

การแปรรูปร่วมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CO-
PROCESSING OF USED LUBRICATING OIL AND USED COOKING OIL ON FCC CATALYST

Miss Nattaya Chanhuab



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

ณัฐญา จันทฮวบ : การแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี (CO-PROCESSING OF USED LUBRICATING OIL AND USED COOKING OIL ON FCC CATALYST) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์, 126 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในช่วง 350 ถึง 440 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 30 ถึง 75 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วในช่วงร้อยละ 1 ถึง 5 โดยน้ำหนัก และไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0 9:1 7:3 5:5 3:7 1:9 และ 0:10 โดยออกแบบการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุด นำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่นตามคาบจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887 ภาวะที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ คือ ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 7:3 ซึ่งจะได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวของแข็ง และแก๊สเท่ากับร้อยละ 80.11 2.86 และ 17.03 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวประกอบด้วย แนพทา เคโรซีน แก๊สออยล์ และกากน้ำมัน ซึ่งจะมีปริมาณองค์ประกอบเหล่านี้ในผลิตภัณฑ์เท่ากับร้อยละ 42.66 12.01 13.61 และ 12.01 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะเป็นสารไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะลิฟาติกและแอมโรแมติกที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนอยู่ในช่วงแนพทาจนถึงแก๊สออยล์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีและเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโทรสโคปี โดยผลิตภัณฑ์ของเหลวนี้อาจประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนเท่ากับร้อยละ 82.11 15.26 0.22 และ 2.41 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีค่าความร้อนเท่ากับ 44.953 เมกะจูลต่อกิโลกรัม มีค่าความหนืดเท่ากับ 2.33 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.83 กรัมต่อมิลลิลิตร

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5771973323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: CO-PROCESSING/FCC CATALYST/USED LUBRICATING OIL/USED COOKING OIL

NATTAYA CHANHUAB: CO-PROCESSING OF USED LUBRICATING OIL AND USED COOKING OIL ON FCC CATALYST. ADVISOR: PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., 126 pp.

This research aims to study the parameters which affect to the co-processing of used lubricating oil and used cooking oil on spent FCC catalyst in a microreactor. Several parameters were investigated such as reaction temperature of 350 – 440 °C, reaction time of 30 – 75 minutes, catalyst loading of 0 – 5 percentage by weight (wt%) and ratio by weight of used lubricating oil and used cooking oil (ULO/UCO ratio) of 10:0 9:1 7:3 5:5 3:7 1:9 0:10. Design of experiment was investigated to determine the optimal condition on the maximum yield of liquid product and product distribution according with ASTM D2887. The optimal condition of this catalytic cracking were temperature of 410 °C, reaction time of 45 minutes, 1 wt% of spent FCC catalyst and 7:3 of ULO/UCO ratio, that give the yield of liquid, solid and gas product were 80.11, 2.86 and 17.03 wt%, respectively. The product distribution of liquid product consist of naphtha, kerosene, gas oil and long residue. The percentage of these in product were 42.66, 12.01, 13.61 and 12.01 wt%, respectively. Moreover, the liquid product obtained under the optimal condition was analyzed by using Fourier transform infrared spectroscopy and gas chromatography mass spectrometry. It was found that this product was aliphatic and aromatic hydrocarbon, which the number of carbon atoms in range of naphtha to gas oil. The ultimate analysis of liquid product obtained include 82.11 wt% of carbon, 15.26 wt% of hydrogen, 0.22 wt% of nitrogen and 2.41 wt% of oxygen, respectively. The physical properties of liquid product obtained were similar to those of the commercial fuel such as 44.953 MJ/kg of heating value, 2.33 mm²/s of viscosity and 0.83 g/ml of density.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Chemical Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และแนวทางการแก้ไขปัญหา เพื่อให้สามารถดำเนินงานวิจัยให้มีความสมบูรณ์และสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธारा ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิซากร จารุศิริ คณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่กรุณาให้ความรู้ ความคิดเห็น และคำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบริษัท อีซูซูพระนคร จำกัด สาขาบางปู จังหวัดสมุทรปราการ ที่อนุเคราะห์น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วสำหรับใช้ในงานวิจัย และร้านอาหารปุกโภชนา จังหวัดสมุทรปราการ ที่อนุเคราะห์น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วสำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบริษัท ไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิดซ์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีสำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรทั้งในภาควิชาเคมีเทคนิค และศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานชีวมวล ณ โครงการพัฒนาที่ดินของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และเป็นกำลังใจที่ดีในการดำเนินงานวิจัยและการจัดทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ที่อบรมสั่งสอน ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา คำแนะนำ ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆด้านเสมอมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบแต่บิดามารดาผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ครูอาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และผู้มีพระคุณที่มีได้กล่าวนาม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ปีโตรเลียม.....	6
2.2 น้ำมันหล่อลื่น.....	9
2.3 พลังงานจากชีวมวล.....	18
2.4 เชื้อเพลิงชีวภาพ.....	23
2.5 น้ำมันปรุงอาหาร.....	24
2.6 การแตกตัวด้วยความร้อน	30
2.7 การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา	31
2.8 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม.....	36
2.9 การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง	37
2.10 ตัวเร่งปฏิกิริยา	37

2.11 ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิดซ์	43
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	49
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	54
3.1 เครื่องปฏิกรณ์และส่วนประกอบ	54
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	55
3.3 สารตั้งต้นและสารเคมี	56
3.4 เครื่องมือวิเคราะห์	57
3.5 วิธีการทดลอง.....	61
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	65
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น	65
4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	69
4.3 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมัน ปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	72
4.4 การเปรียบเทียบผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ใช้แล้วที่มีต่อผลิตภัณฑ์ของเหลว	82
4.5 การวิเคราะห์หาชนิดองค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโท กราฟแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	85
4.6 หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรส โคปี	87
4.7 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ของเหลว.....	88
4.8 ผลการทดลองและงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน.....	90
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	93
5.1 สรุปผลการทดลอง	93
5.2 ข้อเสนอแนะ	94

รายการอ้างอิง	95
ภาคผนวก.....	102
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	126



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	โครงสร้าง สูตรโมเลกุล และชนิดของกรดไขมันที่พบในน้ำมันพืช	26
ตารางที่ 2.2	องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ.....	27
ตารางที่ 2.3	สมบัติของน้ำมันพืช.....	28
ตารางที่ 2.4	สมบัติและการประยุกต์ใช้ของซีโอไลต์สังเคราะห์	47
ตารางที่ 4.1	องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วก่อนการแตกตัว ...	65
ตารางที่ 4.2	องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว	66
ตารางที่ 4.3	สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว.....	67
ตารางที่ 4.4	องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	69
ตารางที่ 4.5	พื้นที่ผิวรูพรุน ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส.....	71
ตารางที่ 4.6	องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปร่วมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	86
ตารางที่ 4.7	สมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ของเหลว น้ำมันแก๊โซลีน และน้ำมันดีเซล	88
ตารางที่ 4.8	การแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันชนิดต่างๆจากงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน.....	91
ตารางที่ 4.9	การแปรรูปร่วมผ่านปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันชนิดต่างๆจากงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน	92

สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างพาราฟินที่มีแขนตรง	7
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างไอโซพาราฟินและพาราฟินแบบกิ่ง	7
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแนฟทีน	7
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างแอรอแมติก	8
รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น	11
รูปที่ 2.6 กระบวนการทางเคมีความร้อนและผลิตภัณฑ์	20
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์	25
รูปที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัว	25
รูปที่ 2.9 ลำดับเสถียรภาพของคาร์บีเนียมไอออน	32
รูปที่ 2.10 ปฏิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิริยา	35
รูปที่ 2.11 พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิริยาที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิริยา	38
รูปที่ 2.12 ภาพจำลองขั้นตอนการเร่งปฏิริยาของตัวเร่งปฏิริยาวิวิธพันธุ์ที่มีตัวรองรับ	41
รูปที่ 2.13 การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างสารตั้งต้นของซีโอไลต์ในการแตกตัวเฮพเทนผสม	45
รูปที่ 2.14 การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างผลิตภัณฑ์ของซีโอไลต์ในปฏิริยาเมทิลเลชันของโทลูอีน	46
รูปที่ 2.15 การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างสภาวะแทรกซันของซีโอไลต์ในปฏิริยาดิสพรอพอร์ ชันเนชันของเมตาไซลีน	46
รูปที่ 2.16 โครงร่างผลึกของซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์ วาย และแซดเอสเอ็ม-ไฟว์	48
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก	54
รูปที่ 3.2 ชุดทดลองที่ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและอุปกรณ์ ควบคุมการแกว่งเครื่องปฏิกรณ์	55
รูปที่ 3.3 ชุดกรองสูญญากาศ	55
รูปที่ 3.4 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว	56
รูปที่ 3.5 น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว	56

รูปที่ 3.6	ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	57
รูปที่ 3.7	เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน	57
รูปที่ 3.8	เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์.....	58
รูปที่ 3.9	เครื่องวัดความหนืด.....	58
รูปที่ 3.10	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น.....	59
รูปที่ 3.11	เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรมิเตอร์.....	59
รูปที่ 3.12	เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์.....	60
รูปที่ 3.13	เครื่องวัดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	60
รูปที่ 3.14	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปกโทรมิเตอร์	61
รูปที่ 3.15	เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์	61
รูปที่ 4.1	รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนเผา (a) หลังเผา (b) และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดวาย (c).....	70
รูปที่ 4.2	ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และแก๊ส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0	73
รูปที่ 4.3	การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0.....	73
รูปที่ 4.4	ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และแก๊ส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0	75
รูปที่ 4.5	การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0.....	75

รูปที่ 4.6 ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และแก๊ส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0.....	77
รูปที่ 4.7 การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0.....	77
รูปที่ 4.8 ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และแก๊ส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....	79
รูปที่ 4.9 การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก.....	80
รูปที่ 4.10 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส	82
รูปที่ 4.11 ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว และจากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วในอัตราส่วน 7:3	83
รูปที่ 4.12 การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วผสมกับผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว และผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วในอัตราส่วน 7:3.....	83
รูปที่ 4.13 โครมาโทแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปกโตรมิเตอร์	85

รูปที่ 4.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของผลิตภัณฑ์ของเหลวได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี 87



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการพลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียมของโลกเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของประชากร การใช้พลังงานที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเติบโตทางเศรษฐกิจ และการพัฒนาด้านเทคโนโลยี ส่งผลให้ปริมาณน้ำมันสำรองของโลกลดลง ประกอบกับแหล่งน้ำมันปิโตรเลียมมีอยู่อย่างจำกัดและอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้พลังงานซึ่งอาจเกิดวิกฤตการณ์ขาดแคลนพลังงานในอนาคตได้ ในขณะที่เดียวกับการใช้น้ำมันปิโตรเลียมจะก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศเป็นสาเหตุให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) นอกจากนี้พบว่าในปี ค.ศ. 2014 ประเทศไทยมีอัตราการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของทั้งอุปสงค์ภายในประเทศและภายนอกประเทศ ส่งผลให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น โดยการใช้พลังงานจะเพิ่มขึ้นมากที่สุดในภาคอุตสาหกรรม รองลงมาคือ ภาคการขนส่ง ภาคครัวเรือน ภาคธุรกิจการค้า และภาคเกษตรกรรม ตามลำดับ และการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นนี้ย่อมส่งผลกระทบต่อความมั่นคงด้านพลังงาน (Energy security) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้รัฐบาลกำหนดนโยบายการพัฒนาพลังงานทดแทน [1] โดยมีเป้าหมายให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นในทุกภาคส่วนของสังคม ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) แล้ว ยังเป็นการลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศอีกด้วย และจะมีส่วนช่วยส่งเสริมการแก้ไขปัญหาการพัฒนาพลังงานของประเทศให้เป็นไปอย่างยั่งยืนได้มากขึ้น เนื่องจากการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศไทยในปัจจุบัน จะใช้พลังงานที่ผลิตภายในประเทศเป็นหลัก เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานแสงอาทิตย์ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งสามารถผลิตได้จากชีวมวลที่มีศักยภาพ หรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร รวมทั้งของเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรมและครัวเรือน เช่น น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว เป็นต้น

น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating oil) [2] เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base oil) และสารเพิ่มคุณภาพ (Additives) โดยทั่วไปจะนำไปใช้หล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลที่มีลักษณะปิด เช่น ภายในห้องเพลลา ข้อเหวี่ยง ห้องเกียร์ และเฟืองท้าย เป็นต้น รวมถึงจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมและกิจกรรมอื่นๆ ทำให้เกิดน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นจำนวนมากกว่า 230 ล้านลิตรต่อปี เมื่อน้ำมันหล่อลื่นถูกใช้

งานไปเรื่อยๆจะทำให้คุณสมบัติของสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนไปและเกิดการเสื่อมสภาพทำให้กลายเป็นของเสีย น้ำมันหล่อลื่นที่เสื่อมสภาพเหล่านี้บางส่วนจะถูกนำไปบำบัดหรือรีไซเคิล แต่บางส่วนอาจถูกปล่อยออกสู่ธรรมชาติโดยไม่ผ่านการบำบัดก่อน หรืออาจถูกกำจัดด้วยวิธีการที่ไม่ถูกต้อง [3] เช่น การทิ้งน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วลงในน้ำสาธารณะหรือแหล่งน้ำ ซึ่งเป็นการทำลายระบบนิเวศน์วิทยาในแหล่งน้ำ เพราะน้ำมันจะลอยตัวและรวมตัวกันบนผิวน้ำกั้นไม่ให้ออกซิเจนและแสงอาทิตย์ผ่านไปได้ เป็นการทำลายแหล่งอาหาร แหล่งการวางไข่ของสัตว์น้ำ และทำลายทัศนียภาพที่ดี การเก็บหรือทิ้งน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในภาชนะบรรจุอย่างไม่ถูกวิธี ซึ่งทำให้น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเกิดการรั่วไหลลงดิน ส่งผลให้พื้นดินบริเวณนั้นไม่เหมาะสมแก่การเพาะปลูก และถ้าน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วซึมลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินจะทำให้น้ำมีกลิ่นเหม็นและเกิดการปนเปื้อนของสารไฮโดรคาร์บอนและโลหะหนักจึงไม่เหมาะแก่การอุปโภคและบริโภค และการเผาใช้น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วซึ่งทำให้เกิดไอ ควันทันที่มีโลหะหนัก และออกไซด์ของโลหะฟุ้งกระจายออกสู่บรรยากาศก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีความพยายามในการจัดการน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยการนำมาแปรรูปให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีคุณค่าและนำกลับมาใช้ได้อีก ในขณะที่น้ำมันปรุงอาหาร (Cooking oil) [4] ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ น้ำมันพืช (Vegetable oil) และน้ำมันสัตว์ (Animal oil) โดยทั่วไปจะถูกใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและการบริโภคในครัวเรือนเมื่อน้ำมันปรุงอาหารถูกใช้แล้วก็จัดว่าเป็นของเสียประเภทหนึ่ง ในปัจจุบันผู้บริโภคส่วนใหญ่จะนำน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วกลับมาใช้ซ้ำหลายครั้งในการประกอบอาหารโดยไม่ผ่านการบำบัดก่อน ซึ่งจะเพิ่มโอกาสเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็ง รวมทั้งผู้ประกอบการบางรายนำน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วมากรองและฟอกสีก่อนนำไปจำหน่ายอีกครั้ง ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค นอกจากนั้นการกำจัดน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยวิธีการที่ไม่เหมาะสมก็จะส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมได้ เช่น การเทน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วลงในแหล่งน้ำจะทำให้ไขมันเกาะรวมตัวกันทำให้ท่อน้ำอุดตันได้ หรือการทิ้งน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วลงในแหล่งน้ำจะทำให้ออกซิเจนสำหรับสัตว์และพืชน้ำลดลง และเกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ เป็นต้น ดังนั้นวิธีการกำจัดน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วที่ดีคือการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงให้เกิดการเพิ่มมูลค่าไปพร้อมกับการช่วยขจัดของเสียอีกทางหนึ่งด้วย

หนึ่งในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel) ที่มีความน่าสนใจ คือ กระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว กระบวนการนี้สามารถนำน้ำมันใช้แล้วมาแปรรูปรวมกันโดยไม่ต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพก่อน ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนและลดพลังงานในการดำเนินการ [5] แนวทางนี้มีข้อดีเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวแบบดั้งเดิม คือ จะได้ผลิตภัณฑ์ในช่วงกว้าง เช่น แก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied petroleum gas, LPG) น้ำมันแก๊ซอลีน (Gasoline) น้ำมันดีเซล (Diesel) น้ำมันก๊าดหรือเคโรซีน (Kerosene) น้ำมันเครื่องบิน

(Jet fuel) เป็นต้น นอกจากนั้นกระบวนการแปรรูปรวมนี้อาจยังสามารถลดการพึ่งพาการใช้ น้ำมันปิโตรเลียม ช่วยลดปริมาณของเสียไปพร้อมกับการปรับปรุงคุณภาพของเชื้อเพลิงเหลว ทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดของเสียและช่วยแก้ปัญหาภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

ในปัจจุบันมีหลายวิธีที่ใช้สำหรับกระบวนการแปรรูปรวม [6] เช่น การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) และการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking) โดยกระบวนการที่มีการใช้ไฮโดรเจนร่วมจะมีราคาสูงและใช้พลังงานมากกว่ากระบวนการแตกตัวแบบอื่นๆ ส่วนการแตกตัวด้วยความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีปริมาณสารประกอบที่มีออกซิเจนอยู่ในโมเลกุล (Oxygenated compound) ปริมาณมาก จึงเป็นสาเหตุที่ลดความน่าสนใจในการใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการขนส่ง (Transportation fuel) ในทางตรงกันข้าม การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดได้รวดเร็วและได้น้ำมันที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนที่มีความเจือจางมากกว่าการแตกตัวด้วยความร้อน และจะทำให้ได้ร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์หนักในปริมาณน้อย รวมทั้งจะทำให้ได้ร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของเหลวในปริมาณมาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีปริมาณออกซิเจนและความหนืดต่ำ ซึ่งเหมาะใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการขนส่ง โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิดหรือตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี (Fluid catalytic cracking catalyst) [7] ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalyst) ประเภทที่นิยมใช้อย่างหลากหลายในอุตสาหกรรม มีความจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ (Product selectivity) สามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย และถูกนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีเป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 60 ถึง 80 ไมโครเมตร ซึ่งในปัจจุบันตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีจะประกอบด้วย 4 องค์ประกอบหลัก คือ ซีโอไลต์ (Zeolite) เมทริกซ์ (Matrix) สารเติม (Filler) และตัวประสาน (Binder) นอกจากนั้นในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาจะแสดงความสามารถในการกำจัดสารประกอบที่มีออกซิเจนอยู่ในโมเลกุล โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของน้ำ (H_2O) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ปราศจากออกซิเจน (Free oxygen) ซึ่งจะช่วยให้ปรับปรุงสมบัติของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ เช่น ทำให้ค่าความร้อน (Heating value) ของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้สูงขึ้น

งานวิจัยนี้จะนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วมาเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการแปรรูปรวมบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการแปรรูปรวม ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว ทำการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (Microreactor) พร้อมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว

1.2.2 ศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการ

1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1.3.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.2 จัดเตรียมน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยา อุปกรณ์และสารเคมีที่จำเป็นในการดำเนินงานวิจัย

1.3.3 วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

- วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วก่อนทำการทดลองด้วยเครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric Analyzer, TGA)

- วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น เพื่อทราบการกระจายองค์ประกอบน้ำมันตามคาบจุดเดือดต่างๆ (Distillation gas chromatography, DGC): ASTM D2887

- วิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (Fatty acid composition)

- วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis): ASTM D3176

- วิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating value): ASTM D2015

- วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความหนืด (Viscosity): ASTM D445 และค่าความหนาแน่น (Density): ASTM D1298

1.3.4 วิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

- วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray fluorescence spectroscopy, XRF)

- วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray diffraction, XRD)

- วิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน

1.3.5 ออกแบบการทดลองโดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ

- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 350 ถึง 440 องศาเซลเซียส
- ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 30 ถึง 75 นาที
- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วอยู่ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 5 โดยน้ำหนัก และไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา
- อัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0 9:1 7:3 5:5 3:7 1:9 และ 0:10

1.3.6 วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้

- วิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น (Distillation gas chromatography, DGC): ASTM D2887
- วิเคราะห์หาชนิดองค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas chromatograph-mass spectrometer, GC-MS)
- วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)
- วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis): ASTM D3176
- วิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating value): ASTM D2015
- วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลว ได้แก่ ค่าความหนืด (Viscosity): ASTM D445 และค่าความหนาแน่น (Density): ASTM D1298

1.3.7 วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas chromatography, GC)

1.3.8 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปิโตรเลียม

ปิโตรเลียม [8] กำเนิดมาจากสิ่งมีชีวิตที่ดำรงชีวิตอยู่เมื่อหลายร้อยล้านปีก่อน ซึ่งอยู่กระจัดกระจายทั่วไปทั้งบนบกและในทะเล เมื่อสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ตายลงจะเน่าเปื่อยผุพังและย่อยสลายโดยมีบางส่วนสะสมรวมตัวอยู่กับตะกอนดินเลนในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เมื่อผิวโลกเกิดการเปลี่ยนแปลงในเวลาต่อมาส่วนของชั้นตะกอนนี้จะจมตัวลงเรื่อยๆพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์จนกลายเป็นปิโตรเลียมในท้ายที่สุด

ปิโตรเลียม เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด คือ คาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) โดยอาจมีธาตุโลหะชนิดอื่น เช่น ออกซิเจน (O) กำมะถัน (S) ไนโตรเจน (N) ปนอยู่ด้วย ปิโตรเลียมแบ่งตามสถานะได้ 2 ชนิด คือ ปิโตรเลียมที่มีสถานะเป็นของเหลว เรียกว่า น้ำมันดิบ (Crude oil) และปิโตรเลียมที่มีสถานะเป็นแก๊ส เรียกว่า แก๊สธรรมชาติ (Natural gas)

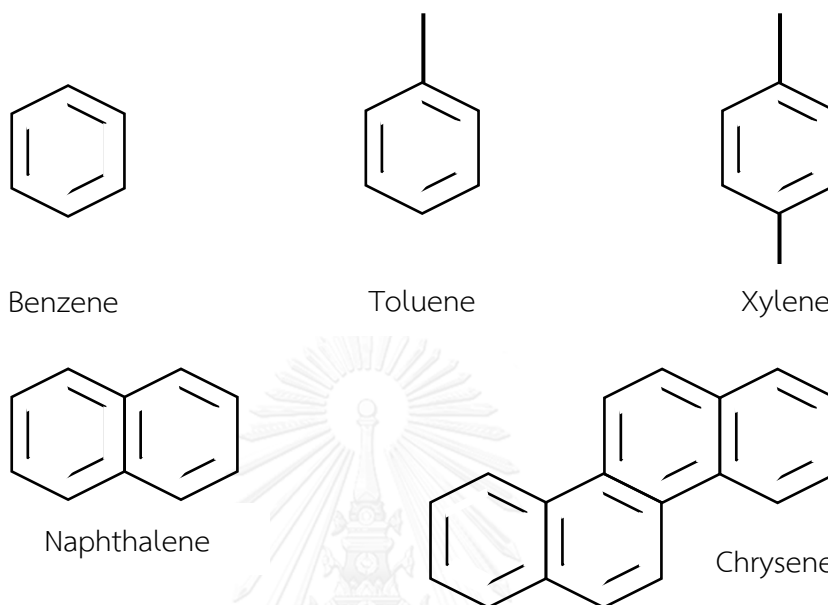
2.1.1 น้ำมันดิบ

น้ำมันดิบ [9] เป็นสารผสมที่มีความซับซ้อน มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนประเภทต่างๆ ตั้งแต่โมเลกุลขนาดเล็กจนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำมันดิบแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ พาราฟิน (Paraffins or alkanes) แนฟทีน (Naphthenes or cyclo alkanes) และแอโรแมติก (Aromatic) นอกจากนี้ยังมีสารเจือปน (Impurity) ที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น สารประกอบออกซิเจน สารประกอบกำมะถัน สารประกอบไนโตรเจน และสารประกอบโลหะเป็นองค์ประกอบอีกหลายชนิด

พาราฟิน เป็นสารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (Saturated hydrocarbon) มีสูตรทางเคมีเป็น C_nH_{2n+2} โดย n เป็นจำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุล แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- พาราฟินที่มีแขนตรง (n-paraffins) สามารถแยกสารไฮโดรคาร์บอนประเภทนี้ตั้งแต่ C_1 ถึง C_{33} ออกจากน้ำมันดิบ พาราฟินที่มีแขนตรงมีอยู่ค่อนข้างมากในช่วง C_{12} ถึง C_{15} ซึ่งเป็นช่วงของน้ำมันก๊าด และในช่วง C_{15} ถึง C_{18} ซึ่งเป็นช่วงของน้ำมันดีเซล ดังแสดงในรูปที่ 2.1

แอโรแมติก เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีวงของคาร์บอน 6 อะตอมยึดต่อกันด้วยพันธะคู่และพันธะเดี่ยวสลับกัน อาจมีวงแหวนหนึ่งวงหรือมากกว่าก็ได้ มักพบในส่วนกลั่นหนัก เช่น น้ำมันแก๊สออยล์ (Gas oil) น้ำมันหล่อลื่น และกากน้ำมัน (Long residue) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างแอโรแมติก

2.1.2 แก๊สธรรมชาติ

แก๊สธรรมชาติ [10] เป็นสารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว สามารถผลิตได้จาก 2 แหล่ง คือ แก๊สธรรมชาติที่ผลิตได้จากแหล่งแก๊สใต้ดิน (Non-associated gas) และแก๊สธรรมชาติที่ติดมากับน้ำมันดิบจากหลุมน้ำมันดิบ (Associated gas) ในแหล่งแก๊สธรรมชาตินั้นอาจพบแก๊สธรรมชาติที่มีสถานะแก๊ส (Gas phase) ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนชนิดเบา คือ มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 1 ถึง 4 อะตอม (C_1 - C_4) หรือมีสถานะของเหลว (Liquid phase) ที่ปะปนอยู่กับแก๊ส เนื่องจากมีส่วนประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนชนิดหนัก คือ มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 5 อะตอม (C_5) ขึ้นไป ทั้งนี้สถานะของแก๊สธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน โดยทั่วไปแล้วแก๊สธรรมชาติจะประกอบด้วยมีเทนตั้งแต่ร้อยละ 70 ขึ้นไป และอาจมีสารอื่นปนอยู่บ้าง เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แก๊สไนโตรเจน (N_2) และน้ำ ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของแหล่งแก๊สธรรมชาติแต่ละแหล่ง ซึ่งแก๊สธรรมชาติที่ประกอบด้วยมีเทนและอีเทนเกือบทั้งหมดจะเรียกว่า แก๊สแห้ง (Dry gas) ในขณะที่แก๊สธรรมชาติที่ประกอบด้วยโพรเพน บิวเทน และสารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นของเหลว เช่น เพนเทน เฮกเซน ฯลฯ ในปริมาณที่ค่อนข้างสูงจะเรียกว่า แก๊สชื้น (Wet gas) โดยในการแยกแก๊สธรรมชาตินั้นจะนำแก๊สธรรมชาติที่พบในสถานะ

แก๊สมาทำการกำจัดสารประกอบหรือสารปนเปื้อนที่ไม่ต้องการออกก่อนจะส่งเข้าโรงแยกแก๊ส ในขณะที่แก๊สธรรมชาติที่พบในสถานะของเหลวจะต้องผ่านการแยกสารไฮโดรคาร์บอนชนิดหนัก คือ มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 20 อะตอม (C_{20}) ขึ้นไปออกก่อน โดยอาศัยการควบแน่น (Condense) ซึ่งของเหลวที่ได้จากกระบวนการนี้จะเรียกว่า คอนเดนเสท (Condensate) สามารถนำไปกลั่นเป็นน้ำมันสำเร็จรูปต่อไป อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีการแยกคอนเดนเสทออกแล้ว แต่ก็ยังมีสารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นของเหลวบางส่วนหลุดไปกับสารไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะแก๊ส และเมื่อผ่านกระบวนการแยกจากโรงแยกแก๊สธรรมชาติแล้ว สารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นของเหลวนี้ก็จะถูกแยกออกเรียกว่า แก๊สลิโนธรรมชาติ (Natural gasoline) หรือ NGL ซึ่งแก๊สลิโนธรรมชาตินี้ประกอบด้วย เพนเทน เฮกเซน และสารประกอบตัวอื่น ๆ ที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนผสมตั้งแต่ 5 อะตอมขึ้นไป ซึ่งจะถูกส่งเข้าโรงกลั่นน้ำมันเพื่อกลั่นเป็นน้ำมันเบนซิน (Motor Gasoline) รวมทั้งจะแยกส่งให้กับโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเป็นวัตถุดิบสำหรับเป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมบางประเภท นอกจากนี้เมื่อนำเอาโพรเพนกับบิวเทนมาผสมกันแล้วอัดใส่ถังโดยการเพิ่มความดันหรือลดอุณหภูมิให้ต่ำเพียงพอ แก๊สทั้งสองก็จะเปลี่ยนสถานะจากแก๊สเป็นของเหลวแล้วบรรจุลงในถังเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้มในครัวเรือน หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์และโรงงานอุตสาหกรรม

2.2 น้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่น [2, 11] หรืออาจเรียกทั่วไปว่า น้ำมันเครื่อง เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม มีลักษณะเป็นของเหลว โดยทั่วไปจะนำไปใช้หล่อลื่นชิ้นส่วนต่างๆที่เคลื่อนไหวยภายในเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลที่มีลักษณะปิด เช่น ลูกสูบ เพลาข้อเหวี่ยง เพลาลูกเบี้ยว เพื่อถ่ายเป็นต้น รวมถึงจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมและกิจกรรมอื่นๆ น้ำมันหล่อลื่นประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base oil) และสารเพิ่มคุณภาพ (Additives)

2.2.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีใช้ในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ น้ำมันจากพืชหรือสัตว์ (Vegetable or animal oil) น้ำมันแร่ (Mineral oil) และน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic oil) โดยน้ำมันจากพืชหรือสัตว์จะถูกนำใช้งานน้อยมากแม้ว่าราคาจะถูก เนื่องจากมีเสถียรภาพทางเคมีต่ำและเสื่อมสภาพง่าย ในขณะที่ส่วนใหญ่จะนิยมใช้น้ำมันแร่มาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป เนื่องจากมีคุณภาพดีและราคาถูก ส่วนน้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมี สามารถนำไปใช้งานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ แต่มีราคาสูง ซึ่งในปัจจุบันนั้นมีความนิยมใช้มากขึ้น

2.2.1.1 น้ำมันจากพืชหรือสัตว์

น้ำมันพื้นฐานประเภทนี้สกัดได้จากพืชหรือสัตว์ โดยน้ำมันพืชที่นิยมใช้ ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันละหุ่ง เป็นต้น ส่วนน้ำมันสัตว์ที่นิยมใช้ ได้แก่ น้ำมันหมู น้ำมันปลา เป็นต้น น้ำมันจากพืชหรือสัตว์นี้มีราคาจะถูก แต่มีเสถียรภาพทางเคมีต่ำและเสื่อมสภาพง่ายขณะใช้งาน จึงต้องนำไปผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ทำให้เกิดการเพิ่มค่าใช้จ่ายและส่งผลให้มีราคาสูงขึ้น ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานแต่จะนำมาใช้เป็นสารเพิ่มคุณภาพ เพื่อใช้สำหรับงานหล่อลื่นที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางประการ เช่น ใช้เพิ่มความลื่น และเพิ่มความสามารถในการรวมตัวกับน้ำ เป็นต้น

2.2.1.2 น้ำมันแร่

น้ำมันพื้นฐานประเภทนี้ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำเอาส่วนที่อยู่ก้นหอกลั่นบรรยากาศ (Atmospheric tower) จากการกลั่นน้ำมันดิบเข้าไปกลั่นอีกครั้งหนึ่งในหอกลั่นสุญญากาศ (Vacuum tower) เพื่อแยกส่วนที่เหลือจากหอกลั่นบรรยากาศออกเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆตามช่วงจุดเดือด (Boiling point) หลังจากที่น้ำมันออกจากหอกลั่นสุญญากาศแล้วก็จะนำไปผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อแยกส่วนที่ไม่ต้องการออกให้เหลือผลิตภัณฑ์หรือน้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติตามต้องการ และเพื่อให้มีความอยู่ตัวทางเคมีและความร้อนที่ดีขึ้น ตัวอย่างของกระบวนการเหล่านี้ได้แก่ กระบวนการแยกยางมะตอยออกโดยใช้โพรเพนเป็นสารละลาย (Propane deasphalting) กระบวนการแยกเอาสารประกอบแอโรแมติก (Aromatic compounds) ออกจากสารประกอบที่ไม่ใช่แอโรแมติก (Nonaromatic compound) โดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น ได้แก่ การเพิ่มเสถียรภาพในด้านความร้อนและการรวมตัวกับออกซิเจน และเพิ่มดัชนีความหนืด (Viscosity index) กระบวนการในลำดับต่อไปคือ กระบวนการแยกเอาไขออก (Dewaxing) เพื่อลดจุดไหลเทให้ต่ำลง ทำให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ และกระบวนการสุดท้ายคือ การเติมไฮโดรเจน (Hydrofinishing) เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดสีและสารที่ไม่เสถียรทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีสีจางลง และช่วยเพิ่มคุณสมบัติบางประการ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 น้ำมันแร่ที่นำมาใช้ทำน้ำมันหล่อลื่นสามารถแบ่งตามดัชนีความหนืดได้ 3 ประเภทคือ ประเภทที่มีดัชนีความหนืดสูง กลาง และต่ำ ซึ่งน้ำมันแร่ที่มีดัชนีความหนืดสูงได้มาจากการกลั่นน้ำมันดิบประเภทพาราฟิน ส่วนน้ำมันแร่ที่มีดัชนีความหนืดปานกลางและต่ำได้มาจากน้ำมันประเภทแนฟทีน โดยน้ำมันพื้นฐานชนิดนี้ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีคุณภาพดีและราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันพื้นฐานประเภทอื่น

ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเฉพาะอย่าง ซึ่งสามารถแบ่งตามผลที่มีต่อ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานได้เป็น 3 ประเภท คือ

- 1) เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ให้คุณสมบัติใหม่ที่เป็นประโยชน์ต่อน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน
- 2) เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ปรับปรุงคุณสมบัติเดิมของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานให้ดีขึ้น
- 3) เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในขณะทำงาน สำหรับสารเพิ่มสารคุณภาพที่นิยมใช้ มีดังนี้

2.2.2.1 สารลดจุดไหลเท (Pour point depressants)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ใช้ในการยับยั้งการเกิดผลึกไขที่ให้น้ำมันไม่สามารถไหลได้ที่ อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นสารนี้จึงช่วยให้จุดไหลเทของน้ำมันหล่อลื่นต่ำลง ทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำๆได้ โดยทั่วไปเมื่อเติมสารนี้ลงในน้ำมันหล่อลื่นแล้วจะช่วยลดอุณหภูมิของจุดไหลเทลงประมาณ 11 ถึง 17 องศาเซลเซียส สำหรับสารที่ใช้เป็นลดจุดไหลเทจะเป็นพวกพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น พอลิเมทาคริเลต (Polymethacrylates) ทำหน้าที่ตกผลึกร่วมกับไขเพื่อป้องกันไม่ให้ผลึกเติบโต และอัลคิลแอโรแมติกพอลิเมอร์ (Alkylaromatic polymers) ทำหน้าที่ในการดูดกลืนผลึกของไขเมื่อเกิดขึ้นเพื่อป้องกันไม่ให้ผลึกเติบโตและยึดติดกัน

2.2.2.2 สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity index improvers)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยไม่ให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงมากเมื่อ อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืดจะเป็นพวกพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาว (Long chain) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเพิ่มความหนืดสัมพัทธ์ของ น้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากพอลิเมอร์ดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้โมเลกุลเกิดการยืดออกและมีปฏิกิริยากันระหว่างโมเลกุล ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารเพิ่มค่าดัชนีความหนืดมีหลายตัว เช่น เมทาคริเลตพอลิเมอร์ (Methacrylate polymers) อะคริเลตพอลิเมอร์ (Acrylate polymers) เป็นต้น

2.2.2.3 สารป้องกันการเกิดฟอง (Defoamants)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำมันหล่อลื่นเกิดฟองอากาศในขณะ ทำหน้าที่หล่อลื่นชิ้นส่วนเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกล เนื่องจากภายในฟองอากาศจะมีอากาศซึ่งมีส่วนประกอบของออกซิเจนอยู่ และเมื่อฟองอากาศดังกล่าวแตกตัวในขณะที่สัมผัสกับพื้นผิวของ ชิ้นส่วนเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดออกซิเดชันขึ้นในบริเวณ ดังกล่าว ดังนั้นเมื่อใส่สารป้องกันการเกิดฟองจะส่งผลให้โมเลกุลของสารเข้าไปติดกับฟองอากาศทำให้ ฟองอากาศเล็กๆรวมตัวกันเป็นฟองอากาศที่ใหญ่ขึ้น และลอยขึ้นที่บริเวณผิวจนแตกออกในที่สุด สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารป้องกันการเกิดฟอง คือ ซิลิโคนพอลิเมอร์ (Silicone polymer) และพวก พอลิเมอร์อินทรีย์ (Organic polymer)

