

ไฟโรไลซิสน้ำมันสบูดำเป็นเชื้อเพลิงเหลว บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

นางสาวชุติมาพร วรรณวงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

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 JATROPHA OIL TO LIQUID FUELS ON FCC CATALYST
IN BATCH REACTOR

Miss Chutimaporn Wannawong

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ไฟโรไลซิสน้ำมันสนคู่เป็นเชื้อเพลิงเหลว บน
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีในเครื่องปฏิกรณ์แบบ
แบตช์

โดย

นางสาวชุตติมาพร วรรณวงษ์

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.แก้วดี พุกษาท)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุกร จารุศิริ)

ชุตติมาพร วรรณวงษ์ : ไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยา
 เอฟซีซีในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (PYROLYSIS OF JATROPHA OIL TO LIQUID
 FUELS ON FCC CATALYST IN BATCH REACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :
 ศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์, 119 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยา
 เอฟซีซีในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ขนาด 70 มิลลิลิตร ใช้ปริมาณน้ำมันสบู่ดำจำนวน 15 กรัม
 ทำการศึกษาที่ภาวะอุณหภูมิ 380-440 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที
 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์
 ออกแบบการทดลองโดยใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปร
 ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวและ
 องค์ประกอบที่ดีที่สุด นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลว
 ที่ได้ด้วยเครื่อง Simulate Distillation Gas Chromatography (DGC) หาภาวะที่เหมาะสมของ
 การไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี จากการวิเคราะห์โดยใช้
 โปรแกรม design-expert ภาวะที่เหมาะสมที่ได้ คือ ที่อุณหภูมิ 410.24 องศาเซลเซียส ระยะเวลา
 ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1
 โดยน้ำหนัก (0.15 กรัม) ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 88.60 โดยน้ำหนัก และ
 ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวมีองค์ประกอบของแนฟทา เคโรซีน และดีเซล ร้อยละ 15.62 7.93 และ
 40.15 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ อีกทั้งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีองค์ประกอบหลักเป็นพวก แนฟทา
 (C_4-C_{10}) ดีเซล ($C_{11}-C_{22}$) และหมู่ฟังก์ชันเป็นอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีองค์ประกอบที่คล้าย
 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวจากปิโตรเลียม

ภาควิชา : เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ.....

สาขาวิชา : เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา : 2556.....

5372231123: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: PYROLYSIS/ JATROPHA OIL/ NAPHTHA/ LIQUID PRODUCT YIELD/ FCC CATALYST

CHUTIMAPORN WANNAWONG: PYROLYSIS OF JATROPHA OIL TO LIQUID FUELS ON FCC CATALYST IN BATCH REACTOR. ADVISOR: PROF. THARAPONG VITIDSANT, 119 pp.

This research aims to study, the pyrolysis of jatropha oil to liquid fuels over spent fluid catalytic cracking (FCC) catalyst in a 70 ml batch reactor. The variables catalyst-to-jatropha oil ratio (0.15-0.75 g catalyst to 15 g jatropha oil), reaction temperature (380-440°C) and time of reaction (30-60 minutes) were studied for their effect on the yield of liquid fuel. The operating variables were varied and results investigated for their influence on liquid product yield and composition. The liquid fuel was analyzed for product distribution by Simulated Distillation gas chromatography (DGC). According to design-expert program. The optimum conditions of pyrolysis of jatropha oil were reaction temperature of 410.24 °C, catalyst of 0.15 g, initial hydrogen pressured of 1 bar and reaction time of 30 minutes. The product yield at optimum condition is 88.60 percent by weight and contains a naphtha kerosene, diesel to 15.62, 7.93 and 40.15 percent by weight. It was concluded that the liquid fuel obtained from the conversion of jatropha oil mainly similar to those found in naphtha (C₄-C₁₀) and diesel fuel (C₁₁-C₂₂) boiling range fractions of petroleum.

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

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

Academic Year : 2013.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พุกษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เวียงร้อยเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษชากร จารุศิริ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและกรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้ เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจสำคัญ รวมถึงผู้อยู่เบื้องหลังที่ให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ความสำคัญของพลังงาน.....	5
2.1.1 พลังงานทดแทน(Alternative Energy).....	6
2.1.2 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564) พลังงานทดแทนในภาคขนส่ง (ทดแทนการใช้ น้ำมัน).....	7
2.1.3 เชื้อเพลิงใหม่ทดแทนดีเซลในอนาคต.....	8
2.2 น้ำมันปิโตรเลียม.....	9
2.2.1 น้ำมันดิบ (Crude Oil)	9
2.2.2 ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas)	12
2.3 พลังงานชีวมวล (Biomass energy)	12
2.3.1 แหล่งพลังงานที่สำคัญของชีวมวล.....	13
2.4 น้ำมันพืช (vegetable oil).....	14
2.4.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของน้ำมันพืช.....	14

	หน้า
2.5 น้ำมันสบูดำ.....	18
2.5.1 พฤษศาสตร์ของน้ำมันสบูดำ.....	18
2.5.2 การใช้น้ำมันสบูดำแทนน้ำมันดีเซล	19
2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst).....	21
2.6.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา	21
2.6.2 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	21
2.6.3 การเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalytic process).....	22
2.6.4 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	24
2.6.5 ซีโอไลต์ (zeolite).....	24
2.6.6 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์	25
2.6.7 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์	26
2.6.8 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	28
2.6.9 การป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	30
2.6.10 การฟื้นฟูสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่	34
2.6.11 กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking).....	35
2.6.12 กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking)	37
2.7 เทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิงดีเซล	42
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	47
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	47
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้.....	53
3.3 การดำเนินการวิจัย.....	53
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	56
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	58
4.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันสบูดำ.....	58

4.1.1	วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันสบู่ดำก่อนทำไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาตาม คาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatography).....	58
4.1.2	การวิเคราะห์หาองค์ประกอบที่เป็นกรดไขมัน(Fatty acid) ของน้ำมันสบู่ดำ	56
4.1.3	การวิเคราะห์ช่วงอุณหภูมิการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันสบู่ดำ ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analyzer (TGA)	60
4.2	วิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	60
4.2.1	การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี (FCC) ที่ใช้แล้ว ทั้งก่อนและหลังเผา.....	60
4.2.2	วิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังเผาด้วยเทคนิค XRD.....	62
4.2.3	วิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	63
4.2.4	วิเคราะห์ความแรงของตำแหน่งของกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยา.....	64
4.3	ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว.....	65
4.3.1	การออกแบบการทดลองแบบ 2k แฟกทอเรียล (2 ^k factorial)	65
4.3.2	ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยา เอฟซีซีใช้แล้ว	65
4.3.3	ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทา ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว	71
4.3.4	หาภาวะที่เหมาะสมจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบน ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว.....	78
4.4	ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว	80
4.4.1	อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันสบู่ดำ.....	80
4.4.2	อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันสบู่ดำ.....	82

4.4.3	อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อ ร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันสบูดำ	84
4.4.4	อิทธิพลของความดันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันสบูดำ.....	86
4.5	การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว.....	88
4.5.1	การวิเคราะห์สารประกอบที่เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว.....	88
4.5.2	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว.....	90
4.5.3	การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	92
4.6	การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	92
4.6.1	วิเคราะห์ค่าความร้อน (Calorific value) ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจาก การไพโรไลซิสน้ำมันสบูดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	92
4.6.2	วิเคราะห์ความหนืด (Viscosity) ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการ ไพโรไลซิสน้ำมันสบูดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	93
4.7	วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ CHO ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิส น้ำมันสบูดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	94
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	95
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	95
5.1.1	ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการไพโรไลซิสน้ำมันสบูดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่ง ปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	95
5.1.2	ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert ของการไพโรไลซิส น้ำมันสบูดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	96
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	96
	รายการอ้างอิง.....	97
	ภาคผนวก.....	100
	ภาคผนวก ก.....	101
	ภาคผนวก ข.....	105
	ภาคผนวก ค.....	114
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	119

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันพืชและไขมันสัตว์บางชนิด.....	17
2.2 แสดงค่าคุณสมบัติทาง เคมีและทางกายภาพของน้ำมันของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ.....	18
2.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางฟิสิกส์-เคมี ของน้ำมันสบู่น้ำมันตามมาตรฐาน AOCS.....	20
2.4 ตัวอย่างสารที่เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องมาจากการเกิดสารประกอบ โลหะที่ระเหยได้.....	33
3.1 ระดับของตัวแปรที่ศึกษา.....	54
3.2 จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ.....	54
4.1 องค์ประกอบของน้ำมันถั่วเหลืองตามค่าจุดเดือดก่อนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา.....	58
4.2 องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันสบู่น้ำมัน.....	59
4.3 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี(FCC) ใช้แล้วก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศา	61
4.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี ใช้แล้วก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส.....	63
4.5 ผลการวิเคราะห์ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วก่อนเผาเผาที่ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส.....	64
4.6 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่น้ำมัน บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว.....	66
4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Anova) ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่น้ำมันบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว.....	70
4.8 ร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่น้ำมันบนตัวเร่งปฏิกิริยา เอฟซีซีใช้แล้ว.....	72
4.9 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Anova) ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ เชื้อเพลิงเหลว ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่น้ำมันบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว.....	76
4.10 ขอบเขตของตัวแปรในการหาภาวะที่เหมาะสมโดยโปรแกรม Design-Expert ของ การไพโรไลซิสน้ำมันสบู่น้ำมันบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว.....	78

ตารางที่	หน้า
4.11 แสดงภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert ของการการไฟโรไลซิส น้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	79
4.12 เปรียบเทียบผลภาวะเหมาะสมระหว่างคำนวณจากโปรแกรม Design-Expert กับ การทดลองจริงของการการไฟโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	80
4.13 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ที่ภาวะเหมาะสมจากการไฟโรไลซิส น้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	89
4.14 ค่าความร้อนของน้ำมันสบู่ดำและผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากภาวะเหมาะสม ของการไฟโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	93
4.15 ค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากภาวะเหมาะสมของการ ไฟโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	93
4.16 องค์ประกอบธาตุ CHO ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไฟโรไลซิสน้ำมัน สบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	94
ก1 ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันสบู่ดำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	101
ข1 สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	106

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 สัดส่วนการใช้พลังงานของประเทศปี 2554.....	5
2.2 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟิน.....	10
2.3 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทแนฟทีน.....	11
2.4 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทแอโรมาติก.....	11
2.5 โครงสร้างโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์	14
2.6 โครงสร้างโมเลกุลกรดไขมันอิ่มตัว.....	15
2.7 โครงสร้างโมเลกุลกรดไขมันไม่อิ่มตัว.....	16
2.8 โครงสร้างหน่วยย่อยของซีโอไลต์	25
2.9 โครงร่างผลึกของซีโอไลต์ชนิดหนึ่ง.....	25
2.10 โครงสร้างตำแหน่งกรดบราวน์สเตท (Bronsted acid site)	25
2.11 การแปลงสภาพของตำแหน่งกรดบราวน์สเตทเป็นตำแหน่งกรดลิวอิส.....	26
2.12 ปฏิริยาการสลายตัวของไตรกลีเซอไรด์โดยปฏิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน	37
2.13 การเกิดกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....	43
2.14 การเกิดกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน.....	44
3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ปริมาตร 70 มิลลิลิตร (Micro-reactor)	47
3.2 ชุดทดลองประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัลและเครื่องปฏิกรณ์ ขนาดเล็ก.....	48
3.3 ชุดกรองสุญญากาศ.....	49
3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatography)	49
3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography – Mass spectrometer, GC-MS)	50
3.6 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (BET surface area)	51
3.7 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)	51
3.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography).....	52

ภาพที่	หน้า
3.9 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer.....	52
4.1 ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของน้ำมันถั่วเหลืองด้วยเทคนิค TGA.....	60
4.2 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนเผา.....	62
4.3 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส...	62
4.4 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ultrastable Y, Dehydrated Dealuminated.....	63
4.5 Normal probability plot ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่มีผลต่อร้อยละผลได้ ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยา เอพซีซีใช้แล้ว	69
4.6 Normal % Probability กับส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	70
4.7 Residual กับ Run ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิส น้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	71
4.8 Normal probability plot ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของ เนฟทาจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	75
4.9 Normal % Probability กับส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	77
4.10 Residual กับ Run ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิส น้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	77
4.11 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำที่ความดัน ไฮโดรเจน เริ่มต้น 1 บาร์ อุณหภูมิ 380 องศา และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 60 นาที.....	81
4.12 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำ ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ อุณหภูมิ 380 องศา และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 65 นาที.....	82
4.13 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำ ที่ความดัน ไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที บนตัวเร่งปฏิกิริยา เอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 380 410 และ 440 องศาเซลเซียส.....	83

ภาพที่	หน้า
4.14 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำ ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 380 410 และ 440 องศาเซลเซียส.....	83
4.15 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำ ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และอุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียสเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	84
4.16 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำที่ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และอุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	85
4.17 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำ ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 3 และ 5 บาร์ บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก	87
4.18 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำที่ อุณหภูมิ 440 องศา เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 3 และ 5 บาร์ บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....	87
4.19 โคโรมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ที่ภาวะเหมาะสมจากการไพโรไลซิส น้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว.....	88
4.20 FTIR spectrum ของน้ำมันสบู่ดำ.....	91
4.21 FTIR spectrum ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากภาวะเหมาะสมจากการ ไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว.....	91
4.22 FTIR spectrum ของน้ำมันเบนซินออกเทน 95.....	92
ข1 ตารางของ 2 Level Factorial Design.....	108
ข2 ตัวแปรและหน่วยที่ใช้ในการทดลอง.....	109

ภาพที่	หน้า
ข3 Response และ หน่วยของตัวแปรที่ทำการทดลอง.....	109
ข4 ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด.....	110
ข5 แถบข้อมูลของ gas liquid kerosene และdiesel.....	110
ข6 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้เนฟทาจากปฏิกิริยาแตกตัวของ น้ำมันสบู่ดำ.....	111
ข7 แสดงการคำนวณผลของ ANOVA	112
ข8 ขอบเขตที่ต้องการในการทดลอง.....	113
ข9 แสดงภาวะที่เหมาะสมและขอบเขตของการทดลอง.....	113
ค1 แสดงโครมาโทแกรมจากการแยกของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	115
ค2 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ น้ำมันตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องมือ Simulated Distillation Gas Chromatography...	115
ค3 แถบการดูดกลืนของ Infrared Spectra ที่ ความยาวคลื่นต่าง ๆ	117
ค 4 Interpreting spectra ที่ได้จากเครื่อง GC-MS	118

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบัน น้ำมันเป็นแหล่งของพลังงานที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม โดยเฉพาะการคมนาคม การขนส่งต่างๆ ล้วนแล้วแต่ใช้น้ำมันปิโตรเลียม และผลิตเชื้อเพลิงจากฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงาน ยังต้องพึ่งพาการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศเป็นมูลค่าปีละมากกว่า 1 ล้านล้านบาท และจากเกิดวิกฤตการณ์ขาดแคลนพลังงานในอนาคตอันใกล้นี้ จึงอาจทำให้ราคาน้ำมันมีราคาสูง และเกิดความไม่มั่นคงทางพลังงานขึ้นในประเทศ ทำให้ประเทศไทยต้องมุ่งหานวัตกรรมพลังงานทดแทนเพื่อลดการพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการใช้พลังงาน ดังนั้น การแสวงหาแหล่งวัตถุดิบจากพืชพลังงานเพื่อทดแทนการใช้น้ำมันจากฟอสซิล จึงเป็นทางเลือกของประเทศไทยที่สำคัญที่ควรดำเนินการ น้ำมันที่ผลิตได้จากพืช เช่น ถั่ว เมล็ดเรพ (rape seed) สบู่ดำ และปาล์มน้ำมัน ซึ่งพืชน้ำมันเหล่านี้เป็นแหล่งทรัพยากรที่สามารถผลิตทดแทนได้ในธรรมชาติ

ในขณะนี้ น้ำมันสบู่ดำ (Jatropha oil) เป็นพืชน้ำมันชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจ นอกเหนือจากปาล์มน้ำมัน เนื่องจาก ประเทศไทยมีสภาพภูมิอากาศและสภาพภูมิประเทศที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของต้นสบู่ดำเป็นอย่างดีสามารถปลูกได้ในพื้นที่ทั่วทุกภาค และไม่สามารถนำมาบริโภคได้จึงไม่กระทบต่อห่วงโซ่อาหารของมนุษย์ และมีความเหมาะสมในการนำมาผลิตไบโอดีเซล อีกทั้งยังมีงานวิจัยที่พบว่า น้ำมันสกัดจากเมล็ดสบู่ดำมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมาก จึงสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์รอบต่ำโดยไม่ต้องเพิ่มส่วนผสมอื่น เช่น รถไถนา เครื่องสูบน้ำ และเครื่องยนต์ทั้งหลายที่ใช้งานเกี่ยวกับด้านเกษตรกรรม แต่เนื่องจากพบปัญหา ด้านคุณภาพบางประการ ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์รอบสูงได้ อาทิ ไชจากสบู่ดำ จะทำให้เครื่องยนต์หนืด ทำให้เครื่องมีปัญหา จึงต้องมีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันให้ดีขึ้น

การแตกตัวด้วยความร้อน (Pyrolysis) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตพลังงานชีวมวล เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงเหลว โดยการใช้ความร้อนในการย่อยสลายสารต่างๆ ให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง ในภาวะไร้อากาศหรือปราศจากก๊าซออกซิเจน น้ำมันสบูดำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีองค์ประกอบที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิส โมเลกุลของน้ำมันสบูดำจะเกิดแตกตัวด้วยความร้อนเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลงจนมีขนาดและสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งปริมาณและคุณภาพของน้ำมันและก๊าซที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ อาทิ เช่น อุณหภูมิ ความดัน เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น นอกจากนี้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับกระบวนการไพโรไลซิส เป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันให้ดีขึ้นอีกด้วย งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาไพโรไลซิสน้ำมันสบูดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ขนาด 70 มิลลิลิตร ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ที่อุณหภูมิ 380-440 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยา 1-5 กรัม ต่อ น้ำมันสบูดำ 15 กรัม โดยจะมีการวิเคราะห์ผลได้ของน้ำมัน แก๊สไฮโดรคาร์บอน และของแข็ง และวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatograph) เพื่อหาค่าการกระจายองค์ประกอบของน้ำมันตามคาบจุดเดือดต่างๆ อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นตัวเร่งที่ใช้แล้ว จึงมีการศึกษาองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRF และวัดขนาดรูพรุนด้วยเครื่องหาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (BET surface area)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันสบูดำเป็นเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิ เวลา ความดันและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

2. ศึกษาภาวะของกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ จากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวมากที่สุด

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันสบู่ดำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่เป็นผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวมากที่สุด
2. เพื่อให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์น้ำมันปิโตรเลียมที่ได้จากการกลั่น

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัย
2. จัดเตรียมหาอุปกรณ์ และเตรียมเครื่องปฏิกรณ์ และตรวจสอบให้พร้อมใช้งาน
3. วิเคราะห์ สมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบเบื้องต้น ก่อนทำปฏิกิริยาด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatograph) เครื่องวัดความหนืดของน้ำมันและวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันสบู่ดำ
4. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสารเมื่อน้ำมันสบู่ดำได้รับความร้อนสูงและเกิดการสลายตัวด้วยเครื่อง TGA (Thermogravimetric analyzer)
5. วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วโดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence spectrometry (XRF) และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค BET
6. ออกแบบการทดลองโดยใช้แฟกทอเรียลแบบสองระดับจากโปรแกรม Design-expert โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคืออุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
7. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ของแต่ละสถานะทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยนำผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นน้ำมันมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น เพื่อทราบค่าการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดต่างๆ
8. หาภาวะที่เหมาะสม โดยศึกษาจากผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่
 - 8.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิ เริ่มต้นที่ 380-440 องศาเซลเซียส
 - 8.2 ศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที

8.3 ศึกษาผลของความดันไฮโดรเจน 1-5 บาร์

8.4 ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา 1-5 กรัมต่อน้ำมันสนุ่ดำ 15 กรัม

9. นำผลิตภัณฑ์น้ำมันสนุ่ดำที่ได้ไปวิเคราะห์ เพื่อศึกษาการกระจายตัวขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดต่างๆด้วยเครื่อง แก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น (DGC) และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC/MS) เพื่อหาองค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์น้ำมันสนุ่ดำ

10. วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล

11. เขียนเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสำคัญของพลังงาน [1 - 3]

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญ เพื่อตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของมนุษย์ และเป็นปัจจัยพื้นฐานการผลิตในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม ซึ่งพลังงานหลักที่มนุษย์ใช้เป็นสิ่งอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันคือ น้ำมันปิโตรเลียม โดยเฉพาะพลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งในปัจจุบันมีความต้องการใช้น้ำมันเป็นจำนวนมาก แต่ปริมาณน้ำมันมีจำนวนจำกัดทำให้ราคาน้ำมันดิบสูงขึ้นมาก นอกจากนี้ปริมาณการใช้อาจจะไม่เกิน 40 ปี ดังนั้นจึงต้องมีการจัดหาพลังงานให้มีปริมาณที่เพียงพอ มีราคาที่เหมาะสม และมีคุณภาพที่ดี สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้ เพื่อให้สามารถตอบสนอง ความต้องการขั้นพื้นฐานของประชาชน และสามารถตอบสนองความต้องการใช้ในกิจกรรมการผลิตต่างๆ ได้อย่างเพียงพอ จึงจำเป็นต้องมีการกระตุ้น พัฒนารูปแบบของพลังงานเชื้อเพลิงต่างๆ ขึ้นมาทดแทน โดยเฉพาะเชื้อเพลิงทดแทนซึ่งในปัจจุบันเริ่มมีการนำพลังงานทดแทนใช้เป็นเชื้อเพลิงจากก๊าซชีวภาพน้ำมันแก๊สโซลล์ น้ำมันไบโอดีเซล จากสถิติการใช้พลังงานของประเทศพบว่า ประเทศไทยมีความต้องการใช้น้ำมันดีเซลในปี พ.ศ. 2554 ถึง 28,201 ล้านลิตร (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน) ดังนั้นเราสามารถส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการใช้น้ำมันพืชในการผลิตไบโอดีเซลแล้ว จะมีผลต่อการรักษาเงินตราของประเทศ สร้างความมั่นคงและสามารถพึ่งพาตนเองด้านพลังงานของประเทศ อีกทั้งช่วยสร้างตลาดที่มั่นคงให้กับผลผลิตทางการเกษตรได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 2.1 สัดส่วนการใช้พลังงานของประเทศปี 2554 [3]

ประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเป็นหลัก จากข้อมูลในปี 2554 ที่ผ่านมามีรายงานว่าร้อยละ 60 ของความต้องการพลังงานเชิงพาณิชย์ขึ้นต้นมาจากการนำเข้า โดยมีสัดส่วนการนำเข้าน้ำมันสูงถึงร้อยละ 80 ของปริมาณการใช้น้ำมันทั้งหมดภายในประเทศและยังมีแนวโน้มจะสูงขึ้นอีกเพราะไม่สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตปิโตรเลียมในประเทศได้ทันกับความต้องการใช้งาน การพัฒนาพลังงานทดแทนอย่างจริงจังจะช่วยลดการพึ่งพาและการนำเข้าน้ำมัน เชื้อเพลิงและพลังงานชนิดอื่น และยังช่วยกระจายความเสี่ยงในการจัดหาเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตไฟฟ้าของประเทศซึ่งเดิมต้องพึ่งพาก๊าซธรรมชาติเป็นหลักมากกว่าร้อยละ 70 โดยพลังงานทดแทนถือเป็นหนึ่งในเชื้อเพลิงเป้าหมายที่คาดว่าจะสามารถนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าทดแทนก๊าซธรรมชาติได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลมแบบทุ้งกังหันลม พลังน้ำขนาดเล็ก ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ และขยะ และหากเทคโนโลยีพลังงานทดแทนเหล่านี้มีต้นทุนถูกลง และได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ก็อาจสามารถพัฒนาให้เป็นพลังงานหลักในการผลิตไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยได้ในอนาคต

2.1.1 พลังงานทดแทน (Alternative Energy)

พลังงานทดแทน (Alternative Energy) คือ พลังงานใดๆ ที่จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ทดแทนพลังงานเชิงพาณิชย์ พลังงานทดแทนเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติใช้แล้วไม่หมดไป หรือแหล่งที่สามารถสร้างขึ้นใหม่เพื่อหมุนเวียนมาใช้ได้อีก และเป็นพลังงานที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยพลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิล เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานจากลม พลังงานจากคลื่น และพลังงานจากพืช เป็นต้น

สามารถแบ่งพลังงานทดแทนออกได้ 2 ประเภท คือ

1. พลังงานสิ้นเปลือง (Non-Renewable Energy) เป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เช่น น้ำมันปิโตรเลียม ถ่านหิน ลิกไนต์ แก๊สเหลว ฯลฯ

2. พลังงานคืนรูป หรือพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) เป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป และสามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล (Bio-Mass) พลังงานแก๊สธรรมชาติ (Bio-Gas) พลังงานลม เป็นต้น

2.1.2 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564) พลังงานทดแทนในภาคขนส่ง (ทดแทนการใช้น้ำมัน)

1. เอทานอล (เชื้อเพลิงทดแทนเบนซิน)

เป้าหมายในปี 2564 คือ 9 ล้านลิตร/วัน ปัจจุบันมีกำลังการผลิตรวม 1.3 ล้านลิตร/วัน โดยมุ่งเน้นการพัฒนาพัฒนาแผน AEDP ที่สำคัญ 2 ด้าน ดังนี้

ด้านอุปทาน

- เพิ่มผลผลิตเฉลี่ยของประเทศต่อไร่ต่อปี ของมันสำปะหลังและอ้อยไม่น้อยกว่า 5 และ 15 ตัน/ไร่/ปี ในปี 2564
- ส่งเสริมพืชทางเลือกอื่นๆ ในเชิงพาณิชย์ เช่น ข้าวฟ่างหวาน เป็นต้น

ด้านอุปสงค์

- เตรียมการยกเลิกการใช้ น้ำมันเบนซิน 91 ภายในตุลาคม 2555
- บริหารส่วนต่างราคาน้ำมัน E20 ให้ถูกกว่าน้ำมันแก๊สโซฮอล์ 95 ประมาณ 3 บาท/ลิตร พร้อมกำหนดให้ค่าการตลาดของน้ำมัน E20 ต้องมากกว่าน้ำมันแก๊สโซฮอล์ 91 และไม่น้อยกว่า 50 สตางค์/ลิตร เพื่อเป็นแรงจูงใจในการเร่งรัดขยายสถานีบริการ E20
- สนับสนุนงบประมาณการวิจัย ทดสอบ และการสร้างแรงจูงใจเพื่อเพิ่มความต้องการใช้เอทานอล เช่น การใช้ conversion kit กับรถยนต์และรถจักรยานยนต์เก่าเพื่อให้สามารถใช้ น้ำมัน E85 ได้ หรือการปรับปรุงดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลให้สามารถใช้ น้ำมัน ED 95 ได้ เป็นต้น
- ประชาสัมพันธ์สร้างความเข้าใจน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E10 E20 E85 อย่างต่อเนื่อง
- สนับสนุนการผลิตรถยนต์ E85 ในรถยนต์นั่งทั่วไป และ ECO-CAR โดยการลดภาษีสรรพสามิต ให้กับผู้ผลิตรถยนต์ E85 50,000 บาท/คัน และ ECO CAR-E85 30,000 บาท/คัน
- เสนอเพื่อให้มีการกำหนดให้การซื้อรถยนต์ราชการเป็นรถยนต์ E85
- ปรับปรุงกฎ ระเบียบ ข้อบังคับและกฎหมายต่างๆ เพื่อรองรับการค้า เอทานอลอย่างเสรีในอนาคต

2. ไบโอดีเซล (เชื้อเพลิงทดแทนดีเซล)

เป้าหมายในปี 2564 คือ 5.97 ล้านลิตร/วัน ปัจจุบันมีกำลังการผลิตรวม 1.62

ล้านลิตร/วัน โดยมุ่งเน้นการพัฒนาพัฒนาแผน AEDP ที่สำคัญ 2 ด้าน ดังนี้

ด้านอุปทาน

- ส่งเสริมการปลูกปาล์มในพื้นที่ที่เหมาะสมโดยไม่แย่งพื้นที่พืชอาหาร โดยส่งเสริมให้มีพื้นที่ปลูกปาล์ม 5.5 ล้านไร่ และมีปาล์มให้ผลรวม 5.3 ล้านไร่ ภายในปี 2564
- มีกำลังการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ ไม่น้อยกว่า 3.05 ล้านตัน/ปี
- ส่งเสริมให้เป้าหมายผลผลิตภาพ หรือ yield ไม่น้อยกว่า 3.2 ตัน/ไร่/ปี มีอัตราสัดส่วนการให้น้ำมัน (Oil Content) ไม่น้อยกว่า 18%

ด้านอุปสงค์

- บริหารจัดการสัดส่วนการผสมน้ำมันไบโอดีเซลให้สอดคล้องกับปริมาณการผลิตน้ำมันปาล์มภายในประเทศ
- ทดลองนำร่อง B10 หรือ B20 ใน fleet รถบรรทุก หรือ เรือประมงเฉพาะเตรียมพัฒนามาตรฐานไบโอดีเซลแบบ FAME ให้สามารถมีสัดส่วนผสมในน้ำมันดีเซลถึง 7% (B7)

2.1.3 เชื้อเพลิงใหม่ทดแทนดีเซลในอนาคต : เป้าหมาย 2564 25.0 ล้านลิตร/วัน

ด้วยที่ปัจจุบันการวางแผนการใช้เอทานอล เพื่อทดแทนการใช้ น้ำมันเบนซินในประเทศสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ในทางกลับกันการวางแผนที่จะนำไบโอดีเซลมาทดแทนการใช้ น้ำมันดีเซลยังมีข้อจำกัดอยู่มากโดยเฉพาะการที่ประเทศไทยมีวัตถุดิบที่สามารถนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ไม่เพียงพอ ดังนั้น ในการวิจัยและพัฒนา“เชื้อเพลิงใหม่ทดแทนดีเซลในอนาคต” จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยในปัจจุบันสามารถบ่งชี้แนวทางการพัฒนาเชื้อเพลิงใหม่ทั้งสิ้น 7 แนวทาง ซึ่งประกอบด้วยการพัฒนาพืชพลังงานใหม่ 2 แนวทาง (สบู่ดำ และ สาหร่าย) การนำเอทานอลมาผสมใช้แทนน้ำมันดีเซล 3 แนวทาง (FAEE, ED95 และ ดีไซฮอลล์) และการพัฒนาเทคโนโลยีการแปรสภาพน้ำมัน 2 แนวทาง (BHD และ BTL) โดยได้มีการจัดทำแผนปฏิบัติการ (พ.ศ. 2555-2559) เพื่อส่งเสริมงานวิจัยเกี่ยวกับเชื้อเพลิงใหม่ทดแทนดีเซลอนาคตเรียบร้อยแล้ว โดยเป็นการบูรณาการการทำงานร่วมกันระหว่าง กระทรวงพลังงาน (พ.น.) และ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (วท.) โดยพอสรุปสังเขป ดังนี้

