

การแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์
ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



นางสาวพสธร ชุนไธษฐ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CATALYTIC CRACKING OF PALM OIL FROM EMPTY FRUIT BUNCH ON DOLOMITE
IN CONTINUOUS REACTOR

Miss Phasatorn Khunoad



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลาย
	ปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
โดย	นางสาวพัสสร ชุนโอบุษฐ์
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวนศิริ)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)
.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลรัตน์ ตระการพฤษย์)
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ)

พสธร ชุนโอษฐ์ : การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (CATALYTIC CRACKING OF PALM OIL FROM EMPTY FRUIT BUNCH ON DOLOMITE IN CONTINUOUS REACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์, 107 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาปัจจัยการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร วัตถุประสงค์เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีสัดส่วนของดีเซลมากที่สุด โดยการออกแบบการทดลองเชิงตัวประกอบแบบสองระดับ (2k factorial design) ตัวแปรที่ทำการศึกษาดังต่อไปนี้ คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380-460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม 3-9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 50-150 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 30-60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้นำไปวิเคราะห์ด้วยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น และเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์เพื่อบ่งบอกโครงสร้างโมเลกุลเชื้อเพลิงเหลว เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Design Expert พบว่าภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม 8.96 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50.04 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ จะได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 59.73 และร้อยละผลได้ของดีเซล 66.12 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าความร้อน 45.20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความเป็นกรด 0.35 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5672253223 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: PYROLYSIS / CATALYTIC CRACKING / DECARBOXYLATION

PHASATORN KHUNOAD: CATALYTIC CRACKING OF PALM OIL FROM EMPTY FRUIT BUNCH ON DOLOMITE IN CONTINUOUS REACTOR. ADVISOR: PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., 107 pp.

This research aims to study catalytic cracking of palm oil from empty fruit bunch over dolomite in 3 liter continuous reactor. The objective is to investigate the influence of parameters which affect to the optimum condition that obtain the maximum yield of liquid product and diesel-like fraction. This experiments were used 2k factorial design to investigate the parameters such as temperature of 380-460 °C, feed rate of palm oil 3-9 mL/min, nitrogen gas flow rate of 50-150 mL/min and the amount of catalyst 30-60% (by reactor volume). Liquid product were obtained and analysed by using distillation simulation gas chromatography and gas chromatograph mass- spectrometry to identified the structural of liquid fuels. An analysis from design-expert program, shown that the optimum condition for catalytic cracking of palm oil from empty fruit bunch on dolomite in continuous reactor as following; temperature of 460 °C, feed rate of palm oil 8.96 mL/min, nitrogen gas flow rate of 50.04 mL/min and the amount of catalyst 60% (v/v) which gave the highest diesel-like fraction of 66.12 %wt whereas gave liquid yield of 57.93 %wt. The physicochemical analysis from liquid product obtained 45.20 MJ/kg of heating value and the acidity of 0.35 mgKOH/g.

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสถานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ แนวทาง คำปรึกษาตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ในหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ทุกท่าน

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวศิริ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.วิมลรัตน์ ตระการพุกฤษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมถึงแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่กรุณาให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมถึงแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบริษัท ทักษิณปาล์ม (2521) จำกัด ที่อนุเคราะห์น้ำมันปาล์มจากทะเลายปาล์มเปล่าที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณทุนคลังสเตอร์พลังงาน โครงการทุนยุทธศาสตร์การวิจัยเชิงลึก ประจำปี 2557 กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการให้ทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณบุคลากรทั้งในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน และศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล อำเภอแก่งคอย จ.สระบุรี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ที่ให้การอบรมสั่งสอนและกำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	ญ
สารบัญตาราง.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ปีโตรเลียม.....	4
2.2 พลังงานจากชีวมวล	9
2.3 ปาล์มน้ำมัน.....	10
2.4 กระบวนการไพโรไลซิส	13
2.5 เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงดีเซล	15
2.6 การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง	16
2.7 การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน.....	17
2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยา	21
2.9 โดโลไมต์	26
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27

บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	31
3.1 เครื่องปฏิกรณ์และส่วนประกอบ	31
3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	33
3.3 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	36
3.4 การดำเนินงานวิจัย.....	36
3.5 วิธีการทดลอง.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	40
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่า	40
4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	43
4.3 การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาโตโล ไมต์.....	47
4.4 ผลของตัวแปรที่ศึกษาต่อการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าบน โตโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	56
4.5 คำแนะนำภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลาย ปาล์มเปล่าบนโตโลไมต์ด้วยโปรแกรม Design-Expert	65
4.6 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้	66
4.7 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลว.....	67
4.8 การวิเคราะห์ค่าความร้อน.....	68
4.9 วิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมัน ปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนโตโลไมต์.....	69
4.10 ผลการทดลองและงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน	78
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	80
รายการอ้างอิง	81
ภาคผนวก.....	86

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 107



สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างพาราฟินที่พบในปิโตรเลียม.....	4
ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างแนฟทีนที่พบในปิโตรเลียม.....	5
ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างแอรอมาติกที่พบในปิโตรเลียม.....	5
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเตตระลีน (tetralin).....	6
ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างสารประกอบกำมะถันที่พบในปิโตรเลียม.....	6
ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างสารประกอบไนโตรเจนที่พบในปิโตรเลียม.....	7
ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างสารประกอบออกซิเจนที่พบในปิโตรเลียม.....	7
ภาพที่ 2.8 โครงสร้างของคลอโรฟิลล์ ซึ่งมีวงพอร์ไฟรินเป็นโครงสร้างหลัก.....	8
ภาพที่ 2.9 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....	15
ภาพที่ 2.10 ปฏิกริยาดีคาร์บอกซิเลชัน.....	16
ภาพที่ 2.11 การแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น.....	23
ภาพที่ 2.12 การแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน.....	24
ภาพที่ 2.13 การดูดซับทางเคมีของสาร A บนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	25
ภาพที่ 2.14 การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจากโมเลกุลสาร A เปลี่ยนไปเป็นโมเลกุล B.....	25
ภาพที่ 2.15 โครงสร้างผลึกแบบ rhombohedral.....	26
ภาพที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร.....	31
ภาพที่ 3.2 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร.....	32
ภาพที่ 3.3 อุปกรณ์ควบแน่นผลิตภัณฑ์.....	33
ภาพที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น.....	34
ภาพที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์.....	34
ภาพที่ 3.6 เครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ.....	35

ภาพที่ 3.7 เครื่อง Scanning electron microscope.....	35
ภาพที่ 3.8 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์.....	35
ภาพที่ 3.9 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน	36
ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าด้วย เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี- แมสสเปกโทมิเตอร์.....	41
ภาพที่ 4.2 เทอร์โมแกรมของการแตกสลายเชิงความร้อนของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่า.....	43
ภาพที่ 4.3 รูปแบบ XRD ของ (a) โดโลไมต์ก่อนแคลไซน์ (b) โดโลไมต์หลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อ ● แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ , □ แคลเซียมไฮดรอก ไซด์, ◆ แคลไซต์, ▽ แมกนีเซียมออกไซด์ และ ○ แคลเซียมออกไซด์.....	44
ภาพที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของโดโลไมต์ (a) โดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์ (b) โดโลไมต์หลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า.....	45
ภาพที่ 4.5 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว	50
ภาพที่ 4.6 Normal probability plot ของส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิง เหลว	51
ภาพที่ 4.7 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของดีเซล	54
ภาพที่ 4.8 Normal probability plot ของส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ของดีเซล.....	55
ภาพที่ 4.9 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (อัตราการ ป้อนน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 150 มิลลิลิตรต่อนาที และ อุณหภูมิ 380 และ 460 องศาเซลเซียส เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ร้อยละ 60 โดยปริมาตร ของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*)).....	56
ภาพที่ 4.10 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (อัตราการ ป้อนน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 150 มิลลิลิตรต่อนาที และ อุณหภูมิ 380 และ 460 องศาเซลเซียส เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ ร้อยละ 60 โดยปริมาตร ของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*)).....	57
ภาพที่ 4.11 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนน้ำมัน ปาล์ม (อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 150 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการ	

ป้อนน้ำมันปาล์ม 3 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาทีเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ร้อยละ 60 โดย ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*).....	58
ภาพที่ 4.12 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อน น้ำมันปาล์ม (อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 150 มิลลิลิตรต่อนาที อัตรา การป้อนน้ำมันปาล์ม 3 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาทีเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ร้อยละ 60 โดย ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*).....	59
ภาพที่ 4.13 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนแก๊ส ตัวพา (อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการ ป้อนแก๊สตัวพา 50 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ร้อยละ 60 โดย ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*).....	61
ภาพที่ 4.14 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อน น้ำมันปาล์ม (อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 150 มิลลิลิตรต่อนาที อัตรา การป้อนน้ำมันปาล์ม 3 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาทีเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ร้อยละ 60 โดย ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*).....	62
ภาพที่ 4.15 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 150 มิลลิลิตรต่อนาที อัตรา การป้อนน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาทีเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ร้อยละ 30 และ 60 โดย ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา).....	63
ภาพที่ 4.16 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนแก๊ส ตัวพา (อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการ ป้อนแก๊สตัวพา 50 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ร้อยละ 60 โดย ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*).....	64
ภาพที่ 4.17 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของ น้ำมัน จากทะเลาะปาล์มเปล่าบนโคโลไมต์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-กับแมสสเปกโตรมิเตอร์ ..	69
ภาพที่ 4.18 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมัน ปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าบนโคโลไมต์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวตรวจวัด TCD	78
ภาพที่ ข.1 แสดงตารางของ 2 Level Factorial Design.....	93
ภาพที่ ข.2 การกำหนดตัวแปร.....	94

ภาพที่ ข.3 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง	94
ภาพที่ ข.4 จำนวนการทดลองและค่าของตัวแปรแต่ละการทดลอง	95
ภาพที่ ข.5 Half normal plot	95
ภาพที่ ข.6 ANOVA ของการวิเคราะห์ตัวแปร	96
ภาพที่ ข.7 การกำหนดตัวแปรตอบสนองที่ต้องการหาภาวะที่เหมาะสม	96
ภาพที่ ข.8 การคำนวณภาวะที่เหมาะสม	97
ภาพที่ ค.1 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	98
ภาพที่ ค.2 โครมาโทแกรมจากการแยกองค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของเชื้อเพลิงเหลวจาก เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	101
ภาพที่ ค.3 แผนภูมิจำลองการกลั่น	101
ภาพที่ ง.1 กราฟการวัดพื้นที่ผิวด้วยวิธีบีอีที	102
ภาพที่ ง.2 กราฟเส้นตรงของสมการบีอีที	103
ภาพที่ ง.3 ปรัชญาการถนอมการเสี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	104
ภาพที่ ง.4 แผนภาพองค์ประกอบกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	105

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมัน ปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาไดโกลไมต์	37
ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองเชิงประกอบแบบสองระดับ เพื่อทำการศึกษากการแตกตัว เชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาไดโกลไมต์.....	38
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าก่อนการศึกษากการแตกตัวเชิง เร่งปฏิกิริยา	40
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์	42
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุน (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาไดโกลไมต์	45
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาไดโกลไมต์ด้วยเทคนิค XRF	46
ตารางที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมัน ปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาไดโกลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	48
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการแตก ตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนไดโกลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์ แบบต่อเนื่อง.....	50
ตารางที่ 4.7 แสดงร้อยละผลได้ของดีเซลที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจาก ทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาไดโกลไมต์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น.....	52
ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของดีเซลจากการแตกตัวเชิงเร่ง ปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนไดโกลไมต์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลอง การกลั่น	54
ตารางที่ 4.9 ขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert จากการแตกตัว เชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนไดโกลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ..	65
ตารางที่ 4.10 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert จากการแตกตัวเชิงเร่ง ปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนไดโกลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง	65
ตารางที่ 4.11 ค่าความเป็นกรดของเชื้อเพลิงเหลว	66

ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลว..... 67

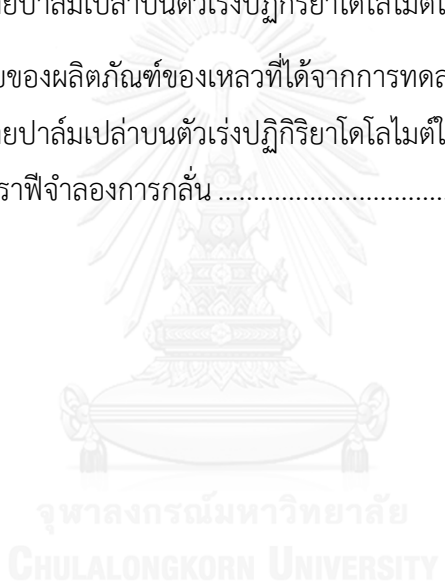
ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter ของน้ำมันจาก
 ทะลายปาล์มเปล่าก่อนและหลังการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา..... 68

ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของ
 น้ำมันจากทะลายปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทก
 ราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์..... 70

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองและงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน..... 79

ตารางที่ ก.1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการทดลองการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา
 ของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง... 87

ตารางที่ ก.2 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา
 ของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
 ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น 89



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในช่วงศตวรรษที่ผ่านมา ความเจริญก้าวหน้าทางด้านเศรษฐกิจเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว พลังงานส่วนใหญ่ได้มาจากน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งใช้แล้วหมดไป แต่ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นและแหล่งผลิตที่มีอยู่จำกัดก่อให้เกิดปัญหาการขาดแคลนพลังงาน ทำให้มีการค้นคว้าและพัฒนาแหล่งพลังงานชนิดใหม่ เพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง สำหรับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ดังนั้นโอกาสที่จะใช้การเกษตรเข้ามาช่วยพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนย่อมมีความเป็นไปได้มากกว่าประเทศอุตสาหกรรมทั้งหลาย

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีโอกาสพัฒนาให้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมได้ เนื่องจากเป็นพืชที่ให้น้ำมันสูงที่สุดต่อพื้นที่เมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่น ๆ [1] โดยน้ำมันที่ได้จากผลปาล์มเมื่อทำให้บริสุทธิ์แล้วจะนำไปใช้บริโภค ส่วนทะลายปาล์มเปล่าจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้โดยตรงในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าภายในโรงงานน้ำมันปาล์มและทำปุ๋ยพบว่าทะลายปาล์มเปล่ามีน้ำมันคงเหลืออยู่เกือบร้อยละ 5 [2] สามารถนำมาหีบน้ำมันออกมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวได้ โดยได้มีการทดลองนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน พบว่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าต่ำ เนื่องจากน้ำมันมีองค์ประกอบของน้ำตาลอยู่ ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้ไม่ดี ในขั้นตอนการผลิตต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และใช้น้ำปริมาณมากเพื่อล้างตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนให้เกิดน้ำเสียที่ยากต่อการกำจัด นอกจากนี้ยังใช้เวลาทำปฏิกิริยานานและเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงคือกลีเซอรอลที่มีความบริสุทธิ์ต่ำ ต้องนำไปผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ ทำให้การนำไปใช้ประโยชน์มีน้อย ปัจจุบันการสังเคราะห์เชื้อเพลิงโดยกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ได้รับความสนใจ เนื่องจากมีข้อดีหลายประการคือ สามารถใช้วัตถุดิบได้หลากหลายไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์หรือกำจัดน้ำออก เช่น น้ำมันพืชบริสุทธิ์ น้ำมันพืชใช้งานแล้ว สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวได้ นอกจากนี้ยังใช้เวลาไม่นาน และกระบวนการไพโรไลซิสใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst) ทำให้สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย จึงไม่มีของเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างผลิตภัณฑ์หรือผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียม มีความหนืดและปริมาณออกซิเจนต่ำ จึงสามารถนำไปใช้ทดแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียมได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำน้ำมัน

ปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่ามาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องโดยใช้ โดโลไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากโดโลไมต์เป็นแหล่งของแมกนีเซียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ ส่งเสริมปฏิกิริยา ดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนในช่วงดีเซล อีกทั้งยังช่วยลดความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย โดยศึกษาตัวแปรดังนี้ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา อัตราการป้อนสารตั้งต้น อัตราการป้อนแก๊สตัวพา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลที่ได้ และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีสัดส่วนของดีเซลมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร
2. หาภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีสัดส่วนของดีเซลมากที่สุด

1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาการใช้เครื่องปฏิกรณ์ และข้อมูลทางด้านเทคนิค
3. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ อุณหภูมิในการเผา (calcine) 800°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ศึกษาองค์ประกอบ และสมบัติทางกายภาพของสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ ดังนี้
 - 4.1 ศึกษาอุณหภูมิในการสลายทางความร้อนของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าด้วยเทคนิค thermo gravimetric analysis (TGA)
 - 4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าด้วยเทคนิค gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)
 - 4.3 ศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (distillation simulation gas chromatography, DGC)
 - 4.4 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)
 - 4.5 วิเคราะห์หาองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-ray fluorescence spectrometry (XRF)
 - 4.6 ตรวจสอบลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค scanning electron microscope (SEM)
 - 4.7 วิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากวิธีดูดซับแก๊สไนโตรเจน ด้วยเทคนิค BET

5. ออกแบบการทดลองเชิงตัวประกอบแบบสองระดับ (2k factorial design) โดยมีตัวแปรที่ต้องศึกษา ประกอบด้วย
 - อุณหภูมิในการปฏิกิริยา 380-460 องศาเซลเซียส
 - อัตราการป้อนสารตั้งต้น 3-9 มิลลิลิตรต่อนาที
 - อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 50-150 มิลลิลิตรต่อนาที
 - ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคิดเป็นร้อยละ 30-60 ของปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์
6. ดำเนินการทดลอง และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์
 - วิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบเชื้อเพลิงเหลวในช่วงคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น
 - วิเคราะห์องค์ประกอบที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงเหลวด้วยเทคนิค gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)
 - วิเคราะห์ผลการทดลอง และหาภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิงของเหลวมากที่สุด โดยใช้วิธีพื้นผิวการตอบสนอง (response surface methodology)
7. สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโตโลไมต์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีสัดส่วนของดีเซลมากที่สุด มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และเป็นข้อมูลในการออกแบบกระบวนการผลิตในเชิงพาณิชย์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

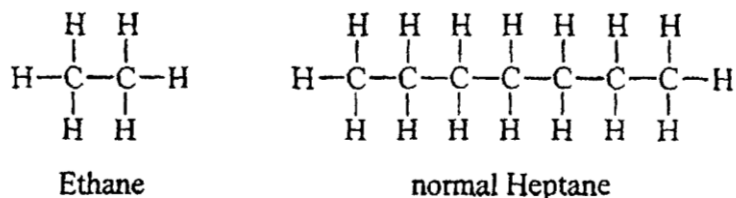
2.1 ปิโตรเลียม

ปิโตรเลียม (petroleum) [3] มาจากรากศัพท์ในภาษาละติน 2 คำ คือ เพทรา (petra) แปลว่าหิน และโอเลียม (oleum) แปลว่าน้ำมัน เมื่อรวมแล้วมีความหมายว่า น้ำมันที่ได้จากหิน แบ่งได้ตามสถานะ 2 ชนิด คือของเหลว เรียกว่า น้ำมันดิบ (crude oil) และแก๊ส เรียกว่า แก๊สธรรมชาติ (natural gas)

2.1.1 น้ำมันดิบ

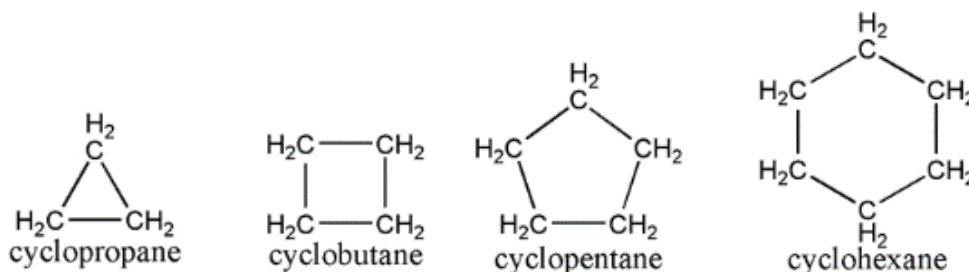
น้ำมันดิบ [4] แต่ละแหล่งมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ โครงสร้างของสารเคมีอินทรีย์ที่อยู่ในซากพืชซากสัตว์ ความลึกของชั้นหินที่เป็นแหล่งกำเนิด ชนิดของชั้นหินที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนย้าย การเคลื่อนตัวของเปลือกโลก และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในแหล่งกักเก็บ มีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

พาราฟิน (paraffins) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbons) ได้แก่ นอร์มัลพาราฟิน (normal-paraffins) ตั้งแต่ C_1 - C_{40} และมากกว่า C_{40} พบเล็กน้อย เช่น มีเทน (methane) อีเทน (ethane) ไอโซพาราฟิน (isoparaffins) คือพาราฟินที่มีหมู่เมทิลต่ออยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และพาราฟินแบบกิ่ง (branched paraffins) คือพาราฟินที่มีกิ่งออกจากสายโซ่โมเลกุลหลักมีโครงสร้าง แสดงในภาพที่ 2.1 [5]



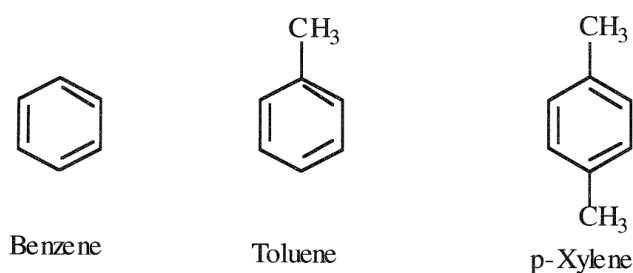
ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างพาราฟินที่พบในปิโตรเลียม

แนฟทีน (naphthenes) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวง เรียกว่า ไซโคล-แอลเคน (cycloalkanes) ส่วนใหญ่ที่พบเป็นวงขนาดห้าเหลี่ยม และหกเหลี่ยม ในน้ำมันดิบจะมีแนฟทีนสูงถึงร้อยละ 50 จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูง แสดงในภาพที่ 2.2 [6]



ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างแนฟทีนที่พบในปิโตรเลียม

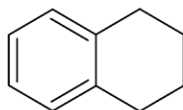
แอโรมาติก (aromatics) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงหกเหลี่ยม มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว เช่น เบนซีน (benzene) ปริมาณที่พบในน้ำมันดิบมีน้อยมาก มักพบในส่วนกลั่นหนัก เช่น แก๊สออยล์ น้ำมันหล่อลื่นและกากการกลั่น อนุพันธ์ของเบนซีนที่พบมากที่สุดปิโตรเลียมคือ โทลูอินและไซลีน และอนุพันธ์ประเภทอื่นของเบนซีนได้แก่ สารที่มีวงแอโรมาติกแนบต่อกัน เช่น แนฟทาลีน พีแนนทริน และแอนทราซีน เป็นต้น ตัวอย่างแอโรมาติก แสดงในภาพที่ 2.3 [7]



ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างแอโรมาติกที่พบในปิโตรเลียม

