งตลอดการทดลอง และใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมลงในเครื่องปฏิกรณ์
2. ติดตั้งชุดเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับส่วนประกอบต่าง ๆ โดยใส่เครื่องปฏิกรณ์ในเตาเผาอุณหภูมิสูง สารตั้งต้นจะถูกป้อนและควบคุมอัตราการป้อนเข้าด้วยปั๊มเพอริสแตติก และด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ต่อกับเทอร์โมคัพเพิลเพื่อวัดอุณหภูมิจริงภายในเตา และต่อกับ reflux และถูกลดอุณหภูมิโดยเครื่องลดอุณหภูมิ (condenser) ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สควบแน่นมากลายเป็นน้ำมันเหลว ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 ชุดทดลองประกอบด้วย 1) ปั๊มเพอริสแตติก (peristaltic pump) 2) เตาเผาอุณหภูมิสูง 3) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล 4) เครื่องปฏิกรณ์ 5) เทอร์โมคัพเพิล (thermocouple) 6) ไบกวน 7) รีฟลักซ์ (reflux) 8) ชุดลดอุณหภูมิ (condenser)

3. ให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์จนกระทั่งถึงอุณหภูมิตามสภาวะการทดลองที่กำหนด โดยความร้อนที่ให้กับเครื่องปฏิกรณ์จะไปไล่ออกซิเจนที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ทำให้ภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่มีออกซิเจน และเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงตามที่จะทำการทดลองรอให้อุณหภูมิคงที่ประมาณ 20 นาที

4. ป้อนสารตั้งต้นเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยใช้ปั๊มเพอริสแตติก ที่ต่อสายยาง masterflex เข้ากับปั๊มเพอริสแตติก ปลายสายยางอยู่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิเมตรที่บรรจุสารป้อน ปลายสายยางอีกข้างต่อเข้ากับท่อที่ต่อกับเครื่องปฏิกรณ์ รอจนกระทั่งสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งไอของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์จะลอยขึ้นด้านบนที่ต่อกับ reflux และถูกลดอุณหภูมิโดยเครื่องลดอุณหภูมิ (condenser) กลายเป็นผลิตภัณฑ์เหลวและแก๊ส

5. เมื่อเกิดผลิตภัณฑ์น้ำมันขึ้นนับจากผลิตภัณฑ์เริ่มไหลเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ทั้งหมดด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

6. นำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันในช่วงคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น

7. นำกากน้ำมันที่เหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ไปกรองด้วยเตตระไฮโดรฟูเรนเพื่อแยกของแข็งออกจากกากน้ำมัน

8. คำนวณร้อยละการเปลี่ยนของสารตั้งต้น จากสูตร

$$\text{ร้อยละผลได้ของของเหลว (\%Liquid yield)} = \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดขึ้น} \times 100}{\text{น้ำหนักสารตั้งต้นที่เริ่มต้น}}$$

ร้อยละผลได้เนฟทา (%Overall naphtha yield)

$$= \frac{\text{ร้อยละผลได้ของของเหลว} \times \text{ร้อยละผลได้เนฟทาจาก DGC}}{100}$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมาจากอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบที่เป็นแนฟทากับดีเซล งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมเป็นแบบแฟกทอเรียล (2^k experimental design) เพื่อศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยตัวแปรที่ศึกษามี 2 ระดับ คือ ระดับสูง และระดับต่ำ ประกอบด้วย อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ตลอดจนผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น

4.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วก่อนไพโรไลซิสด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (DGC) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

จุดเดือด	องค์ประกอบ	%Recovered
IBP-200°C	Naphtha (C ₅ -C ₁₂)	0.00
200°C-250°C	Kerosene (C ₁₂ -C ₁₅)	0.00
250°C-350°C	Light gas oil (C ₁₅ -C ₂₅)	5.00
350°C-370°C	Gas oil (C ₂₅ -C ₃₃)	3.00
370°C-FBP	Long residue (>C ₃₃)	92.00

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วก่อนไพโรไลซิส เมื่อวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (DGC) พบว่ามีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกาน้ำมันมากถึงร้อยละ 92.00 โดยน้ำหนัก ทำให้เห็นว่าน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่นำมาใช้ในการทดลองมีสารที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่และไม่พบปริมาณองค์ประกอบที่เป็นเนฟทา

2. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

สมบัติทางกายภาพ	
ความหนืด (40°C) (mm ² /s) : ASTM D2270	128
ค่าความร้อน (KJ/kg)	44911

ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่าน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมีความหนืดสูง ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนโดยตรง ต้องผ่านกระบวนการแปรรูปหรือปฏิกิริยาทางเคมี เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถใช้ทดแทนได้

4.1.2 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว

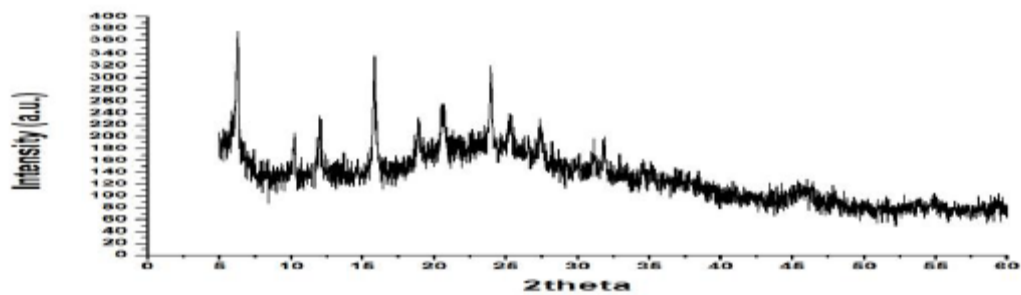
1. การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผาด้วยเทคนิค X-Ray fluorescence spectrometer (XRF)

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง [14]

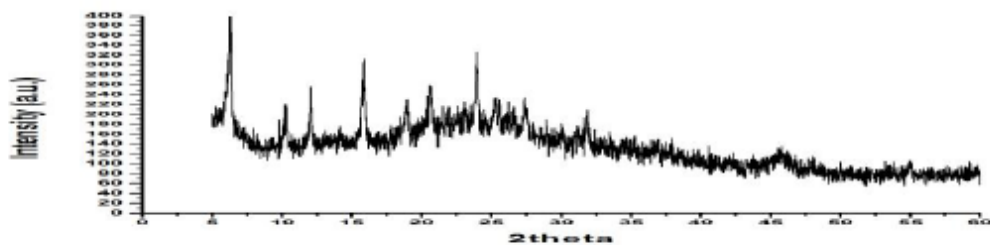
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว		ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Na	0.58	Na	0.31
Al	42.07	Al	40.30
Si	40.13	Si	42.03
P	0.12	P	0.20
S	0.30	S	0.49
K	0.32	K	0.24
Ca	0.40	Ca	0.37
Ti	2.67	Ti	3.08
V	0.34	V	0.34
Mn	0.20	Mn	0.19
Fe	3.12	Fe	3.29
Ni	1.65	Ni	1.27
Cu	0.08	Cu	0.11
Zn	0.07	Zn	0.07
La	6.29	La	7.06
Ge	0.49	Ge	0.64
Ga	0.04	Ga	0.02

ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค XRF พบว่าในตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผา มีปริมาณธาตุ Si และ Al ที่มาก

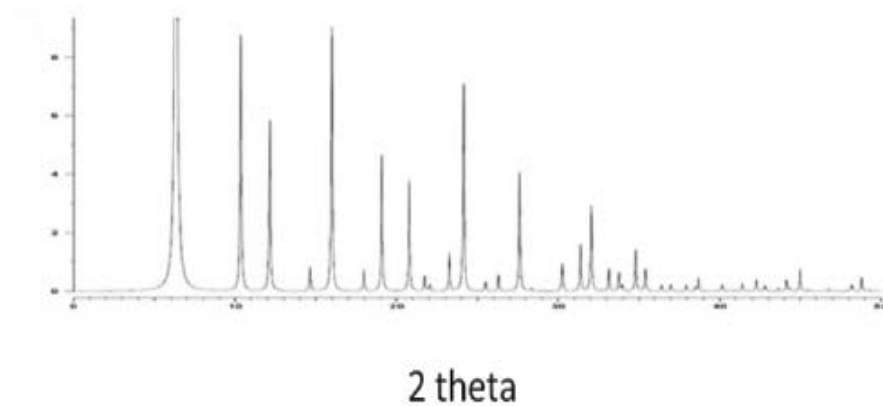
2. การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผาด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)



ภาพที่ 4.1 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วก่อนการเผา [14]



ภาพที่ 4.2 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส [14]



ภาพที่ 4.3 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ultrastable Y, Dehydrated Dealuminated [14]

ภาพที่ 4.1 และ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผาตามลำดับ พบว่าลักษณะของ peak ที่ปรากฏในภาพมีความใกล้เคียงกับลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาในภาพที่ 4.3 ซึ่งคือ Ultrastable Y, Dehydrated Dealuminated จึงทำให้สามารถระบุได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วนั้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ประเภท USY

3. การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผาด้วยเทคนิค BET

ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนและหลังการเผา [14]

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (S_{BET}) ตารางเมตร/กรัม	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average Pore Size) นาโนเมตร	ปริมาตรรูพรุน (Pore Volume) ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ใช้แล้ว	79.84	6.92	0.13
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	103.65	8.89	0.15

จากตารางที่ 4.4 แสดงพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผาด้วยเทคนิค BET พบว่าการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วมาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จะทำให้พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดสูงขึ้น เนื่องจากการเผาเป็นการกำจัดไค้กและสารปนเปื้อนบางส่วนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาแล้วไปติดค้างบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

4. การวิเคราะห์ความแรงของตำแหน่งกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผา โดยใช้เทคนิค NH_3 temperature-programmed desorption

ตารางที่ 4.5 ความแรงของตำแหน่งกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผา [14]

ตัวอย่าง	ความแรงของตำแหน่งกรด (mmol H ⁺ /g)
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	0.22
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	0.36

4.1.3 การกำหนดภาวะที่ใช้ในไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี

ภาวะที่เลือกใช้ในการทดลองคือ อุณหภูมิ 380–420 องศาเซลเซียส การเลือกช่วงอุณหภูมิ ตั้งแต่ 380 องศาเซลเซียสขึ้นไปนั้น เนื่องจากได้ทำการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่อุณหภูมิต่ำกว่า 380 องศาเซลเซียส พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณน้อยมาก เนื่องจากไอของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นไม่มากพอจะควบแน่นออกมา จึงทำการทดลองที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น คือ 380 องศาเซลเซียสขึ้นไปพบว่าไม่เกิดปัญหาดังกล่าว แต่เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 420 องศาเซลเซียส พบว่าเกิดการแยกสลายไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่มากซึ่งในงานวิจัยต้องการผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันจึงไม่ตรงตามวัตถุประสงค์และเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน การเลือกอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2-4 กรัมต่อนาที เนื่องจากได้ทำการทดลองอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 1 กรัมต่อนาที พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีปริมาณน้อยมาก เกิดจากไอของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ไม่มากพอจะควบแน่นออกมา และเมื่อทำการทดลองอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่มากกว่า 4 กรัมต่อนาที พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีปริมาณลดลง เนื่องมาจากน้ำมันที่ป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มากเกินไปจนสิ้นเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้การถ่ายโอนความร้อนจากผนังเครื่องปฏิกรณ์มายังน้ำมันป้อนเข้าเกิดขึ้นได้ไม่ทั่วถึง และการเลือกปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาช่วงปริมาณร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติการเลือกจำเพาะสูง ทำให้สามารถเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบตามต้องการได้ และมีบทบาทในการช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการแยกสลายได้เร็วขึ้น แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่มากเกินไปส่งผลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น เพราะตัวเร่งปฏิกิริยามีตำแหน่งว่างไว้ในปริมาณที่มาก และสำหรับการเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากในโรงกลั่นน้ำมันทั่วไปจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี

เพื่อเปลี่ยนเนฟทาให้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สโอเลฟิน ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจึงเกิดการเสื่อมสภาพโดยสูญเสียความว่องไวและการเลือกจำเพาะเป็นผลมาจากสิ่งเจือปน ฝุ่นผงหรือพวกคาร์บอนที่เกิดจากปฏิกิริยามาเกาะหรือไปอุดตันที่รูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา จึงทำให้ความสามารถในการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการในงานวิจัยที่ต้องการให้เกิดแก๊สน้อยแต่ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันที่มาก ด้วยเหตุนี้จึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วมาใช้ในงานวิจัย โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วไปฟื้นฟูสภาพด้วยความร้อนหรือนำไปเผา เพื่อกำจัดโค้กและสารปนเปื้อนจากทำปฏิกิริยาแล้วไปติดค้างบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.2 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี

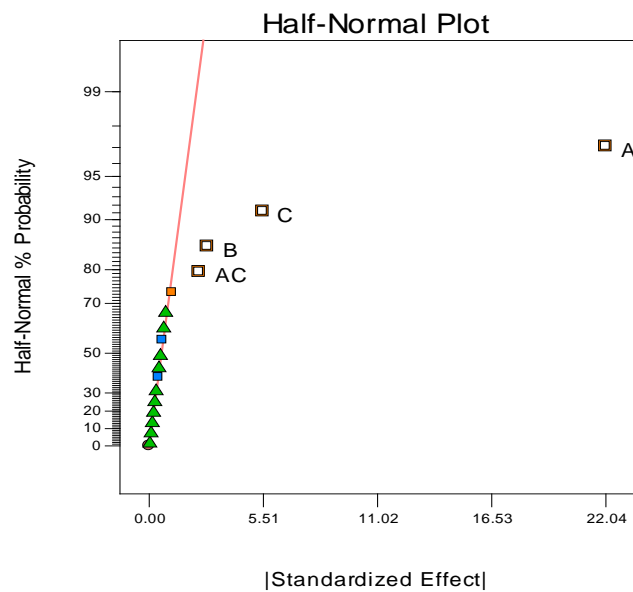
4.2.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมเป็นแบบแฟกทอเรียล (2^k experimental design) เพื่อศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยตัวแปรที่ได้ทำการศึกษามี 2 ระดับ คือ ระดับสูง และระดับต่ำ จากนั้นทำการทดลองซ้ำครบทุกการทดลอง ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้จำนวนการทดลองทั้งหมดคือ 2^3 หรือ 8 การทดลอง และมีการทำการทดลองซ้ำ ผลของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วงร้อยละ 51.49 – 83.12 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.6 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ภาวะต่าง ๆ จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2^3 factorial design)

การทดลอง	ตัวแปร			ร้อยละผลได้ ของ ผลิตภัณฑ์ น้ำมัน	ค่าเฉลี่ยของ ร้อยละผลได้ ผลิตภัณฑ์ น้ำมัน
	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลเข้า ของสารตั้งต้น (g/min)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (%wt)		
1.1	380	2	1	52.69	52.09
1.2				51.49	
2.1	420	2	1	70.85	70.16
2.2				69.47	
3.1	380	4	1	53.66	53.99
3.2				54.32	
4.1	380	2	5	54.70	55.36
4.2				56.02	
5.1	420	4	1	76.79	75.18
5.2				73.57	
6.1	380	4	5	58.12	56.88
6.2				55.64	
7.1	420	2	5	80.95	79.16
7.2				77.37	

การทดลอง	ตัวแปร			ร้อยละผลได้ ของ ผลิตภัณฑ์ น้ำมัน	ค่าเฉลี่ยของ ร้อยละผลได้ ผลิตภัณฑ์ น้ำมัน
	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลเข้า ของสารตั้งต้น (g/min)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (%wt)		
8.1	420	4	5	83.12	81.99
8.2				80.86	
9.1	400	3	3	54.73	56.56
9.2				58.14	
9.3				56.80	

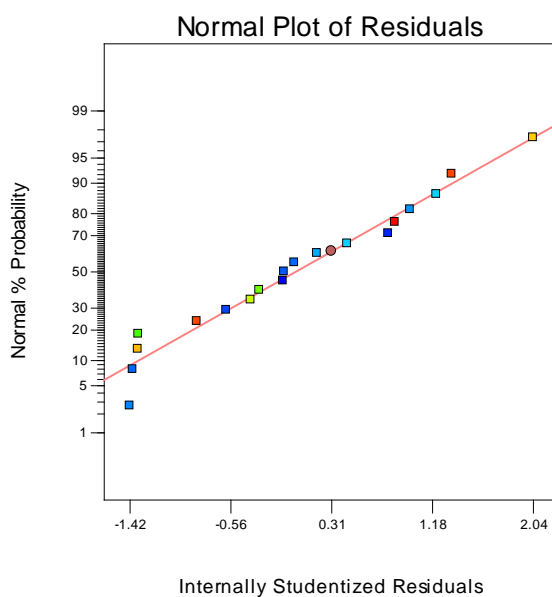


ภาพที่ 4.4 half normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากไพโรไลซิส
น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพีซีซี

ตารางที่ 4.7 ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob>F Value
Model	2119.19	4	529.80	207.06	< 0.0001
A	1943.49	1	1943.49	759.59	< 0.0001
B	31.75	1	31.75	12.41	0.0037
C	120.67	1	120.67	47.16	< 0.0001
AC	23.28	1	23.28	9.10	0.0099
Curvature	206.66	1	206.66	80.77	< 0.0001
Residual	33.26	13	2.56		
Total	2359.12	18			

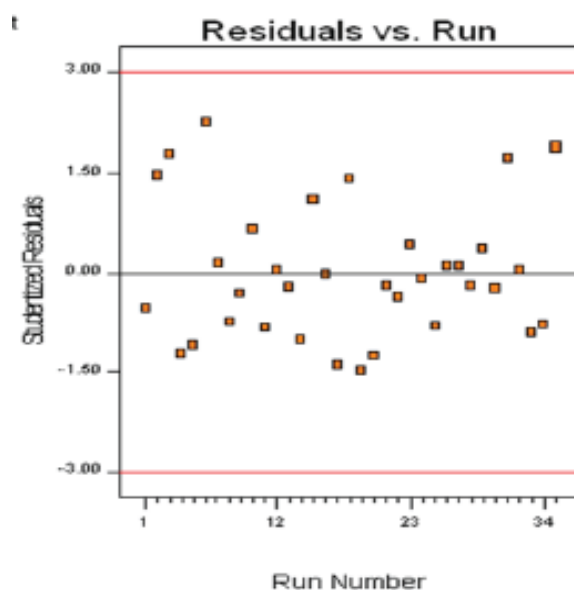
ภาพที่ 4.4 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่นำมาสร้างเป็น half normal probability plot พบว่าตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงมาก คือ อุณหภูมิ (A) อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น (B) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (C) และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (AC) แสดงให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อตรวจสอบผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตาราง 4.7 จะบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ซึ่งพบว่า อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จึงเป็นการยืนยันได้ว่าอุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.5 normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

ภาพที่ 4.5 แสดง normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี เป็นการตรวจสอบความถูกต้องโดยการวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่เหลือจากข้อมูลที่สามารถทำนายได้ โดยนำค่าจริงจากการทดลองลบด้วยค่าจากการคาดเดา ไปพล็อตส่วนตกค้างกับค่า half normal probability plot และลำดับการทดลอง เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลในการทดลองมีความน่าเชื่อถือหรือไม่ ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าค่าส่วนตกค้างสำหรับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีการเรียงตัวเป็นเส้นตรงจึงทำให้สรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติจริง นอกจากนี้ยังสามารถหาสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันกับปัจจัยดังกล่าว เพื่อใช้ในการทำนายค่าร้อยละผลได้ของน้ำมัน ดังสมการ

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน} = -126.98188 + 0.46059A + 1.40875B - 10.68937C + 0.030156AC$$



ภาพที่ 4.6 ค่าส่วนตกค้างและลำดับการทดลองของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี

ภาพที่ 4.6 แสดงค่าส่วนตกค้างกับลำดับการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) ของผลการทดลอง พบว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างที่สัมพันธ์กับลำดับของการทำการทดลองของชุดการทดลองทั้งหมดเป็นการกระจายตัวแบบไร้รูปแบบ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน แสดงว่ากระบวนการทำการทดลองเป็นแบบสุ่มสมบูรณ์ทำให้ค่าผิดพลาดต่าง ๆ ที่เกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้กระจายตัวเข้าถึงทุกหน่วยของการทดลองอย่างเท่าเทียมกัน

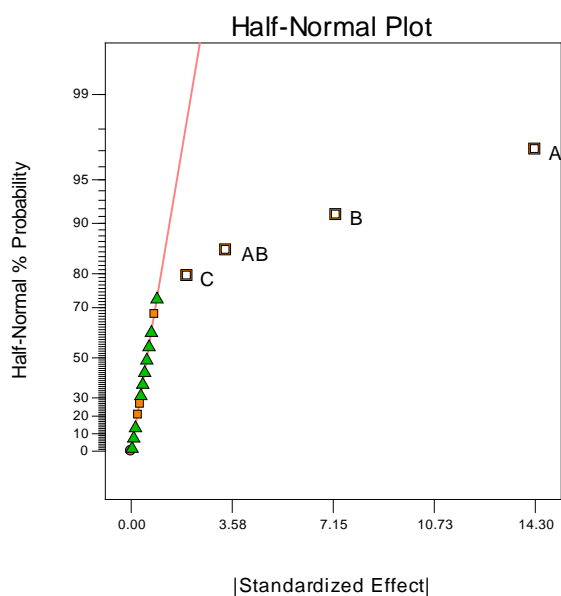
4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทาที่ได้จากไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี

จากการศึกษาไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2^3 factorial design) และมีการทำการทดลองซ้ำ แสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทาอยู่ในช่วงร้อยละ 16.32 – 41.74 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.8 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทาที่ภาวะต่าง ๆ จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2^3 factorial design)

การทดลอง	ตัวแปร			ร้อยละผลได้ของแนฟทา	ค่าเฉลี่ยของร้อยละผลได้ของแนฟทา
	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น (g/min)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)		
1.1	380	2	1	18.06	17.19
1.2				16.32	
2.1	420	2	1	27.52	28.06
2.2				28.60	
3.1	380	4	1	21.96	20.51
3.2				19.06	
4.1	380	2	5	19.57	18.27
4.2				16.97	
5.1	420	4	1	36.28	37.59
5.2				38.90	
6.1	380	4	5	24.03	22.75
6.2				21.47	
7.1	420	2	5	28.32	29.29
7.2				30.26	

การทดลอง	ตัวแปร			ร้อยละผลได้ของเนฟทา	ค่าเฉลี่ยของร้อยละผลได้ของเนฟทา
	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น (g/min)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)		
8.1	420	4	5	40.26	41.00
8.2				41.74	
9.1	400	3	3	22.98	20.78
9.2				20.06	
9.3				19.31	

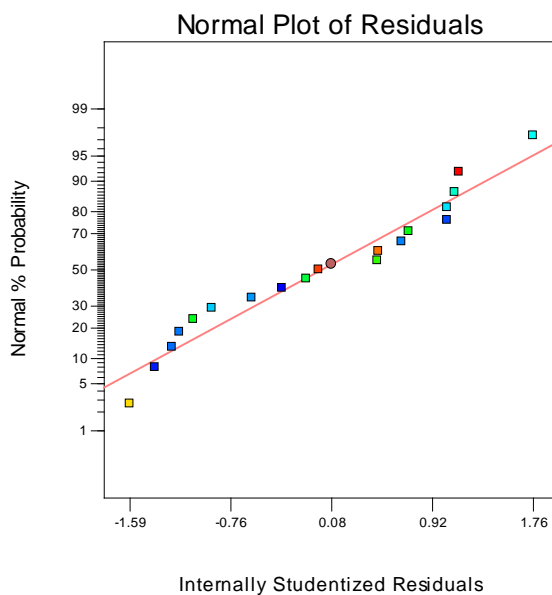


ภาพที่ 4.7 half normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทาที่ได้จากไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

ตารางที่ 4.9 ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทาที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob >F Value
Model	1090.36	4	272.59	116.68	< 0.0001
A	818.53	1	818.53	350.35	< 0.0001
B	210.83	1	210.83	90.24	< 0.0001
C	15.84	1	15.84	6.78	< 0.0001
AB	45.16	1	45.16	19.33	0.0099
Curvature	92.44	1	92.44	39.57	< 0.0001
Residual	30.37	13	2.34		
Total	1213.18	18			