2.2.2.4 สารป้องกันออกซิเดชัน (Oxidation inhibitors)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยลดตะกอนเมื่อความหนืดและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเกิดออกซิเดชัน โดยออกซิเดชันจะเกิดได้เมื่อน้ำมันหล่อลื่นได้รับความร้อนและสัมผัสกับอากาศจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันหล่อลื่นและออกซิเจนในอากาศ ส่งผลให้ความหนืดและความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารป้องกันออกซิเดชัน คือ สังกะสีไดไทโอฟอสเฟต (Zinc dithiophosphate)

2.2.2.5 สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion inhibitors)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยในการปกป้องพื้นผิวของชิ้นส่วนเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลที่ต้องการหล่อลื่นจากการถูกกัดกร่อน โดยการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในระบบหล่อลื่นโดยน้ำมันหล่อลื่นนั้นมีหลายชนิด เช่น การกัดกร่อนซึ่งเกิดจากกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในตัวของน้ำมันเอง และการกัดกร่อนจากสารปนเปื้อนที่ถูกนำและพาไปโดยน้ำมัน สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารป้องกันการกัดกร่อน คือ สังกะสีไดไทโอฟอสเฟต และสารที่มีซัลเฟอร์และฟอสฟอรัส

2.2.2.6 สารป้องกันสนิม (Rust inhibitors)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยป้องกันสนิมที่อาจเกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นส่วนโลหะ ชิ้นส่วนเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลที่มีการหล่อลื่น โดยสารที่ใช้จะเป็นสารประกอบที่มีการยึดติดกับผิวของโลหะได้ดี ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับผิวโลหะเกิดเป็นฟิล์มเกาะติดกับผิวเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเข้าถึงผิวโลหะ สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารป้องกันสนิม คือ อะไมนซัคซิเนต (Amine succinates) และอัลคาไลเอิร์ทซัลโฟเนต (Alkaline earth sulfonates)

2.2.2.7 สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (Detergents and dispersants)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวของชิ้นส่วนเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลที่มีการหล่อลื่น และช่วยกระจายทำให้ไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นโคลนหรือตะกอน ซึ่งจะอุดช่องทางน้ำมันหล่อลื่น และจะไปรวมกันอยู่ด้านหลังของแหวนลูกสูบในเครื่องยนต์ทำให้แหวนติดตายได้ สำหรับสารที่นิยมใช้เป็นสารชะล้าง ได้แก่ สบู่อินทรีย์ (Organic soaps) บาเรียม (Barium) แคลเซียม (Calcium) และแมกนีเซียมซัลโฟเนต (Magnesium sulfonates) เป็นต้น ส่วนสารที่นิยมใช้เป็นสารกระจายสิ่งสกปรก ได้แก่ พอลิเมอร์ซัคซิไมด์ (Polymeric succinimides) เบนซิลไมด์ (Benzylamides) เป็นต้น

2.2.2.8 สารป้องกันการสึกหรอ (Antiwear additives)

เป็นสารเพิ่มคุณภาพที่ช่วยลดความเสียหายและการสึกหรอภายใต้สภาวะการหล่อลื่นแบบเขตแดน (Boundary lubrication) ซึ่งก็คือในสภาวะที่ฟิล์มของน้ำมันที่จะแยกผิวสัมผัสได้อย่างสมบูรณ์ไม่สามารถคงอยู่ได้ สารป้องกันการสึกหรอที่ใช้กันแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามความต้องการของการใช้งาน คือ สารที่ช่วยลดความเสียหายและการสึกหรอสำหรับสภาวะการทำงาน

เบา ได้แก่ กรดไขมัน (Fatty acids) และน้ำมันไขมัน (Fatty oils) และสารที่ใช้ลดความเสียดทาน และการสึกหรอภายใต้สภาวะความดันสูงมาก (Extreme pressure additive) หรือเรียกว่า EP ซึ่งจะทำหน้าที่โดยทำปฏิกิริยาทางเคมีกับผิวโลหะ และเกิดเป็นฟิล์มเคลือบที่ผิวโลหะป้องกันการสัมผัสโดยตรงของผิวโลหะ สาร EP ได้แก่ สารประกอบของซัลเฟอร์ (Sulphur compound) คลอรีน (Chlorine) หรือฟอสฟอรัส (Phosphorus)

2.2.3 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน [14] ดังนั้นในการเลือกใช้จึงจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น และในการผลิตก็จะต้องมีการควบคุมคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นให้ได้ตามต้องการ สำหรับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นที่สำคัญ มีดังนี้

2.2.3.1 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืด หมายถึง ความข้นหรือความใสของน้ำมัน เป็นคุณสมบัติของของไหล ซึ่งวัดในรูปของความต้านทานการไหล ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัส และมีผลต่อการเกิดความร้อนขึ้นในระหว่างผิวสัมผัสที่มีการหล่อลื่นด้วยน้ำมัน โดยน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดต่ำสามารถไหลได้ง่ายและจะเกิดฟิล์มบางส่วน ในขณะที่น้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงจะเกิดมีฟิล์มหนาและไหลยากขึ้น ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นควรมีความหนืดที่เหมาะสมเพื่อที่จะสามารถไหลผ่านไปตามจุดต่างๆได้ง่าย แต่ไม่ควรมีความหนืดต่ำเกินไปจนทำให้ฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นบางมาก เนื่องจากจะมีผลทำให้ชิ้นส่วนของโลหะเสียดสีกันจนสึกหรออย่างรวดเร็ว และไม่ควรมีความหนืดสูงเกินไปจนทำให้ฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นหนามากเกินไป เนื่องจากจะทำให้น้ำมันหล่อลื่นสามารถไหลไปตามชิ้นส่วนต่างๆได้ช้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะที่เครื่องยนต์ยังเย็นอยู่ ทำให้ชิ้นส่วนเหล่านั้นขาดน้ำมันหล่อลื่นและเกิดการสึกหรอ

ค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะไม่คงที่ ซึ่งจะแปรผันกับสภาวะการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะแปรผันกับอุณหภูมิและความดันในการใช้งาน ในด้านของอุณหภูมินั้นความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำมัน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ของเหลวเกิดการขยายตัว โมเลกุลของน้ำมันจะเคลื่อนออกห่างกัน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลงและเป็นผลให้ความหนืดลดลงด้วย สำหรับผลของความดันต่อความหนืดนั้นจะเห็นได้ชัดเจนก็ต่อเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นมาก ซึ่งเมื่อความดันของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น โมเลกุลของน้ำมันก็จะถูกบีบให้เข้าใกล้กันทำให้แรงยึดติดระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น และเป็นผลให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นด้วย

2.2.3.2 ดัชนีความหนืด (Viscosity index)

เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดสูงที่อุณหภูมิต่ำ และมีความหนืดต่ำที่อุณหภูมิสูง

ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กับเครื่องยนต์ควรมีความหนืดคงที่ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและสูง แต่การผลิตน้ำมันหล่อลื่นให้มีคุณสมบัติดังกล่าวนั้นเป็นไปได้ยาก จึงต้องปรับปรุงไม่ให้น้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงความหนืดมากเกินไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ตัวอย่างเช่น น้ำมันหล่อลื่นเกรดเดี่ยวหรือน้ำมันหล่อลื่นความหนืดเดี่ยว (Single-viscosity oil) เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่เปลี่ยนแปลงความหนืดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ง่าย น้ำมันหล่อลื่นชนิดนี้มีค่าดัชนีความหนืดต่ำ จึงทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มค่าดัชนีความหนืดโดยเติมสารเพิ่มคุณภาพบางอย่างลงในน้ำมันหล่อลื่น ทำให้น้ำมันมีแนวโน้มที่จะรักษาความหนืดเอาไว้ให้คงเดิมทั้งที่อุณหภูมิต่ำและสูง

น้ำมันหล่อลื่นที่มีมีค่าดัชนีความหนืดสูง (High viscosity index) จะช่วยรักษาความหนืดไว้ได้ดีกว่า ซึ่งจะทำให้การหล่อลื่นมีประสิทธิภาพสูง ช่วยให้เครื่องยนต์สตาร์ทติดง่าย และช่วยลดการสึกหรอ

2.2.3.3 กากคาร์บอน (Carbon residue)

เป็นสิ่งที่ตกค้างอยู่ภายหลังจากเผาไหม้น้ำมันหล่อลื่นในสภาวะที่กำหนด ซึ่งคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก ปริมาณกากคาร์บอนจะมีความสำคัญสำหรับน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากมีการเผาไหม้โดยตรงของน้ำมันหล่อลื่นในการนำไปใช้งาน ดังนั้นการหาปริมาณกากคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจึงเป็นการหาสำหรับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเพื่อดูว่ากระบวนการผลิตเป็นไปตามกำหนดหรือไม่

2.2.3.4 สี (Color)

น้ำมันหล่อลื่นจะมีสีที่แตกต่างกันไปตามชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่น วิธีการกลั่นและการผลิต ปริมาณและชนิดของสารเพิ่มคุณภาพ โดยสีของน้ำมันหล่อลื่นที่เห็นเมื่อมีแสงผ่านนั้นจะมีสีต่างกัน เช่น สีเหลืองใส สีแดง สีน้ำตาล สีดำ เป็นต้น

2.2.3.5 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (Density and gravity)

ความหนาแน่น หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนด ส่วนความถ่วงจำเพาะ หรือความหนาแน่นสัมพัทธ์ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันและความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน ในสหรัฐอเมริกา มักนิยมกำหนดค่าความถ่วงจำเพาะในรูปของหน่วยของศาเอพีไอ (American Petroleum Institute, API) เมื่อค่าองศาเอพีไอเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะจะลดลง โดยค่าความถ่วงจำเพาะนี้จะเป็นตัวช่วยในการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่ใช้แล้ว ซึ่งถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะลดลงก็อาจแสดงว่ามีน้ำมันเชื้อเพลิงเข้ามาผสมกับน้ำมันหล่อลื่น ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นก็อาจแสดงว่ามีสิ่งแปลกปลอม เช่น เหมะ หรือสารที่เกิดจากการรวมตัวกับออกซิเจนผสมอยู่กับน้ำมันหล่อลื่น

2.2.3.6 จุดวาบไฟและจุดติดไฟ (Flash and fire point)

จุดวาบไฟ เป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันจะให้ไอระเหยออกมาได้มากเพียงพอ และสามารถลุกไหม้ได้เมื่อโดนเปลวไฟ แต่เมื่อไอระเหยของสารหมดไปเปลวไฟก็จะดับลงเองทันที แต่หากมีการให้ความร้อนแก่น้ำมันต่อไปอีก อุณหภูมิก็จะสูงขึ้นเกินกว่าจุดวาบไฟ ทำให้เกิดไอระเหยออกมาได้อีกจนเกิดการลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง ที่อุณหภูมินี้จะเรียกว่า จุดติดไฟ ซึ่งจุดติดไฟมักจะสูงกว่าจุดวาบไฟประมาณ 10 ถึง 20 องศาเซลเซียส โดยจุดวาบไฟของน้ำมันหล่อลื่นใหม่จะแปรผันกับความหนืด กล่าวคือน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดสูงก็จะมีจุดวาบไฟสูงด้วย นอกจากนี้ชนิดของน้ำมันดิบที่นำมาใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานก็มีผลต่อจุดวาบไฟด้วย ดังนั้นจุดวาบไฟและจุดติดไฟของน้ำมันจะใช้ในการควบคุมการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและจะใช้ในการพิจารณาในด้านความปลอดภัยในการใช้งาน

2.2.3.7 จุดไหลเท (Pour point)

เป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันหล่อลื่นจะเริ่มไหลภายใต้สภาวะที่กำหนด โดยทั่วไปถ้าอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นต่ำกว่าจุดไหลเท น้ำมันหล่อลื่นก็จะเป็นไขและเกาะกันเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง ทำให้น้ำมันก็จะไม่สามารถไหลต่อไปได้ แต่ในทางตรงข้าม ถ้าอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นสูงกว่าจุดไหลเท ไขที่ผสมอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นก็จะหลอมตัวเข้ากับน้ำมันทำให้น้ำมันสามารถไหลได้ ซึ่งความสำคัญของจุดไหลเทจะขึ้นอยู่กับสภาวะของการใช้งาน ตัวอย่างเช่น ในประเทศหนาวจะต้องเลือกใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ เพื่อให้น้ำมันสามารถไหลได้ ถึงแม้อุณหภูมิของอากาศโดยรอบจะต่ำ

2.2.3.8 ตัวเลขความเป็นกลาง (Neutralization number)

โดยทั่วไปน้ำมันหล่อลื่นจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่เล็กน้อย ซึ่งสภาพความเป็นกรดนี้จะวัดเป็นปริมาณของเบสมาตรฐานที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำมันมีสภาพเป็นกลาง และสภาพความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะได้ และจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำมันหล่อลื่นถูกใช้งานเป็นเวลานาน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจนทำให้เกิดกรดอินทรีย์ขึ้น ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นจึงนิยมเติมสารเพิ่มคุณภาพที่มีความเป็นด่างเข้าไป เพื่อให้สารที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งมีสภาพเป็นกรดเปลี่ยนสภาพเป็นกลาง ซึ่งจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ได้ โดยการวัดความเป็นด่างนี้จะวัดในรูปของจำนวนเบสทั้งหมด (Total base number, TBN)

2.2.4 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น [4, 15]

2.2.4.1 ให้การหล่อลื่น

เครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลประกอบด้วยชิ้นส่วนโลหะที่เคลื่อนไหวยู่หลายส่วน เมื่อเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลมีการทำงานจะส่งผลให้ชิ้นส่วนต่างๆที่มีการเคลื่อนไหวยึดติดกันทำให้เกิดความฝืด แรงเสียดทาน และการสึกหรอ น้ำมันหล่อลื่นจะสร้างฟิล์มบางๆ (Lubricant films) เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างผิวหน้าของชิ้นส่วนต่างๆเหล่านั้น เพื่อป้องกันการสัมผัสกันโดยตรงของ

โลหะ ช่วยลดการเสียดสี ลดแรงเสียดทาน และลดการสึกหรอ ทำให้เครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ทั้งนี้ น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องรักษาฟิล์มของน้ำมันให้สม่ำเสมอทุกๆ อุณหภูมิการทำงาน

2.2.4.2 ระบายความร้อน

เมื่อเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลทำงานจะเกิดความร้อน ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังน้ำมันหล่อลื่น และน้ำมันหล่อลื่นจะเข้าไปช่วยลดซับความร้อนและระบายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิของการทำงานลดลง จึงรักษาอุปกรณ์และชิ้นส่วนของเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.4.3 รักษาความสะอาด

โดยทั่วไปในเครื่องยนต์จะเกิดการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง ทำให้เกิดสิ่งสกปรกหรือเขม่าตกค้างอยู่ภายในเป็นจำนวนมาก น้ำมันหล่อลื่นจะสามารถชะล้างเขม่า ขจัดคราบสิ่งสกปรกออกจากโลหะ และกระจายเขม่าหรือสิ่งสกปรกไม่ให้รวมตัวกันเป็นก้อน ทำให้ไส้กรองไม่เกิดการอุดตัน ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่อง จะสังเกตเห็นน้ำมันมีสีดำ แสดงว่าน้ำมันได้ชะล้างสิ่งสกปรกออกจากชิ้นส่วนเครื่องยนต์แล้ว

2.2.4.4 ป้องกันสนิมและการกัดกร่อน

การเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงจะทำให้เกิดไอน้ำและกรดกำมะถันกัดกร่อนชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ และทำให้เกิดสนิมได้ น้ำมันหล่อลื่นจะมีหน้าที่เคลือบผิวชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ ซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดสนิมและทำให้ความเป็นกรดลดลง

2.2.4.5 ป้องกันการรั่วซึม

เป็นการช่วยรักษากำลังอัดในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ โดยน้ำมันหล่อลื่นจะแทรกเข้าไประหว่างลูกสูบ แหวนลูกสูบ และกระบอกสูบ ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างแรงอัดให้กับเครื่องยนต์ และช่วยป้องกันแก๊สที่เป็นส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศไม่ให้ผ่านช่องห่างระหว่างแหวนเพื่อไม่ให้กำลังอัดของเครื่องยนต์ที่อยู่บริเวณบนหัวลูกสูบรั่วไหลออกจากห้องเผาไหม้จนทำให้เครื่องยนต์ไม่มีกำลัง

2.2.5 การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น

การเสื่อมสภาพหรือหมดอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นมีหลายสาเหตุ สามารถแบ่งเป็น 4 สาเหตุหลักๆ ดังนี้

2.2.5.1 การสะสมของสิ่งสกปรกในน้ำมันหล่อลื่น

สิ่งสกปรกที่เข้าไปปนเปื้อนในน้ำมันหล่อลื่น ได้แก่ ฝุ่นละอองในอากาศ ไอน้ำ เขม่า และกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ เศษโลหะจากการสึกหรอของชิ้นส่วนต่างๆ การเกิด

ยางเหนียวเนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของน้ำมันหล่อลื่นซึ่งอาจทำให้เกิดการอุดตันและทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ดังนั้นสิ่งสกปรกเหล่านี้จะมีผลทำให้ น้ำมันเสื่อมสภาพ

2.2.5.2 สารเพิ่มคุณภาพในน้ำมันหล่อลื่นถูกใช้หมดไป

เมื่อน้ำมันหล่อลื่นเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือมีสิ่งสกปรกเข้ามาปนเปื้อน จะส่งผลให้สารเพิ่มคุณภาพที่มีอยู่ในน้ำมันต้องเข้าไปกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆ และหากมีสิ่งสกปรกเข้ามาปนเปื้อนเป็นจำนวนมากก็จะทำให้สารเพิ่มคุณภาพถูกใช้ไปมากจนกระทั่งหมดไป จึงทำให้คุณสมบัติของน้ำมันต่ำลงหรือเรียกว่าน้ำมันเสื่อมสภาพ

2.2.5.3 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

เครื่องยนต์ที่สภาพไม่ดีในการทำงาน เช่น เครื่องยนต์เดินไม่เรียบ เครื่องหลวม เครื่องยนต์เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ใส์กรองต่างๆหมดสภาพ จะเป็นสาเหตุที่ทำให้ น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น แต่หากมีการดูแลเครื่องยนต์ให้มีสภาพที่ดี จะช่วยให้เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและช่วยยืดอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นด้วย

2.2.5.4 สภาพการใช้งาน

การใช้งานเครื่องยนต์หรือเครื่องจักรกลที่หนักเกินกำลังจะส่งผลให้เกิดความร้อนสูงซึ่งเมื่ออุณหภูมิในการใช้งานสูงจะส่งผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น ทำให้น้ำมันมีความเป็นกรดมากขึ้น และความหนืดของน้ำมันก็จะสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้น้ำมันหล่อลื่นเกิดการเสื่อมสภาพได้

2.3 พลังงานจากชีวมวล

2.3.1 ชีวมวล

ชีวมวล [16] เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy resource) ที่ได้จากสิ่งมีชีวิตและสารอินทรีย์ ได้แก่ พืชและสัตว์ ผลิตผลทางการเกษตรหรือเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ทะลายปาล์ม กาบและกะลามะพร้าว ชังข้าวโพด ฟางข้าว ชี้อ้อย เหง้ามันสำปะหลัง แกลบ ชานอ้อย เศษไม้ เปลือกไม้ ฯลฯ รวมถึงมูลสัตว์ สิ่งปฏิกูล ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ขยะมูลฝอยชุมชน เช่น เศษอาหาร เศษกระดาษ น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว เป็นต้น ชีวมวลเหล่านี้สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานโดยผ่านกระบวนการแปลงสภาพ (Conversion process) เพื่อใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิตพลังงานและลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุในการเกิดภาวะโลกร้อน

2.3.2 กระบวนการแปลงสภาพ

กระบวนการแปลงสภาพ [17, 18] เป็นการปรับปรุงลักษณะและสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวล เมื่อชีวมวลถูกนำมาผ่านกระบวนการแปลงสภาพต่างๆ เหล่านี้จะกลายเป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ทั้งของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สที่มีสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีขึ้นและเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน

กระบวนการแปลงสภาพสามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

1. กระบวนการทางกายภาพ (Physical process) ได้แก่ การลดความชื้น (Moisture reduction) การลดขนาด (Size reduction) และการเพิ่มความหนาแน่น (Densification)
2. กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical process) ได้แก่ การเผาไหม้ (Combustion) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) ลิควิแฟกชัน (Liquefaction) และแกซิฟิเคชัน (Gasification)
3. กระบวนการทางชีวภาพ (Biochemical process) ได้แก่ การผลิตมีเทนชีวภาพ (Biomethanation) การหมักเอทานอล (Ethanol fermentation) การหมักไฮโดรเจน (Hydrogen fermentation)

ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการแปลงสภาพข้างต้นแล้ว สามารถนำไปใช้ผลิตเป็นพลังงานต่างๆ ได้ เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อน รวมทั้งเชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel)

2.3.2.1 กระบวนการทางกายภาพ

1. การลดความชื้น

ประกอบด้วย การแยกน้ำ (Dewatering) ซึ่งเป็นการดึงน้ำออกในรูปของของเหลว เหมาะสมกับวัสดุที่มีลักษณะเปียก ความชื้นสูง เช่น ขยะเปียก กากตะกอนน้ำเสีย เป็นต้น และการทำแห้ง (Drying) ซึ่งเป็นการดึงน้ำออกในรูปของไอ เหมาะสมกับวัสดุที่มีความชื้นต่ำ หรือผ่านการแยกน้ำขั้นต้นมาแล้ว

2. การลดขนาด

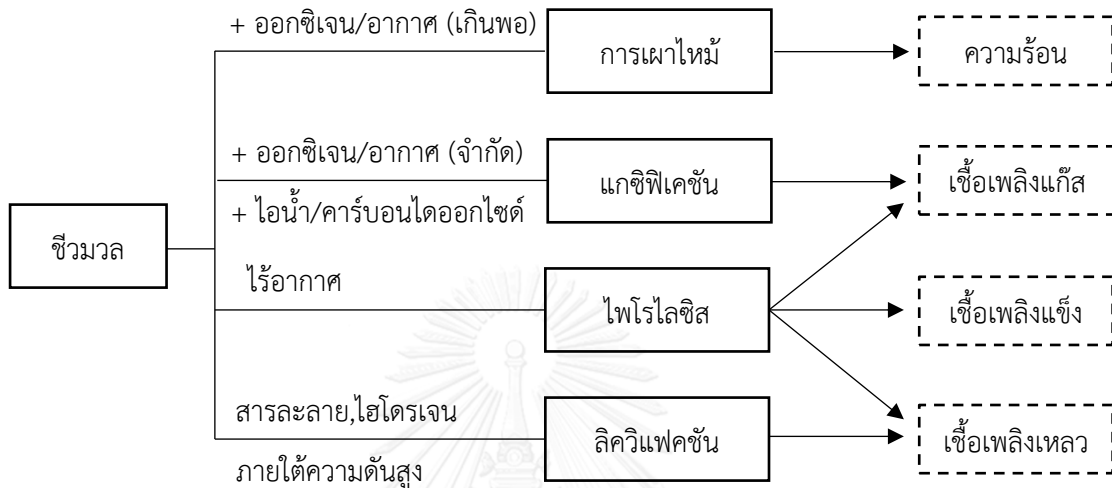
เป็นกระบวนการที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวล ความร้อน และอัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากชีวมวลที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการเกิดปฏิกิริยาสูง โดยทั่วไปจะใช้หลักการบดและอัดเพื่อให้วัสดุแตกแล้วมีขนาดเล็กลง รวมทั้งอาจมีการบดหรือการตัดร่วมด้วย

3. การเพิ่มความหนาแน่น

เป็นการแปลงสภาพที่เปลี่ยนชีวมวลให้มีความหนาแน่นบัลก์ (Bulk density) สูงขึ้น เพื่อผลิตเชื้อเพลิงแข็งที่มีความหนาแน่นเชิงพลังงานหรือความความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric calorific) สูงขึ้น ช่วยให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพ

2.3.2.2 กระบวนการทางเคมีความร้อน

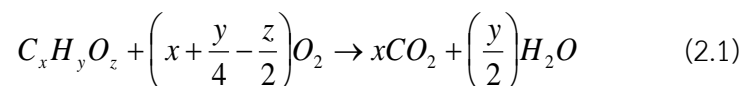
กระบวนการทางเคมีความร้อนเป็นกระบวนการที่มีปฏิกิริยาเคมีร่วมกับความร้อน ซึ่งประกอบด้วย การเผาไหม้ ไพโรไลซิส ลิกวิแฟกชัน และแกซิฟิเคชัน โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการจะแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการทางเคมีความร้อนและผลิตภัณฑ์ [18]

1. การเผาไหม้

เป็นการแปลงสภาพชีวมวลเป็นพลังงานโดยการให้ความร้อนในภาวะที่มีออกซิเจนหรืออากาศมากเกินพอ เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีความเสถียร 2 ชนิด คือ น้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งจะได้รับความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ดังแสดงในสมการที่ 2.1 ซึ่งความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้นั้นสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิต เช่น การอบแห้ง หรือการนำความร้อนที่ได้ไปผลิตไอน้ำมีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า หรือนำความร้อนไปใช้ในกระบวนการ



การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ซึ่งประสิทธิภาพจะขึ้นกับปริมาณออกซิเจนหรืออากาศ โดยการเผาไหม้แบบสมบูรณ์จะเกิดได้เมื่อมีออกซิเจนหรืออากาศในปริมาณที่มากเพียงพอ แต่หากป้อนออกซิเจนหรืออากาศในปริมาณมากเกินไป จะทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ต่ำลง ให้ความร้อนสูญเสียไปกับแก๊สเผาไหม้ (Flue gas)

2. ไพโรไลซิส

เป็นกระบวนการแตกตัวทางเคมีความร้อน (Thermochemical cracking) ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรืออากาศ ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 300 ถึง 650 องศาเซลเซียส กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ต้องการพลังงานและความร้อนเพื่อสลายพันธะเคมีของโครงสร้างสารไฮโดรคาร์บอน และผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามสถานะ ดังนี้

(1) ของแข็ง เช่น ถ่านชาร์ (Char) ขี้เถ้า (Ash) ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก คือ คาร์บอนประมาณร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก

(2) ของเหลว อาจเรียกว่าน้ำมันทาร์ (Tar oil) น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) หรือน้ำมันดิบชีวภาพ (Bio-crude) ซึ่งเป็นของเหลวสีน้ำตาลจนถึงดำ โดยทั่วไปมักมีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วยประมาณร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนัก

(3) แก๊ส เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวทางความร้อนทั้งขั้นปฐมภูมิ (Primary cracking) และขั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking) ซึ่งปลดปล่อยไอระเหยที่ไม่ควบแน่น (Non-condensable gases) ที่อุณหภูมิห้อง โดยทั่วไปจะประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น

อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ เวลาของปฏิกิริยา ขนาดอนุภาคของชีวมวล อัตราการให้ความร้อน อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน ชนิดของชีวมวล ความชื้นเริ่มต้นของชีวมวล เป็นต้น

กลไกการเกิดไพโรไลซิสสำหรับชีวมวลสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย คือ ขั้นแรก เมื่อชีวมวลได้รับความร้อนและมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะเริ่มเกิดการแตกตัวของโครงสร้างสารไฮโดรคาร์บอน ปลดปล่อยแก๊ส สารระเหยที่ไม่สามารถควบแน่นได้หรือทาร์ และของแข็งที่เหลือหรือชาร์ปฐมภูมิ (Primary char) ต่อมาในขั้นที่สอง ทาร์จะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวต่อในวัฏภาคของแก๊ส ซึ่งเมื่อลดอุณหภูมิจนถึงที่อุณหภูมิกดติจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการควบแน่นตามธรรมชาติ และได้ผลิตภัณฑ์แก๊สและของแข็งเพิ่มขึ้น ของแข็งที่ได้มักถูกเรียกว่าชาร์ทุติยภูมิ (Secondary char) ซึ่งผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะถูกนำไปกลั่นและปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยอาจเติมแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปในกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อช่วยให้เกิดการแตกตัวได้มากขึ้นและทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีความเสถียรมากขึ้น หรืออาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งจะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเจอะจงมากขึ้น

3. ลิควิแฟกชัน

เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งสามารถแบ่งกระบวนการออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะการดำเนินการ คือ ลิควิแฟกชันทางตรง (Direct liquefaction) และลิควิแฟกชันทางอ้อม (Indirect liquefaction)

(1) ลิควิแฟกชันทางตรง เป็นการเปลี่ยนรูปจากเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวแบบขั้นตอนเดียว โดยปกติกระบวนการนี้จะมีการเติมแหล่งไฮโดรเจนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation reaction) ซึ่งจะช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว (Liquid yield) แต่ในกรณีที่ชีวมวลมีความชื้นสูงอาจมีการใช้น้ำและตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมทำปฏิกิริยาด้วย กระบวนการนี้เรียกว่า ไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน (Hydrothermal liquefaction) ซึ่งกระบวนการนี้มีข้อดีคือสามารถใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นสูงได้ และช่วยลดพลังงานสำหรับการทำแห้ง

(2) ลิควิแฟกชันทางอ้อม เป็นการเปลี่ยนรูปจากเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวแบบหลายขั้นตอน โดยขั้นแรกเชื้อเพลิงแข็งจะถูกเปลี่ยนให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊สก่อนผ่านแกซิฟิเคชัน ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สจะถูกนำไปปรับสภาพ เช่น การทำให้บริสุทธิ์ การปรับองค์ประกอบแก๊ส การทำความสะอาดแก๊ส จากนั้นแก๊สที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน หรือเรียกว่าแก๊สสังเคราะห์ (Syngas) จะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการแปลงสภาพจากแก๊สเป็นของเหลว (Gas-to-liquid process) หรือเรียกว่า จีทีแอล (GTL) โดยปกติจะดำเนินการภายใต้อุณหภูมิไม่เกิน 400 องศาเซลเซียส ความดันสูง และมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย ตัวอย่างกระบวนการนี้ เช่น การสังเคราะห์ฟิชเชอร์โทรปซ์ (Fischer-Tropsch synthesis) การสังเคราะห์เมทานอล (Methanol synthesis) เป็นต้น ข้อดีของลิควิแฟกชันทางอ้อม คือ สามารถควบคุมการเกิดผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่า และช่วยลดค่าใช้จ่ายในการแยกผลิตภัณฑ์ภายหลัง

4. แกซิฟิเคชัน

เป็นกระบวนการเปลี่ยนสารป้อนที่เป็นเชื้อเพลิงแข็งหรือเชื้อเพลิงเหลวให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊ส ในภาวะที่มีการจำกัดปริมาณออกซิเจนจนเกิดการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแกซิฟิเคชันจะประกอบไปด้วยขั้นตอนหลักคือ การทำแห้ง การไพโรไลซิส การเผาไหม้ การแตกตัวหรือรีฟอร์มมิง (Reforming) ของสารระเหย แกซิฟิเคชันของชาร์ โดยมักเกิดขึ้นตามลำดับ แต่บางส่วนอาจเกิดขึ้นพร้อมกันได้ ทั้งนี้ขึ้นกับภาวะในการดำเนินการและลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้

2.3.2.3 กระบวนการทางชีวภาพ

1. การผลิตมีเทนชีวภาพ

มีเทนชีวภาพหรือแก๊สชีวภาพ (Biogas) เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) ของสารอินทรีย์ โดยอาศัยกลไกเมแทบอลิซึม (Metabolism) ของจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรีย ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์คือมีเทนร้อยละ 50 ถึง 75 และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 25 ถึง 50 และอาจมีส่วนประกอบอื่นเจือปนอยู่บ้าง เช่น น้ำ และไฮโดรเจนซัลไฟด์

2. การหมักเอทานอล

เป็นการผลิตเอทานอลจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว โดยอาศัยการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์จำพวกยีสต์ (Yeast) แบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งเอทานอลนี้จะถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนแกโซลีนในเครื่องยนต์ใน 3 รูปแบบ คือ การใช้แทนน้ำมันเบนซินหรือดีเซลโดยตรง การผสมกับน้ำมันเบนซินหรือดีเซลเรียกว่าแกโซฮอล์ (Gasohol) และดีโซฮอล์ (Diesohol) ตามลำดับ และการใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทน

2.4 เชื้อเพลิงชีวภาพ

เชื้อเพลิงชีวภาพ [19] คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากชีวมวลโดยผ่านกระบวนการต่างๆ นับเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สามารถฟื้นฟูหรือสร้างขึ้นใหม่ได้ ซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจะใช้ระยะเวลาไม่นานเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยชีวมวลที่นำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพสามารถแบ่งออกเป็น 3 รุ่น (Three generations) ได้แก่

1. ชีวมวลรุ่นที่หนึ่ง (First generation) [20, 21] เป็นการนำผลผลิตทางการเกษตร (Agricultural feedstock) เช่น น้ำตาล มันสำปะหลัง อ้อย และน้ำมันพืชที่ใช้บริโภค เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง เป็นต้น มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งการนำผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้มาผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจะส่งผลให้ราคาต้นทุนสูงขึ้น เกิดภาวะขาดแคลนอาหาร รวมทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การเสียสมดุลของระบบนิเวศน์ การปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เป็นต้น

2. ชีวมวลรุ่นที่สอง (Second generation) [21, 22] เป็นการนำเศษวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตร (Agricultural residues) เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย ชี้เลื่อย เปลือกไม้ เศษวัสดุเหลือใช้จากครัวเรือนหรืออุตสาหกรรม และขยะมูลฝอยชุมชน เช่น เศษไม้ ของเสียประเภทพลาสติกที่ใช้แล้ว กระดาษ กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย และน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว และเนื่องจากชีวมวลรุ่นที่สองที่นำมาผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพเป็นพืชหรือวัตถุดิบที่ไม่ใช้ในการบริโภค จึงทำให้ไม่เกิดการแย่งอาหารของมนุษย์และสัตว์

3. ชีวมวลรุ่นที่สาม (Third generation) [23] เป็นการนำสาหร่ายขนาดเล็กและขนาดใหญ่ (Micro and macro algae) มาสกัดและแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ เนื่องจากสาหร่ายมีข้อได้เปรียบ เช่น ใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงน้อยและใช้ระยะเวลาเพาะเลี้ยงสั้นกว่าเมื่อเทียบกับชีวมวลรุ่นอื่นๆ มีความสามารถในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพได้สูง (High productivity) และสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตได้ดี ทำให้สามารถลดการปลดปล่อยแก๊ส

คาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศได้ แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีข้อจำกัดสำหรับการนำสาหร่ายมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ คือ การเพาะเลี้ยงสาหร่ายจำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญและต้องควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสม เช่น สภาพกรด-เบส อุณหภูมิ แสงแดด ออกซิเจนในน้ำ จึงจะทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตได้ดี

นอกจากนั้นการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวภาพจะทำให้มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สพิษต่างๆน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดอื่น ดังนั้นการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพจึงเป็นการช่วยรักษาสภาพแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง และเชื้อเพลิงชีวภาพสามารถแบ่งตามสถานะได้ 3 รูปแบบ คือ เชื้อเพลิงของแข็ง เชื้อเพลิงของเหลว และเชื้อเพลิงแก๊ส

2.5 น้ำมันปรุงอาหาร

น้ำมันปรุงอาหาร เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและการบริโภคในครัวเรือน โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์

2.5.1 น้ำมันพืช

น้ำมันพืช [24] คือ น้ำมันที่ผลิตได้จากพืชต่างๆ เช่น ถั่วลิสง (Peanut oil) เมล็ดทานตะวัน (Sunflower seed oil) ถั่วเหลือง (Soybean oil) มะพร้าว (Coconut oil) ปาล์มน้ำมัน (Palm oil) เมล็ดนุ่น (Cotton seed oil) ดอกคำฝอย (Safflower seed oil) ดอกคาโนลา (Canola oil) สบู่ดำ (Jatropha oil) ละหุ่ง (Castor oil) เมล็ดเรพ (Rapeseed oil) เป็นต้น

2.5.1.1 องค์ประกอบและสมบัติของน้ำมันพืช

น้ำมันพืชเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) มีโครงสร้างเป็น $-C_3H_5$ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอล (Glycerol) กับกรดไขมัน (Fatty acid) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยสมบัติของน้ำมันพืชจะแตกต่างกันไปตามสมบัติของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ

1. กรดไขมันอิ่มตัว [27] เป็นกรดไขมันที่มีพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนในหมู่ไฮโดรคาร์บอนเป็นพันธะเดี่ยวทั้งหมด มีสูตรทั่วไป คือ $C_nH_{2n+1}COOH$ โดยที่ n คือ จำนวนอะตอมคาร์บอน กรดไขมันชนิดนี้พบได้มากในไขมันสัตว์ และน้ำมันมะพร้าว ชนิดของกรดไขมันอิ่มตัวที่มักพบในน้ำมันพืช คือ กรดสเตียริก กรดปาล์มมิติก และกรดลอริก เป็นต้น โดยกรดไขมันอิ่มตัวมีสมบัติแข็งตัวง่าย ไม่เหม็นหืนเนื่องจากไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่มีอยู่ในอากาศ มีจุดหลอมเหลวสูงเมื่อเทียบกับจุดหลอมเหลวของกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเท่ากัน แต่มีข้อเสีย คือ หากรับประทานเข้าไปในปริมาณมากอาจทำให้เกิดการอุดตันของหลอดเลือดได้