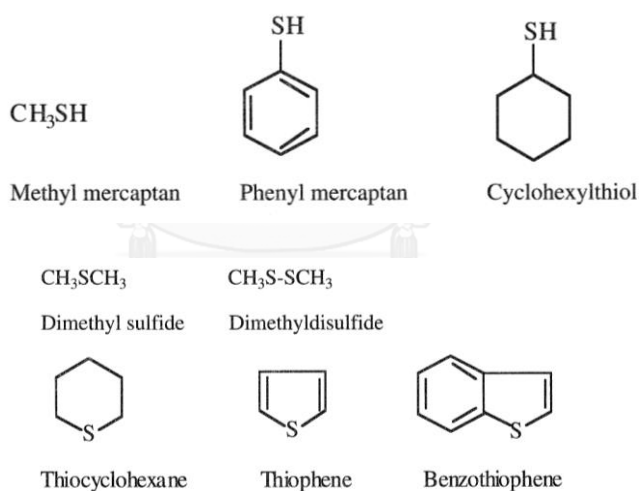
แนฟทีโน-แอโรแมติก (naphtheno-aromatic) เป็นสารประกอบบางประเภทที่พบในน้ำมันดิบที่มีอายุการสะสมตัวน้อย มีโครงสร้างของแอโรมาติกและแนฟทีนอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน เช่น

เตตระไฮโดรแนฟทาลีน (tetrahydronaphthalene) หรือเตตระลีน (tetralin) แสดงในภาพที่ 2.4 [8]



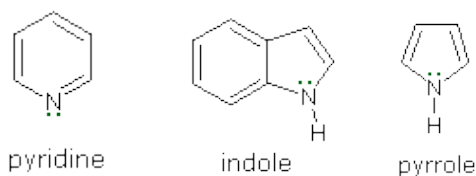
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเตตระลีน (tetralin)

สารประกอบกำมะถัน หมายถึงสารประกอบที่มีธาตุกำมะถันเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุล สารประกอบกำมะถันเป็นสารที่ปนเปื้อนที่ตรวจพบในน้ำมันดิบมากที่สุด มีกลิ่นและมีฤทธิ์กัดกร่อน ทำปฏิกิริยากับโลหะได้ จึงจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมดก่อนนำไปใช้งาน ได้แก่ ไทออล ซัลไฟด์ และ ไทโอฟีน เป็นต้น แสดงในภาพที่ 2.5 [7]



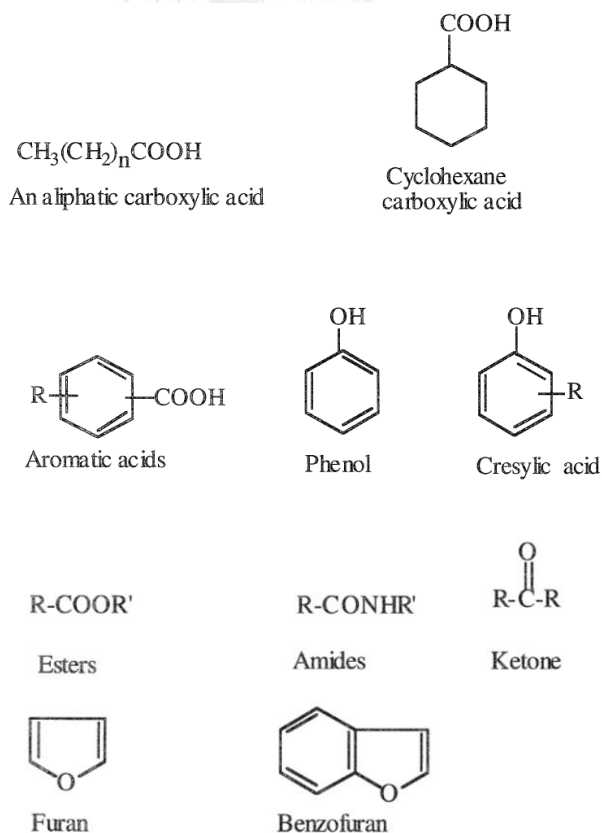
ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างสารประกอบกำมะถันที่พบในปิโตรเลียม

สารประกอบไนโตรเจน หมายถึงสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุล มีปริมาณร้อยละ 0.1-2.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันดิบ ได้แก่ พิริดีน ควิโนลีน อินโดล พิโรล และ คาร์บาโซล สารประกอบของไนโตรเจนทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่าง ๆ เสื่อมสภาพเร็ว แสดงในภาพที่ 2.6 [9]



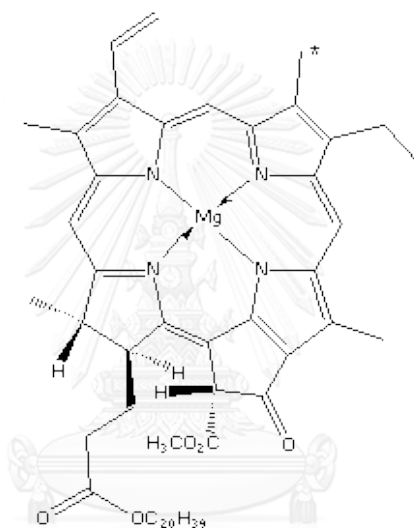
ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างสารประกอบไนโตรเจนที่พบในปิโตรเลียม

สารประกอบออกซิเจน มักอยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ในน้ำมันดิบที่มีอายุการสะสมตัวน้อย พบอยู่ในปิโตรเลียมในช่วงร้อยละ 0.1-2.0 โดยน้ำหนัก กรดที่มีโครงสร้างเป็นวงพบมากจะมีจำนวนคาร์บอน 9-13 อะตอม เมื่อมีจำนวนอะตอมมากกว่า 14 อะตอมมักจะอยู่ในรูปวงสองวง บางครั้งอยู่ในรูปของแนฟทีโน-แอโรมาติก นอกจากนี้แล้วยังพบสารประกอบออกซิเจนในรูปของแอลกอฮอล์ ฟีนอล คีโตน เอสเทอร์ และแอนไฮไดรด์ แสดงในภาพที่ 2.7 [7]



ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างสารประกอบออกซิเจนที่พบในปิโตรเลียม

สารประกอบออร์แกโนเมทัลลิก น้ำมันดิบส่วนมากมักมีโลหะปะปนอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนของพอร์ไฟริน (porphyrin) จึงเรียกว่า ปีโตรพอร์ไฟริน (petroporphyrins) มีโครงสร้างคล้ายกับคลอโรฟิลล์ โดยมีโลหะอื่นแทนที่แมกนีเซียมที่อยู่ตรงกลางของวงพอร์ไฟริน โลหะที่พบมากได้แก่ แวนเดียม และนิกเกิล ที่พบรองลงมาได้แก่ ทองแดง และเหล็ก หมู่แทนที่ที่อยู่รอบวงพอร์ไฟรินอาจแตกต่างจากคลอโรฟิลล์เล็กน้อย หรืออาจไม่มีหมู่แทนที่เลยที่บางตำแหน่ง สารประกอบเชิงซ้อนของพอร์ไฟรินแวนเดียมและนิกเกิลมีความเสถียรสูง และสามารถกลั่นแยกออกมาได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 2.8 [10]



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างของคลอโรฟิลล์ ซึ่งมีวงพอร์ไฟรินเป็นโครงสร้างหลัก

2.1.2 แก๊สธรรมชาติ

ก๊าซธรรมชาติ (natural gas) หมายถึงของผสมของสารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิและความดันปกติ ได้แก่ มีเทน (methane) อีเทน (ethane) โพรเพน (propane) และบิวเทน (butane) แหล่งกำเนิดของแก๊สธรรมชาติมีอยู่ด้วยกันสองลักษณะคือ แหล่งกักเก็บใต้ผิวดินซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยการขุดเจาะ แก๊สธรรมชาติลักษณะนี้เรียกว่า นอนแอสโซซิเอตเต็ดแก๊ส (non-associated gas) และอีกลักษณะหนึ่งคือแก๊สที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขุดเจาะน้ำมันดิบ ซึ่งส่วนใหญ่แก๊สธรรมชาติจะเกิดขึ้นในลักษณะนี้เนื่องจากแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำอื่น ๆ มักจะละลายอยู่ในน้ำมันดิบหรือของผสมของสารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงภายใต้ความดันสูง เมื่อน้ำมันดิบถูก

นำขึ้นมาบนพื้นดินซึ่งมีความดันลดต่ำลงเท่ากับความดันบรรยากาศ สารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวตั้งแต่ C_1 - C_4 จะคืนสภาพเป็นแก๊สเพราะสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้มีจุดเดือดต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ เรียกแก๊สธรรมชาติที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ว่า แอสโซซิเอเตดแก๊ส (associated gas) องค์ประกอบในแก๊สธรรมชาติแต่ละแหล่งจะแตกต่างกัน มีเทนเป็นองค์ประกอบที่มีปริมาณมากที่สุด สารไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นที่พบและมีปริมาณน้อยกว่ามีเทนได้แก่ อีเทน โพรเพน และบิวเทน แก๊สธรรมชาติบางแห่งพบสารไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวน C_5 - C_{10} ปนอยู่ มักอยู่ในรูปของไอ เรียกว่า ซีฟวี่พลัส (C_5+) หรือเพนเทนพลัส แก๊สธรรมชาติที่มีแอลเคนอื่น ๆ นอกเหนือจากมีเทนปะปนอยู่จำนวนเล็กน้อย เรียกว่าแก๊สธรรมชาติแห้ง (dry or lean natural gas) แก๊สธรรมชาติส่วนใหญ่ที่พบจากแหล่งแก๊สธรรมชาติมักเป็นแก๊สธรรมชาติแห้ง เมื่อนำแก๊สธรรมชาติแห้งมาอัดความดันที่อุณหภูมิปกติ แทบจะไม่มีของเหลวเกิดขึ้นเลย โดยทั่วไปแก๊สธรรมชาติแห้งเมื่อแยกเอาแก๊สที่ไม่ใช่สารไฮโดรคาร์บอนออกแล้วจะมีมีเทนอยู่ประมาณร้อยละ 85-95 ส่วนก๊าซธรรมชาติที่มี อีเทน โพรเพน บิวเทน และเพนเทน ปนอยู่ปริมาณมาก เรียกว่าแก๊สธรรมชาติชื้น (wet or rich natural gas) มักเป็นแก๊สธรรมชาติที่ได้จากแอสโซซิเอเตดแก๊ส เมื่อนำมาอัดความดันที่อุณหภูมิห้องก็จะกลายเป็นของเหลวได้ จะพบมีเทนน้อยกว่าร้อยละ 85 องค์ประกอบในแก๊สธรรมชาตินอกจากสารไฮโดรคาร์บอนยังพบแก๊สไนโตรเจน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ แก๊สฮีเลียม แก๊สธรรมชาติที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์ปนอยู่ในปริมาณที่สูง เรียกว่า แก๊สธรรมชาติกัดกร่อน (sour natural gas) แก๊สธรรมชาติที่กำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว เรียกว่า แก๊สธรรมชาติไม่กัดกร่อน (sweet natural gas) โดยปกติแล้วแก๊สธรรมชาติสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เลย สำหรับแก๊สธรรมชาติชื้นนั้นจะต้องนำมาสกัดด้วยตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนเพื่อแยกเอาอีเทน โพรเพน บิวเทน และเพนเทนพลัสออกกลายเป็นของเหลวเรียกว่า ของเหลวแก๊สธรรมชาติ (natural gas liquid) หรือ NGL ส่วนแก๊สธรรมชาติที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์ปนอยู่เมื่อกำจัดออกแล้วสามารถนำไปผลิตเป็นกำมะถันบริสุทธิ์ได้ แก๊สธรรมชาติที่เป็นของเหลวจะถูกแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือส่วนที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นโพรเพน มีบิวเทนปนอยู่เล็กน้อย ใช้เป็นแก๊สหุงต้ม เรียกว่า แก๊สปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gas) หรือ LPG ส่วนที่สองที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น C_5 และสูงกว่า C_5 จะถูกนำไปผสมในแก๊สโซลีนหรือน้ำมันเบนซิน

2.2 พลังงานจากชีวมวล

พลังงานจากชีวมวล [11, 12] เป็นพลังงานทางธรรมชาติที่มาจากสารอินทรีย์จากสิ่งมีชีวิตพืช เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น

ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย เศษไม้ กากโยปาล์ม กะลาปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า กากและเหง้ามันสำปะหลัง ชังข้าวโพด กาบมะพร้าวและกะลามะพร้าว รวมถึงของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร ฟาร์มปศุสัตว์ และขยะชุมชนต่างๆ เป็นต้น ในชีวมวลประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ไนโตรเจน ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปผลผลิตเป็นพลังงานได้ สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งการทำให้เป็นพลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า กระบวนการแปรรูปพลังงานชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่นๆ มีดังนี้

1. การเผาไหม้โดยตรง (combustion) เมื่อนำชีวมวลมาเผา จะได้รับความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวลนั้น ๆ ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูง และนำไอน้ำความดันสูงไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป ตัวอย่างชีวมวลประเภทนี้ ได้แก่ เศษวัสดุทางการเกษตร และเศษไม้ เป็นต้น
2. การผลิตแก๊ส (gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง เรียกว่าแก๊สชีวภาพ (biogas) มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
3. การหมัก (fermentation) เป็นการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ ชีวมวลที่ถูกหมักจะย่อยสลายและแตกตัว เรียกว่าแก๊สชีวภาพ (biogas) มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า

2.3 ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน (oil palm) [13] มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Elaeis guineensis* Jacq. มีถิ่นกำเนิดอยู่ในแถบแอฟริกาตะวันตก จัดเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว เป็นไม้ยืนต้นที่ให้ผลผลิตตลอดทั้งปี และมีอายุยืนยาว มีลักษณะเด่นดังนี้ [14, 15]

1. เป็นพืชที่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมในประเทศไทยได้ดี
2. เป็นพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงที่สุดและราคาถูกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่น ๆ
3. เป็นพืชที่ให้พลังงานที่จำเป็นต่อการบริโภคและอุปโภคของประชากรในชีวิตประจำวัน
4. เป็นพืชที่ให้วัสดุพลอยได้จากทุกส่วนของต้นปาล์มที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้

5. เป็นพืชยืนต้นที่สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตทะลายได้ตลอดทั้งปี อายุการเก็บเกี่ยวมากกว่า 25 ปี จึงทำให้เกษตรกรและผู้ประกอบการโรงงานมีรายได้ต่อเนื่องตลอดทั้งปีและมีระยะเวลาติดต่อกันนาน
6. เป็นพืชที่ทนทานต่อการเกิดภัยธรรมชาติ เช่น กรณีเกิดไฟไหม้สวน ปาล์มน้ำมันสามารถฟื้นสภาพกลับมาเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ใหม่
7. เป็นพืชน้ำมันที่มีความสำคัญในอนาคตในสถานการณ์ที่น้ำมันที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิลขาดแคลน มีราคาสูง สามารถใช้น้ำมันปาล์มทดแทนได้

ปาล์มน้ำมัน [16] มีผลผลิตในรูปของผลปาล์มสด (fresh fruit bunch: FFB) ประมาณ 9.27 ล้านตันต่อปี เศษวัสดุจากปาล์มที่นำมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงานได้แก่ ทะลายปาล์มเปล่า (empty fruit bunch: EFB) กะลาปาล์มเปล่าและเส้นใย ซึ่งวัสดุที่เกิดจากกระบวนการหีบน้ำมันปาล์มสำหรับทะลายปาล์มเปล่าเกิดขึ้นร้อยละ 32 กะลาปาล์มร้อยละ 4 และเส้นใยร้อยละ 19 ของผลผลิตทั้งหมด ปัจจุบันเส้นใยถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตความร้อนและไฟฟ้าในโรงงานหีบน้ำมันปาล์มเกือบทั้งหมด สำหรับกะลาปาล์มจะจำหน่ายเพื่อเป็นเชื้อเพลิงโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น ปูนซีเมนต์ เป็นต้น หรือใช้ผลิตถ่านกัมมันต์

2.3.1 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม [17] ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ

1. การอบทะลายด้วยไอน้ำ (sterilization) ที่อุณหภูมิ 130-135 องศาเซลเซียส การอบทะลายจะช่วยหยุดปฏิกิริยาไลโปไลซิส ที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม และช่วยให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มหลุดออกจากขั้วผลได้ง่าย
2. การแยกผล (stripping) เป็นการส่งทะลายเข้าเครื่องแยกผลปาล์มออกจากทะลาย สำหรับทะลายปาล์มเปล่าจะถูกแยกออกไป จากนั้นนำผลปาล์มไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์มเพื่อให้ส่วนของเปลือกถูกแยกออกจากเมล็ด
3. การสกัดน้ำมัน (oil extraction) นำส่วนเปลือกมาอบที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส จากนั้นผ่านเข้าเครื่องหีบแบบเกลียวอัดคู่ จะได้น้ำมันปาล์มดิบที่มีองค์ประกอบคือน้ำมันร้อยละ 66 น้ำร้อยละ 24 และของแข็งร้อยละ 10

4. การทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ (clarification) นำน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการสกัดส่งไปยังถังกรองเพื่อแยกน้ำและของแข็งออก จากนั้นเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อทำความสะอาดอีกครั้ง และใส่น้ำเพื่อให้แห้ง ส่งเข้าถังเก็บน้ำมันเพื่อรอการกลั่นหรือจำหน่ายต่อไป สำหรับกากผลปาล์มจะถูกนำมาแยกเส้นใยออกจากเมล็ด นำเมล็ดที่ได้มาอบแห้งและทำความสะอาด จากนั้นนำเข้าเครื่องกะเทาะเพื่อแยกกะลาออก นำเมล็ดในมาอบแห้งให้มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 7 จากนั้นบรรจุกระสอบเพื่อรอจำหน่าย หรือหีบน้ำมันต่อไป

2.3.2 ผลผลิตจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม [18]

ในกระบวนการผลิตน้ำมันต้องเอาทะลายปาล์มสดผ่านหม้อหนึ่งที่มีความดันไอน้ำประมาณ 3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อทำลายเอนไซม์ที่มีอยู่ในผลปาล์มซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดกรดไขมันอิสระและทำให้ดีทะลายและผลิตผลได้ง่าย ให้ผลผลิตแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ

1. ผลผลิตโดยตรง คือ น้ำมันปาล์มจะได้จาก

1.1 เปลือกผลปาล์มเรียกว่า palm oil น้ำมันชนิดนี้จะมีสีเข้ม มีความเหนียวระดับปานกลางถึงเหนียวมาก

1.2 เนื้อในเมล็ดปาล์มเรียกว่า palm kernel oil มีสีอ่อนกว่าพวกแรกคือมีสีเหลืองถึงเหลืองอมน้ำตาล และมีความเหนียวในระดับปานกลาง

2. ผลพลอยได้ จะประกอบด้วยผลพลอยได้หลายชนิด ได้แก่

2.1 ทะลายเปล่า (bunch trash) ถูกแยกออกมาหลังจากอบหนึ่งมีประมาณร้อยละ 55-58 ของปาล์มทั้งทะลาย ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงและทำปุ๋ย

2.2 กากเยื่อใยปาล์ม (palm press fiber) เป็นส่วนเปลือกของผลปาล์มที่หีบน้ำมันออกแล้วมีประมาณร้อยละ 12 ของปาล์มทั้งทะลาย ส่วนใหญ่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงของโรงงาน

2.3 กากเมล็ดปาล์มน้ำมัน (oil palm seed meal) ได้จากการสกัดน้ำมันของเมล็ดปาล์มซึ่งจะมีทั้งกะลาและเนื้อปาล์ม

2.4 เนื้อในเมล็ดปาล์ม (palm kernel) เป็นส่วนที่แยกเอาเปลือกและกะลาออกมีประมาณร้อยละ 4-5 มีวิธีการสกัดน้ำมันออก 2 วิธีคือ วิธีการหีบน้ำมัน (expeller pressed type) โดยการใส่สกรูเป็นเกลียวบีบให้น้ำมันออก วิธีนี้จะทำให้ยังคงมีน้ำมันหลงเหลืออยู่ร้อยละ 5-10 และวิธีใช้ตัวทำละลายสกัดน้ำมัน (solvent extracted type) คือเฮกเซน (hexane) วิธีนี้ทำให้กากน้ำมันที่ได้มีน้ำมันเหลืออยู่ร้อยละ 1-3 แต่มีคุณภาพมากกว่าวิธีแรก กากที่ได้จากการสกัดน้ำมันทั้ง 2 วิธีเรียกว่า กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม (palm kernel cake)

2.5 กากผลปาล์ม (oil palm meal) จะประกอบด้วยเปลือกนอก กะลา และเนื้อในของเมล็ด

2.6 กะลา ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานมีประมาณร้อยละ 8 ของผลปาล์มทั้งหมด

2.7 กากตะกอนปาล์ม (palm oil sludge) มีประมาณร้อยละ 2 เป็นของเหลือที่เป็นของเหลวจากโรงงานปาล์มน้ำมัน

2.4 กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) [19-22] คือกระบวนการแตกตัวหรือสลายตัวของสารประกอบหรือวัสดุต่าง ๆ ให้มีขนาดเล็กลงด้วยความร้อนระดับปานกลางเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น ที่อุณหภูมิประมาณ 400-800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนอยู่น้อยมากหรือปราศจากออกซิเจน โดยทั่วไปผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ความร้อนที่ให้แก่กระบวนการไพโรไลซิสเป็นความร้อนทางอ้อมที่ให้แก่เครื่องปฏิกรณ์แล้วเครื่องปฏิกรณ์จะถ่ายเทให้กับสารประกอบหรือวัสดุที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกตามสถานะ 3 ชนิด คือ แก๊สของเหลว (ลักษณะคล้ายน้ำมัน) และของแข็ง (char) เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ (primary product) ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากที่สุด คือ ของเหลวหรือน้ำมัน ส่วนแก๊สที่ได้นิยมนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการไพโรไลซิสต่อไป คุณภาพของน้ำมันและแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ขึ้นอยู่กับตัวแปรดังต่อไปนี้คือ

1. สภาพที่ใช้ในการไพโรไลซิส เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเร็วในการให้ความร้อน อุณหภูมิสุดท้าย เวลาที่ใช้ บรรยากาศในปฏิกรณ์ และระบบการป้อนวัตถุดิบ
2. ชนิดของปฏิกรณ์ การออกแบบให้มีรูปทรงที่ต่างกัน มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ เนื่องจากการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นั้น มีผลต่ออัตราเร็วในการให้ความร้อน ทิศทางการไหลของสิ่งที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ และเวลาและผลผลิตที่ใช้อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์
3. วัตถุดิบที่ใช้ในการป้อน เช่น ขนาด ชนิดและส่วนผสม ซึ่งแตกต่างกันไปตามประเภทแหล่งที่มา และอายุการใช้งานของวัตถุดิบนั้น เป็นต้น

ปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วย ขั้นแรกการสลายตัวของสารที่ระเหยง่ายออกจากวัตถุดิบ (devolatilization) ขั้นที่สองเป็นการแตกตัวของวัตถุดิบออกมาเป็นโมเลกุลที่เล็กลงเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการแตกตัวสมบูรณ์ โดยอุณหภูมิที่ให้นั้นแต่ละขั้นตอนขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ อย่างไรก็ตามถ้ามีการให้ความร้อนและเวลามากเกินไป สารที่ได้จากการแตกตัวของวัตถุดิบ

จะกลับมารวมตัวกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ หรือเป็นของแข็งลักษณะเหนียวติดตามอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ และได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีคุณภาพและต้องหยุดการผลิตเพื่อซ่อมแซมอุปกรณ์ ดังนั้น ภาวะที่ใช้ในการไพโรไลซิสจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ด้วย ในการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสภายในเครื่องปฏิกรณ์นั้น ในตอนเริ่มต้นของปฏิกิริยาจะเกิดเป็นแก๊สทั้งหมดภายในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อมีการลดอุณหภูมิของสารผลิตภัณฑ์ลงมาที่อุณหภูมิปกติจึงจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวออกมา ดังนั้นในกระบวนการไพโรไลซิสจึงต้องมีส่วนที่ลดความร้อนและควบแน่นผลิตภัณฑ์ของเหลวเพื่อใช้ในการแยกระหว่างแก๊สและน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจะใช้วิธีการแยกออกภายในเครื่องปฏิกรณ์ จะติดออกมากับแก๊สผลิตภัณฑ์น้อยมากและภายหลังจากการกลั่น ของแข็งที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสก็จะถูกแยกออกไปอย่างสมบูรณ์ การควบแน่นแก๊สที่เกิดขึ้นนั้นมีผลิตภัณฑ์สถานะแก๊สและของเหลวผสมกันอยู่ ซึ่งจะต้องทำการแยกผลิตภัณฑ์แก๊สและของเหลวออกจากกัน การระบายความร้อนออกจากแก๊สโดยน้ำหล่อเย็น ถ้าแก๊สควบแน่นไม่สมบูรณ์ในแก๊สอาจจะมีส่วนประกอบของน้ำมันปนออกมาเล็กน้อย อีกผลิตภัณฑ์หนึ่งก็คือของเหลวซึ่งมีลักษณะคล้ายน้ำมันดิบนั้น นำไปกลั่นและปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป

ในกระบวนการไพโรไลซิสบางครั้งอาจมีการเติมไฮโดรเจนหรือไอน้ำเข้าไปด้วย เพื่อช่วยในการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนจะเข้าไปรบกวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยออกซิเจนที่มีอยู่ในเนื้อของวัตถุดิบ ส่วนการเติมไอน้ำในปริมาณไม่มากเกินไปเข้าไปเป็นตัวกลางในกระบวนการไพโรไลซิส จะช่วยเพิ่มความดันให้กับกระบวนการ ทำให้วัตถุดิบเกิดเป็นของไหลได้ง่ายและทำให้ถ่านที่ได้จากกระบวนการมีค่าพื้นที่ผิวสูงขึ้น ในกรณีที่ต้องการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ หรือถ่านดูดซับ เป็นต้น

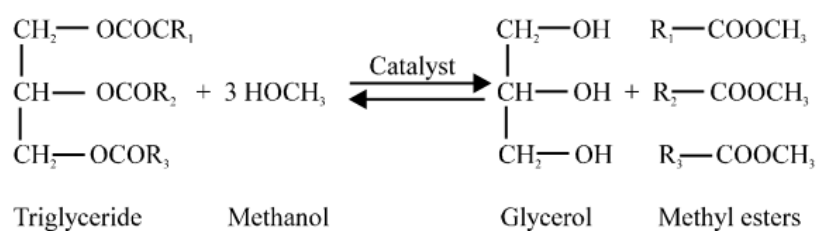
นอกจากนี้อาจมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับกระบวนการไพโรไลซิส เป็นการช่วยปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันและแก๊สที่ได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดได้เร็วขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบ่งออกออก 2 กลุ่มตามคุณสมบัติดังนี้คือ (1) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด (2) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นด่าง โดยอาจมีการเติมโลหะชนิดต่าง ๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาให้ดีขึ้น ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นด้วย หน้าที่หลักของ

ตัวเร่งปฏิกิริยาคือ ช่วยในการแตกตัวของวัตถุดิบ ช่วยให้เลือกผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์ที่มีความจำเพาะเจาะจงและช่วยเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังช่วยลดกากจากระบบให้น้อยลง

2.5 เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงดีเซล

เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงดีเซล [23] แบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

2.5.1 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมสูงสุด ใช้แอลกอฮอล์ เช่น เมทานอลเป็นสารตั้งต้นในการผลิต ได้ผลิตภัณฑ์หลักคือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid methyl ester, FAME) และกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ซึ่งยากต่อการกำจัด กระบวนการแสดงดังภาพที่ 2.9 [24]

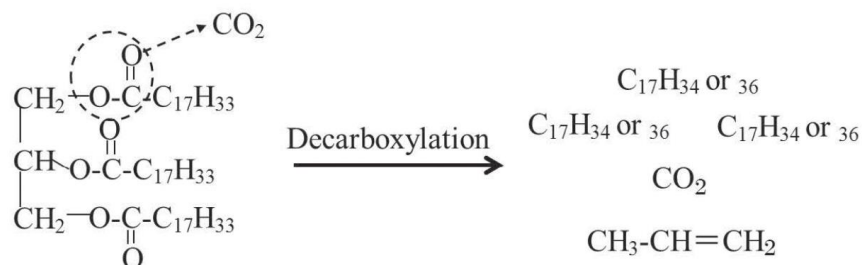


ภาพที่ 2.9 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

2.5.2 กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (hydrocracking) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไฮโดรเจนที่เติมลงไป ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีแขนและแตกแขนงจำนวนมาก ส่วนใหญ่เป็นสารพาราฟินและแนฟทีน

2.5.3 กระบวนการไพโรไลซิสเชิงเร่ง (catalytic pyrolysis process) เป็นกระบวนการแตกสลายไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลให้มีขนาดเล็กลงด้วยความร้อนสูง แบ่งออกดังนี้ กระบวนการไพโรไลซิสไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน (thermal cracking) คือกระบวนการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง ต้องควบคุมความร้อนให้พอเหมาะเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ แต่ถ้าความร้อนมากเกินไปจะทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนแตกต่อไปเรื่อยๆ จนมีขนาดเล็กเกินไปจะอยู่ในสถานะที่เป็นแก๊ส ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ และกระบวนการไพโรไลซิสไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic pyrolysis cracking)

คือการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้ามาช่วยย่อยสารไฮโดรคาร์บอนขนาดโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง ในสภาพที่ไร้อากาศด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน [25]



ภาพที่ 2.10 ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

2.6 การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง

วิธีการวิเคราะห์น้ำมันดิบ [26] จะแยกออกตามคาบจุดเดือดเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ แบ่งได้ดังนี้ คือ

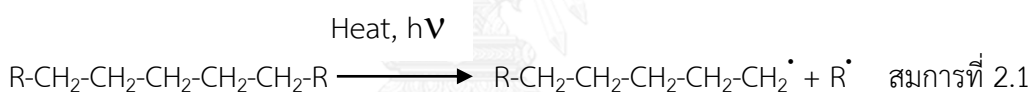
1. พวกที่มีคาบจุดเดือดตั้งแต่จุดเดือดเริ่มต้น (Initial boiling point; IBP) ถึง 200 องศาเซลเซียสเรียกว่า แก๊สโซลีน (gasoline fraction) หรือแนฟทา (naphtha) เป็นส่วนที่จะนำไปใช้ผลิตเป็นน้ำมันเบนซิน
2. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 200 ถึง 250 องศาเซลเซียส เรียกว่าน้ำมันก๊าด (Kerosene fraction) เป็นส่วนที่จะนำไปผลิตเป็นน้ำมันก๊าด เพื่อใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงในการให้แสงสว่าง
3. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส เรียกว่าแก๊สออยล์ชนิดเบา (light gas oil fraction) มักนำมาใช้เป็นน้ำมันเครื่องยนต์
4. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 350 ถึง 370 องศาเซลเซียส เรียกว่าแก๊สออยล์ (gas oil fraction) นำไปผลิตเป็นน้ำมันดีเซล
5. พวกที่มีคาบจุดเดือด 370 องศาเซลเซียสขึ้นไป เรียกว่ากากน้ำมันหรือกากกันทอ (Long residue) มักนำมาใช้เป็นน้ำมันเตา และผลิตเป็นอย่างมะตอย

2.7 การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

ปฏิกิริยาการแตกตัวโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอน [22, 26-28] แบ่งออกเป็น 3 ประเภท

2.7.1 การแตกตัวโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน เป็นกระบวนการแตกตัวทางความร้อนเพื่อเปลี่ยนโมเลกุลสารไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง หากใช้อุณหภูมิสูงเกินไป จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซมีจำนวนคาร์บอน 1-4 อะตอม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นที่ต้องการ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวด้วยความร้อน โมเลกุลจะมีกิ่งของโอเลฟิน (olefin) และไดโอเลฟิน (diolefin) ที่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากันเองได้ กระบวนการแตกตัวโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (free radical) แบบห่วงโซ่ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ดังนี้

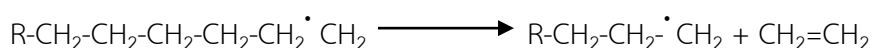
1. ขั้นเริ่มต้น (initiation step) คือขั้นที่เกิดอนุมูลอิสระ เนื่องจากความร้อนทำให้พันธะของสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนแตกออก ได้เป็นอนุมูลอิสระซึ่งจะไปทำปฏิกิริยาในขั้นต่อไป แสดงในสมการที่ 2.1

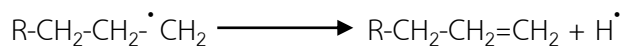


2. ขั้นการแตกตัวอย่างต่อเนื่อง (propagation step) เป็นขั้นตอนที่เกิดการแตกตัวของพันธะที่เชื่อมระหว่างคาร์บอน 2 ตัว บริเวณตำแหน่งที่สอง นับจากตรงคาร์บอนที่มีอิเล็กตรอนที่ยังไม่จับคู่อยู่ หรือตำแหน่งบีตา (β) การแตกตัวที่ตำแหน่งนี้จะเกิดต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งโมเลกุลมีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ จนไม่สามารถจะแตกตัวต่อไปได้อีก แสดงในสมการที่ 2.2 เริ่มจากอนุมูลอิสระเข้าไปยังพันธะของคาร์บอนที่ตำแหน่ง β เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวที่ตำแหน่ง β (β -scission) เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่สั้นลงพร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระใหม่ขึ้น ส่งผลให้สายโซ่คาร์บอนไม่เสถียร ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลที่เล็กลงอาจจะกลับมารวมตัวได้ เป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ เรียกว่าปฏิกิริยาการถ่ายโอนสายโซ่ (chain transfer reactions) ซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนไฮโดรเจน (hydride transfer) จากสายโซ่หนึ่งไปยังอีกสายโซ่หนึ่ง

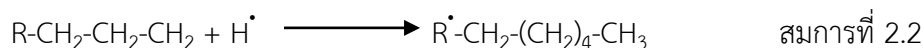
β -scission

β -scission



β -scission

Chain transfer

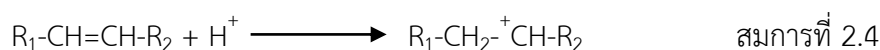
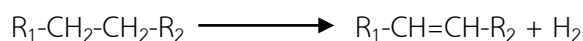


3. ขั้นหยุดปฏิกิริยา (termination step) เป็นขั้นที่อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากันเองเพื่อหยุดปฏิกิริยา เกิดขึ้นเมื่อมีการถ่ายโอนโปรตอนระหว่างอนุมูลอิสระสองตัว เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ได้เป็นสารประกอบชนิดอัลคีนเกิดขึ้น โดยอาจเป็นโมเลกุลใหม่ โมเลกุลเดี่ยวหรือเกิดเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล แสดงในสมการที่ 2.3

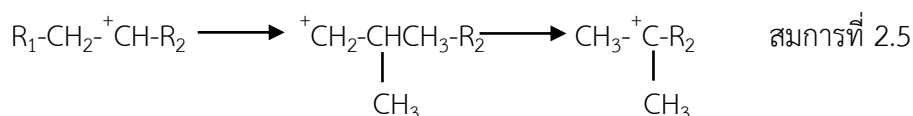


2.7.2 การแตกตัวโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามาช่วยในการแตกพันธะสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ประกอบด้วย

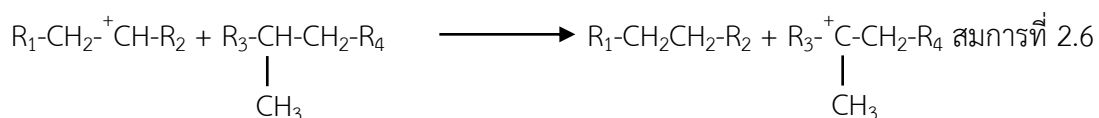
1. การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอเนียมไอออน (carbonium ion) เกิดจากโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรต์ไอออนที่มีประจุลบให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ทำให้คาร์บอเนียมไอออนมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า แสดงในสมการที่ 2.4



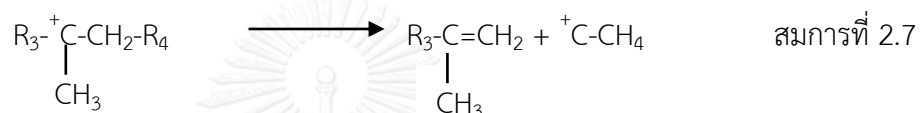
2. การเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลคาร์โบเนียมไอออน เกิดจากหมู่เมทิลมีการเคลื่อนย้ายเพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีความเสถียรของคาร์โบเนียมไอออน แสดงในสมการที่ 2.5



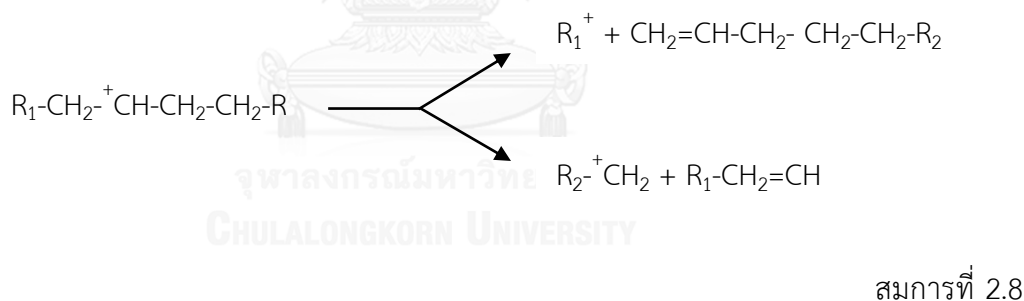
ต่อจากนั้นจะเกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ (hydride transfer) โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนเนียมไอออนกับโมเลกุลของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน แสดงในสมการที่ 2.6



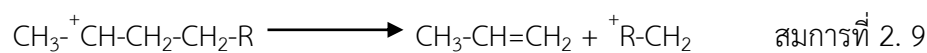
สำหรับคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยา หรือการแตกตัวที่ตำแหน่ง β ที่นับจากจุดที่มีประจุบวก ซึ่งจะให้สารประกอบโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง โดยมักจะเป็น primary carbonium ion แสดงในสมการที่ 2.7



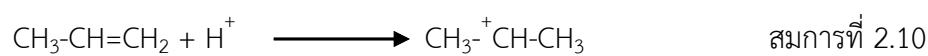
ในบางกรณีคาร์บอนเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 รูปแบบ เช่น ตัวอย่างของ secondary carbonium ion แสดงในสมการที่ 2.8



ถ้า $R_1 = H$ จะสามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว แสดงในสมการที่ 2.9

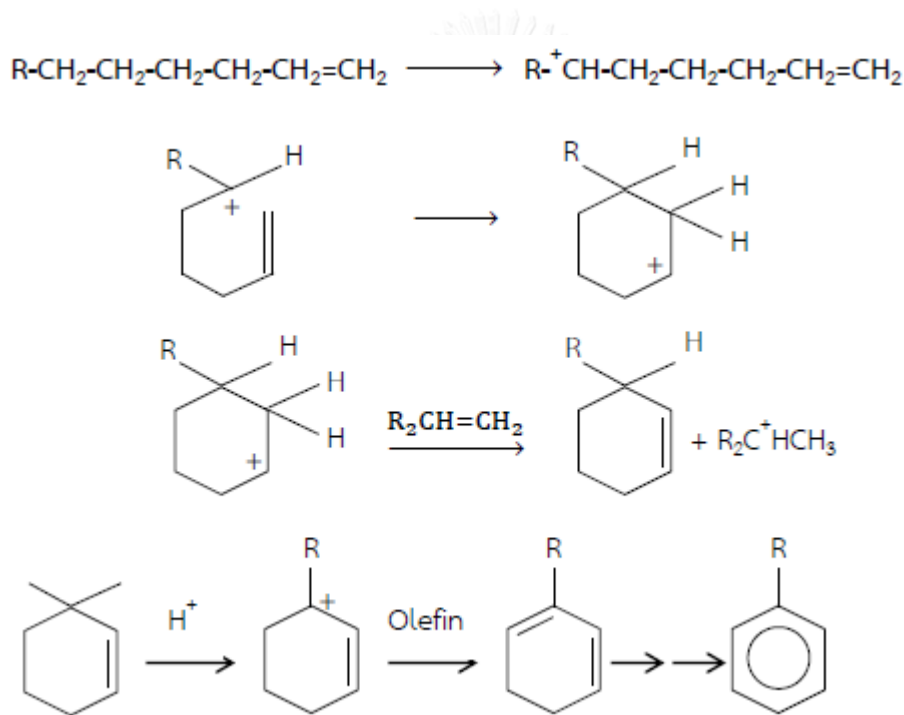


ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพีนซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอน และจะอยู่ในรูปของคาร์บอนเนียมไอออน ซึ่งจะไม่สามารถเกิด β -scission ต่อไปได้อีก แสดงในสมการที่ 2.10



(isopropyl carbonium ion)

Isopropyl carbonium ion ที่เป็นผลิตภัณฑ์ แสดงในภาพที่ 2.10 จะเกิดปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายไฮโดรด์กับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลอื่น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรเพน หรืออาจเกิดการสูญเสียโปรตอน จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพีน ในส่วนของการเกิดวงแหวนแอโรแมติกจะเกิดจากปฏิกิริยา dehydrocyclization ซึ่งโอเลฟินจะเกิดเป็น คาร์บอนเนียมไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยา β -scission ได้เป็นสารประกอบ olefin carbonium ion จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยากับโอเลฟิน โดยการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ไอออนจากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะได้ allylic carbonium ion ที่มีความเสถียร จากนั้นจะรับโปรตอนจาก cyclohexadine ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบแอโรแมติก แสดงในสมการที่ 2.11



สมการที่ 2.11

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกพันธะโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยแก๊สที่มีโอเลฟินสูง เกิดเป็นวงเบนซินที่มีค่าออกเทนสูง เนื่องจากมีสารจากพวกอะโรแมติกและโอเลฟินมาก องค์ประกอบของน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กากน้ำมันชนิดใส และโค้ก (coke) ที่เกาะบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้พื้นที่ผิวรูพรุนและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงจนเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.7.3 การแตกตัวไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมในปฏิกิริยา

การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการระหว่างการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและมีการใช้แก๊สไฮโดรเจนร่วม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีกิ่งจำนวนมาก เกิดเป็นพาราฟินและแนฟทีน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีหน้าที่ช่วยในการแตกพันธะคาร์บอน-คาร์บอนของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและเติมไฮโดรเจน จึงมักประกอบด้วยสารจำพวกซิลิกา-อะลูมินา โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มต้นจากการเกิดโอเลฟินขึ้นที่พื้นผิวส่วนที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโอเลฟินไปทำให้เกิดคาร์บอนเนียมไอออนตรงบริเวณที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจะเกิดการแตกตัวบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา การเติมแก๊สไฮโดรเจนมีส่วนช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีพันธะอิ่มตัว นอกจากนี้การเติมแก๊สไฮโดรเจนบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกำจัดโค้กบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วยกระบวนการแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมนี้เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์สูง จำเป็นต้องมีการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิให้เหมาะสมเพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโค้กและตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาได้ หรือทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหายรวมทั้งอาจไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา [29, 30] คือ สารที่เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นโดยที่ตัวมันเองไม่ถูกใช้ไปอย่างถาวรในปฏิกิริยา เนื่องจากช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา (activation energy) ให้ต่ำลง ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารที่เข้าทำปฏิกิริยา เป็นแก๊สหรือของเหลว มีข้อดีคือตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์เป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาที่ชัดเจน ทำให้ง่ายต่อการศึกษา มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะเดียวกับสารตั้งต้น สภาวะการทดลองไม่รุนแรง ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีต่าง ๆ และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการแพร่ของสารตั้งต้นไปหาตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากอยู่ในสถานะเดียวกัน แต่มีข้อเสียคือ การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นที่เหลือและผลิตภัณฑ์ได้ยากส่วนใหญ่คือการกลั่นหรือสกัดด้วยตัวทำละลาย

นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้งานใหม่ทำได้ยากกว่า และอายุการใช้งานสั้นกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เนื่องจากมักจะสลายตัวหรือเสียสภาพในสภาวะที่ใช้ความร้อนหรือความดันสูง

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะที่แตกต่างกับสารที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยามีสถานะเป็นของแข็ง แต่สารตั้งต้นมีสถานะเป็นของเหลวหรือแก๊ส มีข้อดีคือใช้ในภาวะที่มีอุณหภูมิหรือความดันสูงได้ สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นที่เหลือและผลิตภัณฑ์ได้ง่ายกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ มีอายุการใช้งานนาน รวมถึงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (regenerate) ได้

สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญ ดังนี้

พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญมาก เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การเพิ่มพื้นที่ผิวทำได้ด้วยการลดขนาดของวัสดุให้เล็กลงจนเป็นผงละเอียด แต่วิธีนี้ทำได้ค่อนข้างยาก วิธีเพิ่มพื้นที่ผิวที่ดีที่สุดจึงได้แก่การทำวัสดุให้พรุนโดยทำให้เกิดโพรงเล็ก ๆ จำนวนมาก

ขนาดและจำนวนรูพรุน สามารถบอกปริมาณพื้นที่ผิวภายในของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวภายในสูงจะมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่อย่างหนาแน่น ทำให้การกระจายตัวของตำแหน่งกัมมันต์ (active site) สูง และขนาดของรูพรุนที่เลือกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับโมเลกุลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากตำแหน่งกัมมันต์ได้ดีที่สุด เนื่องจากขนาดของโพรงของตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีความสำคัญต่อความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขนาดของโพรงแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ

1. โพรงชนิดแมโครพอร์ (macropores) เป็นกลุ่มที่มีขนาดของโพรงใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร หรือมีรัศมีเฉลี่ยของโพรงใหญ่กว่า 25 นาโนเมตร

2. โพรงชนิดเมโซพอร์ (mesopores) เป็นกลุ่มที่มีขนาดของโพรงระหว่าง 2 และ 50 นาโนเมตร หรือมีรัศมีเฉลี่ยของโพรงระหว่าง 1 และ 25 นาโนเมตร

3. โพรงชนิดไมโครพอร์ (micropores) หรือโพรงระดับอะตอม เป็นกลุ่มที่มีขนาดของโพรงเล็กกว่า 2 นาโนเมตร หรือมีรัศมีเฉลี่ยของโพรงน้อยกว่า 1 นาโนเมตร

การดูดซับและการคายซับ

การดูดซับ (adsorption) และการคาย (desorption) เป็นขั้นตอนที่สำคัญของการเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ คือการเกิดพันธะเคมีระหว่าง ตัวดูดซับ (adsorbent) กับตัวถูกดูดซับ (adsorbate) บนตำแหน่งกัมมันต์ เพื่อให้โมเลกุลเหล่านั้นเกิดปฏิกิริยาต่อไป ส่วนการคายคือ