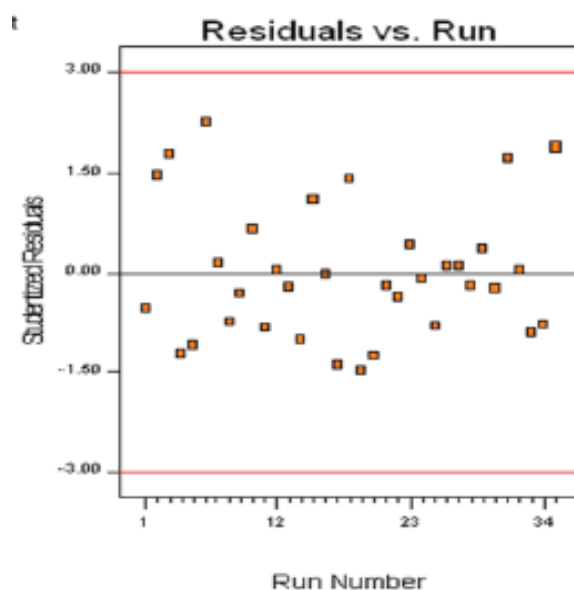
ภาพที่ 4.7 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่นำมาสร้างเป็น half normal probability plot พบว่าตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงมาก ได้แก่ อุณหภูมิ (A) อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น (B) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (C) และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น (AB) แสดงให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทาจากไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี และเมื่อพิจารณาตารางที่ 4.9 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทา พบว่า อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทา จึงเป็นการยืนยันได้ว่า อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทา อย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.8 normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทาที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

ภาพที่ 4.8 แสดง normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทาที่ได้จากไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี เป็นการตรวจสอบความถูกต้องโดยวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่เหลือจากข้อมูลที่สามารถทำนายได้ ส่วนตกค้างหาได้จากการนำค่าจริงจากการทดลองลบด้วยค่าจากการคาดเดา แล้วพล็อตส่วนตกค้างกับค่า half normal probability plot และลำดับการทดลอง เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลในการทดลองมีความน่าเชื่อถือหรือไม่ พบว่าค่าส่วนตกค้างสำหรับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทามีการเรียงตัวเป็นเส้นตรงจึงทำให้สรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติจริง นอกจากนี้ยังสามารถหาสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทากับปัจจัยดังกล่าว เพื่อใช้ในการทำนายค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทา ดังสมการ

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทา} = -27.8 + 0.10562A - 29.97B + 0.49750C + 0.084AB$$



ภาพที่ 4.9 ค่าส่วนตกค้างและลำดับการทดลองของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทาที่ได้จากไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

จากภาพที่ 4.9 แสดงค่าส่วนตกค้างกับลำดับการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) ของผลการทดลอง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างที่สัมพันธ์กับลำดับของการทำการทดลองของชุดการทดลองทั้งหมดเป็นการกระจายตัวแบบไร้รูปแบบ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน แสดงว่ากระบวนการทำการทดลองเป็นแบบสุ่มสมบูรณ์ทำให้ค่าผิดพลาดต่าง ๆ ที่เกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้กระจายตัวเข้าถึงทุกหน่วยของการทดลองอย่างเท่าเทียมกัน

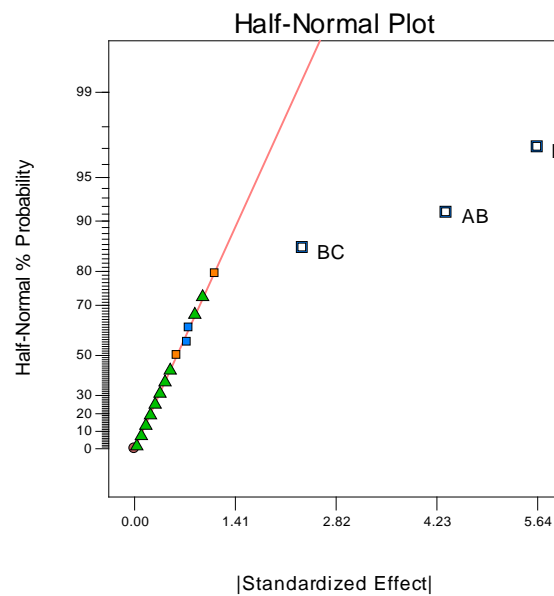
4.2.3 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

จากการศึกษาไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2^3 factorial design) และมีการทำการทดลองซ้ำ แสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลอยู่ในช่วงร้อยละ 10.12 – 24.39 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.10 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ภาวะต่าง ๆ จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2^3 factorial design)

การทดลอง	ตัวแปร			ร้อยละผลได้ของดีเซล	ค่าเฉลี่ยของร้อยละผลได้ของดีเซล
	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น (g/min)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)		
1.1	380	2	1	16.22	16.67
1.2				17.12	
2.1	420	2	1	18.37	18.94
2.2				19.51	
3.1	380	4	1	16.67	17.01
3.2				17.35	
4.1	380	2	5	19.43	18.82
4.2				18.21	
5.1	420	4	1	12.47	12.03
5.2				11.59	
6.1	380	4	5	15.29	15.93
6.2				16.57	
7.1	420	2	5	23.11	23.75
7.2				24.39	

การทดลอง	ตัวแปร			ร้อยละผลได้ ของดีเซล	ค่าเฉลี่ยของ ร้อยละผลได้ ของดีเซล
	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลเข้า ของสารตั้งต้น (g/min)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (%wt)		
8.1	420	4	5	11.20	10.66
8.2				10.12	
9.1	400	3	3	12.04	16.08
9.2				18.02	
9.3				18.18	



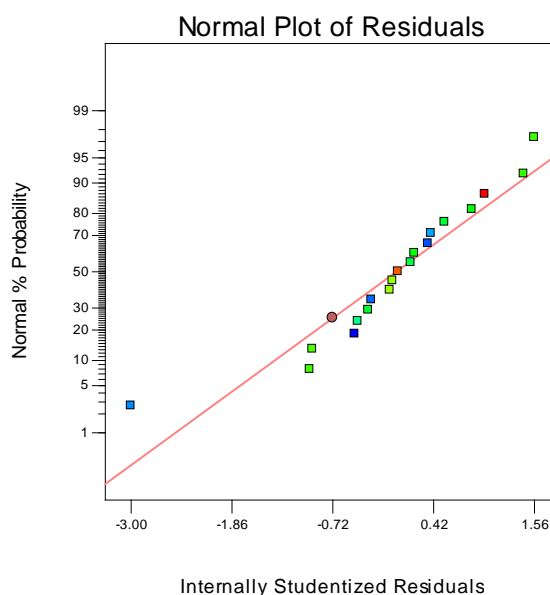
ภาพที่ 4.10 half normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

ตารางที่ 4.11 ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากไฟโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob >F Value
Model	232.80	5	46.56	17.08	< 0.0001
A	2.33	1	2.33	0.85	0.3739
B	127.13	1	127.13	46.63	< 0.0001
C	5.09	1	5.09	1.87	0.1971
AB	76.13	1	76.13	27.92	0.0002
BC	22.14	1	22.14	8.12	0.0146
Curvature	1.06	1	1.06	0.39	0.5455
Residual	32.71	12	2.73		
Total	266.57	18			

ภาพที่ 4.10 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่นำมาสร้างเป็น half normal probability plot พบว่าตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงมาก คือ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น (B) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น (AB) และอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (BC) แสดงให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลจากไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี และเมื่อพิจารณาตารางที่ 4.11 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความเพื่อบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซล พบว่า อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซล จึงเป็นการยืนยันได้ว่า อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อันตร

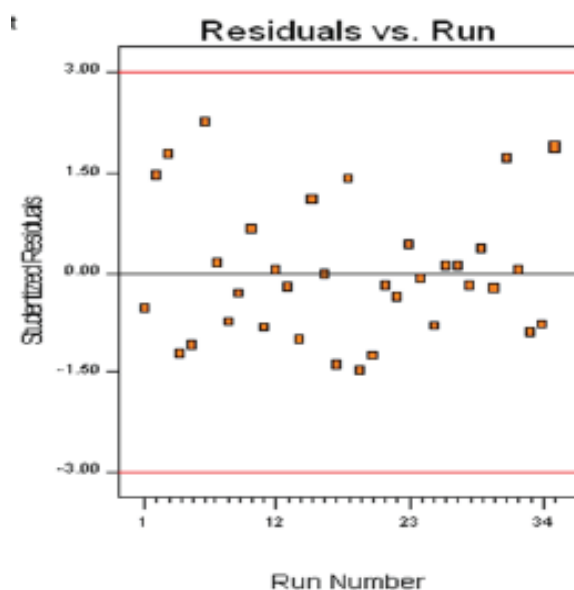
กิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.11 normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

จากภาพที่ 4.11 แสดง normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี ซึ่งเป็นการตรวจสอบความถูกต้องโดยการวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่เหลือจากข้อมูลที่สามารถทำนายได้ โดยส่วนตกค้างหาได้จากการนำค่าจริงจากการทดลองลบด้วยค่าจากการคาดเดา พล็อตส่วนตกค้างกับค่า half normal probability plot และลำดับการทดลอง เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลในการทดลองมีความน่าเชื่อถือหรือไม่ ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าค่าส่วนตกค้างสำหรับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลมีการเรียงตัวเป็นเส้นตรงบ่งบอกได้ว่าผลการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติจริง นอกจากนี้ยังสามารถหาสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลกับปัจจัยดังกล่าวเพื่อใช้ในการทำนายค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซล ดังสมการ

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซล} = 16.73 - 0.38A - 2.82B + 0.56C - 2.18AB - 1.18BC$$



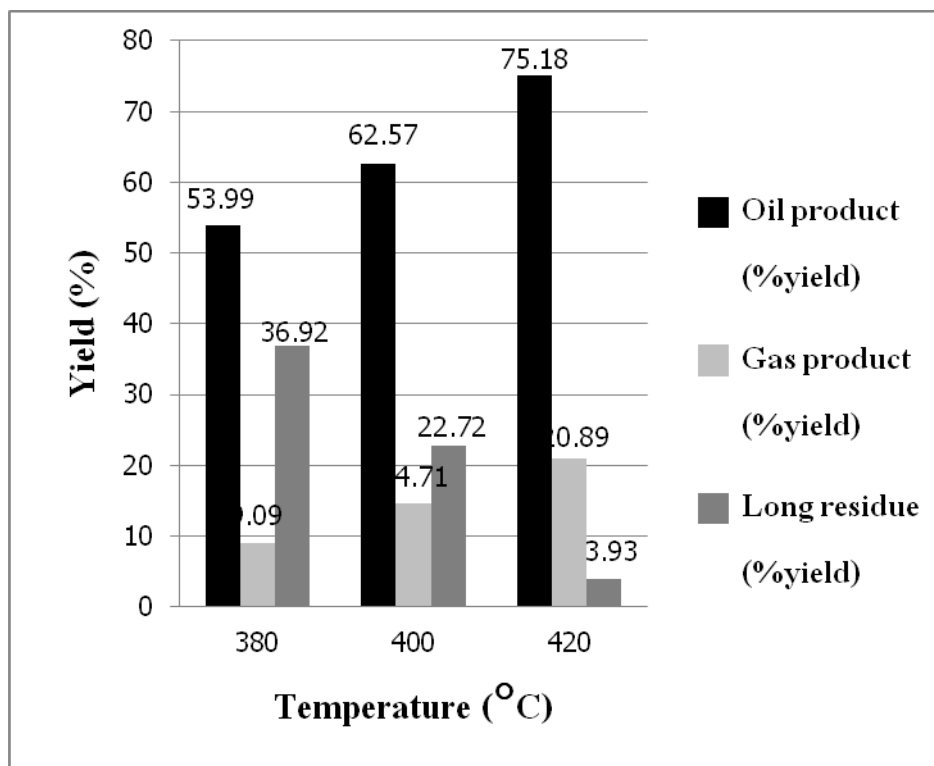
ภาพที่ 4.12 ค่าส่วนตกค้างและลำดับการทดลองของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซลที่ได้จากไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

จากภาพที่ 4.12 แสดงค่าส่วนตกค้างกับลำดับการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) ของผลการทดลอง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากภาพแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างที่สัมพันธ์กับลำดับของการทำการทดลองของชุดการทดลองทั้งหมดเป็นการกระจายตัวแบบไร้รูปแบบ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันและการทดลองเป็นแบบสุ่มสมบูรณ์ทำให้ค่าผิดพลาดต่าง ๆ ที่เกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้กระจายตัวเข้าถึงทุกหน่วยของการทดลองอย่างเท่าเทียมกัน

4.3 อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

4.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิในการทดลองที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน

การศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อกระบวนการไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ 380 400 และ 420 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 4 กรัมต่อนาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แสดงในภาพที่ 4.13