- สบู่ดำ พัฒนาพันธุ์และเพาะปลูกที่ให้ผลผลิตสูง พัฒนาเครื่องจักรในวัฏจักรสบู่ดำ และทดสอบการใช้งานระยะยาวในเครื่องยนต์
- สาหร่ายน้ำจืด-น้ำเค็ม ปรับปรุงพันธุ์และพัฒนาการผลิตเชิงพาณิชย์
- FAEE ทดสอบการใช้งานกับรถยนต์ และมาตรฐานทดสอบคุณภาพ
- ED95 พัฒนาระบบเติมแต่งและเทคโนโลยีการตัดแปลงเครื่องยนต์เก่า
- ดีเซลฮอล์ ทดสอบสัดส่วนเอทานอลที่เหมาะสมจะผสมในน้ำมันดีเซลที่มีไบโอดีเซลผสมอยู่แล้ว 3-5% ทดสอบการใช้งานในเครื่องยนต์
- BHD ทดสอบการใช้งานในเครื่องยนต์ และมาตรฐานทดสอบคุณภาพ
- BTL ผลิตระดับ pilot scale ทดสอบการใช้งาน

2.2 น้ำมันปิโตรเลียม [4,8]

ปิโตรเลียม คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยมีธาตุ คาร์บอน และไฮโดรเจน เป็นองค์ประกอบหลัก และอาจมีธาตุอื่น เช่น กำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจน ปนอยู่ด้วย ปิโตรเลียมเป็นได้ทั้งของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของปิโตรเลียม พลังงานความร้อน และความกดดันตามสภาพแวดล้อมที่ปิโตรเลียมสะสมตัวอยู่

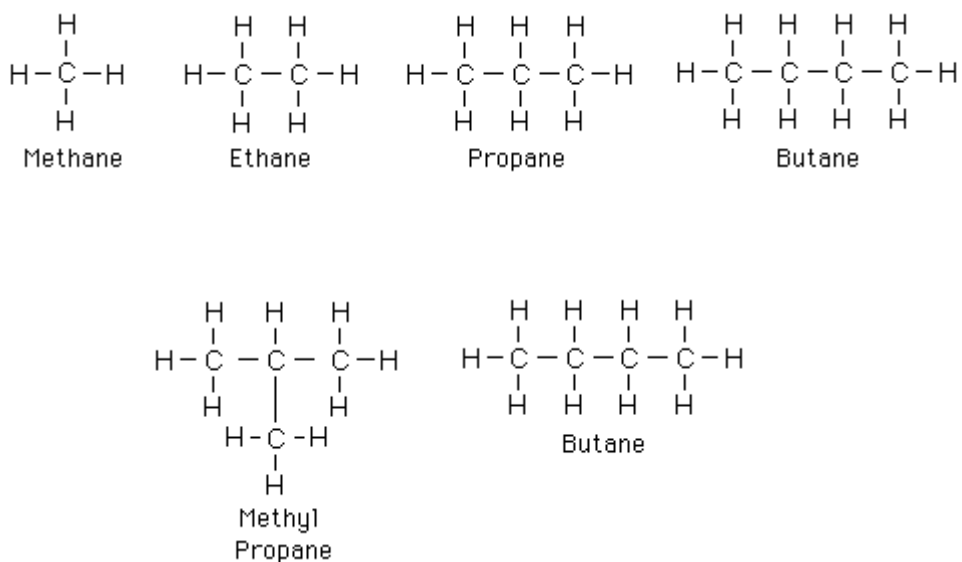
ปิโตรเลียมแบ่งตามสถานะในธรรมชาติได้ 2 ชนิด

2.2.1 น้ำมันดิบ (Crude Oil)

น้ำมันดิบ เป็นสารผสมที่สลับซับซ้อน มีสถานะตามธรรมชาติเป็นของเหลว ประกอบด้วยสารประกอบส่วนใหญ่เป็น ไฮโดรคาร์บอนประเภทต่างๆ ตั้งแต่โมเลกุลขนาดเล็กสุดจนถึงพวกโมเลกุลขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่น เช่น กำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจน ปนอยู่ด้วย น้ำมันดิบจะมีลักษณะและคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปมาก ทั้งนี้เพราะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของไฮโดรคาร์บอนประเภทต่างๆ น้ำมันดิบมีไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นสารประกอบระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนอยู่เป็นส่วนใหญ่ ไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำมันดิบทุกชนิดมีอยู่ 3 ประเภท ได้แก่

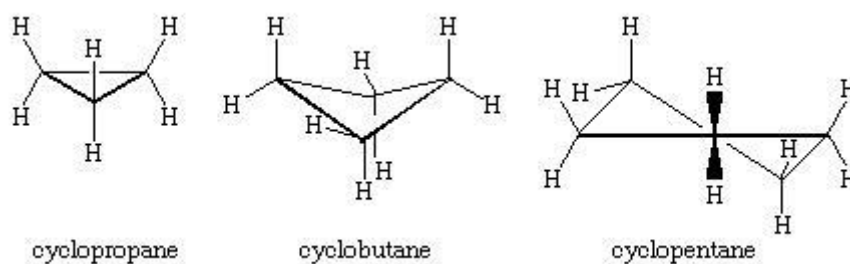
1.1 พาราฟิน หรืออัลเคน (paraffin or alkanes) คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดอิ่มตัว (saturated hydrocarbons) โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบชนิดนี้มีทั้งแบบสายโซ่ตรง (straight chain) ซึ่งเรียกว่า นอร์มอลพาราฟิน (normal paraffins หรือ n-paraffins) พาราฟินที่มี

ไฮโดรเจนมีอยู่ค่อนข้างมากในช่วง $C_{10} - C_{14}$ ซึ่งเป็นช่วงในน้ำมันก๊าด และในช่วง $C_{14} - C_{18}$ เป็นช่วงของน้ำมันดีเซล และแบบสายโซ่กิ่ง (branched chain) ซึ่งเรียกว่า ไอโซพาราฟิน (isoparaffins) พันธะที่ใช้ในการยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอน ($-C-C-$) เป็นแบบพันธะเดี่ยว (single bond) มีสูตรโมเลกุลโดยทั่วไป คือ C_nH_{2n+2} เมื่อ n คือ ตัวเลขที่แสดงจำนวนอะตอมของคาร์บอนในสายโซ่โมเลกุล และเมื่อจำนวนอะตอมของคาร์บอนในสายโซ่โมเลกุลมีมากกว่า 3 อะตอมขึ้นไป จะทำให้สารประกอบที่มีสูตรโมเลกุลเหมือนกัน สามารถจัดสูตรโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไปได้อีก ซึ่งเรียกว่า ไอโซเมอร์ (isomers) ตัวอย่างของสารประกอบในกลุ่มนี้ เช่น มีเทน (methane) อีเทน (ethane) โพรเพน (propane) บิวเทน (butane) เพนเทน (pentane) เป็นต้น แสดงสูตรโครงสร้างดังภาพที่ 2.2



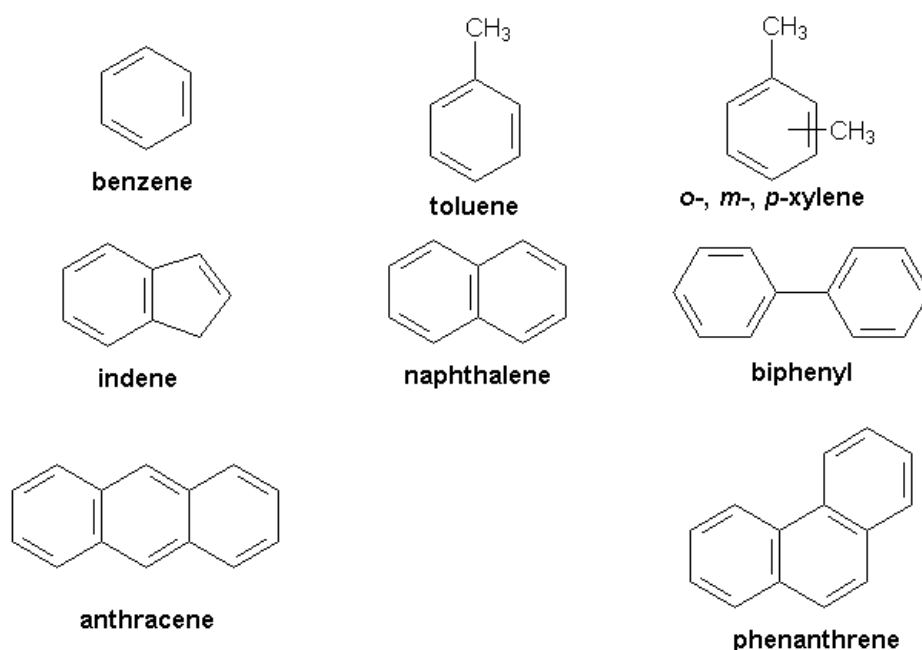
ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟิน [5]

1.2 แนฟทีน หรือไซโคลอัลเคน (naphthene or cycloalkane) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อิมตัวโดยมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลเชื่อมต่อกันเป็นวง การจับตัวระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอนเป็นแบบพันธะเดี่ยว มีสูตรทางเคมี คือ C_nH_{2n} ตัวอย่างของสารประกอบในกลุ่มนี้ เช่น ไซโคลโพรเพน (cyclopropane, C_3H_6), ไซโคลบิวเทน (cyclobutane, C_4H_8) และไซโคลเฮกเซน (cyclohexanes, C_6H_{12}) แสดง ดังภาพ 2.3



ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทแนฟทีน [6]

1.3 อะโรมาติก (Aromatic) คือ ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวหรือไม่มีความเสถียรภาพ มีวงคาร์บอน 6 อะตอมยึดต่อเป็นวงกันด้วยพันธะคู่ และพันธะเดี่ยวสลับกัน อาจมีหนึ่งวงแหวนหรือมากกว่าก็ได้ มีสูตรทางเคมีทั่วไป คือ C_nH_{2n-6} สำหรับอะโรมาติก ที่มีวงเดียว ได้แก่ เบนซีน (benzene, C_6H_6), โทลูอีน (toluene, C_7H_8) เป็นต้น มักจะพบในส่วนที่เป็นน้ำมันเบนซินรถยนต์ของน้ำมันดิบ อะโรมาติกที่มี 2 วง ซึ่งได้แก่ พกแนฟทาลีน (Naphthalene) มักจะอยู่ในส่วนที่เป็นน้ำมันก๊าดและน้ำมันดีเซล และอะโรมาติกที่มีหลายวงติดกัน (Polynuclear Aromatic) จะอยู่ในส่วนหนักๆ และเป็นส่วนสำคัญของสารที่เรียกว่า แอสฟัลทีน (Asphaltene) ในกากน้ำมัน และในยางมะตอย แสดงสูตรโครงสร้างดังภาพ 2.4



ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทอะโรมาติก [7]

2.2.2 ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas)

ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) คือ ก๊าซชีวภาพชนิดหนึ่ง กำเนิดจากการทับถมของซากสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์เป็นเวลานานนับหลายล้านปี โดยซากพืชซากสัตว์เหล่านี้จะแปรสภาพเป็นก๊าซและน้ำมัน เนื่องจากความร้อนและความกดดันของผิวโลกและสะสมอยู่ในชั้นดิน ก๊าซธรรมชาติจึงประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในปริมาณร้อยละ 95 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็น ไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ปนอยู่เพียงเล็กน้อย จึงเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่ง จัดอยู่ในอนุกรมพาราฟิน มีคุณสมบัติอิ่มตัวและไม่เปลี่ยนแปลงทางเคมีในสภาวะปกติ มีสูตรทางเคมีเป็น C_nH_{2n+2} โดยทั่วไปประกอบด้วยก๊าซมีเทน (Methane, CH_4) ประมาณ 70% ขึ้นไป ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของแหล่งก๊าซธรรมชาติแต่ละแหล่งเป็นสำคัญ ในแหล่งหรือบ่อก๊าซธรรมชาตินั้น เราอาจพบก๊าซธรรมชาติที่อยู่ในสถานะเป็นก๊าซ (Gas Phase) ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนที่เบา คือ มีคาร์บอนน้อย ตั้งแต่ (C_1 - C_4) หรือมีสถานะเป็นของเหลว (Liquid Phase) ที่ปะปนอยู่กับก๊าซ เนื่องจากมีส่วนประกอบของไฮโดรคาร์บอนชนิดหนัก (ตั้งแต่ C_5 ขึ้นไป) อยู่มากซึ่งจะอยู่ในสถานะใดนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (Temperature) และ ความดัน (Pressure) นอกจากนี้ เรายังอาจพบก๊าซธรรมชาติจากแหล่งเดียวกันกับน้ำมันดิบได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม แม้ก๊าซธรรมชาติจากต่างแหล่งจะมีสัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซไม่เหมือนกัน มีสถานะแตกต่างกัน แต่ก็สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ใน 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ ใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมี

2.3 พลังงานชีวมวล (Biomass energy) [9]

ปัจจุบันน้ำมันเป็นแหล่งของพลังงานที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการคมนาคมขนส่ง และรวมทั้งในวงการอุตสาหกรรมก็ใช้น้ำมันเป็นแหล่งพลังงานส่วนใหญ่ เนื่องจากสถานการณ์ราคาน้ำมันที่ไม่แน่นอนและความหวงใยต่อสภาพแวดล้อมทำให้มีการแสวงหาพลังงานรูปแบบใหม่เข้ามาทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล พลังงานจากชีวมวลจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากชีวมวลนี้เป็นแหล่งทรัพยากรที่สามารถผลิตทดแทนได้ในธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีทั้งพืชและเศษเหลือทิ้งจากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมากจึงเป็นโอกาสอันดีที่จะนำเศษเหลือทิ้งดังกล่าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์และลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลจากประเทศผู้ผลิตน้ำมัน นอกจากนี้การใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวลยังช่วยรักษาภาวะแวดล้อมด้วยเนื่องจากพลังงานจากชีว

มวลมีการปลดปล่อยก๊าซชนิดต่างๆ และชนิดของสารพิษโดยรวมออกมาน้อยกว่าพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ชีวมวลมีหลายชนิด เช่น ไม้ยืนต้น พืชเกษตรกรรมประเภทข้าวโพด มันสำปะหลัง พืชพลังงาน เช่น ปาล์มน้ำมัน น้ำมันสบู่ดำ รวมทั้งขยะสที่เกิดจากการอุปโภคบริโภคและมูลสัตว์ด้วย ชีวมวลเหล่านี้สามารถนำมาแปรรูปเพื่อผลิตเป็นพลังงานได้โดยมีวิธีการและกระบวนการแปรรูปเป็นพลังงานอยู่หลายวิธี พลังงานที่ได้นั้นมีค่าพลังงานและความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและวิธีการในการเปลี่ยนรูปพลังงาน

2.3.1 แหล่งพลังงานที่สำคัญของชีวมวล

ชีวมวล คือ วัสดุที่ได้จากธรรมชาติซึ่งอาจเป็นสิ่งมีชีวิตหรือส่วนประกอบของธรรมชาติ รวมทั้งสิ่งเหลือทิ้งจากสิ่งมีชีวิตที่สามารถสร้างทดแทนได้ □ ชีวมวลที่นำไปแปรรูปพลังงานส่วนใหญ่เป็นพืชหรือส่วนประกอบของพืชชีวมวลที่ได้จากธรรมชาติมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน สามารถจำแนกแหล่งที่มาของชีวมวล ได้ดังนี้

1. พืชเกษตรกรรม (Agricultural crop) เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ฯลฯ ซึ่งเป็นแหล่งสำคัญของคาร์โบไฮเดรต แป้งและน้ำตาลสามารถปลูกเป็นพืชซึ่งให้พลังงานและผลิตเป็นน้ำมันพืชได้ รวมทั้งยังมีพืชที่ปลูกเพื่อนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงโดยเฉพาะ เช่น ปาล์มน้ำมัน และสบู่ดำ
2. วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Agricultural residues) เช่น ฟางข้าว รากมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด กากถั่วเหลือง
3. ไม้หรือเศษเหลือทิ้งของไม้ (Wood and wood residues) เช่น เศษเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตไม้ และไม้ยืนต้นทั่วไป รวมทั้งเศษเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เป็นต้น
4. เศษเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม (Waste streams) เช่น แกลบจากโรงสีข้าว กากน้ำตาล และชานอ้อยจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล และเศษเหลือทิ้งจากการสกัดปาล์มน้ำมัน
5. ขยะมูลฝอยและมูลสัตว์ เช่น ขยะที่เป็นของสดและมูลสัตว์ชนิดต่างๆ

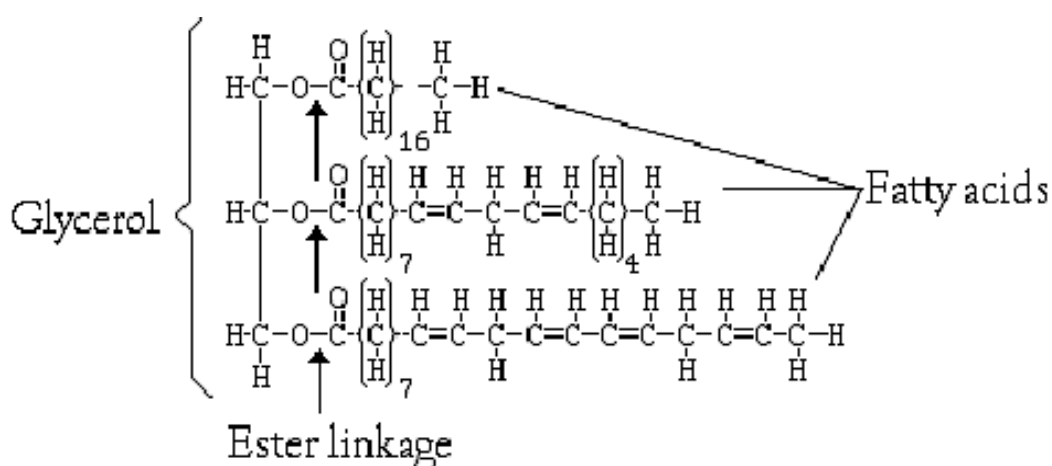
6. สิ่งมีชีวิตบางชนิด ตัวอย่างเช่น พืชจำพวกสาหร่ายซึ่งสามารถนำไปทำประโยชน์ได้หลายรูปแบบ ได้แก่ การย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจน ไบโอดีเซลจากสาหร่าย และการผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรเจน เป็นต้น (Hossain, ABMS., et al., 2008)

2.4 น้ำมันพืช (vegetable oil) [10-13]

น้ำมันพืช (vegetable oil) คือ น้ำมัน (oil) ที่สกัดได้จากส่วนต่างๆของพืชน้ำมัน(oil crop) เช่น เมล็ด เนื้อผล น้ำมันพืชมีส่วนประกอบหลักคือ ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) มีความหนืดสูงมีโครงสร้างเป็น C_3H_5 เชื่อมต่อกับกรดไขมันซึ่งมีองค์ประกอบชนิดต่างๆกัน และมีปริมาณไขมันอยู่ในโครงสร้างถึงร้อยละ 94-96 ของน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้น้ำมันพืชแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน และน้ำมันพืชไม่ระเหยที่อุณหภูมิห้อง และไม่ละลายน้ำ น้ำมันพืช ให้พลังงานสูง ให้วิตามินอี และส่วนใหญ่ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนในปริมาณมาก แต่ไม่มีคอเลสเตอรอล เพราะพืชไม่สังเคราะห์คอเลสเตอรอล

2.4.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของน้ำมันพืช

น้ำมัน (oil) จากพืช เป็นไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ประกอบด้วยกลีเซอรอล (glycerol) 1 โมเลกุล และกรดไขมัน (fatty acid) 3 โมเลกุล ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ [12]

กรดไขมัน (Fatty acid) เป็นกรดอินทรีย์ที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และ ออกซิเจน โดยมักจะมีจำนวนคาร์บอนเป็นเลขคู่ตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป มีสูตรทั่วไป คือ $R - COOH$ ลักษณะสูตรโครงสร้างของกรดไขมันประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เรียกว่า คาร์บอกซิล (COOH) ซึ่งมีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมตัวกันอยู่ อีกส่วนหนึ่งเรียกว่า ห่วงโซ่คาร์บอน (R) โดยมีธาตุคาร์บอนยึดเหนี่ยวกันเป็นห่วงโซ่ โดยปกติธาตุคาร์บอนจะมีอยู่ 4 แขนงที่เหลือจากการจับธาตุคาร์บอนจะไปจับกับธาตุไฮโดรเจน กรดไขมันมีอยู่หลายชนิด ทุกชนิดจะมีหน่วยคาร์บอกซิลอยู่หนึ่งหน่วย ส่วนที่แตกต่างกันคือลักษณะทางเคมีในส่วนของโซ่คาร์บอน ทำให้กรดไขมันมีชื่อแตกต่างกันไป กรดไขมันแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

1. กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid) เป็น กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid) คือ กรดไขมัน (fatty acid) ที่พันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลเป็นพันธะเดี่ยว และไม่สามารถรับไฮโดรเจนได้อีก มีสูตรทั่วไป คือ $C_nH_{2n+1}COOH$ มีความเสถียร ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้ไม่เกิดการเหม็นหืนจากออกซิเจน (Lipid oxidation) จุดหลอมเหลว (melting point) สูงเมื่อเทียบกับกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) ที่มีจำนวนคาร์บอนเท่ากัน โดยกรดไขมันอิ่มตัวที่พบมากที่สุดได้แก่ กรดปาล์มิติก (C16:0) พบในไขมันสัตว์ น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันปาล์ม เป็นต้น

saturated fatty acid

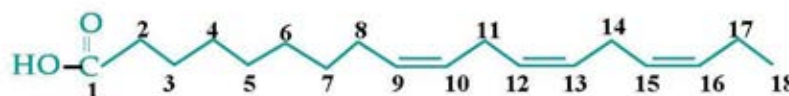


ภาพที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลกรดไขมันอิ่มตัว [13]

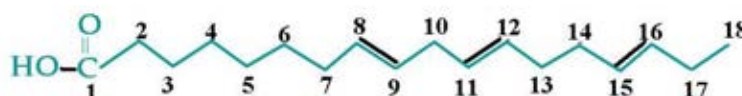
2. กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) เป็นกรดไขมันที่มีคาร์บอนในโมเลกุลมีไฮโดรเจนน้อยกว่าชนิดอิ่มตัว โดยที่มีคาร์บอนในโมเลกุล 2 อะตอมจับกันเองด้วยพันธะคู่ (=) การมีพันธะคู่ 1 แห่ง ทำให้มีไฮโดรเจนน้อยลงกว่าชนิดอิ่มตัว 2 อะตอม การมีพันธะคู่อาจมีมากกว่า 1 ตำแหน่ง กรดไขมันไม่อิ่มตัวนี้พบมากในไขมันพืช ยกเว้นน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันปาล์ม การมีพันธะคู่อยู่มากจะทำให้ไขมันเหม็นหืนได้ง่ายเมื่อตั้งทิ้งไว้ในอากาศ

แต่พบว่าน้ำมันสัตว์มีกลิ่นเหม็นเร็วกว่าน้ำมันพืชทั้ง ๆ ที่น้ำมันพืชมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่า ทั้งนี้เพราะน้ำมันพืชมีวิตามินอีซึ่งเป็นสารป้องกันการเติมออกซิเจนอยู่แล้วตามธรรมชาติ ตัวอย่างกรดไขมันชนิดนี้ได้แก่ กรดไลโนเลอิก กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่พบมากคือ กรดโอเลอิก (C18:1)

cis unsaturated fatty acid



tran unsaturated fatty acid



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลกรดไขมันไม่อิ่มตัว [13]

ไขมันและน้ำมันแต่ละชนิดจะมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพแตกต่างกันตามสมบัติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ เช่น น้ำมันมะพร้าวมีกรดไขมันอิ่มตัวโมเลกุลสายสั้นจำนวนมาก และมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวจำนวนน้อยจึงมีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้มีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ส่วนไขวัวมีกรดไขมันชนิดอิ่มตัวโมเลกุลสายยาวจำนวนมากเป็นองค์ประกอบ จึงมีลักษณะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูง ปริมาณสัดส่วนของกรดไขมันทั้งสองชนิดที่ต่างกันทำให้สมบัติของน้ำมันพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่

2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันพืชและไขมันสัตว์บางชนิด [14]

กรดไขมัน	ไขมันวัว	น้ำมันหมู	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันเมล็ดฝ้าย	น้ำมันปาล์ม	น้ำมันถั่วเหลือง
Caprylic C8:0	-	-	7.6	-	-	-
Capric C10:0	-	-	7.3	-	-	-
Lauric C12:0	-	0.3	48.2	-	0.1	-
Myristic C14:0	3.1	1.7	16.6	1.0	1.2	0.1
Myristoleic C14:1	0.4	0.2	-	-	-	-
Palmitic C16:0	29.1	26.2	8.0	25.0	46.8	10.5
Stearic C18:0	18.9	13.5	3.4	2.8	37.5	3.2
Oleic C18:1	44.0	42.9	5.0	17.1	10.0	22.3
Linoleic C18:2	0.3	9.0	2.5	52.7	-	54.5
Linolenic C18:3	-	0.3	-	-	-	8.3

ตารางที่ 2.2 ค่าคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ [29]

ชนิดของ น้ำมัน	ค่าความถ่วงจำเพาะ ที่ 25 องศาเซลเซียส (gm/ml)	ค่าความหนืด ที่ 25 องศาเซลเซียส (cp)	ค่าความร้อน (kJ/kg)
ถั่วเหลือง	0.918	57.2	39,350
ทานตะวัน	0.918	60.0	39,490
มะพร้าว	0.915	51.9	37,540
ปาล์ม	0.898	88.6	39,550
สบู่ดำ	0.914 (ที่ 38 องศาเซลเซียส)	45.68	39,000
ดีเซล	0.845	3.8	46,800

2.5 น้ำมันสบู่ดำ [14-16]

2.5.1 พฤกษศาสตร์ของน้ำมันสบู่ดำ

สบู่ดำจัดเป็นพืชในวงศ์ Euphorbiaceae เป็นวงศ์เดียวกับมันสำปะหลัง ยางพารา สบู่ดำ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha curcas* L. ชื่อสามัญ คือ physic nut ทั้งนี้ คำว่า *Jatropha* มีรากศัพท์มาจาก ทางกรการแพทย์ของภาษากรีก 2 คำ คือ *iatros* แปลว่า หมอ และ *trophe* แปลว่า อาหาร ส่วนคำว่า *curcas* เป็นชื่อเรียกของสบู่ดำ บริเวณเมือง Malabar ในประเทศอินเดีย นอกจากนี้ ยังมีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปในแต่ละประเทศอีกด้วย เช่น พม้กเยา มะเยา มะหัว มะหุ้งฮั่ว มะห่ง หงเทก (เหนือ) สบู่หัวเทศ สลอดดำ สลอดป่า สลอดใหญ่ สีหลอด (กลาง)

สบู่ดำ เป็นไม้พุ่มยืนต้นขนาดกลาง สูงประมาณ 2 – 7 เมตร มีอายุไม่น้อยกว่า 20 ปี จัดอยู่ในวงศ์ Euphorbiaceae เช่นเดียวกับยางพารา สบู่แดง บัตตาเวีย มะละกอฝรั่ง หนุมนานั่งแทน เป็ยเขียน มันสำปะหลัง มะยม มะขามป้อม ผักหวานบ้าน เป็นต้น

ลำต้น มีเปลือกลำต้นเรียบ มีสีเทา-น้ำตาล ลำต้นเกลี้ยง อวบน้ำ เป็นไม้เนื้ออ่อน ไม่มีแก่น หักง่าย มีน้ำยางสีขาวใส ใบ เป็นใบเดี่ยวรูปไข่ กว้างหรือค่อนข้างกลม จัดเรียงแบบสลับ โคนใบเว้า รูปหัวใจ ปลายใบแหลม ขอบใบเรียบหรือหยักเว้า 3-5 หยัก

ดอก มีช่อดอกแบบ Panicle หรือ panicle cyme ประกอบด้วยดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในช่อดอกเดียวกัน ดอกทั้ง 2 ชนิด มีกลีบรอง และกลีบดอก อย่างละ 5 กลีบ ดอกตัวผู้มีเกสรเรียงเป็นวง 2 วง วงละ 5 อัน ดอกตัวเมียมีรังไข่ ก้านเกสรตัวเมียมี 6 แฉก ดอกมีขนาดเล็กสีเขียวแกมเหลือง มีกลิ่นหอมอ่อนๆ ออกเป็นช่อที่ซอกใบหรือปลายยอด ในช่อดอกเดียวกันมีดอกตัวผู้มากกว่าดอกตัวเมีย (อัตราดอกตัวผู้ : ดอกตัวเมีย เท่ากับ 6-7 : 1) ดอกแต่ละช่อบานไม่พร้อมกัน มีช่อดอกประมาณ 15-30 ช่อต่อต้น แต่ละช่อดอกมีดอกย่อย 70-120 ดอก แต่จะติดผลเพียง 8-14 ผล

ผล ผลที่เกิดจากช่อดอกเดียวกันจะสุกแก่ไม่พร้อมกัน ผลอ่อนมีสีเขียว เมื่อแก่มีสีเหลืองคล้ายลูกจันทน์ ผลมีลักษณะกลมรีเล็กน้อย ผลมีขนาดปานกลาง กว้าง 2 – 3 เซนติเมตร ยาว 2.5-3.5 เซนติเมตรผลมี 3 พูๆ ละ 1 เมล็ด เมื่อสุกแก่ผลจะปริแตก ผลสด 1 กิโลกรัม มีจำนวน 85-90 ผล

เมล็ด รูปกลมรี เปลือกนอกสีดำ เนื้อในสีขาว มีสารพิษ (curcin) หากบริโภคจะเกิดอาการอาเจียนและท้องเสีย เมล็ดกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร ยาวประมาณ 2 เซนติเมตร น้ำหนัก 100 เมล็ด ประมาณ 70 กรัม เมล็ด 1 กิโลกรัม มีประมาณ 1,300-1,500 เมล็ด

2.5.2 การใช้น้ำมันสบู่ดำแทนน้ำมันดีเซล

น้ำมันสบู่ดำสามารถละลายได้ดีในน้ำมันดีเซลและเบนซิน เมื่อเก็บไว้นานๆ ไม่มีการแยกชั้น ดังนั้น น้ำมันสบู่ดำจึงใช้ประโยชน์ในการผสม กับน้ำมันเบนซิน สำหรับเดินเครื่องยนต์เบนซินได้ดีอีกด้วย โดยปกติสิ่งที่นำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนสำหรับเครื่องยนต์เบนซิน น่าจะเป็นที่นิยมมากกว่าใช้แทนน้ำมันดีเซล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศอุตสาหกรรม สำหรับประเทศที่พัฒนาแล้วทั้งหลายก็คำนึงถึงการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง สำหรับผู้มีเครื่องยนต์เบนซินอยู่แล้วก็จะยอมรับแนวความคิดนี้ได้ง่ายตามความเป็นจริงประเทศที่กำลังพัฒนากลับมีความคิดที่ตรงกันข้ามความจริงก็คือว่ารถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซล ตามที่ขึ้นทะเบียนไว้จะมี จำนวนมากกว่ารถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์ชนิดอื่นๆ ยิ่งไปกว่านั้น เครื่องมือที่ใช้ในการก่อสร้าง เครื่องจักรกลเกษตร และเรือหาปลา มักนิยมใช้เครื่องยนต์ดีเซลกันองค์กร the United States Environment Protection Agency หรือ USEPA พบว่าน้ำมันสบู่ดำมีผลกระทบต่อด้านมลภาวะทางอากาศน้อยกว่าการใช้น้ำมันอื่น ๆ สามารถลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนตกค้าง (unburned hydrocarbons) ได้ประมาณ 68% คาร์บอนมอนอกไซด์ (carbon monoxide) 44 % ปริมาณซัลเฟต (sulphates) 100 % กลุ่มสารอโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (aromatic hydrocarbons PAHs) 80% และคาร์ซิโนเจนิกไนเตรท (carcinogenic nitrated PAHs) 90% จากหลักการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ความร้อน โดยการอัดอากาศในกระบอกสูบ แล้วฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปเพื่อทำการเผาไหม้ นั่น คุณสมบัติทางเคมี