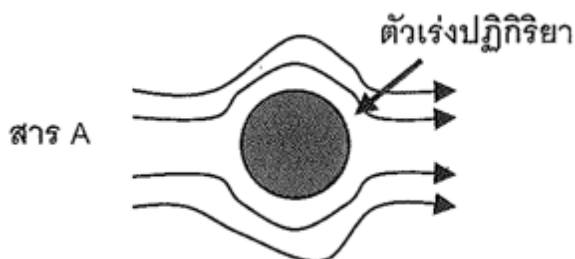
การแตกออกของพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ทำให้ได้ตำแหน่งกัมมันต์กลับคืนมา การดูดซับของแก๊สเฉื่อยหรือแก๊สที่ไวต่อปฏิกิริยาขึ้นกับผิวหน้าของวัสดุ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เป็นการดูดซับที่อ่อนและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้นโดยเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างอะตอมผิวหน้ากับตัวถูกดูดซับ คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (vander waals forces) มีค่าความร้อนของการดูดซับต่ำ จึงเป็นกระบวนการคายความร้อน ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์ และไม่มีการแตกพันธะ ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเมื่อโมเลกุลเคลื่อนที่มาถึงผิวหน้าตัวดูดซับ แต่ในกรณีตัวดูดซับมีความพรุนสูงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้าลง เนื่องจากมีข้อจำกัดเรื่องอัตราเร็วของการแพร่ ปริมาณการดูดซับเป็นแบบไม่เลือก โดยจะขึ้นกับจุดเดือดของแก๊สเท่านั้น ไม่ขึ้นกับชนิดของแก๊สหลังการดูดซับที่ผิวหน้าของแก๊สไม่ได้เป็นชั้นเดียว

2. การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) เป็นการดูดซับที่แข็งแรง เป็นการเกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นแบบเฉพาะเจาะจง โดยขึ้นกับชนิดของแก๊สและของผิวหน้า หลังจากการดูดซับแก๊สที่ผิวหน้าจะเป็นชั้นเดียว ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 60-85 กิโลจูลต่อโมล ปฏิกิริยาดูดซับทางเคมีไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำได้ยาก

ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกิริยารีดอกซ์ แบ่งเป็น 7 ขั้นตอน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น (external diffusion) เป็นขั้นตอนที่ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เกิดจากความสามารถของสารขณะไหลผ่านผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะแพร่ไปยังผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาของสารตั้งต้นจากกระแสของสารตั้งต้นไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงในภาพที่ 2.11



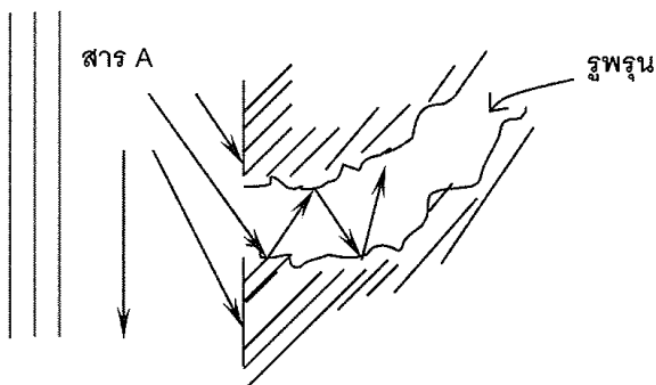
ภาพที่ 2.11 การแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น

ภาพที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่าค่าคงตัวของการแพร่ภายนอก ($k_{\text{ext.diff.}}$) ขึ้นกับพฤติกรรมการไหล และสภาพพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นไปตามสมการที่ 2.1

$$k_{\text{ext.diff.}} = k_g S_{\text{ext.}} \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

เมื่อค่า k_g คือค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายโอนมวล (mass transfer coefficient) หน่วยเป็น cm/s ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความเร็วในการไหล และค่า S_{ext} คือพื้นที่ผิวภายนอกของอนุภาคต่อปริมาตรของอนุภาค

2. การแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน (internal pore diffusion) เป็นการแพร่ของสารตั้งต้นที่บริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา เข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี การแพร่แบบนี้จะมีการชนกันเองระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้นเนื่องจากรูพรุนมีขนาดเล็กมากและมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนตลอดรูพรุน แสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 การแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน

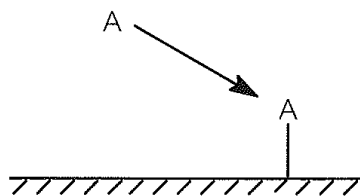
ค่าคงตัวของการแพร่สู่ภายในรูพรุน ($k_{\text{int.diff.}}$) ได้จากสมการ 2.2

$$k_{\text{int.diff.}} = k_g S_{\text{int.}} \eta \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

เมื่อ k_s คือค่าคงตัวของการแพร่ต่อหน่วยของพื้นที่ผิว มีขนาดรูพรุนเป็นตัวกำหนด ค่า S_{int} คือพื้นที่ผิวภายในของอนุภาคต่อปริมาตรของอนุภาค และค่า η คือประสิทธิภาพผลของการแพร่ (diffusion effectiveness)

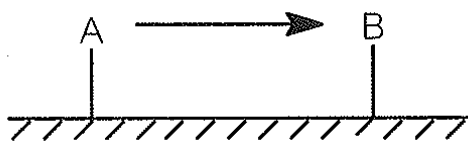
3. การดูดซับ (adsorption) เป็นการดูดซับของสารตั้งต้นบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโมเลกุลของสารตั้งต้นแพร่ไปถึงตำแหน่งกระตุ้นซึ่งอยู่ในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการดูดซับเชิงเคมี (chemisorption) เสมอ นั่นคือเกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้นเรียกว่า

ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) และผิวหน้าของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) การดูดซับนี้ทำให้เกิดการจับของสารตั้งต้นเป็นชั้นเดียว (monolayer) แสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 การดูดซับทางเคมีของสาร A บนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา

4. ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) สารตั้งต้นจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเป็นสารผลิตภัณฑ์ ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) เมื่อโมเลกุลสาร A เปลี่ยนไปเป็นโมเลกุลสาร B แสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจากโมเลกุลสาร A เปลี่ยนไปเป็นโมเลกุล B

5. การคาย (desorption) เกิดขึ้นหลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยา สารผลิตภัณฑ์จะหลุดออกจากผิวตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขั้นสุดท้าย

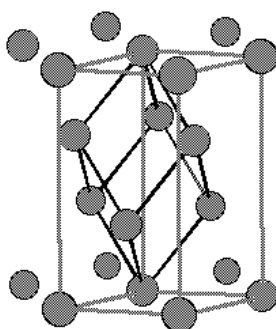
6. การแพร่ของผลิตภัณฑ์ออกจากภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นขั้นตอนย้อนกลับ ขั้นตอนการแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน ถ้าปฏิกิริยาเกิดได้ไม่สมบูรณ์จะมีสารตั้งต้นแพร่ออกมาด้วยเช่นกัน

7. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์จากผิวหน้าด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นขั้นตอนย้อนกลับ ขั้นตอนการแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น ถ้าปฏิกิริยาเกิดได้ไม่สมบูรณ์จะมีสารตั้งต้นแพร่ออกมาด้วยเช่นกัน

จากกระบวนการทั้ง 7 ขั้นตอนจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นรูพรุน แต่ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยามีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่หรือมีรูพรุนที่น้อยมาก ๆ ทำให้การแพร่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว จะไม่มีกระบวนการที่ 2 และ 6 เกิดขึ้นในกระบวนการ

2.9 โดโลไมต์

โดโลไมต์ $[CaMg(CO_3)_2]$ [31-33] เป็นแร่หรือหินตะกอนที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) เป็นส่วนใหญ่ มีลักษณะวาวคล้ายแก้วหรือไข่มุก สีขาว ชมพู เทา น้ำตาลหรือดำ ขาวอมเขียว เนื้อแร่มีทั้งโปร่งใสและโปร่งแสง โดโลไมต์มีลักษณะคล้ายคลึงกับหินปูนมากยากที่จะแยกได้ด้วยตาเปล่า แต่สามารถใช้เทคนิคการหยดกรดเจือจาง เช่น ไฮโดรคลอริก เพราะโดโลไมต์ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดเจือจางรุนแรง โดโลไมต์ส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการทุติยภูมิที่ทำให้อนุผลแมกนีเซียมสามารถเข้าไปแทนที่อนุผลแคลเซียมในโครงสร้างเดิมของแร่ได้ แหล่งโดโลไมต์ในประเทศไทยมักพบที่จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดสุราษฎร์ธานี จังหวัดนครศรีธรรมราช และจังหวัดอื่น ๆ ได้แก่ จังหวัดแพร่ ชลบุรี จันทบุรีและสงขลา ประโยชน์โดโลไมต์เป็นสินแร่หลักของโลหะแมกนีเซียม หรือใช้ประโยชน์โดยตรงเป็นหินก่อสร้างหรือหินประดับ หรือนำมาบดย่อยผ่านกรรมวิธีการผลิตเพื่อแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์อื่น เช่นนำมาใช้ผสมเป็นเครื่องปั้นดินเผาหรือใช้ทำวัสดุทนไฟเชิงต่างที่ใช้บุผนังเตาผลิตเหล็กกล้า เตาเผาซีเมนต์ และเตาอื่น ๆ ใช้แก้ไขสภาพดินเป็นกรด และใช้ในอุตสาหกรรมแก้วและกระจก การใช้โดโลไมต์ผสมในเนื้อดินในงานเซรามิก มีจุดประสงค์เพื่อลดจุดหลอมตัวของวัตถุดิบ แต่โดยทั่วไปมักใช้ในปริมาณน้อย และใช้เป็นส่วนผสมของน้ำยาเคลือบมากกว่าในเนื้อดิน โดโลไมต์มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบ rhombohedral แสดงในภาพที่ 2.15 [34]



ภาพที่ 2.15 โครงสร้างผลึกแบบ rhombohedral

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Stefaiak และคณะ (2002) [35] ศึกษาภาวะที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับจากโตโลไมด์ต่อสมบัติการดูดซับและความพรุน ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิในการเตรียมที่ 600-800 องศาเซลเซียส เตรียมภายใต้บรรยากาศได้แก่ อากาศ คาร์บอนไดออกไซด์ และอาร์กอน ระยะเวลาในการเตรียม 2 และ 8 ชั่วโมง และปริมาณต่อการเตรียมในแต่ละครั้งที่ 30 และ 180 กรัม พบว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทำให้โตโลไมด์เกิดการสลายตัวบางส่วนและเกิดเป็นแมกนีเซียมออกไซด์และแคลไซต์ ระยะเวลาและปริมาณการเตรียมตัวอย่างต่อครั้งที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวดูดซับมีความพรุนลดลง ส่วนการเตรียมภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อยให้ความพรุนมากที่สุด สำหรับสมบัติด้านการดูดซับพบว่าระยะเวลาในการเตรียมตัวดูดซับที่นานเกินไป จะทำลายตำแหน่งว่องไวของตัวดูดซับ ส่วนบรรยากาศในการเตรียมตัวดูดซับมีผลน้อยมากต่อคุณสมบัติของตัวดูดซับ

Yean และคณะ (2004) [36] ศึกษาการสังเคราะห์น้ำมันเชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันปาล์มที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงผ่านกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ HZHM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดเบดนิ่ง อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 400-450 องศาเซลเซียส และออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3^3 ในการหาภาวะที่เหมาะสม พบว่าได้ภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 440 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ร้อยละการเปลี่ยนของน้ำมันปาล์ม ร้อยละ 85.4 โดยน้ำหนัก และได้ ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน (gasoline) ร้อยละ 44.4 โดยน้ำหนัก

Xu และคณะ (2010) [37] ศึกษาการสังเคราะห์เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนจากน้ำมันถั่วเหลืองผ่านกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างที่แตกต่างกัน ได้แก่ อะลูมินา (Al_2O_3), MCM-41, โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3), โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$), และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 400 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเบดนิ่งปริมาตร 250 มิลลิลิตร พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (อะลูมินา) ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความเป็นกรด 104.5 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม หากใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง พบว่าค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะการใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ลดลงจาก 104.5 เหลือ 36.9 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของน้ำมันเป็นร้อยละ 3 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความเป็นกรดลดลง พบว่า

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง สามารถช่วยลดความเป็นกรดให้กับผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสได้ นอกจากนี้คุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลที่ได้ยังมีค่าใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียมและไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิชั่นอีกด้วย

Tani และคณะ (2011) [38] ศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของไตรกลีเซอไรด์ที่มีความจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ในช่วงดีเซล โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษา 3 ชนิด ได้แก่ ซิลิกา ถ่านกัมมันต์ และ ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC (fluid catalytic cracking) ที่ใช้แล้ว ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 430 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 50 มิลลิลิตร อัตราการป้อนน้ำมันพืช 5-20 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวพา มีอัตราการป้อน 50 มิลลิลิตรต่อนาที จากการศึกษาพบว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 10 ลงบนถ่านกัมมันต์ได้เชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 64.9 โดยน้ำหนัก อีกทั้งเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ยังมีค่าความเป็นกรดต่ำที่สุดคือ 0.02 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมาก ทำให้สามารถส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันได้ดี อีกทั้งแมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง นอกจากมีความสามารถในการส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาข้างต้นแล้วยังสามารถลดความเป็นกรดของเชื้อเพลิงเหลวได้อีก

เชษฐา จิงเจริญพาณิชย์ (2555) [39] ศึกษาการไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้เชื้อเพลิงชีวภาพเหลว ภาวะที่ศึกษาคืออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380-430 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมัน 60-180 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊สตัวพา 100-300 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 30-60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Design-expert พบว่าภาวะของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์คืออุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมัน 66.60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซตัวพา 100 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว 74.78 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้นำมา

วิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ได้ผลได้ร้อยละของแนฟทา เคโรซีน ดีเซล คือ 20.17, 10.39 และ 43.82 โดยน้ำหนักตามลำดับ

จารุ นาดกรณกุล (2556) [40] ศึกษาการไพโรไลซิสน้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 400-450 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมัน 3-9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50-150 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 30-60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ ใช้การออกแบบการทดลองเชิงตัวประกอบแบบสองระดับ หาภาวะที่มีผลต่อสัดส่วนของดีเซลในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว จากการนำผลการทดลองที่ได้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert พบว่าได้เชื้อเพลิงเหลวที่มีสัดส่วนของดีเซลมากที่สุดร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 400 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมัน 3 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 102.5 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 48.2 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ มีค่าความร้อน 47.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และค่าความเป็นกรด 1.62 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกกรัม

ญาดา ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา (2556) [41] ศึกษาการไพโรไลซิสน้ำมันปาล์มจากทะเลาเปลาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ขนาด 70 มิลลิลิตร โดยออกแบบการทดลองแฟทอเรียลสองระดับ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสม โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 380-440 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที ความดันไฮโดรเจน 1-5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มจากทะเลาเปลา 15 กรัม พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่ได้ร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวมากที่สุดคือ 66.68 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดันไฮโดรเจน 5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ได้ผลได้ร้อยละของแนฟทา เคโรซีน ดีเซล และกาน้ำมันคือ 22.50 17.50 55.00 และ 5 โดยน้ำหนักตามลำดับ

ฉัตติตา อ้อยใจ (2557) [42] ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากไดโลไมต์ด้วยวิธีทางความร้อนเพื่อใช้ในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กแบบแบตช์ขนาด 70 มิลลิลิตร

ผลการศึกษาพบว่า การแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีองค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์และมีพื้นที่ผิวมากที่สุด สำหรับภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ คือที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลา 60 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2.50 โดยน้ำหนักของน้ำมันพีซีใช้แล้ว ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 55.01 โดยน้ำหนักมีองค์ประกอบตามคาบจุดเดือดเป็นแนฟทาร้อยละ 42.00 กากน้ำมันร้อยละ 8.00 และเมื่อทดสอบค่าความเป็นกรดพบว่ามีค่าความเป็นกรด 0.50 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมไขมัน

ชัยพร จิงโชติกะพิศุ (2558) [43] ศึกษาการสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพเหลวจากการไพโรไลซิส น้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้โดโลไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ ขนาด 70 มิลลิลิตร ใช้การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับ โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 420 440 และ 460 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 60 นาที ความดันไฮโดรเจน 1 3 และ 5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 3.5 และ 5 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่า 100 กรัม ภาวะที่เหมาะสมที่ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 67.10 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 460 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ได้ผลได้ร้อยละของแนฟทา เคโรซีน ดีเซล และกากน้ำมันคือ 8.23 17.12 37.50 และ 4.25 โดยน้ำหนักตามลำดับ

บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง

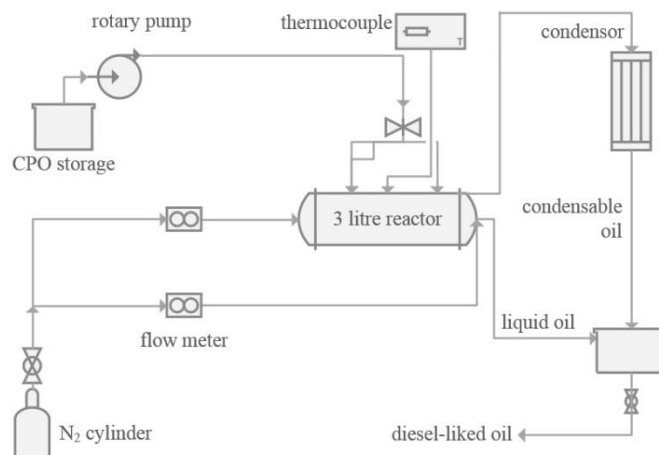
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนโพลีโพลีเมอร์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง และหาภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีสัดส่วนของดีเซลมากที่สุด โดยมีเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองดังนี้

3.1 เครื่องปฏิกรณ์และส่วนประกอบ

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม ใช้งานอุณหภูมิได้สูงถึง 500 องศาเซลเซียส เตาปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นทรงกระบอกถูกจัดวางในแนวนอน และติดตั้งใบกวนไว้บริเวณแกนกลาง ทางด้านข้างของเตาปฏิกรณ์มีช่องสำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิได้ทั้งภายในเครื่องปฏิกรณ์ และด้านข้างผนังของเครื่องปฏิกรณ์ ทางด้านบนมีช่องสำหรับใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ในภาพที่ 3.1 และแผนภาพของเครื่องปฏิกรณ์ ในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร



ภาพที่ 3.2 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร

3.1.2 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล (temperature controller) ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังขดลวดให้ความร้อนในส่วนต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ และสามารถตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อได้อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ โดยแบ่งการควบคุมอุณหภูมิออกเป็น

- ควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์
- ควบคุมอุณหภูมิประเกนทั้งสองข้างของเครื่องปฏิกรณ์

3.1.3 เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) แบบ k-type ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร สำหรับวัดอุณหภูมิในส่วนต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ โดยจะแสดงผลที่แผงควบคุมอุณหภูมิ

3.1.4 ขดลวดความร้อน แบบ injection ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ แรงดัน 220 โวลต์ กำลัง 400 วัตต์ต่อชุด เพื่อทำความร้อนให้เครื่องปฏิกรณ์

3.1.5 ชุดควบคุมอัตราการไหลของแก๊สตัวพา (carrier gas) โดยใช้แก๊สไนโตรเจนทำหน้าที่เป็นแก๊สตัวพาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ออกมา ซึ่งจะถูควบคุมการไหลของแก๊สให้เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านประเกนของเครื่องปฏิกรณ์

3.1.6 อุปกรณ์ควบแน่นผลิตภัณฑ์ (condensor) ดังแสดงภาพที่ 3.3 ประกอบด้วย

- อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) แบบไหลสวนทางกัน (counter current) ระหว่างที่ไหลสวนทางกันจะทำให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอของผลิตภัณฑ์และน้ำหล่อเย็น

- เครื่องทำความเย็นให้แก่หล่อเย็น (cooling tower) จะแลกเปลี่ยนความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สให้กลายเป็นของเหลว



ภาพที่ 3.3 อุปกรณ์ควบแน่นผลิตภัณฑ์

3.1.7 ปั๊มชนิดโรตารี (rotary pump) สำหรับป้อนสารตั้งต้นเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

3.2.1 เตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace) ใช้งานได้อุณหภูมิสูงสุด 1200 องศาเซลเซียส ปริมาตร 7 ลิตร

3.2.2 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด ทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.2.4 นาฬิกาจับเวลา

3.2.5 ครุชีเบิ้ล (crucible)

3.2.6 เครื่องแก้ว ได้แก่ กระจบอกรตวง ปีกเกอร์ ขวดสำหรับใส่ผลิตภัณฑ์

3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.2.1 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (distillation simulation gas chromatography, DGC) สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือด โดยใช้มาตรฐานการวิเคราะห์ตาม ASTM D2887 ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890A ของบริษัท เอจิลেন্ট เทคโนโลยีส์ จำกัด (ประเทศไทย) ใช้คอลัมน์ชนิด capillary จากบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น DB-1 ขนาด 10 เมตร x 0.53 มิลลิเมตร x 2.65 ไมโครเมตร และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (simulation distillation software) แสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

3.2.2 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (gas chromatography mass spectrometer, GC-MS) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890A โดยมีเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น GCMS5975C เป็นดีเทคเตอร์ ของบริษัท เอจีเลนต์ เทคโนโลยีส์ จำกัด (ประเทศไทย) โดยใช้ Capillary column จากบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น HP-5MS ขนาด 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร ซึ่งมี 100% Dimethylpolysiloxane ความหนา 0.25 ไมโครเมตร เป็นวัฏภาคนิ่ง (stationary phase) ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 350 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

3.2.3 เครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ รุ่น 848 Trinoplus ยี่ห้อ Metrohm แสดงในภาพที่ 3.6 สำหรับวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว



ภาพที่ 3.6 เครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ

3.2.4 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-5800 LV ยี่ห้อ JEOL แสดงในภาพที่ 3.7 ใช้วิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา



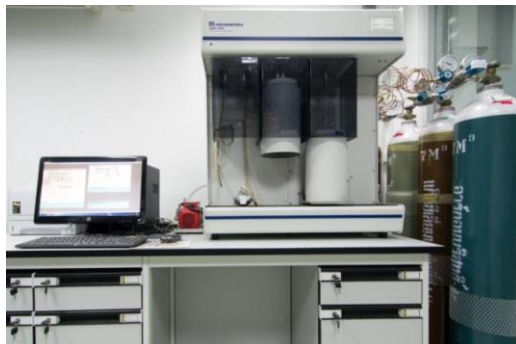
ภาพที่ 3.7 เครื่อง Scanning electron microscope

3.2.5 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer) รุ่น D8 Discover ยี่ห้อ Bruker แสดงในภาพที่ 3.8 ใช้ศึกษาโครงสร้างของผลึกสารตัวอย่าง



ภาพที่ 3.8 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์

3.2.6 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน หลักการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) รุ่น ASAP2020 ยี่ห้อ Micromeritic แสดงในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน

3.3 สารตั้งต้นและสารเคมี

- 3.3.1 น้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่า ของบริษัท ทักษิณปาล์ม (2521) จำกัด
- 3.3.2 โดโลไมต์ที่ใช้นำมาจากแหล่งโดโลไมต์ที่จังหวัดกาญจนบุรี
- 3.3.3 แก๊สไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 บรรจุอยู่ในถังความดันสูงขนาดปริมาตร 7 ลูกบาศก์เมตร จากบริษัท บางกอกอินดัสเทรียลแก๊ส จำกัด
- 3.3.4 ตัวทำละลายคาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99.99 (ACS for analysis) ยี่ห้อ CARLO ERBA