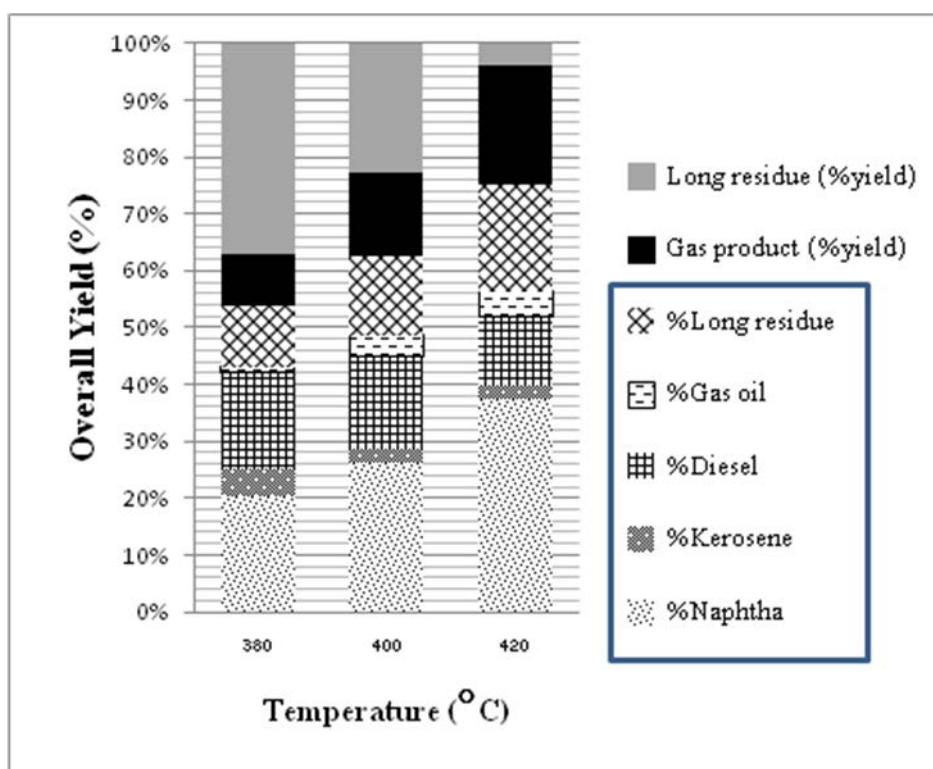


ภาพที่ 4.13 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ 380 400 และ 420 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 4 กรัมต่อนาที บน ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณของน้ำมันหนักลดลง เนื่องจากอิทธิพลของการแยกสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงมีบทบาทอย่างมากต่อการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ โดยเมื่อได้รับความร้อนสูงอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการแตกตัวไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก โดยพบว่าเมื่อให้ความร้อนสูงอย่างต่อเนื่องจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจำนวนมากเช่นกัน ซึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันคิดเป็นร้อยละ 53.99 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 380 องศาเซลเซียสไปเป็น 400 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันคิดเป็นร้อยละ 62.57 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 400 องศาเซลเซียสไปเป็น 420 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันคิดเป็นร้อยละ 75.18 โดยน้ำหนัก และเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สคิดเป็นร้อยละ 9.09 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 380 องศาเซลเซียสไปเป็น 400 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สคิดเป็นร้อยละ 14.71 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 400 องศาเซลเซียสไป

เป็น 420 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สคิดเป็นร้อยละ 20.89 โดยน้ำหนัก ในขณะที่เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณของน้ำมันหนักคิดเป็นร้อยละ 36.92 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 380 องศาเซลเซียสไปเป็น 400 องศาเซลเซียส จะได้ปริมาณของน้ำมันหนักคิดเป็นร้อยละ 22.72 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 400 องศาเซลเซียสไปเป็น 420 องศาเซลเซียส จะได้ปริมาณของน้ำมันหนักคิดเป็นร้อยละ 3.93 โดยน้ำหนัก

เมื่อทำการศึกษาผลของกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ที่อุณหภูมิ 380 400 และ 420 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 4 กรัมต่อนาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ว่ามีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่อง simulate distillation gas chromatograph แสดงในภาพที่ 4.14



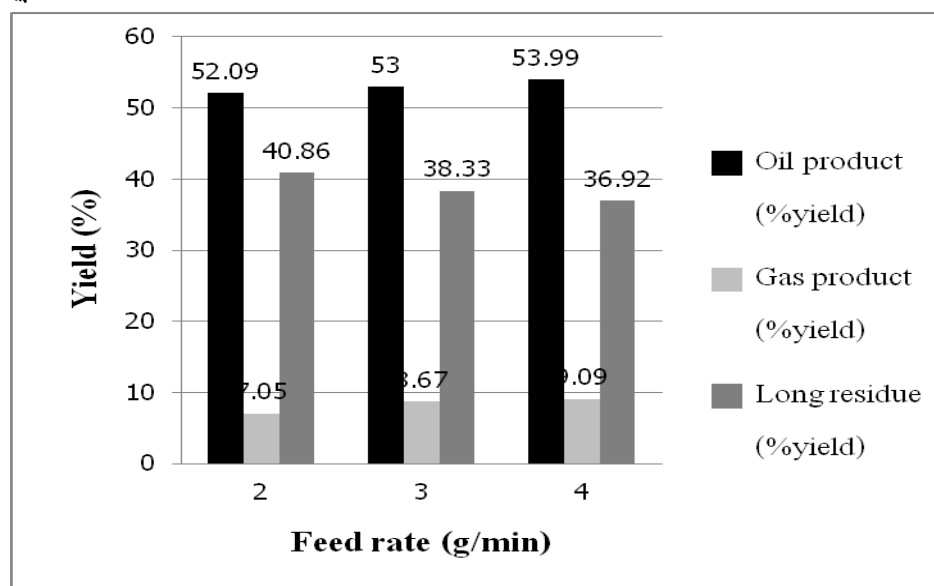
ภาพที่ 4.14 ร้อยละผลได้ของการกระจายตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ ในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 380 400 และ 420 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 4 กรัมต่อนาที บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณเนฟทาจะเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 380 400 และ 420 องศาเซลเซียส มีร้อยละผลได้ของเนฟทาอยู่ร้อยละ 20.51 26.28 และ 37.59 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ในขณะที่ปริมาณดีเซลจะลดลง โดยที่อุณหภูมิ 380 400 และ 420 องศาเซลเซียส มีร้อยละผลได้ของดีเซลอยู่ร้อยละ 17.01 16.27 และ 12.03 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากอิทธิพลของการแยกสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการแตกย่อยของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จนได้โมเลกุลขนาดกลาง ต่อจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก็จะเข้ามาบทบาทในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กจำพวกเนฟทา จึงส่งผลให้มีปริมาณเนฟทามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่กากน้ำมันมีปริมาณสูงขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้ในการแตกย่อยของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จนได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นอัลคีนในปริมาณมาก ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยา polymerization จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นกากน้ำมันอยู่มาก

4.3.2 อิทธิพลของอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน

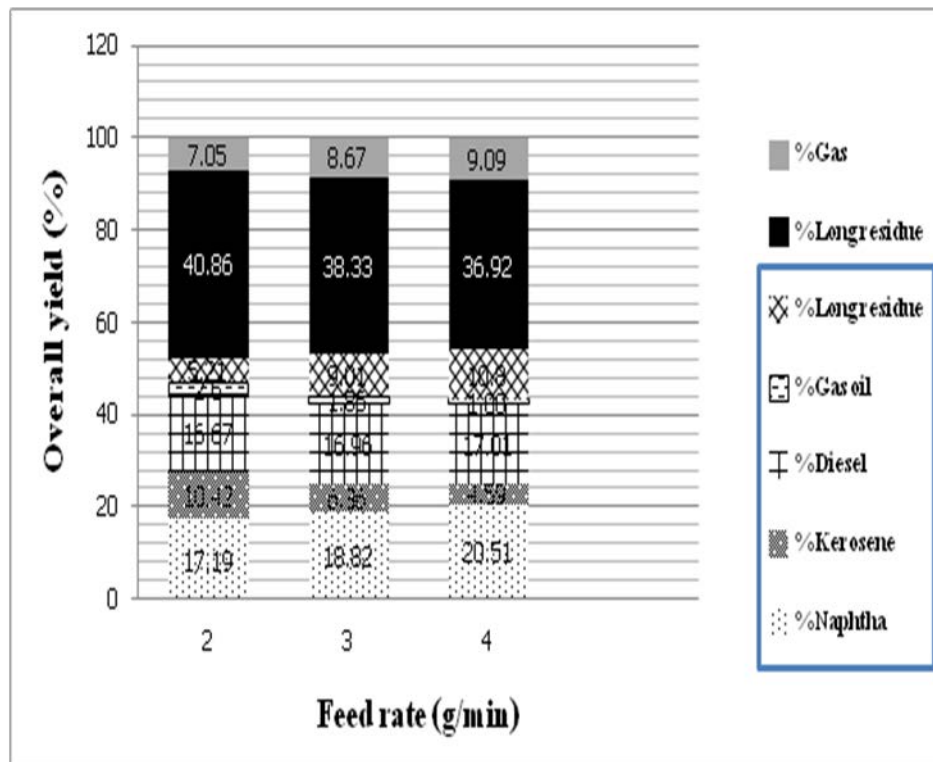
การศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่ 2 3 และ 4 กรัมต่อนาที ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แสดงในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่ 2 3 และ 4 กรัมต่อนาที ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

พบว่าเมื่ออัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้น ปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณของน้ำมันหนักจะลดลง เนื่องมาจากลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ที่เป็นทรงกระบอกสูงทำให้เมื่ออัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นสูงขึ้น ระดับความสูงของน้ำมันที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้นแต่ไม่เต็มเครื่องปฏิกรณ์ สารตั้งต้นจึงมีพื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อนมากขึ้น ทำให้ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิที่ถ่ายโอนความร้อนมายังสารตั้งต้นมากขึ้นจึงเกิดการแตกพันธะของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จนได้โมเลกุลขนาดเล็กมากขึ้น โดยที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที มีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ร้อยละ 52.09 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นจาก 2 เป็น 3 กรัมต่อนาที มีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ร้อยละ 53.00 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นจาก 3 เป็น 4 กรัมต่อนาที มีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ร้อยละ 53.99 โดยน้ำหนัก และเมื่อใช้อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สคิดเป็นร้อยละ 7.05 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นจาก 2 เป็น 3 กรัมต่อนาที จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สคิดเป็นร้อยละ 8.67 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นจาก 3 เป็น 4 กรัมต่อนาที จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สคิดเป็นร้อยละ 9.09 โดยน้ำหนัก ในขณะที่เมื่อใช้อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที ให้ปริมาณของน้ำมันหนักคิดเป็นร้อยละ 40.86 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นจาก 2 เป็น 3 กรัมต่อนาที จะได้ปริมาณของน้ำมันหนักคิดเป็นร้อยละ 38.33 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นจาก 3 เป็น 4 กรัมต่อนาที จะได้ปริมาณของน้ำมันหนักคิดเป็นร้อยละ 36.92 โดยน้ำหนัก

เมื่อทำการศึกษาผลของกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 3 และ 4 กรัมต่อนาที ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ว่ามีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่อง simulate distillation gas chromatograph แสดงในภาพที่ 4.16

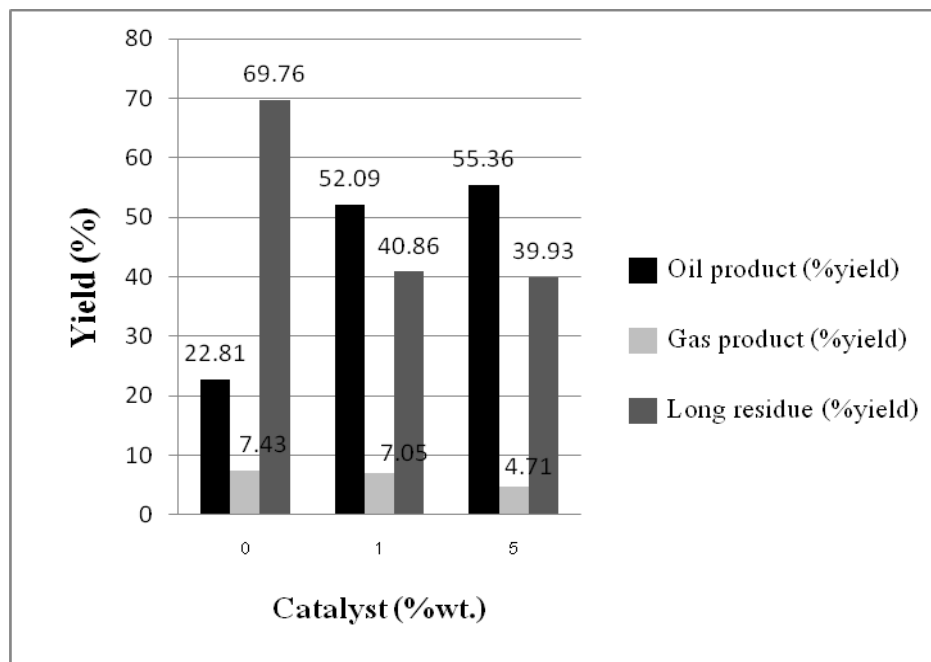


ภาพที่ 4.16 ร้อยละผลได้ของการกระจายตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ ในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่ 2 3 และ 4 กรัมต่อนาที ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นสูงขึ้นจะมีปริมาณเนฟทาเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 3 และ 4 กรัมต่อนาที จะมีร้อยละผลได้ของเนฟทาอยู่ร้อยละ 17.19 18.82 และ 20.51 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากที่อัตราการไหลของสารตั้งต้นสูง ระดับความสูงของน้ำมันที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้นแต่ไม่เต็มเครื่องปฏิกรณ์ สารตั้งต้นจึงมีพื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อนมากขึ้นทำให้ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิที่ถ่ายโอนความร้อนมายังสารตั้งต้นมากขึ้น จึงเกิดการแตกพันธะของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จนได้โมเลกุลขนาดกลางมากขึ้น ต่อจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก็จะเข้ามาบทบาทในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กจำพวกเนฟทา จึงส่งผลให้มีปริมาณเนฟทาเพิ่มขึ้น