ของน้ำมันสบูดำ จะอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดและดีกว่า ค่ากำหนดมาตรฐานของน้ำมันดีเซลในบางประเทศ เช่น ไทย ญี่ปุ่น และยุโรป เช่น ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ค่าความหนาแน่น (density) ค่าจุดวาบไฟ (flash point) ค่าซีเทน (cetane) และค่าความหนืด (viscosity) รวมถึงให้ความร้อนสูงเท่ากับ 9,470 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล น้ำมันเบนซินและเอธิลแอลกอฮอล์ที่ให้ความร้อนเท่ากับ 10,170 10,600 และ 6,400 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งคุณสมบัติทางเคมี เหล่านี้ เป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ การติดไฟ การป้องกันการน็อค และการประหยัดน้ำมันในเครื่องยนต์ดีเซล เช่นเดียวกับค่าการเผาไหม้ของสารซัลเฟต (sulphated ash) หรือปริมาณสารซัลเฟอร์ตกค้างที่จะกัดกร่อนชิ้นส่วนของระบบหัวฉีดเครื่องยนต์ดีเซลให้สึกกร่อนได้ง่าย และทำให้อากาศเป็นพิษ น้ำมันสบูดำจะมีค่าน้อยกว่าน้ำมันดีเซลด้วย

นอกจากนี้ภายในเมล็ดสบูดำยังประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีที่มีประโยชน์หลายชนิดและมีปริมาณสูง เมื่อเปรียบเทียบกับในเมล็ดถั่วเหลือง และถั่วลิสง ซึ่งเป็นพืชที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ เช่น โปรตีน กรดไขมันไม่อิ่มตัว และไฟเบอร์ เมล็ดสบูดำจึงมีประโยชน์ในด้านการทำปุ๋ยอินทรีย์ได้ ซึ่งจากการวิเคราะห์จากเมล็ดสบูดำมีธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชสูง หลายชนิด ได้แก่ ฟอสฟอรัส (0.61 %) แคลเซียม (0.47%) แมกนีเซียม (0.42%) โซเดียม (0.04%) และโพแทสเซียม (1.03%)

ตารางที่ 2.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางฟิสิกส์-เคมี ของน้ำมันสบูดำตามมาตรฐาน AOCS

ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid, % as oleic acid)	4.80
ค่าสaponification value	197.13
ค่าไอโอดีน (Iodine value, Wijs)	97.08
ดัชนีหักเห (Refractive index) ที่ 25°C	1.4670
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ที่ 25°C	0.9136
ความหนืด (Viscosity)ที่ 25°C (Gardner) (cp)	45.68
กำมะถัน (Sulphur)	0.13-0.16
จุดวาบไฟ (Flash point)	110.00
ค่าซีเทน (Cetane Value)	51.00

นอกจากนี้ น้ำมันสกัดจากเมล็ดสบู่ดำมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากจึงสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์รอบต่ำโดยไม่ต้องเพิ่มส่วนผสมอื่น เช่น รถไถนา เครื่องสูบน้ำ และเครื่องยนต์ทั้งหลายที่ใช้งานเกี่ยวกับด้านเกษตรกรรม เป็นต้น และยังสามารถนำไปได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าลบ 7 องศาเซลเซียส ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการส่งเสริมให้ปลูกต้นสบู่ดำเป็นจำนวนมากมากกว่า สองล้านไร่ และมีการวางแผนไปจนถึงอนาคต

2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) [17-18]

ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือคะตะลิสต์ หมายถึง สารที่สามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate) และค่าการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการในปฏิกิริยาเคมีใดๆ โดยไม่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาและสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาคือสารที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นโดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมไดนามิกของระบบ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงกระบวนการในการเกิดปฏิกิริยาเคมีให้ไปในทิศทางที่ใช้พลังงานกัมมันต์ (Activation Energy) ที่ต่ำลง และส่งผลให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น

2.6.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ไม่เข้าไปรบกวนสมดุลของปฏิกิริยา
2. ไปช่วยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา
3. เป็นสารเสมอ (ไม่ใช่พลังงาน)

2.6.2 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous Catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารตั้งต้น โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในสถานะของเหลว ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ มีหลายประการ เช่น สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ภายใต้สภาวะปกติเป็นการลดค่าใช้จ่าย ไม่เกิดการสลายตัวของสารในกระบวนการผลิต สามารถเลือกเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเฉพาะปฏิกิริยาที่ต้องการได้ และ ตัวเร่งมีราคาไม่แพงสูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือ มีขั้นตอนยุ่งยากในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความบริสุทธิ์ อาจมีค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการล้างตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งทำให้เกิดน้ำเสียได้ และมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

- สารละลายกรด-เบสที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมัน
- สารประกอบเฮไลด์ของโลหะ เช่น ภูเขาเนียมคลอไรด์ที่มีลิแกนด์

เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และฟอสฟีน ใช้ในปฏิกิริยาคาร์บอนิลเลชันของโอเลฟินส์หรือเมทานอล

- สารประกอบออร์กาโนเมทัลลิก เช่น ไตรคลอไรด์และอลูมิเนียมอัลคิล มักใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของโอเลฟินส์

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะที่แตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยา ส่วนใหญ่จะนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเป็นของแข็ง ในการเร่งปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นมีสถานะเป็นของเหลวหรือแก๊ส ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และจะมีขั้นตอนในการดูดซับ-คายซับของสารตั้งต้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ข้อดีของการเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์มีการเกิดสารพิษน้อยกว่า สามารถใช้ในภาวะที่มีความดันสูงหรืออุณหภูมิได้ ในขั้นตอนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นที่เหลือและผลิตภัณฑ์ทำได้ง่าย ทำให้สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ และมีอายุในการใช้งานสูง

ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

- โลหะ (metal) เช่น เหล็กสำหรับปฏิกิริยาการสังเคราะห์แอมโมเนียและแพลตินัม สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอมโมเนีย
- โลหะที่มีตัวรองรับ (supported metal) เช่น นิกเกิลบนซิลิกาสำหรับไฮโดรจิเนชันของไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว
- ซีโอไลต์ (zeolite) เป็นสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกตที่มีโครงสร้างแบบเฉพาะ เช่น ซีโอไลต์ ZSM-5 สำหรับปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอน

2.6.3 การเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalytic process)

การเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์เป็นปฏิกิริยาที่เกิดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีขั้นตอนมากกว่า 1 ขั้นตอนเสมออีกทั้งยังจะมีการดูดซับของสารตั้งต้นอย่างน้อย 1 ชนิดในการเกิดปฏิกิริยา

การแพร่ภายนอกและภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีวิธกัณฑ์ส่วนใหญ่มักใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ 3 เฟส ประกอบด้วยของแข็งคือ สารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวและแก๊ส ขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยาแบ่งออกได้ เป็น 7 ขั้นตอน เป็นดังนี้

1. การแพร่กระจายของสารตั้งต้นจากภายนอกเข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (external diffusion) เป็นการแพร่ของสารตั้งต้นจากแก๊สเฟสเข้าสู่ชั้นฟิล์มของแก๊ส เป็นการแพร่ผ่านผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังชั้นฟิล์มที่เป็นขอบเขต (Boundary layer) ล้อมรอบตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในชั้นตอนนี้ยังไม่มีเปลี่ยนแปลงทางเคมี

2. การแพร่กระจายของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน (internal pore diffusion) เป็นการถูกจำกัดด้วยการแพร่ภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการแพร่จะแพร่จากบริเวณผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีบริเวณที่ว่องไว (active size) และ เนื่องจากรูพรุนมีขนาดเล็กมากและไม่มีรูปทรงแน่นอน ทำให้เกิดการชนกันเองระหว่างการแพร่ ซึ่งเป็นการชนกันระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น หรือการชนของโมเลกุลกับผนังของรูพรุน ขั้นตอนนี้ยังไม่มีเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้น

3. การดูดซับของสารตั้งต้นลงบนผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา (adsorption) ขั้นตอนนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีบริเวณตำแหน่งที่ว่องไวภายในรูพรุน โดยโมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกดูดซับที่ผิวด้านนอกแล้วแพร่ไปจนถึงตำแหน่งว่องไวบริเวณภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วเกิดดูดซับในเชิงเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) คือ เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น ที่เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) กับผิวด้านนอกของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เรียกว่าตัวดูดซับ (adsorbent)

4. การเกิดปฏิกิริยาของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (surface reaction) เมื่อเกิดการดูดซับแล้วสารตั้งต้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น

5. การคายซับ (desorption) เป็นการหลุดออกของผลิตภัณฑ์จากผิวตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุดลง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขั้นสุดท้าย

6. การแพร่ของผลิตภัณฑ์ออกจากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยผลิตภัณฑ์จะแพร่ผ่านรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยากลับไปสู่ผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสารตั้งต้นจะถูกแพร่ออกมาด้วยถ้าปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 4 เกิดไม่สมบูรณ์

7. การแพร่ของผลิตภัณฑ์จากรูพรุนผ่านผิวหนังด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังชั้นฟิล์มที่เป็นขอบเขต (Boundary layer) ล้อมรอบตัวเร่งปฏิกิริยา และเช่นเดียวกันว่าหากปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์จะมีสารตั้งต้นแพร่ออกมาด้วยเช่นกัน

2.6.4 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญ เช่น พื้นที่ผิว (surface area) ปริมาตรรูพรุน (pore volume) ขนาดรูพรุน (Pore Size) และการกระจายตัวของขนาดรูพรุน (pore size distribution)

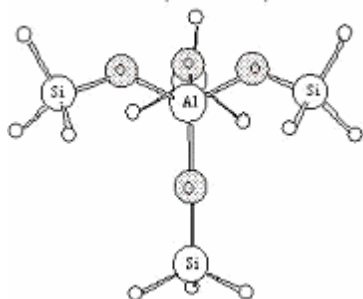
พื้นที่ผิว (surface area) พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะมีตำแหน่งที่ว่องไวที่เกิดจากการรวมตัวกันของอะตอมและโมเลกุลบนพื้นผิวของโลหะ ในการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคบีอีที (BET) จะสามารถคำนวณพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจากการดูดซับของแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลวบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนั้นในการเพิ่มพื้นที่ผิวสามารถทำได้โดยการลดขนาดของวัสดุให้เล็กลงเป็นผงละเอียด แต่วิธีนี้ทำได้ยาก วิธีเพิ่มพื้นที่ผิวที่ดีที่สุด คือ การทำวัสดุให้พรุนโดยทำให้เกิดโพรงเล็กๆ จำนวนมาก

ขนาดและจำนวนรูพรุน (size and number of pores) สามารถบอกปริมาณพื้นที่ผิวภายในของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวภายในสูงจะมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่อย่างหนาแน่น ซึ่งจะทำให้การกระจายตัวของตำแหน่งกัมมันต์ (active site) สูง และขนาดของรูพรุนที่เลือกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับโมเลกุลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ จึงทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากตำแหน่งกัมมันต์ได้ดีที่สุด เนื่องจากขนาดของโพรงของตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีความสำคัญต่อความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

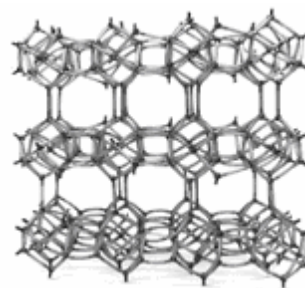
2.6.5 ซีโอไลต์ (zeolite) [18-20]

ซีโอไลต์ คือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) มีหน่วยย่อยที่ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน หรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_2 หรือ AlO_2) สร้างพันธะกันเป็นทรงสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุมโดยใช้ออกซิเจนร่วมกัน (รูปที่ 2.5) ก่อให้เกิดเป็นโครงร่างผลึกที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็น

ช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็งมีรูพรุนที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบแบบสามมิติ ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์อยู่ในช่วง 2-10 อังสตรอม



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างหน่วยย่อยของซีโอไลต์ [18]

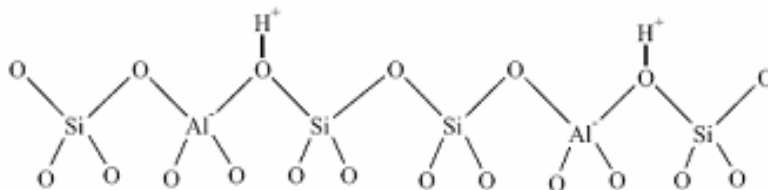


ภาพที่ 2.9 โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์
ชนิดหนึ่ง [18]

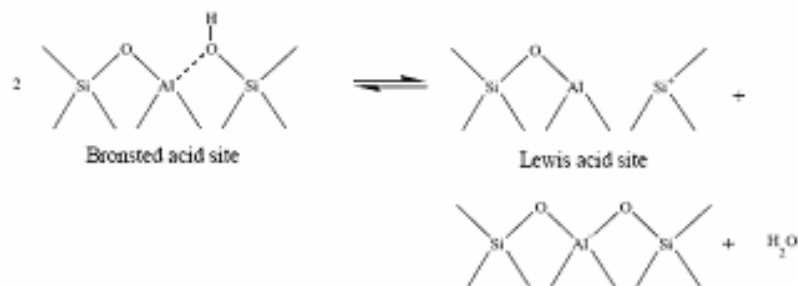
2.6.6 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ [18]

สมบัติที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาของซีโอไลต์มี 2 ประการ คือ สมบัติการเลือกจำเพาะและความเป็นกรด สมบัติการเลือกจำเพาะเกิดขึ้นจากโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดนั้น ๆ โดยถูกกำหนดด้วยอะตอมของ ออกซิเจนที่ล้อมรอบรูเปิด ดังนั้นสารตั้งต้นต้องมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของซีโอไลต์ จึงจะสามารถแพร่เข้าทำ ปฏิกิริยาภายในรูพรุนได้ ส่วนสมบัติความเป็นกรดของซีโอไลต์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1. **ชนิดของตำแหน่งกรด** ได้แก่ กรดบราวน์สเตท (Bronsted acid) มีตำแหน่งกรดเป็น Si-OH-Al ซึ่งเป็นตำแหน่งกรดที่สำคัญในการเร่งปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยา ดังภาพที่ 2.10 และกรดลิวอิส (Lewis acid) ที่ภาวะอุณหภูมิสูงในตำแหน่งกรดบราวน์สเตท (Bronsted acid site) สามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นตำแหน่งกรดลิวอิส (Lewis acid site) ซึ่งเป็นการปรับสภาพของซีโอไลต์ เนื่องจากเกิดการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้าง ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างตำแหน่งกรดบราวน์สเตท [18]



ภาพที่ 2.11 การแปลงสภาพของตำแหน่งกรดบราวน์สเตทเป็นตำแหน่งกรดลิวอิส [18]

2. ปริมาณของตำแหน่งกรด จะถูกกำหนดด้วยอัตราส่วน Si/Al ถ้าปริมาณของอะลูมิเนียมต่ำจะทำให้ ซีโอไลต์มีตำแหน่งกรดมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มลักษณะการชอบน้ำให้กับซีโอไลต์ ทำให้เกิดการดูดซับสารตั้งต้นบนพื้นผิวซีโอไลต์มากขึ้น ซึ่งบางครั้งอาจทำให้เกิดการอุดตันรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาได้

3. ความแรงของตำแหน่งกรด ถูกกำหนดด้วยอัตราส่วน Si/Al เช่นเดียวกัน ถ้าลดปริมาณอะลูมิเนียมลงจะทำให้ความแรงของตำแหน่งกรดเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่อัตราส่วน Si/Al ต่ำมากจะไม่ส่งผลต่อความแรงของตำแหน่งกรด

สมบัติความเป็นกรดของซีโอไลต์ สามารถปรับแต่งสมบัติของซีโอไลต์ได้โดยการบำบัดด้วยกรดหรือเบสหรือการกราฟ (grafting) หมู่อินทรีย์ลงบนพื้นผิวซีโอไลต์

2.6.7 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์

ซีโอไลต์มีสมบัติเป็นกรด (acid properties) และการเลือกจำเพาะ (selective properties) สูงมีความเสถียรทางความร้อนและความร้อนในภาวะที่มีน้ำ (thermal and hydrothermal stability) จึง สามารถฟื้นฟูสภาพด้วยความร้อน (thermal regeneration) และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการเผา (calcination) ในบรรยากาศที่มีออกซิเจน จึงมักนำเอา ซีโอไลต์มาใช้งาน 4 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้

1. **ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา** เช่น ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) ปฏิกิริยาแอลคิลเลชัน (alkylation) ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) เป็นต้น โดยมีการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและ เคมีของซีโอไลต์ให้เหมาะสมกับปฏิกิริยามากขึ้น เช่น A. Gola et al. ทำการปรับอัตราส่วนระหว่างซิลิกอน Y เพื่อเพิ่มความเป็นกรด (acidity) โดยการนำซีโอไลต์ Y ผ่านไอน้ำ (hydrothermal steaming) ทำให้อะตอมของอะลูมิเนียมถูกดึงออกจากโครงสร้างซีโอไลต์ (dealumination) จากนั้นแลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต (ammonium nitrate: NH_4NO_3) แล้วนำไปเผา (calcination) อะตอมของซิลิกอนจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่แทนที่อะตอมของอะลูมิเนียมที่หลุดออกไป ทำให้อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูงขึ้น เพิ่มความเป็นกรดของซีโอไลต์ และมีโครงสร้างที่คงทนต่อความร้อนมากขึ้น เรียกว่า Ultrastable Y (USY) ในปัจจุบัน USY นำมาใช้ในกระบวนการไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) การแตกสลาย (cracking) และแอลคิลเลชันของไฮโดรคาร์บอนในโรงกลั่นน้ำมัน

2. **ใช้เป็นสารดูดซับ (sorption agent)** ซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ทำให้มีสมบัติการเลือกจำเพาะ สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้ตามขนาด และโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด จึงนำซีโอไลต์มาใช้ใน การแยกสาร (seperation) การทำให้บริสุทธิ์ (purification) และการทำให้แห้ง (dehydration) โดยซีโอไลต์ สามารถดูดซับและคายน้ำได้ คือเมื่อให้ความร้อนแก่ซีโอไลต์ น้ำในรูพรุนจะระเหยออกไป แต่เมื่อซีโอไลต์ สัมผัสกับไอน้ำอีกครั้ง ก็สามารถดูดซับน้ำได้อีก นอกจากนี้ ยังใช้ซีโอไลต์ในการดูดซับสารอื่น เช่น ไอโอดีน ตะกั่ว และแอมโมเนีย เป็นต้น

3. **สารลดความกระด้างของน้ำ (water softener)** เนื่องจากซีโอไลต์มีประจุบวกของโลหะแอลคาไลเกาะอยู่อย่างหลวมๆ เช่น โซเดียม หรือโพแทสเซียม จึงสามารถแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมและ แมกนีเซียมไอออน ซึ่งเป็นประจุของโลหะที่อยู่ในน้ำกระด้างได้

4. **ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin)** ซีโอไลต์สามารถใช้ในการกำจัดแอมโมเนีย ในน้ำเสีย โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแอมโมเนียมกับโลหะโซเดียมที่อยู่ในรูพรุนของซีโอไลต์ รวมทั้ง สามารถใช้ขจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ จากไอเสียเครื่องยนต์ให้กลายเป็นแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนที่ปลอดภัย

2.6.8 ลักษณะที่เอื้อต่อการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ความเสถียรทางความร้อน (thermal stability) โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมจะใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูงประมาณ 300-600 องศาเซลเซียส ในการทำให้เกิดปฏิกิริยา และมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมในกระบวนการ ซึ่งมีความจำเป็นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องเสถียรในสภาวะที่ทำปฏิกิริยาเป็นเวลานานและต่อเนื่อง และการที่ซีโอไลต์เป็นสารประกอบ aluminosilicate ที่เป็นผลึกแข็งจึงมีความเสถียรต่อความร้อนสูง เมื่อพิจารณาอัตราส่วน Si/Al แล้วพบว่าซีโอไลต์ที่มีค่า Si/Al สูงจะทนความร้อนสูง และถ้าใช้ขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์ในการจำแนกพบว่าซีโอไลต์ชนิดที่มีขนาดรูพรุนเล็กจะทนต่อความร้อนได้สูงกว่าซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ แต่ด้วยที่ซีโอไลต์ส่วนใหญ่มีความเสถียรจึงสามารถใช้ได้ทั้งปฏิกิริยา endothermic เช่น cracking และ reforming ซึ่งเกิดที่ภาวะอุณหภูมิสูง และปฏิกิริยา exothermic เช่น alkylation และ isomerization ซึ่งเกิดที่ภาวะอุณหภูมิต่ำ

2. พื้นที่ผิวในการเร่งปฏิกิริยาสูง (high surface area) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์จะสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากบริเวณเร่งจะอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น และจากการที่ซีโอไลต์มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงโดยพื้นผิวโดยส่วนใหญ่คือ พื้นที่ผิวในรูพรุนซึ่งจะมีบริเวณเร่งอยู่ และการใช้โครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดเล็กจะทำให้พื้นที่ผิวด้านนอกเพิ่มมากขึ้นทำให้สารสามารถแพร่เข้ารูพรุนได้มากขึ้นจึงให้ผลดีกว่าโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่

3. ปฏิกิริยาระดับโมเลกุล (molecular reactor) ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยซีโอไลต์ สารตั้งต้นจะต้องแพร่และถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนก่อน แล้วค่อยเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ในบริเวณที่ถูกดูดซับ โดยสิ่งที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนทั้งหมดจะมีขนาดจำกัด และใกล้เคียงกับขนาดของโมเลกุลสำหรับที่เป็นปฏิกิริยาแบบโมเลกุลเดี่ยว (monomolecular Reaction) คือมีสารตั้งต้นเพียงตัวเดียวอยู่ภายในโพรงเดี่ยวและเกิดปฏิกิริยาในทุกๆโพรงในลักษณะเดียวกัน ส่งผลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงได้น้อย และด้วยการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับสารตั้งต้นไว้ ก็ส่งผลให้มีความเข้มข้นสูงจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็ว ส่วนในปฏิกิริยาแบบโมเลกุลเชิงคู่ (bimolecular reaction) ต้องอาศัยการชนกันของโมเลกุลของสารตั้งต้นอย่างน้อย 2 ตัว เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้น โดยรูพรุนจะทำหน้าที่คล้าย molecular reaction ที่ช่วยเพิ่มความเข้มข้นให้กับสารตั้งต้น ทำให้โอกาสในการชนกัน เกิดได้มากยิ่งขึ้น

4. การคัดสรรต่อขนาด และภาพร่าง (shape selectivity aspect) การคัดสรรขนาดและภาพร่างเป็นความสามารถพิเศษของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ไม่พบในตัวเร่งตัวอื่น ๆ เนื่องจากซีโอไลต์มีบริเวณเร่งอยู่ภายในรูพรุนด้วยขนาดที่จำกัด ดังนั้นสารตั้งต้นจะต้องแพร่ผ่านเข้าไปภายในรูพรุนให้ได้ก่อนถึงจะมีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นก็ต้องแพร่ผ่านออกจากรูพรุนให้ได้อีกด้วย จึงทำให้ขนาดของรูพรุนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทเข้ามาควบคุมทั้งขนาดและภาพร่างของโมเลกุลที่เกิดขึ้น ทั้งหมดในปฏิริยานั้นๆ สามารถแบ่งได้ใน 3 ลักษณะ ได้แก่

4.1 การคัดสรรโมเลกุลของสารตั้งต้น (reactant shape selectivity) สารตั้งต้นจะถูกคัดขนาดเข้าไปทำปฏิกิริยาเพื่อให้ เกิดปฏิกิริยาที่ต้องการ เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนพวงอัลเคน ($C_6 - C_8$) ซึ่งโครงสร้างมีทั้งที่เป็นสายโซ่ตรงและโซ่กิ่ง ซึ่งสายโซ่กิ่งจะเป็นโครงสร้างที่ดีมีค่าออกเทนสูงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดีกว่าพวกสายโซ่ตรง ดังนั้นจึงมีการนำเอาซีโอไลต์มาแยกพวกสายโซ่ตรงโดยการดูดซับเข้าไปในรูพรุน ที่เข้าไปได้ เนื่องจาก kinetic diameter เล็กกว่าพวกสายโซ่กิ่งและเมื่อเข้าไปในรูพรุนแล้วจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวเกิดขึ้น ซึ่งรูพรุนนี้สารจำพวกสายโซ่กิ่งไม่สามารถที่จะเข้าไปเกิดปฏิกิริยาได้โดยเป็นผลจากการคัดสรรสารตั้งต้นของตัวเร่งปฏิริยานั่นเอง แต่การคัดสรรก็ขึ้นกับการเลือกใช้ชนิดของซีโอไลต์ด้วยเช่นกัน

4.2 การคัดสรรภาพร่างของสารมัธยันต์ (intermediate shape selectivity) สารมัธยันต์เป็นตัวที่กำหนดทิศทางการเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้เป็นผลิตภัณฑ์ การเลือกใช้ซีโอไลต์จึงมีผลต่อการคัดเลือกปฏิกิริยาดังนี้ เช่น การเกิดปฏิกิริยา disproportionation ของ m-xylene ซึ่งจะเกิดผลิตภัณฑ์ 2 ชนิด คือ 1,2,4-trimethylbenzene และ 1,3,5-trimethylbenzene เป็นผลมาจากการมีสารมัธยันต์ที่ต่างกัน โดยปฏิกิริยาจะเกิดผ่านปฏิกิริยาแบบโมเลกุลเชิงคู่ของ xylene ซึ่ง 1,3,5 trimethylbenzene เกิดจากสารมัธยันต์ที่มีความเกะกะมากกว่าสารมัธยันต์ของ 1,2,4-trimethylbenzene การที่จะแยกการเกิดปฏิกิริยาเป็น สารมัธยันต์ จึงขึ้นกับการเลือกซีโอไลต์มาใช้แยกจากความต่างของความเกะกะที่เกิดขึ้น

4.3 การคัดสรรภาพร่างของสารผลิตภัณฑ์ (product shape selectivity) สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนั้นต้องสามารถแพร่ผ่านรูพรุนของซีโอไลต์ให้ได้ ถ้าเกิดว่าไม่สามารถแพร่ผ่านไปได้ อาจจะทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับในกรณีที่เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ หรืออาจทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่นเพื่อสุดท้ายแล้วให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แพร่ผ่านรูพรุนออกมาได้

2.6.9 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา [17]

เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยามีช่วงการใช้งานนานแต่ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยามักลดลงตามระยะเวลาการใช้งานแสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีการเสื่อมสภาพ ตัวอย่างเช่นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทโลหะที่มีตัวรองรับใช้ในอุตสาหกรรมการกลั่นปิโตรเลียมสามารถผลิตสารผลิตภัณฑ์ได้ 200-800 บาร์เรลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาหนึ่งปอนด์ เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพจะถูกนำไปผ่านกระบวนการเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่หรือถูกทิ้งแล้วแทนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่แทน มีหลายกระบวนการที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้เสื่อมความว่องไว ในภาวะอุณหภูมิที่ดำเนินงานสารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นสารตั้งต้นอาจสลายตัวอย่างสมบูรณ์เกิดเป็นคาร์บอนที่ไม่ว่องไวที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นชั้นหนา (โค้ก) สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาหลายชนิด การเสื่อมสภาพเป็นไปอย่างช้ามากพอที่จะใช้ในกระบวนการที่ระบบคงตัวได้ สารตั้งต้นที่สภาวะแก๊สและของเหลวจะผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาไปด้วยความเร็วที่เรียกว่า ความเร็วสเปซ (space velocity) ซึ่งปกติแล้วมีหน่วยวัดเป็นต่อชั่วโมง หมายถึงน้ำหนักของของเหลวหรือแก๊สเป็นปอนด์ที่ผ่านไปเป็นหนึ่งในหน่วยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาในหนึ่งชั่วโมง (weight hourly space velocity, WHSV) สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ว่องไวอื่นๆ การเสื่อมสภาพเป็นไปอย่างรวดเร็วมากจนต้องดำเนินงานแบบรอบคือเครื่องปฏิกรณ์จะ "สลับไปมา" (swing) ระหว่างการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับกระบวนการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นการเข้าใจสาเหตุของการเสื่อมสภาพและพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ๆ ซึ่งสามารถทนต่อพิษได้มากขึ้นจึงเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสนใจเสมอสำหรับผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับตัวเร่งปฏิกิริยา

สารที่เป็นพิษหลายชนิดประพัตติตัวโดยการเข้าบดบังตำแหน่งว่องไวบนพื้นผิวยิ่งกว่านั้น สารพิษอาจเปลี่ยนโครงสร้างพื้นผิวระดับอะตอมซึ่งมีผลให้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง บางครั้งอัตราการเสื่อมความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะเนื่องจากการมีกำมะถันปนอยู่ในปริมาณน้อยอาจส่งผลเสียที่ใหญ่มาก เครื่อง catalytic convactor ที่ใช้ในรถยนต์จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องกำจัดสารประกอบของตะกั่ว (tetraethyl-lead) ซึ่งเป็นหนึ่งในสารกันเครื่องยนต์ชนิดได้ดีที่สุดออกจากแก๊สเนื่องจากมันเป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยา Pt-Pd โดยจะทำให้เลดซัลเฟตเกาะบนพื้นผิวโลหะมีตระกูล หนึ่งในสาเหตุที่สำคัญที่สุดของการเสื่อมความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการแตกตัวน้ำมันดิบคือการที่สารปนเปื้อนโลหะเข้าเกาะบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสารปนเปื้อนเหล่านี้ปรากฏอยู่ในรูปแบบของสารประกอบของสารตั้งต้นผสม สารประกอบออร์แกโนเมทัลลิก (organometallic compound) ที่มีวาเนเดียมและไทเทเนียมร่วมด้วยเมื่อสลายตัวแล้วไม่เพียงแต่จะทำให้พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมเท่านั้นแต่ยังเข้าไปอุดอยู่ในรูของ

ตัวรองรับ พื้นที่ผิวสูงอีกด้วย ทำให้เป็นอุปสรรคในการสัมผัสกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นในกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นมาใหม่ในบางครั้งไม่ได้แสดงความว่องไวตามที่ต้องการขึ้นกับถูกนำเข้ามาครั้งแรกของสายสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีประสิทธิภาพดีแต่อาจมีปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์เกิดขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออก เพื่อจุดมุ่งหน้านี้ สารพิษปริมาณน้อยมักจะถูกเติมเข้าไปในสารผสมของปฏิกิริยาหรือนำเข้าไปในขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นสารปนเปื้อนที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพอาจมีการใช้กันบ้างแต่ไม่มากนักเพื่อปรับปรุงความสามารถเลือกของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้

1. การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องมาจากสารที่เป็นพิษ (Poisoning)

การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องมาจากสารที่เป็นพิษ (poisoning) เกิดจาก เกิดการดูดซับทางเคมีอย่างแข็งแรงของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ บนตำแหน่งที่ว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยสารที่เป็น “พิษ”

กลไกการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาอันเนื่องมาจากสารที่เป็นพิษ

1. เกิดการดูดซับทางกายภาพของสารพิษ บนบั้งพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
2. เกิดการเปลี่ยนแปลงทางอิเล็กทรอนิกส์ของตำแหน่งที่ว่องไว ทำให้การดูดซับ-คายซับของโมเลกุลของสารเปลี่ยนแปลงไป
3. เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้สมบัติในการเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลง
4. ทำให้ขั้นตอนการดูดซับ-คายซับช้าลง

การแบ่งชนิดของสารที่เป็นพิษตามการเลือกเกิด

1. สารที่เป็นพิษเลือกเกิดที่ตำแหน่งที่ว่องไว

เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องมาจากสารที่เป็นพิษที่ตำแหน่งที่ว่องไวสูง ก่อนที่ปริมาณสารพิษน้อย

2. สารที่เป็นพิษเลือกเกิดที่ตำแหน่งที่ไม่ว่องไว

เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องมาจากสารที่เป็นพิษที่ตำแหน่งที่ว่องไวต่ำกว่าก่อนที่ปริมาณสารพิษน้อย

3. สารที่เป็นพิษเลือกเกิดแบบไม่จำเพาะเจาะจง

เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องมาจากสารที่เป็นพิษเป็นส่วนเดียวกับปริมาณสารพิษแบบเส้นตรง

2. การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องมาจากฟอสฟอริ่ง(Fouling)/การเกิดโค้ก

การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องมาจากฟอสฟอริ่ง/การเกิดโค้กเกิดจาก ตำแหน่งที่ว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกบดบังด้วยโค้กที่เกิดจากฟลูอิดเฟส หรือการเกิดอุดตันของรูพรุนหรือช่องว่างในเครื่องปฏิกรณ์ ตัวอย่างเช่น การเกิดโค้กบนตัวเร่งปฏิกิริยา Ni/Al_2O_3 ในปฏิกริยารีฟอร์มมิงของไอน้ำ

การลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ทำให้เกิดโค้ก

- ใช้อัตราส่วนไอน้ำต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูง (>2.5)
- ใช้อัตราส่วนของแก๊สมีเทนต่ำ

3. การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องมาจากการซินเทอริ่ง (Sintering)

1. เกิดการสูญเสียพื้นผิวที่ว่องไวเนื่องมาจากการโตของขนาดผลึก
2. สูญเสียโครงสร้างหรือรูพรุนของตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา
3. เกิดการสูญเสียพื้นผิวที่ว่องไวเนื่องมาจากการถูกบดบังโดยตัวรองรับที่ไม่เสถียร
4. การถ่ายโอนพื้นผิวที่ว่องไวไปในวัฏภาคแก๊ส

การซินเทอริ่งมักเกิดที่อุณหภูมิสูง (>500°C) และมักจะถูกร่งด้วย ไอน้ำ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดซินเทอริ่ง

- อุณหภูมิ
- ความดัน
- ชนิดของโลหะ

- การกระจายตัวของโลหะ
- โปรโมเตอร์ (promoter) และสารปนเปื้อน
- พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
- โครงสร้างและขนาดของรูพรุน

นอกจากการซินเทอริ่งแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องมาจากความเสถียรทางความร้อนโดยกลไกอื่น อาทิ การเกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะและตัวรองรับอีกด้วย

4. การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องมาจากการเกิดสารประกอบโลหะที่ระเหยได้

เกิดจากสูญเสียพื้นที่ผิวที่ว่องไวไปในวัฏภาคแก๊สเนื่องมาจากการเกิดสารประกอบโลหะที่ระเหยได้

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างสารที่เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องมาจากการเกิดสารประกอบโลหะที่ระเหยได้

บรรยากาศ	สารประกอบ	ตัวอย่าง
CO , NO	Carbonyl, Nitrosyl	Ni(CO) ₄ , Fe(CO) ₅ 0-300°C
O ₂	Oxides	RuO ₃ 25°C PbO (>850°C)
H ₂ S	Sulfides	MoS ₂ (>550°C)
Halogen	Halides	PdBr ₂ , PtCl ₄ , PtF ₆

5. การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องมาจากการกระทบ/การแตกหัก (attrition)

เกิดจากการสูญเสียพื้นผิวที่ว่องไวเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคที่เล็กลง หรือพื้นผิวถูกทำให้เรียบ/กลม มักเกิดในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด

2.6.10 การป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

การป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องมาจากสารพิษ

- ลดปริมาณสารปนเปื้อน อาทิ ซัลเฟอร์ โดยการติดตั้งการ์ดเบด (guard bed) ZnO ก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์
- ลดปริมาณสารประกอบที่มีความเป็นเบสสูง อาทิ แอมมีน พิริดีน
- เลือกจับสารที่เป็นพิษโดยโลหะที่ไม่ต้องการเช่นการใช้นิกเกิลเป็นตัวจับสาร antimony

การป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องมาจากฟาล์วลิง/การเกิดโค้ก

- ลดปริมาณ free radicals โดยติดตั้งตัวดักจับ เพิ่มสารแก๊สซิไฟอิง
- ลดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา
- เติมสารโปรโมเตอร์ที่ช่วยให้ขนาดของโลหะเหมาะสมเช่น Cu หรือ S ใน Ni หรือ Ru
- เติมสารโปรโมเตอร์ที่ช่วยเพิ่มการละลายของคาร์บอนเช่น Pt ใน Ni
- ลดความเป็นกรดของตัวรองรับ เช่นใช้ MgO TiO₂ แทน Al₂O₃
- ป้องกันไม่ให้เกิดการจำกัดการแพร่ในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น ใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

การป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องมาจากซินเทอร์ริง

- ลดอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา
- ลดปริมาณไอน้ำ
- เติมสารที่มีจุดหลอมเหลวสูงเพื่อช่วยเพิ่มความเสถียรทางความร้อนของโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่นเติม Ru Rh ลงใน Ni
- เติมสารเพิ่มความเสถียรของตัวรองรับ เช่น เติม Ba Zn Si Mn ลงในอลูมินา

2.6.11 การฟื้นฟูสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

วิธีการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้งานอีกครั้งขึ้นกับสาเหตุการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา บ่อยครั้งพบว่า การเกาะติดของคาร์บอนเป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพระหว่างกระบวนการเปลี่ยนไฮโดรคาร์บอน โดยการให้ความร้อนกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้งานแล้วโดยใช้อากาศหรือออกซิเจนสามารถเผาไล่คาร์บอนออกไปได้ ความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้มาสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งกระบวนการแคตาไลติก ซินเทอร์ริงหรือการที่อนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาเคลื่อนเข้าหากันเนื่องจากได้รับอุณหภูมิสูงในระยะยาวเวลานานทำให้พื้นที่ผิวลดลง ออกซิเจนสามารถออกซิไดซ์สารประกอบโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านั้นเพื่อเปลี่ยนรูปร่างและขนาดของอนุภาคโลหะได้ ออกไซด์ของโลหะมีพลังงานพื้นผิวต่ำกว่าของโลหะ ดังนั้นออกซิเดชันสามารถทำให้ตัวรองรับออกไซด์พื้นผิวสูงมี “ความเปียก (wetting)” ของดีขึ้น สารเติมแต่ง เช่น คลอรีนซึ่งอาจสร้างเฮไลด์โลหะระเหยง่าย (volatile metal halide) ได้สามารถช่วยทำให้สารประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัวกลับมาระบายตัวอีกครั้ง

ที่อุณหภูมิสูง รูปทรงขนาดเล็กของตัวเร่งปฏิกิริยาพื้นผิวสูงอาจถูกทำลายเนื่องจากเกิดการเคลื่อนมารวมกันหรือหลอมละลาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงเคมีวัสดุศาสตร์และเลือกสารประกอบที่มีคุณสมบัติทางพื้นผิวและทางเทอร์โมไดนามิกที่เหมาะสมมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้สามารถคงเสถียรภาพทางความร้อนภายใต้สภาวะปฏิกิริยาที่เปลี่ยนกลับไปกลับมา (ออกซิไดซ์และรีดิวซ์) ได้ การกำจัดสารปนเปื้อนที่เกาะอยู่จากสารผสมตั้งต้นเป็นสิ่งท้าทาย กำมะถัน สารหนู ฟอสฟอรัสและ วานาเดียมมักเกาะระหว่างกระบวนการล้มน้ำมัน ปัญหาบางอย่างสามารถหาวิธีแก้ไขได้แต่จะคงเป็นปัญหาๆไปอาจจะต้องหาข้อมูลอ้างอิงจากแหล่งอื่นๆ

1. การฟื้นฟูสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เสื่อมสภาพจากสารพิษ

Rostrup-Nielsen เสนอการกำจัดซัลเฟอร์บนพื้นผิวของนิกเกิล โดยการทำให้ปฏิกิริยากับไอน้ำที่ 700°C [Rostrup-Nielsen, 1971] Bartholomew เสนอการกำจัดซัลเฟอร์บนพื้นผิวของ Ni, Cu, Pt and Me โดยการทำให้ปฏิกิริยากับไอออกซิเจน/อากาศ ไฮโดรเจน หรือสารออกซิไดซ์ เช่น KMnO_4 [Bartholomew, 1982] อย่างไรก็ตามการฟื้นฟูสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวอาจทำให้เกิดการขึ้นเทอริงของโลหะขึ้นได้

2. การฟื้นฟูสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เสื่อมสภาพจากการเกิดโค้ก

การฟื้นฟูสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เสื่อมสภาพจากการเกิดโค้กทำได้โดยการเผาในบรรยากาศของแก๊สซิไฟอิงเอเจนต์ (gasifying agent) เช่น O_2 , H_2O , CO_2 และ H_2

Gates ในปี 1979 และ Figuerido ในปี 1982 เสนอการกำจัดโค้กบนตัวเร่งปฏิกิริยาคาตาลิติกแครกกิง โดยการเผาด้วย H_2 หรือ H_2O ที่ 400°C [Gates et al., 1979 and Figuerido et al. 1982]

3. การฟื้นฟูสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เสื่อมสภาพจากการขึ้นเทอริง

การฟื้นฟูสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/ Al_2O_3 ที่เสื่อมสภาพจากการขึ้นเทอริงโดยการทำให้ปฏิกิริยาออกซิคลอรีเนชัน มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 การดูดซับของออกซิเจนอะตอมบนพื้นผิวของโลหะแพลตินัม

ขั้นที่ 2 การดูดซับของคลอรีนอะตอมบนพื้นผิวของโลหะแพลตินัม

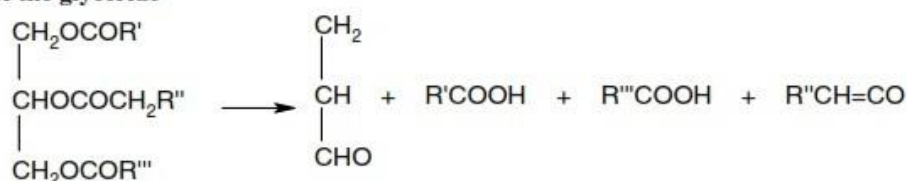
ขั้นที่ 3 สารประกอบแพลตินัมคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมไตรคลอไรด์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน $\text{PtCl}_2(\text{AlCl}_3)_2$

ขั้นที่ 4 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน Oxychloroplatinum Complex

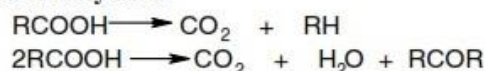
2.6.12 กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (thermal cracking) [20-21]

กระบวนการไพโรไลซิสหรือการแตกตัวด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันพืชไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำมาผลิตเชื้อเพลิงทางเลือกเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ซึ่งเป็นกระบวนการแตกตัวไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบที่คล้ายกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียมดีเซล คือเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดสายโซ่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยในระหว่างเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน อาจได้ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาโดยเฉพาะส่วนที่มีแขนของโอเลฟิน (olefin) ซึ่งจะสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อและสามารถทำปฏิกิริยากันเองได้ ตัวอย่างปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้ในกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์ แสดงดังภาพที่ 2.12

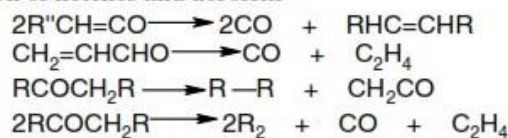
Decomposition of the glyceride



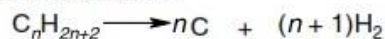
(2) Decomposition of fatty acids



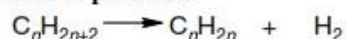
(3) Decomposition of ketenes and acrolein



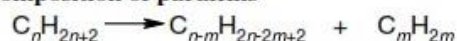
(4) Decomposition into elements



(5) Dehydrogenation of paraffins



(6) Splitting Decomposition of paraffins



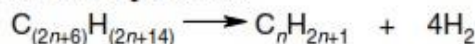
ภาพที่ 2.12 ปฏิกิริยาการสลายตัวของไตรกลีเซอไรด์โดยปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน [20]

(7) Alkylation of paraffins, the reverse of (6)

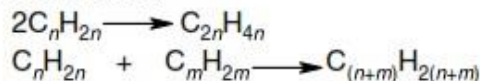
(8) Isomerization of paraffins



(9) Aromatic cyclization of paraffins



(10) Polymerization of olefins



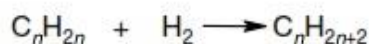
(11) Depolymerization of olefins, reverse of (10)

(12) Decomposition of olefins to diolefins

(13) Decomposition of olefins to acetylenic hydrocarbons

(14) Aromatization or cyclization of olefins

(15) Hydrogenation of olefins



(16) Isomerization of olefins

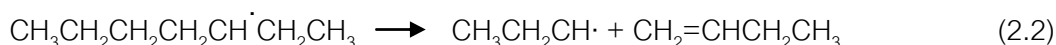


ภาพที่ 2.12 ปฏิริยาการสลายตัวของไตรกลีเซอไรด์โดยปฏิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน [20]

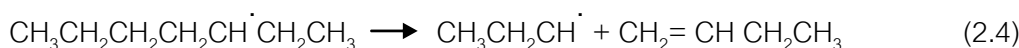
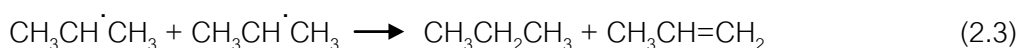
กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนเป็นปฏิริยาแบบอนุมูลอิสระ (free radical) และเกิดต่อไปอย่างต่อเนื่อง โดยในขั้นตอนแรกความร้อนจะไปสลายสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน ทำให้ได้เป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ที่จะทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มปฏิริยา (initiator) และดึงไฮโดรเจนออกจากอัลเคน เนื่องจากอนุมูลอิสระที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่สองจะมีความเสถียรมากกว่าอนุมูลอิสระที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่หนึ่ง (2° radical) เกิดเป็นผลิตภัณฑ์อัลเคนที่มีโมเลกุลเล็กลง ดังสมการที่ (2.1)



อนุมูลอิสระนี้จะเกิดในขั้นเริ่มต้นปฏิริยาจะเข้าไปทำปฏิริยาแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า (β -scission) เกิดเป็น 2-alkene และเกิดเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ที่เกาะที่คาร์บอนอะตอมแรก ดังสมการที่ (2.2)



อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะเข้าไปยังตำแหน่งเบต้าอย่างต่อเนื่อง ได้ผลพลอยได้ (By-product) เกิดเป็นเอทิลีนจำนวนมาก โดยการแตกตัวด้วยความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อปฏิกิริยาเกิดขึ้น โดยเฉพาะส่วนที่มีแขนโอเลฟินส์และไดโอเลฟินส์ ทำให้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อหรือทำปฏิกิริยากันเอง ซึ่งหากกระบวนการแตกตัวได้รับความร้อนมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กเป็นผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊สในรูป C_1 - C_4 ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการเนื่องจากนำไปใช้ประโยชน์ได้ยาก นอกจากนี้ในกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนจะเกิดปฏิกิริยา Disproportionation หรือเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวที่ตำแหน่ง β เกิดเป็นแอลคีน ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4)



ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นหยุดปฏิกิริยา (termination step) โดยอนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจจะเกิดเป็นโมเลกุลใหญ่ 1 โมเลกุล หรือแตกเป็นโมเลกุล 2 โมเลกุล ดังสมการ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ



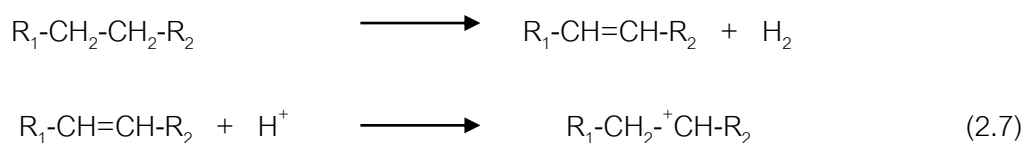
2.6.13 กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) [22]

ปฏิกิริยาการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามามีส่วนร่วมกับการแตกตัวด้วยความร้อน เป็นกระบวนการที่ช่วยทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่หลายๆ มีขนาดเล็กลง สามารถเปลี่ยนน้ำมันที่มีโมเลกุลสูงให้เป็นน้ำมันเบนซิน (gasoline) ดีเซล (diesel) ที่มีขนาดเบาลงได้ ดังนั้นในกระบวนการผลิตที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีความสำคัญมากในปัจจุบัน เนื่องจากในปัจจุบันมีความต้องการในการใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียมสูงขึ้นเรื่อย

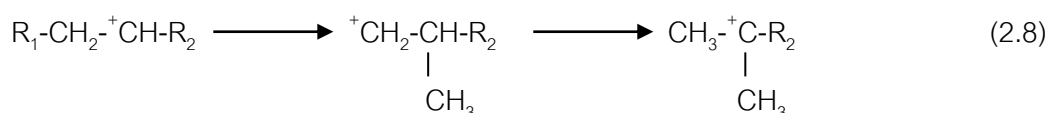
กลไกของการแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย

1. ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (dehydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนเนียมไอออน (carbonium ion) โดยเกิดจากการสูญเสียไฮโดรไดออกไซด์ที่มีประจุลบของสารประกอบ

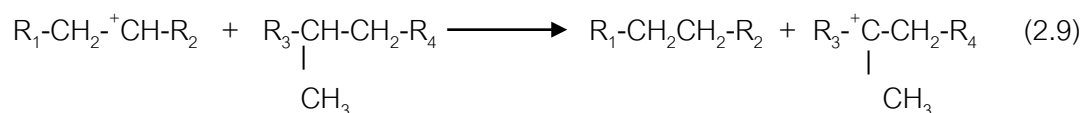
ไฮโดรคาร์บอนให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ส่งผลให้เกิดเป็นคาร์บอนเนียมไอออนที่มีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า โดยเสถียรภาพของคาร์บอนเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันตามโครงสร้างของไอออน ซึ่งคาร์บอนเนียมไอออนที่มีโครงสร้างแบบตติยภูมิ (tertiary ion) จะมีเสถียรภาพมากกว่าคาร์บอนเนียมไอออนที่มีโครงสร้างแบบทุติยภูมิ (secondary ion) และปฐมภูมิ (primary ion) ดังสมการที่ 2.7



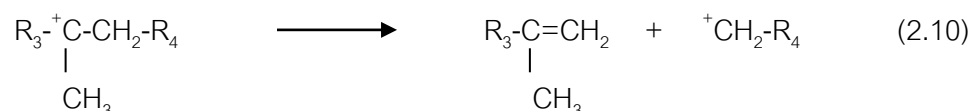
2. ปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลคาร์บอนเนียมไอออน เกิดจากการที่เสถียรภาพของคาร์บอนเนียมไอออนมีความแตกต่างกันตามโครงสร้างของไอออน ดังสมการ 2.8



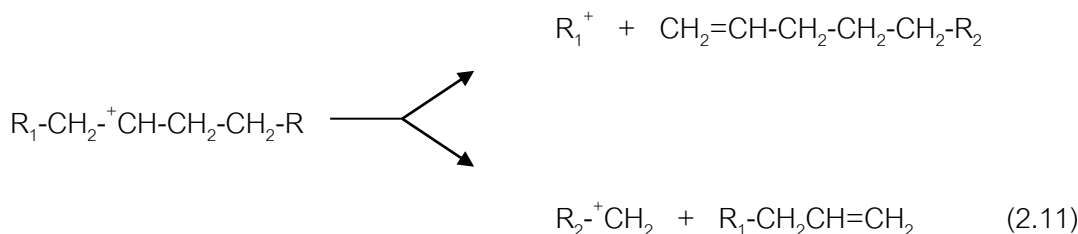
3. เกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ (hydride transfer) โดยปฏิกิริยาจะเกิดระหว่างคาร์บอนเนียมไอออนกับสายโซ่ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังสมการ 2.9



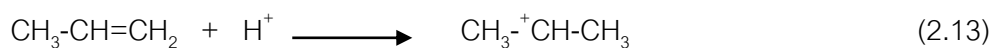
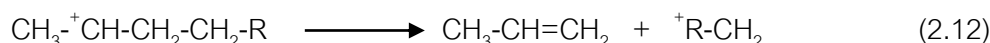
คาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (β - fission) ที่ตำแหน่ง β ที่นับจากจุดที่มีประจุบวก จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดเล็กลง โดยมักจะเป็น primary carbonium ion ดังสมการ 2.10



เกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ (hydride transfer) โดยปฏิกิริยาจะเกิดระหว่างคาร์บอนเนียมไอออนกับสายโซ่ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังสมการ 2.9

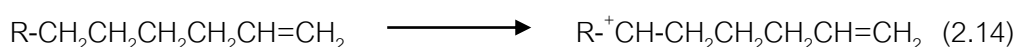


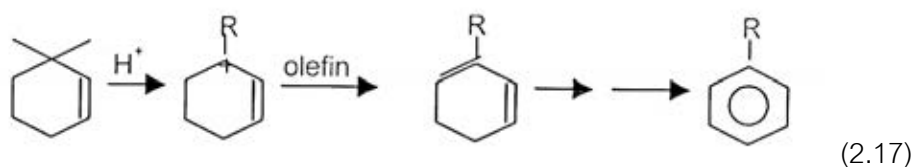
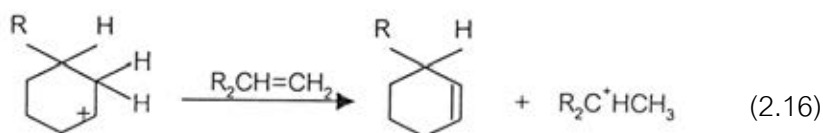
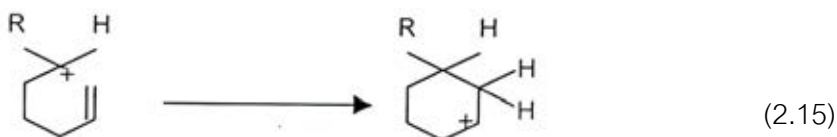
กรณีที่ R_1 คือ H การเกิด β - fission จะเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว ดังสมการ 2.12 ซึ่งจะได้โพรพีนเป็นผลิตภัณฑ์และเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนได้เป็นโมเลกุลที่อยู่ในรูปคาร์บอนเนียมไอออน ซึ่งจะไม่สามารถเกิด β - fission ต่อได้ แสดงดังสมการ 2.13 จากนั้น Isopropyl carbonium ion จะถ่ายโอนเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ให้กับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นได้โพรเพนเกิดขึ้น หรืออาจเกิดการสูญเสียโปรตอน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพีน



(isopropyl carbonium ion)

4. ปฏิกิริยาดีไฮโดรไซคลิกเซชัน dehydrocyclization เป็นปฏิกิริยาการเกิดวงแหวนแอโรแมติก โดยโอเลฟินจะเกิดเป็นคาร์บอนเนียมไอออน จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยา β - fission ได้สารประกอบโอเลฟินคาร์บอนเนียมไอออน (olefin carbonium ion) ที่มีลักษณะเป็นวงแหวน จากนั้นเกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ไอออนจากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้เป็น allylic carbonium ion ที่มีเสถียรภาพและเกิดการรับโปรตอนจากไซโคลเฮกซะไดอิน (cyclohexadine) ในปฏิกิริยาขั้นสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแอโรแมติก ดังสมการ 2.14-2.17



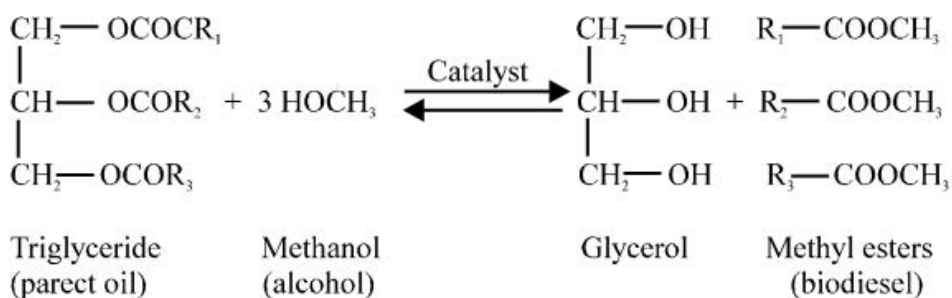


ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง ประกอบด้วยแก๊สที่มีโอเลฟินสูง องค์ประกอบของวงเบนซีนที่มีค่าออกเทนสูง เนื่องจากมีสารจำพวกแอโรแมติกและโอเลฟินมาก องค์ประกอบของน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กากน้ำมันชนิดใส และโค้ก (coke) ที่เกาะบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้พื้นที่ผิวพรุนและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงจนเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.7 เทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิงดีเซล [23-24]

1. กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมสูงที่สุดในการนำมาผลิตเชื้อเพลิงดีเซลในปัจจุบัน เป็นกระบวนการที่ต้องใช้แอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นในการผลิต โดยจะควบคุมให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นภายใต้สภาวะบรรยากาศ อุณหภูมิประมาณ 37-87 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจากกระบวนการจะแบ่งเป็น 2 ชั้น ชั้นแรกคือ แฟทตีเอซิกเมทิลเอสเตออร์ (FAME) และชั้นที่สองคือ กลีเซอรอล ซึ่งจะถูกล้างด้วยน้ำ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วกรดไขมันอิสระ ซึ่งยากในการกำจัด กระบวนการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 2.13

Transesterification:



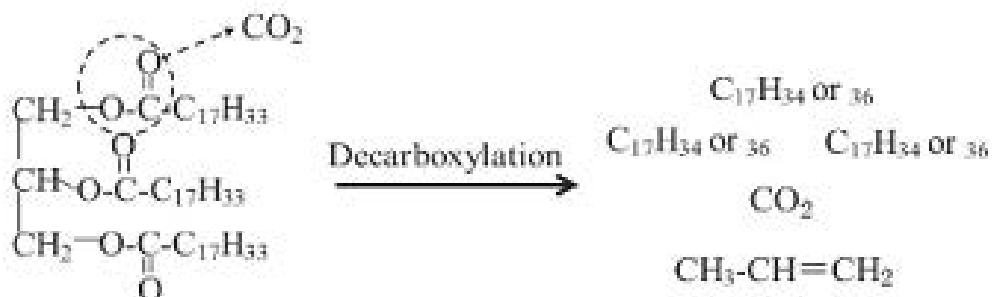
ภาพที่ 2.13 การเกิดกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน [23]

2. กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (hydrocracking) คือการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่ใช้บทบาทในด้านของคุณสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาและไฮโดรเจนที่เติมลงไปทำให้ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีแขนแตกแขนงจำนวนมากซึ่งเป็นพวกพาราฟิน และแนฟทีน

3. กระบวนการไพโรไลซิสเชิงเร่ง (catalytic pyrolysis reaction) เป็นกระบวนการในการแตกสลายโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ความร้อนสูง โดยแบ่งออกเป็น

3.1 กระบวนการไพโรไลซิสของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน (thermal cracking) คือการแตกตัวด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงหากมีการควบคุมให้เกิดการแตกตัวอย่างพอดีจะทำให้ ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ เนื่องจากถ้าให้ความร้อนที่มากเกินไปจะทำให้ เกิดการแตกตัวได้ เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กเกินไปจนอยู่ในสถานะที่เป็นแก๊ส ซึ่งไม่ต้องการและนำมาใช้ประโยชน์ไม่ได้

3.2 กระบวนการไพโรไลซิสของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic pyrolysis cracking) คือการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามามีบทบาทในการช่วยแตกย่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ ให้ มีขนาดเล็กลง ในสภาพไร้อากาศ ด้วยกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation reaction) ให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสม เพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ตามต้องการ โดยเชื้อเพลิงเหลวที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้งานดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 การเกิดกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน [24]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Singh และ Shadangi [25] ศึกษาการแตกตัวด้วยความร้อน (pyrolysis) ของเมล็ดละหุ่งเป็นเชื้อเพลิงเหลว ขณะนี้พลังงานชีวภาพถือว่าเป็นพลังงานที่มีศักยภาพที่เป็นส่วนสำคัญที่คาดการณ์ไว้ให้เป็นพลังงานทดแทนในอนาคต ปฏิริยาไพโรไลซิสแบบช้า (pyrolysis) เป็นทางเลือกหนึ่งในสามของปฏิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน รวมทั้งการผลิตก๊าซ (gasification) และการเผาไหม้โดยตรง (combustion) เพื่อให้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีประโยชน์และมีคุณค่า โดยศึกษากระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (pyrolysis) ของเมล็ดละหุ่งในเครื่องปฏิกรณ์แบบ semi batch ที่ทำจากสแตนเลส ในช่วงอุณหภูมิ 450 °C ถึง 600 °C ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพพบว่า ผลของอุณหภูมิในกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (pyrolysis) ของเมล็ดละหุ่งเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ที่ทำให้ได้ผลผลิตของเหลวสูงสุด อุณหภูมิการสลายความร้อนของเมล็ดละหุ่งได้ทำการศึกษาโดยใช้การวิเคราะห์จากเครื่อง thermo gravimetric (TGA) ที่อัตราความร้อนที่ 20°C/นาที และจากการวิเคราะห์ ตัวอย่างน้ำมันในสภาวะที่เหมาะสมนั้นเมื่อวิเคราะห์ธาตุ น้ำมันที่ได้แสดงหมู่ฟังก์ชัน และ สารองค์ประกอบต่างๆ เป็นไปตามสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

Xu และคณะ [26] ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของน้ำมันถั่วเหลือง พบว่าเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS และ FTIR ได้ผลิตภัณฑ์สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกโอเลฟิน พาราฟิน กรดคาร์บอกซิลิกและแอลดีไฮด์ และเมื่อมีการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทั้งหมด (Al_2O_3 , MCM-41, Na_2CO_3 และ K_2CO_3) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความเป็นกรดที่ต่ำ สมบัติการไหล ณ อุณหภูมิต่ำและความสามารถในการละลายในน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิต่ำดีขึ้น แต่กรดคาร์บอกซิลิกและแอลดีไฮด์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Na_2CO_3 และ K_2CO_3 จากงานวิจัยนี้

แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันถั่วเหลืองสามารถผลิตเชื้อเพลิงเหลวที่มีสมบัติและองค์ประกอบทางเคมีคล้ายคลึงกับน้ำมันปิโตรเลียม