2. กรดไขมันไม่อิ่มตัว [28] เป็นกรดไขมันในหมู่ไฮโดรคาร์บอนมีพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนบางพันธะเป็นพันธะคู่ ซึ่งอาจมีพันธะคู่เพียงตำแหน่งเดียว (Monounsaturated fatty acid) หรือหลายตำแหน่ง (Polyunsaturated fatty acid) และ ผลจากการที่มีพันธะคู่ ทำให้โมเลกุลของกรดไขมันไม่อิ่มตัวมีจำนวนอะตอมไฮโดรเจนน้อยกว่ากรดไขมันอิ่มตัว ชนิดของกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มักพบในน้ำมันพืช คือ กรดโอเลอิก และกรดไลโนเลอิก เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วน้ำมันพืชมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบหลัก และกรดไขมันไม่อิ่มตัวมีสมบัติแข็งตัวยาก มีจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อตั้งทิ้งไว้ให้สัมผัสกับอากาศเป็นเวลานานจะทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืน

กรดไขมันทั่วไปจะมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนเป็นเลขคู่ มีความยาวของสายโซ่คาร์บอนตั้งแต่ 12 ถึง 24 อะตอม กรดไขมันที่พบในน้ำมันพืชส่วนใหญ่มีจำนวนคาร์บอน 16 และ 18 อะตอม โดยโครงสร้าง สูตรโมเลกุล และชนิดของกรดไขมันที่พบในน้ำมันพืช ดังแสดงในตารางที่ 2.1 [29] ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรดไขมันแต่ละชนิดมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนและชนิดของพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนแตกต่างกัน และองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [30] โดยความแตกต่างของทั้งประเภทและปริมาณของกรดไขมันในน้ำมันพืชแต่ละชนิดมีผลต่อสมบัติของน้ำมันพืช ดังแสดงในตารางที่ 2.3 [31, 32]

ตารางที่ 2.1 โครงสร้าง สูตรโมเลกุล และชนิดของกรดไขมันที่พบในน้ำมันพืช

ชนิดของกรดไขมัน	โครงสร้าง *	สูตรโมเลกุล
กรดลอริก (Lauric acid)	12:0	$C_{12}H_{24}O_2$
กรดไมริสติก (Myristic acid)	14:0	$C_{14}H_{28}O_2$
กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid)	16:0	$C_{16}H_{32}O_2$
กรดสเตียริก (Stearic acid)	18:0	$C_{18}H_{36}O_2$
กรดโอเลอิก (Oleic acid)	18:1	$C_{18}H_{34}O_2$

หมายเหตุ : * คือ เลขหน้า หมายถึง จำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลของกรดไขมัน
เลขหลัง หมายถึง จำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของกรดไขมัน

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) โครงสร้าง สูตรโมเลกุล และชนิดของกรดไขมันที่พบในน้ำมันพืช

ชนิดของกรดไขมัน	โครงสร้าง *	สูตรโมเลกุล
กรดไลโนเลอิก(Linoleic acid)	18:2	C ₁₈ H ₃₂ O ₂
กรดไลโนเลนิก(Linolenic acid)	18:3	C ₁₈ H ₃₀ O ₂
กรดอะราคิโดนิก (Arachidonic acid)	20:0	C ₂₀ H ₄₀ O ₂
กรดบีฮีนิก (Behenic acid)	22:0	C ₂₂ H ₄₄ O ₂
กรดอีรูซิก (Erucic acid)	22:1	C ₂₂ H ₄₂ O ₂
กรดลิกโนซีริก (Lignoceric acid)	24:0	C ₂₄ H ₄₈ O ₂

หมายเหตุ : * คือ เลขหน้า หมายถึง จำนวนอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลของกรดไขมัน
เลขหลัง หมายถึง จำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของกรดไขมัน

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ

ชนิดของ น้ำมันพืช	กรดไขมันอิ่มตัว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			กรดไขมันไม่อิ่มตัว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	C12:0	C14:0	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:0
น้ำมันมะพร้าว	44-51	13-21	7.5-10	1-3.5	5-8.2	1-2.6	0-0.2	-
น้ำมันข้าวโพด	-	0-0.3	7-16.5	1-3.3	13-37	5-23	26-60	-
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	-	0.6- 1.5	22-26	2.1-5	14-21	47-58	-	-
น้ำมันปาล์ม	-	0-2.4	32-46	4-6.3	36-53	6-12	-	-
น้ำมันถั่วลิสง	-	0.0-5	6-14	1.9-6	36-67	13-43	-	1.32
น้ำมันงา	-	-	7.2-9.2	5.8-7.7	35-46	35-48	-	-
น้ำมันถั่วเหลือง	-	-	2.3-13	2.4-6	18-31	49-57	2-10	-
น้ำมันเมล็ด ดอกทานตะวัน	-	-	3.5-7.6	1.3-6.5	14-43	44-74	-	-

ตารางที่ 2.3 สมบัติของน้ำมันพืช

ชนิดของน้ำมันพืช	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	ความหนืด (ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที)	ความถ่วงจำเพาะ	ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)
น้ำมันมะพร้าว	23 ถึง 28	27 ^b	0.917	37.10
น้ำมันข้าวโพด	-10 ถึง -12	31 ถึง 35 ^a	0.922	39.50
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	-2 ถึง 2	34 ^b	0.916	38.70
น้ำมันปาล์ม	27 ถึง 50	40 ^a ถึง 45 ^b	0.921	39.50
น้ำมันถั่วลิสง	-2	40 ^b	0.917	39.80
น้ำมันงา	-4 ถึง 0	36 ^b	0.920	39.40
น้ำมันถั่วเหลือง	-20 ถึง -23	29 ^b ถึง 33 ^a	0.924	39.60
น้ำมันเมล็ด	-16 ถึง -18	34 ^a ถึง 36 ^b	0.922	39.60
ดอกทานตะวัน				

หมายเหตุ : a คือ ความหนืดที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส

b คือ ความหนืดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

2.5.1.2 เชื้อเพลิงจากน้ำมันพืช [33, 34]

น้ำมันพืชสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ได้ เนื่องจากน้ำมันพืชทุกชนิดประกอบด้วยสายโซ่ยาวของสารไฮโดรคาร์บอน ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลของมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันดีเซลและน้ำมันเบนซิน โดยเชื้อเพลิงจากน้ำมันพืชสามารถแบ่งได้ 3 รูปแบบ ดังนี้

1. น้ำมันพืชบริสุทธิ์ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง หรือเรียกว่า น้ำมันพืชสดตรง (Straight vegetable oil, SVO) ซึ่งสามารถนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้ แต่เนื่องจากน้ำมันพืชมีความเข้มข้นและความหนืดสูงจึงเหมาะสำหรับเครื่องยนต์ที่มีความเร็วรอบต่ำ เช่น เครื่องยนต์สำหรับเกษตรกรรม อย่างไรก็ตามน้ำมันที่ใช้แล้วสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้หากผ่านการกรองก่อนนำไปใช้งาน

2. น้ำมันพืชดัดแปลง เป็นน้ำมันที่ได้จากการผสมน้ำมันพืชกับน้ำมันดีเซลโดยตรง (Blending oil fuel) เช่น น้ำมันปาล์มผสมกับน้ำมันดีเซล น้ำมันมะพร้าวผสมกับน้ำมันดีเซล เป็นต้น เนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ดังนั้นการนำน้ำมันมาผสมกันจึงสามารถทำได้ง่าย อีกทั้งมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ และสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ได้โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ จากโครงการวิจัยการใช้น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันปาล์มดิบเพื่อใช้ในเครื่องยนต์เกษตรกรรม ของโครงการส่วนพระองค์สวนจิตรลดา [35] โดยเมื่อผสมน้ำมันดีเซลและน้ำมันปาล์มดิบในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 และเมื่อผสม

น้ำมันดีเซล น้ำมันปาล์มดิบ และน้ำมันก๊าดในอัตราส่วน 75 ต่อ 20 ต่อ 5 แล้วนำไปทดสอบสมรรถนะในเครื่องยนต์เกษตรกรรม พบว่าไม่ก่อให้เกิดผลกระทบในด้านกำลังของเครื่องยนต์ ตลอดจนการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ค่าควันดำ รอบการทำงานของเครื่องยนต์ รวมทั้งค่าอุณหภูมิของไอเสีย ทั้งนี้ น้ำมันปาล์มดิบจะต้องเป็นน้ำมันที่ไม่เก็บไว้นาน โดยต้องกรองเอาส่วนที่เป็นไขออกก่อน และต้องไม่ใช้ส่วนที่ข้นมากเพื่อไม่ให้ไส้กรองน้ำมันเชื้อเพลิงอุดตัน น้ำมันที่ผสมแล้วควรจะนำไปใช้งานทันที เนื่องจากอาจเกิดการรวมตัวกันของเส้นใยพืชเป็นก้อน ทำให้เกิดการอุดตันที่ไส้กรองน้ำมันเชื้อเพลิงได้ง่าย อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของน้ำมันพืชัดแปลงในการนำไปใช้งานคือ น้ำมันกลุ่มนี้ยังไม่ได้คุณภาพตามข้อกำหนดคุณภาพน้ำมันดีเซล ของกระทรวงพาณิชย์ จึงไม่จัดเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงตามพระราชบัญญัติน้ำมันเชื้อเพลิง

3. ไบโอดีเซล เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตได้จากน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้ว ซึ่งได้รับการกำจัดยางเหนียวและสิ่งสกปรกออก โดยเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีเป็นสารเอสเทอร์ (Ester) ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงน้ำมันดีเซล ผ่านกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) โดยน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้วทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือเอทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้สภาวะการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม เพื่อเปลี่ยนให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอัลคิลเอสเทอร์ (Alkyl esters) ได้แก่ เมทิลเอสเทอร์ (Methyl esters) หรือเอทิลเอสเทอร์ (Ethyl esters) และกลีเซอรอล

ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติทางกายภาพคล้ายกับน้ำมันดีเซล แต่ให้การเผาไหม้ที่สะอาดกว่า และไอเสียนั้นมีคุณภาพดีกว่า เนื่องจากออกซิเจนในไบโอดีเซลทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า น้ำมันดีเซล จึงมีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่า และเนื่องจากไบโอดีเซลไม่มีกำมะถัน จึงไม่มีปัญหาสารซัลเฟต นอกจากนี้การอุดตันของระบบไอเสียจะเกิดได้ยาก เนื่องจากการใช้ไบโอดีเซลจะทำให้มีเขม่าคาร์บอนน้อย ซึ่งจะช่วยให้อายุการทำงานของเครื่องยนต์ได้

การนำน้ำมันพืชไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. ปรับปรุงเครื่องยนต์ เช่น การปรับปรุงระบบหัวฉีดและห้องเครื่อง การเปลี่ยนวัสดุบางชนิดในระบบเชื้อเพลิงที่อาจถูกกัดกร่อน เป็นต้น ซึ่งวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสูงในการดำเนินการ

2. ปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันพืช เช่น การลดค่าความหนืด การเพิ่มความสามารถในการระเหยเป็นไอให้ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล เพื่อให้สะดวกต่อการป้อนเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้และเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งทำได้โดยผสมน้ำมันพืชกับน้ำมันดีเซลโดยตรง เช่น น้ำมันมะพร้าวผสมกับน้ำมันดีเซล เรียกว่าดีเซลมะพร้าว น้ำมันปาล์มผสมกับน้ำมันดีเซล เรียกว่า ดีเซลปาล์ม ซึ่งวิธีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันพืชนี้มีความยุ่งยากมากกว่าแต่เสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าวิธีการปรับปรุงเครื่องยนต์

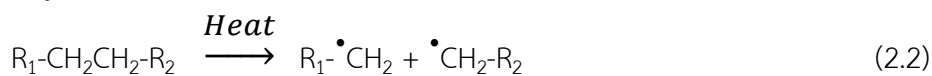
2.5.2 น้ำมันสัตว์

น้ำมันสัตว์เป็นน้ำมันที่นำมาปรุงอาหารได้เช่นเดียวกับน้ำมันพืช แต่มีความแตกต่างกับน้ำมันพืชทั้งในแง่ของคุณสมบัติและคุณค่าทางอาหาร เช่น น้ำมันหมู จะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันอิ่มตัว ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นไขได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง และมีกลิ่นเหม็นหืนได้ง่ายเมื่อตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิปกติ รวมทั้งมีปริมาณโคเลสเตอรอลสูง ซึ่งเป็นปัจจัยเสี่ยงที่สำคัญต่อการเกิดโรคหัวใจขาดเลือดและหลอดเลือดอุดตัน น้ำมันปลา [36] เป็นน้ำมันที่สกัดจากส่วนของเนื้อ หนัง หัว และหางของปลาทะเล เช่น ปลาซาร์ดีน ปลาแซลมอน ปลาแฮร์ริ่ง ปลานิลทะเล ปลาดุกทะเล ปลาแมคเคอเรล ปลาไวท์ฟิช ปลาทูน่า ปลาซาบะ เป็นต้น น้ำมันปลาประกอบด้วยกรดไขมันโอเมก้า 3 (Omega 3) และกรดไขมันโอเมก้า 6 (Omega 6) สำหรับกรดไขมันโอเมก้า 3 นั้นจะสามารถแบ่งออกได้เป็นอีพีเอ (EPA) และดีเอชเอ (DHA) ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย เนื่องจากร่างกายไม่สามารถสร้างเองได้ จึงต้องได้รับจากสารอาหารเท่านั้น และสำหรับกรดไขมันในกลุ่มโอเมก้า 6 นั้นจะมีส่วนช่วยลดไขมันในเลือดได้

2.6 การแตกตัวด้วยความร้อน

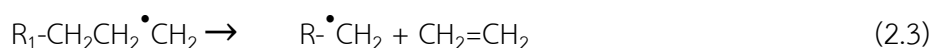
การแตกตัวด้วยความร้อน [37-39] เป็นกระบวนการที่ใช้เพื่อเปลี่ยนสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีโมเลกุลขนาดเล็กลงโดยใช้ความร้อน การแตกตัวด้วยความร้อนมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและเวลา โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเมื่อสารไฮโดรคาร์บอนเกิดการแตกตัวที่อุณหภูมิสูงในช่วง 425 ถึง 650 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

ขั้นเริ่มต้นของการแตกตัวด้วยความร้อนคือ การเกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้พันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนแตกออกจากกัน เกิดเป็นอนุมูลอิสระที่จะไปทำปฏิกิริยาในขั้นต่อไป ดังแสดงในสมการที่ 2.2



โดยอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนี้มีความว่องในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวที่ตำแหน่งแอลฟา (Alpha scission) ตำแหน่งเบต้า (Beta scission) โดยเป็นการแตกตัวของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนที่ตำแหน่งห่างจากอะตอมของคาร์บอนที่เป็นอนุมูลอิสระหนึ่งและสองพันธะ ตามลำดับ รวมทั้งเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization reaction) ได้

การแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้าจะผลิตสารโอเลฟินส์ เช่น อนุมูลอิสระปฐมภูมิ (Primary free radical) และเอทิลีน (Ethylene) ดังแสดงในสมการที่ 2.3



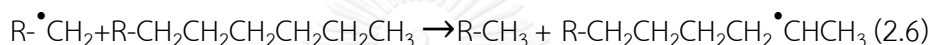
สำหรับการแตกตัวที่ตำแหน่งแอลฟาจะผลิตอนุมูลอิสระที่คาร์บอนอะตอมแรก (Methyl radical) ซึ่งสามารถดึงอะตอมของไฮโดรเจนจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่เป็นกลางได้ เกิดเป็นมีเทน และอนุมูลอิสระทุติยภูมิ (Secondary free radical) หรืออนุมูลอิสระตติยภูมิ (Tertiary free radical) ดังแสดงในสมการที่ 2.4



ซึ่งอนุมูลอิสระนี้สามารถเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอนุมูลอิสระปฐมภูมิ แอลฟาโอเลฟินส์ ดังแสดงในสมการที่ 2.5



ในทำนองเดียวกัน อนุมูลอิสระปฐมภูมิ สามารถดึงอะตอมของไฮโดรเจนจากพาราฟินตัวอื่น เพื่อเกิดเป็นอนุมูลอิสระทุติยภูมิและพาราฟินที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง ดังแสดงในสมการที่ 2.6



เนื่องจากอนุมูลอิสระปฐมภูมิ ($\text{R}\cdot\text{CH}_2$) มีความเสถียรมากกว่าอนุมูลอิสระที่คาร์บอนอะตอมแรก ($\cdot\text{CH}_3$) ดังนั้นอัตราการดึงไฮโดรเจนของอนุมูลอิสระปฐมภูมิจึงต่ำกว่าอนุมูลอิสระที่คาร์บอนอะตอมแรก

หลังจากการเกิดอนุมูลอิสระแล้วจะทำให้เกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่อง ซึ่งปฏิกิริยาการแตกตัวนี้สามารถหยุดได้โดยการที่อนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น โดยอาจเกิดเป็นโมเลกุลเดียว ดังแสดงในสมการที่ 2.7 หรือเกิดเป็น 2 โมเลกุล ดังแสดงในสมการที่ 2.8



2.7 การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา [40, 41] เป็นกระบวนการที่นำตัวเร่งปฏิกิริยามาเพื่อช่วยในการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีโมเลกุลขนาดเล็กลง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีส่วนช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้รวดเร็วและสามารถควบคุมผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการได้

เมื่อสารไฮโดรคาร์บอนสัมผัสกับกับตำแหน่งที่เป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ภาวะในการดำเนินปฏิกิริยา ในระหว่างขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยานั้น จะเกิดโมเลกุลที่เกิดจากการเปลี่ยนสารไฮโดรคาร์บอนไปเป็นสารตัวกลาง (Intermediate) ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะปรากฏตัวในช่วงระยะเวลาสั้นๆ เนื่องจากสามารถเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เสถียรกว่าอย่างรวดเร็วในขั้นตอนสุดท้าย โดยสาร

ตัวกลางที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดเป็นสารประกอบที่มีประจุบวก หรือเรียกว่าคาร์บีนียมไอออน (Carbenium ions, $R-CH_2^+$)

คาร์บีนียมไอออน สามารถเกิดได้ทั้งจากการเติมโปรตอน (Proton, H^+) ให้กับโอเลฟินส์ซึ่งโอเลฟินส์นี้อาจมาจากสารป้อนหรือถูกผลิตผ่านปฏิกิริยาการแตกตัวทางความร้อน และการดึงไฮไดรด์ (Hydride Ion, H^-) จากพาราฟิน ไอออนเหล่านี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนกับตำแหน่งที่เป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ 2.9 และสมการที่ 2.10



(การเติมโปรตอนที่ตำแหน่งบรอนสเตด)



(การดึงไฮไดรด์ที่ตำแหน่งลิทวีส)

ความเสถียรของคาร์บีนียมไอออนขึ้นกับธรรมชาติของหมู่อัลคิล (Alkyl group) ที่ติดอยู่กับประจุบวก ซึ่งเสถียรภาพของคาร์บีนียมไอออนสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ คือ ไอออนตติยภูมิ (Tertiary ions) ไอออนทุติยภูมิ (Secondary ions) ไอออนปฐมภูมิ (Primary ions) และไอออนที่คาร์บอนอะตอมแรก (Methyl ions) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



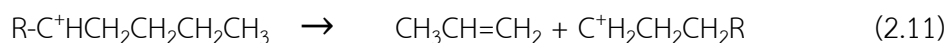
รูปที่ 2.9 ลำดับเสถียรภาพของคาร์บีนียมไอออน

หนึ่งในข้อดีของการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ไอออนปฐมภูมิ และไอออนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มจะเกิดการจัดเรียงตัวแบบไอออนตติยภูมิ เพื่อเพิ่มความเสถียรทำให้ได้ผลผลิตที่มีโมเลกุลเป็นกิ่งก้านมากขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดผ่านคาร์บีนียมไอออนนี้ได้หลายปฏิกิริยา แต่มีปฏิกิริยาหลัก คือ ปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking reaction) ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน (Isomerization reaction) ปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจน (Hydrogen transfer reaction) โดยธรรมชาติและความแรงของตำแหน่งกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาต่างๆ เหล่านี้

2.7.1 ปฏิกิริยาการแตกตัว

การแตกตัวหรือการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า เป็นการแตกพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนที่ตำแหน่งห่างจากอะตอมของคาร์บอนที่มีประจุบวกสองพันธะ การแตกตัวที่ตำแหน่งเบตานั้นจะใช้พลังงานเพื่อแตกพันธะต่ำที่ตำแหน่งอื่นซึ่งอยู่ใกล้เคียง เช่น ตำแหน่งแอลฟา นอกจากนั้นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่สั้นจะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาน้อยกว่าสารไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่ยาว ดังนั้นอัตราเร็วของปฏิกิริยาการแตกตัวจะลดลงเมื่อความยาวของสายโซ่สารไฮโดรคาร์บอนลดลง

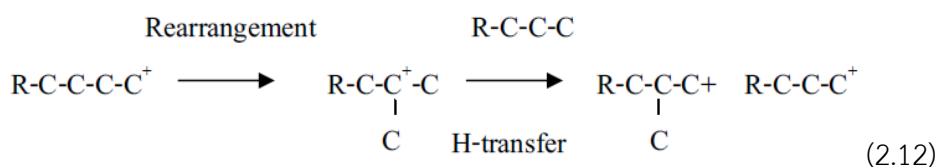
จนถึงจุดที่ไม่สามารถเกิดคาร์บิเนียมไอออนที่เสถียรได้ โดยผลิตภัณฑ์เริ่มต้นของการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า คือ สารโอเลฟินส์และคาร์บิเนียมไอออนตัวใหม่ ดังแสดงในสมการที่ 2.11



โดยคาร์บิเนียมไอออนที่เกิดขึ้นใหม่จะสามารถเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ได้อย่างต่อเนื่อง และคาร์บิเนียมไอออนที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น C_3^+ หรือ C_4^+ สามารถถ่ายโอนประจุบวกให้กับโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ และโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะเกิดการแตกตัวได้ ซึ่งปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic reaction) ดังนั้นอัตราการแตกตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนสามถึงสี่อะตอมในปริมาณสูง ในขณะที่จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นมีเทนและอีเทนในปริมาณต่ำ

2.7.2 ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน

ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันมักเกิดขึ้นในการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่าเกิดในการแตกตัวด้วยความร้อน โดยทั้งการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและการแตกตัวด้วยความร้อนจะเกิดการแตกพันธะผ่านการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า อย่างไรก็ตามในการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดผ่านคาร์บิเนียมไอออนที่มีแนวโน้มการจัดเรียงตัวแบบไอออนตติยมุม ซึ่งมีเสถียรภาพมากกว่าไอออนทุติยมุมและไอออนปฐมภูมิ ซึ่งไอออนตติยมุมจะเกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจนกับพาราฟินและเกิดการแตกตัวได้ผลิตภัณฑ์เป็นโมเลกุลที่มีกิ่งก้าน (Branched molecule) ดังแสดงในสมการที่ 2.12

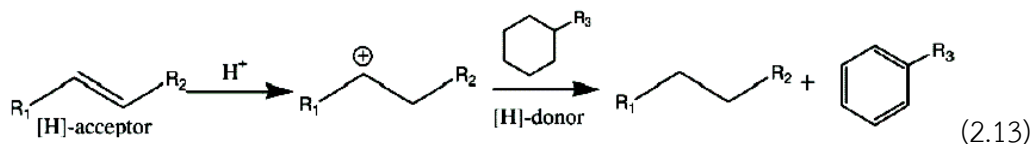


ดังนั้นปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันจึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเลขออกเทนสูง เนื่องจากไอโซพาราฟินมีค่าออกเทนสูงกว่าพาราฟินที่มีแขนตรง

2.7.3 ปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจน

การถ่ายโอนไฮโดรเจน หรือเรียกว่าการถ่ายโอนไฮโดรด์ ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่างสองโมเลกุล ซึ่งมีสารตั้งต้นอย่างน้อยหนึ่งตัวเป็นโอเลฟินส์ โดยโอเลฟินส์จะถูกดูดซับบนตำแหน่งกรดที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นคาร์บิเนียมไอออน แล้วคาร์บิเนียมไอออนนั้นจะทำปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนกับสารไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟินหรือแนฟทีน เกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟินและแอมโรแมติกซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีความเสถียร ดังแสดงใน

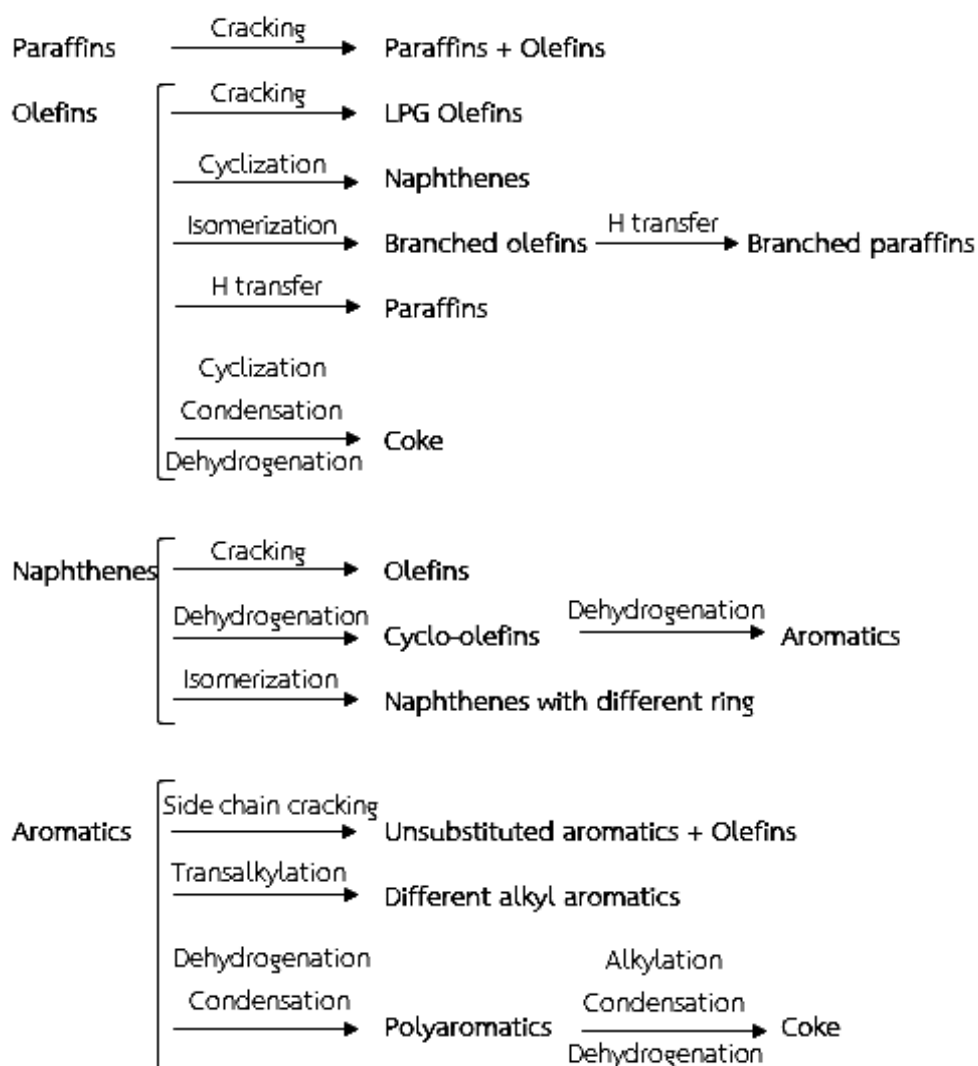
สมการที่ 2.13 ดังนั้นปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนของโอเลฟินส์จะได้ผลผลิตเป็นพาราฟินและแอโรแมติก



สำหรับซีโอไลต์ที่การแลกเปลี่ยนไอออนกับธาตุแรร์เอิร์ท (Rare earth) จะช่วยเพิ่มปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจน โดยธาตุแรร์เอิร์ทจะสร้างสะพานเชื่อมระหว่างตำแหน่งกรดสองหรือสามตำแหน่งในโครงผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากการถ่ายโอนไฮโดรเจนจำเป็นต้องถ่ายโอนในบริเวณที่มีตำแหน่งกรดติดกัน ซึ่งสะพานเชื่อมระหว่างตำแหน่งกรดเหล่านี้จะช่วยให้เกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจนได้มากขึ้น

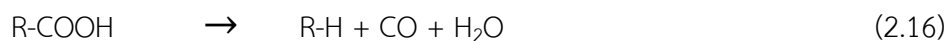
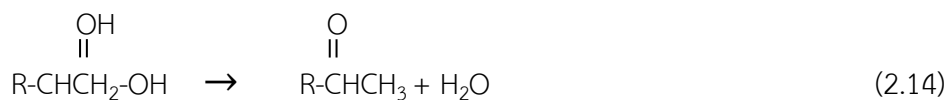
ปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนจะช่วยเพิ่มผลได้ของแกโซลีน รวมทั้งช่วยเพิ่มเสถียรภาพโดยการลดความว่องไวของแกโซลีน เนื่องจากการถ่ายโอนไฮโดรเจนจะผลิตโอเลฟินส์น้อยกว่าซึ่งโอเลฟินส์เป็นสารว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนจึงเป็นการช่วยลดการแตกตัวที่มากเกินไป (Overcracking) ของแกโซลีนได้ทางอ้อม

นอกจากปฏิกิริยาหลักทั้งสามที่กล่าวมาแล้ว ยังมีปฏิกิริยาอื่นๆที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาอีก เช่น ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation reaction) ปฏิกิริยาไซคลิเซชัน (Cyclization reaction) ปฏิกิริยาแอลคิเลชัน (Alkylation reaction) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา [42]

ในปัจจุบัน กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยายังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสารตั้งต้นชนิดอื่น ๆ ได้ เช่น ชีวมวล สาหร่าย น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการจะขึ้นกับชนิดของสารตั้งต้น สภาพวะในการดำเนินการ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ สำหรับการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากวัตถุดิบชีวมวลจะเกิดปฏิกิริยาต่างๆ [30] เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัว ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน ปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจน และปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชัน (Deoxygenation reaction) ได้แก่ ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration reaction) ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation reaction) และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน (Decarbonylation reaction) ดังแสดงในสมการที่ 2.14 2.15 และ 2.16 ตามลำดับ

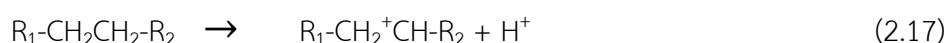


จากปฏิกิริยาข้างต้น สังเกตเห็นว่าออกซิเจนจะถูกกำจัดและถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจนเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยทั่วไปหากใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ซึ่งประกอบด้วยซีโอไลต์ชนิดววายเมทริกซ์ที่ว่องไว สารเติม และตัวประสาน จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดออกซิเจนออกจากโมเลกุลจากวัตุดิบชีวมวล

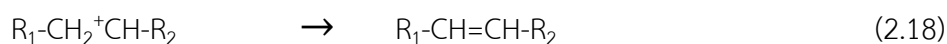
ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันจะเกิดบนตำแหน่งกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาในระหว่างที่เกิดการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของสารประกอบที่มีออกซิเจน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและสารประกอบพวกคีโตน (Ketone) แอลดีไฮด์ (Aldehyde) และแอลกอฮอล์ (Alcohol) เป็นต้น ส่วนปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ ตามลำดับ

2.8 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม

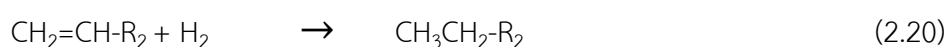
การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม [43] เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีโมเลกุลขนาดเล็กลง โดยใช้กลไกเหมือนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแต่มีปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนเข้ามาร่วมด้วย ซึ่งจะช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์พาราฟินแบบกิ่งและแนฟทีน ปฏิกิริยาการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมจะเกิดผ่านคาร์บีเนียมไอออน ซึ่งเกิดบริเวณตำแหน่งกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในสมการที่ 2.17



จากนั้นคาร์บีเนียมไอออนอาจจะมีการกำจัดโปรตอนออกจากโมเลกุล ดังแสดงในสมการที่ 2.18 หรือเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า ดังแสดงในสมการที่ 2.19 เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินส์



สารโอเลฟินส์ที่ได้นี้จะเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นพาราฟิน ดังแสดงในสมการที่ 2.20



ตัวแปรที่มีต่อกระบวนการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมมีหลายตัวแปร เช่น อุณหภูมิ ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อค่าการเปลี่ยน (Conversion) เนื่องจากเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกใช้งานเป็น

ระยะเวลาหนึ่งจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ จึงต้องมีการฟื้นฟูตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเพิ่มอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ และความดัน ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อค่าการเปลี่ยนเช่นกัน โดยค่าการเปลี่ยนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันย่อยของไฮโดรเจนสูงขึ้น เป็นต้น

2.9 การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง

เป็นวิธีการวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบและสมบัติของส่วนต่างๆในน้ำมันดิบ [44] ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี โดยจะนำน้ำมันมากลั่นแล้วแยกออกตามคาบจุดเดือด (Boiling range) เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตน้ำมันสำเร็จรูป โดยสามารถแบ่งน้ำมันตามคาบจุดเดือดอย่างย่อๆได้ดังนี้

2.9.1 พวกที่มีคาบจุดเดือดตั้งแต่จุดเดือดเริ่มต้น (Initial boiling point, IBP) ถึง 200 องศาเซลเซียส เรียกว่า แนฟทา (Naphtha fraction) หรือแก๊สโซลีน (Gasoline fraction) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ผลิตเป็นน้ำมันเบนซิน

2.9.2 พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 200 ถึง 250 องศาเซลเซียส เรียกว่า น้ำมันก๊าดหรือเคโรซีน (Kerosene fraction) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ผลิตเป็นน้ำมันก๊าด เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในตะเกียงสำหรับให้แสงสว่าง อีกทั้งใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ของเครื่องบินไอพ่น

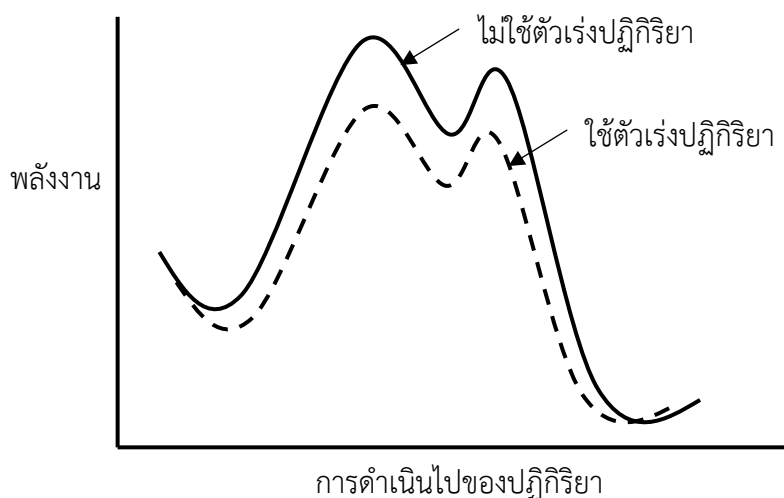
2.9.3 พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส เรียกว่า แก๊สออยล์เบา (Light gas oil fraction) ซึ่งมักนำไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์

2.9.4 พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 350 ถึง 370 องศาเซลเซียส เรียกว่า แก๊สออยล์ (Gas oil fraction) ซึ่งมักนำไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล

2.9.5 พวกที่มีคาบจุดเดือด 370 องศาเซลเซียสขึ้นไป เรียกว่า กากน้ำมัน (Long residue) ซึ่งมักนำไปใช้เป็นน้ำมันเตา เพื่อใช้สำหรับเรือและอุตสาหกรรมที่ต้องใช้กระบวนการเผาไหม้กระบวนการให้ความร้อน เช่น โรงงานถลุงเหล็ก โรงงานรีดเหล็ก เป็นต้น และนำไปผลิตเป็นยางมะตอย หรือผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่น

2.10 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา [45] คือ สารที่ช่วยให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดเร็วขึ้น โดยจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้เข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดผ่านกลไกของปฏิกิริยาแบบใหม่ ซึ่งมีระดับพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา (Activation energy, E_a) ต่ำลงเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังรูปที่ 2.11 และเมื่อปฏิกิริยาดำเนินจนสมบูรณ์แล้วจะได้ผลิตภัณฑ์และตัวเร่งปฏิกิริยากลับคืนมา



รูปที่ 2.11 พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

2.10.1 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา [46]

ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจแบ่งออกได้หลายประเภทตามโครงสร้าง องค์ประกอบ การนำไปใช้งาน และโดยเฉพาอย่างยิ่งแบ่งตามสถานะของการรวมกลุ่ม คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) และตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst)

2.10.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารตั้งต้น ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกระจายตัวในสารตั้งต้นได้ดี และทุกอะตอมของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้สารตั้งต้นสามารถเข้าถึงตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาได้ทุกทิศทาง จึงไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบจำนวนมากก็ทำให้การเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพได้อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ยังสามารถเคลื่อนที่ในสารที่ทำปฏิกิริยาได้รวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการชนกันกับสารที่เข้าทำปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์แทบไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการแพร่ของสารตั้งต้นไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา และสามารถทำปฏิกิริยาภายใต้ภาวะที่ไม่รุนแรงมาก ข้อดีอื่นๆตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ เช่น มีการเลือกจำเพาะสูง สามารถควบคุมจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาได้ง่าย และกลไกการเร่งปฏิกิริยายังสามารถเข้าใจได้ง่าย แต่ข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ คือ การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก มีราคาสูง และมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ซึ่งจะเสื่อมสภาพได้ง่ายหากถูกใช้ในภาวะที่มีอุณหภูมิสูง