4.3.3 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน

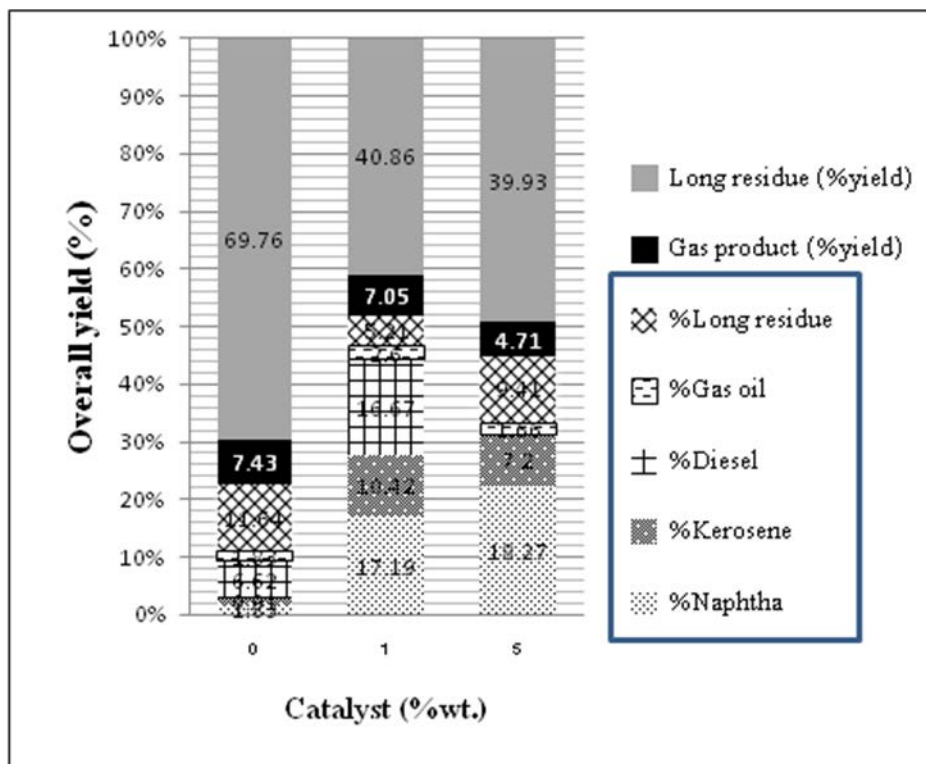
การศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากในโรงกลั่นน้ำมันทั่วไปจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีเพื่อเปลี่ยนเนฟทาให้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สโอเลฟิน ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจึงเกิดการเสื่อมสภาพโดยสูญเสียความว่องไว ทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นขนาดเล็กได้ โดยสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์แบบกรดมีความสามารถในการถ่ายโอนไฮโดรเจนที่เกิดจากการแตกตัวด้วยความร้อนในช่วงแรก และเกิดการเลือกเกิด (selectivity) บนพื้นที่ผิวรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาไปเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก อาทิ แนฟทา และเคโรซีนได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดโค้กบริเวณ active site ของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง โดยทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส และที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที แสดงในภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส และที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที

พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น จะมีปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณของน้ำมันหนักลดลง เนื่องจากในตอนแรกอิทธิพลของอุณหภูมิมีบทบาทต่อการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ โดยเมื่อได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการแตกตัวไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง ต่อจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้ามามีบทบาทโดยการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวหรือบริเวณเร่งทำให้เกิดการแตกย่อยของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางจนได้โมเลกุลขนาดเล็กมากขึ้น ทำให้มีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันมากขึ้น โดยที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ร้อยละ 52.09 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 1 เป็น 5 โดยน้ำหนัก พบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 55.36 โดยน้ำหนัก และจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้อย่างชัดเจนระหว่างไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือเกิดเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 22.81 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 52.09 โดยน้ำหนักตามลำดับ เนื่องจากการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปมีบทบาทในการแตกตัวของสารตั้งต้นให้เป็นสารผลิตภัณฑ์ได้มากจึงทำให้สารตั้งต้นนั้นแตกตัวจากโมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นโมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็กลง ทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันมากขึ้น

เมื่อทำการศึกษาผลของกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส และที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที ว่ามีผลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่อง simulate distillation gas chromatograph แสดงในภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 ร้อยละผลได้ของการกระจายตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ ในผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส และที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที

พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น จะมีปริมาณเนฟทาเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก จะมีร้อยละผลได้ของเนฟทา อยู่ร้อยละ 17.19 และ 18.27 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากในตอนแรกอิทธิพลของอุณหภูมิมีบทบาทต่อการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ โดยเมื่อได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการแตกตัวไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง ต่อจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้ามามีบทบาทโดยสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์แบบกรดมีความสามารถในการถ่ายโอนไฮโดรเจนที่เกิดจากการแตกตัวด้วยความร้อนในช่วงแรก และเกิดการเลือกเกิด (selectivity) บนพื้นที่ผิวรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาไปเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก อาทิ เนฟทา และเคโรซีนได้ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นเนฟทามากขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบการแตกตัวเมื่อมีการใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนในการแตกตัวของสารเป็นอย่างมาก โดยพบร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเป็นร้อยละ

1.83 และ 17.19 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีทั้งบริเวณเร่งและความร้อนที่ช่วยในการแตกตัวของสารตั้งต้น ขณะที่เมื่อไม่มีการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะมีเพียงความร้อนเท่านั้น ซึ่งอาจต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นถึงจะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

4.4 คำแนะนำภาวะเหมาะสมจากปฏิกิริยาการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี โดยโปรแกรม Design-Expert 7.0

ตารางที่ 4.12 ขอบเขตของการหาภาวะเหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert 7.0

ตัวแปร	ขอบเขต	ระดับต่ำ	ระดับสูง	หน่วย
อุณหภูมิ	ในช่วง	380	420	°C
อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น	ในช่วง	2	4	g/min
ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา	ในช่วง	1	5	wt%
ร้อยละผลได้ของแก๊ส	ค่าต่ำสุด	4.71	22.49	%
ร้อยละผลได้ของของเหลว	ค่าสูงสุด	52.09	85.58	%
ร้อยละผลได้ของเนฟทา	ค่าสูงสุด	17.19	41.00	%
ร้อยละผลได้ของดีเซล	ค่าสูงสุด	10.66	28.24	%

เมื่อทำการหาภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี โดยพิจารณาค่าตอบสนองเพียง 4 ค่าคือ ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทา และค่าร้อยละผลได้ของดีเซล โดยจะพิจารณาให้มีค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด ส่วนค่าตอบสนองที่เหลือ ได้แก่ ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทา และค่าร้อยละผลได้ของดีเซล พิจารณาให้ได้ค่ามากที่สุดโดยใช้โปรแกรม Design-Expert 7.0 ในการหาภาวะที่เหมาะสม ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.13 คือ ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 4.09 โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นเป็นร้อยละ 13.93 โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเป็นร้อยละ 79.37 โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทาเป็นร้อยละ 30.36 โดยน้ำหนัก และค่าร้อยละผลได้ของดีเซลเป็นร้อยละ 21.35 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.13 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert 7.0

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลเข้า ของสารตั้งต้น (min)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	แก๊ส (%)	ของเหลว (%)	แนฟทา (%)	ดีเซล (%)
420	2	4.09	13.93	79.37	30.36	21.35

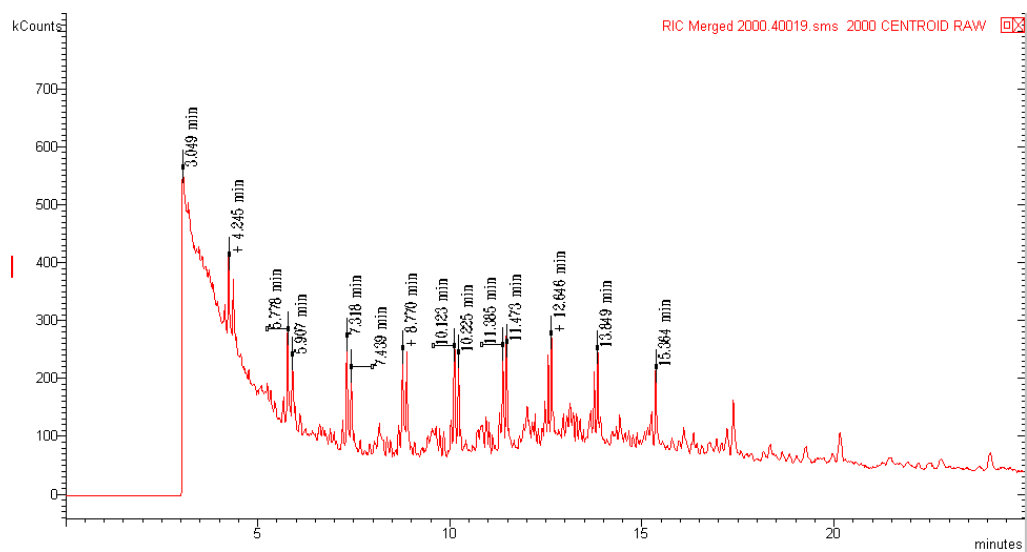
ผลการเปรียบเทียบระหว่างการทำการทดลองที่ภาวะที่เหมาะสมจากการคำนวณโดยโปรแกรม design expert กับการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม

ตารางที่ 4.14 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert 7.0 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริง

การทดลอง	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง			แก๊ส (%)	ของเหลว (%)	แนฟทา (%)	ดีเซล (%)
	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น (g/min)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)				
จากโปรแกรม	420	2	4.09	13.93	79.37	30.36	21.35
จากการทดลอง	420	2	4.09	12.75	78.60	29.40	20.44
จากการทดลอง	420	2	4.09	11.59	79.11	30.06	21.76
ค่าเฉลี่ย	420	2	4.09	12.17	78.86	29.73	21.10

4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการทดลอง

การไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว เมื่อทำการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมแล้วนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบ ซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง gas chromatography-mass spectrometry พบว่าองค์ประกอบหลักในผลิตภัณฑ์น้ำมันเป็นพวกวาราฟิน โซ่ตรง พวกวาราฟินที่มีกิ่งสาขา และพวกอโรมาติก



ภาพที่ 4.19 Interpreting spectra ที่ได้จากเครื่อง GC-MS

ตารางที่ 4.15 องค์ประกอบต่าง ๆ ที่พบในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว

พีคที่	สารประกอบ	สูตรโมเลกุล
3.049	n-heptane	C_7H_{16}
4.245	2,4-dimethyl hexane	C_8H_{18}
5.778	ethylbenzene	C_8H_{10}
5.907	2,3,4-trimethyl hexane	C_9H_{20}
7.318	1,2,3-trimethyl benzene	C_9H_{12}
7.439	1-phenyl-1-butene	$C_{10}H_{12}$
8.770	dodecane	$C_{12}H_{26}$
10.123	tridecane	$C_{13}H_{28}$
10.225	2-hexyl-1-decanol	$C_{16}H_{34}O$