Hanna และ Raimo [27] ศึกษากระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (pyrolysis) ของพืชที่ให้น้ำมัน ได้แก่ ปาล์ม น้ำมัน มะกอก เมล็ดเรพ และน้ำมันละหุ่ง ซึ่งพืชน้ำมันเหล่านี้ถูกแตกตัวด้วยความร้อน โดยใช้เครื่อง Pyrolysis gas chromatography with mass selective and flame ionisation detection (Py-GC/MSD) ที่อุณหภูมิ ที่ 750 °C เป็นเวลา 20 s และใช้การตรวจวัดแบบ flame ionisation (FID) เพื่ออธิบายลักษณะทางเคมีของการแตกตัวด้วยความร้อน พบว่าสารประกอบที่เป็นของเหลว ที่ได้จากน้ำมันปาล์ม น้ำมันมะกอกและน้ำมันเรพที่มีอยู่ส่วนใหญ่เป็นแอลคีนที่เป็นไซตรง (จนถึง C19) และแอลเคน (จนถึง C17) ซึ่งทั้งสองชนิดนี้มีลักษณะคล้ายกับที่พบในน้ำมันเบนซิน (C4 - C10) และเชื้อเพลิงดีเซล (C11 - C22) ซึ่งเป็นช่วงจุดเดือดของปิโตรเลียม ในขณะที่ในกรณีของน้ำมันละหุ่งพบว่ามีออกซิเจนเกิดขึ้นปะปนอยู่ เช่น จำพวกคีโตนและ ฟีนอล ที่ซึ่งไม่ต้องการให้เกิดในผลิตภัณฑ์ ข้อมูลที่ได้รับเกี่ยวกับกลไกการเกิดปฏิกิริยายังสามารถประยุกต์ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น จากผลพลอยได้ของการแยก tall oil จากเยื่อกระดาษคราฟท์

Pramila และคณะ [28] ศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มของน้ำมันปาล์มซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาคือ REY บัจฉัยที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ (400-500°C) อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับน้ำมันปาล์ม (5-10) และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (10-30 นาที) จากการคำนวณทางสถิติที่ร้อยละความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 โดยพิจารณาค่าตอบสนอง 4 ค่า คือ ร้อยละการเปลี่ยน ร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลว อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนและร้อยละผลได้ของแก๊ส จะพบว่าภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับน้ำมันปาล์มเท่ากับ 5 กรัมต่อกรัม จะทำให้ได้ร้อยละการเปลี่ยนเท่ากับ 75.8 ร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวเท่ากับ 53.5 อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 33.5 และร้อยละผลได้ของแก๊สเท่ากับ 14.2

Padmaja และคณะ [29] ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันดิบที่ได้มาจากต้นรักโดยมีการเปรียบเทียบระหว่างการแตกตัวด้วยความร้อนและการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยานั้นใช้ zeolite (FCC) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้ คือศึกษาที่อุณหภูมิ 430-460 องศาเซลเซียส ความดันที่ 0.2-1.2 เมกะพาสคา และเวลา 15-30 นาที ในการบวนการการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาดเล็ก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ในอัตราการทำป้อนเข้า 3-7.30 ที่อุณหภูมิ 460-520 องศาเซลเซียส พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงของดีเซล โดยที่กระบวนการแตกตัวด้วยเชิงตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่สูงสุดถึงร้อยละ 92 เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน ซึ่งได้ร้อยละผลิตภัณฑ์เพียงร้อยละ 57.7 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การแตกตัวเชิงตัวเร่งปฏิกิริยาให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่สูงกว่าการแตกตัวด้วยความร้อน รวมทั้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวเชิงตัวเร่งยังมีสารประเภทแอมโรมาติก และโพลีแอมโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เป็นองค์ประกอบด้วย

รวีวรรณ สวัสดิ์รักษา [30] ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร่วมในกระบวนการ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Autoclave เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยเฉพาะแนฟทา เมื่อทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (simulated distillation gas chromatography) พบว่าจากการคำนวณด้วยโปรแกรม design-expert เวอร์ชัน 6.0.10 พบว่า ภาวะที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อการเกิดปริมาณแนฟทาสูงสุดคือ อุณหภูมิ 426 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 56 นาที และร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 6.35 ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันเท่ากับ 58.62 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของแนฟทาเท่ากับ 40.60 เมื่อนำภาวะที่เหมาะสมมาทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณพบว่าผลที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมาก คือมีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเท่ากับ 60.50 และ 57.40 ร้อยละผลได้ของแนฟทาเท่ากับ 38.35 และ 39.50 และเมื่อทำการทดลองโดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเพิ่มขึ้น เป็น 65.00 และ 67.00 และร้อยละผลได้ของแนฟทาลดลงเหลือ 20.10 และ 20.20 ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

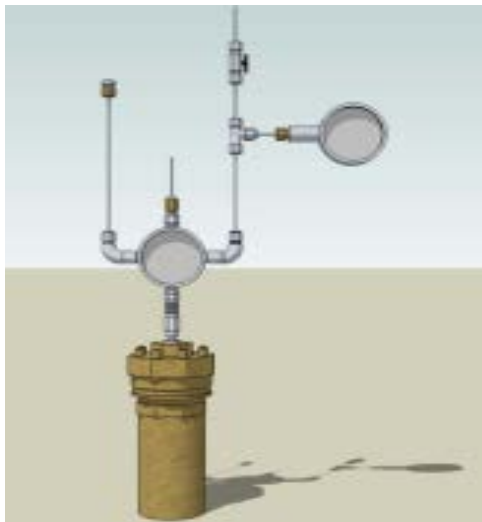
บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรด และหาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ เพื่อให้ได้ร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวและองค์ประกอบที่ดีที่สุด

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (Micro-reactor) ปริมาตร 70 มิลลิลิตร ทำจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม โดยด้านบนมีชุดฝาปิดทำจากสแตนเลส อุปกรณ์สำหรับอัดแก๊ส และวาล์วนิรภัยสามารถทำการทดลองภายใต้ภาวะที่ทนความร้อนได้ถึง 500 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะพาสคาล มีช่องเสียบเทอร์โมคัปเปิลทางด้านบนสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างทำการทดลอง ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ปริมาตร 70 มิลลิลิตร

3.1.2 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Temperature controller) ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังขดลวดให้ความร้อนและสามารถตัดการจ่ายกระแสเมื่อได้อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ มีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิได้ในระดับ ± 10 องศาเซลเซียส

3.1.3 ขดลวดความร้อนแบบ Injection แรงดัน 230 โวลต์ กำลัง 400 วัตต์

3.1.4 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ ชนิดเค (K-type) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร

3.1.5 ชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ ประกอบไปด้วยมอเตอร์ที่เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนแกนหมุนให้เครื่องปฏิกรณ์เกิดการแกว่ง และสามารถปรับความเร็วรอบการเขย่าได้จากชุดควบคุมความเร็ว ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอลและเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

3.1.6 ชุดกรองสุญญากาศ ประกอบด้วยชุดเครื่องแก้วต่อกับเครื่องดูดอากาศ โดยผ่านการกรองโดยใช้กระดาษกรอง ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ชุดกรองสุญญากาศ

3.1.7 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียดตศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียดตศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.1.9 นาฬิกาจับเวลา

3.1.10 ตู้อบ (Oven)

3.1.11 เครื่องแก้ว ประกอบด้วยบีกเกอร์ ขวดใส่ตัวอย่าง

3.1.12 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation) จากบริษัท Agilent Technologies รุ่น GC7890 A สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดตามมาตรฐาน ASTM D2887 แสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatography)

3.1.13 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography – Mass spectrometer, GC-MS) รุ่น GC2010 จากบริษัท Agilent Technologies จำกัด โดยมีเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น GCMSQP2010 เป็นดีเทคเตอร์ โดยใช้ Capillary column จากบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น DB-1 ขนาด 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร ซึ่งมี 100% Dimethylpolysiloxane หนา 0.25 ไมโครเมตรเป็นวัสดุชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 350 องศาเซลเซียส ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว โดยอาศัยการเปรียบเทียบ Fingerprint ของเลขมวล (Mass Number) ขององค์ประกอบนั้นๆ ที่ตรวจวัดได้กับข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูล แสดงดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography – Mass spectrometer, GC-MS)

3.1.14 เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface area and porosity analyzer) เป็นเครื่องใช้สำหรับวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา การวัดพื้นที่ผิวด้วยการใช้เทคนิค BET เป็นการวัดปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (absorb) ลงบนผิวสารของตัวอย่าง แล้วนำมาคำนวณโดยเข้าสู่ตรรกกรรมของ BET เพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) แสดงดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (BET surface area)

3.1.15 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา เทคนิค XRF อาศัยหลักการการวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence) ที่ปล่อยโฟตอนจำเพาะของสาร ซึ่งจะมีความยาวคลื่นเฉพาะของธาตุนั้นๆ จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ แสดงดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

3.1.16 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) ยี่ห้อ Shimadzu GC-2014 สำหรับวิเคราะห์หาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลอง แสดงดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)

3.1.17 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy เป็นเครื่องที่ใช้เทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ใช้วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ แสดงดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 เครื่อง FT-IR Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมีที่ใช้

3.2.1 น้ำมันสนบูดำ ที่ได้จาก โรงงานน้ำมันสนบูดำไทย คลอง 3 จังหวัดปทุมธานี

3.2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

3.2.3 แก๊สไฮโดรเจน 99.99% บรรจุในถังเก็บแบบ high pressure ขนาด 6 ลูกบาศก์เมตร จากบริษัท TIG Trading

3.2.4 สารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) 99% จากบริษัท เอส อาร์ แล็บ

3.2.5 สารละลายโทลูอีน 99% จากบริษัท Fisher Chemical

3.3 การดำเนินการวิจัย

3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันสนบูดำ ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันสนบูดำก่อนการทดลองโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (Simulated Distillation) และวัดองค์ประกอบของกรดไขมันที่มีอยู่ในน้ำมันสนบูดำก่อนการทดลอง

3.3.2 วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี โดยวิเคราะห์หาองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง BET

3.3.3 ออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลสองระดับ เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันสนบูดำบนตัวเร่งปฏิกิริยารวพันธ์ชนิดกรด โดยออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟคทอเรียล ตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาดัง โดยภาวะที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2

3.3.4 น้ำมันที่ได้จากการทดลอง วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และทำการคำนวณหาปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 3.1 ระดับของตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปร	ระดับ	
	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt), A	1	5
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (bar), B	1	5
เวลาในการทำปฏิกิริยา (min), C	30	60
อุณหภูมิ ($^{\circ}$ C), D	380	440

ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ

ตัวแปร			
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt), A	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (bar), B	เวลาในการทำปฏิกิริยา (min), C	อุณหภูมิ ($^{\circ}$ C), D
1	1	30	380
5	1	30	380
1	5	30	380
5	5	30	380
1	1	60	380
5	1	60	380
1	5	60	380

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ

ตัวแปร			
ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (%wt), A	ความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น (bar), B	ระยะเวลาในการทำ ปฏิกิริยา (min), C	อุณหภูมิ (°C), D
5	5	60	380
1	1	30	440
5	1	30	440
1	5	30	440
5	5	30	440
1	1	60	440
5	1	60	440
1	5	60	440
5	5	60	440
3	3	45	410
3	3	45	410
3	3	45	410

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.4.1 ชั่งน้ำหนักน้ำมันสบู่ดำ 15 กรัมพร้อมกับเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียดเทคนิค 2 ตำแหน่ง และชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีตามปริมาณที่ต้องการด้วยเครื่องชั่งละเอียดเทคนิค 4 ตำแหน่ง

3.4.2 เติมตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ชั่งได้ตามปริมาณที่ต้องการลงในเครื่องปฏิกรณ์แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย

3.4.3 นำเครื่องปฏิกรณ์ไปใส่อากาศที่อยู่ภายในออกโดยผ่านแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปอย่างช้าๆ แล้วอัดแก๊สไฮโดรเจนจนได้ความดันที่กำหนด ทำการตรวจสอบรอยรั่วของแก๊สตามข้อต่อของเครื่องปฏิกรณ์ หากปรากฏว่าไม่มีรอยรั่วของแก๊สไฮโดรเจน ค่อยๆ หมุนวาล์วปิดเพื่อไม่ให้แก๊สออก

3.4.4 นำเครื่องปฏิกรณ์ต่อเข้ากับชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ และต่ออุปกรณ์ขดลวดความร้อนแบบ Injection เข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นต่อเทอร์โมคัพเปิดเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์

3.4.5 ปรับกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าให้กับขดลวดให้ความร้อน และเปิดสวิตซ์เครื่องเขย่า

3.4.6 เริ่มทำการจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์คงที่ตามที่กำหนด เมื่อครบเวลาที่ทำการปฏิกิริยาแล้ว นำฉนวนและขดลวดความร้อนออก รอจนอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง จึงทำการปล่อยแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ออก

3.4.7 แยกผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวออกจากกากของแข็ง โดยการกรองผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยอุปกรณ์การกรองแบบสุญญากาศ ใช้กระดาษกรองเพื่อแยกส่วนที่เป็นของเหลวเก็บไว้ในขวดแก้ว เพื่อรอการวิเคราะห์ ดำเนินการปฏิกรณ์ด้วยสารละลายโทลูอีน เช็ดทำความสะอาดด้วยกระดาษที่ชั่งน้ำหนักเตรียมไว้ จากนั้นนำส่วนที่เป็นของแข็งและกระดาษซับไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งเพื่อคำนวณหาร้อยละของการเปลี่ยนแปลงไป

3.4.8 นำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatography เพื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวในช่วงคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆ และวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้

3.4.9 คำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

ร้อยละผลได้เชื้อเพลิงเหลว (% Liquid yield)

$$= \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้} \times 100}{\text{น้ำหนักสารตั้งต้น}}$$

ร้อยละผลได้แก๊สโซลีนทั้งหมด (% overall gasoline yield)

$$= \text{ร้อยละผลได้เชื้อเพลิงเหลว} \times \text{ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน}$$

3.4.10 นำผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) เพื่อหาค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบที่อยู่ในผลิตภัณฑ์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากาโรไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันสบู่ดำ ได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และหาภาวะที่เหมาะสมของกาโรไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวและองค์ประกอบที่ดีที่สุด ใช้การออกแบบการทดลองเป็นแบบ 2^k แฟกทอเรียล (2^k factorial design)

4.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันสบู่ดำ

4.1.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันสบู่ดำก่อนทำไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาตามคาบจุดเดือด

วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันสบู่ดำก่อนทำไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (simulated distillation gas chromatography) แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันสบู่ดำตามคาบจุดเดือดก่อนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา

องค์ประกอบ	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Naphtha ($C_5 - C_{12}$)	IBP - 200	4.25
Kerosene ($C_{12} - C_{15}$)	200 - 250	0.45
Light gas oil ($C_{15} - C_{25}$)	250 - 350	9.30
Gas oil ($C_{25} - C_{33}$)	350 - 370	38.20
Long Residue ($>C_{33}$)	370 - FBP	47.80

ตารางที่ 4.1 แสดงการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันสบู่ดำก่อนการไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น ตามมาตรฐาน ASTM D2887 พบว่า มีองค์ประกอบของน้ำมันส่วนใหญ่เป็นกาน้ำมันหนักหรือ long residue และ Gas oils โดยมีมากถึงร้อยละ 47.8 และ 38.2 โดยน้ำหนักตามลำดับ ในขณะที่มีเนฟทา

เพียงร้อยละ 4.25 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นได้ว่าน้ำมันสนุดำที่นำมาใช้ทดลองมีสารที่เป็นสารโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่และพบปริมาณองค์ประกอบที่เป็นสารโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กน้อยมากเมื่อเทียบกับองค์ประกอบทั้งหมด ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้มีขนาดที่เล็กลงจากการทำปฏิกิริยาการไฟไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียม

4.1.2 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบที่เป็นกรดไขมัน (Fatty acid) ของน้ำมันสนุดำ

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบที่เป็นกรดไขมัน (Fatty acid) ของน้ำมันสนุดำ แสดงผลได้ดังตารางที่ 4.2

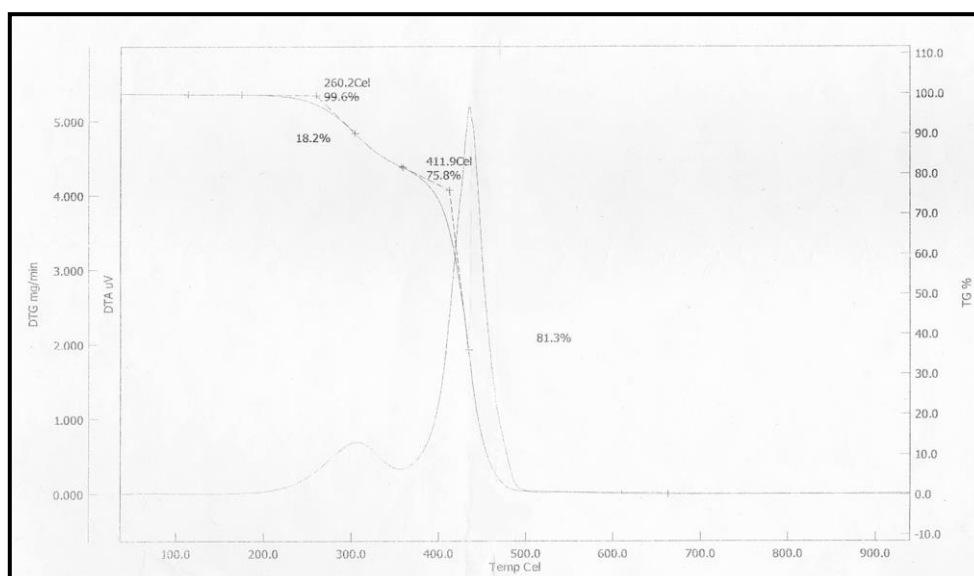
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันสนุดำ

Composition of fatty acid	g/ 100 ml
Myristic acid	0.05
palmitic acid	14.46
heptadecanoic acid	0.07
stearic acid	6.28
arachidic acid	0.17
behenic acid	0.03
lignoceric acid	0.08
Total saturated fatty acid	21.14
sapienic acid	0.06
palmitoleic acid	0.70
heptadecenoic acid	0.04
oleic acid	41.42
linoleic acid	36.40
alpha -linoleic acid	0.15
erucic acid	0.09
Total unsaturated fatty acid	78.86

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบกรดไขมัน (Fatty acid) ของน้ำมันสนุ่นดำ ส่งวิเคราะห์ผลที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) พบว่า น้ำมันสนุ่นดำมีปริมาณของกรดไขมันอิ่มตัว 21.14 กรัม/100 มิลลิลิตร และมีปริมาณของกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ 78.71 กรัม/100 มิลลิลิตร และพบว่าในน้ำมันสนุ่นดำมีองค์ประกอบของ oleic acid (C18:1) และ linoleic acid (C18:2) ในปริมาณที่มากที่สุด

4.1.3 การวิเคราะห์ช่วงอุณหภูมิการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันสนุ่นดำด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analyzer (TGA)

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA เพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวของน้ำมันสนุ่นดำ พบว่า น้ำมันสนุ่นดำแตกตัวช่วง 380-460 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสูงสุดที่น้ำมันสนุ่นดำสลายตัวได้คือที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.1 ช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของน้ำมันสนุ่นดำด้วยเทคนิค TGA

4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

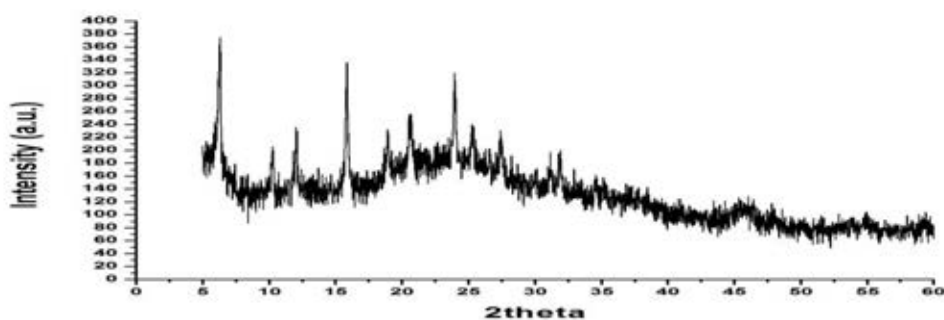
4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี (FCC) ที่ใช้แล้วทั้งก่อนและหลังเผา ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี (FCC) ใช้แล้วก่อนเผาและหลังเผาที่ อุณหภูมิ 550 องศา

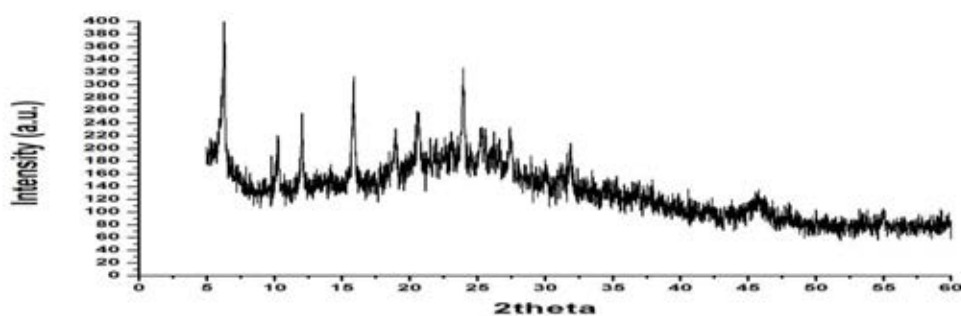
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว		ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วเผาที่ อุณหภูมิ 550 °C	
องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Na	0.4	Na	0.34
Al	42.07	Al	40.30
Si	40.13	Si	42.03
P	0.12	P	0.37
S	0.43	S	0.49
K	0.3	K	0.20
Ca	0.58	Ca	0.24
Ti	2.67	Ti	3.08
V	0.34	V	0.31
Mn	0.22	Mn	0.19
Fe	3.12	Fe	3.29
Ni	2.65	Ni	1.27
Cu	0.07	Cu	0.07
Zn	0.04	Zn	0.02
La	6.29	La	7.06
Ge	0.49	Ge	0.63
Ga	0.08	Ga	0.11

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี (FCC) ที่ใช้แล้วทั้งก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วหลังการเผาส่วนใหญ่ มีธาตุซิลิกอน (Si) และ อะลูมิเนียม (Al) เป็นองค์ประกอบหลักเมื่อเทียบกับองค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งมีมากถึง 42.03 (%wt) และ 40.3 (%wt) แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทซีโอไลต์

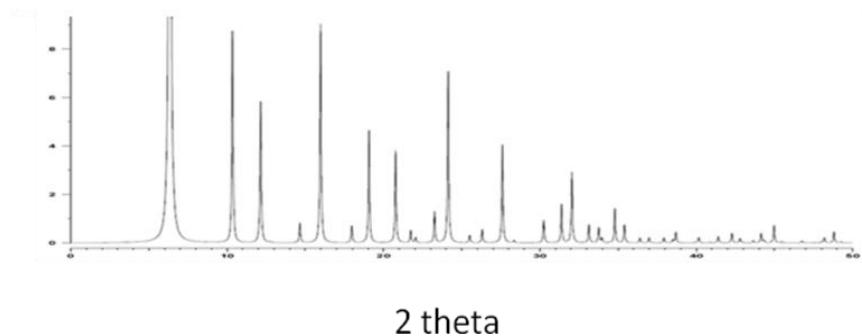
4.2.2 วิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังเผาด้วยเทคนิค XRD



รูปที่ 4.2 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วก่อนเผา



รูปที่ 4.3 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.4 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ultrastable Y, Dehydrated Dealuminated

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD แสดงดังภาพที่ 4.2 และ 4.3 เป็น XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วและ XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่า เมื่อพิจารณาจากลักษณะของ peak ที่ปรากฏนี้มีความใกล้เคียงกับ XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ultrastable Y, Dehydrated Dealuminated ดังแสดงในภาพที่ 4.4 จากการเปรียบเทียบลักษณะของพิกัดดังกล่าว จึงสามารถระบุได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วนั้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ประเภท Ultrastable Y (USY)

4.2.3 วิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยา

ทำการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้ว ทั้งก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเพื่อหาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRD

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

Catalyst	BET surface area (m ² /g)	Average Pore size (nm)	Pore volume (cm ³ /g)
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	79.84	6.92	0.13
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว เผาที่อุณหภูมิ 550 °C	103.65	8.89	0.15

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วมีพื้นที่ผิวรูพรุนเท่ากับ 79.84 และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วมาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส พบว่าจะทำให้พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดสูงขึ้นเป็น 103.65 ทั้งนี้เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิสูงเป็นการกำจัดไค้กและสารปนเปื้อนที่ติดค้างบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากการนำไปใช้แล้ว

4.2.4 วิเคราะห์ความแรงของตำแหน่งของกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อทำการวิเคราะห์ความแรงตำแหน่งของกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้ว ทั้งก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส โดยใช้เทคนิค NH_3 -TDP แสดงผลดังตารางที่ 4.5 พบว่า การนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วไปเผาที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ค่าความเป็นกรดสูงขึ้นจาก 0.22 ($\text{mmol H}^+/\text{g}$) เป็น 0.34 ($\text{mmol H}^+/\text{g}$) เนื่องจากการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วไปเผาส่งผลให้อัตราส่วนขององค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูงขึ้น ส่งผลให้ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนเผาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเป็นกรด ($\text{mmol H}^+/\text{g}$)
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	0.22
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว เผาที่อุณหภูมิ 550 °C	0.34

4.3 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

4.3.1 การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล (2^k factorial)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว โดยวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ออกแบบการทดลองเป็นแบบ 2^k แฟกทอเรียล (2^k factorial) เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนองของตัวแปรที่ต้องการศึกษา โดยลดจำนวนครั้งการทดลอง โดยแต่ละตัวแปรที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ ระดับต่ำและระดับสูง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษ ตัวแปรทั้งหมด 4 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยการออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้ กำหนดให้

- A คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (-) ค่าสูงสุดที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (+)
- B คือ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น ค่าต่ำสุดที่ 1 บาร์ (-) ค่าสูงสุดที่ 5 บาร์ (+)
- C คือ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ค่าต่ำสุดที่ 30 นาที (-) ค่าสูงสุดที่ 60 นาที (+)
- D คือ อุณหภูมิ ค่าต่ำสุดที่ 380 องศาเซลเซียส (-) ค่าสูงสุดที่ 440 องศาเซลเซียส (+)

จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลทำให้ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 32 การทดลอง และการทดลองที่ค่ากลางของตัวแปร คือ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (A) = ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (B) = 3 บาร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (C) = 45 นาที และ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (D) = 410 องศาเซลเซียส

4.3.2 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

การศึกษาระบบการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วได้ทำการออกแบบการทดลองเป็นแบบ 2^4 แฟกทอเรียล และทำการทดลองที่ค่ากลาง 3 ครั้ง และทำซ้ำ (replicate) 2 ครั้ง จึงมีจำนวนทำการทดลอง 38 การทดลอง ผลการทดลองในตารางที่ 4.6 พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวอยู่ในช่วง ร้อยละ 68.74–98.01 โดยน้ำหนัก และนำมาสร้างเป็น Normal probability plot ดังภาพที่ 4.5

ตารางที่ 4.6 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบูดำบน
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพทีซีใช้แล้ว

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ เชื้อเพลิงเหลว (%wt)
	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (%wt), A	ความดัน ไฮโดรเจน (bar), B	ระยะเวลา (min), C	อุณหภูมิ (°C), D	
1	1	1	30	380	97.53
2					98.01
3	5	1	30	380	94.58
4					95.31
5	1	5	30	380	97.20
6					96.81
7	5	5	30	380	94.13
8					95.01
9	1	1	60	380	92.36
10					92.54
11	5	1	60	380	90.25
12					91.55
13	1	5	60	380	92.11
14					90.32

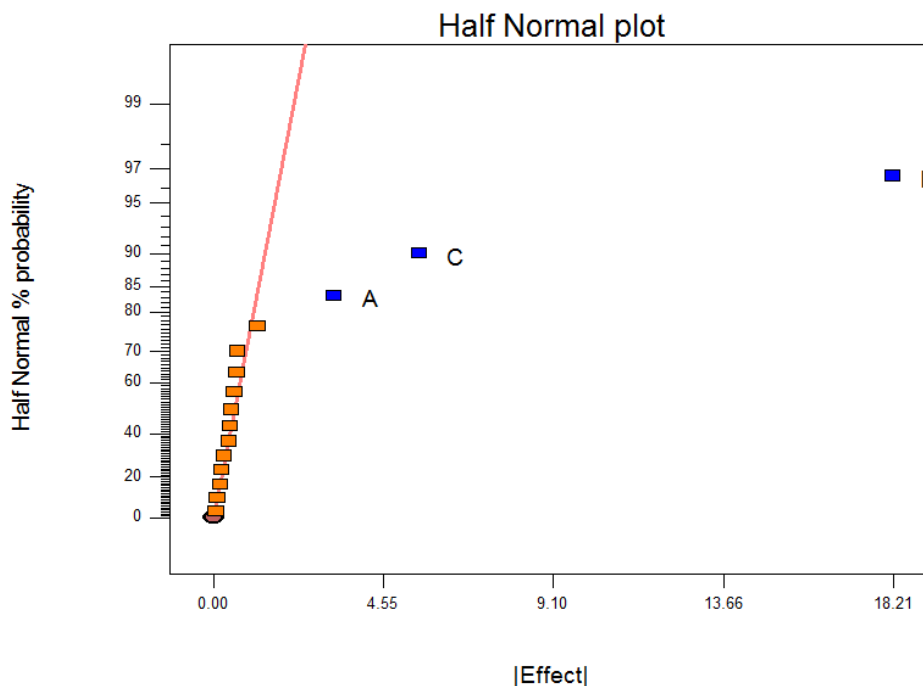
ตารางที่ 4.6 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบูดำบน
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพทีซีใช้แล้ว (ต่อ)

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ เชื้อเพลิงเหลว (%wt)
	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (%wt), A	ความดัน ไฮโดรเจน (bar), B	ระยะเวลา (min), C	อุณหภูมิ (°C), D	
15	1	5	60	380	89.15
16					89.67
17	5	1	30	440	80.73
18					79.91
19	1	1	30	440	76.67
20					76.18
21	5	5	30	440	79.56
22					77.98
23	1	5	30	440	76.12
24					77.63
25	5	1	60	440	75.82
26					75.31
27	1	1	60	440	71.22
28					72.57

ตารางที่ 4.6 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสุบุดำบน
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพทีซีใช้แล้ว(ต่อ)

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ เชื้อเพลิงเหลว (%wt)
	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (%wt), A	ความดัน ไฮโดรเจน (bar), B	ระยะเวลา (min), C	อุณหภูมิ (°C), D	
29	1	5	60	440	72.00
30					72.65
31	5	5	60	440	69.51
32					68.74
33	3	3	45	410	89.29
34					89.56
35	3	3	45	410	85.32
36					83.45
37	3	3	45	410	88.41
38					87.32

ใช้โปรแกรม Design-Expert วิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลองซึ่งแสดงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว แสดงในภาพที่ 4.5 มาจากการสร้าง Normal probability plot พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรง ได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (A) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (C) และ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (D) แสดงให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว



ภาพที่ 4.5 Normal probability plot ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสนูป่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพทียูซีแล้ว