2.10.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะแตกต่างกับสารตั้งต้น ส่วนมากจะมีสถานะเป็นของแข็ง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้จะนิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง สามารถใช้งานได้ในภาวะที่มีอุณหภูมิสูง โดยตัวเร่งตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์มีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ โลหะที่ว่องไว (Active metal) ตัวรองรับ (Support) และตัวสนับสนุน (Promoter) ซึ่งมีหน้าที่แตกต่างกัน แต่เสริมให้คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาดีขึ้น กล่าวคือ โลหะที่ว่องไว ทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาหลัก ตัวรองรับ เป็นวัสดุที่เฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยา มีพื้นที่ผิวสูง ทำหน้าที่กระจายโลหะที่ว่องไวให้มีผลึกขนาดเล็กบนพื้นผิว อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงเสถียรภาพเชิงความร้อนของโลหะที่ว่องไวในขณะเกิดปฏิกิริยาได้ และตัวสนับสนุน จะช่วยส่งเสริมสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาในด้านความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา การเลือกจำเพาะ และเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.10.2 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

2.10.2.1 พื้นที่ผิว (Surface area)

เป็นสมบัติทางกายภาพพื้นฐานที่สำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสัมพันธ์กับโอกาสที่สารตั้งต้นจะเข้ามาดูดซับและเกิดปฏิกิริยาบนตำแหน่งที่ว่องไวภายในตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวสูงจะมีตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามาก ส่งผลให้มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาสูง

2.10.2.2 ขนาดรูพรุน (Pore size)

เป็นสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยเพิ่มค่าการการเลือกจำเพาะของปฏิกิริยา ซึ่งขนาดรูพรุนจะมีความสัมพันธ์กับขนาดโมเลกุลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยสามารถแบ่งขนาดรูพรุนออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

1. รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร
2. รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร
3. รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร

2.10.2.3 ความหนาแน่น (Density)

เป็นสมบัติทางกายภาพในการระบุลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงในหน่วยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. ความหนาแน่นรวม (Bulk density) คือ ความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่รวมปริมาตรช่องว่างระหว่างอนุภาค
2. ความหนาแน่นอนุภาค (Partical density) คือ ความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละอนุภาค
3. ความหนาแน่นเนื้อของแข็ง (Solid density) คือ ความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนที่เป็นของแข็ง ไม่รวมช่องว่างระหว่างอนุภาค

2.10.2.4 ความทนทานต่อการอัด (Crush strength)

เป็นแรงต่ำสุดที่กดทับอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาในแนวตั้งหรือแนวรัศมีจนเกิดการเสียรูปหรือแตกหักเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นสมบัติเชิงกลที่มีความสำคัญในการช่วยคาคตะเนแรงที่ใช้กดอัดเพื่อไม่ให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสียรูปหรือแตกหัก ซึ่งจะเกิดการอุดตันภายในเครื่องปฏิกรณ์

2.10.2.5 ความต้านทานการสึกหรอ (Attrition resistance)

เป็นสมบัติเชิงกลที่แสดงความต้านทานที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการสึกหรอหรือแตกหักเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงเนื่องจากเกิดการกระแทกกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา หรือเกิดการกระแทกกับผนังของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กลงนี้อาจหลุดลอยออกจากระบบหรือหลุดไปกับผลิตภัณฑ์ ทำให้สูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยาและทำให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาลดลง

2.10.3 สมบัติทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

2.10.3.1 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมี

ธาตุองค์ประกอบเป็นสมบัติที่กำหนดสมบัติทางเคมีอื่นๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากธาตุองค์ประกอบแต่ละธาตุมีโครงสร้างอิเล็กตรอนที่แตกต่างกันออกไป จึงส่งผลต่อการจัดเรียงอะตอมเป็นโครงผลึก ทำให้เกิดลักษณะผลึกและระนาบที่หลากหลายน ซึ่งการจัดเรียงอะตอมในแต่ละระนาบจะส่งผลต่อสมบัติการดูดซับสารตั้งต้น

2.10.3.2 สภาพกรด

มีบทบาทสำคัญในการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอน โดยสภาพกรดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สภาพกรดบรอนสเตด ซึ่งเป็นความสามารถในการให้โปรตอน และสภาพกรดลิวอิส ซึ่งเป็นความสามารถในการรับอิเล็กตรอน

2.10.3.3 สภาพเบส

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสจะไม่นิยมนำมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยามากนัก เนื่องจากตำแหน่งเบสมีความอ่อนไหว ต่อความชื้น คาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจนในอากาศ ซึ่งการนำตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสไปใช้จะต้องนำไปกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง เพื่อกำจัดสารเหล่านี้ ออกจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อน สภาพเบสสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สภาพเบส

บรอนสเตด ซึ่งเป็นความสามารถในการรับโปรตอน และสภาพเบสลิวิส ซึ่งเป็นความสามารถในการให้อิเล็กตรอน

2.10.4 สมบัติเชิงแรงของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

2.10.4.1 ความว่องไว

เป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อพื้นที่ผิวที่ว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา หรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อมวลหรือปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสามารถวัดได้จากความเร็วในการดำเนินปฏิกิริยาเทียบกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ซึ่งความว่องไวจะบอกความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์

2.10.4.2 การเลือกจำเพาะ

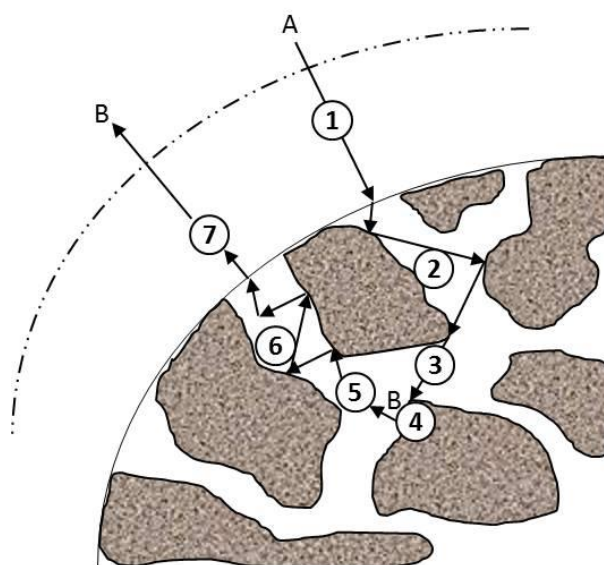
เป็นความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาในการเลือกผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

2.10.4.3 เสถียรภาพ

ประกอบไปด้วยเสถียรภาพเชิงเคมี เสถียรภาพเชิงความร้อน และเสถียรภาพเชิงกลของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเสถียรภาพเชิงเคมี เป็นความต้านทานต่อการสลายตัวและการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา เสถียรภาพเชิงความร้อน เป็นความต้านทานของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อนำไปใช้ภายใต้ภาวะที่มีอุณหภูมิสูง และเสถียรภาพเชิงกล เป็นความต้านทานด้านความแข็งแรงและการสึกหรอของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.10.5 ขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

การเกิดปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้น A แพร่เข้าไปยังรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์เพื่อเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ B โดยสามารถแบ่งได้เป็น 7 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ภาพจำลองขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่มีตัวรองรับ [46]

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ของสารตั้งต้น A จากภายนอก (External diffusion) ไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งต้องผ่านชั้นฟิล์มของแก๊ส (Gas phase) หรือชั้นขอบ (Boundary layer) ที่ล้อมรอบด้านนอกของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ของสารตั้งต้น A เข้าไปภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (Internal pore diffusion) โดยโมเลกุลของสารตั้งต้น A อาจชนกันเองหรือชนกับผนังของรูพรุน

ขั้นตอนที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) ของสารตั้งต้น A บนตำแหน่งที่ว่างในการเกิดปฏิกิริยาภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 4 การเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) ระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ B ที่ตำแหน่งที่ว่างในการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 5 การคายสารผลิตภัณฑ์ B ที่เกิดขึ้นออกจากตำแหน่งที่ว่างในการเกิดปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 6 การแพร่ของผลิตภัณฑ์ B ในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาไปที่ผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 7 การแพร่ของผลิตภัณฑ์ B จากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามายังด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา

การเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ มีกระบวนการที่สำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ กระบวนการการดูดซับ ซึ่งหมายถึง การที่โมเลกุลของสารถูกดึงเข้ามาติดกับผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับตัวดูดซับ โดยกระบวนการดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ physisorption) เป็นการดูดซับระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยแรงอย่างอ่อน หรือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force) การดูดซับทางกายภาพนี้ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้แบบชั้นเดียว (Monomolecular layer) ที่ความดันต่ำ และแบบหลายชั้น (Multi molecular layer) ที่ความดันสูง ซึ่งการดูดซับแบบนี้ จะเกิดการผันกลับได้ง่าย (Reversible) และเป็น การดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างไม่จำเพาะเจาะจง กล่าวคือ สารต่างๆสามารถถูกดูดซับบนผิวได้ และการแยกสารที่ถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับสามารถทำได้ง่าย เช่น การเพิ่มอุณหภูมิ หรือลดความดัน ซึ่งจะเกิดการปล่อยหรือคายสารที่ดูดซับออกมา (Desorption)

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ chemisorption) การดูดซับแบบนี้จะมีการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งอาศัยการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ และจะมีความร้อนเกิดขึ้นสูง การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่สารสามารถถูกดูดซับอยู่บนผิวตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียว

เท่านั้น ซึ่งเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจง และไม่สามารถเกิดผกผันกลับได้ (Irreversible) หรือผกผันกลับได้แต่น้อยมาก และใช้เวลาการดูดซับนาน

2.11 ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิด

ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิดหรือตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี [47] เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิด (Fluid catalytic cracking) โดยในปีค.ศ. 1915 เริ่มมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Aluminum chloride catalyst) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรดที่ช่วยแตกพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอน แต่เกิดปัญหาการกัดกร่อนและต้องมีการจัดการของเสีย จึงมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกา-อะลูมินา (Silica-alumina catalyst) ในปีค.ศ. 1940 แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกา-อะลูมินา ซึ่งมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบอสัณฐาน (Amorphous structure) จะทำให้มีความจำเพาะต่อการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สอินทรีย์ต่ำและทำให้เกิดโค้ก (Coke) ปริมาณสูง ดังนั้นจึงมีการพัฒนาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรื่อยมา จนกระทั่งในปีค.ศ. 1962 มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดวาย (Zeolite Y) เพื่อช่วยเพิ่มความจำเพาะต่อการเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สอินทรีย์ ต่อมาในช่วงปีค.ศ. 1980 ถึง 1989 ซีโอไลต์ชนิดแซตเอสเอ็ม-ไฟว์ (ZSM-5) ถูกเริ่มนำมาใช้เพื่อเพิ่มทั้งค่าออกเทนและผลได้ของโอเลฟินส์เบา (Yield of light olefins) เช่น โพรพิลีน และบิวทิลีน และในช่วงปีค.ศ. 1990 ถึง 1999 เริ่มมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความทนทานต่อการปนเปื้อนของโลหะนิกเกิลและวานาเดียมในน้ำมันดิบมากขึ้น เพื่อให้มีความยืดหยุ่นต่อกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิด

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์กับตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกา-อะลูมินา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์มีความว่องไวและมีความจำเพาะมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกา-อะลูมินา ซึ่งความว่องไวและความจำเพาะที่มากกว่านี้จะช่วยเพิ่มผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวและช่วยเพิ่มความสามารภในการแตกตัว นอกจากนี้พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ยังมีข้อได้เปรียบอื่นๆอีก เช่น มีความเสถียรมากกว่า สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า มีโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบผลึกที่มีรูปแบบแน่นอน จึงทำให้สามารถควบคุมผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการได้

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี เป็นของแข็งที่มีอนุภาคขนาดเล็ก มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 60 ถึง 80 ไมโครเมตร ซึ่งในปัจจุบันประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน [48] คือ ซีโอไลต์ เมทริกซ์ สารเติม และตัวประสาน

2.1.1.1 ซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นองค์ประกอบสำคัญของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ซึ่งมีความจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ และมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา โดยธรรมชาติและโครงสร้างผลึกจะมีผลโดยตรงต่อการควบคุมสมบัติของซีโอไลต์ เช่น ความเป็นกรด ความจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ และเสถียรภาพ สมบัติเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของซีโอไลต์โดยตรงเมื่อนำไปใช้ในการเร่งปฏิกิริยา

2.1.1.1.1 โครงสร้างและเคมีของซีโอไลต์ (Zeolite structure and chemistry)

ซีโอไลต์ เป็นสารประกอบจำพวกอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีการจัดเรียงตัวของหน่วยพื้นฐานซิลิเกต (SiO_4)⁴⁻ และอะลูมิเนต (AlO_4)⁵⁻ แบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) เชื่อมต่อกันอย่างเป็นระเบียบผ่านอะตอมออกซิเจน เกิดเป็นโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ขึ้น มีลักษณะเป็นโครงผลึก (Framework) แบบสามมิติ มีขนาดรูพรุนขนาดที่แน่นอน ซึ่งโครงสร้างของซีโอไลต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีการจัดเรียงตัวกันจนเป็นโครงสร้างที่สมบูรณ์ที่เล็กที่สุดและเป็นเอกลักษณ์ หรือเรียกว่า หน่วยเซลล์ (Unit cell) โดยผลึกซีโอไลต์แต่ละชนิดจะประกอบไปด้วยหน่วยเซลล์ที่ซ้ำกัน และหน่วยเซลล์คือหนึ่งในตัวแปรสำคัญในการกำหนดลักษณะของโครงสร้างซีโอไลต์

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้ในปัจจุบัน มีรูพรุนขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 อังสตรอม จึงจัดเป็นโมเลกุลาร์ซีฟ (Molecular sieve) ชนิดหนึ่งที่แสดงสมบัติการคัดกรองโมเลกุลแก๊สและของเหลวที่มีขนาดเล็กกว่า 8 อังสตรอมให้สามารถผ่านเข้าไปได้ นอกจากนี้มีพื้นที่ผิวภายในสูงประมาณ 600 ตารางเมตรต่อกรัม โดยทั่วไปแล้วซีโอไลต์ชนิดวายจะประกอบด้วยอะตอมในโครงผลึก 192 อะตอม แบ่งเป็นอะตอมของซิลิกอน 137 อะตอม และอะตอมของอะลูมิเนียม 55 อะตอม ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนโดยโมลระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินาที่มีค่าเท่ากับ 5

พื้นที่ผิวของซีโอไลต์จะมีประจุลบที่เกิดจากอะลูมิเนียมในโครงสร้างของซีโอไลต์มีโครงสร้างแบบทรงสี่หน้าที่เข้าไปแทรกในโครงผลึกของซิลิเกต ซึ่งจะถูกลดประจุด้วยแคตไอออน เช่น โซเดียมไอออน (Na^+) แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ทำให้ซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้ โดยเมื่อซีโอไลต์มีการแลกเปลี่ยนแคตไอออนกับโปรตอน (H^+) จะแสดงความเป็นกรด และตำแหน่งกรดที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นตำแหน่งกรดที่มีความแรงของกรดสูง เรียกว่า ตำแหน่งกรดบรอนสเตด (Bronsted acid site) มีโครงสร้างเป็น $\equiv\text{Si}-\text{OH}-\text{Al}\equiv$ ซึ่งสามารถนำไปใช้เร่งปฏิกิริยาได้หลายปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัว ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน นอกจากนั้นตำแหน่งกรดบรอนสเตดยังสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับธาตุแรร์เอิร์ท เช่น ซีเรียม (Cerium) นีโอติเมียม (Neodymium) แลนทานัม (Lanthanum) เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้ และเมื่อซีโอไลต์ถูกเผาหรือใช้งานที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสูญเสียหมู่ไฮดรอกซิล (Dehydroxylation) จากโครงผลึกในรูปของน้ำ ทำให้อะลูมิเนียมเชื่อมพันธะกับอะตอมออกซิเจนสามแขนทำให้ขาดอิเล็กตรอน เรียกว่า ตำแหน่งกรดลิวอิส (Lewis acid site)

สมบัติความเป็นกรดของซีโอไลต์มีองค์ประกอบ 3 ส่วน [46] คือ

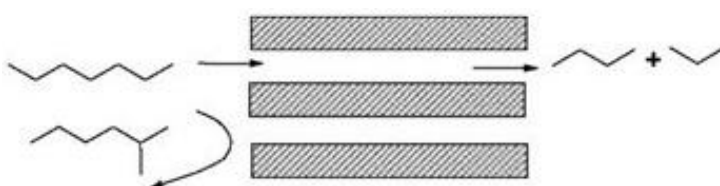
1. ชนิดของตำแหน่งกรด ได้แก่ ตำแหน่งกรดบรอนสเตด ตำแหน่งกรดลิวอิส และ หมู่ไฮดรอกซิล (Silanol group) ที่มีโครงสร้างแบบ $\equiv\text{Si-O-H}$ ซึ่งเกิดจากตำแหน่งของโครงผลึกซีโอไลต์

2. ปริมาณตำแหน่งกรด ขึ้นกับจำนวนอะตอมของอะลูมิเนียมในโครงผลึก โดยอะลูมิเนียมหนึ่งอะตอมจะทำให้เกิดตำแหน่งกรดบรอนสเตดหรือกรดลิวอิสหนึ่งตำแหน่ง หรือพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม ซึ่งอัตราส่วนนี้จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น

3. ความแรงของตำแหน่งกรด เป็นความสามารถในการให้โปรตอน โดยถ้าในโครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะลูมิเนียมปริมาณมาก จะทำให้ภายในรูพรุนมีความเป็นลบมาก เนื่องจากมีความหนาแน่นของประจุสูง ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุลบกับโปรตอนมีค่ามาก ความสามารถในการให้โปรตอนจึงลดลง ดังนั้นความแรงของกรดจึงมีค่าน้อย

โครงผลึกของซีโอไลต์เป็นโครงสร้างรูพรุนที่มีขนาดและมิติที่แน่นอน จึงทำให้เกิดสมบัติการเลือกจำเพาะต่อรูปร่าง (Shape-selective properties) ซึ่งสามารถจำกัดขนาด โครงสร้าง และชนิดของสารผลิตภัณฑ์ให้ได้ตามต้องการ โดยสมบัติการเลือกจำเพาะต่อรูปร่างสามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

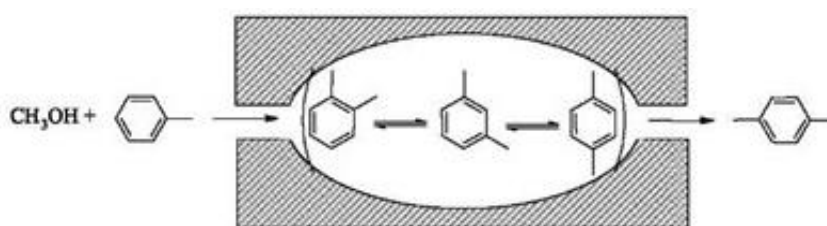
1. การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างสารตั้งต้น (Reactant shape selective) โดยสารตั้งต้นที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าหรือใกล้เคียงกับขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ จะสามารถแพร่เข้าไปภายในรูพรุนของซีโอไลต์และเกิดปฏิกิริยาได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งการแพร่ของสารตั้งต้นนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิด้วย กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการแพร่ภายในรูพรุนจะเกิดได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม สารตั้งต้นที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่ารูพรุนของซีโอไลต์จะไม่สามารถแพร่ผ่านรูพรุนของซีโอไลต์



รูปที่ 2.13 การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างสารตั้งต้นของซีโอไลต์ในการแตกตัวเฮปเทนผสม [46]

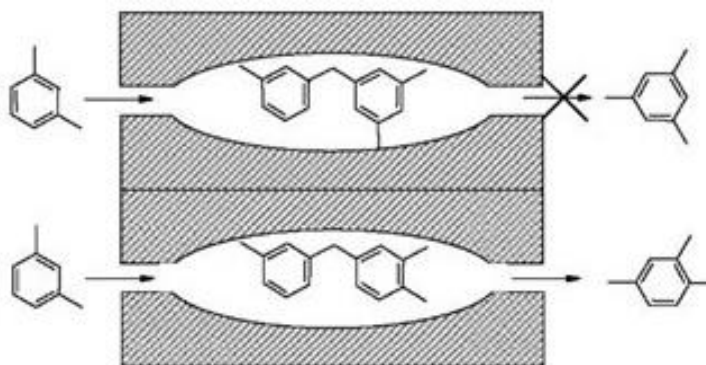
2. การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างผลิตภัณฑ์ (Product shape selective) เมื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากกว่าหนึ่งชนิดภายในรูพรุนของซีโอไลต์ ผลิตภัณฑ์ที่สามารถแพร่ออกจากรูพรุนของซีโอไลต์ได้จะต้องมีขนาดโมเลกุลและมีโครงสร้างความเกะกะที่น้อยกว่าขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ ซึ่งการเลือกจำเพาะต่อรูปร่างของผลิตภัณฑ์เป็นสมบัติที่ขึ้นกับขนาดของผลึกซีโอไลต์

กล่าวคือ เมื่อขนาดผลึกใหญ่ขึ้น จะมีระยะทางในการแพร่มากขึ้น ทำให้การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ตัวอย่างการเลือกจำเพาะต่อรูปร่างของผลิตภัณฑ์ เช่น สำหรับปฏิกิริยาเมทิลเลชันของโทลูอีน (Methylation of toluene) บนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดแซตเอสเอ็ม-ไพร์ จากความเป็นไปได้ทางอุณหพลศาสตร์ พาราไซลีน (p-xylene) เป็นไอโซเมอร์ที่เกิดยากที่สุดแต่เนื่องจากโครงสร้างมีความเกะกะน้อยกว่าจึงแพร่ออกจากรูพรุนของซีโอไลต์ได้เร็วกว่า และทั้งออโรไซลีน (o-xylene) และเมตาไซลีน (m-xylene) ที่เกิดขึ้นในรูพรุนจะถูกเปลี่ยนให้เป็นพาราไซลีนผ่านปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชัน ทำให้ได้พาราไซลีนเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างผลิตภัณฑ์ของซีโอไลต์ในปฏิกิริยาเมทิลเลชันของโทลูอีน [46]

3. การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างสถานะทรานซิชัน (Transition-state shape selective) ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่กำหนดโครงสร้างของสารที่เกิดขึ้น ณ สถานะทรานซิชัน คือ ช่องว่างภายในรูพรุนของซีโอไลต์ เช่น ปฏิกิริยาดิสพรอพอร์ชันเนชัน (Disproportionation) ของเมตาไซลีน ซึ่งเกิดผลิตภัณฑ์ไตรเมทิลเบนซีน (Trimethylbenzene) ได้หลายชนิด โดยที่สถานะทรานซิชันของการเกิด 1,3,5-ไตรเมทิลเบนซีน ต้องใช้พื้นที่ภายในรูพรุนมากกว่า 1,2,4-ไตรเมทิลเบนซีน เมื่อใช้ซีโอไลต์ชนิดฟาวจาไซต์ (Faujasite, FAU) จะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น 1,3,5-ไตรเมทิลเบนซีน แต่เมื่อใช้ซีโอไลต์ชนิดมอร์ดไนต์ (Mordenite, MOR) ซึ่งมีขนาดรูพรุนเล็กกว่า จะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น 1,2,4-ไตรเมทิลเบนซีน ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเลือกจำเพาะต่อรูปร่างสถานะทรานซิชันของซีโอไลต์ในปฏิกิริยาดิสพรอพอร์ชันเนชันของเมตาไซลีน [46]

2.11.1.2 ชนิดของซีโอไลต์ (Zeolite type)

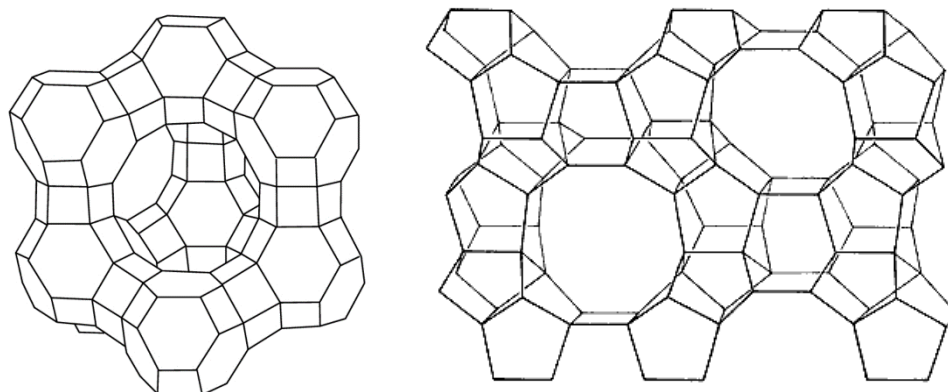
ปัจจุบันชนิดโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์มีมากกว่า 200 ชนิด ซึ่งเป็นแร่ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติประมาณ 40 ชนิด และที่เหลือเป็นซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้น และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นบางตัวนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติและการประยุกต์ใช้ของซีโอไลต์สังเคราะห์

ชนิดของซีโอไลต์	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน (อังสตรอม, °A)	อัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่ออะลูมินา	การประยุกต์ใช้
ซีโอไลต์ชนิดเอ (Zeolite A)	4.1	2 ถึง 5	ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารซักฟอก
ฟาวจาไซต์ (Faujasite, FAU)	7.4	3 ถึง 6	ใช้ในกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา และการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม
มอดีไนต์ (Mordenite, MOR)	6.7 × 7.0	10 ถึง 12	ใช้ในกระบวนการไอโซเมโรเซชัน และกระบวนการแยกไข (Dewaxing)
แซตเอสเอ็ม-ไฟว์ (ZSM-5)	5.2 × 5.8	30 ถึง 200	ใช้ในกระบวนการไอโซเมโรเซชันของไซลีน กระบวนการแอลคิลเลชันของเบนซีน กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการแยกไขด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา และกระบวนการเปลี่ยนเมทานอล

ซีโอไลต์ที่ถูกนำมาใช้ในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิดซ์ ได้แก่ ซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์ วาย และแซตเอสเอ็ม-ไฟว์ ซึ่งโครงสร้างผลึกแสดงดังรูปที่ 2.16 โดยซีโอไลต์ทั้งชนิดเอ็กซ์ และวายมีโครงสร้างผลึกเหมือนกัน แต่มีความแตกต่างกัน คือ ซีโอไลต์ชนิดวายมีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al molar ratio) สูงกว่าซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์ ซึ่งซีโอไลต์ชนิดวายและเอ็กซ์ มีอัตราส่วนโดยโมลระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 3 และ 1 ถึง 1.5

ตามลำดับ อีกทั้งซีโอไลต์ชนิดวายยังมีเสถียรภาพต่อความร้อนสูงกว่าซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์ ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้กันในปัจจุบันจะนิยมใช้ซีโอไลต์ชนิดวายมากกว่า



ซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์, วาย

ซีโอไลต์ชนิดแซตเอสเอ็ม-ไพร์

รูปที่ 2.16 โครงร่างผลึกของซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์ วาย และแซตเอสเอ็ม-ไพร์ [49]

การเพิ่มค่าออกเทนของแกโซลีน สามารถทำได้โดยการลดจำนวนอะตอมของอะลูมิเนียมจากโครงผลึกซีโอไลต์ ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al ratio) เพิ่มขึ้นและทำให้โซเดียมไอออนที่ใช้ดุลประจุลดลง การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะช่วยเพิ่มค่าออกเทนโดยเพิ่มความเป็นโอเลฟินส์ (Olefinicity) และซีโอไลต์ที่มีการลดอะตอมของอะลูมิเนียมนี้จะถูกเรียกว่า อัลตราสเตเบิลวาย (Ultrastable Y, USY) เนื่องจากมีความเสถียรสูงกว่าซีโอไลต์ชนิดวาย

2.11.2 เมทริกซ์

เมทริกซ์ เป็นส่วนประกอบอื่นของตัวเร่งปฏิกิริยานอกเหนือจากซีโอไลต์ และเมทริกซ์ที่ว่องไว (Active matrix) เป็นส่วนประกอบอื่นของตัวเร่งปฏิกิริยานอกเหนือจากซีโอไลต์ที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ตัวอย่างของเมทริกซ์ที่ว่องไว คือ อะลูมินา ซึ่งมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบอสัณฐาน ซึ่งเมทริกซ์ที่ว่องไวนี้จะช่วยเพิ่มสมรรถนะในการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี กล่าวคือ รูพรุนของซีโอไลต์มีขนาดเล็กเกินไปที่จะยอมให้โมเลกุลขนาดใหญ่สามารถแพร่ผ่านเข้ามาในตำแหน่งที่ทำให้เกิดการแตกตัว (Cracking site) ดังนั้นเมทริกซ์ที่ว่องไวจะมีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่ยอมให้โมเลกุลขนาดใหญ่สามารถแพร่ผ่านเข้าและออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยเมทริกซ์ที่ว่องไวจะช่วยให้เกิดการแตกตัวขั้นแรกที่บริเวณตำแหน่งที่ทำให้เกิดการแตกตัว แม้ว่าตำแหน่งกรดของเมทริกซ์จะไม่มี ความจำเพาะเท่ากับตำแหน่งกรดของซีโอไลต์ แต่ตำแหน่งกรดของเมทริกซ์สามารถทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กก่อนที่จะเข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์ นอกจากนี้ เมทริกซ์ที่ว่องไวยังสามารถใช้ธาตุโลหะ เช่น นิกเกิลและวาเนเดียม ซึ่งเป็นพิษต่อซีโอไลต์และทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ

2.11.3 สารเติม

สารเติม เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่จะช่วยเติมเต็มอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา สารเติมที่นิยมใช้คือ เคลย์ (Clay) ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน และจะไม่ให้ความว่องไวต่อตัวเร่งปฏิกิริยาหรือให้เพียงเล็กน้อย แต่จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลและความหนาแน่นที่เหมาะสมต่อการเกิดฟลูอิดซ์ ตัวอย่างเคลย์ที่ถูกใช้ในตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี เช่น ดินขาว (Kaolin)

2.11.4 ตัวประสาน

ตัวประสาน เป็นเสมือนกาวที่ช่วยยึดส่วนประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าด้วยกัน และจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลที่สมบูรณ์ เช่น ความหนาแน่น ความทนทานต่อการสึกกร่อน การกระจายขนาดอนุภาค เป็นต้น

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lappas และคณะ [50] ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพผ่านการแปรรูปร่วมในกระบวนการกลั่นแบบดั้งเดิม ในระดับนำร่องขนาดเล็ก (Small scale pilot plant) ทำการทดลอง (i) การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของชีวมวลบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่อุณหภูมิ 450 และ 500 องศาเซลเซียส จากกระบวนการนี้พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีแทนซิลิกา จะทำให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพลดลงแต่จะมีคุณภาพดีขึ้น ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ไค้ก และถ่านชาร์เพิ่มขึ้น และ (ii) กระบวนการแปรรูปร่วมของน้ำมันแก๊สออยล์กับน้ำมันชีวภาพที่ผ่านการไฮโดรทรีต (Hydrotreated bio-oil) โดยเมื่อทำการไฮโดรทรีตน้ำมันชีวภาพจะสามารถกลั่นแยกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนเบา (Light biomass fast pyrolysis liquid, LBFPL) และส่วนหนัก (Heavy biomass fast pyrolysis liquid, HBFPL) ซึ่งพบว่าน้ำมันชีวภาพส่วนหนักจะมีองค์ประกอบคล้ายน้ำมันแก๊สออยล์สุญญากาศ (Vacuum gas oil, VGO) จึงสามารถนำไปใช้เป็นสารป้อนร่วมกับน้ำมันแก๊สออยล์สุญญากาศในกระบวนการกลั่นได้ โดยในการศึกษาการแปรรูปร่วมนี้จะใช้น้ำมันแก๊สออยล์สุญญากาศผสมกับร้อยละ 15 ของน้ำมัน Light cycle oil (VGO+15%LCO) และใช้น้ำมันแก๊สออยล์สุญญากาศผสมกับร้อยละ 15 ของน้ำมันชีวภาพส่วนหนักรวมกับน้ำมัน Light cycle oil (VGO+15%(LCO+HBFPL)) พบว่าเมื่อผสมน้ำมันชีวภาพส่วนหนักลงในสายป้อนจะให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนและไค้กสูงกว่า ซึ่งแก๊สโซลีนที่ได้จะมีปริมาณสารแอมโรแมติกมากกว่า แต่มีสารพาราฟิน และสารโอเลฟินส์น้อยกว่าเมื่อไม่ได้ผสมน้ำมันชีวภาพส่วนหนัก

Melero และคณะ [51] ศึกษาการแปรรูปร่วมของน้ำมันแก๊สออยล์กับชีวมวลที่มีองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ เช่น น้ำมันปาล์ม ไขมันสัตว์ น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันปรุงอาหาร ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) ด้วยเครื่องปฏิกรณ์

แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed reactor) ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 565 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 12 วินาที อัตราส่วนโดยมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันเป็น 4 ทำการทดลองโดยผสมชีวมวลที่มีองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักในน้ำมันแก๊สออยล์สุญญากาศ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณชีวมวลที่มีองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์จะทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สและโค้กเพิ่มขึ้น ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวจะลดลง และผลิตภัณฑ์ของเหลวนี้จะมีสารประกอบแอมโรแมติกเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการเพิ่มค่าออกเทน นอกจากนี้ภายใต้ภาวะที่ทำการทดลองพบว่าโมเลกุลออกซิเจนในสารประกอบไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้นจะถูกเปลี่ยนรูปให้เป็นน้ำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ผ่านปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ตามลำดับ

Bielansky และคณะ [52] ได้ศึกษาการแปรรูปรวมของน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันเมล็ดเรพกับน้ำมันแก๊สออยล์สุญญากาศบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี ในระดับนำร่อง (Pilot scale) ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized bed reactor) โดยน้ำมันพีชจะถูกผสมเพิ่มขึ้นทีละร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าร้อยละการเปลี่ยนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำมันพีชเพิ่มขึ้น และร้อยละผลได้แกโซลีนค่อนข้างคงที่สำหรับน้ำมันพีชชนิดต่างๆอยู่ในช่วงร้อยละ 40 ถึง 43 โดยน้ำหนัก ยกเว้นที่เมื่อเติมน้ำมันพีชร้อยละ 20 โดยน้ำหนักจะทำให้มีร้อยละผลได้แกโซลีนสูงขึ้น คิดเป็นร้อยละ 46 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันพีชจะทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น ในขณะที่ร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์เบา และกากน้ำมันมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของน้ำมันพีชและน้ำมันแก๊สออยล์สุญญากาศจะให้ผลของการเสริมกันสูงสุด (Maximum synergetic effect) ส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปของสารตั้งต้น นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่าแกโซลีนที่ได้จากสารตั้งต้นผสมทุกอย่างอัตราส่วนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากออกซิเจน ซึ่งมีคุณภาพสูงสังเกตได้จากค่าประสิทธิภาพออกเทนสูง (Research octane number, RON > 98) และค่าการต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูง (Oxidation stability)

Doronin และคณะ [53] ศึกษาการแปรรูปรวมของน้ำมันดอกทานตะวันและน้ำมันแก๊สออยล์สุญญากาศบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี ในระดับห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องจุลแก๊สมันตภาพ (Micro activity test equipment, MAT unit) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง อัตราการป้อนจะถูกควบคุมโดยปั๊มไซริงจ์ (Syringe pump) ซึ่งใช้ในการหาค่าความว่องไว หรือสภาพการเลือกจำเพาะ (Selectivity) ของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสภาพการเลือกจะคิดในรูปของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่สนใจ ส่วนค่าความว่องไวจะอยู่ในรูปของร้อยละการเปลี่ยนของสารป้อน ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 450 ถึง 527 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันเป็น 4 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 วินาที พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันดอกทานตะวัน จะทำให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้

แก๊สเพิ่มขึ้น โดยแก๊สเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันพีซร้อยละ 5 ถึง 10 โดยน้ำหนัก

Thegarid และคณะ [54] ศึกษากระบวนการแปรรูปรวมน้ำมันชีวภาพสองชนิด คือ น้ำมันชีวภาพจากการแตกตัวด้วยความร้อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยการไฮโดรดีออกซิเจนชัน (Hydrodeoxygenated pyrolysis oil, HDO) และน้ำมันชีวภาพจากการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic pyrolysis oil, CPO) กับน้ำมันแก๊สออยล์สุญญากาศ ในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองที่อัตราส่วนโดยมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันอยู่ในช่วง 3 ถึง 8 พบว่าน้ำมันชีวภาพจากการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแอสเอเอ็ม-ไพร์ จะสามารถนำมาใช้ในกระบวนการแปรรูปรวมกับน้ำมันแก๊สออยล์สุญญากาศได้โดยไม่ต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพก่อน ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายและพลังงานในขั้นตอนการไฮโดรดีออกซิเจนชัน อย่างไรก็ตามการแปรรูปรวมน้ำมันชีวภาพสองชนิด (HDO และ CPO) กับน้ำมันแก๊สออยล์สุญญากาศ จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในแง่ของการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ แต่มีความแตกต่างกันมากในแง่ของคุณภาพผลิตภัณฑ์ เช่น น้ำมันชีวภาพจากการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สอินทรีย์ที่มีสารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) ปริมาณสูงกว่า หรือปริมาณสารโอเลฟินส์ และสารแอมโรแมติกที่สูงกว่า นอกจากนั้นร้อยละผลได้ของสารอินทรีย์จากน้ำมันชีวภาพจากการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับร้อยละผลได้จากน้ำมันชีวภาพจากการแตกตัวด้วยความร้อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยการไฮโดรดีออกซิเจนชันที่จะมีค่าประมาณร้อยละ 24 โดยน้ำหนัก