3.4 การดำเนินงานวิจัย

- 3.4.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่า โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น และเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์
- 3.4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบของโดโลไมต์ โดยใช้เครื่อง XRD
- 3.4.3 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการเผาโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศปกติ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง [42] ทิ้งให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องและเก็บในตู้ดูดความชื้น
- 3.4.4 ออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงประกอบแบบสองระดับ ประสมกลาง โดยมีระดับของตัวแปร 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ (-1) ระดับสูง (1) และระดับกลาง (0)

โดยมีตัวแปรที่จะศึกษา 4 ตัวแปร แสดงในตารางที่ 3.1 และมีการทำซ้ำการทดลองของตัวแปรระดับกลาง 5 ครั้ง แสดงในตารางที่ 3.2

3.4.5 ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ และวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว โดย

- วิเคราะห์หาสัดส่วนของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวตามมาตรฐาน ASTM D2887 ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น
- วิเคราะห์หาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

3.4.6 หาภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์เพื่อให้ได้สัดส่วนของดีเซลมากที่สุด โดยใช้โปรแกรม Design Expert (รุ่น 7.0.0)

3.4.7 เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณและผลที่ได้จากการทดลองจริง และนำผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ไปทดสอบสมบัติของเชื้อเพลิง

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์

ตัวแปร	สัญลักษณ์ ตัวแปร	ระดับต่ำ (-1)	ระดับกลาง (0)	ระดับสูง (1)
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	A	380	420	460
อัตราการป้อนน้ำมัน (มิลลิลิตรต่อนาที)	B	3	6	9
อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (มิลลิลิตรต่อนาที)	C	50	100	150
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์)	D	30	45	60

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองเชิงประกอบแบบสองระดับ เพื่อทำการศึกษการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์

การทดลองที่	A	B	C	D
1	380	3	50	30
2	460	3	50	30
3	380	9	50	30
4	460	9	50	30
5	380	3	150	30
6	460	3	150	30
7	380	9	150	30
8	460	9	150	30
9	380	3	50	60
10	460	3	50	60
11	380	9	50	60
12	460	9	50	60
13	380	3	150	60
14	460	3	150	60
15	380	9	150	60
16	460	9	150	60
17	420	6	100	45
18	420	6	100	45
19	420	6	100	45
20	420	6	100	45
21	420	6	100	45

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นและเก็บไว้ในหม้อดูดความชื้น

3.5.2 เตรียมเครื่องปฏิกรณ์ให้พร้อมใช้งาน โดยทำการปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ หุ้มฉนวนกันความร้อน และต่อระบบน้ำหล่อเย็นเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้เรียบร้อย

3.5.3 ตวงปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยาตามที่ต้องการพร้อมทั้งบันทึกน้ำหนัก และใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์

3.5.4 ตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการ จากนั้นเปิดระบบให้ความร้อน ไบวอน และระบบน้ำหล่อเย็น

3.5.5 เปิดแก๊สไนโตรเจนและปรับอัตราการไหลตามที่ต้องการ

3.5.6 รอจนกระทั่งเครื่องปฏิกรณ์ และตัวเร่งปฏิกิริยา มีความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ

3.5.7 ทำการป้อนน้ำมันปาล์มตามอัตราการป้อนที่ต้องการ จดบันทึกอุณหภูมิ และน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม และน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวทุกชั่วโมง

3.5.8 เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ บันทึกน้ำหนัก และนำไปกรองด้วยกระดาษกรองชนิดใยแก้ว ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ จากนั้นเก็บตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้วในขวดเก็บสารเคมี เพื่อนำไปวิเคราะห์หาสัดส่วนของเชื้อเพลิงต่อไป

3.5.9 ล้างเครื่องปฏิกรณ์ด้วยสารละลายโทลูอิน และเอทานอล

3.5.10 ทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น มีวิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ดังนี้

- นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ละลายในตัวทำละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 30 โดยปริมาตร

3.5.11 คำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ในสมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว} = \left(\frac{\text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้}}{\text{น้ำหนักของน้ำมันปาล์มที่หายไป}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปลาบน โดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยาของ น้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปลา ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อัตราการป้อนอัตรา การป้อนสารตั้งต้น อัตราการไหลของแก๊สตัวพา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อหาภาวะที่เหมาะสม ในการแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีสัดส่วนของดีเซลมากที่สุด และมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปลา

4.1.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปลาโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปลา ก่อนการศึกษาการแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยา

จุดเดือด (°C)	องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)
IBP - 200	แนฟทา (C ₅ -C ₁₂)	0.00
200 - 250	เคโรซีน (C ₁₂ -C ₁₅)	0.00
250 - 370	ดีเซล (C ₁₅ -C ₃₃)	15.50
370 - FBP	กากน้ำมัน (>C ₃₃)	84.50

หมายเหตุ :IBP คือ Initial Boiling Point (จุดเดือดเริ่มต้น)

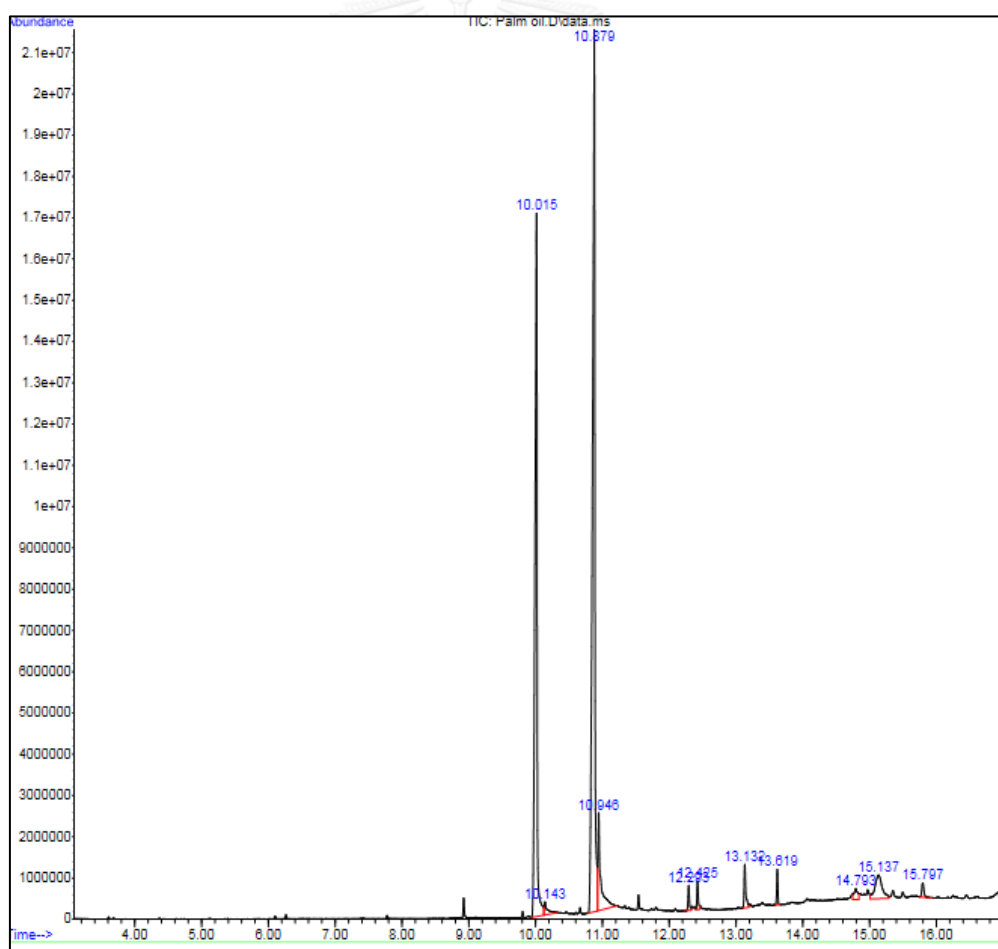
:FBP คือ Initial Boiling Point (จุดเดือดสุดท้าย)

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบในน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลา ก่อนนำไปศึกษาการแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยา จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ตามมาตรฐานของสมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน ASTM (American Society for Testing and Materials) โดยใช้มาตรฐานการวิเคราะห์ช่วงการกลั่นของน้ำมันปิโตรเลียมหมายเลข D2887 สามารถแยกองค์ประกอบ

ตามช่วงการกลั่นตามจุดเดือดได้แก่ แนฟทา เคโรซีน ดีเซล และกากน้ำมัน พบว่ามีสององค์ประกอบหลักคือ ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวในช่วงดีเซลเท่ากับร้อยละ 15.50 โดยน้ำหนักและมีปริมาณกากน้ำมันหนักซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลยาวมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 84.50 โดยน้ำหนัก ซึ่งไม่สามารถใช้กับเครื่องยนต์ได้โดยตรงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพให้มีขนาดสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลงและคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลาะปาล์มเปล่าทำได้โดยการนำน้ำมันจากทะเลาะปาล์มเปล่าไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์



ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

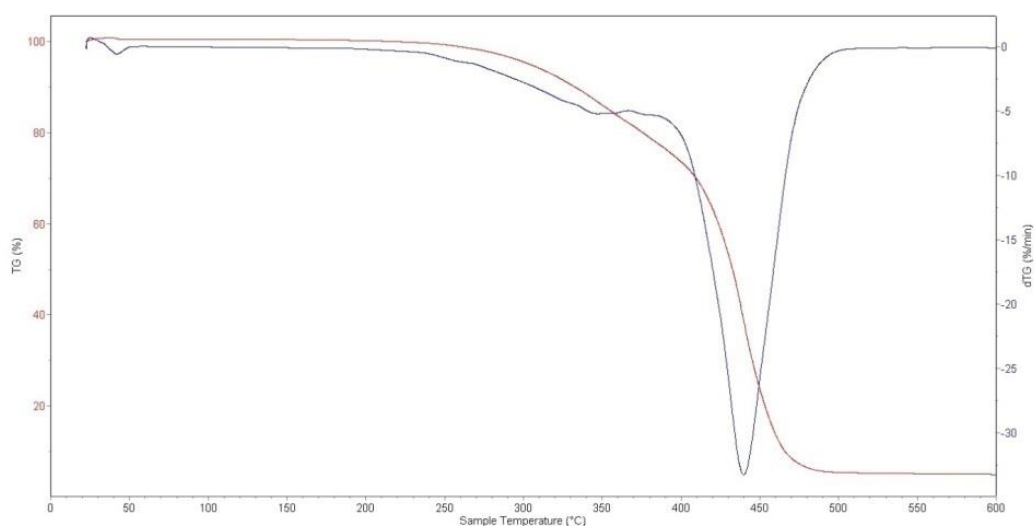
ภาพที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าก่อนการนำไปแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ พบว่าเกิดพีคหลักที่เด่นชัด 3 พีคที่รีเทนชันไทม์ 10.015, 10.879 และ 10.946 จากการเปรียบเทียบรูปแบบของสเปกตรัม พบว่าเป็นพีคของกรดไขมันอิ่มตัวสูง นั่นคือกรดไขมันปาล์มติก (palmitic acid; C16) และกรดไขมันโอเลอิก (Oleic acid; C18) ซึ่งองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้แสดงในตารางที่ 4.2 จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจึงเป็นเหตุผลที่สำคัญในการเลือกใช้น้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาบนโตโลไมต์เนื่องจากน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าเป็นแหล่งของไฮโดรคาร์บอนที่มี C₁₆-C₁₈ อะตอมเรียงต่อกันซึ่งคล้ายคลึงกับจำนวนอะตอมคาร์บอนของดีเซลที่ได้มาจากระบวนการกลั่นปิโตรเลียม

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
10.015	n-Hexadecanoic acid	34.88
10.145	Octadecanoic acid	0.98
10.879	9-Octadecenoic acid	48.15
10.946	Octadecanoic acid	6.33
12.291	9-Octadecenal, (Z)-	0.97
12.425	Hexadecanoic acid, 2-hydroxy-1-(...	0.83
13.132	9-Octadecenoic acid (Z)-, 2-hydr...	1.59
13.617	Squalene	0.90
14.792	Benzo[h]quinoline, 2,4-dimethyl-	0.92
15.135	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	3.95
15.789	2-Ethylacridine	0.67

4.1.3 วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าด้วยเทคนิค TGA

ภาพที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิการแตกตัวโมเลกุลของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย (อาร์กอน) ตั้งแต่ 25-600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าอัตราการแตกตัวของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าเริ่มต้นที่ประมาณ 155 องศาเซลเซียส และมีอัตราการแตกตัวโมเลกุลสูงสุดที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ดังนั้นการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง จึงเลือกศึกษาที่อุณหภูมิ 380-460 องศาเซลเซียส



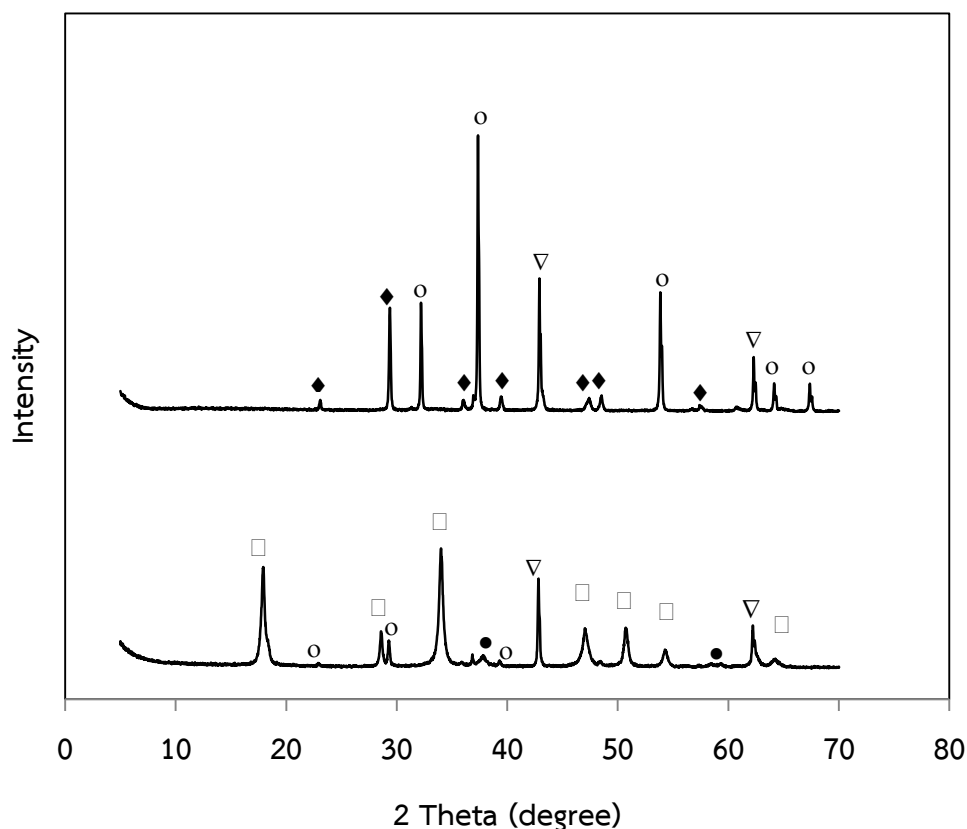
ภาพที่ 4.2 เทอร์โมแกรมของการแตกสลายเชิงความร้อนของน้ำมันจากทะเลาะปาล์มเปล่า

4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของโคโลไมต์ก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของโคโลไมต์ก่อนและหลังแคลไซน์ด้วยเทคนิค XRD แสดงในภาพที่ 4.3 พบว่าโคโลไมต์ก่อนการแคลไซน์ มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ในโครงสร้างผลึก และพบแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ปนอยู่

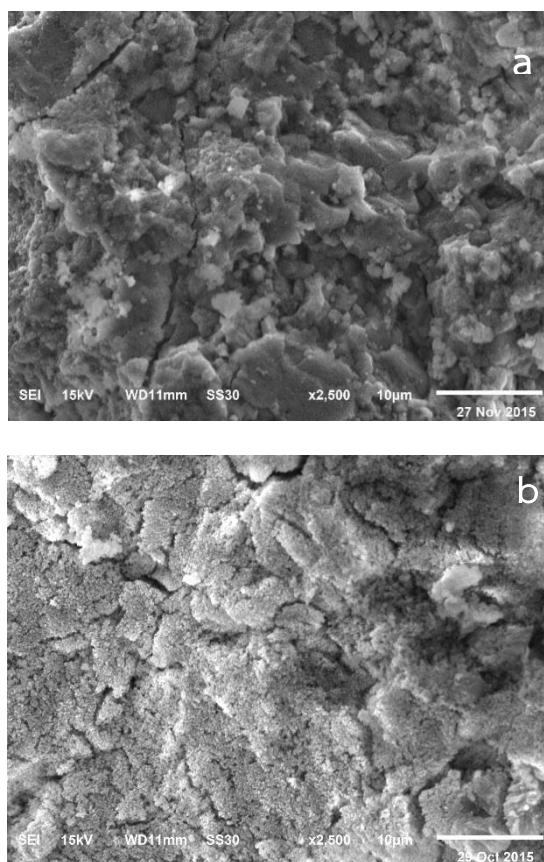
เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง [42, 44] พบว่ามีพีคของแคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้นแต่องค์ประกอบของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์หายไปเนื่องจากการสลายตัวทางความร้อน



ภาพที่ 4.3 รูปแบบ XRD ของ (a) โดโลไมต์ก่อนแคลไซน์ (b) โดโลไมต์หลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อ ● แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์, □ แคลเซียมไฮดรอกไซด์, ◆ แคลไซด์, ▽ แมกนีเซียมออกไซด์ และ ○ แคลเซียมออกไซด์

4.2.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโดโลไมต์ก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

จากภาพที่ 4.4 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของโดโลไมต์ (a) โดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์ (b) โดโลไมต์หลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า พบว่าโดโลไมต์ที่ผ่านการแคลไซน์แล้วมีพื้นผิวที่ขรุขระและมีความเป็นรูพรุนมากกว่าโดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์



ภาพที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของโดโลไมต์ (a) โดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์ (b) โดโลไมต์หลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า

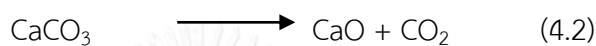
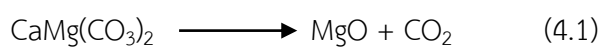
4.2.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุน (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวรูพรุน (S_{BET}) (ตารางเมตรต่อกรัม)	ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)
ก่อนแคลไซน์	8.00	0.01
หลังแคลไซน์	19.95	0.10

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยเทคนิค Brunauer Emmett Teller

(BET method) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์มีพื้นที่ผิว 8.00 ตารางเมตรต่อกรัม หลังจากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมงมีพื้นที่ผิวรูพรุนเพิ่มขึ้นเป็น 19.95 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 0.01 เป็น 0.10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เนื่องจากการแคลไซน์โดโลไมต์ที่อุณหภูมิและเวลาดังกล่าวจะทำให้เกิดการสลายตัวของคาร์บอนเนต กลายเป็นออกไซด์ของโลหะด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอนเนชัน (decarbonation) ตามสมการที่ 4.1-4.3 [45] คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการแตกตัวโมเลกุลของสารตั้งต้น การที่พื้นที่ผิวและ ปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นหลังจากการแคลไซน์จะกำจัดมลทิน (impurity) ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสทำให้ สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งเสริมการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น



4.2.4 วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของโดโลไมต์โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ไปวิเคราะห์ ด้วยเทคนิค XRF แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ด้วยเทคนิค XRF

Compound	Concentration (%weight)
CaO	59.80
MgO	33.50
SiO ₂	0.39
Fe ₂ O ₃	0.23
Al ₂ O ₃	0.19
Other	5.89

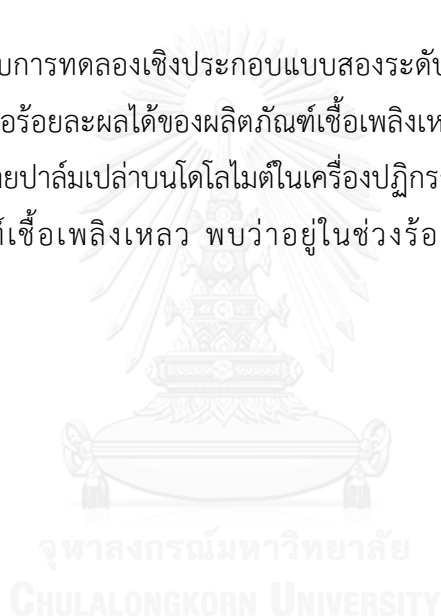
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ด้วยเทคนิค XRF พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 59.80 และปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 33.50

4.3 การแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาโตโลไมต์

การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 แฟกทอเรียลเพื่อวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆ ที่มีตัวแปรตอบสนอง (response) 2 ตัวแปรคือ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาโตโลไมต์ โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อัตราการป้อนสารตั้งต้น อัตราการไหลของแก๊สตัวพา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

4.3.1 การศึกษาอิทธิพลและตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาโตโลไมต์

จากการออกแบบการทดลองเชิงประกอบแบบสองระดับ เพื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนโตโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ตารางที่ 4.5 แสดงร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว พบว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 25.95-66.75 โดยน้ำหนัก



ตารางที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมัน
ปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

การ ทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของ ผลิตภัณฑ์ของเหลว (%wt)
	A (°C)	B (mL/min)	C (mL/min)	D (%v/v)	
1					36.67
2	380	3	50	30	35.85
3					66.75
4	460	3	50	30	60.64
5					41.35
6	380	9	50	30	43.22
7					65.59
8	460	9	50	30	65.92
9					35.72
10	380	3	150	30	33.00
11					56.48
12	460	3	150	30	54.67
13					37.78
14	380	9	150	30	35.32
15					60.85
16	460	9	150	30	65.43
17					28.77
18	380	3	50	60	27.63
19					54.87
20	460	3	50	60	52.81
21					31.15
22	380	9	50	60	29.64
23					62.73
24	460	9	50	60	60.63

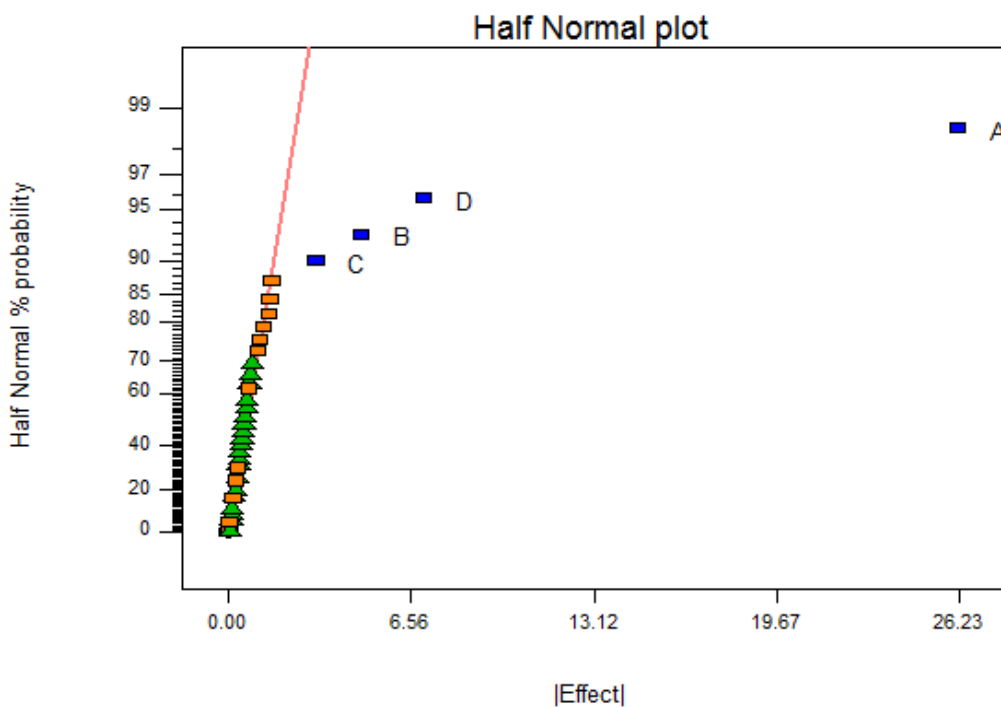
ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว (%wt)
	A (°C)	B (mL/min)	C (mL/min)	D (%v/v)	
25	380	3	150	60	25.95
26					27.78
27	460	3	150	60	50.78
28					52.45
31	460	9	150	60	58.71
32					59.66
33	420	6	100	45	42.87
34					37.01
35					39.69
36					33.79
37					40.86