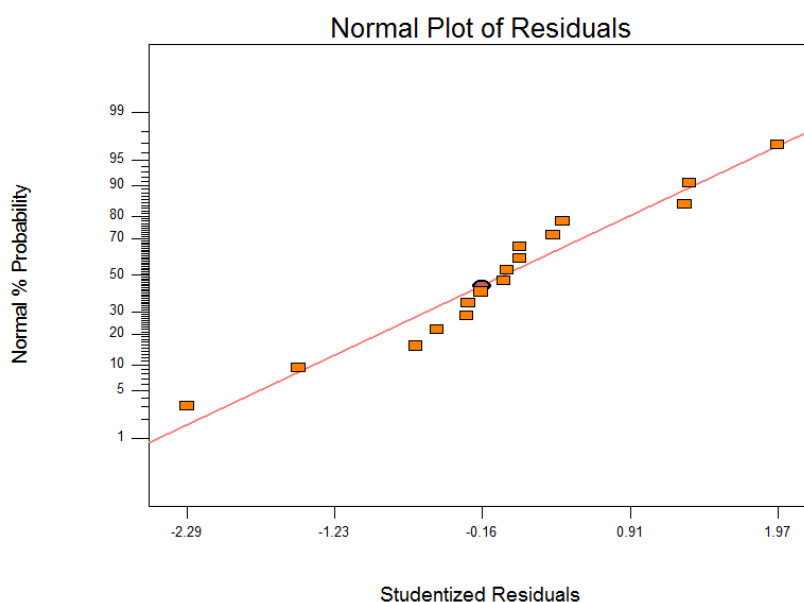
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (analysis of variance) ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert ปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 แสดงว่ามีอิทธิพลต่อผลการทดลอง พบว่า ปัจจัยที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (A) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (C) และ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (D) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว อย่างมีนัยสำคัญ สามารถสร้างแบบจำลองการถดถอย (regression model) ได้ดังสมการที่ 4.1

$$\text{Yield of liquid} = 84.31 - 1.61A - 2.76C - 9.10D \quad (4.1)$$

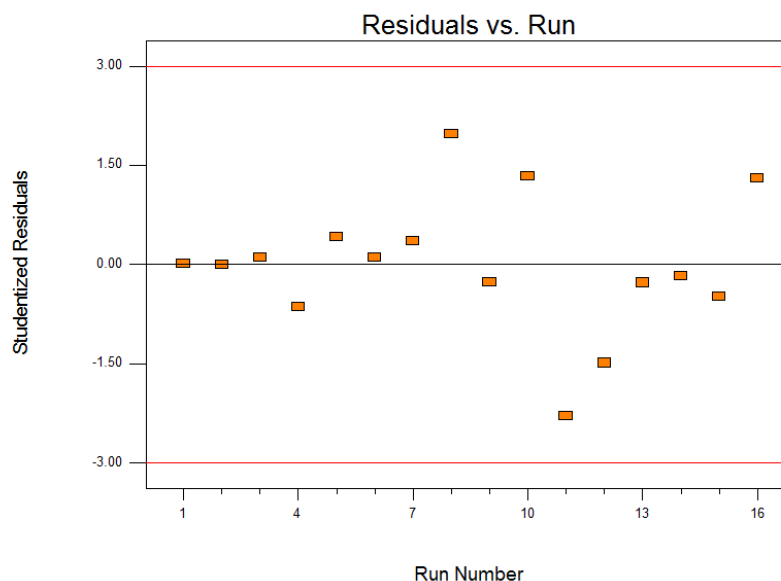
ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Anova) ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F value	Prob >F value
Model	1489.18	3	496.39	464.54	<0.0001
A	41.22	1	41.22	38.57	<0.0001
C	121.55	1	121.55	113.75	<0.0001
D	1326.42	1	1326.42	1241.29	<0.0001
Residual	9.73	12	1.07		
Total	3647.36	15			

เมื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลในการทดลอง โดยแสดงเป็น Normal plot of residue ในภาพที่ 4.6 พบว่าค่า residuals สำหรับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีการเรียงตัวแนวโน้มเป็นเส้นตรง และมีค่า $R^2 = 0.9915$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติจริง



ภาพที่ 4.6 Normal % Probability กับส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว



ภาพที่ 4.7 Residual กับ Run ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสนูป่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ภาพที่ 4.7 แสดง ลำดับการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) ของผลการทดลอง เมื่อรูปแบบการกระจายตัวของค่า residuals ที่สัมพันธ์กับ ลำดับของชุดการทดลองทั้งหมดพบว่า ผลการทดลองนี้เป็นการกระจายตัวแบบไร้รูปแบบ ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน จึงสรุปได้ว่าซึ่งชุดการทดลองนี้เป็นแบบสุ่มสมบูรณ์ส่งผลให้ค่าผิดพลาดเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

4.3.3 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทาที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสนูป่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

การศึกษอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทาที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสนูป่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว โดยนำผลิตภัณฑ์น้ำมันเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (simulated distillation gas chromatography) ได้ร้อยละผลได้ของแนฟทาในตารางที่ 4.8 พบว่าค่าร้อยละผลได้ของแนฟทาอยู่ในช่วงร้อยละ 3.90 – 31.63 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.8 ร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพทีซีใช้แล้ว

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ แนฟทา (%wt)
	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (%wt), A	ความดัน ไฮโดรเจน (bar), B	ระยะเวลา (min), C	อุณหภูมิ (°C), D	
1	1	1	30	380	3.90
2					5.39
3	5	1	30	380	6.15
4					6.48
5	1	5	30	380	4.08
6					3.58
7	5	5	30	380	5.74
8					6.18
9	1	1	60	380	4.99
10					5.37
11	5	1	60	380	8.57
12					8.06
13	1	5	60	380	4.79
14					5.78

ตารางที่ 4.8 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทาที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู์ด้าบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพิซีซีใช้แล้ว (ต่อ)

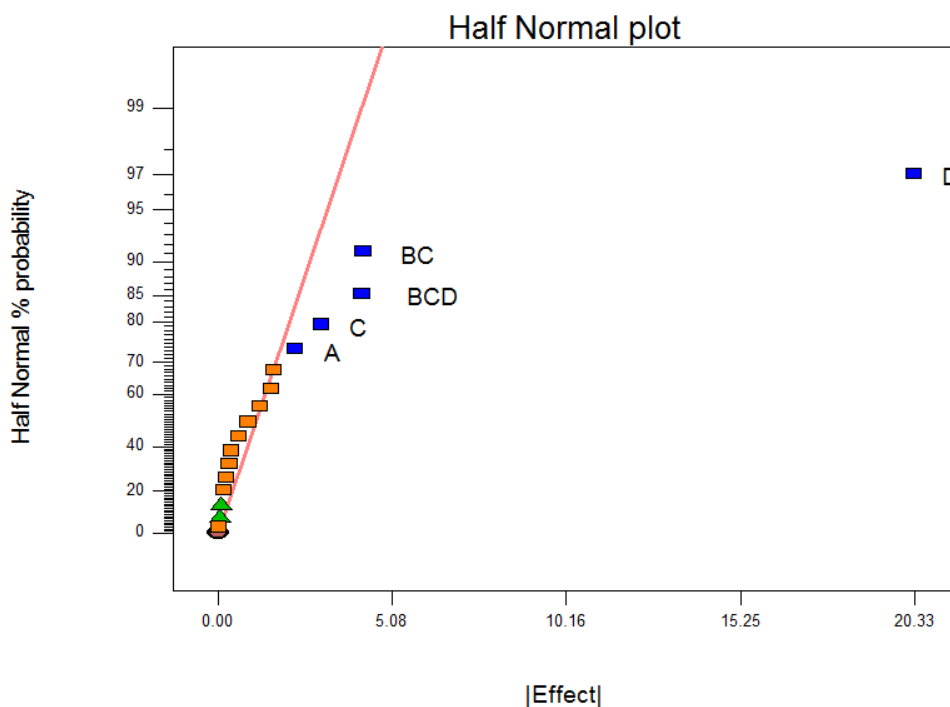
การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ แนฟทา (%wt)
	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (%wt), A	ความดัน ไฮโดรเจน (bar), B	ระยะเวลา (min), C	อุณหภูมิ (°C), D	
15	1	5	60	380	8.65
16					9.59
17	5	1	30	440	29.47
18					25.97
19	1	1	30	440	30.28
20					29.25
21	5	5	30	440	17.90
22					18.01
23	1	5	30	440	18.65
24					17.47
25	5	1	60	440	23.88
26					22.97
27	1	1	60	440	27.06
28					27.94

ตารางที่ 4.8 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพทีซีใช้แล้ว(ต่อ)

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ แนฟทา (%wt)
	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (%wt), A	ความดัน ไฮโดรเจน (bar), B	ระยะเวลา (min), C	อุณหภูมิ (°C), D	
29	1	5	60	440	30.24
30					30.15
31	5	5	60	440	31.63
32					31.69
33	3	3	45	410	10.27
34					11.46
35	3	3	45	410	8.53
36					8.35
37	3	3	45	410	9.07
38					11.35

ผลการทดลองทั้งหมดนำมาวิเคราะห์และคำนวณผล ด้วยโปรแกรม Design-Expert โดยการสร้าง Normal probability plot เพื่อแสดงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว แสดงในภาพที่ 4.8 พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรง ได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (A) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (C) อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (D) อันตรกิริยาระหว่างความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นกับเวลา (BC) และอันตรกิริยาระหว่างความดัน

ไฮโดรเจนเริ่มต้นกับเวลาในการทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิ (BCD) แสดงให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.8 Normal probability plot ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทาจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่น้ำมันตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

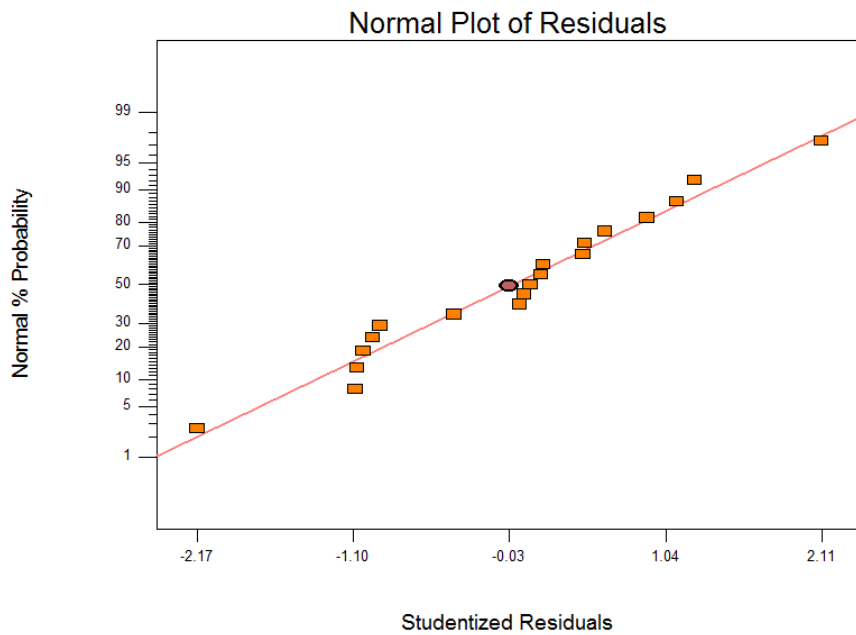
ตารางที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (analysis of variance) ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert ปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 แสดงว่ามีอิทธิพลต่อผลการทดลอง ซึ่งพบว่า ปัจจัยที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (A) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (C) อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (D) อันตรกิริยาระหว่างความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นกับเวลา (BC) และอันตรกิริยาระหว่างความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นกับเวลาในการทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิ (BCD) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน สามารถสร้างแบบจำลองการถดถอย (regression model) ในสมการที่ 4.2

$$\text{Yield of naptha} = 16.02 + 1.12A + 1.50C + 10.16D + 2.12BC + 2.10B CD \quad (4.2)$$

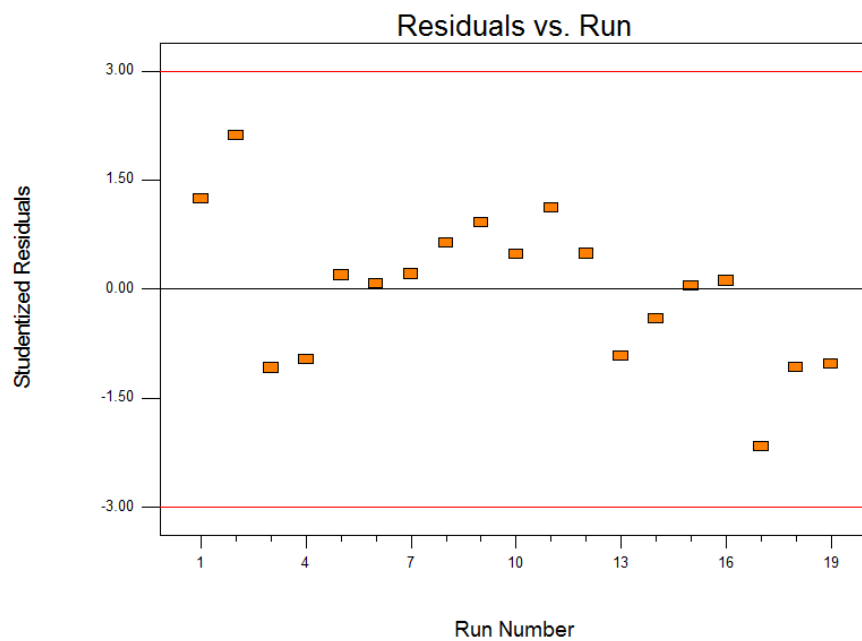
ตารางที่ 4.9 ค่าความแปรปรวน (Anova) ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F value	Prob >F value
Model	1851.55	5	370.31	125.91	< 0.0001
A	19.98	1	19.98	6.79	0.0230
C	36.12	1	36.12	12.28	0.0043
D	1653.24	1	1653.24	562.11	< 0.0001
BC	71.57	1	71.57	24.33	0.0003
BCD	70.64	1	70.64	24.02	0.0004
Curvature	95.46	1	95.46	32.46	< 0.0001
Residual	35.29	12	2.94		
Total	1982.31	18			

ภาพที่ 4.9 เมื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลในการทดลอง โดยแสดงเป็น Normal plot of residue พบว่าค่า Residuals สำหรับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีการเรียงตัวแนวโน้มเป็นเส้นตรง และมีค่า $R^2 = 0.9813$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติจริง



ภาพที่ 4.9 Normal % Probability กับส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสนูป่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว



ภาพที่ 4.10 Residual กับ Run ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสนูป่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของค่า residuals กับ run เพื่อใช้ในการตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) ของผลการทดลอง เมื่อรูปแบบการกระจายตัวของค่า residuals ที่สัมพันธ์กับลำดับของชุดการทดลองทั้งหมดพบว่า ผลการทดลองนี้เป็นการกระจายตัวแบบไร้รูปแบบ ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน จึงสรุปได้ว่าซึ่งชุดการทดลองนี้เป็นแบบสุ่มสมบูรณ์ส่งผลให้ค่าผิดพลาดเกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้

4.3.4 หาภาวะที่เหมาะสมจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีซีใช้แล้ว

การศึกษาผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีซีใช้แล้ว โดยการออกแบบการทดลองเป็นแบบ 2^k แฟกทอเรียล (2^k factorial) และคำนวณหาภาวะที่เหมาะสม โดยใช้โปรแกรม Design Expert เวอร์ชัน 6.0.1.0 ซึ่งได้มีการกำหนดขอบเขตตัวแปรต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 ขอบเขตของตัวแปรในการหาภาวะที่เหมาะสมโดยโปรแกรม Design-Expert ของการการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีซีใช้แล้ว

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Unit
Catalyst (A)	is in range	1	5	%Wt
Pressure (B)	is in range	1	5	Bar
Time (C)	is in range	30	60	Minute
Temperature (D)	is in range	380	440	°C
Yield of gas	minimize	1.72	24.27	%wt
Yield of liquid	maximize	69.51	97.53	%wt
Yield of naphtha	maximize	3.9	31.63	%wt
Yield of kerosene	maximize	2.76	12.51	%wt
Yield of diesel	maximize	19.46	64.15	%wt

การคำนวณหาภาวะเหมาะสม โดยโปรแกรม Design-Expert ได้กำหนดขอบเขตของตัวแปรในการหาภาวะที่เหมาะสม แสดงดังตาราง 4.10 โดยพิจารณาศึกษาค่าตอบสนองเพียง 5 ค่า ได้แก่ ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ร้อยละผลได้ของแนฟทา ร้อยละผลได้ของเคโรซีน และ ร้อยละผลได้ของดีเซล โดยกำหนดให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าน้อยที่สุด และให้ค่าตอบสนองที่เหลือ ได้แก่ ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ร้อยละผลได้ของแนฟทา ร้อยละผลได้ของเคโรซีน และ ร้อยละผลได้ของดีเซล มีค่ามากที่สุด พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการการไฟโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว คือที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และอุณหภูมิ 410.24 องศาเซลเซียส แสดงในตาราง 4.11

ตารางที่ 4.11 ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert ของการการไฟโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ตัวแปร	ภาวะจากโปรแกรม
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์)	1
ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	30
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	410.24
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	9.26
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	88.60
ร้อยละผลได้แนฟทา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	15.62
ร้อยละผลได้เคโรซีน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	7.93
ร้อยละผลได้ดีเซล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	40.15

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมจากการคำนวณด้วยโปรแกรมแล้ว ได้นำมาทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม กับค่าที่ได้จากการทดลอง พบว่า ผลของค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert ดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบผลภาวะเหมาะสมระหว่างคำนวณจากโปรแกรม Design-Expert กับ การทดลองจริงของการการไฟโรไลซิสน้ำมันสบูดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

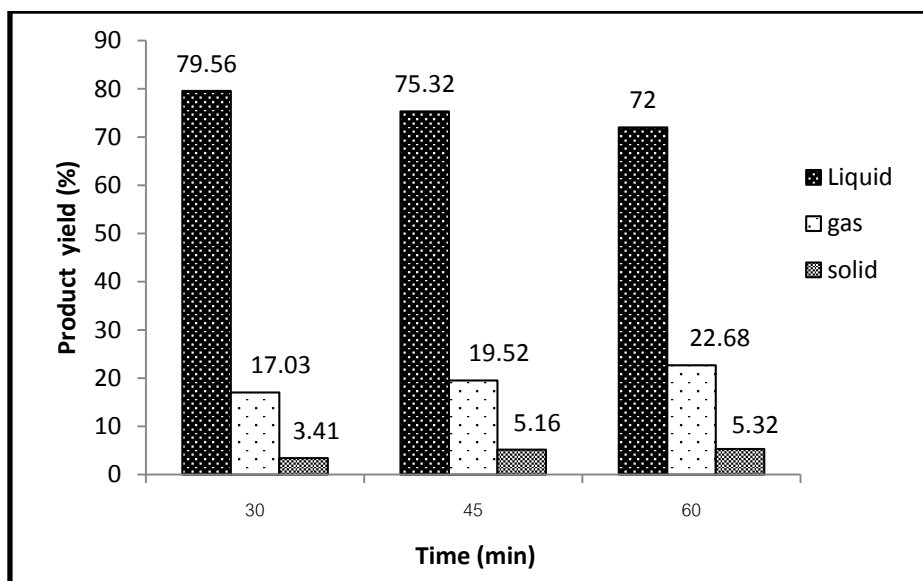
ตัวแปร	ภาวะจาก โปรแกรม	ทดลองจริง
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1	1
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์)	1	1
ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	30	30
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	410.24	410
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	9.26	8.79
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	88.60	88.04
ร้อยละผลได้แนฟทา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	15.62	15.12
ร้อยละผลได้เคโรซีน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	7.93	6.84
ร้อยละผลได้ดีเซล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	40.15	41.25

4.4 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไฟโรไลซิสน้ำมันสบูดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

4.4.1 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันสบูดำ

ภาพที่ 4.11 แสดงอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไฟโรไลซิสน้ำมันสบูดำ ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 60 นาที พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้คือ 79.56 75.32 และ 72.00 โดยน้ำหนักตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จะลดลงโดยเปลี่ยนเป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความร้อนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ไปเป็นขนาดกลางและขนาดเล็ก เมื่อให้อุณหภูมิอย่างต่อเนื่องทำให้ปฏิกิริยาแตกตัวด้วยความร้อนดำเนินต่อไปเกิดการแตกตัวของน้ำมันสบูดำที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง โดยเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยายังดำเนินต่อไป ปฏิกิริยาการแตกตัวเมื่อได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่อง จึงเกิดการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดเล็กไปเป็น

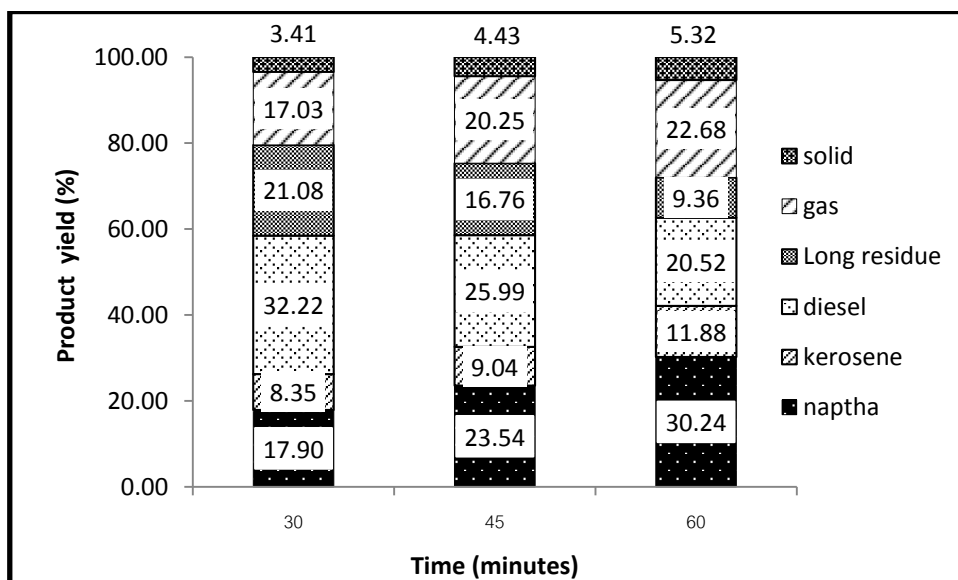
แก๊สไฮโดรคาร์บอน และมีบางส่วนเกิดการเผาไหม้กลายเป็นของแข็งหรือโค้กเกาะอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาและผิวด้านในของเครื่องปฏิกรณ์ จึงเห็นได้ว่า มีแก๊สไฮโดรคาร์บอนและของแข็งเกิดมากขึ้นเมื่อเวลาในการทำการทดลองยาวนานขึ้น



ภาพที่ 4.11 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสปูดำ ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 60 นาที

เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องมือ simulated distillation gas chromatograph แสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพ 4.12 พบว่าเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ร้อยละผลได้ในช่วงของเนฟทาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 17.90 เป็น 30.24 โดยน้ำหนัก และพบว่า long residue มีปริมาณที่ลดลงจากร้อยละ 21.08 เป็น 9.36 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้น อุณหภูมิมีผลต่อปฏิกิริยาการแตกตัวไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็กจำนวนมาก โดยเมื่อเวลายังดำเนินต่อไปผลของอุณหภูมิจะทำให้ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็กแตกตัวไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน และมีบางส่วนกลายเป็นของแข็ง ดังจะเห็นว่าปริมาณของเนฟทาเพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 17.90 ไปเป็น 30.24 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก

30 นาที ไปเป็น 60 นาที และของแข็งที่เกิดขึ้นหรือแก๊สไฮโดรคาร์บอนก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกัน

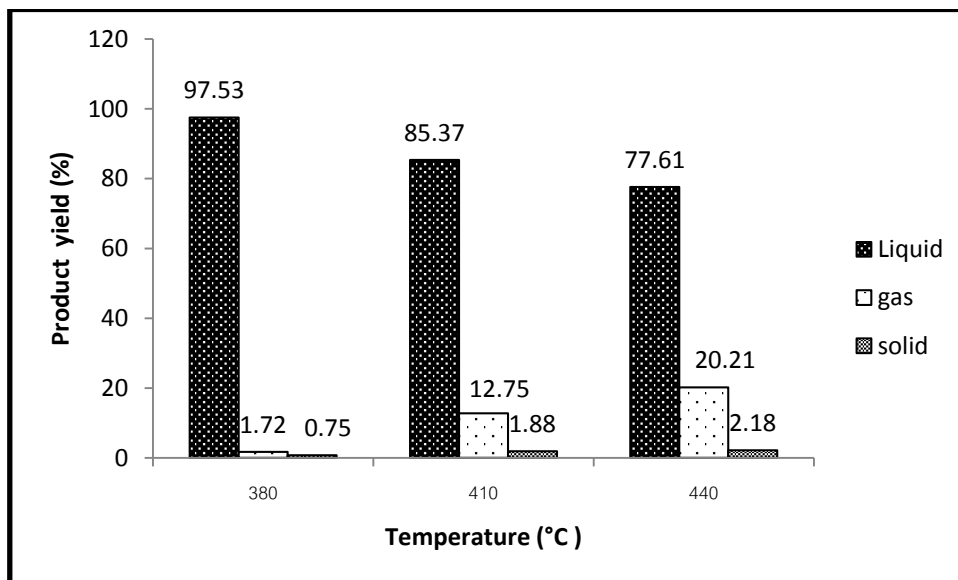


ภาพที่ 4.12 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำ ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ อุณหภูมิ 380 องศา และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 60 นาที

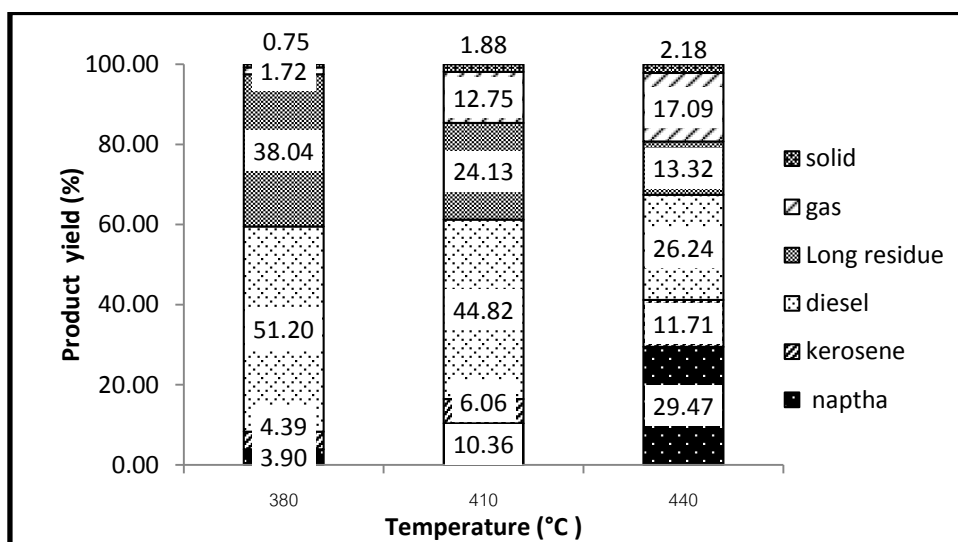
4.4.2. อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันสบู่ดำ

ภาพที่ 4.13 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำ ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 380 410 และ 440 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวลดลงจากร้อยละ 97.53 เป็นร้อยละ 77.61 โดยน้ำหนัก แต่พบว่าร้อยละผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและของแข็งกลับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของการแตกสลายด้วยความร้อน โดยมีอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อการแตกตัวด้วยความร้อน ทำให้สายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่แตกตัวเป็นสายโซ่โมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็ก โดยเมื่อได้รับความร้อนสูงอย่างต่อเนื่อง

ทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็กแตกสลายไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน และมีส่วนหนึ่งที่เกิดการเปลี่ยนไปเป็นโค้ก



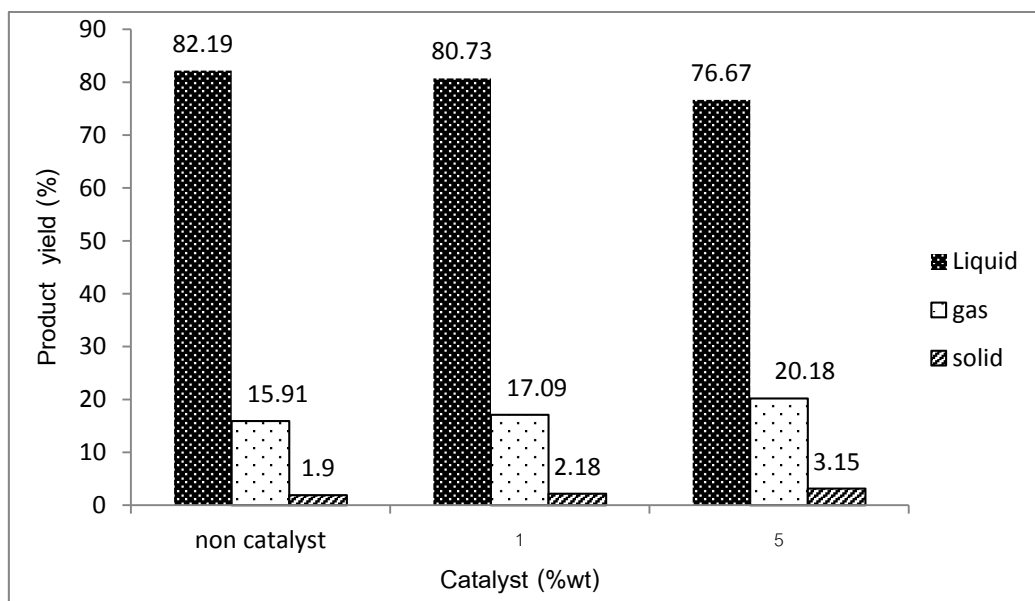
ภาพที่ 4.13 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบูดำ ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 380 410 และ 440 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.14 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบูดำ ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 380 410 และ 440 องศาเซลเซียส

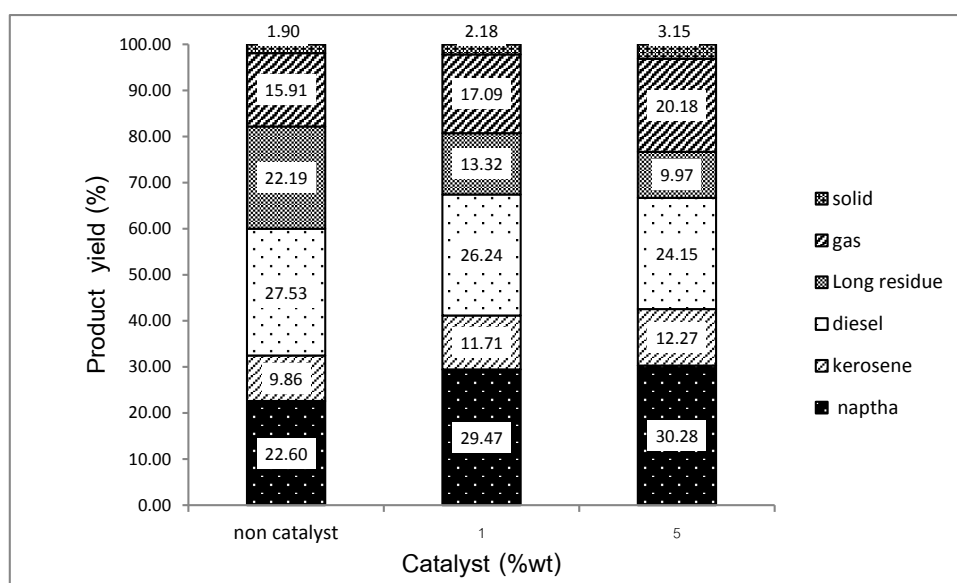
เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบเพื่อหาค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือด แสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพ 4.14 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 380 ถึง 440 องศา ทำให้แนฟตามีปริมาณเพิ่มขึ้นสูงจากร้อยละ 3.90 เป็นร้อยละ 29.47 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และ long residue ลดลงจากร้อยละ 38.04 เป็น 13.32 โดยน้ำหนัก เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อการแตกตัวอย่างมาก โดยเกิดเป็นเรดิเคิลต่อเนื่องทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กในขณะที่ยังให้อุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่องจะทำให้โมเลกุลขนาดเล็กแตกตัวได้ดีจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่ได้อยู่ในช่วงของแนฟตามากขึ้น