Siauw และคณะ [55] ศึกษาการแปรรูปรวมน้ำมันแก๊สออยล์หนัก (Heavy gas oil, HGO) ที่ได้จากรายน้ำมัน (Oil sand) กับน้ำมันคาโนลา ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักบนตัวเร่งปฏิกิริยาสมดุล (Equilibrium catalyst) ในระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 490 ถึง 530 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยมวลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันอยู่ในช่วง 4 ถึง 12 พบว่าเมื่อผสมน้ำมันคาโนลาในน้ำมันแก๊สออยล์หนักจะทำให้ได้ร้อยละการเปลี่ยน ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สแห้ง และแก๊สปิโตรเลียมเหลว มีค่าสูงกว่าการใช้น้ำมันแก๊สออยล์หนักเป็นสารป้อนเพียงตัวเดียว ซึ่งการเพิ่มขึ้นของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊สแห้งมาจากการเกิดปฏิกิริยาดิคาร์บอกซีเลชัน และปฏิกิริยาดิคาร์บอนิลเลชันของสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ในสายป้อนที่จะทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ในขณะที่ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวจะมีค่าต่ำกว่า

วิชชากร จารุศิริ [56] ศึกษาการแปรรูปน้ำมันพีซ น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และพลาสติกใช้แล้ว ให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน และอัตราการไหลของสาร

ป้อนน้ำมันพืชต่อน้ำมันหล่อลื่นต่อพอลิพรอพิลีนเป็น 0.7 ต่อ 0.1 ต่อ 0.2 เมื่อนำผลิตภัณฑ์ของเหลว มาวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น พบว่าที่ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 5 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของ สารป้อน 1.23 กรัมต่อนาที บนตัวเร่งปฏิกิริยา 5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ จะได้ร้อยละของแก๊สไฮโดรเจน สูงสุดที่ร้อยละ 50.95 โดยน้ำหนัก เคโรซีนร้อยละ 10.38 โดยน้ำหนัก แก๊สออยล์ร้อยละ 21.68 โดย น้ำหนัก และกากน้ำมันร้อยละ 16.99 โดยน้ำหนัก แล้วนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวไป กลั่นลำดับส่วนในช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึง 200 องศาเซลเซียส บนเครื่องกลั่นขนาดกำลังการกลั่น 1 ลิตรต่อชั่วโมง จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจนสังเคราะห์ที่มีสมบัติทางเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับน้ำมัน เบนซินออกเทน 95

ปิยนุช ธรรมานิช [57] ศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันมะพร้าวบนตัวเร่งปฏิกิริยา เอซแซตเอสเอ็ม-ไฟว์ (HZSM-5) ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล สองระดับเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ 360 ถึง 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 ถึง 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.05 ถึง 0.5 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 1 ถึง 3 บาร์ พบว่าภาวะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิ 391.10 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำ ปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ซึ่งจะได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันมากที่สุดร้อยละ 69.58 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์แก๊สร้อย ละ 21.87 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ของแข็งร้อยละ 8.55 โดยน้ำหนัก และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ของเหลวจะประกอบด้วยแนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์ และกากน้ำมันร้อยละ 31.52 16.51 38.90 3.65 และ 9.42 โดยน้ำหนัก

กฤษณิ ปิ่นเวหา [58] ศึกษาการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่ง ปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิ 410 ถึง 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 ถึง 60 นาที ความดัน ไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 ถึง 5 บาร์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 ถึง 5 โดยน้ำหนัก ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละ ผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Design- expert พบว่าภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการแตกตัวนี้ คือ ที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส

ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 46 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1.12 โดยน้ำหนัก และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมมาวิเคราะห์ ปริมาณจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 78.02 โดยน้ำหนัก แก๊สไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 17.23 โดย น้ำหนัก กากของแข็งร้อยละ 4.75 โดยน้ำหนัก และวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วย เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น พบว่ามีปริมาณเนฟทาร้อยละ 37.41 โดยน้ำหนัก และ ดีเซลร้อยละ 41.33 โดยน้ำหนัก



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากกระบวนการแปรรูปรวม พร้อมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ

3.1 เครื่องปฏิกรณ์และส่วนประกอบ

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (Microreactor) ปริมาตร 70 มิลลิลิตร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) SUS 316 มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ด้านบนมีชุดฝาปิดทำจากสแตนเลส มีช่องใส่เทอร์โมคัปเปิล สำหรับวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ มีชุดอุปกรณ์สำหรับอัดแก๊ส และวาล์วนิรภัย ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยเครื่องปฏิกรณ์สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส และความดันสูงสุดไม่เกิน 10 เมกะพาสคัล



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

3.1.2 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลแบบเค (K Type Thermocouple) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร ชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล (Temperature controller) ที่ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยัง

ขดลวดไฟฟ้าและตัวจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิได้ในระดับ ± 10 องศาเซลเซียส และขดลวดให้ความร้อนที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้า 240 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 450 วัตต์

3.1.3 อุปกรณ์ควบคุมการแกว่งเครื่องปฏิกรณ์ โดยจะใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนแกนหมุน และสามารถปรับความเร็วรอบของการแกว่งได้



รูปที่ 3.2 ชุดทดลองที่ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและอุปกรณ์ควบคุมการแกว่งเครื่องปฏิกรณ์

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 ชุดกรองสุญญากาศ ประกอบด้วยปั๊มดูดอากาศที่ต่อกับชุดเครื่องแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เพื่อกรองแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวออกจากของแข็งแบบสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว (Glass Microfiber Filter)



รูปที่ 3.3 ชุดกรองสุญญากาศ

3.2.2 กระจกกรองใยแก้ว

3.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.2.4 ตู้อบ (Oven)

3.2.5 เตาเผา (Furnace)

3.2.6 กระจกทึบ ฟอยล์อะลูมิเนียม

3.2.7 นาฬิกาจับเวลา

3.2.8 เครื่องแก้ว เช่น ปีกเกอร์ แท่งแก้วคนสาร กรวยกรอง หลอดหยด เป็นต้น

3.2.9 ขวดใส่ตัวอย่างน้ำมันขนาด 30 มิลลิลิตร

3.3 สารตั้งต้นและสารเคมี

3.3.1 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

3.3.2 น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

3.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

3.2.4 แก๊สไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 จากบริษัท บางกอกอินดัสเทรียลแก๊ส จำกัด

3.2.5 ตัวทำละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (Carbon disulfide) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 ยี่ห้อ CARLO ERBA

3.2.6 โทลูอีน (Toluene) เกรดการค้า

3.4 เครื่องมือวิเคราะห์

3.3.1 เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN analyzer) ยี่ห้อ LECO รุ่น CHNSO ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ใช้วิเคราะห์หาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน



รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน

3.3.2 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter) ยี่ห้อ LECO รุ่น AC-500 ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ใช้วิเคราะห์ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมัน



รูปที่ 3.8 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์

3.3.3 เครื่องวัดความหนืด (Viscometer) ยี่ห้อ BROOKFIELD รุ่น DV-III Ultra ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ใช้วิเคราะห์ค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445 สามารถวัดความหนืดได้ตั้งแต่ 1 ถึง 320,000,000 เซนติพอยส์ และมีความเร็วรอบ 0.01 ถึง 250 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความหนืด

3.3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น (Simulated distillation gas chromatograph) จากบริษัท เอจิลেন্ট เทคโนโลยีส์ (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น GC7890A ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ใช้วิเคราะห์การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM D2887 ใช้คอลัมน์แบบกะปิลลารี (Capillary column) จากบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น DB-1 มีความยาว 10 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตร และความหนาของชั้นฟิล์มของเฟสคงที่ (Stationary phase) ที่อยู่ในคอลัมน์ 2.65 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.10 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น

3.3.5 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometer) ยี่ห้อ AXIOS รุ่น PW 4400 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 3.11 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์

3.3.6 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer) จากบริษัท Bruker AXS รุ่น D8 Discover ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 3.12 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์

3.3.7 เครื่องวัดพื้นที่ผิว (Surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน ยี่ห้อ Micromeritic รุ่น ASAP2020 ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่องวัดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

3.3.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas chromatograph-mass spectrometer, GC-MS) จากบริษัท เอจิลেন্ট เทคโนโลยีส์ (ประเทศไทย) จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ใช้วิเคราะห์หาชนิดองค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890A และเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น GCMS5975C ใช้คอลัมน์แบบกะปิลลารี จากบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น HP-5MS มีความยาว 30 เมตรเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร และความหนาของชั้นฟิล์มของเฟสคงที่ที่อยู่ในคอลัมน์ 0.25 ไมโครเมตร ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 350 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.14 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปกโตรมิเตอร์

3.3.9 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum one ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ใช้วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีใช้หลักการกระจายแสง (Dispersion) ของสเปกตรัมการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงอินฟราเรด



รูปที่ 3.15 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 เตรียมน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว โดยทำการกรองด้วยกระดาษกรอง ยี่ห้อวอทแมน (Whatman) เบอร์ 40 เพื่อแยกสิ่งเจือปนต่างๆในน้ำมันใช้แล้วออก และเก็บน้ำมันใช้แล้วที่กรองแล้วในภาชนะปิดสนิท จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว ดังนี้

3.5.1.1 วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วก่อนทำการทดลองด้วยเครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก

3.5.1.2 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น เพื่อทราบการกระจายองค์ประกอบของน้ำมันตามคาบจุดเดือดต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM D2887

3.5.1.3 วิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

3.5.1.4 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ตามมาตรฐาน ASTM D3176

3.5.1.5 วิเคราะห์ค่าความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM D2015

3.5.1.6 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว ได้แก่ ค่าความหนืด ตามมาตรฐาน ASTM D445 และค่าความหนาแน่น ตามมาตรฐาน ASTM D1298

3.5.2 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว โดยทำการเผา (Calcined) ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (Desiccator) จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ดังนี้

3.5.2.1 วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

3.5.2.2 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

3.5.2.3 วิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน

3.5.3 ออกแบบการทดลองโดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ

3.5.3.1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา คือ 350 380 410 440 องศาเซลเซียส

3.5.3.2 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา คือ 30 45 60 75 นาที

3.5.3.3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว คือ ร้อยละ 1 3 5 โดยน้ำหนัก และไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา

3.5.3.4 อัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0 9:1 7:3 5:5 3:7 1:9 และ 0:10

3.5.4 การทดลองการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว

3.5.4.1 ชั่งน้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กพร้อมแหวนรอง และใส่น้ำมันใช้แล้วตามอัตราส่วนที่กำหนด ปริมาณ 15 กรัม

3.5.4.2 ชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาตามภาวะที่กำหนด และใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ พร้อมชั่งน้ำหนักกรวมก่อนการทดลอง (น้ำหนักกรวมของเครื่องปฏิกรณ์ แหวนรอง น้ำมันใช้แล้ว และ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว) แล้วปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ให้แน่น

3.5.4.3 นำเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบแล้วมาทำการไล่อากาศที่อยู่ภายในออกโดยทำการอัดแก๊สไนโตรเจนแล้วปล่อยออก จากนั้นตรวจสอบรอยรั่วของบริเวณข้อต่อต่างๆด้วยน้ำสบู่

3.5.4.4 ต่อเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิล ชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล และขดลวดให้ความร้อน โดยทำการหุ้มฉนวนกันความร้อน เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง จากนั้นเปิดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิโดยตั้งอุณหภูมิตามภาวะที่กำหนด และจะเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์คงที่เท่ากับที่ตั้งไว้ พร้อมกับเปิดอุปกรณ์ควบคุมการแกว่งเครื่องปฏิกรณ์

3.5.4.5 เมื่อครบระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ทำการลดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง แล้วลดฉนวนกันความร้อนและขดลวดให้ความร้อนออก จากนั้นปล่อยแก๊สที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ออก

3.5.4.6 เปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ออก แล้วชั่งน้ำหนักกรวมหลังการทดลอง (น้ำหนักกรวมของเครื่องปฏิกรณ์ แหวนรอง ผลิตภัณฑ์ของเหลว ผลิตภัณฑ์ของแข็ง และตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว) ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊ส} = (\text{น้ำหนักกรวมก่อนการทดลอง} - \text{น้ำหนักกรวมหลังการทดลอง}) / \text{ปริมาณน้ำมันใช้แล้วที่ใช้ในการทดลอง} \quad (3.1)$$

3.5.4.7 แยกผลิตภัณฑ์ของเหลวออกจากผลิตภัณฑ์ของแข็งโดยการกรองแบบสุญญากาศด้วยกระดาษกรองใยแก้ว แล้วเก็บผลิตภัณฑ์ของเหลวที่กรองแล้วไว้ในขวดแก้ว เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

3.5.4.8 เช็ดทำความสะอาดเครื่องปฏิกรณ์ด้วยกระดาษทิชชูที่ห่อด้วยฟอยล์อะลูมิเนียมหลังผ่านการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และใช้โหลอินชิตล้างคราบน้ำมันที่ติดอยู่กับเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ของแข็ง กระดาษกรองใยแก้ว และกระดาษทิชชูห่อด้วยฟอยล์อะลูมิเนียมไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็ง} = (\text{น้ำหนักกรวมของกระดาษกรองใยแก้ว กระดาษทิชชู ฟอยล์อะลูมิเนียม กากของแข็งหลังอบ} - \text{น้ำหนักกรวมของกระดาษกรองใยแก้ว กระดาษทิชชู ฟอยล์อะลูมิเนียม ก่อนอบ} - \text{น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว}) / \text{ปริมาณน้ำมันใช้แล้วที่ใช้ในการทดลอง} \quad (3.2)$$

3.5.4.9 คำนวณปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากสมการที่ 3.3

$$\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว} = 100 - \text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์แก๊ส} - \text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ของแข็ง} \quad (3.3)$$

3.5.4.10 นำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้มาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น เพื่อทราบการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM D2887 และคำนวณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้

3.5.5 วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองที่ภาวะที่เหมาะสม ดังนี้

3.5.5.1 วิเคราะห์หาชนิดองค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปกโตรมิเตอร์

3.5.5.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

3.5.5.3 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ ตามมาตรฐาน ASTM D3176

3.5.5.4 วิเคราะห์ค่าความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM D2015

3.5.5.5 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลว ได้แก่ ค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445 และค่าความหนาแน่น ตามมาตรฐาน ASTM D1298

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก การดำเนินงานวิจัยเน้นการนำน้ำมันใช้แล้วมาแปรรูปร่วมกันเพื่อให้เกิดเป็นเชื้อเพลิงเหลว งานวิจัยนี้จึงออกแบบการทดลองโดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณ องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น ตามคาบจุดเดือดตามมาตรฐาน ASTM D2887 และสมบัติของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวม ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ประกอบด้วย อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว และ อัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น

4.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วก่อนการแตกตัว

องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วก่อนนำไปศึกษาการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น เพื่อทราบการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM D2887 ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบตามคาบจุดเดือดได้คือ แนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์ และกากน้ำมัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วก่อนการแตกตัว

จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว	ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว
IBP ถึง 200	แนฟทา (C ₅ ถึง C ₁₂)	0.00	0.00
200 ถึง 250	เคโรซีน (C ₁₂ ถึง C ₁₅)	3.00	0.00
250 ถึง 370	แก๊สออยล์ (C ₁₅ ถึง C ₃₃)	10.00	15.00
370 ถึง FBP	กากน้ำมัน (>C ₃₃)	87.00	85.00

หมายเหตุ : IBP คือ Initial Boiling Point (จุดเดือดเริ่มต้น)

FBP คือ Final Boiling Point (จุดเดือดสุดท้าย)

จากตารางที่ 4.1 พบว่าในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมีองค์ประกอบ 3 ชนิด คือ เคโรซีน แก๊สออยล์ และกากน้ำมันเท่ากับร้อยละ 3.00 10.00 และ 87.00 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในขณะที่ในน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วมีองค์ประกอบ 2 ชนิด คือ แก๊สออยล์และกากน้ำมันเท่ากับร้อยละ 15.00 และ 85.00 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบหลักทั้งในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว คือ แก๊สออยล์ และกากน้ำมัน ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และมีความหนืดสูง [56] จึงไม่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ได้โดยตรง แต่ต้องนำมาปรับปรุงหรือเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันใช้แล้วให้มีขนาดที่เหมาะสมและมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิงก่อนที่จะนำไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์โดยตรง ด้วยการแตกตัวด้วยความร้อนซึ่งอาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วยหรือการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของน้ำมันใช้แล้วให้มีขนาดเล็กลง และมีความสมบัติทางกายภาพและทางเคมีใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิง

4.1.2 องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว วิเคราะห์จากสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

องค์ประกอบกรดไขมัน		ร้อยละโดยน้ำหนัก
C 12:0	กรดลอริก	0.33
C 14:0	กรดไมริสติก	0.99
C 15:0	กรดเพนตะเดคาโนอิก	0.06
C 16:0	กรดปาล์มติก	36.05
C 17:0	กรดเฮปตะเดคาโนอิก	0.12
C 18:0	กรดสเตียริก	4.52
C 20:0	กรดอะราคิโดนิก	0.24
C 22:0	กรดบีฮีนิก	0.05
C 24:0	กรดลิกโนซีริก	0.15
กรดไขมันชนิดอิ่มตัว		42.38
C 16:1	กรดปาล์มมิโนเลอิก	1.07
C 18:1	กรดโอเลอิก	43.4
C 18:2	กรดไลโนเลอิก	12.6
กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว		57.07
ไม่สามารถระบุได้		0.42

จากตารางที่ 4.2 พบว่าน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วประกอบด้วยกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวร้อยละ 42.38 โดยน้ำหนัก ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปกรดปาล์มิติก และกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวร้อยละ 57.07 โดยน้ำหนัก ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปกรดโอเลอิก และกรดไลโนเลอิก

กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวมีความไวต่อการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้งานในอุตสาหกรรม โดยอัตราการดูดซึมออกซิเจนของกรดไลโนเลอิกต่อกรดโอเลอิก คือ 100 ต่อ 1 อย่างไรก็ตาม กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวจะมีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวต่ำกว่าของกรดไขมันชนิดอิ่มตัวที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเท่ากัน มีสมบัติไม่เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นของกระบวนการต่างๆทางเคมี ดังนั้นเนื่องจากน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วนี้ มีปริมาณกรดโอเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดไม่อิ่มในปริมาณสูง จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการต่างๆทางเคมีได้

4.1.3 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของสารตั้งต้น ได้แก่ การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ การวิเคราะห์ค่าความร้อน การวิเคราะห์ค่าความหนืด และการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

สมบัติทางกายภาพ	น้ำมันหล่อลื่น ใช้แล้ว	น้ำมันปรุงอาหาร ใช้แล้ว	มาตรฐาน
องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)			ASTM D3176
• คาร์บอน	82.03	74.54	
• ไฮโดรเจน	14.78	13.24	
• ไนโตรเจน	0.18	1.02	
• ออกซิเจน ^a	3.01	11.20	
สูตรเอมพิริคัล	CH _{2.16} N _{0.001} O _{0.03}	CH _{2.13} N _{0.01} O _{0.11}	
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	42.501	37.126	ASTM D2015
ค่าความหนืด ^b (ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที)	115.73	57.83	ASTM D445

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

สมบัติทางกายภาพ	น้ำมันหล่อลื่น ใช้แล้ว	น้ำมันปรุงอาหาร ใช้แล้ว	มาตรฐาน
ค่าความหนาแน่น ^c (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.89	0.92	ASTM D1298

หมายเหตุ : a คือ โดยผลต่าง (by difference)

b คือ ค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส

c คือ ค่าความหนาแน่นที่ 15.6 องศาเซลเซียส

4.1.3.1 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

จากตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว ตามมาตรฐาน ASTM D3176 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ยี่ห้อ LECO รุ่น CHNSO เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน พบว่าน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วมีธาตุองค์ประกอบหลัก คือ คาร์บอนและไฮโดรเจน เนื่องจากสารตั้งต้นทั้งสองเป็นสารไฮโดรคาร์บอน และยังพบอีกว่า ในน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมีปริมาณออกซิเจนเท่ากับร้อยละ 3.01 โดยน้ำหนักแห้ง ในขณะที่น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วจะมีปริมาณออกซิเจนเท่ากับร้อยละ 11.20 โดยน้ำหนักแห้ง เนื่องมาจากเกิดการออกซิเดชัน โดยออกซิเดชันจะเกิดได้เมื่อน้ำมันสัมผัสกับอากาศแล้วเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันและออกซิเจนในอากาศ นอกจากนั้นในสารตั้งต้นทั้งสองยังมีปริมาณไนโตรเจนเพียงเล็กน้อย เนื่องมาจากเกิดการสัมผัสกับไนโตรเจนในอากาศ

4.1.3.2 ค่าความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

จากตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว ตามมาตรฐาน ASTM D2015 ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ ยี่ห้อ LECO รุ่น AC-500 พบว่าน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วมีค่าความร้อนเท่ากับ 42.501 และ 37.126 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

4.1.3.3 ค่าความหนืดและค่าความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว

จากตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D445 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืด (Viscometer) พบว่าน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วมีค่าความหนืดสูง โดยน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วมี

ค่าความหนืดเท่ากับ 115.73 และ 57.83 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งสารตั้งต้นทั้งสองไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์โดยตรง แต่ต้องนำมาปรับปรุงให้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิงก่อนที่นำไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ และผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นที่ 15.6 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D1298 พบว่าน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.89 และ 0.92 กรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและเก็บไว้ในโถสุญญากาศ จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

4.2.1 องค์ประกอบธาตุของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence spectroscopy, XRF)

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

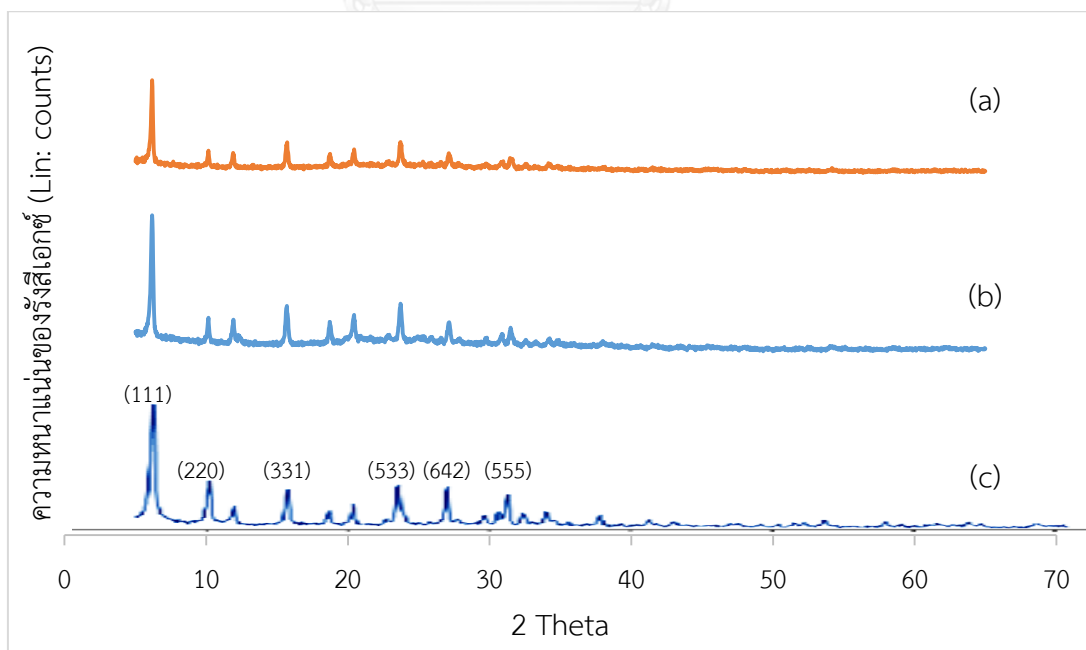
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว		ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Na	0.854	Na	0.868
Al	37.368	Al	32.707
Si	44.202	Si	49.948
P	0.07	P	0.085
S	0.666	S	0.645
Cl	3.08	Cl	1.963
K	0.153	K	0.141
Ca	0.125	Ca	0.12
Ti	2.078	Ti	1.964
Fe	3.486	Fe	3.398
Sr	0.054	Sr	0.056
Y	0.031	Y	0.027

ตารางที่ 4.4 (ต่อ) องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว		ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Zr	0.079	Zr	0.08
La	7.755	La	7.999

จากตารางที่ 4.4 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสที่นำมาใช้นี้ มีธาตุองค์ประกอบหลัก คือ ธาตุอะลูมิเนียมและซิลิกอน ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของซีโอไลต์ โดยสามารถคำนวณอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al ratio) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ได้เท่ากับ 1.1 และ 1.5 ตามลำดับ และทำการวิเคราะห์โครงสร้างโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRD เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ แสดงดังรูป 4.3

4.2.2 โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD)



รูปที่ 4.1 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนเผา (a) หลังเผา (b) และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดวาย (c)

รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนเผา (a) และหลังเผา (b) ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าลักษณะพีคของที่ปรากฏในรูปทั้งสองมีความใกล้เคียงกับลักษณะพีคของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดวาย (c) ที่ตำแหน่งประมาณ 6.233 10.160 15.640 23.636 27.043 และ 31.379 องศา มีการจัดเรียงตัว 6 ระนาบ ได้แก่ (111) (220) (331) (533) (642) และ (555) ตามลำดับ [59] ดังนั้นจึงสามารถระบุได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่ใช้นี้มีองค์ประกอบของซีโอไลต์ชนิดวาย

4.2.3 การหาค่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน

ตารางที่ 4.5 พื้นที่ผิวรูพรุน ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี	พื้นที่ผิวรูพรุน (ตารางเมตร ต่อกรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (นาโนเมตร)
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนเผา	112.406	0.129	4.350
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วหลังเผา	119.394	0.136	4.637
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่ *	215.537	0.127	2.366

* ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่ (Fresh FCC catalyst) หรือตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีเชิงพาณิชย์ (Commercial FCC catalyst)

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าพื้นที่ผิวรูพรุน (Surface area) ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average pore size) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน (Brunauer-Emmett-Teller, BET) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วหลังเผามีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก 112.406 เป็น 119.394 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 0.129 เป็น 0.136 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 4.350 เป็น 4.637 นาโนเมตร เนื่องจากการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว เป็นการกำจัดสารปนเปื้อน และทำให้เกิดบริเวณที่เป็นตำแหน่งที่ว่างไว (Active site) สำหรับส่งเสริมปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนจากการเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาทำให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งเสริมการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น นอกจากนี้สมบัติของขนาดรูพรุนเฉลี่ยเป็นรูพรุนขนาดกลางทำให้เป็นสมบัติหนึ่งในการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่ง

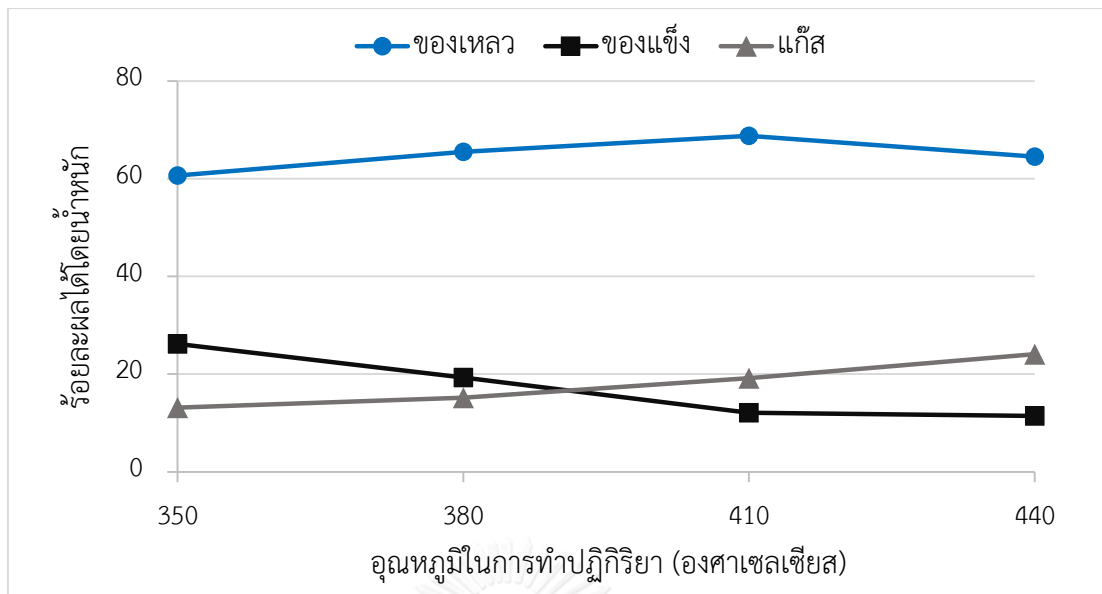
ปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่ขนาดรูพรุนมีผลต่อความจำเพาะต่อรูปร่าง (Shape selectivity) ในการเลือกเกิดเลือกเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำให้ส่งเสริมการแตกตัวของโมเลกุลของแนพทา (C_5 ถึง C_{12}) โมเลกุลของแคโรซีน (C_{12} ถึง C_{14}) และโมเลกุลของแก๊สออยล์ (C_{15}) [60] นอกจากนั้น เมื่อเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวรูพรุน ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใหม่มีค่าพื้นที่ผิวรูพรุนสูง ทำให้มีบริเวณที่เป็นตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามาก จึงมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic activation) ที่มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ซึ่งจะส่งเสริมให้สารตั้งต้นเกิดการแตกตัวได้ผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น [61] เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีเป็นตัวเร่งที่มีความว่องไวและมีความจำเพาะในการเกิดปฏิกิริยาสูง อีกทั้งมีความเสถียรและสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง จึงนำไปในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี สำหรับแยกแก๊สปิโตรเลียมเหลวในโรงกลั่นน้ำมัน

4.3 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการแปรรูปร่วมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

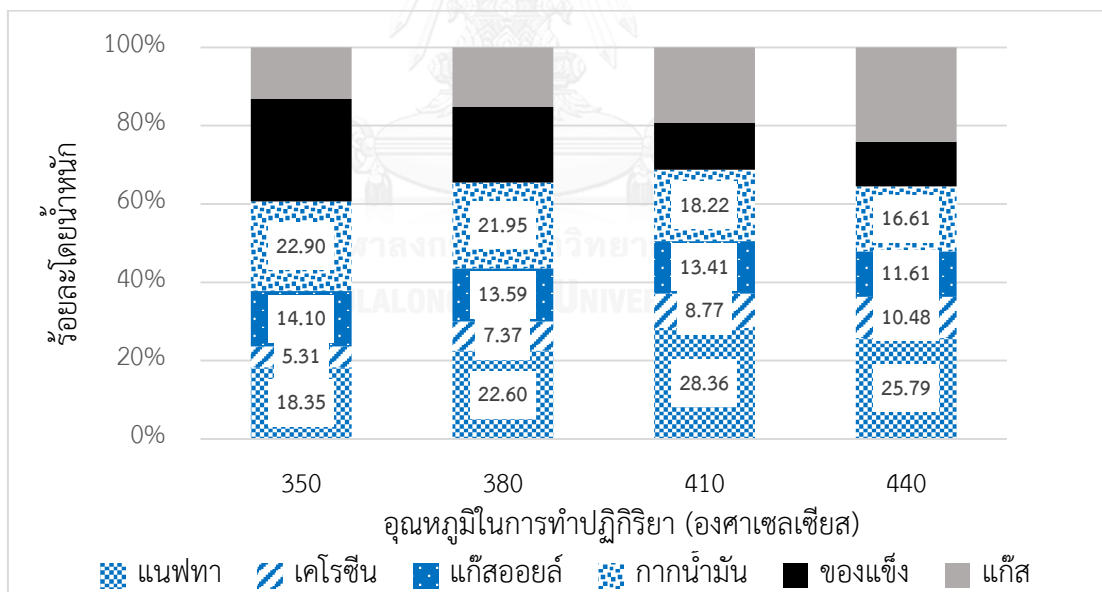
งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้และการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปร่วมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 30 ถึง 75 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในช่วงร้อยละ 1 ถึง 5 โดยน้ำหนัก และไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0 9:1 7:3 5:5 3:7 1:9 และ 0:10

4.3.1 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละผลได้และการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

ผลของร้อยละผลได้และการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในช่วง 350 ถึง 440 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0 แสดงดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และแก๊ส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0



รูปที่ 4.3 การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0

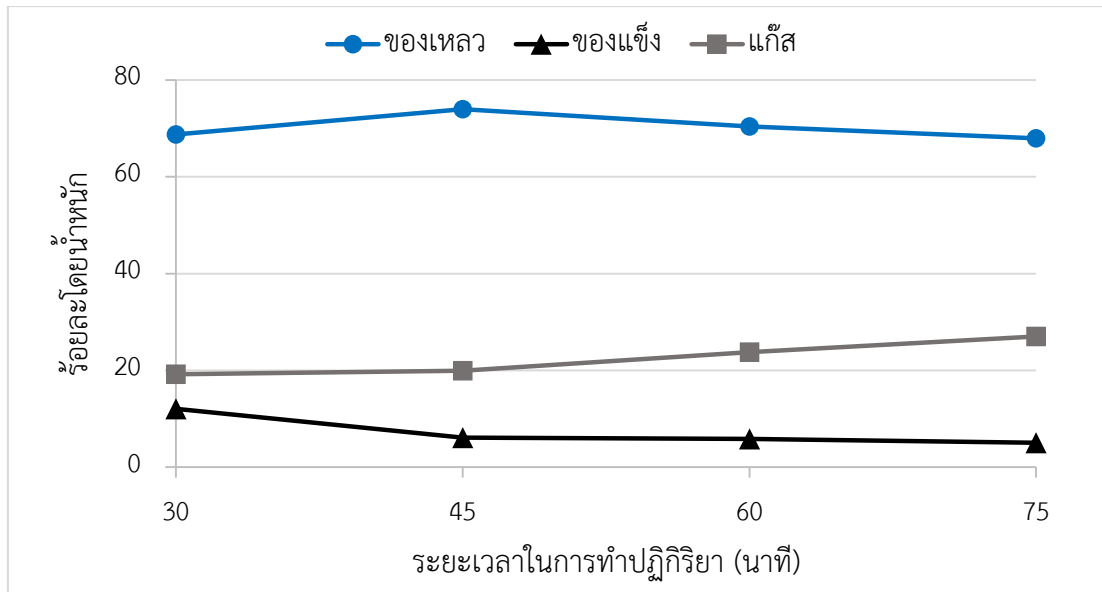
จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จะได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว และผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็งจะลดลง เนื่องมาจาก

ปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดได้ดี และเกิดการแตกพันธะระหว่างโมเลกุลได้อย่างต่อเนื่อง โดยในช่วงแรกของการแตกตัวด้วยความร้อน อุณหภูมิจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอน โดยจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งทำให้พันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนแตกออกจากกันเกิดเป็นอนุมูลอิสระที่จะไปทำปฏิกิริยาในขั้นต่อไป และจะทำให้เกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องส่งผลให้สารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่แตกตัวเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็ก และเมื่อยังคงให้อุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่องพร้อมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วยก็จะส่งผลให้สารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็กเกิดการแตกตัวต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 350 และ 380 องศาเซลเซียส จะได้อ้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเท่ากับร้อยละ 60.66 และ 65.51 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 410 องศาเซลเซียส จะได้อ้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับร้อยละ 68.75 โดยน้ำหนัก ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเป็น 440 องศาเซลเซียส จะได้อ้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงเป็นร้อยละ 64.49 โดยน้ำหนัก

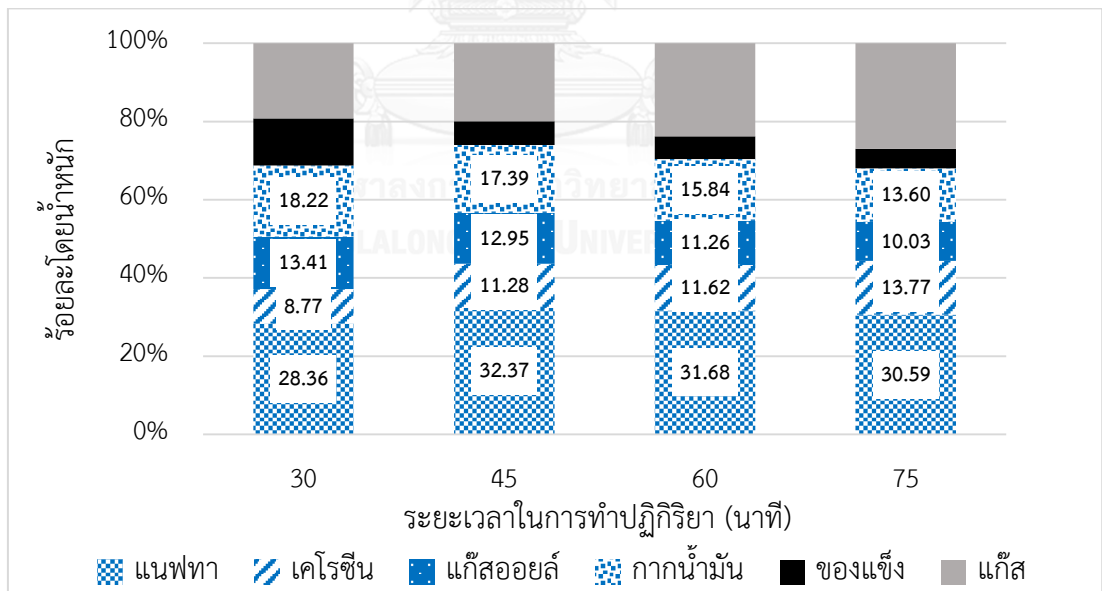
เมื่อวิเคราะห์การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น ผลการวิเคราะห์จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น สารไฮโดรคาร์บอนจะเกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง ทำให้แนฟทาและเคโรซีนมีปริมาณเพิ่มขึ้น ในขณะที่แก๊สออยล์มีปริมาณลดลง และโดยเฉพาะอย่างยิ่งกาบน้ำมันซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะมีปริมาณลดลงเช่นกัน ซึ่งแนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์เป็นองค์ประกอบที่มีประโยชน์และเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยปริมาณรวมขององค์ประกอบทั้งสามในผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 380 410 และ 440 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 37.78 43.56 50.54 และ 47.88 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส มีปริมาณของแนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์ในผลิตภัณฑ์เท่ากับร้อยละ 28.36 8.77 และ 13.41 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังนั้นอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ให้ปริมาณและการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เหมาะสม คือ 410 องศาเซลเซียส