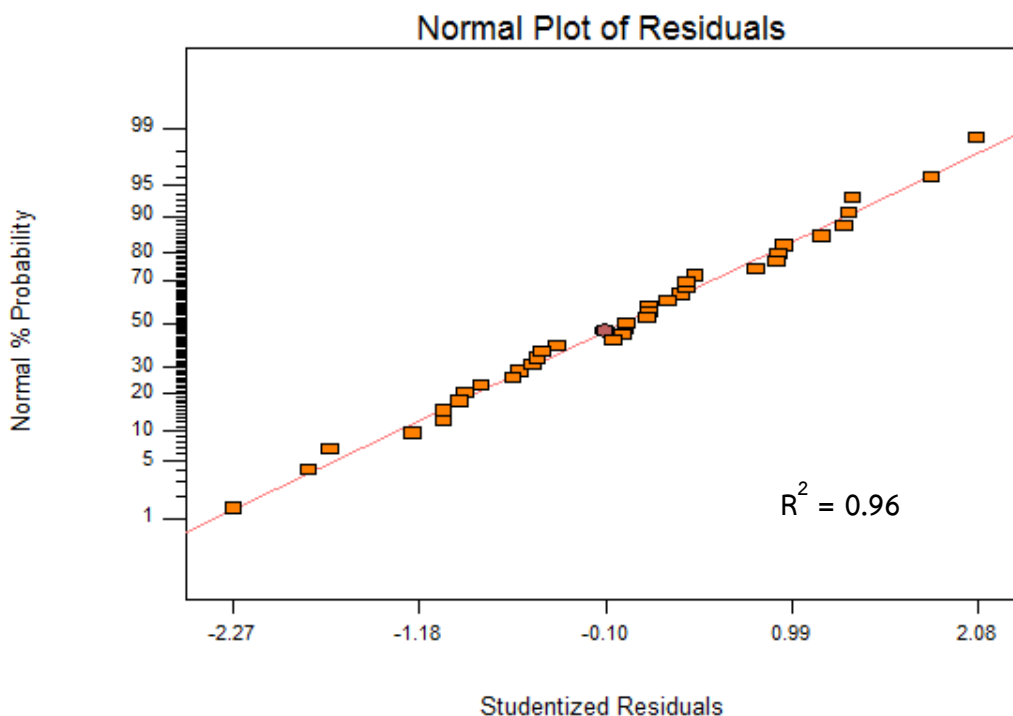
จากการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-expert เพื่อศึกษาค่าความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรม Design-Expert พบว่าจากการคำนวณจะบ่งบอกถึงปัจจัยใดที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว โดยปัจจัยนั้นต้องมีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.6 แสดงผล ANOVA พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (A) อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม (B) อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (C) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (D)

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนโคโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F value	Prob > F value
Model	6160.75	4	1540.19	248.70	<0.0001
A	5504.37	1	5504.37	888.82	<0.0001
B	182.84	1	182.84	29.52	<0.0001
C	79.10	1	79.10	12.77	<0.0012
D	394.45	1	394.45	63.69	<0.0001
Residual	191.98	31	6.19		
Total	6586.43	36			



ภาพที่ 4.5 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว



ภาพที่ 4.6 Normal probability plot ของส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA สอดคล้องกับการทำ Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว เมื่อทำการพลอตค่ากับ Effect แสดงในภาพที่ 4.5 พบว่า ตัวแปรที่มีแนวโน้มเบี่ยงเบนจากเส้นตรงได้แก่ A, B, C, และ D คือปัจจัยหลักแสดงให้เห็นว่าตัวแปรดังกล่าวมีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้เชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจาก ทะลายปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำข้อมูลไปสร้าง Normal probability plot ของส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง แสดงในภาพที่ 4.6 มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง R^2 มีค่าเท่ากับ 0.96 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง แสดงถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้มาจากการทดลอง สามารถนำไปวิเคราะห์โดยการทำ ANOVA ได้

4.3.2 การศึกษาอิทธิพลและตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่ได้จากการ
 แยกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาดีเอสไมต์

ตารางที่ 4.7 แสดงร้อยละผลได้ของดีเซลที่ได้จากการแยกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจาก
 ทะเลาะปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาดีเอสไมต์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

การ ทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ดีเซล (%wt)
	A (°C)	B (mL/min)	C (mL/min)	D (%v/v)	
1	380	3	50	30	66.25
2	380	3	50	30	60.00
3	460	3	50	30	59.38
4	460	3	50	30	58.75
5	380	9	50	30	58.75
6	380	9	50	30	58.00
7	460	9	50	30	57.50
8	460	9	50	30	55.00
9	380	3	150	30	60.00
10	380	3	150	30	59.00
11	460	3	150	30	59.38
12	460	3	150	30	56.25
13	380	9	150	30	52.50
14	380	9	150	30	50.00
15	460	9	150	30	47.50
16	460	9	150	30	47.50
17	380	3	50	60	73.13
18	380	3	50	60	75.57
19	460	3	50	60	68.12
20	460	3	50	60	67.50
21	380	9	50	60	72.50
22	380	9	50	60	71.25

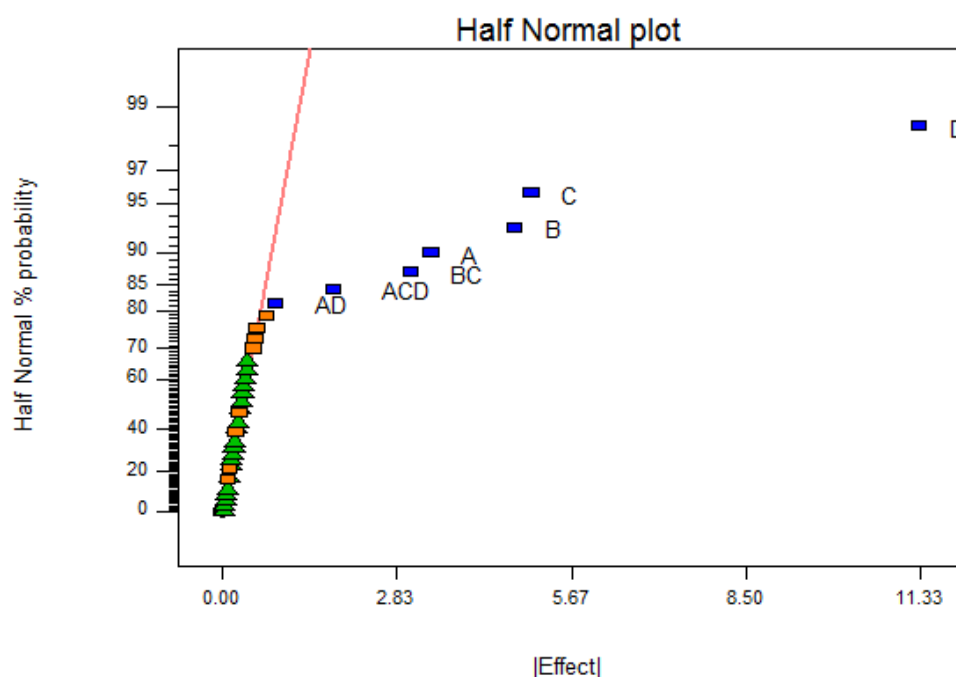
ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของดีเซลจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเป่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ดีเซล (%wt)
	A (°C)	B (mL/min)	C (mL/min)	D (%v/v)	
23	460	9	50	60	66.25
24	460	9	50	60	66.00
25	380	3	150	60	71.25
26	380	3	150	60	70.00
27	460	3	150	60	66.25
28	460	3	150	60	60.63
29	380	9	150	60	61.88
30	380	9	150	60	61.25
31	460	9	150	60	61.25
32	460	9	150	60	58.25
33	420	9	100	45	49.38
34	420	9	100	45	48.75
35	420	9	100	45	49.13
36	420	9	100	45	50.62
37	420	9	100	45	48.73

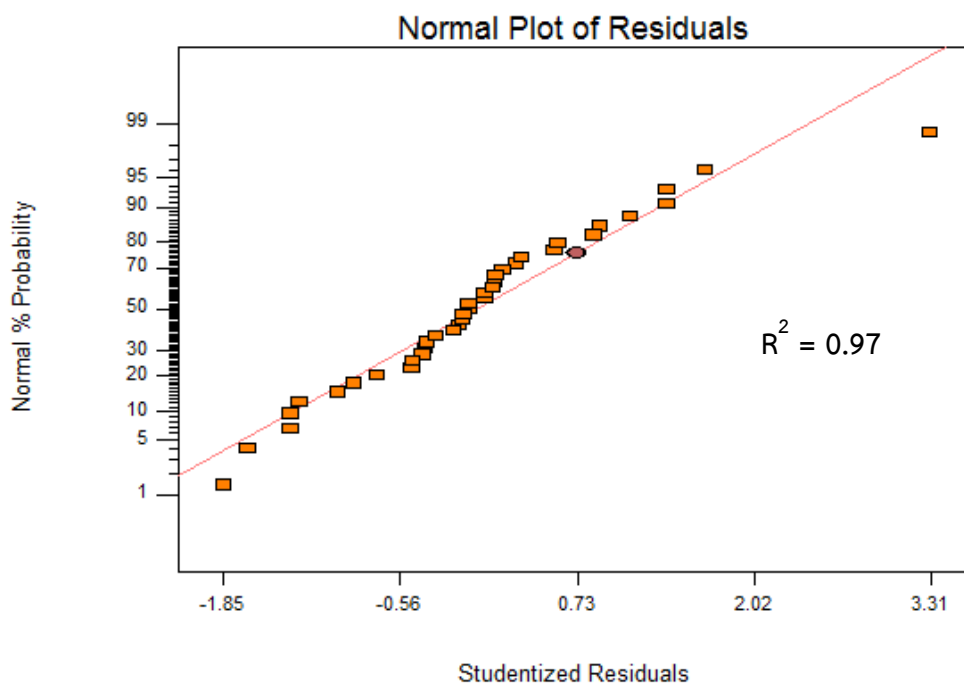
จากการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-expert เพื่อศึกษาค่าความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่างๆโดยใช้โปรแกรม Design-Expert พบว่าจากการคำนวณจะบ่งบอกถึงปัจจัยใดที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซล โดยปัจจัยนั้นต้องมีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 เมื่อพิจารณตารางที่ 4.8 แสดงผล ANOVA พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซลคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (A) อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม (B) อัตราการไหลของก๊าซตัวพา (C) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (D) อีกทั้งยังพบว่าอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (AD) อันตรกิริยาระหว่างอัตราการป้อนน้ำมันปาล์มและอัตราการไหลของก๊าซตัวพา (BC) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับอัตราการไหลของก๊าซตัวพาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ACD) เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของดีเซลจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F value	Prob > F value
Model	1608.63	7	229.80	164.18	<0.0001
A	92.24	1	92.24	65.90	<0.0001
B	180.83	1	180.83	129.19	<0.0001
C	201.55	1	201.55	143.99	<0.0001
D	1027.29	1	1027.29	733.91	<0.0001
AD	5.96	1	5.96	4.26	0.0485
BC	74.82	1	74.82	53.45	<0.0001
ACD	25.94	1	25.94	18.53	0.0002
Residual	39.19	28	1.40		
Total	2201.09	36			



ภาพที่ 4.7 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของดีเซล



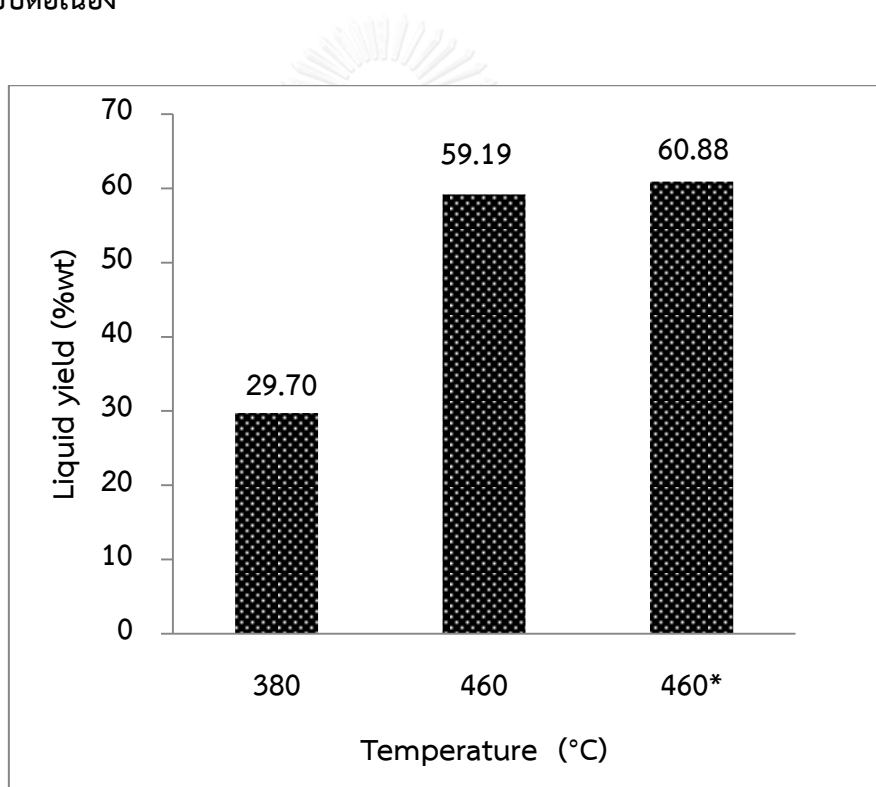
ภาพที่ 4.8 Normal probability plot ของส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ของดีเซล

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA สอดคล้องกับการทำ Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของดีเซล เมื่อทำการพลอตค่ากับ Effect แสดงในภาพที่ 4.7 พบว่าตัวแปรที่มีแนวโน้มเบี่ยงเบนจากเส้นตรงได้แก่ A, B, C, D, AD, BC และ ACD คือปัจจัยหลัก แสดงให้เห็นว่าตัวแปรดังกล่าวมีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของดีเซลจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าบนโถโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำข้อมูลไปสร้าง Normal probability plot ของส่วนตกค้างของสัดส่วนของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าบนโถโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง แสดงในภาพที่ 4.8 พบว่าได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงแสดงถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ถูกนำมาทำการศึกษา พบว่าค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.97 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่นำมาศึกษามีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำไปวิเคราะห์ผลโดย ANOVA ต่อไป

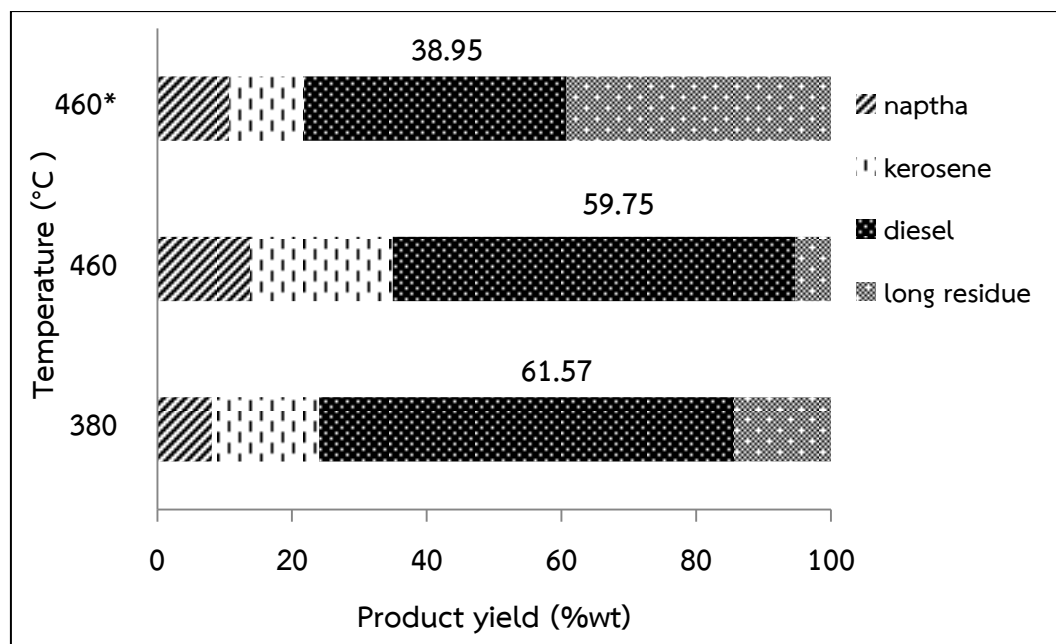
4.4 ผลของตัวแปรที่ศึกษาต่อการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลาบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

เมื่อทำการวิเคราะห์การทดลองโดยวิธี ANOVA แล้ว ทำให้ทราบปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวและร้อยละผลได้ของดีเซลที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลาบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง จะทำการศึกษาต่อว่าปัจจัยเหล่านั้นมีผลอย่างไร โดยการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างค่าต่ำ-สูงของแต่ละปัจจัยดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปลาจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลาบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



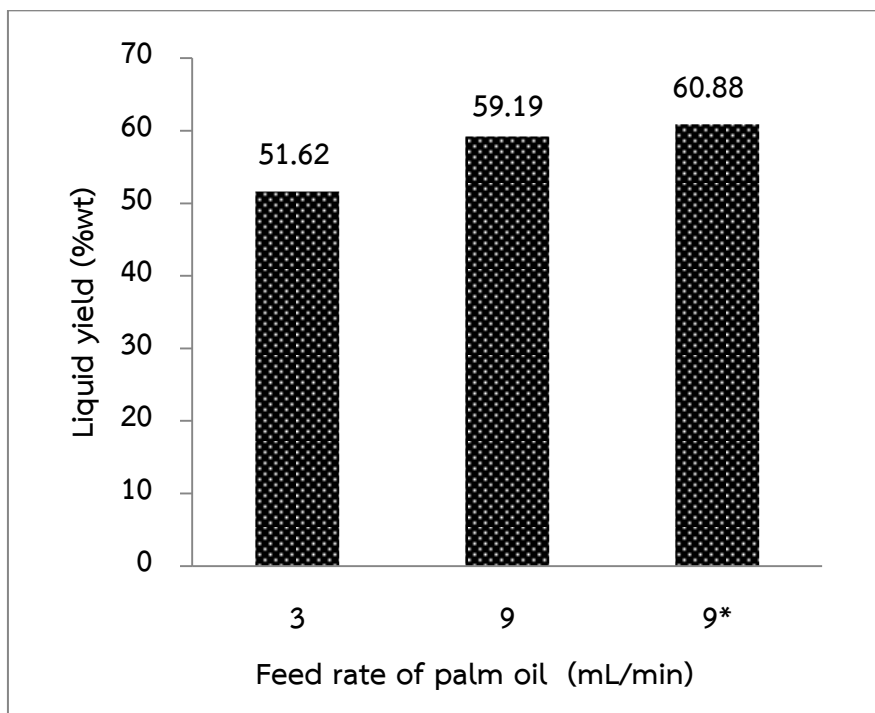
ภาพที่ 4.9 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 150 มิลลิลิตรต่อนาที และอุณหภูมิ 380 และ 460 องศาเซลเซียส เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*))



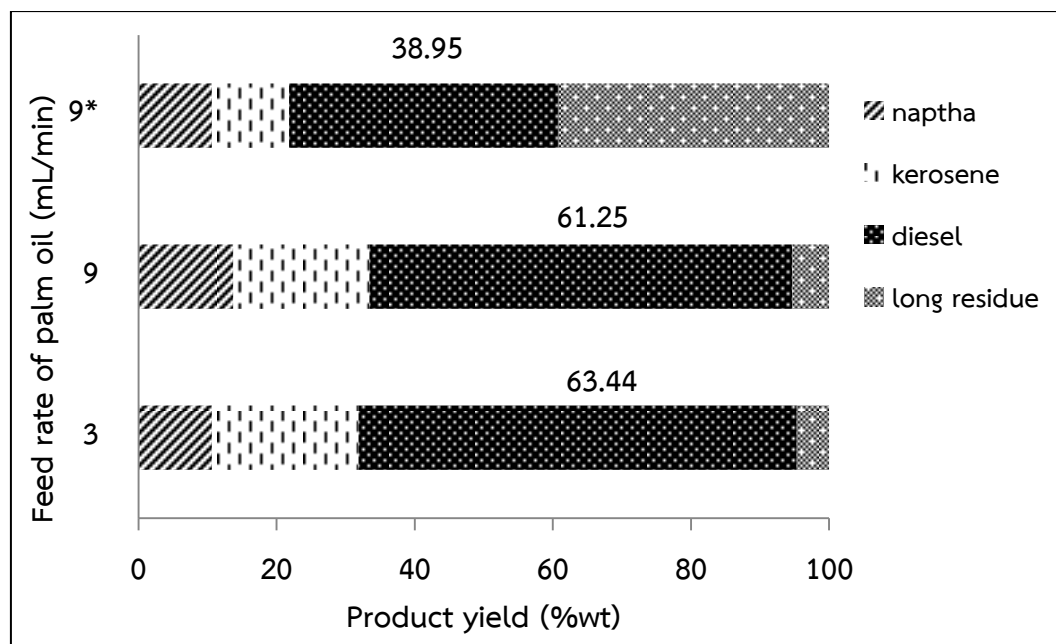
ภาพที่ 4.10 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 150 มิลลิลิตรต่อนาที และอุณหภูมิ 380 และ 460 องศาเซลเซียส เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ ร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*))

ภาพที่ 4.9 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น จะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันเหลวในปริมาณมากขึ้น ในขณะที่เมื่อนำน้ำมันเหลวไปวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดจะให้องค์ประกอบที่อยู่ในช่วงคาบจุดเดือดของน้ำมันดีเซลและปริมาณกากน้ำมันที่ลดลง จากแนวโน้มดังกล่าวพอที่จะอธิบายได้ว่าในช่วงแรกของการแตกตัวด้วยความร้อน อุณหภูมิจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการแตกตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก ในขณะที่ยังให้อุณหภูมิที่สูงอย่างต่อเนื่อง โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก ก็จะมีการแตกตัวต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กพร้อม ๆ กับการแตกตัวเชิงความร้อน มีรายงานว่าอุณหภูมิมีผลต่อการส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยที่อุณหภูมิสูงและเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น (long residence time) ยิ่งส่งเสริมให้เกิดการแตกตัวเชิงความร้อนไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กและแก๊สไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก แสดงในภาพที่ 4.10