4.4.3 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันสบู่ดำ



ภาพที่ 4.15 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำ ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และอุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

จากภาพที่ 4.15 แสดงอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันสบูดำ ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และอุณหภูมิ 440 องศา เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า เมื่อไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 82.19 โดยน้ำหนัก เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1 และ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่าร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวลดลง เป็นร้อยละ 80.73 และ 76.67 โดยน้ำหนักตามลำดับ แต่ส่งผลให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ความร้อนมีผลต่อการแตกตัวในช่วงแรกได้เป็นสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีจึงมีผลต่อการถ่ายโอนไฮโดรเจน และเกิดการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนให้มีรูปแบบที่เหมาะสมจากสมบัติการมีพื้นที่ผิววูพูนจำนวนมาก และความเป็นกรด ความแรงของกรดจะเข้าไปมีบทบาทในการแตกตัวของน้ำมันสบูดำซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้กลายเป็นโมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็กลงจนอาจจะเล็กลงเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนในปริมาณที่มากขึ้นจึงทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันน้อยลง

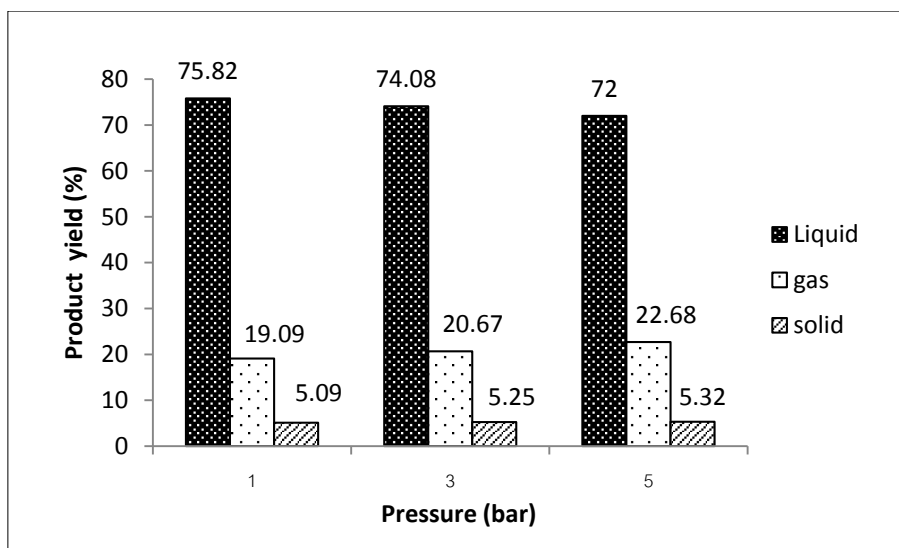


ภาพที่ 4.16 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบูดำ ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และอุณหภูมิ 440 องศา เซลเซียส เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

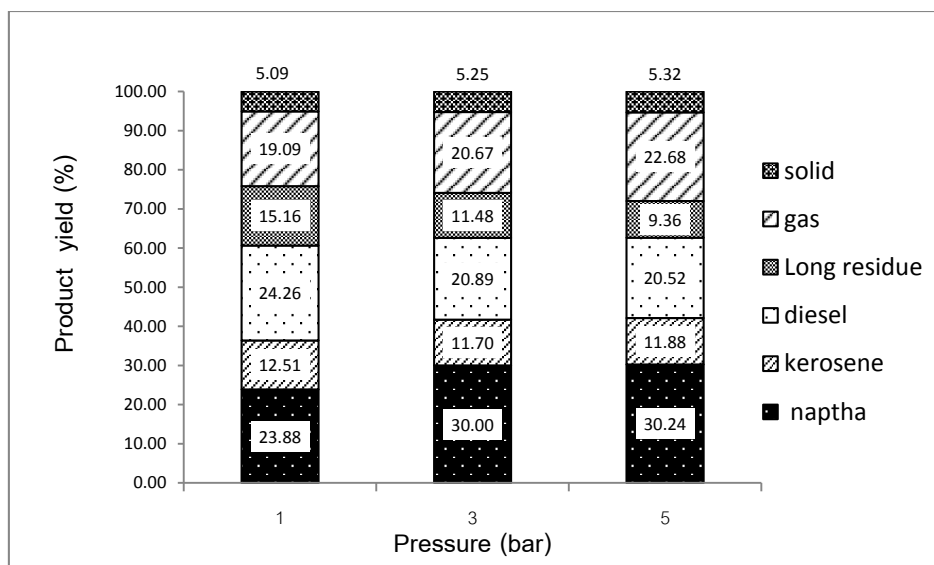
เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องมือ Simulated distillation gas chromatograph แสดงผลการวิเคราะห์จากภาพที่ 4.16 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบปฏิบัติการที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิบัติการที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก กับไม่ใช้ตัวเร่ง พบว่า จากการทำปฏิบัติการโดยไม่ใช้ตัวเร่งทำให้ได้เนฟทาเพียงร้อยละ 22.60 โดยน้ำหนัก เมื่อมีการใช้ตัวเร่งในการทำปฏิบัติการทำให้ได้เนฟทามีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 29.47 โดยน้ำหนัก และ long residue มีปริมาณลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิบัติการเป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำให้ได้เนฟทาเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30.28 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจาก ตัวเร่งปฏิบัติการเอพซีซีมีความเป็นกรด และมีความจำเพาะสูงจึงทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ทำให้ได้ปริมาณของเนฟทามาก เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิบัติการมากขึ้นซึ่งอาจจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวหรือบริเวณเร่งทำให้ปฏิบัติการเกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจนได้ดีช่วยแตกสลายโครงสร้างสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กได้มากขึ้น โดยตัวเร่งปฏิบัติการเอพซีซีมีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำแล้วได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีปริมาณเนฟทาเพิ่มขึ้นมากกว่าไม่มีการใส่ตัวเร่งปฏิบัติการ

4.4.4 อิทธิพลของความดันที่ใช้ในการทำปฏิบัติการที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันสบู่ดำ

ศึกษาอิทธิพลของความดันในการทำปฏิบัติการที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันสบู่ดำ ที่อุณหภูมิ 440 องศา เวลาในการทำปฏิบัติการ 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 3 และ 5 บาร์บนตัวเร่งปฏิบัติการเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยพิจารณาจากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.17 พบว่า เมื่อเพิ่มความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นเข้าไป 1 บาร์ ทำให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เท่ากับ ร้อยละ 75.82 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มความดันไฮโดรเจนเข้าไปในการทำปฏิบัติการเป็น 3 และ 5 บาร์ ส่งผลให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ของเชื้อเพลิงเหลวลดลง เป็น ร้อยละ 74.08 และ 72.00 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองที่มีการเพิ่มความดันไฮโดรเจนเข้าไปในปฏิบัติการ ไฮโดรเจนจะช่วยส่งเสริมให้เกิดปฏิบัติการการแตกตัวแบบ hydrocracking แล้วทำให้น้ำมันเกิดการแตกตัวได้ดีขึ้น อีกทั้งเนื่องจากในตอนเริ่มต้นผลของอุณหภูมิจะทำให้เกิดการแตกตัวของน้ำมันจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดขนาดเล็กลง จากนั้นการแตกตัวในบรรยากาศทำให้ไฮโดรเจนจะเข้ามามีบทบาทเกิดการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมในปฏิบัติการด้วย



ภาพที่ 4.17 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบูดำ ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 3 และ 5 บาร์ บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

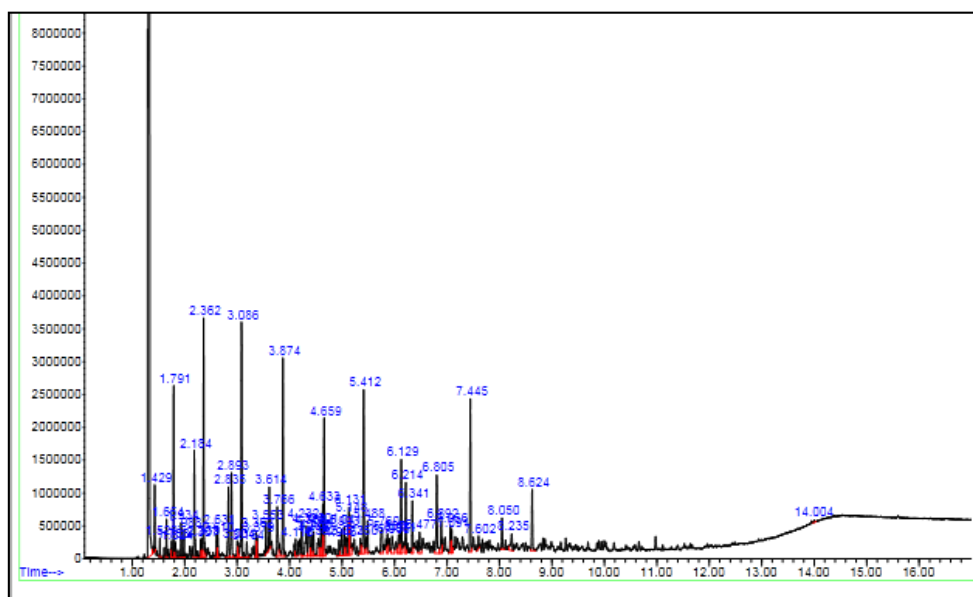


ภาพที่ 4.18 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบูดำ ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 3 และ 5 บาร์ บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องมือ Simulated distillation gas chromatograph แสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4.18 เมื่อทำการเพิ่มความดันจาก 1 บาร์ ไปเป็น 3 บาร์ ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่า ได้ร้อยละผลได้แนฟทาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 23.88 เป็น 30.00 และเมื่อเพิ่มความดันขึ้นเป็น 5 บาร์ พบว่า ได้ร้อยละผลได้แนฟทาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็นร้อยละ 30.24 อีกทั้งยังพบว่า ร้อยละผลได้ดีเซลกลับลดลงจากร้อยละ 24.26 เป็นร้อยละ 20.89 และ 20.52 ตามลำดับ เนื่องจากว่าเมื่อเพิ่มความดันของแก๊สไฮโดรเจนให้กับระบบในภาวะอุณหภูมิคงที่ แก๊สไฮโดรเจนจะไปช่วยให้เกิดการแตกตัวจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางจำพวกดีเซลให้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจำพวกแนฟทาในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งมีผลมาจากการที่แก๊สไฮโดรเจนไปมีบทบาทในการส่งเสริมปฏิกิริยา hydrocracking อีกทั้งยังมีส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวประเภทแนฟทาเพิ่มมากขึ้น พร้อมกันนี้ยังเป็นการเพิ่มความดันในระบบ ทำให้เกิดปฏิกิริยาทำความสะอาดที่ผิวสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีผลทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยายังมีความว่องไวสามารถช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนได้ดี

4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

4.5.1 การวิเคราะห์สารประกอบที่เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว



ภาพที่ 4.19 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ที่ภาวะเหมาะสมจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

เมื่อนำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรสโกปี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.19 พบว่า เมื่อน้ำมันสบู่ดำได้ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแล้วได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีองค์ประกอบเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคน (alkane) หรือพาราฟิน และแอโรแมติก องค์ประกอบหลัก องค์ประกอบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ที่ภาวะเหมาะสมจากการไพโรไลซิส น้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

เวลา R.T. (min)	องค์ประกอบ	สูตรโมเลกุล
1.431	n-Hexane	C_6H_{14}
1.527	Cyclopentane	C_5H_{10}
1.653	Benzene	C_6H_6
1.752	Isopropylcyclobutane	C_7H_{14}
1.791	Heptane	C_7H_{16}
1.934	Cyclohexane	C_6H_{12}
2.186	Toluene	C_7H_8
2.364	Octane	C_8H_{18}
2.836	Ethylbenzene	C_8H_{10}
2.892	p-Xylene	C_8H_{10}
3.088	Nonane	C_9H_{20}

3.872

Decane

 $C_{10}H_{22}$

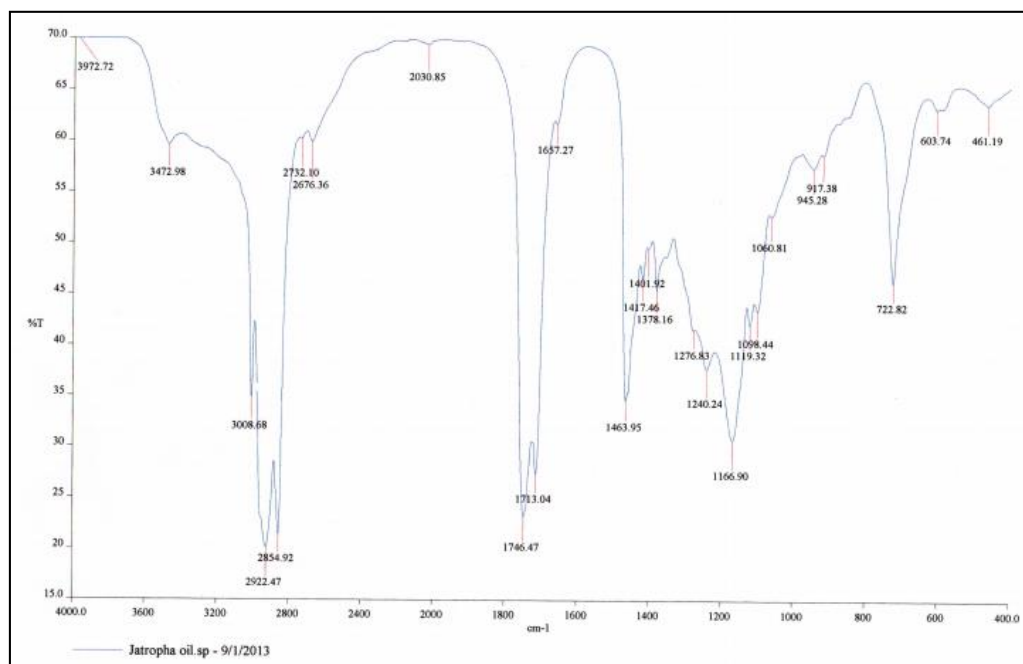
ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ที่ภาวะเหมาะสมจากการไพโรไลซิส น้ำมันสนูป่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว (ต่อ)

เวลา R.T. (min)	องค์ประกอบ	สูตรโมเลกุล
4.366	Naphthalene	$C_{10}H_8$
4.657	Undecane	$C_{11}H_{24}$
5.130	(E)-1-Phenyl-1-butene	$C_{10}H_{12}$
5.411	Dodecane	$C_{12}H_{26}$
6.807	Tetradecane	$C_{14}H_{30}$
7.445	Pentadecane	$C_{15}H_{32}$
8.624	Heptadecane	$C_{17}H_{36}$

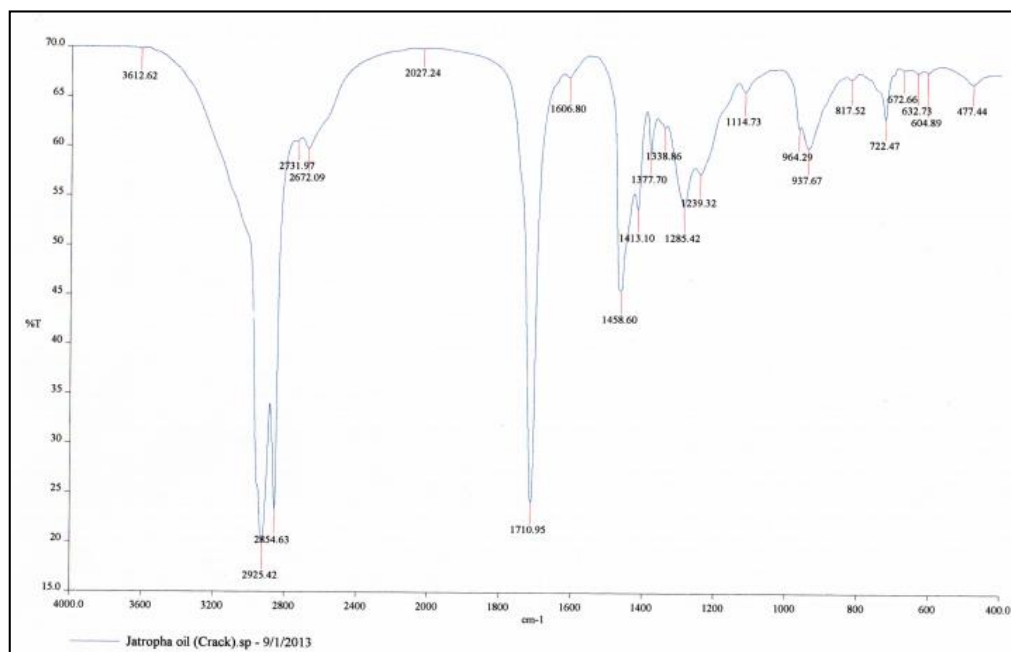
4.5.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

เมื่อนำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส น้ำมันสนูป่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) เพื่อหาหมู่ฟังก์ชัน โดยทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันในช่วงคลื่น $650-4000\text{ cm}^{-1}$ เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของผลิตภัณฑ์น้ำมันสนูป่าก่อนไพโรไลซิสกับผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ผ่านการไพโรไลซิส น้ำมันสนูป่า พบว่า มีหมู่ฟังก์ชันเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน แสดงในภาพที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้พบว่า ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการการไพโรไลซิส น้ำมันสนูป่า มีหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏพิกัดชัดเจนที่ $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ เป็นช่วงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอะลิฟาติก CH (stretching) เป็นองค์ประกอบหลักๆ อีกทั้งนั้นยังพบพิกัดปรากฏในช่วงจำนวนคลื่นต่าง ๆ ดังนี้คือ หมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล พิกัดที่ช่วงความยาวคลื่น $1600-1950\text{ cm}^{-1}$, CH (stretching) ของสารประกอบแอมไคกพิกัดที่ช่วงคลื่น $3000-3100\text{ cm}^{-1}$ และ

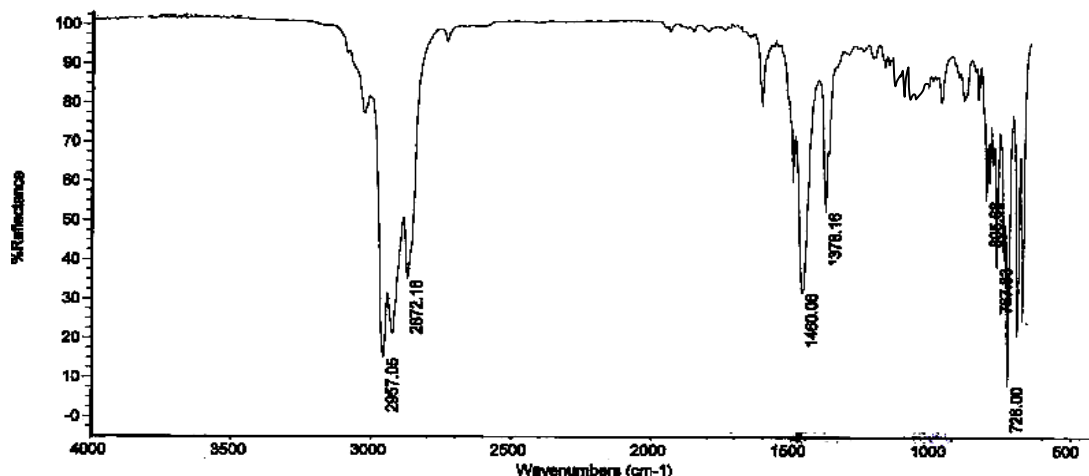
วงแหวนเบนซีนที่ช่วงความยาวคลื่นที่ $670-870\text{ cm}^{-1}$ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันแก๊สโซลีน ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าพีคขึ้นในช่วงความยาวคลื่นใกล้เคียงกัน และมีหมู่ฟังก์ชันหลักที่คล้ายกัน



ภาพที่ 4.20 FTIR spectrum ของน้ำมันสบู่ดำ



ภาพที่ 4.21 FTIR spectrum ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากภาวะเหมาะสมจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว



ภาพที่ 4.22 FTIR spectrum ของน้ำมันเบนซินออกเทน 95

4.5.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

ในปฏิกิริยาจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว พบว่ามีผลิตภัณฑ์แก๊สเกิดขึ้น เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นได้แก่ แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนตั้งแต่หนึ่งอะตอมขึ้นไป เช่น แก๊สมีเทน (CH_4) อีเทน (C_2H_6) เอททีลีน (C_2H_4) บิวเทน (C_4H_{10}) เป็นต้น ซึ่งแก๊สเหล่านี้เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่ยาวเกิดเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่เล็กลง และยังพบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ได้จากการเกิดปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation)

4.6 การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำมัน

4.6.1 วิเคราะห์ค่าความร้อน (calorific value) ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าความร้อนมาตรฐาน ASTM D2015 ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว พบว่าเมื่อน้ำมันสบู่ดำผ่านกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาจะได้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 39.00 เป็น 46.21

เมกะจูล/กิโลกรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันปิโตรเลียมแล้วพบว่ามีความใกล้เคียงกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแก๊สโซลีนและดีเซลมาก

ตารางที่ 4.14 ค่าความร้อนของน้ำมันสบู่ดำและผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากภาวะเหมาะสมของการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ชนิดน้ำมัน	ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)
น้ำมันสบู่ดำ	39.00
ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว	46.21
แก๊สโซลีน	47.00
ดีเซล	45.00

4.6.2 วิเคราะห์ความหนืด (viscosity) ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ตารางที่ 4.15 ค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากภาวะเหมาะสมของการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ชนิดน้ำมัน	ค่าความหนืด (cst)
น้ำมันสบู่ดำ	45.68
ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว	4.06
ดีเซล	1.8-4.1
แก๊สโซลีน	0.4 – 0.71

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าความหนืดที่มาตรฐาน ASTM D2270 ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว พบว่าผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าความหนืดลดลงจาก 45.68 เป็น 4.06 เซนติสโตรก (cst) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความหนืดของมาตรฐานคุณภาพน้ำมันปิโตรดีเซล [35]

4.7 วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ CHO ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิส น้ำมันสบูดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ตารางที่ 4.16 องค์ประกอบธาตุ CHO ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบูดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ตัวเร่งปฏิกิริยา	C	H	O
น้ำมันสบูดำ	74.51	11.15	14.34
เอพซีซีใช้แล้ว	80.61	13.48	5.91
ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	79.63	12.58	7.79

ตารางที่ 4.16 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ CHO ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันสบูดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว พบว่ามีปริมาณออกซิเจนที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันสบูดำในตอนเริ่มต้น อีกทั้งยังมีปริมาณออกซิเจนที่น้อยกว่าผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมัน (Fatty acid) เกิดปฏิกิริยา decarboxylation ได้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง จากนั้นอิทธิพลของความร้อนจึงเข้ามามีบทบาทต่อการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน ดังนั้นจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีปริมาณออกซิเจนลดน้อยลง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัย ได้ทำการศึกษาการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเพื่อหาภาวะที่เหมาะสม และศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟคทอเรียลสองระดับ ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่ศึกษาทั้งหมด 4 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 – 5 โดยน้ำหนัก ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 - 5 บาร์ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 - 60 นาที และอุณหภูมิที่ 380 - 440 องศาเซลเซียส จากนั้นคำนวณผลการทดลองจากการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบน ด้วยโปรแกรม Design-Expert องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้นำไปวิเคราะห์หาค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดต่าง ๆ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatography) จากงานวิจัยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

1. ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (A) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (C) และ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (D)
2. ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้เนฟทา ได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (A) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (C) อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (D) อันตรกิริยาระหว่างความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นกับเวลา (BC) และอันตรกิริยาระหว่างความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นกับเวลาในการทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิ (BCD)

5.1.2 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert

ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert ของการไฟโรไลซิสน้ำมันสบูดำเป็น เชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว คือ

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ	1	โดยน้ำหนัก
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น	1	บาร์
ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	30	นาที
อุณหภูมิ	410.24	องศาเซลเซียส
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส ร้อยละ	9.26	โดยน้ำหนัก
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ร้อยละ	88.60	โดยน้ำหนัก
ร้อยละผลได้แนฟทา ร้อยละ	15.62	โดยน้ำหนัก
ร้อยละผลได้เคโรซีน ร้อยละ	7.93	โดยน้ำหนัก
ร้อยละผลได้ดีเซล ร้อยละ	40.15	โดยน้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการไฟโรไลซิสน้ำมันพีชชนิดอื่นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรด
2. ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการไฟโรไลซิสน้ำมันสบูดำนี้เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มศักยภาพในการทดลอง
4. ศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการทดลองนี้ให้มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้นและสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ชนิดต่าง ๆ ได้จริง

รายการอ้างอิง

- [1] พลังงานและทางเลือกการใช้เชื้อเพลิงของประเทศไทย [ออนไลน์] แหล่งที่มา: [HTTP://WWW.EPPO.GO.TH/DOC/DOC-ALTERFUEL.HTML](http://www.epgo.go.th/doc/doc-alterfuel.html) [25 สิงหาคม 2556]
- [2] ข้อมูลพลังงานทดแทนจาก NSTDA. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.nstda.or.th/component/search/พลังงานทดแทน/?areas%5B0%5D=content&searchphrase> [25 สิงหาคม 2556]
- [3] แผนพัฒนาพลังงานทดแทน [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.dede.go.th/dede/images/stories/aedp25.pdf> [25 สิงหาคม 2556]
- [4] ปิโตรเลียม [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://th.wikipedia.org/wiki/ปิโตรเลียม> [25 สิงหาคม 2556]
- [5] Alkane [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/organic/alkane.html> [25 สิงหาคม 2556]
- [6] Cycloalkanes [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/278321/hydrocarbon/277893/Cycloalkanes> [25 สิงหาคม 2556]
- [7] Aromatic [ออนไลน์] แหล่งที่มา http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/en/ch/12/oc/vlu_organik/aromaten/aromaten/aromaten_gesamt.vlu/Page/vsc/en/ch/12/oc/aromaten/aromaten/vorkommen/vorkommen.vscml.html [25 สิงหาคม 2556]
- [8] ก๊าซธรรมชาติ [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.sc.sci.rmutp.ac.th/sctank/appchem/wcs-petroleum.pdf> [25 สิงหาคม 2556]
- [9] พลังงานทดแทน พลังงานชีวมวล. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://kuttiya.wordpress.com/2012/01/10/%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%8A%E0%B8%B5%E0%B8%A7%E0%B8%A1%E0%B8%A7%E0%B8%A5/> [23 มกราคม 2556]
- [10] สุกัญญา สุนทรส และ วิเชียร ริมพนิชยกิจ. ชีวโมเลกุล. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- [11] น้ำมันพืช [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://vcharkarn.com/varticle/40662> [25 สิงหาคม 2556]
- [12] ไขมัน(Lipid) [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.ipesp.ac.th/learning/biocheme/html/bt4.pdf> [25 สิงหาคม 2556]

- [13] น้ำมันพืช [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/ /0886/unsaturated-fatty-acid-%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%94%E0%B9%84%E0%B8%82%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%B4%E0%B9%88%E0%B8%A1%E0%B8%95%E0%B8%B1%E0%B8%A7> [25 สิงหาคม 2556]
- [14] วิชาการเกษตร, กรม. พืชพลังงานทดแทน. [ออนไลน์]. 2009. แหล่งที่มา : <http://it.doa.go.th/vichakan/news.php?newsid=15> [25 สิงหาคม 2556]
- [15] นพดล พลเสน . สบู่ดำ พืชพลังงานทดแทนน้ำมันดีเซล. [ออนไลน์]. 2011. แหล่งที่มา : <http://www.thaienv.com/content/view/677/40>. [25 สิงหาคม 2556]
- [16] สุนทร ดุริยะประพันธ์. กระแสน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2549 (21):30-32.
- [17] จุงใจ ปั่นประณต. ความรู้พื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาวิธพันธ์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552
- [18] จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยา พื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547
- [19] Zeolite [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://scitechdaily.com/zeolite-catalyst-creates-p-xylene-from-biomass/> [25 สิงหาคม 2556]
- [20] Maher, Bressler. Pyrolysis of triglyceride materials for the production of Renewable fuels and chemicals. Bioresource Technology 98 (2007): 2351–2368
- [21] ปราโมทย์ ไชยเวช และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543
- [22] วิชากร จารุศิริ. การแปรรูปน้ำมันพืช น้ำมันเครื่อง และพลาสติกใช้แล้วให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวบนเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง. รายงานการวิจัย ทูลพัฒนาอาจารย์/นักวิจัยใหม่ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช, 2549
- [23] Tani, Hasegawa, Shimouchi, Asami and Fujimoto, Selective catalytic decarboxy-cracking of triglyceride to middle-distillate hydrocarbon. CatalysisToday 164 (2011) : 410-414

- [24] Haruki Tani, Makoto Shimouchi, Hiroyuki Haga, and Kaoru Fujimoto, Development of direct process of diesel fuel from vegetable oils. The Japan institute of energy 90 (2011) : 466-470
- [25] Singh, Shadangi, Liquid fuel from castor seeds by pyrolysis. Journal of Energy, 2011(90): 2538-2544.
- [26] Xu J, Jiang J, Lu Y, Chen J : Liquid hydrocarbon fuels obtained by the pyrolysis of soybean oils. Journal of Bioresource Technology, 2009(100): 4867-4870.
- [27] Hanna, A. Raimo : Pyrolysis of vegetable oil soaps—Palm, olive, rapeseed and castor oils. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2011(91): 154-158.
- [28] Pramila, B. Subhash : Catalytic cracking of palm oil for the production of biofuels : Optimization studies. Journal of Bioresource Technology, 2007(98): 3593–3601.
- [29] Padmaja, Atheya, Conversion of Calotropis procera biocrude to liquid fuels using thermal and catalytic cracking. Journal of Fuel 2009 (88): 780–785
- [30] รวีวรรณ สวัสดิ์รักษา. การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบน HZSM-5. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [31] มารีนาม มงคล. การแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์และ HZSM-5. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [32] แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. Principle and Techniques of Instrumental Analysis. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535
- [33] ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2545.
- [34] Montgomery, D.C. Design and analysis of Experiments. 5th ed. Newyork: John Wiley & Sons, 2001.
- [35] Viscosity [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.gates.com/brochure.cfm? brochure=2625&locationid=3046> [25 กันยายน 2556]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก1 ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันสนปู้ดำโดยใช้ตัวเร่งเอพิซีซีใช้แล้ว

Experiment no.	Parameter				Product yield (%wt)			Product distribution (%wt)			
	Temperature (°C)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)	Time (Min)	Liquid (%wt)	Gas (%wt)	Solid (%wt)	Naphtha (%wt)	Kerosene (%wt)	Diesel (%wt)	Long residue (%wt)
1	1	1	30	380	97.53	1.72	0.75	3.90	4.39	51.20	38.04
2	5	1	30	380	94.58	3.26	2.16	6.15	4.73	54.86	28.85
3	1	5	30	380	97.20	1.87	0.93	4.08	3.40	64.15	25.56
4	5	5	30	380	94.13	2.11	3.76	5.74	2.82	63.07	22.50
5	1	1	60	380	92.36	5.64	2	4.99	3.69	57.26	26.41
6	5	1	60	380	90.25	7.42	2.33	8.57	3.61	49.19	28.88
7	1	5	60	380	92.11	5.18	2.71	4.79	2.76	62.17	22.38
8	5	5	60	380	89.15	8.41	2.44	8.65	3.12	45.02	32.36