4.3.2 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละผลได้และการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

ผลของร้อยละผลได้และการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 30 ถึง 75 นาที ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0 แสดงดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และแก๊ส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0

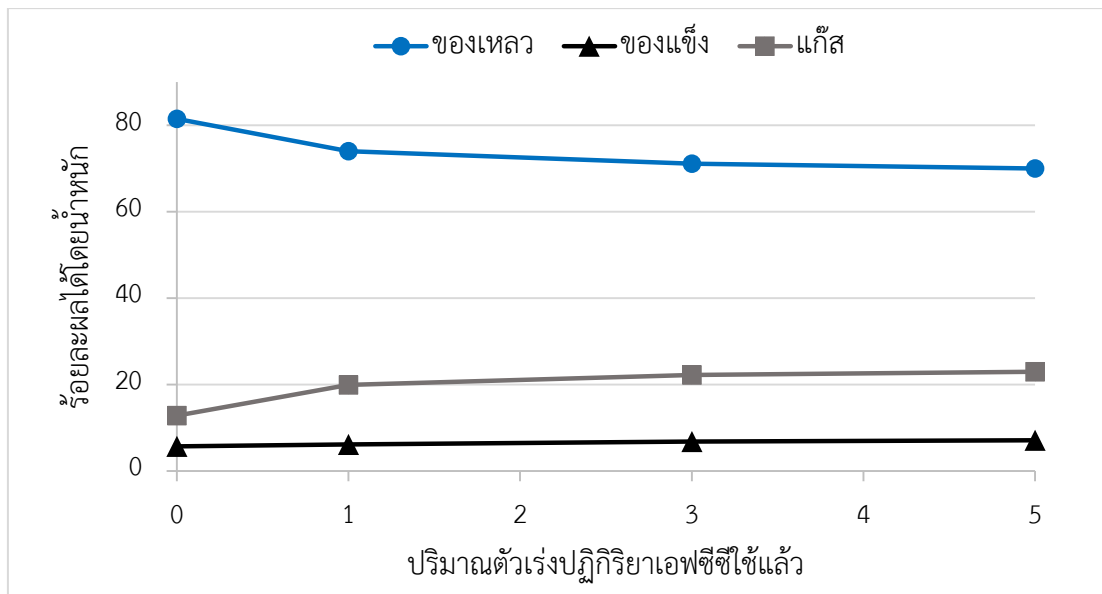


รูปที่ 4.5 การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0

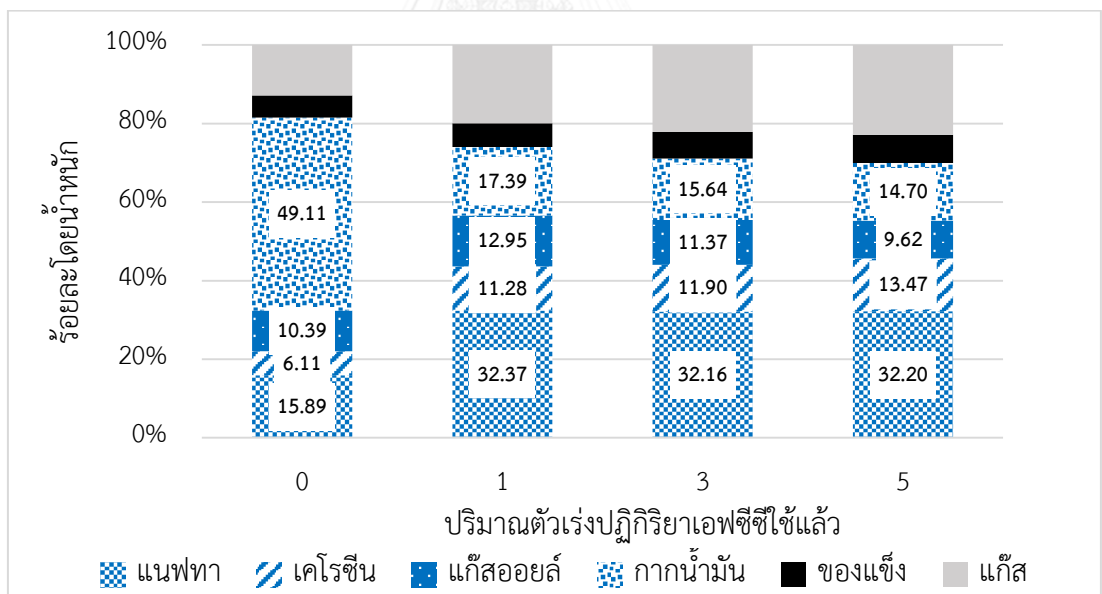
จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาทีเป็น 45 นาที จะได้รับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 68.75 โดยน้ำหนักเป็นร้อยละ 73.99 โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากการให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยาเป็นเวลานานจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวได้มากขึ้น อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยายังเข้ามามีบทบาทช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาการแตกตัวเกิดได้ดีขึ้น และเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาดำเนินต่อไป อิทธิพลของอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยายังมีผลต่อการแตกตัวทำให้สารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดกลางแตกตัวต่อไปเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและแก๊สไฮโดรคาร์บอนตามลำดับ ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น แต่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงเป็นร้อยละ 70.40 และ 67.98 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 45 นาที เป็น 60 และ 75 นาที ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ซึ่งพบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้กากน้ำมันซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่มีปริมาณลดลง ในขณะที่แนฟทาและเคโรซีนซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กกว่ามีปริมาณมากขึ้น และจากรูปที่ 4.5 พบว่าปริมาณรวมของแนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 45 60 และ 75 นาทีเท่ากับร้อยละ 50.54 56.60 54.56 และ 54.39 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที มีปริมาณของแนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์ในผลิตภัณฑ์เท่ากับร้อยละ 32.37 11.28 และ 12.95 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังนั้นระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ให้ปริมาณและการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เหมาะสม คือ 45 นาที

4.3.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่มีต่อร้อยละผลได้และการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

ผลของร้อยละผลได้และการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในช่วงร้อยละ 1 ถึง 5 โดยน้ำหนัก และไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0 แสดงดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และแก๊ส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0



รูปที่ 4.7 การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0

จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจากร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 3 และ 5 โดยน้ำหนัก จะได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้การ

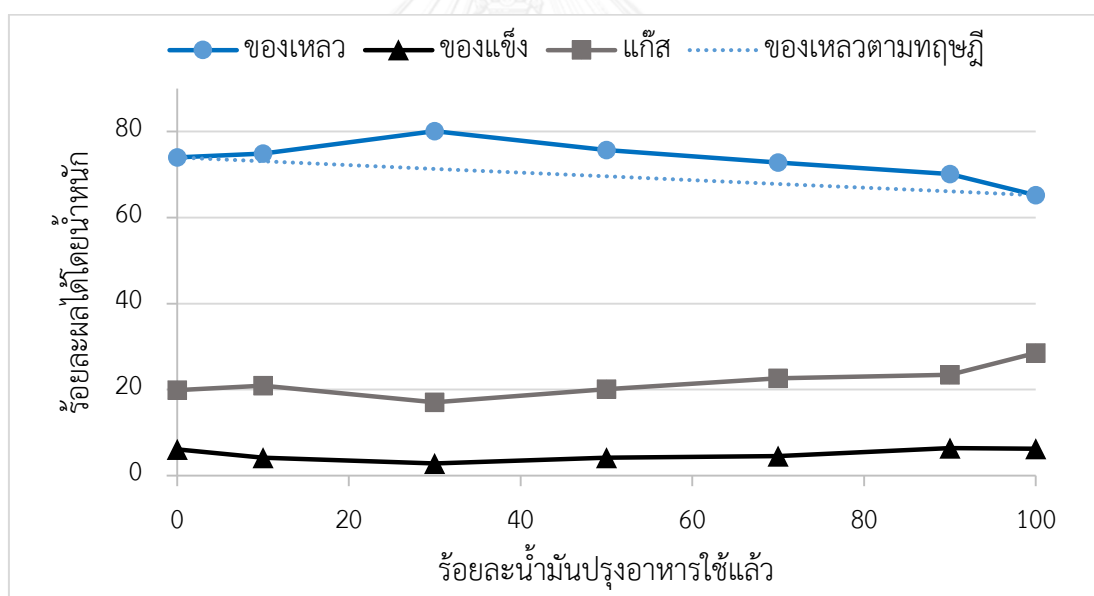
เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวจะไม่ขึ้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากนัก โดยร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจากร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 73.99 71.07 และ 69.99 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 81.51 โดยน้ำหนัก เนื่องจากในกรณีที่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีเพียงความร้อนที่ช่วยในการแตกตัวของสารตั้งต้นเท่านั้น ในขณะที่เมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีทั้งความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของสารตั้งต้นได้รวดเร็วและดีขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่ใช้นี้เป็นตัวเร่งที่มีความว่องไวและมีความจำเพาะในการเกิดปฏิกิริยาสูง มีความเสถียรและสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง และมีความเป็นกรดซึ่งสามารถนำไปใช้เร่งปฏิกิริยาได้หลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะนิยมนำไปใช้อุตสาหกรรมปิโตรเคมี สำหรับแยกแก๊สปิโตรเลียมเหลวในโรงกลั่นน้ำมันสำหรับปฏิกิริยาการแตกตัวที่เกิดขึ้นนี้ ในช่วงแรกจะเป็นผลของความร้อนที่ทำให้สารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่เกิดการแตกตัวได้เป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นต้นที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จำพวกน้ำมันแก๊สออยล์สุญญากาศ หรือน้ำมันแก๊สออยล์ และเนื่องจากโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่เหล่านี้ไม่สามารถเข้าไปภายในรูพรุนของซีโอไลต์ชนิดวาย (ขนาดรูพรุนประมาณ 7.4 อังสตรอม) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีได้ ดังนั้นจึงเกิดการแตกตัวเบื้องต้น (Pre-cracking) ที่บริเวณเมทริกซ์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีเช่นกัน จากนั้นจะได้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงจนสามารถเข้าไปเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวภายในรูพรุนของซีโอไลต์ได้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและแก๊สไฮโดรคาร์บอน [62] โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกี่ยวข้องกับการเกิดคาร์บีเนียมไอออน ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีประจุบวกที่สามารถเกิดได้ทั้งจากการเติมโปรตอน (H^+) ให้กับโอเลฟินส์ที่ตำแหน่งกรดบรอนสเตด (Bronsted acid site) และการดึงไฮไดรด์ (H^-) จากพาราฟินที่ตำแหน่งกรดลิวอิส (Lewis acid site) โดยธรรมชาติและความแรงของตำแหน่งกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาต่างๆที่เกิดผ่านคาร์บีเนียมไอออน เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน ปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจน นอกจากนี้พบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มากขึ้นอาจเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของโอเลฟินส์เบาที่เกิดระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการแตกโมเลกุล

เมื่อวิเคราะห์การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ผลการวิเคราะห์จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อใส่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเพิ่มขึ้น ปริมาณรวมของแนฟทา โครซีน และแก๊สออยล์ในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณรวมขององค์ประกอบทั้งสามที่ได้เมื่อไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักจะมีปริมาณรวมขององค์ประกอบทั้งสามเท่ากับร้อยละ 56.60 55.43 และ 55.29 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แต่เมื่อไม่ใส่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

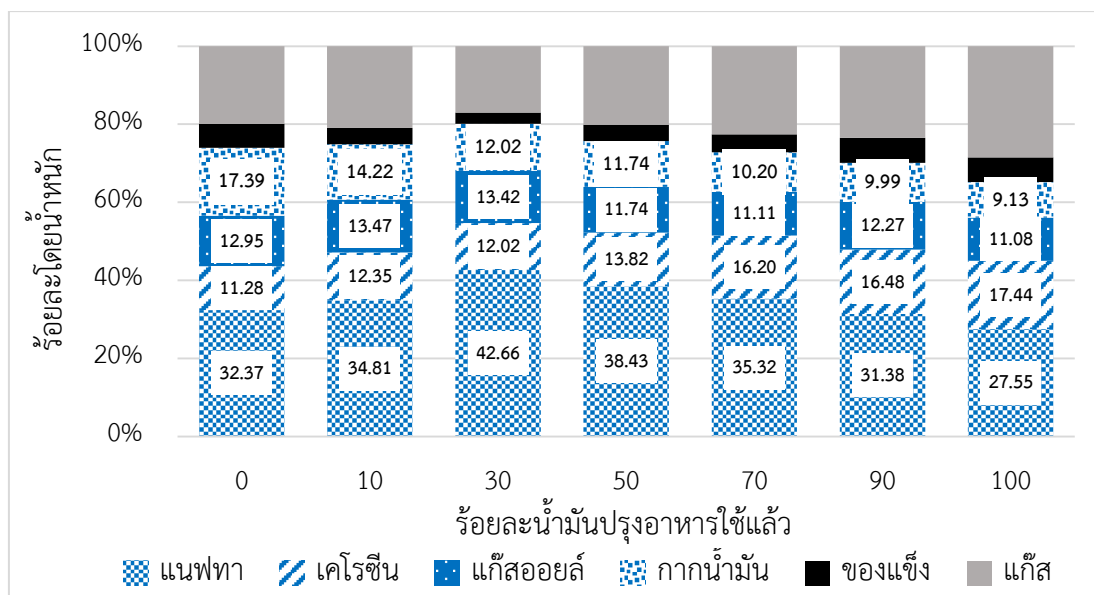
เอพซีซีใช้แล้ว ปริมาณรวมของแนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์ในผลิตภัณฑ์จะเท่ากับ 32.40 และเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาที่ใส่และไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่ภาวะเดียวกัน พบว่าปริมาณกาบน้ำมันจะลดลงอย่างชัดเจน ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีมีบทบาทและมีส่วนช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีโมเลกุลขนาดเล็กลงได้ดี ดังนั้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่ให้ปริมาณและการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

4.3.4 ผลของอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วที่มีต่อร้อยละผลได้และการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

ผลของร้อยละผลได้และการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และแก๊ส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

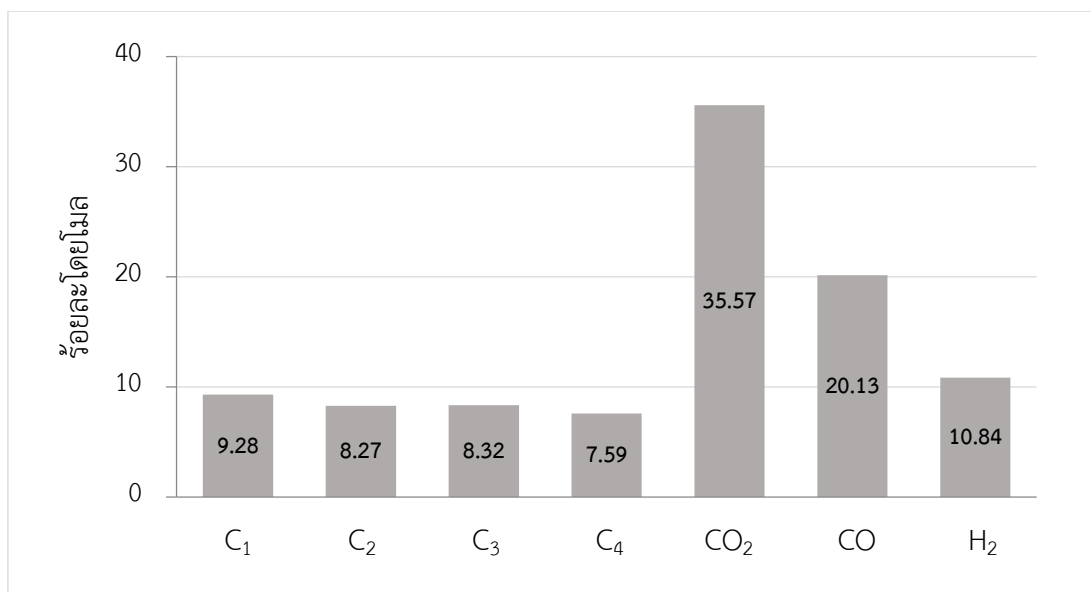


รูปที่ 4.9 การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วในสารตั้งต้น จะได้รับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หรือที่อัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 7:3 จะได้รับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดเท่ากับร้อยละ 80.11 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวผ่านทั้งอนุมูลอิสระและคาร์บอนเนียมไอออน โดยจะเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า ทำให้ได้คาร์บอนเนียมไอออนตัวใหม่ที่มีขนาดเล็กกลางและสารโอเลฟินส์ ซึ่งคาร์บอนเนียมไอออนตัวใหม่ที่ได้นี้จะสามารถเกิดปฏิกิริยาถูกโซ่ได้อย่างต่อเนื่อง และจะเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันทำให้เกิดการจัดเรียงตัวแบบไอออนตติยภูมิและเกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจนกับพาราฟินและเกิดการแตกตัวได้ผลิตภัณฑ์เป็นโมเลกุลที่มีกิ่งก้าน [63] แต่หากมีน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วในสารตั้งต้น จะทำให้เกิดการแตกตัวผ่านอนุมูลอิสระ RCOO^\bullet (Carboxyl radical) จากการแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์ [64] แล้วจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ซึ่งทำให้ได้สารประกอบที่มีออกซิเจนในโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกลาง ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และน้ำ โดยตำแหน่งที่ไม่อิ่มตัวจะช่วยเพิ่มการแตกตัวของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอน ส่งผลให้เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วในสารตั้งต้นมากขึ้นไปอีก จะทำให้มีตำแหน่งพันธะคู่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา และมีความเสถียรต่ำกว่าพันธะเดี่ยว [65] จึงมีส่วนช่วยให้ปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่ง

ปฏิกิริยาเกิดได้ดี ทำให้สารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่เกิดการแตกตัวต่อไปเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วในสารตั้งต้น จะได้องค์ประกอบที่มีขนาดเล็กจำพวกแนฟทาและเคโรซีนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ได้องค์ประกอบที่มีขนาดใหญ่จำพวกแก๊สออยล์และกาน้ำมันลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วต่อไปอีกจะทำให้ได้องค์ประกอบที่มีขนาดใหญ่และขนาดเล็กลดลง เนื่องจากองค์ประกอบเหล่านี้จะเกิดการแตกตัวไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลงได้มากขึ้น โดยที่ปริมาณน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จะปริมาณของแนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์ในผลิตภัณฑ์เท่ากับร้อยละ 42.64 12.01 และ 13.41 ตามลำดับ และปริมาณรวมของแนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์ในผลิตภัณฑ์ที่ปริมาณไม่ใส่น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วและที่ปริมาณน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วร้อยละ 10 30 50 70 90 และ 100 โดยน้ำหนัก จะเท่ากับร้อยละ 56.60 60.63 68.06 63.99 62.63 60.13 และ 56.07 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังนั้นอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วที่ให้ปริมาณและการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เหมาะสม คือ อัตราส่วน 7:3

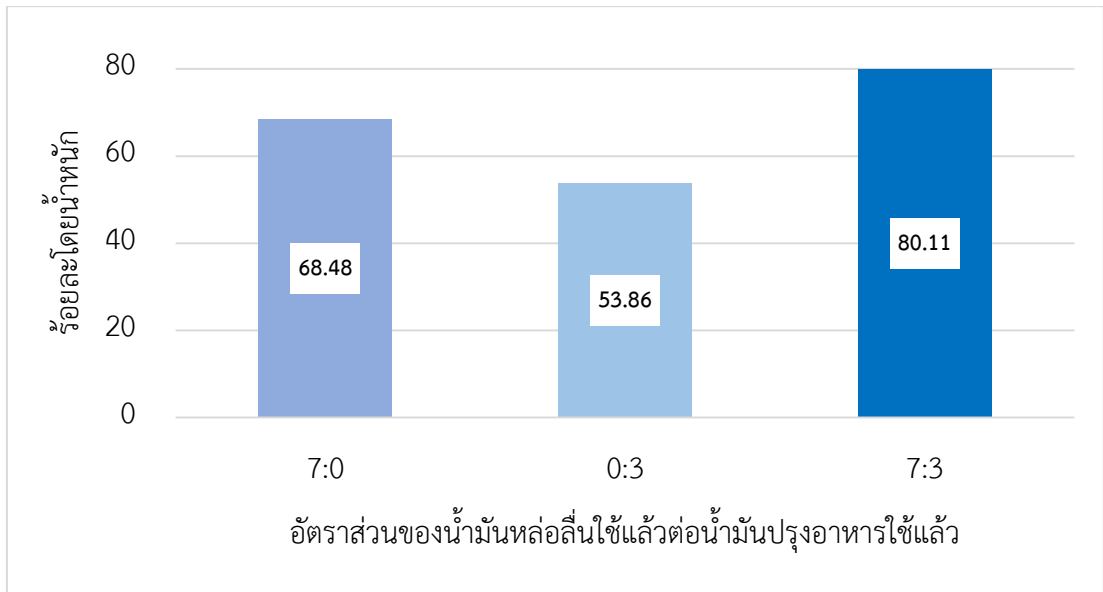
นอกจากนั้น ยังพบอีกว่าความร้อนและตำแหน่งกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีบทบาทอย่างมากในการแตกตัวของหมู่เอสเทอร์ของของไตรกลีเซอไรด์ได้เป็นกรดไขมันอิสระ แล้วเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และอาจเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันได้เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เมื่อนำผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการแปรสภาพรวมภายใต้ภาวะที่เหมาะสมมาตรวจวัดด้วยตัวตรวจวัด Thermal conductivity detector (TCD) และตัวตรวจวัด Flame ionization detector (FID) จะพบองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 1 ถึง 4 อะตอมเท่ากับร้อยละ 35.57 20.13 10.84 9.28 8.27 8.32 และ 7.59 โดยโมลตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



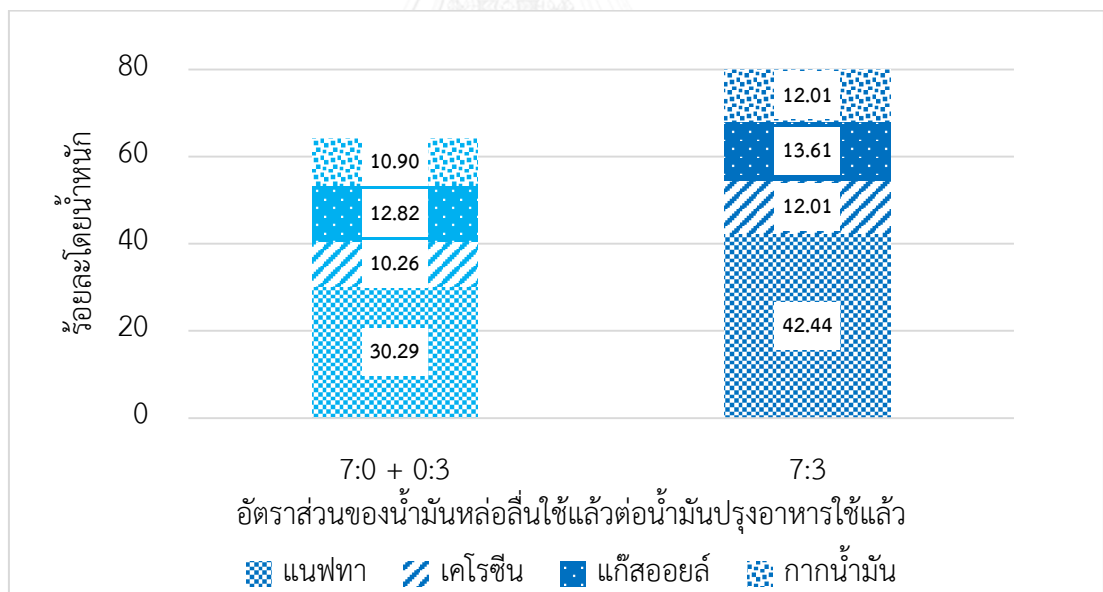
รูปที่ 4.10 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

4.4 การเปรียบเทียบผลของกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่มีต่อผลิตภัณฑ์ของเหลว

ทำการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (7:0) น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (0:3) กับผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมภายใต้ภาวะที่เหมาะสมที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 7:3 ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว และจากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วในอัตราส่วน 7:3

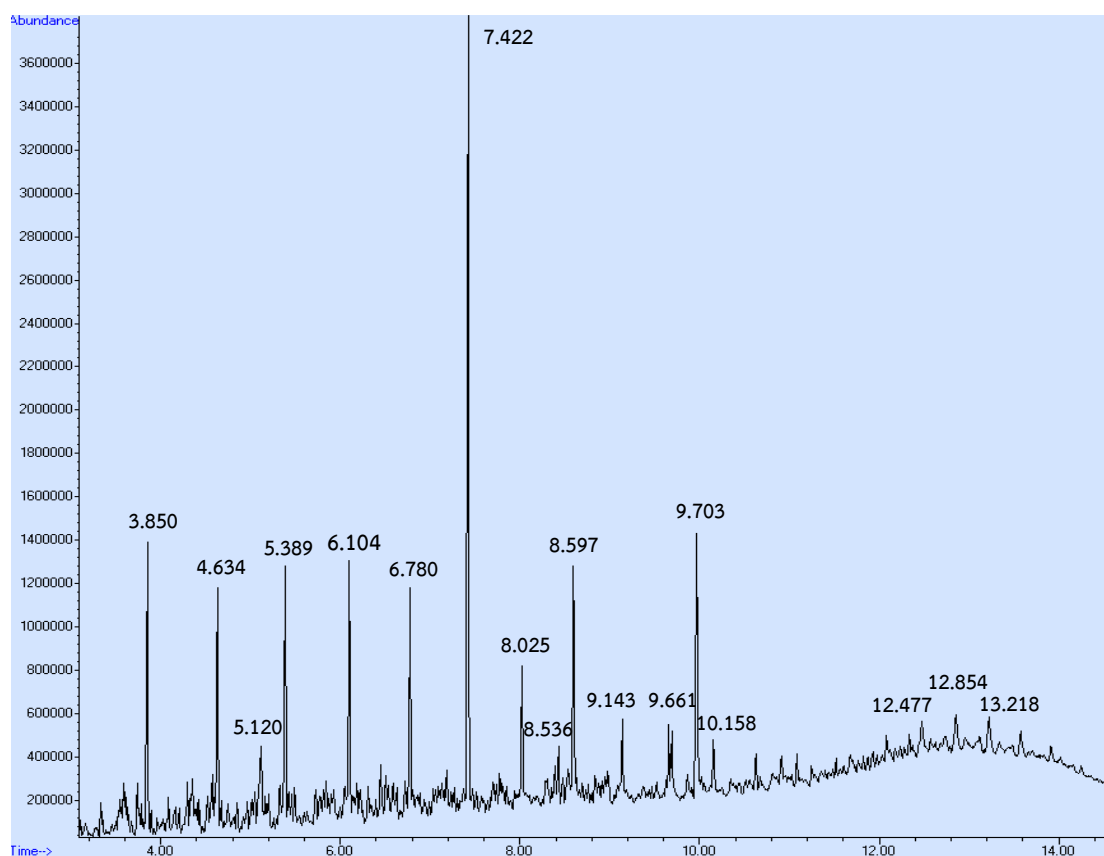


รูปที่ 4.12 การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วผสมกับผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว และผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วในอัตราส่วน 7:3

จากรูปที่ 4.11 พบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (7:0) และน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (0:3) จะได้รับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเท่ากับร้อยละ 68.48 และ 53.86 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมภายใต้ภาวะที่เหมาะสมที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 80.11 โดยน้ำหนัก แสดงว่าเมื่อใช้สารตั้งต้นเป็นน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่เพียงชนิดเดียว จะทำให้การแตกตัวเกิดขึ้นได้ค่อนข้างยาก แต่เมื่อใช้สารตั้งต้นเป็นน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วซึ่งเป็นสารประกอบที่มีพันธะคู่ในโมเลกุลเพียงชนิดเดียว จะทำให้การแตกตัวเกิดได้ดีขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กมากขึ้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าการใช้น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็นสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียวจะทำให้ได้รับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวในปริมาณมากขึ้น แต่การใช้สารตั้งต้นสองชนิดรวมกันในกระบวนการจะทำให้ได้รับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวในปริมาณที่มากกว่า เนื่องจากผลการเสริมกันของสารตั้งต้นสองชนิดและผลของความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวได้มากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การกระจายองค์ประกอบตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่นของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วผสมกับผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (7:0 + 0:3) เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วในอัตราส่วน 7:3 ภายใต้ภาวะที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วผสมกับผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วจะต้องประกอบของเนฟทาและเคโรซีนปริมาณน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วในอัตราส่วน 7:3 แสดงว่าการใช้สารตั้งต้นสองชนิดในกระบวนการแปรรูปรวมจะช่วยให้การแตกตัวเกิดได้ดีขึ้น ทำให้สารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่สามารถแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงได้มากขึ้น โดยปริมาณรวมของเนฟทา เคโรซีน และแก๊สออลีในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วผสมกับผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเท่ากับร้อยละ 53.37 โดยน้ำหนัก และในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วในอัตราส่วน 7:3 เท่ากับร้อยละ 68.06 โดยน้ำหนัก

4.5 การวิเคราะห์หาชนิดองค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปกโตรมิเตอร์

จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปกโตรมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.13 โครมาโทแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์

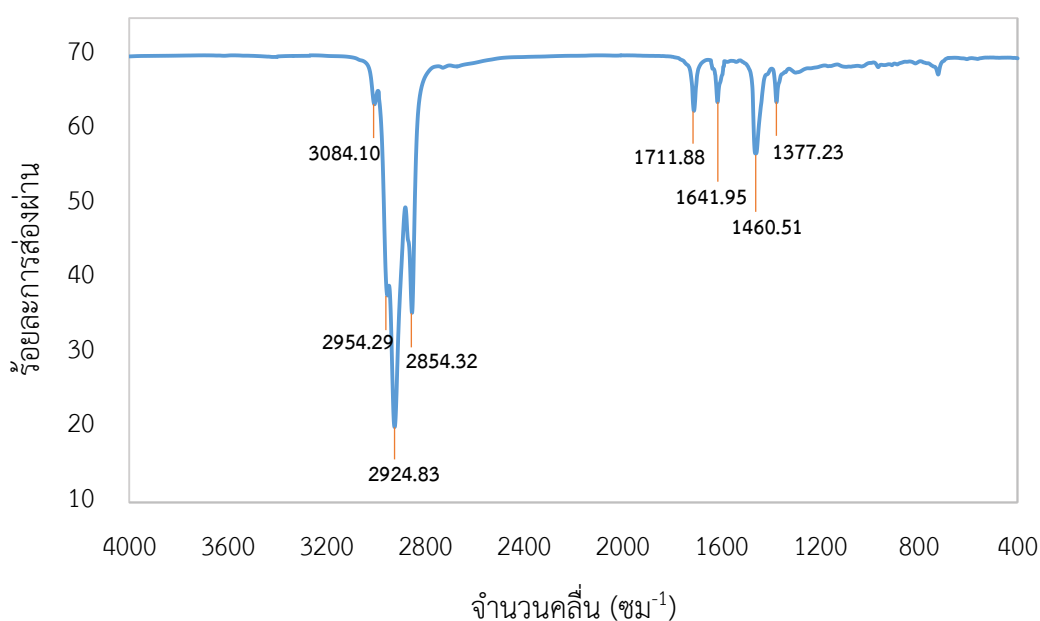
เวลา (นาทีก)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
3.850	Decane	2.53
4.634	Undecane	2.16
5.120	Benzene	1.31
5.389	Dodecane	2.78
6.104	Tridecane	2.66
6.780	Tetradecane	2.41
7.422	Pentadecane	7.74
8.025	Hexadecane	1.69
8.536	1,2-Dibutylcyclopentane	0.87
8.597	Heptadecane	2.57
9.143	Octadecane	1.09
9.659	Nonadecane	0.72
9.703	2-Heptadecanone	3.24
10.158	Eicosane	0.73
12.477	Tetracosane	1.66
12.854	Tricosane	1.30
13.218	Docosane	0.80

จากรูปที่ 4.13 แสดงโครมาโทแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ โดยแต่ละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วมาทำปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้สารไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟินแขนตรง พาราฟินแบบกิ่ง แนฟทีน และแอโรแมติกที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนอยู่ในช่วงแนฟทา (C_5-C_{12}) จนถึงแก๊สออยล์ ($C_{15}-C_{33}$) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่มาผ่านกระบวนการแปรรูปรวมโดยใช้ความร้อนและตัวเร่ง

ปฏิกิริยาจะเกิดการแตกตัวได้เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีองค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็ก

4.6 หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี โดยทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ของเหลวในช่วงจำนวนคลื่น 400 ถึง 4,000 cm^{-1} แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

จากรูปที่ 4.14 พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันหลักที่ปรากฏเป็นสารไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะลิฟาติก (Aliphatic hydrocarbon) และแอโรแมติก โดยพบจำนวนคลื่นดังต่อไปนี้ จำนวนคลื่นที่ 3,000 ถึง 3,100 cm^{-1} แสดง C-H (Stretching) ของสารประกอบแอโรแมติก จำนวนคลื่นที่ 2,800 ถึง 3,000 cm^{-1} แสดง C-H (Stretching) ของสารประกอบอะลิฟาติก จำนวนคลื่นที่ 1,700 cm^{-1} แสดง C=O ของหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) จำนวนคลื่นที่ 1,500 ถึง 1,600 cm^{-1} แสดงพันธะคู่ของ C=C ในแอโรแมติก จำนวนคลื่นที่ 1,450 ถึง 1,475 cm^{-1} และ 1,370 ถึง 1,380 cm^{-1} แสดง C-H (Bending)

ของกลุ่มเมทิล แสดงว่าเมื่อน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วได้รับความความร้อนจะเกิดการแตกตัวเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมที่พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันของกลุ่มเมทิลเกิดขึ้น และตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้ามามีบทบาทในการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนให้มีโมเลกุลขนาดเล็กและปรับเปลี่ยนโครงสร้างให้อยู่ในรูปที่เหมาะสม โดยแอโรแมติกที่เกิดขึ้นมาจากผลของการ ถ่ายอินไฮโดรเจนที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอินฟราเรดสเปกตรัมของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมภายใต้ภาวะที่เหมาะสมกับอินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันแก๊ซอลีน ออกเทน 95 [58] พบว่าจำนวนคลื่นที่ปรากฏและหมู่ฟังก์ชันหลักมีความใกล้เคียงกัน

4.7 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ของเหลว

การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมภายใต้ภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ การวิเคราะห์ค่าความร้อน การวิเคราะห์ค่าความหนืด และการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ของเหลว น้ำมันแก๊ซอลีน และน้ำมันดีเซล

สมบัติทางกายภาพ	ผลิตภัณฑ์ของเหลว	น้ำมันแก๊ซอลีน	น้ำมันดีเซล	มาตรฐาน
องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)				ASTM D3176
• คาร์บอน	82.11	85 ถึง 88	84 ถึง 87	
• ไฮโดรเจน	15.26	12 ถึง 15	13 ถึง 16	
• ไนโตรเจน	0.22			
• ออกซิเจน ^a	2.41			
สูตรเอมพีริคัล	$\text{CH}_{2.23}\text{N}_{0.001}\text{O}_{0.02}$			
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	44.953	43.448 ถึง 46.536	42.791 ถึง 45.766	ASTM D2015
ค่าความหนืด ^b (ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที)	2.33	0.42 ถึง 0.65	4.60	ASTM D445
ค่าความหนาแน่น ^c (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.83	0.720 ถึง 0.775	0.820 ถึง 0.845	ASTM D1298

- หมายเหตุ : a คือ โดยผลต่าง (by difference)
 b คือ ค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส
 c คือ ค่าความหนาแน่นที่ 15.6 องศาเซลเซียส

4.7.1 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของผลิตภัณฑ์ของเหลว

จากตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากภาวะที่เหมาะสม ตามมาตรฐาน ASTM D3176 เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน พบว่าธาตุองค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากภาวะที่เหมาะสม คือ คาร์บอนและไฮโดรเจน โดยมีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนของน้ำมันแกโซลีน [66] และน้ำมันดีเซล [67] นอกจากนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวนี้มีปริมาณออกซิเจนเท่ากับร้อยละ 2.41 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณออกซิเจนของสารตั้งต้นดังแสดงในตารางที่ 4.3 เนื่องจากความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีซีจะมีส่วนช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ซึ่งจะกำจัดออกซิเจนออกจากโมเลกุลในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง ทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมัน

4.7.2 ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลว

จากตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากภาวะที่เหมาะสม ตามมาตรฐาน ASTM D2015 พบว่าเมื่อนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วมาทำปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีซีใช้แล้วภายใต้ภาวะที่เหมาะสมจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีค่าความร้อนเท่ากับ 44.953 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าความร้อนของสารตั้งต้นดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีซีใช้แล้วจะมีส่วนช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ซึ่งจะกำจัดออกซิเจนออกจากโมเลกุลของน้ำมัน ช่วยให้เกิดผลดีต่อคุณภาพของน้ำมัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของน้ำมันแกโซลีนและน้ำมันดีเซลจะพบว่าค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน [68]

4.7.3 ค่าความหนืดและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ของเหลว

จากตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D445 ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากภาวะที่เหมาะสม พบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีซีใช้แล้วภายใต้ภาวะที่เหมาะสมจะมีค่าความหนืดเท่ากับ 2.33 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าความหนืดของสารตั้งต้นดังแสดงในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าค่าความหนืดลดลงเนื่องจากความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิด

การแตกตัวของโครงสร้างที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ไปเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก และผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นที่ 15.6 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D1298 ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากภาวะที่เหมาะสม พบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.83 กรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนืด [69] และค่าความหนาแน่น [70] ของน้ำมันแกโซลีนและน้ำมันดีเซลจะพบว่าทั้งค่าความหนืดและค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน

4.8 ผลการทดลองและงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยเลือกใช้สารตั้งต้นเป็นน้ำมันชนิดต่างๆ และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ประเภทกรดที่มีเสถียรภาพและสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งมีความว่องไวและมีความจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่างๆ จากตารางที่ 4.8 แสดงการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันชนิดต่างๆจากงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน พบว่ามีหลายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาการแตกตัวของสารตั้งต้น เช่น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว ซึ่งภาวะที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ใกล้เคียงกับภาวะที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา และจากตารางที่ 4.9 แสดงการแปรปรูปรวมของน้ำมันจากปิโตรเลียมและน้ำมันจากชีวมวลผ่านปฏิกิริยาการแตกตัวความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันชนิดต่างๆจากงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน พบว่าเมื่อใส่น้ำมันจากชีวมวลลงในสารตั้งต้นในปริมาณต่างๆจะทำให้ได้ร้อยละโดยน้ำหนักของเนฟทาสูงขึ้นเมื่อเทียบกับสารการใช้น้ำมันจากปิโตรเลียมเป็นสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว เนื่องมาจากผลการเสริมกันของสารตั้งต้นสองชนิด และผลของความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงได้มากขึ้น โดยงานวิจัยนี้ให้ร้อยละโดยน้ำหนักของเนฟทาในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สูงกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้

ตารางที่ 4.8 การแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันชนิดต่างๆจากงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

การทดลอง	Chew, T.L. et al. (2009)	ปิยนุช (2010)	Taufiqurrahmi, N. et al. (2011)		กฤษณี (2011)
เครื่องปฏิกรณ์	แบบต่อเนื่อง	แบบกะ	แบบเบดบรรจุ		แบบกะ
สารตั้งต้น	น้ำมันปาล์ม ใช้แล้ว	น้ำมัน มะพร้าว	น้ำมันปาล์มใช้แล้ว		น้ำมันหล่อลื่น ใช้แล้ว
ตัวเร่งปฏิกิริยา	REY	HZSM-5	ZSM5	Zeolite Y	Spent FCC
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	n/a	20	n/a	n/a	20
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	5 g _{cat} /g _{oil}	0.5 wt%	6.22 g _{cat} /g _{oil}	6 g _{cat} /g _{oil}	1.12 wt%
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	450	391	455	458	410
เวลา (นาที)	0.33	30	0.33	0.33	46
ความดันของแก๊ส ไฮโดรเจน (บาร์)	n/a	1	n/a	n/a	1
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ ของเหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	47.40	69.58	53.40	48.00	78.02
องค์ประกอบในของเหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
- แนฟทา	33.00	31.52	37.05	34.96	37.41
- เคโรซีน	9.90	16.51	n/a	n/a	n/a
- แก๊สออยล์	4.50	42.55	n/a	n/a	41.33
- กากน้ำมัน	n/a	9.42	n/a	n/a	n/a
อ้างอิง	[71]	[57]	[72]		[58]

หมายเหตุ : n/a คือ ไม่ได้ระบุไว้ในงานวิจัย (Not Available)

ตารางที่ 4.9 การแปรรูปรวมผ่านปฏิกิริยาการแตกตัวความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันชนิดต่างๆจากงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

การทดลอง	Bielansky, P. et al. (2011)	Doronin, V.P. et al. (2013)	Thegarid, N. et al. (2014)	งานวิจัยนี้ (2016)
เครื่องปฏิกรณ์	แบบฟลูอิดไคซ์เบด	แบบเบดบรรจุ	แบบเบดบรรจุ	แบบกะ
สารตั้งต้น - น้ำมันจากปิโตรเลียม - น้ำมันจากชีวมวล	น้ำมันแก๊ส ออยล์ สุญญากาศ น้ำมันปาล์ม	น้ำมันแก๊ส ออยล์ สุญญากาศ น้ำมันดอกทานตะวัน	น้ำมันแก๊ส ออยล์ สุญญากาศ น้ำมันชีวภาพ	น้ำมันหล่อลื่น ใช้แล้ว น้ำมันปรุง อาหารใช้แล้ว
ร้อยละของน้ำมันจากชีวมวลที่เหมาะสมในสารตั้งต้น	20	10	10	30
ตัวเร่งปฏิกิริยา	FCC	FCC	ZSM-5	Spent FCC
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	n/a	n/a	n/a	15
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	n/a	4 g _{cat} /g _{soil}	3.2 g _{cat} /g _{soil}	1 wt%
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	550	527	500	410
เวลา (นาที)	0.0148	30	1	45
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	n/a	n/a	n/a	80.11
องค์ประกอบในของเหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
- แนฟทา	46.00	52.80	59.00	53.25
- เคโรซีน	n/a	n/a	n/a	15.00
- แก๊สออยล์	n/a	n/a	n/a	16.75
- กากน้ำมัน	n/a	n/a	n/a	15.00
อ้างอิง	[52]	[53]	[54]	

หมายเหตุ : n/a คือ ไม่ได้ระบุไว้ในงานวิจัย (Not Available)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในช่วง 350 ถึง 440 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 30 ถึง 75 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในช่วงร้อยละ 1 ถึง 5 โดยน้ำหนัก และไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 10:0 9:1 7:3 5:5 3:7 1:9 และ 0:10 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมนี้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์เชิงปริมาณเพื่อหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว และทำการวิเคราะห์เชิงคุณภาพโดยวิเคราะห์การกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น พบว่าน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่สามารถแตกตัวให้เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กและเป็นองค์ประกอบที่มีมูลค่าสูงขึ้น เช่น แนฟทา ($C_5 - C_{12}$) เคโรซีน ($C_{12} - C_{15}$) และแก๊สออยล์ ($C_{15} - C_{33}$) โดยภาวะที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 7:3 จะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 80.11 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ภายใต้ภาวะที่เหมาะสมนี้จะมีปริมาณ แนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์ในผลิตภัณฑ์เท่ากับร้อยละ 42.66 12.01 และ 13.61 โดยน้ำหนักตามลำดับ และจะเป็นสารไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะลิฟาติกและแอโรแมติกที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนอยู่ในช่วงแนฟทาจนถึงแก๊สออยล์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโคปีและเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโทรสโคปี โดยผลิตภัณฑ์ของเหลวนี้มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนเท่ากับร้อยละ 82.11 15.26 0.22 และ 2.41 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีค่าความร้อนเท่ากับ 44.953 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความหนืดเท่ากับ 2.33 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.83 กรัมต่อมิลลิลิตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์

5.2.2 พัฒนาระบบการผลิตเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์

5.2.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมจากกระบวนการแปรรูปร่วมของน้ำมันใช้แล้วชนิดอื่น

5.2.4 ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ๆ ที่มีประสิทธิภาพสำหรับปฏิกิริยาการแตกตัว และมีราคา

ถูก



รายการอ้างอิง

1. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25 % ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564) (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2012-2021). [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://www.enconfund.go.th/pdf/index/aedp25.pdf> [2 สิงหาคม 2558]
2. บริษัท ออยเซอร์ฟ จำกัด. ส่วนประกอบของน้ำมันหล่อลื่น. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.oilservethai.com/index.php?lay=show&ac=article&id=539121501&Ntype=11> [19 ตุลาคม 2558]
3. กรมควบคุมมลพิษ. อันตรายจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/haz_lubri.html#s3 [11 ธันวาคม 2558]
4. ธารดาว ทองแก้ว. น้ำมันพืช : ใช้อย่างไรให้ถูกต้องและปลอดภัย. [ออนไลน์]. 2546. แหล่งที่มา: <https://www.doctor.or.th/article/detail/1662> [19 ตุลาคม 2558]
5. Huber, G.W. and Corma, A., Synergies between Bio- and Oil Refineries for the Production of Fuels from Biomass. *Angewandte Chemie International Edition*, 2007. 46(38): p. 7184-7201.
6. Melero, J.A., Garcia, A. and Clavero, M., *Handbook of Biofuels Production*. 2011, United Kingdom: Woodhead Publishing Limited.
7. Pavol Hudec. FCC catalyst - key element in refinery technology. [Online]. 2011. Available from: http://www.vurup.sk/sites/default/files/downloads/46_ft_hudec-fcc.pdf [2015, September 21]
8. ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์. ปิโตรเลียม. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: <http://www.lesa.biz/earth/lithosphere/fuel/oil> [14 มกราคม 2559]
9. บริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน). ชนิดของปิโตรเลียม. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: <https://www2.pttep.com/energyliteracy/PTTEP/issue.aspx?id=21> [16 มกราคม 2559]
10. บริษัท สแกน อินเตอร์ จำกัด (มหาชน). แก๊สธรรมชาติคืออะไร. [ออนไลน์]. 2558. แหล่งที่มา: <http://www.scan->

- inter.com/th/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1/%E0%B8%81%E0%B9%8A%E0%B8%B2%E0%B8%8B%E0%B8%98%E0%B8%A3%E0%B8%A3%E0%B8%A1%E0%B8%8A%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%A1%E0%B8%B2%E0%B8%88%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B9%84%E0%B8%AB%E0%B8%99 [20 มกราคม 2559]
11. กรมธุรกิจพลังงาน. น้ำมันหล่อลื่น. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: http://www.doeb.go.th/v5/show_km.php?tid=50 [26 ธันวาคม 2558]
 12. โรงเรียนนวมินทราชูทิศ มัชฌิม. น้ำมันหล่อลื่น. [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: http://www.chaiwbi.com/0drem/web_children/2545/m5302/oil.html [21 มกราคม 2559]
 13. อางหาญ ณ นรงค์. ชนิดของสารหล่อลื่นและสารเพิ่มคุณภาพ. [ออนไลน์]. 2557. แหล่งที่มา: <http://www.thailandindustry.com/guru/view.php?id=14153> [24 มกราคม 2559]
 14. บริษัท สยามเอ็นจีเนียริง สเปร์พาร์ท จำกัด. คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: <http://www.ronaco.net/articles/1393394036785> [24 มกราคม 2559]
 15. บริษัท เวลลอย คอร์ปอเรชั่น จำกัด. หน้าที่ของน้ำมันเครื่อง. [ออนไลน์]. 2557. แหล่งที่มา: <http://www.veloil.com/TestimonialsContent.php?tmid=OA==> [1 กุมภาพันธ์ 2559]
 16. วรณัฐ แจ้งสว่าง, พลังงานหมุนเวียน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2553,
 17. Mckendry, P., Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. Bioresource Technology, 2002. 83: p. 47-54.
 18. ประพันธ์ คูชลธารา และ ศศิธร สรรพอคำ, พลังงานจากชีวมวลและวัสดุเหลือใช้ (Energy from biomass and waste). กรุงเทพมหานคร: คิว พรินท์ แมเนจเม้นท์. 2558,
 19. ไกรพัฒน์ จินขจร, พลังงานหมุนเวียน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น. 2551,
 20. Mussatto, S.I., et al., Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production. Biotechnology Advances, 2010. 28(6): p. 817-830.
 21. Naik, S.N., et al., Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. 14(2): p. 578-597.

22. Suganya, T., et al., Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. 55: p. 909-941.
23. Maity, J.P., et al., Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives – A mini review. *Energy*, 2014. 78: p. 104-113.
24. บริษัท สนุก ออนไลน์ จำกัด. น้ำมันพืช. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://guru.sanook.com/5704/> [3 กุมภาพันธ์ 2559]
25. Connie Newman. Update on hypertriglyceridemia. [Online]. 2015. Available from: <http://www.cmecorner.com/wp/update-on-hypertriglyceridemia> [2016, March 2]
26. The Association of the British Pharmaceutical Industry. Lipids: triglycerides and fatty acids. [Online]. 2016. Available from: <http://www.abpischools.org.uk/page/modules/chemistryoflife/chemistryoflife7.cfm> [2016, March 2]
27. ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. กรดไขมันชนิดอิ่มตัว. [ออนไลน์]. 2558. แหล่งที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/314/saturated-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%B8%AD%E0%B8%B4%E0%B9%88%E0%B8%A1%E0%B8%95%E0%B8%B1%E0%B8%A7>. [1 กุมภาพันธ์ 2559]
28. ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว. [ออนไลน์]. 2558. แหล่งที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/886/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> [1 กุมภาพันธ์ 2559]
29. Conde Nast. Fats & Fatty Acids. [Online]. 2014. Available from: <http://nutritiondata.self.com/topics/fatty-acids> [2016, February 3]
30. Al-Sabawi, M., Chen, J., and Ng, S.H., Fluid Catalytic Cracking of Biomass-Derived Oils and Their Blends with Petroleum Feedstocks: A Review. *Energy & Fuels*, 2012. 26(9): p. 5355-5372.

31. Stedile, T., et al., Comparison between physical properties and chemical composition of bio-oils derived from lignocellulose and triglyceride sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015. 50: p. 92-108.
32. Blin, J., et al., Characteristics of vegetable oils for use as fuel in stationary diesel engines—Towards specifications for a standard in West Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. 22: p. 580-597.
33. นคร ทิพย์วรงค์, เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น. 2553,
34. บริษัท อักษร อินส์ไพร์ จำกัด. เชื้อเพลิงจากน้ำมันพืช. [ออนไลน์]. 2558. แหล่งที่มา: <https://twig-aksorn.com/film/vegetable-oils-as-fuel-8181/> [18 กุมภาพันธ์ 2559]
35. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. พระบิดาแห่งการพัฒนาพลังงานไทย. [ออนไลน์]. 2557. แหล่งที่มา: http://www.eppo.go.th/royal/m1700_0020.html [16 กุมภาพันธ์ 2559]
36. บริษัท สนุก ออนไลน์ จำกัด. น้ำมันปลา. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://guru.sanook.com/5635/> [30 มกราคม 2559]
37. Brown, P. The free radical thermal cracking of alkanes. [Online]. 2010. Available from: <http://www.docbrown.info/page06/OrgMechsa.htm> [2016, February 21]
38. Gumilar, A. Thermal cracking. [Online]. 2011. Available from: <http://chemeng-processing.blogspot.com/2009/01/thermal-cracking.html> [2016, February 21]
39. Kubatova, A., et al., New path in the thermal cracking of triacylglycerols (canola and soybean oil). *Fuel*, 2011. 90(8): p. 2598-2608.
40. Sadeghbeigi, R., *Chemistry of FCC reactions*. 2012, United Kingdom: Butterworth-Heinemann publications.
41. Shimada, I., et al., Catalytic cracking of polycyclic aromatic hydrocarbons with hydrogen transfer reaction. *Fuel*, 2015. 161: p. 207-214.
42. Talmadge, M.S., et al., A perspective on oxygenated species in the refinery integration of pyrolysis oil. *Green Chem.*, 2014. 16(2): p. 407-453.
43. Choudhary, T.V. and Phillips, C.B., Renewable fuels via catalytic hydrodeoxygenation. *Applied Catalysis A: General*, 2011. 397(1-2): p. 1-12.
44. ปราโมทย์ ไชยเวช, ปีโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์สุนทรออฟเซท. 2548,

45. สำเนียง อภิสันติยาคม, กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีอินทรีย์เบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2555,
46. นพิตา หิณูชีระนันท์ และ ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย, เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Technology). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2556,
47. Harding, R.H., Peters, A.W. and Nee, J.R.D., New developments in FCC catalyst technology. *Applied Catalysis A: General*, 2001. 221: p. 389-396.
48. Sadeghbeigi, R., *FCC Catalysts*. 2012, United Kingdom: Butterworth-Heinemann publications.
49. Claudio, J.A.M. and Nilton, R.J., Carbocations on zeolites. Quo vadis. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2011. 22: p. 1197-1205.
50. Lappas, A.A., Bezergianni, S. and Vasalos, I.A., Production of biofuels via co-processing in conventional refining processes. *Catalysis Today*, 2009. 145(1-2): p. 55-62.
51. Melero, J.A., et al., Production of Biofuels via the Catalytic Cracking of Mixtures of Crude Vegetable Oils and Nonedible Animal Fats with Vacuum Gas Oil. *Energy & Fuels*, 2010. 24(1): p. 707-717.
52. Bielansky, P., et al., Catalytic conversion of vegetable oils in a continuous FCC pilot plant. *Fuel Processing Technology*, 2011. 92(12): p. 2305-2311.
53. Doronin, V.P., et al., Catalytic cracking of vegetable oils and vacuum gas oil. *Fuel*, 2013. 106: p. 757-765.
54. Thegarid, N., et al., Second-generation biofuels by co-processing catalytic pyrolysis oil in FCC units. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2014. 145: p. 161-166.
55. Ng, S.H., et al., FCC coprocessing oil sands heavy gas oil and canola oil. 1. Yield structure. *Fuel*, 2015. 156: p. 163-176.
56. วิชชากร จารุศิริ, การแตกตัวของพลาสติก น้ำมันพืช และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ด้วยความร้อนเป็นแก๊สโซลีนในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง. รายงานวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
57. ปิยนุช ธรรมวานิช, เชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันมะพร้าวโดยการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาบน HZSM-5. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

58. กุณฑณี ปิ่นเวหา, การแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
59. Xia, Y., Yang, Z. and Mokaya, R., Templated nanoscale porous carbons. *Nanoscale*, 2010. 2: p. 639–659.
60. ชัยพร จิงโชติกะพิศิษฐ์, การสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาดีโอไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.
61. Zhang, H., et al., Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass in a Fluidized Bed with Fresh and Spent Fluidized Catalytic Cracking (FCC) Catalysts. *Energy & Fuels*, 2009. 23(12): p. 6199-6206.
62. Vogt, E.T. and Weckhuysen, B.M., Fluid catalytic cracking: recent developments on the grand old lady of zeolite catalysis. *Chem Soc Rev*, 2015. 44(20): p. 7342-7370.
63. Fogassy, G., et al., Biomass derived feedstock co-processing with vacuum gas oil for second-generation fuel production in FCC units. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2010. 96(3-4): p. 476-485.
64. Maher, K.D. and D.C. Bressler, Pyrolysis of triglyceride materials for the production of renewable fuels and chemicals. *Bioresour Technol*, 2007. 98(12): p. 2351-2368.
65. ภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ไฮโดรคาร์บอน. [ออนไลน์]. 2558. แหล่งที่มา: http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course_info/2302275/chapter11.pdf [7 มีนาคม 2559]
66. Krzysztof J. Ptasinski, *Efficiency of Biomass Energy: An Exergy Approach to Biofuels, Power, and Biorefineries*: Wiley, 2016
67. Sharma, M. Orange skin powder diesel solution. [Online]. 2015. Available from: http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/17539/8/08_chapter%203.pdf [2016, March 20]
68. ESSOM Co., L. Heating values of hydrogen and fuels. [Online]. 2015. Available from: http://www.essom.com/upload/eng_data/22.pdf [2016, March 15]

69. ExxonMobil Refining and Supply Company. Detailed assay info for this crude. [Online]. 2015. Available from: <http://crd.exxonmobil.com/crudeoil/download/ERHA14X.pdf> [2016, March 16]
70. Pachemtech. Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method (ASTM D 1298). [Online]. 2016. Available from: <http://www.pachemtech.eu/index.php/en/services/laboratory-services/180-standard-test-method-for-density-relative-density-or-api-gravity-of-crude-petroleum-and-liquid-petroleum-products-by-hydrometer-method-astm-d-1298> [2016, March 16]
71. Chew, T.L. and Bhatia, S., Effect of catalyst additives on the production of biofuels from palm oil cracking in a transport riser reactor. *Bioresour Technol*, 2009. 100(9): p. 2540-2545.
72. Taufiqurrahmi, N., Mohamed, A.R. and Bhatia, S., Production of biofuel from waste cooking palm oil using nanocrystalline zeolite as catalyst: process optimization studies. *Bioresour Technol*, 2011. 102(22): p. 10686-10694.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.
ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ตัวแปรและสัญลักษณ์ตัวแปรที่ต้องการศึกษา

ตัวแปร	สัญลักษณ์ตัวแปร
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	A
ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	B
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	C
อัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (กรัมต่อกรัม)	D

ตารางที่ ก.2 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

การทดลองที่	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	A	B	C	D	ของเหลว	ของแข็ง	แก๊ส
1	350	30	1	10:0	60.47	26.52	13.01
1R ₁	350	30	1	10:0	60.06	26.38	13.56
1R ₂	350	30	1	10:0	61.45	25.70	12.85
2	380	30	1	10:0	66.02	19.18	14.80
2R ₁	380	30	1	10:0	64.55	19.16	16.29
2R ₂	380	30	1	10:0	65.96	19.53	14.51
3	410	30	1	10:0	67.75	12.59	19.66
3R ₁	410	30	1	10:0	69.55	12.25	18.20
3R ₂	410	30	1	10:0	68.92	11.37	19.71
4	440	30	1	10:0	64.64	12.43	22.93
4R ₁	440	30	1	10:0	64.99	11.02	23.99
4R ₂	440	30	1	10:0	63.84	10.81	25.35
5	410	45	1	10:0	72.90	7.64	19.46
5R ₁	410	45	1	10:0	74.68	5.09	20.23
5R ₂	410	45	1	10:0	74.39	5.54	20.07

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

การทดลองที่	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	A	B	C	D	ของเหลว	ของแข็ง	แก๊ส
6	410	60	1	10:0	68.64	5.92	25.44
6R ₁	410	60	1	10:0	70.92	4.91	24.17
6R ₂	410	60	1	10:0	71.64	6.63	21.73
7	410	75	1	10:0	67.81	4.94	27.25
7R ₁	410	75	1	10:0	66.02	5.83	28.15
7R ₂	410	75	1	10:0	70.11	4.32	25.57
8	410	45	0	10:0	80.55	6.37	13.08
8R ₁	410	45	0	10:0	83.19	4.77	12.04
8R ₂	410	45	0	10:0	80.79	5.87	13.34
9	410	45	3	10:0	70.85	6.36	22.79
9R ₁	410	45	3	10:0	69.37	7.42	23.21
9R ₂	410	45	3	10:0	72.99	6.50	20.51
10	410	45	5	10:0	67.99	8.26	23.75
10R ₁	410	45	5	10:0	70.66	6.44	22.90
10R ₂	410	45	5	10:0	71.32	6.57	22.11
11	410	45	1	9:1	73.81	5.06	21.13
11R ₁	410	45	1	9:1	76.26	4.02	19.72
11R ₂	410	45	1	9:1	74.51	3.49	22.00
12	410	45	1	7:3	81.74	2.14	16.12
12R ₁	410	45	1	7:3	80.40	2.35	17.25
12R ₂	410	45	1	7:3	78.19	4.09	17.72
13	410	45	1	5:5	73.83	4.72	21.45
13R ₁	410	45	1	5:5	76.03	3.84	20.13
13R ₂	410	45	1	5:5	77.33	3.98	18.69

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

การทดลองที่	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	A	B	C	D	ของเหลว	ของแข็ง	แก๊ส
14	410	45	1	3:7	73.23	5.06	21.71
14R ₁	410	45	1	3:7	74.04	4.49	21.47
14R ₂	410	45	1	3:7	71.22	4.10	24.68
15	410	45	1	1:9	70.39	5.95	23.66
15R ₁	410	45	1	1:9	71.82	6.50	21.68
15R ₂	410	45	1	1:9	68.15	6.81	25.04
16	410	45	1	0:10	66.72	5.47	27.81
16R ₁	410	45	1	0:10	62.99	7.03	29.98
16R ₂	410	45	1	0:10	65.89	6.31	27.80
17	410	45	1	7:0	67.32	11.02	21.66
17R ₁	410	45	1	7:0	66.91	11.16	21.93
17R ₂	410	45	1	7:0	71.21	9.62	19.17
18	410	45	1	0:3	54.41	14.66	30.93
18R ₁	410	45	1	0:3	52.16	16.97	30.87
18R ₂	410	45	1	0:3	55.01	15.68	29.31

ตารางที่ ก.3 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

การทดลองที่	ตัวแปร				องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	A	B	C	D	แนฟทา	เคโรซีน	แก๊สออยล์	กากน้ำมัน
1	350	30	1	10:0	29.75	9.25	25.25	35.75
1R ₁	350	30	1	10:0	32.50	8.25	21.75	37.50
1R ₂	350	30	1	10:0	28.50	8.75	22.75	40.00
2	380	30	1	10:0	36.25	10.75	19.75	33.25
2R ₁	380	30	1	10:0	33.50	12.25	19.75	34.50
2R ₂	380	30	1	10:0	33.75	10.75	22.75	32.75
3	410	30	1	10:0	43.00	10.75	21.25	25.00
3R ₁	410	30	1	10:0	40.75	13.25	18.75	27.25
3R ₂	410	30	1	10:0	40.00	14.25	18.50	27.25
4	440	30	1	10:0	39.25	15.75	18.50	26.50
4R ₁	440	30	1	10:0	41.75	16.25	16.75	25.25
4R ₂	440	30	1	10:0	39.00	16.75	18.75	25.50
5	410	45	1	10:0	45.00	14.75	16.25	24.00
5R ₁	410	45	1	10:0	41.75	16.50	17.50	24.25
5R ₂	410	45	1	10:0	44.50	14.50	18.75	22.25
6	410	60	1	10:0	43.50	16.5	15.75	24.25
6R ₁	410	60	1	10:0	47.25	15.00	16.75	21.00
6R ₂	410	60	1	10:0	44.25	18.00	15.50	22.25
7	410	75	1	10:0	46.75	21.25	13.50	18.50
7R ₁	410	75	1	10:0	43.00	20.75	15.25	21.00
7R ₂	410	75	1	10:0	45.25	18.75	15.50	20.50
8	410	45	0	10:0	17.25	8.50	14.75	59.50
8R ₁	410	45	0	10:0	21.00	7.75	11.25	60.00
8R ₂	410	45	0	10:0	20.25	6.25	12.25	61.25

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น

การทดลองที่	ตัวแปร				องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	A	B	C	D	แนฟทา	เคโรซีน	แก๊สออยล์	กากน้ำมัน
9	410	45	3	10:0	43.75	17.25	15.50	23.50
9R ₁	410	45	3	10:0	47.50	17.50	14.75	20.25
9R ₂	410	45	3	10:0	44.50	15.50	17.75	22.25
10	410	45	5	10:0	46.25	18.50	14.50	20.75
10R ₁	410	45	5	10:0	45.00	20.25	12.00	22.75
10R ₂	410	45	5	10:0	46.75	19.00	14.75	19.50
11	410	45	1	9:1	44.75	17.25	17.50	20.50
11R ₁	410	45	1	9:1	47.50	16.50	17.25	18.75
11R ₂	410	45	1	9:1	47.25	15.75	19.25	17.75
12	410	45	1	7:3	50.50	16.75	16.25	16.50
12R ₁	410	45	1	7:3	53.75	14.50	17.25	14.50
12R ₂	410	45	1	7:3	55.50	13.75	16.75	14.00
13	410	45	1	5:5	48.75	19.00	16.25	16.00
13R ₁	410	45	1	5:5	51.25	17.50	16.50	14.75
13R ₂	410	45	1	5:5	52.25	18.25	13.75	15.75
14	410	45	1	3:7	49.25	21.75	15.00	14.00
14R ₁	410	45	1	3:7	47.50	23.50	15.25	13.75
14R ₂	410	45	1	3:7	48.75	21.50	15.50	14.25
15	410	45	1	1:9	42.25	22.50	19.50	15.75
15R ₁	410	45	1	1:9	45.75	24.50	16.50	13.25
15R ₂	410	45	1	1:9	46.25	23.50	16.50	13.75

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น

การทดลองที่	ตัวแปร				องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	A	B	C	D	แนฟทา	เคโรซีน	แก๊สออยล์	กากน้ำมัน
16	410	45	1	0:10	44.25	25.75	15.75	14.25
16R ₁	410	45	1	0:10	40.75	26.50	17.50	15.25
16R ₂	410	45	1	0:10	41.75	28.00	17.75	12.50
17	410	45	1	7:0+ 0:3	46.75	16.50	18.25	18.50
17R ₁	410	45	1	7:0+ 0:3	48.50	15.50	19.25	16.75
17R ₂	410	45	1	7:0+ 0:3	46.50	15.25	22.50	15.75

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างการคำนวณผลการทดลอง

การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และแก๊สที่ได้จากกระบวนการแปรรูปรวมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ภายใต้ภาวะที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วต่อน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น 7:3

การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

ข้อมูลจากการทดลอง

น้ำหนักน้ำมันใช้แล้วที่เป็นสารตั้งต้น	15.03	กรัม
น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา	0.15	กรัม
น้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์เปล่าพร้อมแหวนรอง	947.55	กรัม
น้ำหนักรวมก่อนการทดลอง	962.77	กรัม
(น้ำหนักรวมของเครื่องปฏิกรณ์ แหวนรอง น้ำมันใช้แล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยา)		
น้ำหนักรวมหลังการทดลอง	965.33	กรัม
(น้ำหนักรวมของเครื่องปฏิกรณ์ แหวนรอง ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ของเหลว ผลิตภัณฑ์ของแข็ง)		
น้ำหนักรวมของกระดาศิซุและกระดาศกรองเปล่า	6.02	กรัม
น้ำหนักรวมของกระดาศิซุ กระดาศกรองและผลิตภัณฑ์ของแข็งก่อนอบ	10.74	กรัม
น้ำหนักรวมของกระดาศิซุ กระดาศกรองและผลิตภัณฑ์ของแข็งหลังอบ	5.44	กรัม

วิธีการคำนวณ

ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊ส	=	$965.33 - 962.77$	=	2.56	กรัม
ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส	=	$(2.56/15.03) \times 100$	=	17.03	โดยน้ำหนัก
ปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็ง	=	$6.02 - 5.44 - 0.15$	=	0.43	กรัม
ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง	=	$(0.43/15.03) \times 100$	=	2.86	โดยน้ำหนัก
ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว	=	$100 - 17.03 - 2.86$	=	80.11	โดยน้ำหนัก

การคำนวณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว

ร้อยละของเนฟทาในผลิตภัณฑ์ของเหลว	= 53.25	โดยน้ำหนัก	
ร้อยละของเนฟทาในผลิตภัณฑ์	= $(80.11 \times 53.25) / 100 = 46.66$		โดยน้ำหนัก
ร้อยละของเคโรซีนในผลิตภัณฑ์ของเหลว	= 15.00	โดยน้ำหนัก	
ร้อยละของเคโรซีนในผลิตภัณฑ์	= $(80.11 \times 15.00) / 100 = 12.02$		โดยน้ำหนัก
ร้อยละของแก๊สออยล์ในผลิตภัณฑ์ของเหลว	= 16.75	โดยน้ำหนัก	
ร้อยละของแก๊สออยล์ในผลิตภัณฑ์	= $(80.11 \times 16.75) / 100 = 13.42$		โดยน้ำหนัก
ร้อยละของกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์ของเหลว	= 15.00	โดยน้ำหนัก	
ร้อยละของกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์	= $(80.11 \times 15.00) / 100 = 12.02$		โดยน้ำหนัก



ภาคผนวก ค.

วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและ น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยเครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analyzer)

เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis, TGA)

เทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิสเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของสารตัวอย่างทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพเมื่อได้รับความร้อนภายใต้ภาวะที่กำหนด โดยเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา โดยการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ได้แก่ การวิเคราะห์มวลและเอนทัลปีของสารตัวอย่างที่อุณหภูมิต่างๆ ในขณะที่การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ ได้แก่ การวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของสารตัวอย่างที่เฟสต่างๆ เทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในสุญญากาศ และภายใต้บรรยากาศต่างๆ เช่น ออกซิเจน หรือไนโตรเจน เป็นต้น และสามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างได้อย่างหลากหลายทั้งชนิดของเหลว ของแข็งที่มีลักษณะเป็นผง แผ่นฟิล์ม หรือเส้นใย

เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetry) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ดังนี้

1. ไอโซเทอร์มัล เทอร์โมกราวิเมตริก (Isothermal thermogravimetry) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่าง (Sample mass) เมื่ออุณหภูมิตคงที่เทียบกับเวลา
2. ควาซี-ไอโซเทอร์มัล เทอร์โมกราวิเมตริก (Quasi-isothermal thermogravimetry) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างจนกระทั่งมวลคงที่โดยเทียบกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น
3. ไดนามิกส์ เทอร์โมกราวิเมตริก (Dynamic thermogravimetry) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตคงที่ ซึ่งเป็นวิธีที่ประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวาง

ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก มีดังนี้

1. เครื่องชั่งวิเคราะห์ที่สามารถบันทึกข้อมูลได้ (Recording Analytical Balance) เป็นเครื่องชั่งที่มีความละเอียดในการวิเคราะห์สูงถึง 0.1 ไมโครกรัม โดยทั่วไปน้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ด้วยกับเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกจะไม่เกิน 2,000 มิลลิกรัม
2. เตาเผา (Furnace) อุณหภูมิการทำงานของเตาเผาจะขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำเตาเผา เช่น เตาเผาที่ใช้ Fused Quartz Tube ร่วมกับ Kanthal-Type Heating Element Material จะมีอุณหภูมิการทำงานอยู่ในช่วง 1,500 ถึง 1,700 องศาเซลเซียส หรือเตาเผาที่ทำจากอะลูมินา ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลู่ระหว่าง 0.1 ถึง 200 องศาเซลเซียสต่อนาที และมีอุณหภูมิการทำงานอยู่ในช่วง 25 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส

3. เครื่องควบคุมระบบความร้อน และระบบความเย็น ที่สามารถบันทึกข้อมูลและคำนวณ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่างต่ออุณหภูมิ (TG Curve) และควบคุมการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิของสารตัวอย่างอย่างช้าๆ ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการแยกแยะการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (TG Resolution) ให้ดีขึ้น

4. ถ้วยแพลตินัมหรืออะลูมิเนียม (Platinum or aluminum crucible) เป็นถ้วยตื้นปากกว้าง ใช้สำหรับใส่สารตัวอย่างและสารอ้างอิง ซึ่งจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับทั้งสารตัวอย่างและสารอ้างอิงเมื่อ ได้รับความร้อน

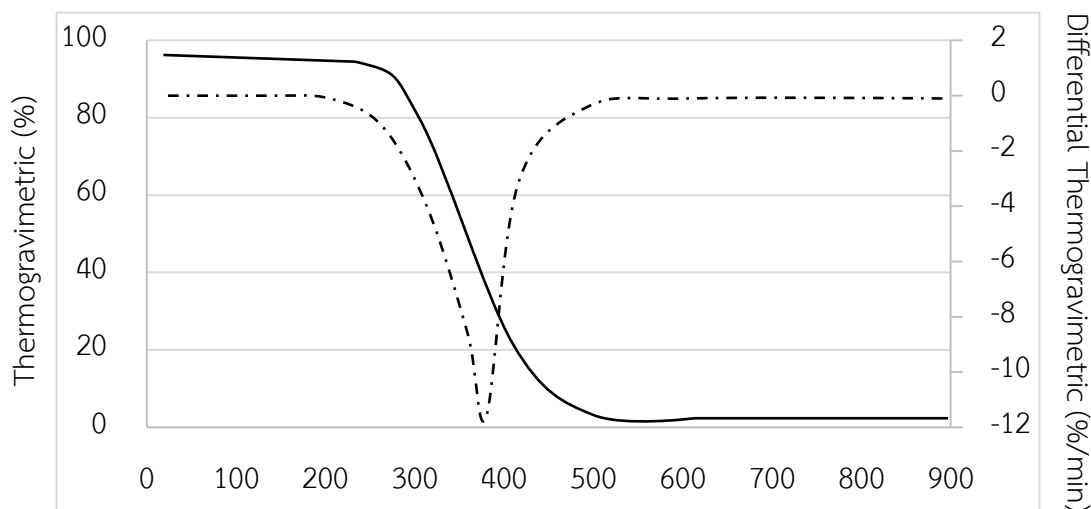
5. แก๊ส ได้แก่ ฮีเลียม อาร์กอน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ หรืออากาศ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

ในงานวิจัยนี้ วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและ น้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น TG 209 F3 ดังแสดงในรูปที่ ค.1 ใช้วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของสารตัวอย่างภายใต้ บรรยากาศไนโตรเจน อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยใช้ถ้วยอะลูมิเนียมสำหรับใส่สารตัวอย่างและสารอ้างอิง น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ไม่เกิน 2,000 มิลลิกรัม



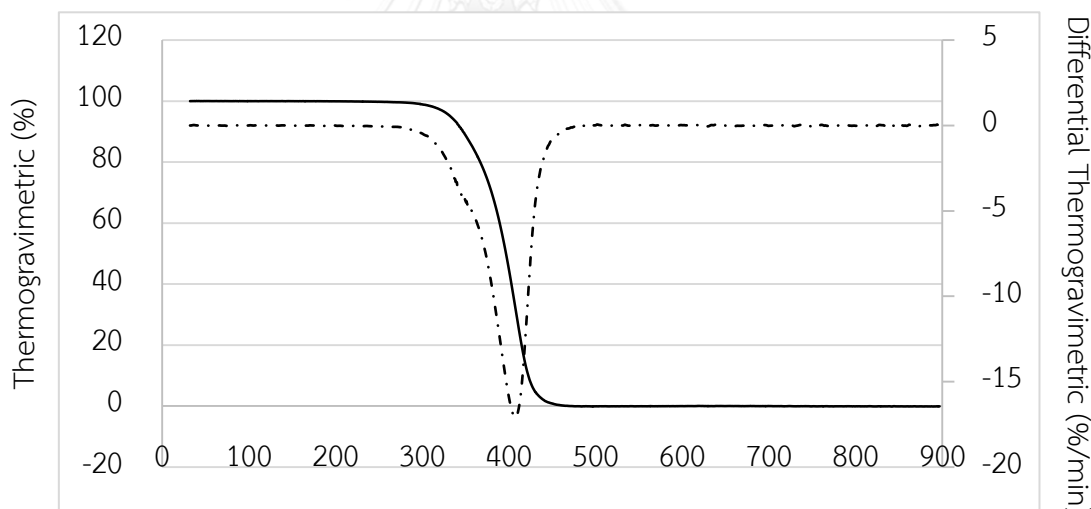
รูปที่ ค.1 เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของสารตั้งต้นด้วยเครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริกก่อนนำไปศึกษาการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังรูปที่ ค.2 และรูปที่ ค.3 ตามลำดับ



อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (องศาเซลเซียส)

รูปที่ ค.2 กราฟวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว
ด้วยเครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก



อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว (องศาเซลเซียส)

รูปที่ ค.3 กราฟวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว
ด้วยเครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก

การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วนี้ ดำเนินการที่อุณหภูมิตั้งแต่ 28 ถึง 900 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จากรูปที่ ค.2 พบว่าโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเริ่มแตกตัวที่ 200 องศาเซลเซียส และมีอัตราการแตกตัวสูงสุดที่ 380 องศา

เซลเซียส และจากรูปที่ ค.3 พบว่าโมเลกุลของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเริ่มแตกตัวที่ 270 องศาเซลเซียส และมีอัตราการแตกตัวสูงสุดที่ 410 องศาเซลเซียส ดังนั้นในกระบวนการแปรรูปร่วมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วนี้จึงเลือกศึกษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในช่วง 350 ถึง 440 องศาเซลเซียส



ภาคผนวก ง.