4.6 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

กฤษณ์ (2554) ศึกษาถึงกระบวนการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว โดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร พบว่าภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว คือที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 46 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.12 โดยน้ำหนัก ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 78.06 โดยน้ำหนัก ปริมาณแอฟทาร์ร้อยละ 19.83 โดยน้ำหนัก และปริมาณเคโรซีนร้อยละ 21.05 โดยน้ำหนัก

ส่วนงานวิจัยนี้ศึกษาไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ซึ่งทำการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 1250 มิลลิลิตร พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี คือ ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 4.09 โดยน้ำหนัก ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 70.16 โดยน้ำหนัก ปริมาณแอฟทาร์ร้อยละ 28.06 โดยน้ำหนัก และปริมาณเคโรซีนร้อยละ 3.51 โดยน้ำหนัก

จากผลการวิจัยและงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน สามารถเปรียบเทียบภาวะที่ใช้ในการทดลองและผลการทดลองในตารางที่ 4.16 พบว่าผลการทดลองของกฤษณ์ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและเคโรซีนมากกว่า ในขณะที่ผลิตภัณฑ์แอฟทาน้อยกว่า เนื่องจากการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะซึ่งผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ต้องการจะผสมอยู่กับน้ำมันหนักทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้สูงกว่า และในงานวิจัยของกฤษณ์มีการเติมแก๊สไฮโดรเจนทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์ขนาดความยาวสายโซ่น้ำมันดีเซล (diesel-range paraffins) เกิดการแตกตัวด้วยไฮโดรเจนเพื่อให้ได้น้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์ขนาดความยาวสายโซ่น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน (kerosene-range paraffins) ดังแสดงในภาพที่ 2.14 ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์เคโรซีนที่ได้สูงกว่า

ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

ตัวแปรที่ศึกษา	กฤษณ์ (2554)	งานวิจัยนี้
สารตั้งต้น	น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว	น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว
ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์	แบบเบตซ์	แบบต่อเนื่อง
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว
อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	410 องศาเซลเซียส	420 องศาเซลเซียส
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	30 นาที	-
ความดันแก๊สไฮโดรเจน	5 บาร์	-
อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น	-	2 กรัมต่อนาที
ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยา	ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก	ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก
ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้		
- น้ำมัน	ร้อยละ 78.06	ร้อยละ 70.16
- แก๊ส	ร้อยละ 15.54	ร้อยละ 12.25
- ของแข็ง/น้ำมันหนัก	ร้อยละ 4.40	ร้อยละ 17.59
องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน		
- แนฟทา	ร้อยละ 19.83	ร้อยละ 28.06
- เลโรซีน	ร้อยละ 21.05	ร้อยละ 3.52
- ดีเซล	} ร้อยละ 26.55	ร้อยละ 18.94
- แก๊สออยล์		ร้อยละ 5.61
- กากน้ำมัน	ร้อยละ 10.63	ร้อยละ 14.03

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี โดยการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องทำในภาวะที่ใช้อุณหภูมิสูง เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการไพโรไลซิส ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวสามารถนำไปวิเคราะห์ในเชิงปริมาณเพื่อหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว และทำการวิเคราะห์ของเหลวในเชิงคุณภาพ โดยวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดต่าง ๆ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น (Simulated distillation gas chromatograph) นอกจากนี้เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาได้ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลและออกแบบการทดลองเป็น 2^3 แฟกทอเรียลทำการทดลองซ้ำ ออกแบบและคำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert โปรแกรมนี้สามารถบ่งบอกได้ว่าตัวแปรใดมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันและร้อยละผลได้ของแนฟทา

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองสามารถสรุปถึงภาวะที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีดังนี้

1. ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แนฟทาอย่างมีนัยสำคัญจากการไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น

3. ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ จากการไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ได้แก่ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และอัตราการไหลระหว่างอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

4. ภาวะที่เหมาะสมในการไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ที่ให้แนวโน้มของผลิตภัณฑ์น้ำมันและค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ดีที่สุด จากการคำนวณด้วยโปรแกรม ดังนี้

- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส
- อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที
- ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 4.09 โดยน้ำหนัก

โดยที่ภาวะการทดลองข้างต้นให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 78.86 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊ส 12.17 โดยน้ำหนัก และให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันตาบคาบจุดเดือด โดยมีร้อยละผลได้ของเนฟทา 29.73 โดยน้ำหนัก และร้อยละผลได้ของดีเซล 21.10 โดยน้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. พัฒนาเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อขยายกำลังผลิตในระดับที่ใหญ่ขึ้น
2. พัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ให้มีระบบที่สามารถกลั่นกากน้ำมันที่ไม่เกิดปฏิกิริยากลับมาทำการแตกตัวอีกได้
3. ศึกษาการนำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ไปใช้กับเครื่องยนต์ชนิดต่าง ๆ

รายการอ้างอิง

- [1] พันธ์ งามกนกวรรณ. ปัญหาน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.diw.go.th> [29 มีนาคม 2555]
- [2] วิกีพีเดีย. ปิโตรเลียม[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/ปิโตรเลียม>[11 เมษายน 2555]
- [3] ปิโตรเลียม[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/236/oil/14.htm>[11 เมษายน 2555]
- [4] น้ำมันหล่อลื่น[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.vcharkarn.com/vblog/39949>[11 เมษายน 2555]
- [5] จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยา : พื้นฐานและการประยุกต์. 1000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.
- [6] ปราโมทย์ ไชยเวช. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. 1000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [7] วิทยา เรื่องพรวิสุทธ์. กะตะไลซิสแบบเฮเทอโรจีเนียส หลักทฤษฎีและการประยุกต์. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
- [8] Bockhorn, H., Hornung, A., Hornung, J. Stepwise pyrolysis for raw material recovery from plastic waste. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 79 (1998): 46.
- [9] Fuentes, M.J., Font, R., Go'mez-Rico, M.F., Marti'n-Gullo'n, I. Pyrolysis and combustion of waste lubricant oil from diesel cars: Decomposition and pollutants. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 79 (2007): 215–226.
- [10] Kim, S.S., Chun, B.H., Kim, S.H. Non-isothermal pyrolysis of waste automobile lubricating oil in a stirred batch reactor. Chemical Engineering Journal 93 (2003): 225–231.
- [11] Kim, S.S., Chun, B.H., Kim, S.H. Pyrolysis kinetics of waste automobile lubricating oil. Fuel 79 (2000): 1943-1949.

- [12] Kim, S.Y., Jeong, S.U., Yoon, W.L. Tar-formation kinetics and adsorption characteristics of pyrolyzed waste lubricating oil. . Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 70 (2003): 19–33.
- [13] Song, G.J., Seo, Y.C., Pudasainee, D., Characteristics of gas and residues produced from electric arc pyrolysis of waste lubricating oil. Waste Management 30 (2010): 1230-1237.
- [14] คุณทณี ปิ่นเวหา. การแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554
- [15] กมลวรรณ กิ่งพุทธพงษ์ และ โสมวดี ไชยอนันต์สุจริต. การแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิเนียม HMS. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549
- [16] จินตนา สุมารินทร์. การแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [17] นัทสนัน วงษ์สวัสดิ์. การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันพืชใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554
- [18] วิชชากร จารุศิริ และจินตนา อุบลวัฒน์. การแตกตัวด้วยความร้อนของกลีเซอรอลที่เหลือจากกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันให้เป็นแก๊สโซลีนบนเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3. สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [19] อำนวย เพิ่มทรัพย์สกุล. การเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โคบอลต์และโมลิบดีนัมบนอะลูมินา และ HZSM-5. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ก1 แสดงผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ 3 ตัวแปร (2^3 factorial design) สำหรับไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

Run	Parameters			Product Yield (%wt.)			Overall Yield (%wt.)	
	Temperature (°C)	Feed rate (g/min)	Catalyst (%wt.)	Liquid (%wt.)	Gas (%wt.)	Long residue (%wt.)	Naphtha Yield (%wt.)	Diesel Yield (%wt.)
1.1	380	2	1	52.69	9.11	38.20	18.06	17.10
1.2				51.49	4.99	43.52	16.32	16.24
2.1	420	2	1	70.85	11.99	17.16	27.52	19.23
2.2				69.47	12.51	18.02	28.60	18.65
3.1	380	4	1	53.66	10.12	36.22	21.96	17.84
3.2				54.32	8.06	37.62	19.06	16.18
4.1	380	2	5	54.70	4.44	40.86	19.57	19.33
4.2				56.02	4.98	39.00	16.97	18.31

Run	Parameters			Product Yield (%wt.)			Overall Yield (%wt.)	
	Temperature (°C)	Feed rate (g/min)	Catalyst (%wt.)	Liquid (%wt.)	Gas (%wt.)	Long residue (%wt.)	Naphtha Yield (%wt.)	Diesel Yield (%wt.)
5.1	420	4	1	76.79	20.13	3.08	36.28	12.89
5.2				73.57	21.65	4.78	38.90	11.17
6.1	380	4	5	58.12	10.29	31.59	24.03	16.45
6.2				55.64	10.69	33.67	21.47	15.41
7.1	420	2	5	80.95	13.12	5.93	28.32	24.37
7.2				77.37	14.74	7.89	30.26	23.13
8.1	420	4	5	83.12	15.55	1.33	40.26	9.77
8.2				80.86	15.19	3.95	41.74	10.55
9.1	400	3	3	54.73	19.15	26.12	22.98	12.04
9.2				58.14	21.15	20.71	20.06	18.02
9.3				56.80	22.49	20.71	19.31	18.18

ตาราง ก2 แสดงผลการศึกษาก๊าซอะลูมิเนียมที่เหมาะสมต่อไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

Run	Parameters			Product Yield (%wt.)			Overall Yield (%wt.)				
	Temperature (°C)	Feed rate (g/min)	Catalyst (%wt.)	Liquid (%wt.)	Gas (%wt.)	Long residue (%wt.)	Naphtha Yield (%wt.)	Kerosene Yield (% wt.)	Diesel Yield (%wt.)	Gas oil Yield (% wt.)	Long residue Yield (%wt.)
1.1	380	4	1	53.66	10.12	36.22	21.96	3.79	17.84	1.57	8.50
1.2				54.32	8.06	37.62	19.06	5.39	16.18	0.59	13.10
2.1	400	4	1	61.74	13.97	24.29	27.32	3.43	17.41	4.56	9.02
2.2				63.40	15.45	21.15	25.24	1.57	15.13	2.94	18.52
3.1	420	4	1	76.79	20.13	3.08	36.28	2.77	12.89	5.27	19.58
3.2				73.57	21.65	4.78	38.90	1.75	11.17	3.75	18.00

ตาราง ก3 แสดงผลการศึกษาก๊าซอัตรการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่เหมาะสมต่อไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

Run	Parameters			Product Yield (%wt.)			Overall Yield (%wt.)				
	Temperature (°C)	Feed rate (g/min)	Catalyst (%wt.)	Liquid (%wt.)	Gas (%wt.)	Long residue (%wt.)	Naphtha Yield (%wt.)	Kerosene Yield (% wt.)	Diesel Yield (%wt.)	Gas oil Yield (% wt.)	Long residue Yield (%wt.)
1.1	380	2	1	52.69	9.11	38.20	18.06	11.34	17.10	1.81	4.38
1.2				51.49	4.99	43.52	16.32	9.50	16.24	3.39	6.04
2.1	380	3	1	52.13	9.52	38.35	19.64	5.37	17.85	1.13	8.14
2.2				53.87	7.82	38.31	18	7.35	16.07	2.59	9.86
3.1	380	4	1	53.66	10.12	36.22	21.96	3.79	17.84	1.57	8.50
3.2				54.32	8.06	37.62	19.06	5.39	16.18	0.59	13.10

ตาราง ก4 แสดงผลการศึกษากภาวะปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี

Run	Parameters			Product Yield (%wt.)			Overall Yield (%wt.)				
	Temperature (°C)	Feed rate (g/min)	Catalyst (%wt.)	Liquid (%wt.)	Gas (%wt.)	Long residue (%wt.)	Naphtha Yield (%wt.)	Kerosene Yield (% wt.)	Diesel Yield (%wt.)	Gas oil Yield (% wt.)	Long residue Yield (%wt.)
1.1	380	2	0	21.46	6.56	71.98	1.06	1.56	7.82	2.86	8.16
1.2				24.16	8.30	67.54	2.60	0.26	5.42	0.80	15.08
2.1	380	2	1	52.69	9.11	38.20	18.06	11.34	17.10	1.81	4.38
2.2				51.49	4.99	43.52	16.32	9.50	16.24	3.39	6.04
3.1	380	2	3	84.85	11.63	3.52	28.21	6.84	29.42	6.92	13.46
3.2				86.31	14.25	0.56	29.99	5.14	27.06	5.06	19.06
4.1	380	2	5	54.70	4.44	40.86	19.57	8.26	19.33	2.79	4.75
4.2				56.02	4.98	39.00	16.97	6.14	18.31	0.53	14.07