ตารางที่ ก1 (ต่อ) ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันสบูดำโดยใช้ตัวเร่งเอพิซีทีใช้แล้ว

Experiment no.	Parameter				Product yield (%wt)			Product distribution (%wt)			
	Temperature (°C)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)	Time (Min)	Liquid (%wt)	Gas (%wt)	Solid (%wt)	Naphtha (%wt)	Kerosene (%wt)	Diesel (%wt)	Long residue (%wt)
9	1	1	30	440	80.73	17.09	2.18	29.47	11.71	26.24	13.32
10	5	1	30	440	76.67	20.18	3.15	30.28	12.27	24.15	9.97
11	1	5	30	440	79.56	17.03	3.41	17.90	8.35	32.22	21.08
12	5	5	30	440	76.12	18.18	5.7	18.65	9.52	29.69	18.27
13	1	1	60	440	75.82	19.09	5.09	23.88	12.51	24.26	15.16
14	5	1	60	440	71.22	22.25	6.53	27.06	10.33	21.01	12.82
15	1	5	60	440	72.00	22.68	5.32	30.24	11.88	20.52	9.36
16	5	5	60	440	69.51	24.27	6.22	31.63	10.77	19.46	7.65
17	3	3	45	410	89.29	7.83	2.88	11.16	6.70	39.73	31.70
18	3	3	45	410	85.32	10.51	4.17	8.53	5.97	40.95	29.86
19	3	3	45	410	86.41	9.33	4.26	10.54	5.62	39.75	30.50

ตารางที่ ก1 (ต่อ) ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันสบูดำโดยใช้ตัวเร่งเอพิซีซีใช้แล้ว

Experiment no.	Parameter				Product yield (%wt)			Product distribution (%wt)			
	Temperature (°C)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)	Time (Min)	Liquid (%wt)	Gas (%wt)	Solid (%wt)	Naphtha (%wt)	Kerosene (%wt)	Diesel (%wt)	Long residue (%wt)
20	1	1	30	380	98.01	1.67	0.32	5.39	3.92	49.50	39.20
21	5	1	30	380	95.31	2.78	1.91	6.48	5.24	53.37	30.21
22	1	5	30	380	96.81	2.01	1.18	3.58	3.87	63.02	26.33
23	5	5	30	380	95.01	2.13	2.86	6.18	3.90	63.66	21.28
24	1	1	60	380	92.54	4.11	3.35	5.37	4.26	58.67	24.25
25	5	1	60	380	91.55	7.56	0.89	8.06	3.66	48.52	31.31
26	1	5	60	380	90.32	4.75	4.93	5.78	3.16	60.97	20.41
27	5	5	60	380	89.67	8.29	2.04	9.59	3.59	46.18	30.31
28	1	1	30	440	79.91	16.56	3.53	25.97	10.79	25.97	17.18
29	5	1	30	440	76.18	21.12	2.7	29.25	12.57	22.70	11.66
30	1	5	30	440	77.98	18.23	3.79	18.01	9.36	32.28	18.33

ตารางที่ ก1 (ต่อ) ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันสบูดำโดยใช้ตัวเร่งเอพิซีทีใช้แล้ว

Experiment no.	Parameter				Product yield (%wt)			Product distribution (%wt)			
	Temperature (°C)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)	Time (Min)	Liquid (%wt)	Gas (%wt)	Solid (%wt)	Naphtha (%wt)	Kerosene (%wt)	Diesel (%wt)	Long residue (%wt)
31	5	5	30	440	77.63	17.87	4.5	17.47	10.40	30.28	19.49
32	1	1	60	440	75.31	19.94	4.75	22.97	11.30	23.35	17.70
33	5	1	60	440	72.57	21.88	5.55	27.94	10.52	20.68	13.43
34	1	5	60	440	72.65	22.05	5.3	30.15	12.50	20.71	9.30
35	5	5	60	440	68.74	27.43	3.83	31.69	10.31	19.93	6.81
36	3	3	45	410	89.56	8.11	2.33	11.46	6.09	39.85	32.15
37	3	3	45	410	83.45	9.56	6.99	8.35	6.26	40.06	28.79
38	3	3	45	410	87.32	10.87	1.81	11.35	7.07	39.99	28.90

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์เชิงสถิติและตัวอย่างการคำนวณ

การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ เป็นการวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยอยู่ภายใต้สมมติฐานว่าตัวแปรและค่าการวิเคราะห์มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

1. สัญลักษณ์ของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

1.1 k หมายถึง จำนวนตัวแปรที่ทำการศึกษา

1.2 n หมายถึง จำนวนการทดลองที่ภาวะการทดลองเดียวกัน

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

1.4 อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่เขียนติดกัน (Combination) เช่น AB, AC, ABC หมายถึงอันตรกิริยาของแต่ละปัจจัย (Interaction)

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

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

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันถั่วเหลืองบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิธีพ่นธนูชนิดเบส โดยทำการออกแบบการทดลองเป็นแบบ 2^k แฟกทอเรียล แบบ 1 เรพลิเคต ซึ่งกำหนดสัญลักษณ์และระดับของตัวแปร ดังนี้

ตารางที่ ข1 สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปร	ระดับ	
	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt), A	1	5
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (bar), B	1	5
เวลาในการทำปฏิกิริยา (min), C	30	60
อุณหภูมิ (°C), D	380	440

ในการทดลองจะมีสัญลักษณ์ที่นำมาใช้แทนการทดลอง ซึ่งได้จากการรวมกันของอิทธิพลปัจจัยต่างๆ หมายถึง การทดลองที่ปรากฏสัญลักษณ์ของปัจจัยใด แสดงว่าทำการทดลองที่ระดับ +1 ของปัจจัยนั้น และที่ระดับ -1 จะไม่ปรากฏสัญลักษณ์นั้นในการทำการทดลอง ตัวอย่างเช่น

(-1) แสดงว่า ได้ทำการทดลองที่ระดับ -1 ในทุกปัจจัย

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

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

2. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k

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

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

3. สูตรการคำนวณ

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

3.2 Effect Estimate_{AB...K} (EE)

$$EE = \frac{2 (\text{Contrast}_{AB...K})}{n 2^k}$$

3.3 Sum of Squares_{AB...K} (SS)

$$SS = \frac{2 (\text{Contrast}_{AB...K})^2}{n 2^k}$$

3.4 Total of sum of squares (SS_T)

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

3.5 Mean of Square Error : (SS_E)

$$SS_E = SST - SS \text{ of Main Effect}$$

3.6 Mean of Square (MS)

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

3.7 % Normal probability = $\frac{(\text{Cumulative frequency} - 0.5) \times 100}{\text{Total cumulative frequency}}$

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

4. การใช้โปรแกรม Design-Expert ในการคำนวณ

4.1. เข้าสู่โปรแกรม คลิกไปที่ file ----> New Design แสดงดังภาพที่ ข1

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 V, Yellow = Res IV, and Red = Res III.

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 ข1 ตารางของ 2 Level Factorial Design

4.2 เลือกจำนวนตัวแปรที่ใช้ในการทดลองเพื่อทำการศึกษาอิทธิพลตัวแปรเหล่านั้น โดยในการทดลองประกอบด้วยตัวแปร 4 ตัวแปร คืออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา คลิกที่ Full ของช่อง 4 จากนั้นกรอกจำนวนที่ทำการทดลองซ้ำในช่อง Replicates และกรอกค่าจำนวนการทดลองของค่ากลาง ช่อง Center point per block ยกตัวอย่าง Replicates = 1, Center point per block = 3 กดที่ Continue จะปรากฏดังรูปที่ ข2 เมื่อกรอกตัวแปรเสร็จคลิกที่ Continue

Factors					
	Name	Units	Type	Low	High
A:	Temperature	C	Numeric	380	450
B:	Catalyst	%Wt	Numeric	0.1	1.5
C:	Pressure	Bar	Numeric	1	5
D:	Time	Min	Numeric	30	60

ภาพที่ ข2 ตัวแปรและหน่วยที่ใช้ในการทดลอง

3. เลือกตัวแปรที่ใช้ในการทดลองและกรอกลงในช่องดังภาพ ข3 จากนั้นคลิกที่ Continue

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

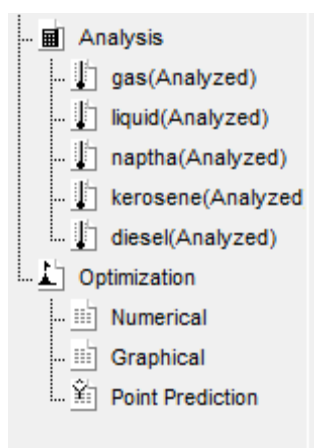
ภาพที่ ข3 Response และ หน่วยของตัวแปรที่ทำการทดลอง

4. จะปรากฏบัยจัยที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด เช่น การทดลองมีทั้งหมด 16 การทดลอง ค่ากลาง 3 การทดลอง ทำซ้ำ 1 ครั้ง รวมการทดลอง 19 การทดลอง จากนั้นทำการกรอกข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดลงในช่องดังภาพที่ ข4

Std	Run	Block	Factor 1 A:Catalyst	Factor 2 B:Pressure	Factor 3 C:Time	Factor 4 D:Temp	Response 1 gas	Response 2 liquid	Response 3 naptha	Response 4 kerosene	Response 5 diesel
9	1	Block 1	1.00	1.00	30.00	440.00	17.09	80.73	29.47	11.71	26.24
14	2	Block 1	5.00	1.00	60.00	440.00	22.25	71.22	27.46	10.33	21.01
7	3	Block 1	1.00	5.00	60.00	380.00	5.18	92.11	4.79	2.76	62.17
18	4	Block 1	3.00	3.00	45.00	410.00	10.51	85.32	8.53	5.97	40.95
10	5	Block 1	5.00	1.00	30.00	440.00	20.18	76.67	30.28	12.27	24.15
6	6	Block 1	5.00	1.00	60.00	380.00	7.42	90.25	8.57	3.61	49.19
4	7	Block 1	5.00	5.00	30.00	380.00	2.11	94.13	5.74	2.82	63.07
3	8	Block 1	1.00	5.00	30.00	380.00	1.87	97.2	4.08	3.4	64.15
17	9	Block 1	3.00	3.00	45.00	410.00	7.83	89.29	11.16	6.7	39.73
1	10	Block 1	1.00	1.00	30.00	380.00	1.72	97.53	3.9	4.39	51.2
13	11	Block 1	1.00	1.00	60.00	440.00	19.09	75.82	23.88	12.51	24.26
2	12	Block 1	5.00	1.00	30.00	380.00	3.26	94.58	6.15	4.73	54.86
5	13	Block 1	1.00	1.00	60.00	380.00	5.64	92.36	4.99	3.69	57.26
15	14	Block 1	1.00	5.00	60.00	440.00	22.68	72	30.24	11.88	20.52
19	15	Block 1	3.00	3.00	45.00	410.00	10.54	86.41	9.94	5.62	39.75
8	16	Block 1	5.00	5.00	60.00	380.00	8.41	89.15	8.65	3.12	45.02
12	17	Block 1	5.00	5.00	30.00	440.00	18.18	76.12	18.65	9.52	29.69
11	18	Block 1	1.00	5.00	30.00	440.00	17.03	79.56	17.9	8.35	32.22
16	19	Block 1	5.00	5.00	60.00	440.00	24.27	69.51	31.63	10.77	19.46

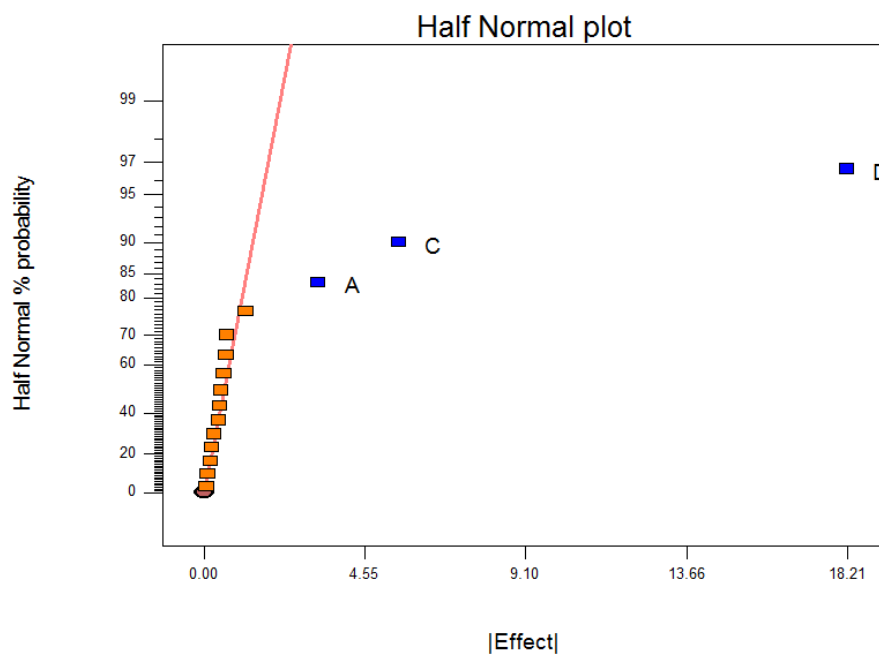
ภาพที่ ข4 ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด

5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรม Design-Expert ยกตัวอย่างเช่น วิเคราะห์ผลของเชื้อเพลิงเหลวโดยยกตัวอย่างข้อมูลของ liquid(Analyzed) ดังภาพที่ ข5 จากนั้นคลิกที่ Effect



ภาพที่ ข5 แถบข้อมูลของ gas liquid kerosene และ diesel

6. ทำการเลือกจุดที่มีผลต่อการทดลองในกราฟ Half Normal %Probability เพื่อให้แนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังภาพที่ ข6 ยกตัวอย่างเช่น



ภาพที่ ข6 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้เนฟทาจากปฏิกิริยาแตกตัวของน้ำมันสตูปุดำ

จากภาพที่ ข6 บ่งบอกว่าปัจจัยใดที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ ความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทา

7. กตที่คำว่า ANOVA ดังภาพที่ ข7 เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณและเป็นการยืนยันผลของ Normal probability

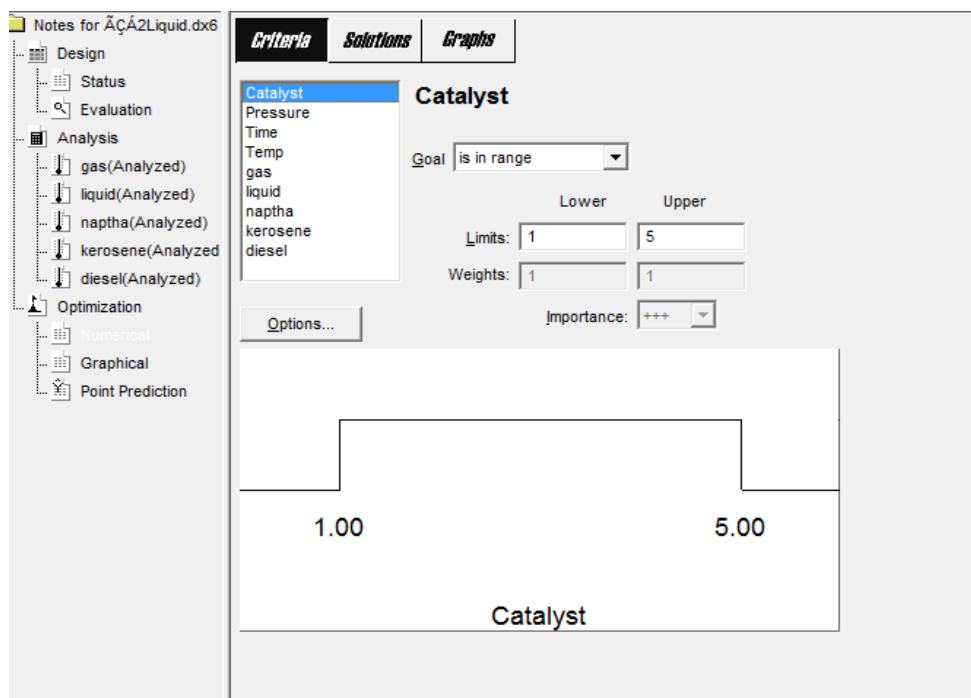
Transform	Effects	ANOVA	Diagnostics	Model Graphs		
Use your mouse to right click on individual cells for definitions.						
Response: liquid						
ANOVA for Selected Factorial Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares]						
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	1489.18	3	496.39	327.23	< 0.0001	significant
A	41.22	1	41.22	27.17	0.0001	
C	121.55	1	121.55	80.13	< 0.0001	
D	1326.42	1	1326.42	874.39	< 0.0001	
Curvature	18.39	1	18.39	12.12	0.0037	significant
Residual	21.24	14	1.52			
Lack of Fit	12.82	12	1.07	0.25	0.9515	not significant
Pure Error	8.41	2	4.21			
Cor Total	1528.81	18				
The Model F-value of 327.23 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.						

ภาพที่ ข7 แสดงการคำนวณผลของ ANOVA

จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert ซึ่งบ่งบอกถึงปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ของปัจจัยนั้น แสดงว่าปัจจัยนั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญ

8. วิเคราะห์ปัจจัยอื่นๆ ตามข้อ 5-7

9. ทำการหาภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง โดยกดที่ numerical --- > พร้อมทั้งกำหนดขอบเขตที่ต้องการในช่อง Limit ดังภาพ ข8



ภาพที่ ข8 ขอบเขตที่ต้องการในการทดลอง

10. กตที่ Solution จะได้สภาวะที่เหมาะสมดังภาพที่ ข9

The screenshot shows the 'Solutions' tab with the following tables:

Constraints

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Catalyst	is in range	1	5	1	1	3
Pressure	is in range	1	5	1	1	3
Time	is in range	30	60	1	1	3
Temp	is in range	380	440	1	1	3
gas	minimize	1.72	24.27	1	1	3
liquid	maximize	69.51	97.53	1	1	3
naptha	maximize	3.9	31.63	1	1	3
kerosene	maximize	2.76	12.51	1	1	3
diesel	maximize	19.46	64.15	1	1	3

Solutions

Number	Catalyst	Pressure	Time	Temp	gas	liquid	naptha	kerosene	diesel	Desirability	Selected
1	1.00	1.00	30.00	410.24	9.25726	88.596	15.8167	7.9268	60.1581	0.543	Selected
2	1.37	1.00	30.00	409.55	9.25629	88.5133	15.5379	7.84826	40.5157	0.542	
3	1.57	1.00	30.00	409.62	9.377	88.3264	15.6838	7.85902	40.4743	0.541	
4	2.05	1.00	30.00	409.03	9.45643	88.1247	15.7056	7.78552	40.7859	0.539	
5	2.15	1.00	30.00	409.37	9.59757	87.9383	15.9043	7.82732	40.6006	0.539	
6	2.24	1.00	30.00	408.61	9.44287	88.0961	15.6429	7.73414	41.0038	0.539	

ภาพที่ ข 9 แสดงภาวะที่เหมาะสมและขอบเขตของการทดลอง

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์

ค.1 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatography)

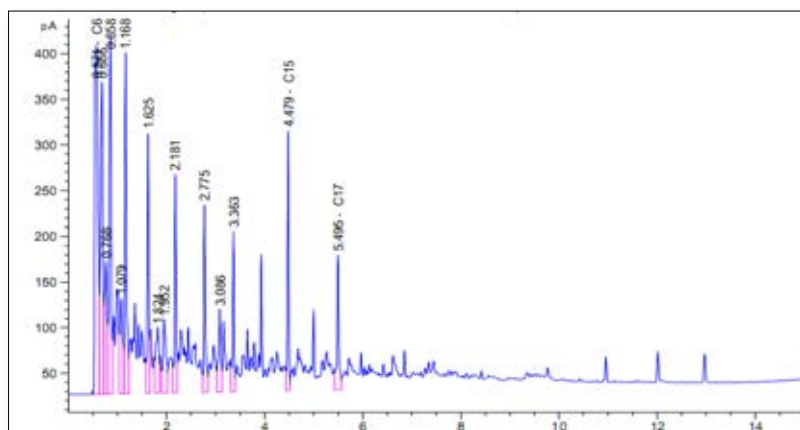
การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatography) โดยใช้หลักการวิเคราะห์หาองค์ประกอบตามคาบจุดเดือด ซึ่งแบ่งเป็นช่วงได้ดังนี้

Initial boiling point (IBP) – 200 °C	=	แนฟทา (Naphtha)
200 °C – 250 °C	=	เคโรซีน (Kerosene)
250 °C – 350 °C	=	แก๊สออยล์เบา (Light Gas Oil)
350 °C – 370 °C	=	แก๊สออยล์ (Gas Oil)
370 °C – Final boiling point (FBP)	=	กากน้ำมันหนัก (Long residue)

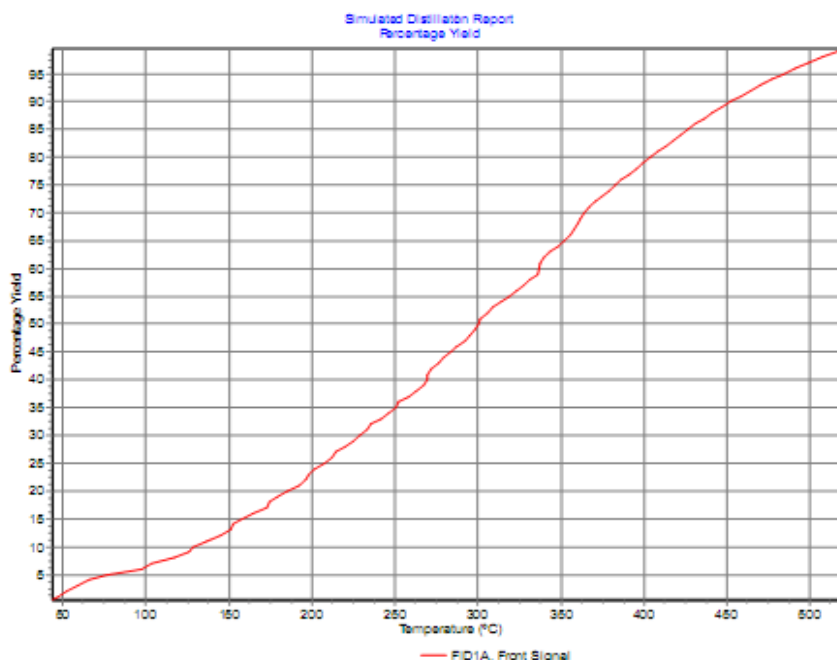
วิธีในการวิเคราะห์ทำโดยเตรียมสารตัวอย่าง ซึ่งจะนำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ไปละลายในสารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS₂) ในอัตรา 1 ส่วนใน 100 ส่วนโดยปริมาตร จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบ ตามมาตรฐาน ASTM D2887 ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น GC7890A ประกอบด้วยดีเทคเตอร์ชนิด FID ใช้ซอฟต์แวร์ Simulated Distillation คอลัมน์ที่ใช้เป็น Capillary column มี stationary phase คือ CP-SIL 5CB ยาว 10 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 530 ไมโครเมตร และความหนาของฟิล์ม 2.65 ไมโครเมตรสภาวะที่ใช้ คือ อุณหภูมิหัวฉีด (Injector Temperature) 298 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคอลัมน์ (Column Temperature or Oven Temperature) 40 - 350 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิดีเทคเตอร์ (Detector Temperature) 375 องศาเซลเซียส โดยมีแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สตัวพาที่อัตราการไหล 6.5 มิลลิลิตรต่อนาทีด้วย split ratio

ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือด

โครมาโทแกรมที่ได้จากการแยกสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี เปลี่ยนเป็นกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือดด้วยโปรแกรม Simulated Distillation โดยจะทำการเทียบกับโครมาโทแกรมของสารมาตรฐานตาม ASTM D2887 (Standard)



ภาพที่ ค1 แสดงโครมาโทแกรมจากการแยกของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



ภาพที่ ค2 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ น้ำมันตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องมือ Simulated Distillation Gas Chromatography

ค.2 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS)

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography – Mass spectrometer, GC-MS) ใช้หาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว โดยมีหลักการคืออาศัยการเปรียบเทียบ Fringerprint ของเลขมวล (Mass Number) ขององค์ประกอบนั้นๆ ที่ตรวจวัดได้กับข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูล สามารถ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี จะทำหน้าที่ในการแยกองค์ประกอบสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้เมื่อถูกความร้อน และส่วนของเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้ตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างโดยอาศัยกลไก คือ โมเลกุลขององค์ประกอบที่ถูกแยกออกมาจากสารตัวอย่างโดยแก๊สโครมาโทกราฟีจะถูกไอออไนซ์ในสภาวะสุญญากาศแล้วตรวจวัดออกมาเป็นเลขมวล เทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิงแล้วแปรผลออกมาเป็นชื่อขององค์ประกอบนั้น ๆ ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ Agilent Technologies รุ่น GC7890A โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ดังนี้

ภาวะในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์

Condition	Value
Carrier gas (He) Flow rate	1.0 ml/min
Interface Temperature	230°C
Ion source Temperature	40°C
Split ratio	1:500
Molecular Weight Scan Range (m/z)	50-700
Solvent cut time	4 min
Injection Temperature	300°C
Inject volume	0.02µL
Column Initial Temperature	90°C
Temperature Program Rate	40°C/15min
Column Final Temperature	280°C

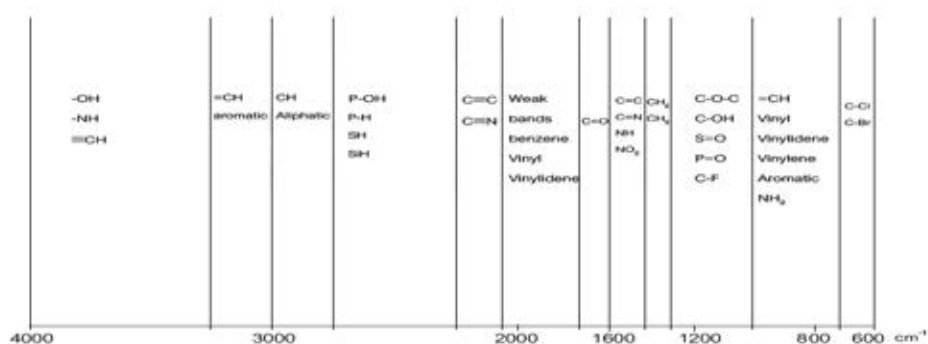
ค.3 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของเชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT – IR)

อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบโมเลกุลของสาร โดยมีหลักการที่เกี่ยวกับการสั่นของโมเลกุลในแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (2.5-25 ไมโครเมตร) ที่มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของสาร ซึ่งสารแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะจึงสามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ที่ความถี่ต่างกัน เมื่อสารได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดจะเกิดการสั่นของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสงแล้วจะวัดแสงที่ส่งผ่านออกมาแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่า infrared Spectrum ในการพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ จะแบ่งการพิจารณาแถบการดูดกลืน Infrared Spectrum ได้เป็น 3 ช่วง คือ

1. ความถี่ 1300 – 1400 cm^{-1} (Functional group regional) เป็นช่วงที่บอกชนิดของหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล หากไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันในช่วงนี้ จะยืนยันได้ว่าไม่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่ในโมเลกุลสารที่สนใจ

2. ความถี่ 910 – 1300 cm^{-1} (Finger print regional) ในช่วงนี้จะมีแถบดูดกลืนที่สลับซับซ้อนมากแถบที่ปรากฏมีลักษณะเฉพาะของโมเลกุลในแต่ละชนิด จึงสามารถที่จะยืนยันได้ว่าสารทั้งสองที่สงสัยนั้นเป็นสารเดียวกันจริงหรือไม่ โดยจะทำการเปรียบเทียบสเปกตรัมของสารในตัวอย่างชนิดเดียวกัน หากปรากฏแถบการดูดกลืนในช่วงนี้เหมือน แสดงว่าสารทั้งสองนั้นเป็นสารตัวเดียวกัน

3. ช่วงความถี่ 650 – 910 cm^{-1} บอกถึงการสารที่มีการจัดตัวของหมู่แทนที่บนวงแหวนสารประกอบแอโรแมติก ซึ่งถ้าไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนในบริเวณนี้ แสดงว่าสารไม่มีองค์ประกอบที่เป็นแอโรแมติก



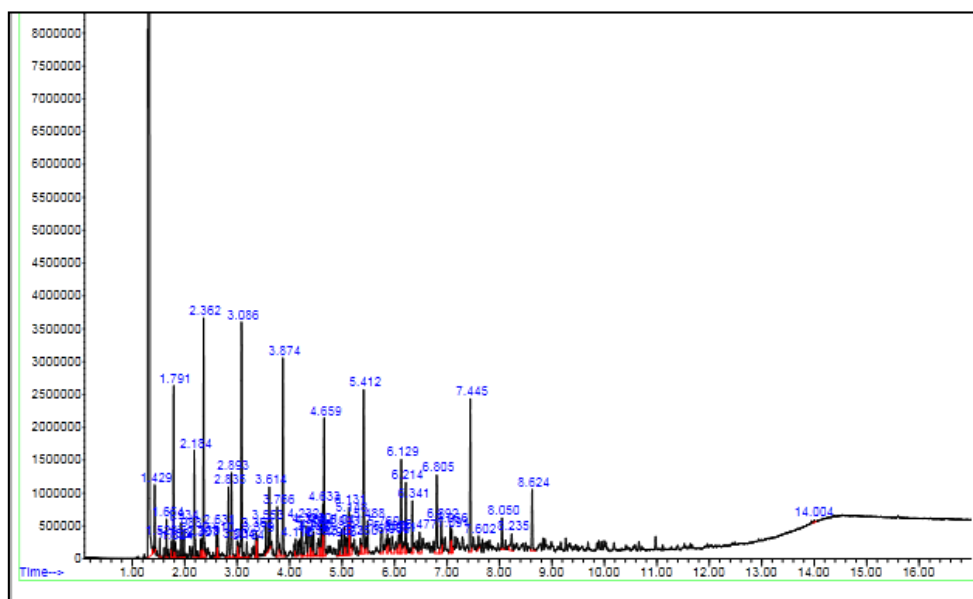
ภาพที่ ค3 แถบการดูดกลืนของ Infrared Spectra ที่ ความยาวคลื่นต่าง

ค.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) เป็นเครื่องวิเคราะห์ที่ใช้หลักการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า เฟสอยู่กับที่ (Stationary phase) และจะมีแก๊สพา (Carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (Detector) และจะส่งสัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับไปบันทึกเป็นโครมาโทแกรมด้วยเครื่องบันทึก (Recorder) งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2014 โดยภาวะที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph)

แก๊สพา (Carrier gas)	แก๊สอาร์กอน (Ar)
ชนิดคอลัมน์	Unibeads C packed
อุณหภูมิการฉีด (Injector temperature)	120 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์	50 ถึง 180 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด (Detector)	ระบบวัดสภาพการนำความร้อน (TCD)



ภาพที่ ค 4 Interpreting spectra ที่ได้จากเครื่อง GC-MS

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชุติมาพร วรรณวงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2530 ที่จังหวัดยโสธร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2553