4.4.2 ผลของอัตราการป้อนน้ำมันต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าจากการแตกตัวเชิงแรงปฏิบัติการของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนโพลีไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 4.11 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม (อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 150 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม 3 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาทีเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีไมต์ร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*))

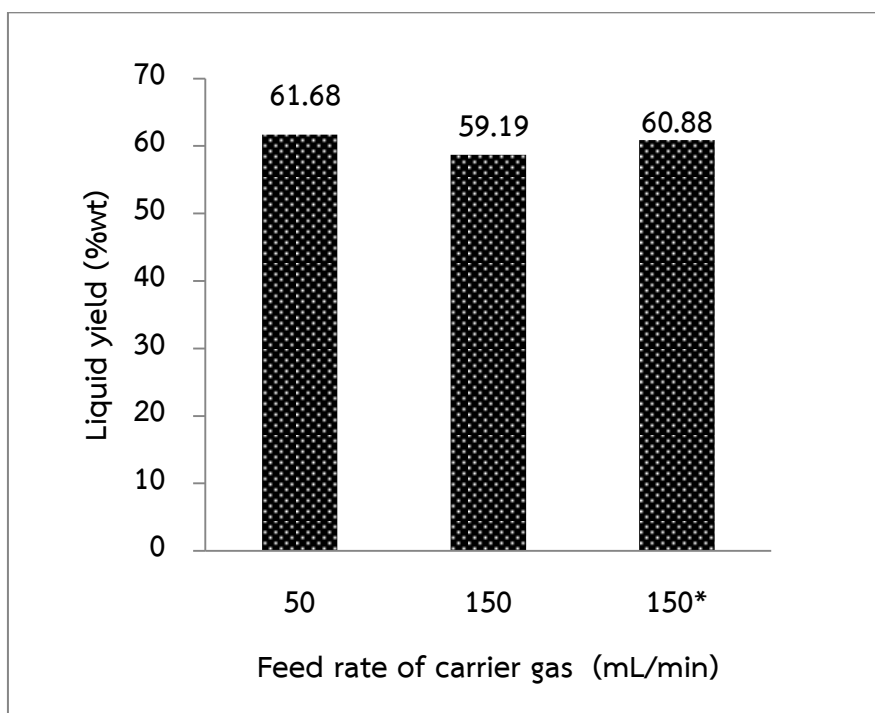


ภาพที่ 4.12 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม (อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 150 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม 3 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาทีเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*))

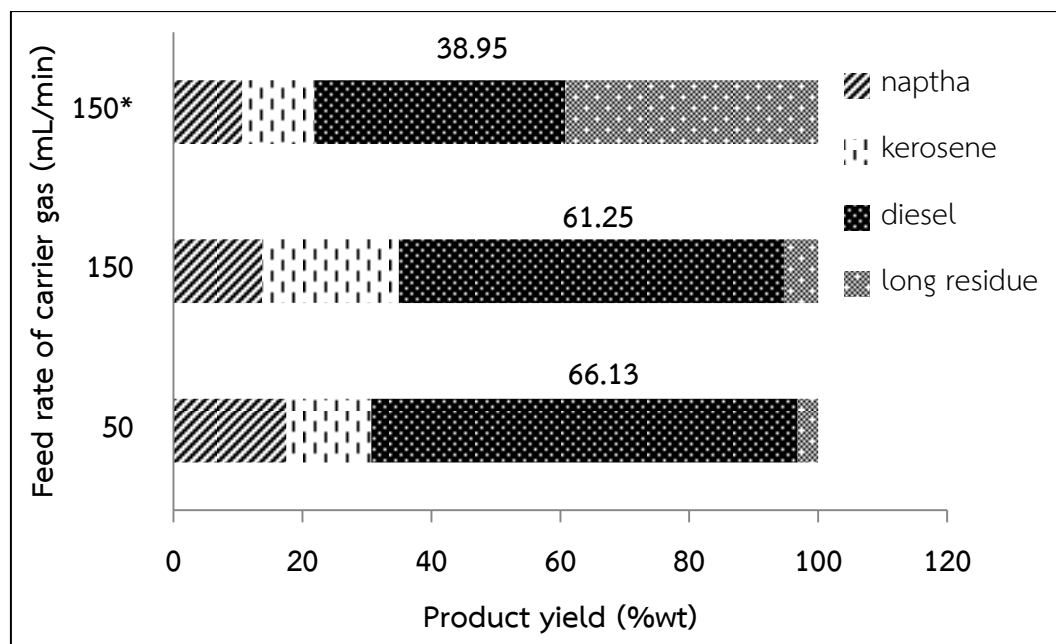
ภาพที่ 4.11 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนน้ำมันปาล์มให้สูงขึ้น จะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันเหลวในปริมาณมากขึ้น ในขณะที่เมื่อนำน้ำมันเหลวไปวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดจะให้องค์ประกอบที่อยู่ในช่วงคาบจุดเดือดของน้ำมันดีเซลลดลง จากแนวโน้มดังกล่าวพอที่จะอธิบายได้ว่าอัตราการป้อนน้ำมันที่สูงกว่า ทำให้มีปริมาณน้ำมันปาล์มในเครื่องปฏิกรณ์มากกว่า มีพื้นที่ผิวในการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผนังของเครื่องปฏิกรณ์และน้ำมันปาล์มสูง ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำมันปาล์มเมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวได้มากขึ้น ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเพิ่มมากขึ้น การสลายตัวมากขึ้นของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนในรูปไตรกลีเซอไรด์ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย อนุมูลอิสระเหล่านี้มีความไม่เสถียร และว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวต่อไปได้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กลง จึงทำให้สัดส่วนของดีเซลลดลง แต่ได้ร้อยละของเนฟทาเพิ่มมากขึ้น พบว่าอัตราการป้อนน้ำมันปาล์มเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่มากกว่าจะได้ร้อยละผลได้ของกากน้ำมันมากกว่าอัตราการป้อนน้ำมันปาล์มที่น้อยกว่า เนื่องจากอัตราการป้อนน้ำมันปาล์มที่มากทำให้เวลาที่สารตั้งต้นเกิดการถ่ายโอนความร้อนที่ผิวเครื่องปฏิกรณ์ได้น้อย ทำให้ได้รับการแตกตัวทางความร้อนจากอิทธิพลของอุณหภูมิได้น้อยลง ทำให้ได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่อยู่ ปริมาณกากน้ำมันที่เหลืออยู่ในองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวจึงมากกว่า นอกจากนี้การ

ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีผลต่อลักษณะการไหลของไอน้ำมันภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วย โดยทั่วไปแล้วการปฏิริยาการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนสามารถเกิดขึ้นปฏิกิริยาได้หลายปฏิกิริยา ทั้งปฏิกิริยาการรวมตัวเป็นโมเลกุลใหญ่ และปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นโมเลกุลเล็กลง ทำให้มีผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เกิดขึ้นมากมาย โดยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ถูกออกแบบมาเพื่อสามารถคัดกรองผลิตภัณฑ์ที่จะออกจากเครื่องปฏิกรณ์ อธิบายได้ว่าภายในเครื่องปฏิกรณ์มีไอของผลิตภัณฑ์อยู่ จากนั้นไอของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะถูกแก๊สตัวพาพาออกจากเครื่องปฏิกรณ์ อุณหภูมิของไอผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่อถ่ายโอนความร้อนสู่อากาศภายนอก และควบแน่นเป็นผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ส่วนไอของผลิตภัณฑ์ที่มีจุดเดือดสูงกว่าจึงเกิดการควบแน่นและตกลงสู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ นอกจากนี้ช่องว่างภายในเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้ไอผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการเหล่านั้นสามารถควบแน่นตกกลับลงไปทำปฏิกิริยาอีกครั้งหนึ่ง แต่การเพิ่มอัตราการป้อนน้ำมันจะทำให้เกิดไอของผลิตภัณฑ์ขึ้นอย่างหนาแน่นในช่องว่างภายในเครื่องปฏิกรณ์ ส่งผลให้ช่องว่างดังกล่าวมีพื้นที่ลดลง ทำให้ไอของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการไม่สามารถควบแน่นได้ และถูกผลักออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ส่งผลให้ร้อยละของกาน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนน้ำมันเพิ่มขึ้น แสดงในภาพที่ 4.12

4.4.3 ผลของอัตราการไหลของแก๊สตัวพาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนโตโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



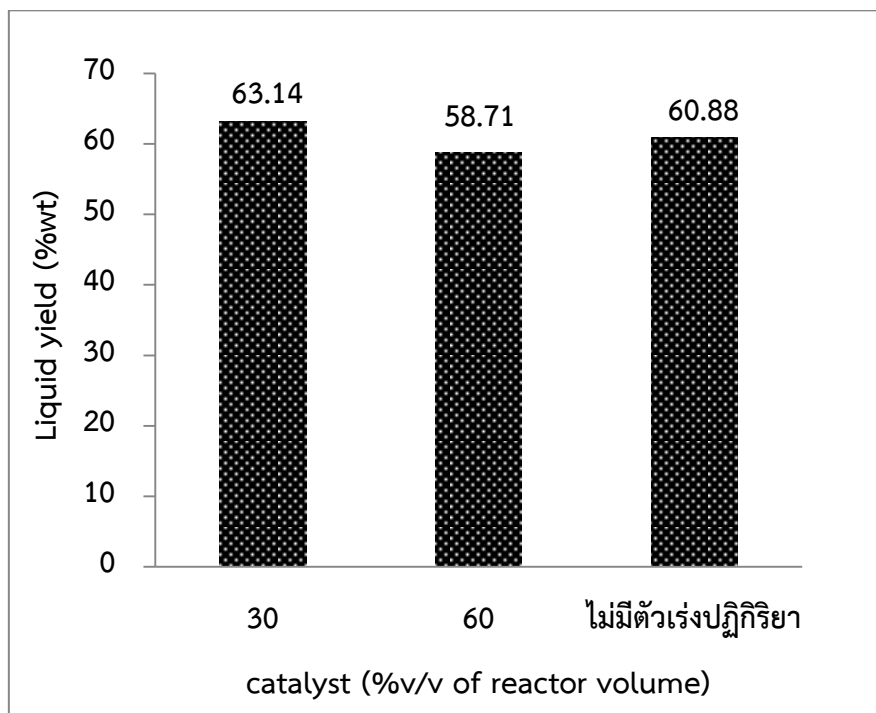
ภาพที่ 4.13 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนแก๊สตัวพา (อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 50 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโตโลไมต์ร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*))



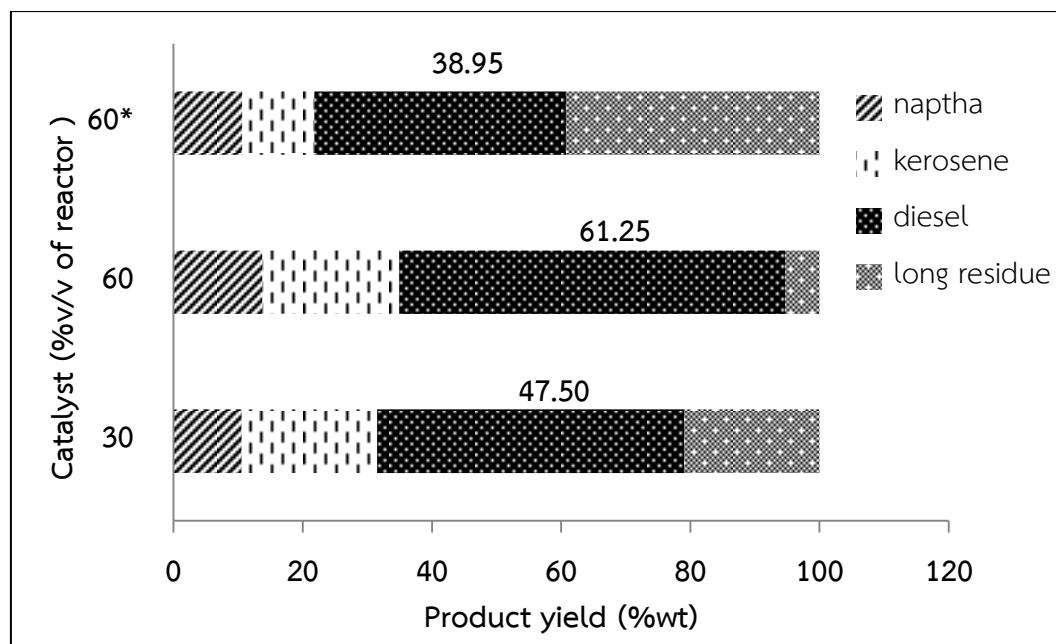
ภาพที่ 4.14 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม (อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 150 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม 3 และ 9 มิลลิลิตรต่อนาทีเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*))

ภาพที่ 4.13 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สตัวพาให้สูงขึ้น จะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันเหลวในปริมาณลดลง ในขณะที่เมื่อนำน้ำมันเหลวไปวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดจะให้องค์ประกอบที่อยู่ในช่วงคาบจุดเดือดของน้ำมันดีเซลลดลง จากแนวโน้มดังกล่าวพอที่จะอธิบายได้ว่าอัตราการป้อนแก๊สตัวพาทำให้แก๊สที่เกิดจากการแตกตัวด้วยความร้อนถูกนำออกจากเครื่องปฏิกรณ์ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาแตกตัวด้วยความร้อนและการถ่ายโอนอุณหภูมิจากผนังเครื่องปฏิกรณ์ได้ไม่เกิดการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันยังเกิดได้ไม่สมบูรณ์ การแตกตัวจึงไม่ดีเท่าที่ควรและพบว่าไม่มีโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนใหญ่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อพิจารณาองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ดีเซลลดลงจาก 66.13 เป็น 61.25 โดยน้ำหนัก แสดงในภาพที่ 4.14

4.4.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปาล์มจาก ทะลายปาล์มเปล่าจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะลายปาล์มเปล่าบนโคโลไมต์ใน เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 4.15 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 150 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนน้ำมัน ปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาทีเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ร้อยละ 30 และ 60 โดยปริมาตรของเครื่อง ปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา)



ภาพที่ 4.16 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนแก๊สตัวพา (อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 50 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ และไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (*))

ภาพที่ 4.15 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาให้สูงขึ้น จะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันเหลวในปริมาณลดลง ในขณะที่เมื่อนำน้ำมันเหลวไปวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดจะให้องค์ประกอบที่อยู่ในช่วงคาบจุดเดือดของน้ำมันดีเซลเพิ่มขึ้นและกาน้ำมันที่ลดลง จากแนวโน้มดังกล่าวพอที่จะอธิบายได้ว่า เนื่องจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเกิดมากขึ้น โมเลกุลแตกตัวอย่างต่อเนื่องได้เป็นแก๊สมากขึ้น ของเหลวจึงมีค่าลดลง เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวตามคาบจุดเดือด พบว่าน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่ามีกาน้ำมันเป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 84.50 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับภายหลังการแตกตัวทางความร้อนโดยไม่ใช้และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ที่ภาวะเดียวกัน ปริมาณกาน้ำมันลดลงอย่างชัดเจน โดยเมื่อพิจารณาองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว ได้ร้อยละผลได้ของดีเซลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 47.50 เป็น 61.25 โดยน้ำหนักแสดงในภาพที่ 4.16 เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวสัมผัสและมีพื้นที่ผิวรูพรุนจำนวนมาก จึงเป็นการส่งเสริมปฏิกิริยาการถ่ายโอนและการเติมไฮโดรเจนที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณมากกว่าของโคโลไมต์ไปยังโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง ทำให้มีความอิ่มตัวมากขึ้น ร้อยละ

ของกาน้ำมันลดลง และได้เนฟทาเพิ่มมากขึ้น นอกจากการที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่มาก ทำให้ช่องว่างภายในเครื่องปฏิกรณ์ลดลงแต่ยังสามารถมีพื้นที่ให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวเพื่อให้ได้ไอของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และการที่มีใบกวนอยู่ภายในแกนกลางของเครื่องปฏิกรณ์ สามารถช่วยกระจายพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำมันปาล์มได้ดียิ่งขึ้น

4.5 คำแนะนำภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลาปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ด้วยโปรแกรม Design-Expert

ตารางที่ 4.9 ขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลาปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Unit
Temperature	is in range	380	460	°C
Feed rate of palm oil	is in range	3	9	mL/min
Flow rate of carrier gas	is in range	50	150	mL/min
Catalyst	is in range	30	60	%v/v
Liquid yield	maximize	25.95	66.75	%wt
Diesel yield	maximize	47.5	75.57	%wt

ตารางที่ 4.10 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลาปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

ตัวแปร	สถานะจากโปรแกรม	สถานะจากการทดลองจริง
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	460.00	460.00
อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม (มิลลิลิตรต่อนาที)	8.96	9.00
อัตราการไหลของก๊าซตัวพา (มิลลิลิตรต่อนาที)	50.04	50.00
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ (โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์)	60.00	60.00
ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลว	59.73	61.68
ร้อยละผลได้ของดีเซล	66.12	66.13

เมื่อหาภาวะที่เหมาะสม โดยพิจารณาค่าตอบสนองเพียง 2 ค่าคือร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวและร้อยละผลได้ของดีเซลให้มากที่สุดโดยใช้โปรแกรม Design-Expert แสดงดังตารางที่ 4.9 ภาวะที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.10 ที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนของน้ำมันปาล์ม 8.96 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สตัวพา 50.04 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ จะทำให้ได้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวร้อยละ 59.73 และร้อยละผลได้ของดีเซลร้อยละ 66.12 โดยน้ำหนัก หลังจากได้ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรมแล้วจึงนำมาทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรม แสดงดังตารางที่ 4.10 ซึ่งจะพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert

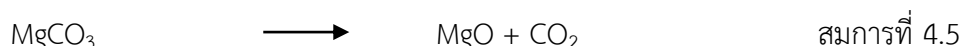
4.6 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้

ตารางที่ 4.11 ค่าความเป็นกรดของเชื้อเพลิงเหลว

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)
น้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่า	54.44
ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา	18.25
เติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์	0.35

จากตารางที่ 4.11 แสดงค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนของน้ำมันปาล์ม 9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สตัวพา 50 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าเมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้มีค่า 18.25 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมันและเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ลงไปพบว่าค่าความเป็นกรดมีค่าลดลงเท่ากับ 0.35 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์มีความเป็นเบสสูงจึงทำให้ค่าความเป็นกรดลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu และคณะ (2010) [37] และ Tani และคณะ (2011) [38] โดยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน เมื่อใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แมกนีเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิกได้เป็นแมกนีเซียมคาร์บอเนตและ

สารไฮโดรคาร์บอน ทำให้ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ลดลง ดังสมการที่ 4.4 จากนั้นแมกนีเซียมคาร์บอเนตจะสลายตัวอยู่ในรูปของออกไซด์อีกครั้งและได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ดังสมการที่ 4.5



4.7 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลว

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวด้วยเครื่อง CHNS Analyzer แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลว

ตัวเร่งปฏิกิริยา	C	H	N	O*
สารตั้งต้น	59.30	12.00	0.04	28.66
ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา	70.90	11.90	0.09	17.11
เติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์	76.50	12.80	0.03	10.67

* by difference

ตารางที่ 4.12 แสดงองค์ประกอบของธาตุ C H O พบว่าน้ำมันพืชใช้แล้วก่อนการไพโรไลซิสบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโคโลไมต์มีค่าออกซิเจนเท่ากับร้อยละ 28.66 จะเห็นได้ว่าน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่านั้นมีองค์ประกอบของธาตุออกซิเจนจำนวนมากซึ่งส่งผลให้ค่าความร้อนมีค่าต่ำกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงทั่วไป หลังจากผ่านการไพโรไลซิสบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโคโลไมต์พบว่าผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มีค่าออกซิเจนลดลงเหลือร้อยละ 10.67 มีค่าต่ำกว่าไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจากโคโลไมต์ซึ่งประกอบด้วยแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดไขมันการกำจัดหมู่คาร์บอกซิลิกออกไปได้คาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนมีค่าลดลง ส่งผลโดยตรงต่อค่าความร้อน ทำให้มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น ช่วยให้เกิดผลดีต่อคุณภาพของน้ำมัน

4.8 การวิเคราะห์ค่าความร้อน

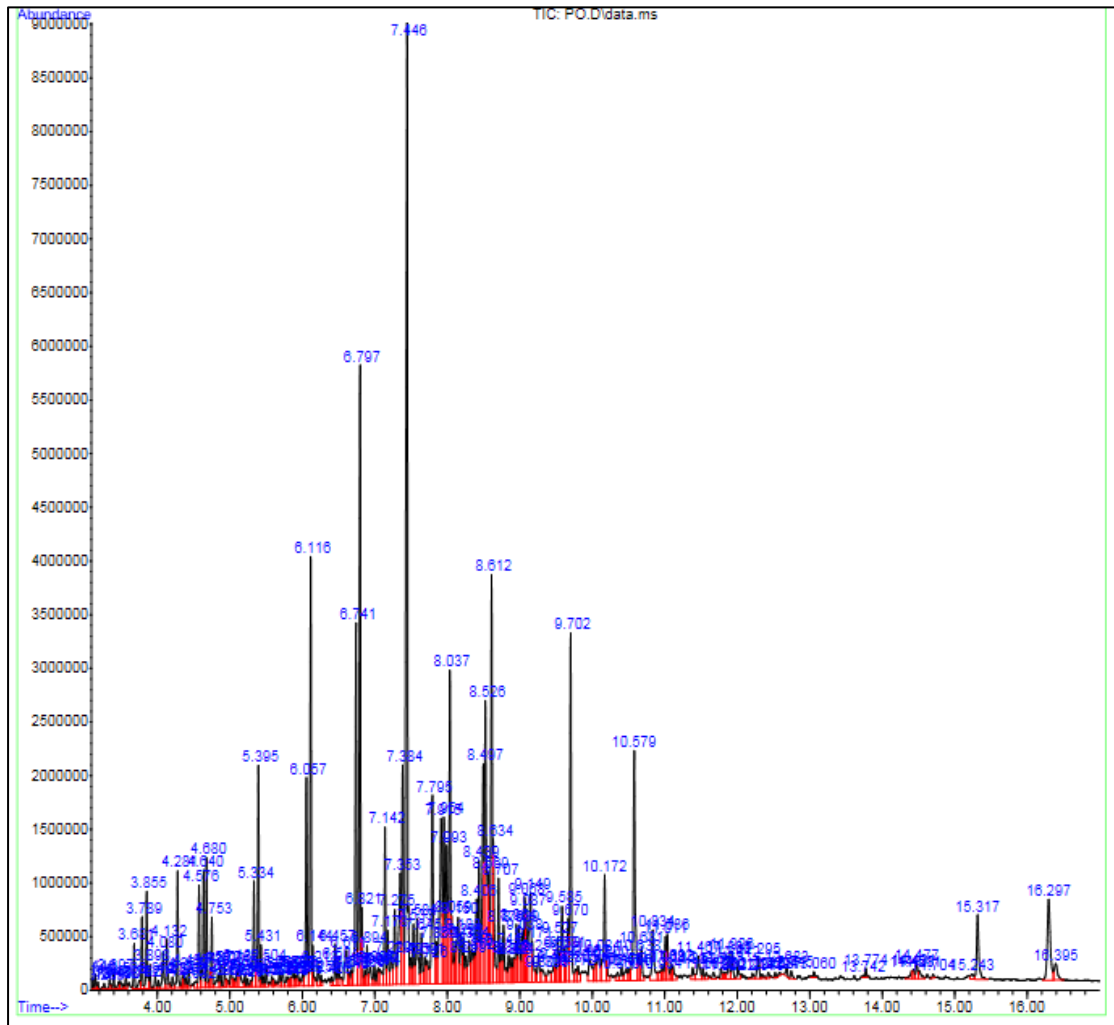
ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter ของน้ำมันจากทะเลสาบ ปาล์มเปล่าก่อนและหลังการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา