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ

รูปแบบของการวิเคราะห์เชิงสถิติที่ใช้ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ โดยอยู่ภายใต้สมมติฐานว่าตัวแปรและค่าการวิเคราะห์นั้น มีความสัมพันธ์กันเป็นแบบเส้นตรง

1. สัญลักษณ์ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

1.1 k หมายถึง จำนวนตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

1.2 n หมายถึง จำนวนของการทดลองที่ทำการทดลองในภาวะเดียวกัน

1.3 อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ (A, B, C, D) แทนปัจจัยที่ต้องการทำการการศึกษา เช่น อุณหภูมิในการทดลอง อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น เป็นต้น

1.4 อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ที่เขียนติดกัน (Combination) เช่น AB, AC, ABC หมายความว่า อันตรกิริยาของแต่ละปัจจัย (Interaction)

1.5 อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กที่เขียนติดกัน เช่น ab, ac, abc หมายถึงการทดลองที่เกิดจากการรวมกันของอิทธิพลจากปัจจัยต่าง ๆ เรียกว่า Treatment combination ในการทดลองที่แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ โดยแทนปัจจัยที่ระดับต่ำเป็น -1 และที่ระดับสูงเป็น $+1$

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาไฟโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมาจากอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบที่เป็นแนฟทากับดีเซล โดยงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมเป็นแบบแฟกทอเรียล (2^k experimental design) ซึ่งสัญลักษณ์ และระดับของตัวแปรมีการกำหนด ดังนี้

ตาราง ข1 สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปร	ระดับ	
	(-) ต่ำ	(+) สูง
A = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	380	420
B = อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น (กรัมต่อนาที)	2	4
C = ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	1	5

การทดลองที่ปรากฏสัญลักษณ์ของปัจจัยใด แสดงว่าทำการทดลองที่ระดับ +1 ของปัจจัยนั้น และปัจจัยที่เหลือทั้งหมดให้ทำการทดลองที่ระดับ -1 เช่น

(-1) แสดงว่า ทำการทดลองที่ระดับ -1 ทุกปัจจัย

a แสดงว่า ทำการทดลองของตัวแปรอุณหภูมิที่ระดับ+1 และปัจจัยอื่นๆทำที่ระดับ -1 ดังนั้น ภาวะการทดลองคือ อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อ นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

ab แสดงว่า ทำการทดลองของตัวแปรอุณหภูมิที่ระดับ+1 และตัวแปรอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่ระดับ +1 ส่วนปัจจัยอื่น ๆ ทำการทดลองที่ระดับ -1

2. ความหมายของคำสำคัญ

อิทธิพลหลัก (main effect) หมายถึง อิทธิพลของตัวแปรที่ทำการศึกษา

อันตรกิริยา (interaction) หมายถึง การแสดงออกของระดับต่าง ๆ ในปัจจัยหนึ่งไม่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่งของอีกปัจจัย

อิทธิพลแฟกทอเรียล (factorial effect) หมายถึง อิทธิพลต่าง ๆ ทั้งอิทธิพลหลักและอันตรกิริยาทั้งหมดในการทดลองซึ่งจะมีเท่ากัน จำนวนการรวมตัว -1 หรือเท่ากับองศาความเป็นอิสระ (degree of freedom) ของสิ่งที่ทดลอง

3. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลหรือแบบ 2^k มักใช้ในกรณีที่การทดลองมีตัวแปรจำนวนมาก จะช่วยให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้เพื่อศึกษาถึงผลของตัวแปรทั้ง k ชนิด ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การออกแบบ 2^k จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายสำหรับกรองตัวแปรที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง กล่าวคือ กรณีที่การทดลองมีตัวแปร k ตัวแปร ซึ่งแต่ละตัวแปรจะประกอบไปด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจได้จากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิในการทดลอง อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น หรืออาจได้จากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องปฏิกรณ์ หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวมานี้จะแทนระดับที่สูงหรือต่ำของตัวแปรหนึ่ง ๆ หรือบ่งบอกถึงการมีหรือไม่มีของตัวแปรนั้น ๆ ก็ได้ โดยใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์ของการออกแบบลักษณะนี้จะเรียกว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

4. สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

1. Contrast = (ผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment) \times [สัมประสิทธิ์(-1หรือ+1)ของตัวแปรหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปร]

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

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

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

$$4. \text{Total of Sum of Squares} (SS_T)$$

$$a \ b \ n$$

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

$$i=1 \ j=1 \ k=1$$

$$5. \text{Sum of Squares Error} (SS_E)$$

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

$$6. \text{Mean of Square} (MS)$$

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

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

$$8. F_0 = MS_{\text{effect}} / MS_{\text{error}}$$

5. การใช้โปรแกรม Design-Expert ในการคำนวณ

1. เมื่อเข้าสู่โปรแกรม จะไปคลิกที่ file ----> new design แสดงในภาพ ข2

2 Level Factorial Design
Design for 2 to 15 factors where each factor is varied over 2 levels. Useful for estimating main effects and interactions. Fractional factorials can be used for screening many factors to find the significant few. The color coding represents the design resolution: Green = Res IV, Yellow = Res III, and Red = Res II.

Experiments	Number of Factors														
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
4	Full	1/2 Fract.													
8		Full	1/2 Fract.	1/4 Fract.	1/8 Fract.	1/16 Fract.									
16			Full	1/2 Fract.	1/4 Fract.	1/8 Fract.	1/16 Fract.	1/32 Fract.	1/64 Fract.	1/128 Fract.	1/256 Fract.	1/512 Fract.	1/1024 Fract.	1/2048 Fract.	
32				Full	1/2 Fract.	1/4 Fract.	1/8 Fract.	1/16 Fract.	1/32 Fract.	1/64 Fract.	1/128 Fract.	1/256 Fract.	1/512 Fract.	1/1024 Fract.	
64					Full	1/2 Fract.	1/4 Fract.	1/8 Fract.	1/16 Fract.	1/32 Fract.	1/64 Fract.	1/128 Fract.	1/256 Fract.	1/512 Fract.	
128						Full	1/2 Fract.	1/4 Fract.	1/8 Fract.	1/16 Fract.	1/32 Fract.	1/64 Fract.	1/128 Fract.	1/256 Fract.	
256							Full	1/2 Fract.	1/4 Fract.	1/8 Fract.	1/16 Fract.	1/32 Fract.	1/64 Fract.	1/128 Fract.	

ภาพที่ ข2 ตารางของ 2 level factorial design

2. จากนั้นเลือกจำนวนตัวแปรที่สนใจศึกษา เช่น ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งหมด 3 ตัวแปร เลือกที่ full ของช่อง 3 แล้วกรอกจำนวนการทดลองที่ทำซ้ำในช่อง replicates และกรอกจำนวนการทดลองของค่ากลางที่ทำซ้ำในช่อง center point per block ตัวอย่างเช่น replicates = 2, center point per block = 3 กดที่ continue จะปรากฏในภาพที่ ข3 เมื่อกรอกตัวแปรเสร็จคลิกเลือกที่ continue

	Name	Units	Type	Low	High
A [Numeric]	A		Numeric	-1	1
B [Numeric]	B		Numeric	-1	1
C [Numeric]	C		Numeric	-1	1

	Name	Units	Type	Low	High
A:	Temperature	C	Numeric	390	440
B:	Feed flow rate	g/min	Numeric	2	5
C:	Cataryst	%wt	Numeric	1	5

ภาพที่ ข3 ตัวแปรและหน่วยที่ใช้ในการทดลอง

3. เลือก responses โดยให้กรอกชื่อตัวแปรที่เราศึกษาในงานวิจัยลงในช่อง responses พร้อมกรอกหน่วยของตัวแปรนั้นในช่อง unit ในภาพ ข4 เมื่อกรอกครบแล้วคลิกที่ continue

Responses:

	Name	Units
	Response 1	
	Response 2	
	Response 3	
	Response 4	
	Response 5	

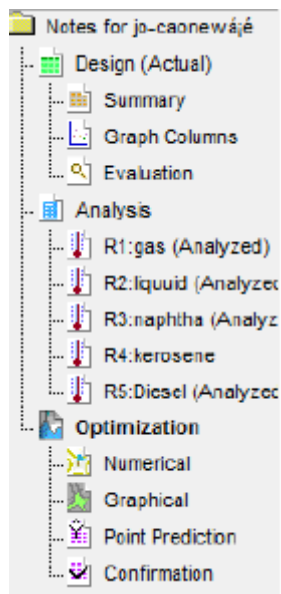
ภาพที่ ข4 response และ หน่วยที่ต้องการของการทดลอง

4. จะพบว่าโปรแกรมจะแสดงข้อมูลทั้งหมดที่เรากรอกลงไป ตัวอย่างเช่น มีทั้งหมด 8 การทดลอง ทำซ้ำการทดลองละ 2 ครั้ง ค่ากลาง 1 การทดลอง ทำซ้ำ 3 ครั้ง จำนวนการทดลอง 19 การทดลอง จากนั้น นำค่าที่ได้จากการทดลองกรอกในช่องในภาพที่ ข5

Std	Run	Block	Factor 1 A: Temperature C	Factor 2 B: Feed flow rate g/min	Factor 3 C: Catalyst %wt	Response 1 Gas %wt	Response 2 Liquid %wt	Response 3 Napththa %wt	Response 4 Kerosene %wt	Response 5 Diesel %wt
10	1	Block 1	380.00	2.00	1.00	8.11	52.69	18.06	11.01	17.1
14	2	Block 1	420.00	2.00	1.00	5.99	72.03	27.52	10.2	16.24
13	3	Block 1	380.00	4.00	1.00	11.89	55.13	21.96	14.3	19.23
7	4	Block 1	380.00	2.00	5.00	12.61	56.79	19.57	13.48	16.85
15	5	Block 1	420.00	4.00	1.00	10.02	76.82	36.28	11.32	17.84
17	6	Block 1	380.00	4.00	5.00	8.16	57.21	24.03	12.36	16.18
11	7	Block 1	420.00	2.00	5.00	4.65	77.32	28.32	7.12	19.33
2	8	Block 1	420.00	4.00	5.00	4.77	83.07	40.26	7.98	18.31
8	9	Block 1	380.00	2.00	1.00	21.13	51.49	16.32	12.32	12.89
16	10	Block 1	420.00	2.00	1.00	20.65	68.29	28.6	13.36	11.17
3	11	Block 1	380.00	4.00	1.00	10.11	52.85	19.06	14.32	16.45
5	12	Block 1	380.00	2.00	5.00	10.87	53.93	16.97	15.11	15.41
1	13	Block 1	420.00	4.00	1.00	14.53	73.54	38.9	10.02	24.37
9	14	Block 1	380.00	4.00	5.00	13.33	56.55	21.47	9.95	23.13
12	15	Block 1	420.00	2.00	5.00	17.24	81	30.26	7.65	9.77
6	16	Block 1	420.00	4.00	5.00	16.14	80.91	41.74	6.32	10.55
18	17	Block 1	400.00	3.00	3.00	19.15	58.14	20.06	7.82	12.04
19	18	Block 1	400.00	3.00	3.00	21.15	56.8	19.31	7.12	18.02
4	19	Block 1	400.00	3.00	3.00	22.49	68.43	22.98	8.01	18.18

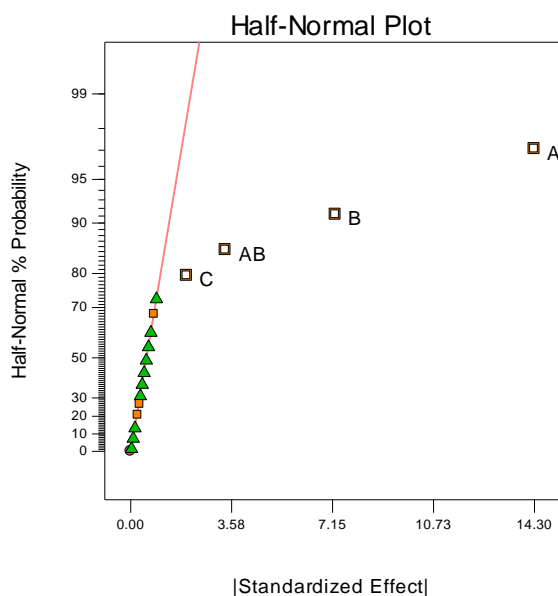
ภาพที่ ข5 ตารางการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองที่ภาวะต่าง ๆ