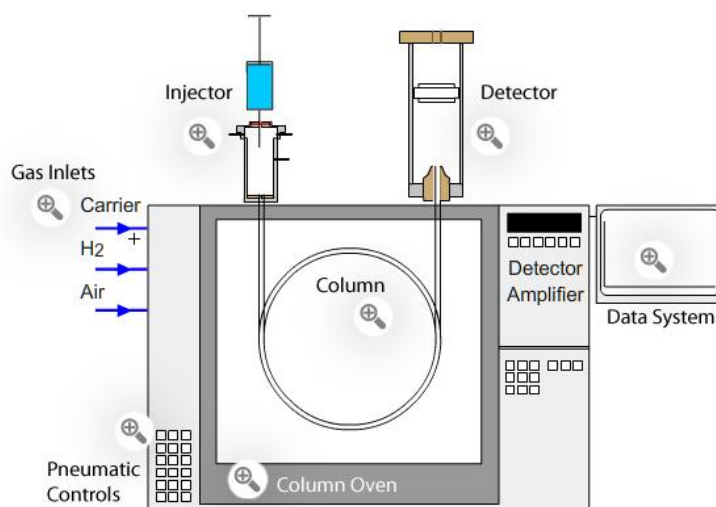
การหาค่าประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว

แก๊สโครมาโทกราฟี

แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคของการแยกทางโครมาโทกราฟี ที่ใช้เฟสเคลื่อนที่เป็นแก๊ส นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งใน การศึกษา การวิจัย และอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความสามารถแยก และวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีองค์ประกอบที่มีความซับซ้อนได้ มีความเฉพาะเจาะจงและความไวสูง อีกทั้งยังให้ผลเที่ยงตรงและรวดเร็ว โดยมีเทคนิคในการวิเคราะห์ 2 วิธี คือ การใช้เฟสอยู่กับที่เป็นของแข็ง เรียกว่า Gas-solid chromatography (GSC) และ การใช้เฟสอยู่กับที่เป็นของเหลว เรียกว่า Gas-liquid chromatography (GLC) ซึ่งเทคนิคที่เป็นที่นิยมมากกว่า คือ เทคนิคของ GLC

แก๊สโครมาโทกราฟีใช้ได้กับสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ง่าย โดยทั่วไปแก๊สโครมาโทกราฟีจะไม่ใช้วิเคราะห์สารประกอบอนินทรีย์ เนื่องจากสารประกอบอนินทรีย์ไม่สามารถกลายเป็นไอได้ในอุณหภูมิปกติที่ทำการทดลอง และแก๊สโครมาโทกราฟีสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ซึ่งการวิเคราะห์เชิงคุณภาพสามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ของสาร ตัวอย่างได้จากการเทียบค่ารีเทนชันไทม์ (Retention time)

เมื่อสารตัวอย่างถูกทำให้กลายเป็นไอที่ inlet แล้วจะถูกพาเข้าไปยังคอลัมน์ด้วยแก๊สตัวพา ซึ่งเป็นแก๊สเฉื่อย โดยอาศัยหลักการที่สารที่มีสมบัติคล้ายคลึงกันจะละลายกันได้ (Likes dissolve likes) ของสารตัวอย่างกับเฟสที่อยู่กับที่ ซึ่งหลักการดังกล่าวหมายความว่า สารจะละลายในตัวทำละลายที่มีโครงสร้างหรือหมู่ฟังก์ชันคล้ายกัน เช่น ตัวทำละลายที่มีขั้ว (Polar solvent) จะละลายโมเลกุลที่มีขั้ว (Polar molecule) ส่วนตัวทำละลายไม่มีขั้ว (Nonpolar solvent) จะละลายโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Nonpolar molecule)



รูปที่ ง.1 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

โดยทั่วไปเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

1. แก๊สตัวพา (Carrier gas)

แก๊สตัวพาต้องเฉื่อยต่อสารตัวอย่าง อนุภาคของตัวพาจะทำหน้าที่พาโมเลกุลของสารตัวอย่างออกจากคอลัมน์สู่ตัวตรวจวัด การหน่วงเหนี่ยวเกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างสารตัวอย่างกับเฟสที่อยู่กับที่ การเลือกตัวพาเป็นสิ่งที่สำคัญจะมีผลต่อกระบวนการแยกและสมรรถนะของตัวตรวจวัดแก๊สที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจายต่ำ (Distribution coefficient) เช่น ไฮโดรเจน และฮีเลียม จะให้ผลของการแยกดีกว่าแก๊สที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และอาร์กอน โดยอัตราส่วนของความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (ขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุลน้อยจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจายมาก) ที่มีค่าน้อยจะให้ผลการวิเคราะห์ได้เร็ว ดังนั้น ไฮโดรเจนและฮีเลียม จึงเหมาะที่จะเป็นแก๊สตัวพา

สารปนเปื้อน ความชื้น ออกซิเจน และแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีปะปนมากับแก๊สตัวพาในปริมาณน้อยๆอาจทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่างหรือทำให้คอลัมน์เกิดการเสื่อมคุณภาพ (Deterioration) และมีผลต่อสมรรถนะของตัวตรวจวัด ดังนั้นแก๊สที่นำมาใช้ต้องบริสุทธิ์ถึง 99.9995% ซึ่งทำได้โดยให้แก๊สตัวพาผ่านชุดอนุกรมของการดักจับความชื้น ออกซิเจน และสารไฮโดรคาร์บอนก่อนผ่านเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

2. สารตัวอย่าง (Sample introduction)

สารตัวอย่างจะถูกนำเข้าไปในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟได้ 2 สถานะ คือ สถานะไอหรือแก๊ส และสถานะของเหลว

2.1. สารตัวอย่างที่มีสถานะไอหรือแก๊ส สามารถฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟได้ ดังนี้

2.1.1 ถ้าสารตัวอย่างเป็นแก๊สที่อัดแน่นในถังบรรจุ (Pressurised containers) สามารถปล่อยเข้าไปในวาล์วเก็บตัวอย่าง (Sample valve) ได้เลย

2.1.2 ถ้ามีขั้นตอนของการเตรียมตัวอย่างให้เป็นแก๊ส การฉีดสารตัวอย่างจะสัมพันธ์กับเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างด้วย ซึ่งมีอยู่ 2 วิธี คือ Purge and trap และ Headspace โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟต้องมี Volatiles interface ในระบบ inlet

2.2 สารตัวอย่างที่มีสถานะของเหลว ซึ่งตัวอย่างของเหลวสามารถเตรียมได้จากการละลายสารที่ต้องการวิเคราะห์ในตัวทำละลายที่เหมาะสม โดยตัวทำละลายที่นำมาใช้ต้องเลือกใช้อย่างระมัดระวัง คือ ต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการวิเคราะห์และเฟสอยู่กับที่ ต้องละลายสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้สมบูรณ์และเป็นเนื้อเดียวกัน ต้องไม่เกิดการ Co-elute กับสารที่ต้องการวิเคราะห์ คือพีคที่ได้ต้องแยกออกจากพีคของสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้อย่างสมบูรณ์ ต้องไม่ติดค้างอยู่ในคอลัมน์ และปริมาณตัวทำละลายที่ใช้ต้องไม่ Overload คอลัมน์

สารตัวอย่างที่เป็นของเหลวสามารถนำเข้าสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีได้โดยใช้ Micro syringe
ดูดสารตัวอย่างของเหลวให้ได้ปริมาณตามที่ต้องการแล้วฉีดผ่าน Silicone rubber septum ซึ่ง
สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

2.2.1 การฉีดด้วยมือ (Manual) การฉีดแบบนี้ผู้ทดลองต้องมีความชำนาญ จึงจะทำให้
เกิดการวิเคราะห์ที่มีความเที่ยงตรงสูง ข้อเสียของวิธีนี้คือสิ้นเปลือง Septum เพราะการฉีดแต่ละครั้ง
ผู้ทดลองไม่สามารถฉีดเข้าที่จุดเดิมได้ ทำให้ Septum เกิดการฉีกขาด และแก๊สรั่วได้ง่าย จึงต้องมีการ
เปลี่ยน Septum บ่อยๆ

2.2.2 การฉีดด้วยเครื่องฉีดอัตโนมัติ (Auto injector) ซึ่งจะให้ผลที่เที่ยงตรงและ
แม่นยำและสามารถใช้ได้กับปริมาตรของตัวอย่างที่มีจำนวนน้อยกว่า 1 ไมโครลิตรได้ด้วย

3. ส่วนที่ฉีดสาร (Injection System)

เมื่อตัวอย่างของเหลวเข้าสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีลงสู่บริเวณ Inlet ที่มีความร้อนสูงพอที่จะ
ทำให้ตัวอย่างกลายเป็นไอ แล้วถูกพาเข้าสู่คอลัมน์ด้วยแก๊สตัวพา ซึ่งเรียกระบบของการพาว่า Sample
inlet system หรือ Injection mode ระบบของการพาตัวอย่างเข้าสู่คอลัมน์มีหลายแบบ ซึ่งการเลือก
ระบบของการพา ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปริมาณสารตัวอย่างที่ต้องการฉีด ความเข้มข้นของ
สารตัวอย่าง เมทริกซ์ในตัวอย่าง ขนาดและชนิดของคอลัมน์ เป็นต้น

ในระบบการพาตัวอย่างเข้าสู่คอลัมน์โดยแก๊สตัวพาถูกควบคุมด้วย Electronic pneumatic
control (EPC) ทำให้อัตราการไหลของแก๊สตัวพาคงที่และสม่ำเสมอ

3.1 Split / splitless Inlet

3.1.1 Split injection mode เมื่อสารตัวอย่างที่ฉีดเข้าสู่คอลัมน์มีปริมาณมาก หรือ
ความเข้มข้นสูงอาจทำให้คอลัมน์ Overload ทำให้การแยกไม่ดี เกิดฟีกซ้อนทับกันและรูปร่างของฟีก
ไม่สมมาตร สามารถปรับปรุงการวิเคราะห์ได้โดยการเลือก Split mode

3.1.2 Splitless injection mode เมื่อสารที่ต้องการวิเคราะห์มีปริมาณน้อยๆ
(Trace analysis) การวิเคราะห์จะให้ผลได้ดีเมื่อใช้ Splitless mode

3.2 Purged packed Inlet

การฉีดสารตัวอย่างด้วยระบบ Purged packed ใช้กับ Packed column และสามารถใช้กับ
Wide-bore capillary column ได้เมื่ออัตราการไหลของแก๊สตัวพามากกว่า 10 มิลลิลิตรต่อนาที

3.3 Cool on - column Inlet

เป็นวิธีการฉีดตัวอย่างที่เป็นของเหลวตรงเข้าสู่ Capillary column ซึ่งวิธีการนี้ส่วนของ
Inlet และ Oven ต้องมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของตัวทำละลายเมื่อทำการฉีดสารตัวอย่าง เพื่อไม่
ต้องการให้ตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือถูกแบ่งแยกก่อนเข้าสู่คอลัมน์

3.4 Programmable Temperature Vaporisation Inlet (PTV)

ด้วยวิธีการฉีดตัวอย่างที่เป็นของเหลวเข้าคอลัมน์โดยตรงพบว่า สารที่ไม่เป็นไอระเหยที่ติดมากับสารตัวอย่าง สามารถเข้าไปติดแน่นในคอลัมน์ วิธีการของ PTV จึงได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้สามารถทำงานได้หลายๆโหมด เมื่อใช้อุณหภูมิคงที่สามารถเลือกระบบเป็นแบบ Split / splitless ถ้าใช้การทำโปรแกรมอุณหภูมิให้มีอุณหภูมิเริ่มต้นต่ำ และใช้กับ Wide-bore column จะสามารถเลือกใช้ On-column injection ได้ และนอกจากนี้ยังสามารถใช้กับการฉีดสารตัวอย่างที่มีตัวทำละลายหลายๆ ซึ่งเรียกว่า Solvent vent mode โดยใช้การฉีด Large volume injection ในระบบการฉีดแบบ PTV inlet สามารถทำได้ทั้งการฉีดด้วยมือ และการฉีดด้วยเครื่องฉีดอัตโนมัติ

4. คอลัมน์ (Column)

คอลัมน์เป็นหัวใจของการทำงานด้วยระบบโครมาโทกราฟี ทั้งนี้เพราะการแยกองค์ประกอบในตัวอย่างจะมีความจำเพาะเจาะจงสูงและมีประสิทธิภาพดีได้นั้น ขึ้นอยู่กับคอลัมน์ ที่ใช้ในเครื่องโครมาโทกราฟี สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

4.1 Packed column

ทำด้วยแก้วหรือสแตนเลส ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1/8 นิ้ว หรือ 2 ถึง 6 มิลลิเมตร มีความยาว 1 ถึง 3 เมตร บรรจุด้วยเฟสอยู่กับที่ (Packing material) โดยเฟสอยู่กับที่ต้องมีลักษณะสม่ำเสมอ (Uniform) มีหลายขนาด เช่น 100 ถึง 200 เมช หรือ 60 ถึง 80 เมช โดยหลอดคอลัมน์ต้องถูกขุดเป็นรูปที่สามารถบรรจุในเตาอบของเครื่อง GC และต่อเข้ากับส่วนฉีดตัวอย่างได้อย่างสนิท (Fitting)

4.2 Open tubular column หรือ Capillary column

คอลัมน์ชนิดนี้มีลักษณะเป็นหลอดคาปิลารีที่ทำด้วยซิลิกาหลอม (Fused silica) ที่มีความยาว 10 ถึง 100 เมตรเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 ถึง 0.7 มิลลิเมตร ขดเป็นวงกลมซ้อนๆกันให้มีขนาดพอดีที่บรรจุในเตาของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีและพอดีกับส่วนที่ฉีดตัวอย่างและดีเทคเตอร์

5. ตู้อบให้ความร้อน (Oven)

อุณหภูมิของคอลัมน์เป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการทำงานเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ดังนั้นคอลัมน์ต้องติดตั้งอยู่ในตู้อบ ที่ควบคุมอุณหภูมิได้อย่างถูกต้องและแม่นยำด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ (Thermostat) ปกติอุณหภูมิของตู้อบที่ใช้จะต่ำกว่าอุณหภูมิ Injector ประมาณ 10 ถึง 20 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของคอลัมน์จะมีผลต่อค่ารีเทนชันและการแยกอย่างมาก อุณหภูมิคงที่จะให้รีเทนชันที่คงที่ ที่อุณหภูมิจะมีผลทำให้ไอของสารตัวอย่างส่วนใหญ่อยู่ในเฟสของแก๊ส เพราะการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การละลายของสารตัวอย่างในเฟสอยู่กับที่ลดลง จึงทำให้สารตัวอย่างถูกชะได้อย่างรวดเร็ว ถ้ามีสารผสมอยู่หลายตัวจะทำให้สารเหล่านั้นถูกชะออกจากคอลัมน์ได้ในเวลาใกล้เคียงกัน

การแยกจะเกิดขึ้นไม่ดี แต่ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำ สารตัวอย่างก็จะใช้เวลาส่วนใหญ่อยู่ในเฟสอยู่กับที่ ทำให้การระเหยเกิดขึ้นช้า รีเทนชันไทม์จะมีค่ามากแต่การแยกดีขึ้น

6. ตัวตรวจวัด (Detectors)

เมื่อสารประกอบในตัวอย่างถูกทำให้แยกออกจากกันภายในคอลัมน์แล้วถูกพาออกมายังดีเทคเตอร์ ดีเทคเตอร์จะทำหน้าที่วัดขนาดสารตัวอย่างว่ามีปริมาณมากน้อยเท่าไร ดังนั้นดีเทคเตอร์ที่เลือกใช้ต้องสามารถวัดขนาดตัวอย่างนั้นๆได้ มีความไวต่อตัวอย่าง และมีความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) สูง

ตัวอย่างของดีเทคเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไปในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีในปัจจุบัน เช่น

6.1 Thermal conductivity detector (TCD)

ดีเทคเตอร์ชนิดนี้จัดเป็น Universal detector สามารถตรวจหาสารได้ทุกชนิดที่ให้การนำความร้อนแตกต่างจากแก๊สตัวพา มีราคาถูกและใช้กันอย่างกว้างขวาง มีหลักการ คือ วัดการลดขนาดความร้อนจากการสูญเสียความร้อนของใยเส้นลวดในดีเทคเตอร์เนื่องจากโมเลกุลของตัวอย่างเข้ามาสัมผัส ซึ่ง TCD ประกอบด้วยใยเส้นลวด (Filament) ที่ทนความร้อนสอดไว้อยู่กลางหลอดของแท่งโลหะ ใยเส้นลวดทำจากแพลตินัม หรือทังสเตน ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.02 มิลลิเมตร ถูกให้ความร้อนโดยผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปอุณหภูมิที่ต่างกันของเส้นลวดกับหลอดของแท่งโลหะ จะมีผลต่อสภาพไวของดีเทคเตอร์ เมื่อแก๊สตัวพาผ่านเข้าไปในหลอดของแท่งโลหะสม่ำเสมอและคงที่ จะมีผลทำให้ใยเส้นลวดร้อนด้วยอุณหภูมิคงที่ เมื่อแก๊สตัวพาพาสารที่ต้องการวิเคราะห์ออกจากคอลัมน์เข้าสู่ดีเทคเตอร์ จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิของใยเส้นลวดเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเส้นลวดที่ต่อเป็นวงจรไฟฟ้า Wheatstone bridge เมื่อทำการปรับความต้านทานเข้าสู่สมดุล กระแสที่เปลี่ยนไปจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานใน Wheatstone bridge จะถูกส่งไปยังส่วนขยาย (Amplifier) และต่อไปยังส่วนบันทึกผลในที่สุด ซึ่งขนาดของสัญญาณจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของสารตัวอย่างนั่นเอง และเนื่องจากเส้นลวดจะถูกเผาที่อุณหภูมิสูงตลอดเวลา อาจจะทำให้เส้นลวดเกิดการขาดได้ง่าย จึงต้องระวังในการใช้โดยก่อนเปิดสวิทซ์ให้ความร้อนแก่ดีเทคเตอร์ต้องผ่านแก๊สตัวพาไปก่อนสักครู่หนึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้เส้นลวดไหม้ เนื่องจากมีอากาศอยู่

6.2 Flame ionization detector (FID)

ดีเทคเตอร์ชนิดนี้เป็นดีเทคเตอร์มาตรฐานที่ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในแก๊สโครมาโทกราฟี เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ทุกชนิดสามารถเกิดไอออนไนซ์ (Ionization) ได้ในเปลวไฟ ทำให้เกิดกระแสของไอออนที่สามารถสะสมอยู่ระหว่างขั้วที่มีประจุตรงข้าม 2 ขั้วได้ตามปริมาณของไอออน กระแสที่เกิดขึ้นยังมีปริมาณน้อยต้องใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อขยายให้มีปริมาณกระแสไฟฟ้ามากขึ้น เปลวไฟที่ใช้ในการทำให้อินทรีย์เกิดการไอออนไนซ์ คือเปลวไฟจากแก๊สไฮโดรเจน ปริมาณหรือ

จำนวนอะตอมจากคาร์บอนที่เกิดการไอออไนซ์หรือถูกออกซิไดซ์จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณกระแสของไอออนที่เกิดขึ้น ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของสารตัวอย่างด้วยนั่นเอง ดีเทคเตอร์ FID สามารถวิเคราะห์สารประกอบที่มีความเข้มข้นน้อยๆ ได้ดีกว่า TCD ถึง 1,000 เท่า

เหตุผลของการนิยมใช้ FID ในการวิเคราะห์ทั่วไป คือ

- ให้ความไวสูงกับสารประกอบอินทรีย์ทุกชนิด
- ไม่ตอบสนองต่อน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และมลทินในแก๊สตัวพา
- ให้เส้นฐาน (Base line) ที่นิ่งและไม่แกว่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดันและอัตราการไหลของแก๊สตัวพา
- มีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ดี (Good linearity) และมี Linearity range (LDR) ในช่วงของความเข้มข้นที่กว้าง

ในระบบ FID การใช้ประกอบด้วยแก๊ส 3 ชนิดคือ แก๊สตัวพาพร้อมกับไฮโดรเจนและอากาศ แก๊สไฮโดรเจนจะทำหน้าที่เป็นเชื้อเพลิงในการจุดเปลวไฟด้วยตัวให้ความร้อน อากาศเป็นตัวช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและอากาศต้องปรับให้ถูกต้องและเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมกับแก๊สตัวพา ถ้าสัดส่วนไม่เหมาะสมจะทำให้การจุดเปลวไฟที่ดีเทคเตอร์เกิดได้ยาก อัตราส่วนที่เหมาะสมของแก๊สตัวพาต่อไฮโดรเจน ประมาณ 1.2 ต่อ 1 และอัตราการไหลของอากาศคือ 300 ถึง 600 มิลลิลิตรต่อนาที เปลวไฟของไฮโดรเจนและอากาศจะถูกจุดที่หัว Jet โดยมีตำแหน่งของขั้ว (Electrode) วางอยู่เหนือเปลวไฟเพื่อเป็นที่สะสมของไอออนตัวอย่าง (Analyze ion) แก๊สตัวพาและไอของตัวอย่างจะเข้าสู่เปลวไฟแล้วทำให้สารตัวอย่างซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์เกิดการไอออไนซ์ได้อิเล็กตรอนและไอออนบวก ซึ่งปริมาณของไอออนไนซ์โมเลกุลจะขึ้นอยู่กับจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลของสารตัวอย่างอินทรีย์ และปริมาณของสาร

เนื่องจากการเผาไหม้ของแก๊สไฮโดรเจนที่ดีเทคเตอร์จะมีไอน้ำเกิดขึ้น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกลั่นตัวของไอน้ำควรตั้งอุณหภูมิของดีเทคเตอร์ไว้สูงกว่า 100 องศาเซลเซียส สำหรับสารประกอบที่มีโมเลกุลใหญ่ๆ มักเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้มีเขม่าอุดตันที่หัว Jet จึงต้องใช้อุณหภูมิให้สูงและต้องมีการถอดหัว Jet มาล้างให้สะอาด เมื่อโครมาโทแกรมมีสัญญาณรบกวนมาก หรือสภาพไวของดีเทคเตอร์ลดลง ถ้าตัวอย่างเป็นสารประกอบที่มีคลอรีน ผลของการเผาไหม้จะทำให้เกิดการดไฮโดรคลอริก ที่ก่อให้เกิดการผุกร่อนของ Jet ได้ง่าย จึงควรระวัง

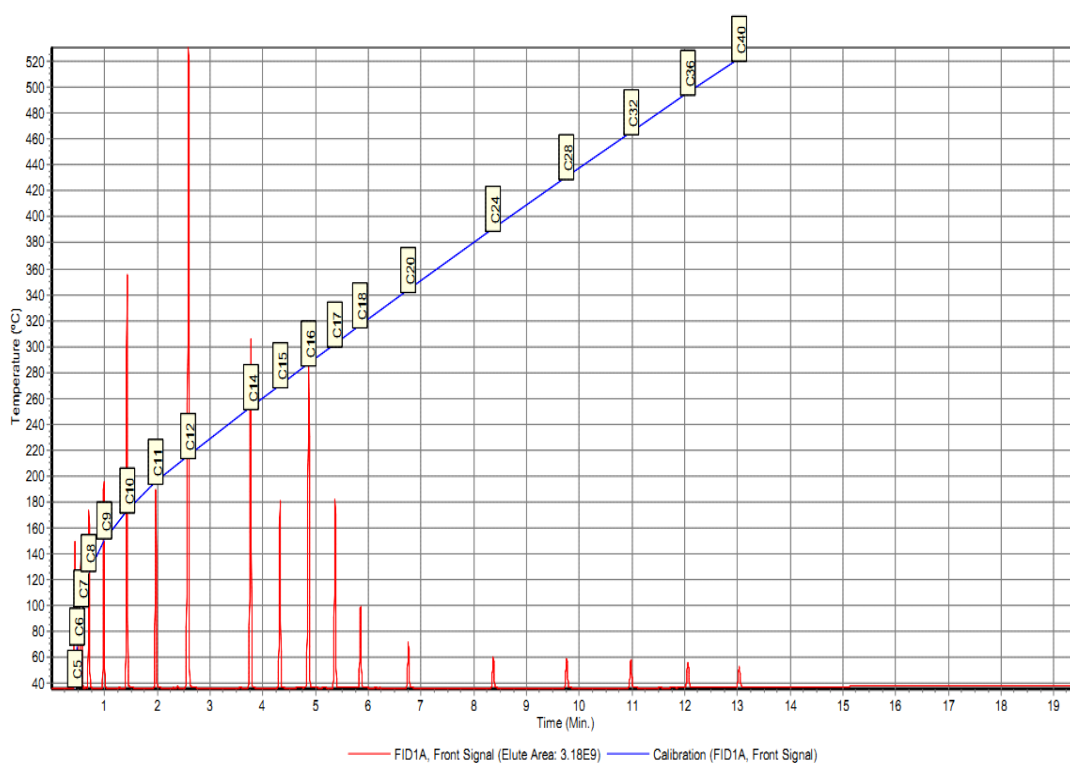
7. ส่วนประมวลผล และบันทึกข้อมูล (Data processing and recorder)

ปัจจุบันการบันทึกข้อมูล และประมวลผลต่างๆ สามารถทำได้โดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่บริษัทผู้ผลิตเครื่องมือเป็นผู้สร้างขึ้น และระบบการทำงานของเครื่องมือทั้งหมดถูกควบคุมได้ด้วยคอมพิวเตอร์ ทำให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้อง และเที่ยงตรงมากขึ้น ข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้ใน

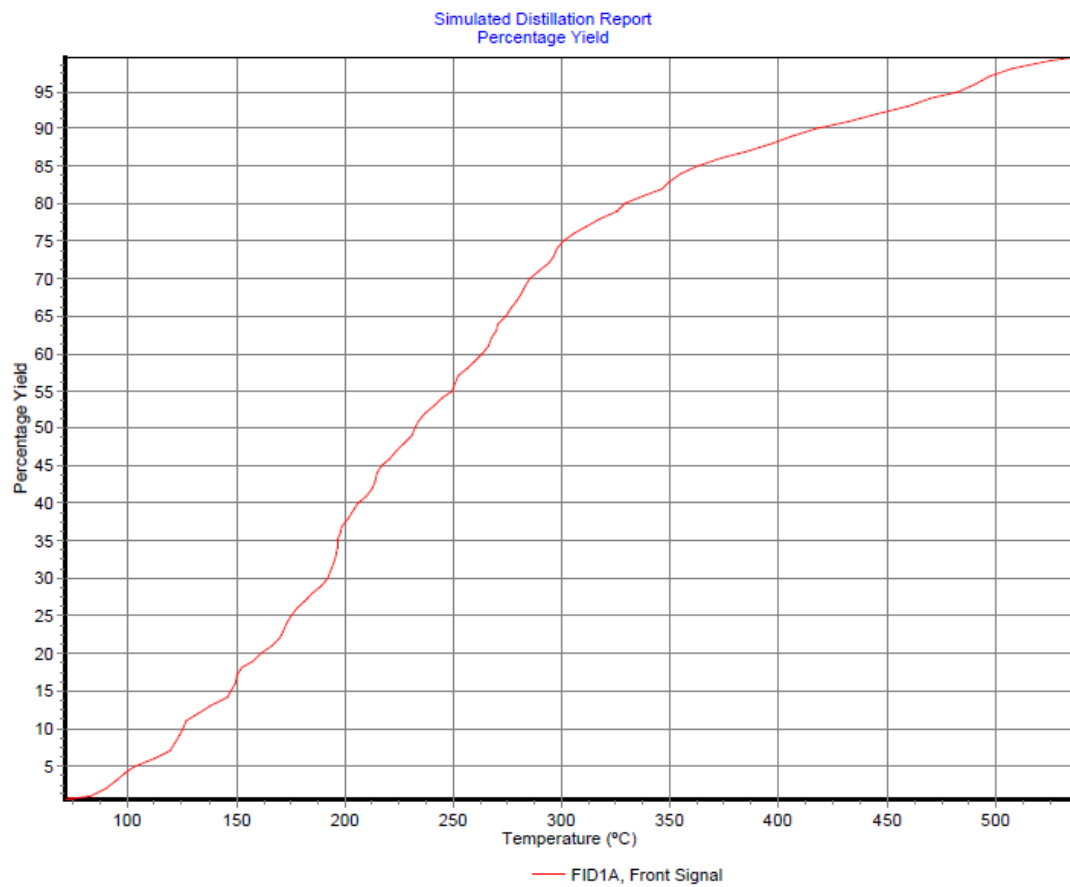
หน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ ทำให้ผู้วิเคราะห์มีความสะดวก และง่ายในการนำข้อมูลมาประมวลผล และเก็บผลนั้นไว้ได้โดยไม่สิ้นเปลืองกระดาษบันทึกผล

กราฟแสดงการกระจายตัวตามจุดเดือด

โครมาโทแกรมที่ได้จากการกลั่นแยกสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจะเปลี่ยนเป็นกราฟการกระจายตัวตามคาบจุดเดือด (Boiling point distribution plot) ด้วยโปรแกรมจำลองการกลั่นเทียบกับโครมาโทแกรมของสารมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM D2887 ดังแสดงในรูปที่ ง.2 และ ง.3



รูปที่ ง.2 โครมาโทแกรมจากการแยกองค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ



รูปที่ ง.3 กราฟการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว

ภาคผนวก จ.

การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งทางกายภาพและเคมี มีความสำคัญและมีความจำเป็นอย่างมาก เนื่องจากจะช่วยให้สามารถตรวจสอบเบื้องต้นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ตรงตามความต้องการหรือไม่ และจะทำให้เข้าใจเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการไปใช้งาน อีกทั้งสามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งขณะใช้งาน และภายหลังการใช้งานได้

1. การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน

การวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถทำได้โดยใช้หลักการการดูดซับทางกายภาพของแก๊สที่โมเลกุลขนาดเล็ก เช่น ไนโตรเจน อาร์กอน โดยแก๊สจะทำหน้าที่เป็นสารดูดซับบนสารตัวอย่างซึ่งทำหน้าที่เป็นสารดูดซับภายใต้ภาวะควบคุม คือ อุณหภูมิ การดูดซับต้องคงที่และต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) ของแก๊ส และความดันที่เปลี่ยนไปจนเข้าสู่ความดันสมดุล (Equilibrium pressure) สำหรับการคายซับใช้หลักการเดียวกับการดูดซับ

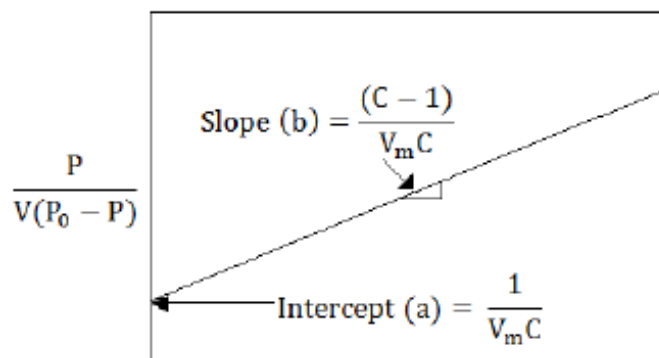
การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยวิธีบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller method, BET) คือ การดูดซับแก๊สไนโตรเจนของสารตัวอย่างที่อยู่ในสถานะของแข็งที่มีลักษณะเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น ภายใต้อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (Standard temperature and pressure, STP) แก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบางส่วนจะเคลือบบนผิวของสารตัวอย่างในลักษณะโมเลกุลชั้นเดียว (Monolayer) และบางส่วนจะเคลือบบนผิวของสารตัวอย่างในลักษณะโมเลกุลหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการของบีอีที (BET equation) ดังสมการที่ จ.1

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

เมื่อ	P	คือ ความดันของแก๊สที่ใช้ขณะทำการทดลอง (มิลลิเมตรปรอท)
	P ₀	คือ ความดันอิ่มตัวของแก๊สที่ถูกดูดซับ (มิลลิเมตรปรอท)
	V	คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับทั้งหมดที่ความดัน P (ลูกบาศก์เมตร)
	V _m	คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับในการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (ลูกบาศก์เมตร)
	C	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

จากสมการที่ จ.1 สามารถเขียนในรูปของสมการเส้นตรง $y = a + bx$ ดังแสดงในรูปที่ จ.1

เมื่อ	x	คือ P/P_0
	y	คือ $P/V(P_0-P)$
	a	คือ $1/V_m C$ ซึ่งเป็นจุดตัดแกน y
	b	คือ $(C-1)/V_m C$ ซึ่งเป็นความชัน

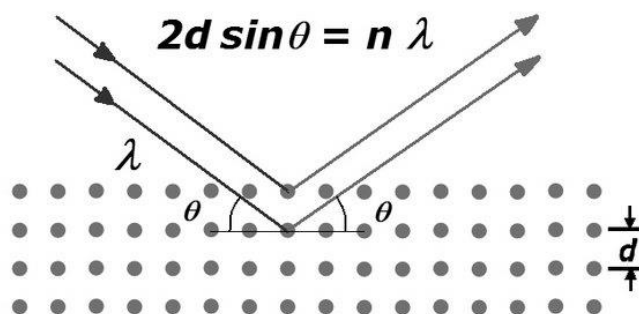


รูปที่ จ.1 กราฟเส้นตรงของสมการปัวีที

2. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเป็นเทคนิคที่มีการใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกของแข็งในระดับอะตอม ซึ่งสามารถวิเคราะห์ชนิดของวัสดุได้เนื่องจากการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะให้สเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ สามารถบอกวิญภาคเชิงผลึกของวัสดุได้ว่ามีความเป็นผลึกหรือเป็นอสัณฐาน และมีประโยชน์ในการวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เนื่องจากสามารถบอกชนิดของสารที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งวิญภาคของสารได้

เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบดังรูปที่ จ.2



รูปที่ จ.2 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์กับระยะห่างระหว่างระนาบผลึกและมุมตกกระทบสามารถเขียนได้ดังสมการที่ จ.2 หรือเรียกสมการนี้ว่า Bragg's Equation

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (\text{จ.2})$$

เมื่อ n คือ อันดับของการสะท้อน (Order of reflection) ซึ่งเป็นเลขจำนวนเต็ม

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

θ คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบของผลึก

ถ้าเราสามารถวัดมุม 2θ ซึ่งเป็นมุมระหว่างรังสีที่เกิดการแทรกสอดกับรังสีตกกระทบ เราจะสามารถหาค่า d ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิดได้ และในการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกของแข็งสามารถแยกแยะว่ามีของแข็งนั้นมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือเป็นเป็นธาตุชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัด

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณัฐญา จันทวบ เกิดเมื่อวันที่ 17 พฤษภาคม 2535 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 1) สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2559 ได้เข้าร่วมการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25 ในหัวข้อการแปรรูปร่วมของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วและน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ระหว่างวันที่ 8 ถึง 10 พฤศจิกายน 2558 ณ โรงแรมดุสิตธานี พัทยา จังหวัดชลบุรี, ENS-OT-08, หน้า O-22