5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรม Design-Expert ตัวอย่างเช่น วิเคราะห์ผลของผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยการเลือก liquid ในภาพที่ ข6 จากนั้น ไปคลิกที่ effect



ภาพที่ ข6 แถบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แนฟทาและดีเซล

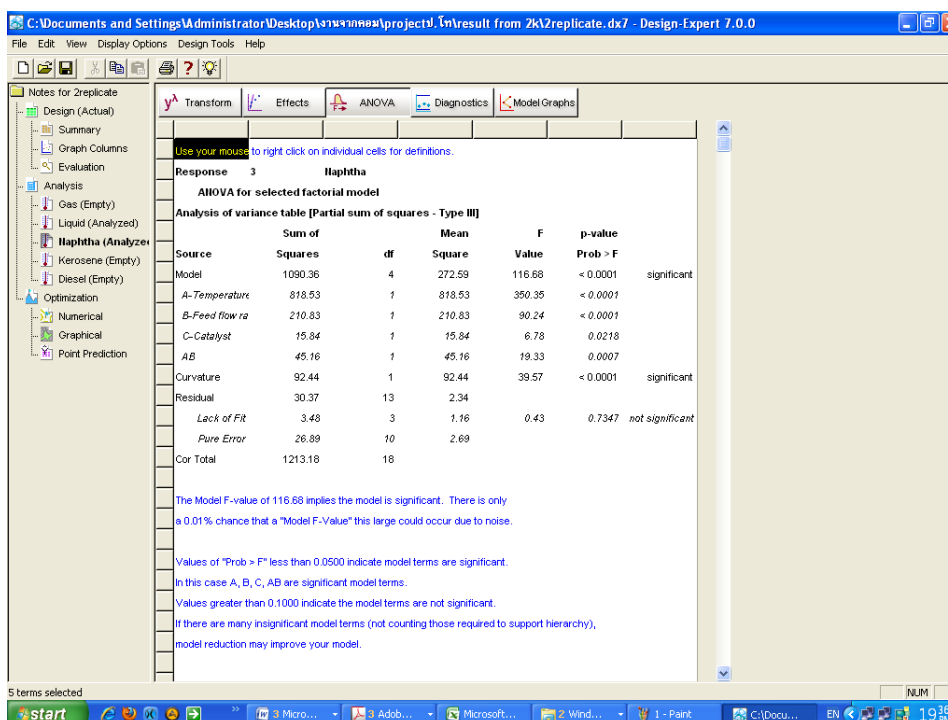
6. ทำการเลือกจุดที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงในกราฟ normal % probability เพื่อให้แนวโน้มเป็นเส้นตรง ในภาพที่ ข7 ตัวอย่างเช่น



ภาพที่ ข7 half normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทาที่ได้จากไพโรไลซิส น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

ภาพที่ ข7 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่นำมาสร้างเป็น half normal probability plot พบว่าตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงมาก คือ อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น แสดงให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากไพโรไลซิสน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

7. คลิกเลือก ANOVA ดังรูป ข8 เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณ โดยโปรแกรมและเป็นการยืนยันผลของกราฟ half normal probability



ภาพที่ ข8 การคำนวณผลของ ANOVA

เมื่อพิจารณาภาพที่ ข8 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert จะบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้นมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทา ซึ่งพบว่า อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทา จึงเป็นการยืนยันได้ว่า อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทาอย่างมีนัยสำคัญ

8. จากนั้นวิเคราะห์ผลของตัวแปรอื่น ๆ ตามข้อ 5-7

9. หากภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง คลิกที่ numerical แล้วเลือกพร้อมกรอบขอบเขตที่ต้องการในช่องของ limit ในภาพที่ ข8



ภาพที่ ข9 ขอบเขตที่ต้องการในการทดลอง

10. คลิกเลือกที่ solution จะได้สถานะที่เหมาะสมในภาพที่ ข10

The screenshot shows the 'Solutions' tab in Design-Expert 7.0.0. A table lists 14 solutions. Solution 1 is selected. The table columns are: Number, Temperature, Feed flow rate, Catalyst, Liquid, Naphtna, and Desirability.

Number	Temperature	Feed flow rate	Catalyst	Liquid	Naphtna	Desirability
1	420.00	4.00	5.00	79.3667	40.2099	0.912
2	420.00	3.99	5.00	79.3667	40.2122	0.911
3	419.94	4.00	5.00	79.2627	40.203	0.909
4	420.00	3.95	5.00	79.3667	40.0442	0.908
5	420.00	4.00	4.83	79.1352	40.2052	0.907
6	420.00	3.93	5.00	79.3667	39.8998	0.905
7	419.53	4.00	5.00	79.1084	40.0813	0.904
8	420.00	3.87	5.00	79.3667	39.5836	0.899
9	420.00	3.80	5.00	79.3667	39.2427	0.892
10	420.00	4.00	4.07	79.066	39.6253	0.882
11	420.00	3.83	5.00	79.3667	38.211	0.874
12	420.00	4.00	3.78	77.6975	39.6844	0.873
13	420.00	4.00	3.72	77.6122	39.6535	0.871
14	420.00	3.56	4.99	79.3610	37.9773	0.867

ภาพที่ ข10 ภาวะที่เหมาะสมและขอบเขตของการทดลอง

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด

(boiling distribution)

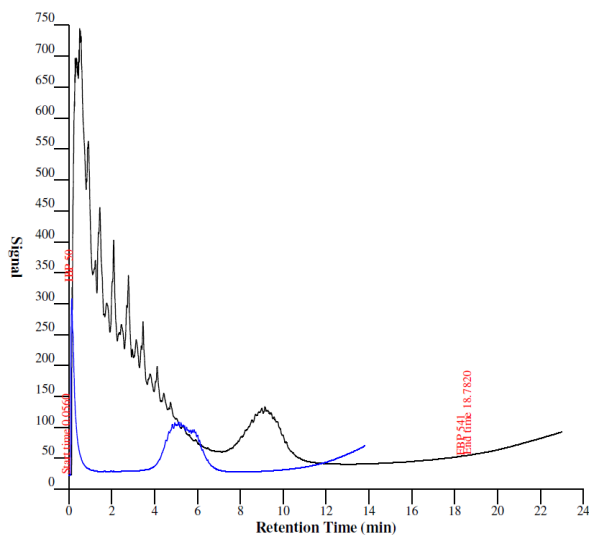
การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง simulated distillation gas chromatography โดยจะวิเคราะห์ตามจุดเดือดของแต่ละสารดังต่อไปนี้

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

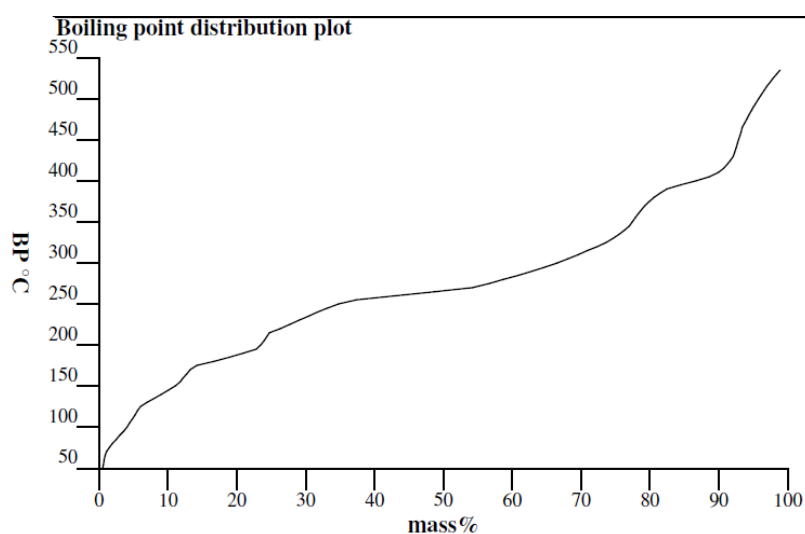
เริ่มต้นการวิเคราะห์โดยการเตรียมสารตัวอย่าง คือ นำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่จะวิเคราะห์ไปละลายในตัวทำละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS₂) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 100 โดยปริมาตร จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น ยี่ห้อ Varian รุ่น CP-3800 เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบน้ำมันตามคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASTM D2887 โดยใช้ดีเทคเตอร์แบบ FID มีการใช้ซอฟต์แวร์ simulated distillation ส่วนคอลัมน์ที่ใช้จะเป็น capillary column มี stationary phase คือ CP-SIL 5CB ที่ยาว 15 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.25 มิลลิเมตร และมีความหนาของฟิล์ม 0.25 ไมครอน โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ อุณหภูมิคอลัมน์ (column temperature or oven temperature) 30-320 องศาเซลเซียส เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิหัวฉีด (injector temperature) 298 องศาเซลเซียส อุณหภูมิดีเทคเตอร์ (detector temperature) 320 องศาเซลเซียส และมี carrier gas เป็นแก๊สฮีเลียมที่อัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วย split ratio 2

ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือด

โครมาโทแกรมที่ได้จากการแยกสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น เปลี่ยนเป็นกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือดด้วยโปรแกรม simulated distillation โดยจะทำการ เทียบกับโครมาโทแกรมของสารมาตรฐานตาม ASTM D2887 (standard)

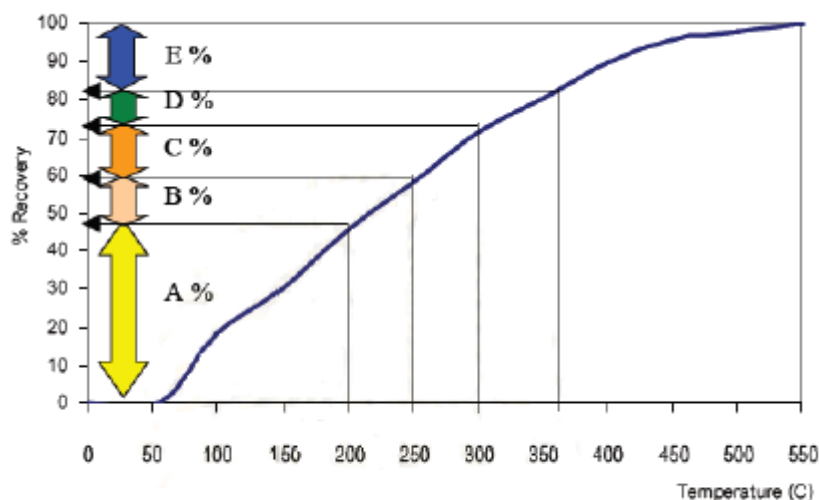


ภาพที่ ค1 โครมาโทแกรมจากการแยกของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลอง การกลั่น



ภาพที่ ค2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน (%off) กับจุดเดือดของสาร

ตัวอย่างการคำนวณ



ภาพที่ ค3 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องมือ simulated distillation gas chromatography และการคำนวณปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ

การคำนวณหาปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบน้ำมันตามคาบจุดเดือด

ปริมาณ naphtha ที่อ่านจากกราฟ A %

ดังนั้น % naphtha ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม = $(A \times W)/100$

ปริมาณ kerosene ที่อ่านจากกราฟ B%

ดังนั้น % kerosene ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม = $(B \times W)/100$

ปริมาณ light gas oil ที่อ่านจากกราฟ C%

ดังนั้น % light gas oil ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม = $(C \times W)/100$

ปริมาณ gas oil ที่อ่านจากกราฟ D%

ดังนั้น % gas oil ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม = $(D \times W)/100$

ปริมาณ long residue ที่อ่านจากกราฟ E%

ดังนั้น % long residue ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม = $(E \times W)/100$

ภาคผนวก ง

ภาวะที่ใช้ในการทดสอบด้วยเทคนิค GC-MS

ตารางที่ ง1 ภาวะในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบกับแมสสเปกโตรมิเตอร์

ภาวะที่ใช้	ค่า
carrier gas (He) flow rate	1.0 มิลลิลิตรต่อนาที
interface temperature	230 องศาเซลเซียส
ion source temperature	40 องศาเซลเซียส
split ratio	1:500
molecular weight scan range (m/z)	50-700
solvent cut time	4 นาที
injection temperature	300 องศาเซลเซียส
inject volume	0.02 ไมโครลิตร
column initial temperature	90 องศาเซลเซียส
temperature program rate	40 องศาเซลเซียสต่อ15นาที
column final temperature	280 องศาเซลเซียส

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอรรชิชา เอกสกุลบัณฑิต เกิดเมื่อวันที่ 6 พฤศจิกายน 2531 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2553 จบการศึกษาในปี 2555