น้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่า	ค่าความร้อน (MJ/kg)
ก่อนการแตกตัว	39.25
หลังการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา	45.20

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่า ก่อนและหลังการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมด์ พบว่าค่าความร้อนของน้ำมัน ปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าก่อนการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 39.25 เมกะจูล ต่อกรัม เมื่อผ่านการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมด์มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 45.20 เมกะจูลต่อกรัม ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมด์ช่วย เร่งปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าทำให้ขจัดออกซิเจนออกจากโมเลกุล ของน้ำมัน ค่าความร้อนจึงสูงขึ้น พบว่าค่าความร้อนที่ได้หลังจากการแตกตัวมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมัน ดีเซลที่ได้มาจากกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม (46.80 เมกะจูลต่อกรัม) [46]

4.9 วิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าบนโคลโลไมต์

จากการวิเคราะห์น้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าที่ผ่านการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาบนโคลโลไมต์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรเมตรี



ภาพที่ 4.17 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะลายปาล์มเปล่าบนโคลโลไมต์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-กับแมสสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลาบนาโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
3.117	3-Nonene	0.06
3.147	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl-	0.09
3.182	cis-2-Nonene	0.04
3.269	Bicyclo[2.2.2]octane, 2-methyl-	0.05
3.343	Cyclohexane, propyl-	0.06
3.399	2-Cyclopenten-1-one, 3,4-dimethyl-	0.10
3.468	Cyclopentene, 1-butyl-	0.07
3.490	Cyclohexanone, 2-methyl-	0.08
3.568	Cyclohexene, 1-propyl-	0.09
3.681	Phenol	0.28
3.763	2,4-Hexadienoic acid, ethyl ester	0.11
3.789	1-Decene	0.43
3.854	Decane	0.67
3.897	4-Decene	0.13
3.971	2-Decene, (Z)-	0.09
4.019	1-Tridecyne	0.05
4.080	Cyclohexene, 1-methyl-4-(1-methyl-...)	0.34
4.132	D-Limonene	0.35
4.210	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	0.10
4.279	Phenol, 2-methyl-	0.73
4.348	Benzene, butyl-	0.08
4.366	Cyclohexane, 1-methyl-4-(1-methyl-...)	0.11
4.396	2-Cyclopenten-1-one, 3,4,5-trime...	0.07
4.435	Phenol, 3-methyl-	0.13
4.530	Cyclooctane, methyl-	0.09
4.578	1-Undecene	0.70
4.639	Undecane	0.85

ตารางที่ 4.14 (ต่อ) องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
4.678	5-Undecene	0.76
4.730	Phenol, 2,6-dimethyl-	0.14
4.752	5-Undecene	0.44
4.838	Cyclodecene, (Z)-	0.18
4.873	Cyclopentene, 1-butyl-	0.18
4.929	Phenol, 2-ethyl-	0.13
4.951	Cyclohexane, 2-propenyl-	0.06
5.016	Phenol, 2,3-dimethyl-	0.19
5.042	Cyclopentene, 1-pentyl-	0.06
5.064	8,10-Dodecadien-1-ol, (E,E)-	0.06
5.107	Cyclohexanol, 1-ethynyl-	0.19
5.133	Benzene, pentyl-	0.31
5.211	4-Methylphenyl acetone	0.09
5.246	Phenol, 3,5-dimethyl-	0.06
5.293	Cyclopropane, 1-butyl-2-pentyl-,...	0.05
5.322	1-Dodecene	0.84
5.397	Dodecane	1.46
5.432	3-Dodecene, (Z)-	0.28
5.467	Phenol, 2,3,6-trimethyl-	0.06
5.506	2-Dodecene, (Z)-	0.17
5.584	Z-1,6-Undecadiene	0.07
5.606	Phenol, 2,3,5-trimethyl-	0.06
5.684	Phenol, 2-ethyl-4-methyl-	0.13
5.731	1-Tridecene	0.17
5.792	1,E-8,Z-10-Tridecatiene	0.12
5.818	p-Aminotoluene	0.05

ตารางที่ 4.14 (ต่อ) องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลาบนาโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
5.840	2,4-Dodecadiene, (E,Z)-	0.07
5.883	Bicyclo[6.4.0]dodeca-9,11-diene	0.18
5.090	Phenol, 2-ethyl-4-methyl-	0.07
5.935	Benzeneethanol, .beta.-methyl-	0.14
6.004	Phenol, 2,3,4,6-tetramethyl-	0.12
6.056	1-Tridecene	1.59
6.117	Tridecane	2.97
6.143	3-Tridecene, (Z)-	0.24
6.217	2-Tridecene, (E)-	0.17
6.260	1H-Imidazole, 2-ethyl-	0.08
6.408	Bicyclo[2.2.1]heptane, 2,2,3-tri...	0.07
6.455	Cyclopentane, (2-methylpropyl)-	0.33
6.503	Cyclopentene, 1-octyl-	0.21
6.611	Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-...	0.54
6.642	1-Methyl-2-n-hexylbenzene	0.10
6.676	Cyclopentane, (2-methylpropyl)-	0.16
6.741	2-Tetradecene, (E)-	2.85
6.798	Tetradecane	4.62
6.819	3-Tetradecene, (Z)-	0.43
6.867	3a,7a-Epoxy-1H-inden-4(5H)-one, ...	0.12
6.893	3-Tetradecene, (Z)-	0.27
6.941	Naphthalene, 1,6-dimethyl-	0.25
6.993	Cyclotetradecane	0.17
7.045	1,4-Dioxa-2-decalone	0.19
7.075	8-Hexadecyne	0.26
7.140	Cyclopentane, decyl-	1.08
7.179	Cyclopentene, 1-octyl-	0.48

ตารางที่ 4.14 (ต่อ) องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
7.227	1-Cyclohexyl-2-methyl-prop-2-en-...	0.33
7.275	Cyclohexene, 1-octyl-	0.69
7.353	Cyclopentadecane	1.44
7.383	1-Pentadecene	1.81
7.444	Pentadecane	9.24
7.491	1-Octadecyne	0.24
7.530	Cyclohexane, 1-(1,5-dimethylhexy...	0.49
7.582	(1S)-(+)-Menthyl chloroformate	0.85
7.643	Cyclohexane, (1-methylpropyl)-	0.47
7.691	Cyclohexane, 1-(cyclohexylmethyl...	0.27
7.726	Cyclohexene, 1,6-dimethyl-	0.33
7.795	n-Nonylcyclohexane	2.19
7.851	Cyclohexadecane	0.33
7.916	Cyclohexene, 1-nonyl-	2.33
7.955	Z-8-Hexadecene	1.56
7.994	Cetene	1.47
8.037	Hexadecane	2.36
8.059	Z-8-Hexadecene	0.51
8.116	Cyclopentane, (2-methylpropyl)-	0.41
8.150	Oxalic acid, cyclohexylmethyl do...	0.73
8.189	Cyclopentene, 5-hexyl-3,3-dimethyl-	0.52
8.224	6-Methyl-bicyclo[4.2.0]octan-7-ol	0.37
8.259	Cyclodecanol	0.26
8.302	Trans-1-methyl-2-nonyl-cyclohexane	0.48
8.341	1-Methyl-2-methylenecyclohexane	0.36
8.371	1,3-Hexadiene, 3-ethyl-2-methyl-...	0.24

ตารางที่ 4.14 (ต่อ) องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลาบโนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
8.406	Cyclohexane, 1,1'-(1,2-dimethyl-...	0.82
8.441	Pentadec-7-ene, 7-bromomethyl-	1.02
8.497	8-Heptadecene	2.15
8.528	8-Heptadecene	2.98
8.571	E-14-Hexadecenal	1.09
8.614	Heptadecane	3.12
8.636	E-14-Hexadecenal	1.19
8.705	8-Heptadecene	0.81
8.744	3a,7a-Epoxy-1H-inden-4(5H)-one, ...	0.31
8.775	Cyclohexane, 1-(cyclohexylmethyl...	0.53
8.848	2-Methyl-Z-4-tetradecene	0.30
8.892	Cyclohexane, 1-(cyclohexylmethyl...	0.27
8.926	7-Octadecyne, 2-methyl-	0.21
8.952	Heptadecane, 2-methyl-	0.55
8.991	Cyclohexane, 2-propenyl-	0.72
9.039	5-Octadecene, (E)-	0.41
9.069	9-Octadecene, (E)-	0.71
9.087	9-Octadecene, (E)-	0.59
9.148	Octadecane	1.26
9.169	E-15-Heptadecenal	0.40
9.260	Cyclopentadecanone, 2-hydroxy-	0.33
9.299	(R)-(-)-14-Methyl-8-hexadecyn-1-ol	0.24
9.395	7-Pentadecyne	0.22
9.473	Z,E-3,13-Octadecadien-1-ol	0.22
9.494	Cyclohexene, 4-(4-ethylcyclohexy...	0.15
9.525	cis-11-Tetradecen-1-ol	0.37

ตารางที่ 4.14 (ต่อ) องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลาบโนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
9.559	1-Heneicosanol	0.22
9.585	9-Nonadecene	0.90
9.629	Z-5-Nonadecene	0.21
9.672	Hexadecane	0.68
9.702	2-Heptadecanone	2.69
9.772	1-Eicosene	0.15
9.806	Hexadecanoic acid, methyl ester	0.18
9.963	13-Tetradecen-1-ol acetate	0.44
10.045	1,19-Eicosadiene	0.20
10.084	Cyclopropanoic acid, 2-octyl-	0.46
10.171	Octadecan-4-one	1.14
10.201	11-Tetradecyn-1-ol acetate	0.18
10.348	7-Heptadecyne, 1-chloro-	0.11
10.405	Eicosane	0.17
10.474	E,E,Z-1,3,12-Nonadecatriene-5,14...	0.20
10.513	E,E,Z-1,3,12-Nonadecatriene-5,14...	0.12
10.578	Z,E-3,13-Octadecadien-1-ol	2.36
10.639	Octadecane	0.28
10.682	2-Nonadecanone	0.32
10.834	Oleic Acid	0.66
10.934	2-Dodecen-1-yl(-)succinic anhydride	0.14
10.968	3,4-Octadiene, 7-methyl-	0.14
11.012	6-Octadecenoic acid	0.37
11.038	4-Methyl-Z-4-hexadecen-1-ol	0.43
11.094	Docosane	0.11
11.116	9-Octadecenoic acid, (E)-	0.17

ตารางที่ 4.14 (ต่อ) องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลาบโนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

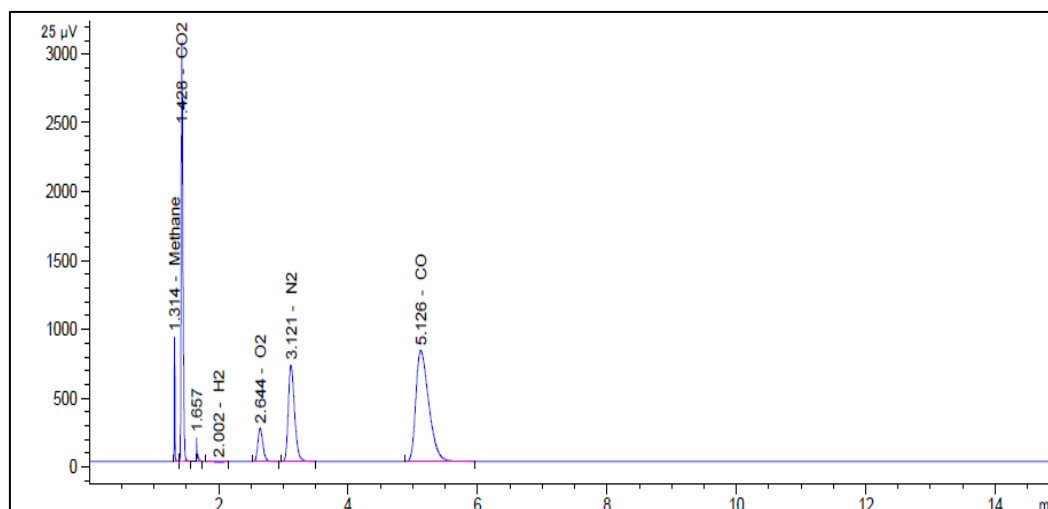
เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
11.389	cis-11,14-Eicosadienoic acid, me...	0.14
11.467	1-Tricosene	0.36
11.528	1-Chloroeicosane	0.09
11.571	.beta.-Piperidinopropiophenone	0.08
11.675	Spiro[4.5]decan-7-one, 1,8-dimet...	0.10
11.779	5.alpha.-Androstan-17.beta.-ol, ...	0.10
11.809	cis-11,14-Eicosadienoic acid, me...	0.04
11.831	Cyclohexane, 1-(1,5-dimethylhexy...	0.06
11.887	Pyrrolidine, 1-(1-oxopentadecyl)-	0.27
11.926	Benzene, 1-fluoro-4-methoxy-	0.26
12.013	N-[5-Chloro-2-(3-methoxy-benzyl)...	0.18
12.213	Cyclodecacyclotetradecene, 1,2,3...	0.06
12.295	Benzenebutanamide, N-phenyl-	0.25
12.347	Eicosane	0.05
12.429	1H-Indene, 5-butyl-6-hexyloctahy...	0.06
12.525	Phenol, m-tert-butyl-	0.03
12.585	2-Methoxybenzoic acid, 2-methylp...	0.04
12.685	Pentanamide, N-(3-chloro-4-methy...	0.10
12.746	Androsta-1,4-dien-17-ol-3-one ac...	0.09
13.058	10-Nonadecanone	0.06
13.743	(E)-2-bromobutyloxychalcone	0.01
13.773	Tetrahydrofuran-2-carboxylic aci...	0.06
14.406	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	0.10
14.432	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	0.09
14.476	2-(Acetoxymethyl)-3-(methoxycarb...	0.15
14.510	3-Methoxy-2,4,5-trifluorobenzoic...	0.13

ตารางที่ 4.14 (ต่อ) องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
14.705	Tris(tert-butyl dimethylsilyloxy)...	0.03
15.243	Silane, chlorodiethylheptyloxy-	0.09
15.317	trans-1,2-Bis(methyl dichlorosilyl)...	0.84
16.296	Benzenamine, 3-(2,2,2-trifluoro...	1.45
16.396	13H-Dibenzo[a,i]carbazole	0.32

จากภาพที่ 4.17 แสดงโครมาโทแกรมของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ และตารางที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลว เมื่อผ่านกระบวนการแตกตัวเชิงเร่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ จะได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ C10-C17 เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาส่งเสริมการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดไขมัน ซึ่งน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่ามีองค์ประกอบของกรดไขมันปาล์มติก (palmitic acid; C16) และกรดไขมันโอเลอิก (oleic acid; C18) ซึ่งเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง และเกิดการแตกตัวต่อไปได้เมื่อได้รับความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคนที่มีขนาดเล็กลง

เนื่องจากอุณหภูมิมีบทบาทอย่างมากต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่อยู่ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นขนาดกลางและขนาดเล็ก จากการแตกตัวของหมู่เอสเทอร์ของไตรกลีเซอไรด์ได้เป็นกรดไขมันอิสระ จากนั้นเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรคาร์บอน เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.18 แสดงโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ โดยใช้ภาวะที่ดีที่สุดเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีสัดส่วนของดีเซลมากที่สุดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวตรวจวัด thermal conductivity detector (TCD) พบว่าองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเกิดขึ้นสมบูรณ์เป็นส่วนใหญ่ และพบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพียงบางส่วนที่เกิดจากปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน



ภาพที่ 4.18 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวตรวจวัด TCD

4.10 ผลการทดลองและงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

เมื่อนำผลการทดลองเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยเลือกใช้สารตั้งต้น เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องและตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสหรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน ภาวะที่เหมาะสมงานวิจัยนี้ให้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวค่อนข้างต่ำกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ ส่วนร้อยละผลได้ของดีเซลมีค่าสูงที่สุดและมีค่าความเป็นกรดต่ำกว่า

ในขณะที่เมื่อใช้สารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเดียวกัน แต่ต่างกันที่เครื่องปฏิกรณ์ พบว่างานวิจัยนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง มีข้อดีคือ ผลิตภัณฑ์แยกออกตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างชัดเจน ทำให้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีความสะอาด ไม่ปนเปื้อนกับตัวเร่งปฏิกิริยาเหมือนแบบแบตช์ที่เมื่อใช้งานเป็นเวลานานอาจมีการดูดซับน้ำมันที่ผลิตภัณฑ์ไว้ และสามารถผลิตน้ำมันได้อย่างต่อเนื่อง ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาตลอดเวลาตราบไต่ที่ยังมีการป้อนสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างไม่เสื่อมสภาพ ภาวะที่เหมาะสมงานวิจัยนี้ให้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวค่อนข้างต่ำกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่มีร้อยละผลได้ของดีเซลมีค่าสูงที่สุดและค่าความเป็นกรดต่ำกว่าเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงผลการทดลองในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองและงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

การทดลอง	เชษฐา (2555)	ญาติ (2556)	ฉัตรทิศา (2557)	ชัยพร (2558)	งานวิจัยนี้
สารตั้งต้น	น้ำมันพืช ใช้แล้ว	น้ำมันจาก ทะเล ปาล์มเปล่า	น้ำมันพืช ใช้แล้ว	น้ำมันจาก ทะเล ปาล์มเปล่า	น้ำมันจาก ทะเล ปาล์มเปล่า
เครื่องปฏิกรณ์	แบบต่อเนื่อง	แบบแบตช์	แบบแบตช์	แบบแบตช์	แบบต่อเนื่อง
ตัวเร่งปฏิกิริยา	MgO : Activated carbon	MgO : Activated carbon	โคโลไมต์	โคโลไมต์	โคโลไมต์
อุณหภูมิ (°C)	430	430	450	460	460
ปริมาณสารตั้งต้น (mL/min)	1.11	-	-	-	8.96
ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา	60 %v/v	5% wt	2.5 %wt	5% wt	60 %v/v
อัตราการไหลของ แก๊สไนโตรเจน (mL/min)	100	-	-	-	50.04
ร้อยละผลได้ ผลิตภัณฑ์เหลว (%wt)	72.50	66.88	55.01	67.10	59.73
ร้อยละผลได้ของ ดีเซล (%wt)	42.75	55.00	-	37.50	66.12
ค่าความร้อน (MJ/kg)	39.55	43.46	43.31	44.07	45.20
ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)	0.35	3.28	0.50	0.34	0.35

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง เพื่อภาวะที่เหมาะสมที่ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีสัดส่วนของดีเซลมากที่สุด มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และเป็นข้อมูลในการออกแบบกระบวนการผลิตในเชิงพาณิชย์ โดยการออกแบบการทดลองเชิงตัวประกอบแบบสองระดับ (2k factorial design) โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาดังต่อไปนี้ คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380-460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม 3-9 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 50-150 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 30-60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้นำไปวิเคราะห์ด้วยโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น จากการนำผลการทดลองที่ได้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert พบว่าภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 460 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปาล์ม 8.96 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50.04 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ จะได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหล্বর้อยละ 59.73 และร้อยละผลได้ของดีเซล 66.12 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าความร้อน 45.20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความเป็นกรด 0.35 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ศึกษาการนำเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้ไปกลั่นเพื่อแยกผลิตภัณฑ์ดีเซลออกมาเพื่อนำไปใช้กับทดสอบกับเครื่องยนต์ต่อไป
- 5.2.2 นำภาวะที่ได้ไปทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ในเชิงพาณิชย์
- 5.2.3 ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสอื่น ๆ ที่ให้ผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกับน้ำมันจากปิโตรเลียม

รายการอ้างอิง

- [1] ทองอำไพ, พ. ปาล์มน้ำมัน แหล่งพลังงานทดแทน [Online]. Available from: <http://www.arda.or.th/easyknowledge/easy-articles-detail.php?id=89> [17 พฤศจิกายน 2558]
- [2] เทคโนโลยีการจัดการผลผลิตปาล์มน้ำมัน [Online]. Available from: www.krabi.doae.go.th/1.pages/pages%20banner/...year52/.../009.doc [17 พฤศจิกายน 2558]
- [3] ปิโตรเลียม [Online]. Available from: http://202.143.165.163/sci_t2/chap10/chap10_1.pdf [25 สิงหาคม 2558]
- [4] ศุภวรรธน์ ตันตยานนท์. ปิโตรเคมี. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
- [5] Device for reducing toxic exhaust gases of diesel engines [Online]. Available from: <http://www.google.com/patents/EP0954693B1?cl=en> [17 พฤศจิกายน 2558]
- [6] Organic Chemistry/Cycloalkanes [Online]. Available from: https://en.wikibooks.org/wiki/Organic_Chemistry/Cycloalkanes [17 พฤศจิกายน 2558]
- [7] Matar, S. Chemistry of Petrochemical Processes. Texas, 1994.
- [8] Tetralin [Online]. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tetralin> [17 พฤศจิกายน 2558]
- [9] Amines [Online]. Available from: <https://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/VirtTxtJml/amine1.htm> [17 พฤศจิกายน 2558]
- [10] Steer, J. Structure and Reactions of Chlorophyll [Online]. Available from: <http://www.ch.ic.ac.uk/local/projects/steer/chloro.htm> [17 พฤศจิกายน 2558]
- [11] กระทรวงพลังงาน. พลังงานทดแทน [Online]. Available from: <http://www.thailandenergyeducation.com/assets/media/A004.pdf> [18 ตุลาคม 2558]
- [12] หอมหวาน, ม. พลังงานทดแทน พลังงานทางเลือกใหม่สำหรับอนาคต [Online]. Available from:

- http://www.bu.ac.th/knowledgecenter/executive_journal/jan_mar_12/pdf/aw014.pdf [16 ตุลาคม 2558]
- [13] ศูนย์ศึกษาการค้าระหว่างประเทศ. โครงการพัฒนาความร่วมมือด้านอุตสาหกรรมกับประเทศเพื่อนบ้าน
(ยุทธศาสตร์การพัฒนาความร่วมมือด้านอุตสาหกรรม ภายใต้กรอบโครงการพัฒนาเขตเศรษฐกิจสามฝ่าย อินโดนีเซีย-มาเลเซีย-ไทย: IMT-GT) [Online]. Available from:
http://www.thaifta.com/trade/study/imtgt_chap5-3.pdf [5 กันยายน 2558]
- [14] บุรณสิงห์, ณ. ปาล์มน้ำมัน : ผลผลิตทางการเกษตรเพื่อการผลิตไฟฟ้า [Online]. Available from: http://library2.parliament.go.th/giventake/content_nrcinf/nrc2557-article73.pdf [29 ตุลาคม 2558]
- [15] การแปรรูปปาล์มน้ำมัน [Online]. Available from:
<http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/palm/used/01-02.php> [18 พฤศจิกายน 2558]
- [16] กระทรวงพลังงาน. พลังงานทดแทน [Online]. Available from:
<http://webkc.dede.go.th/webmax/sites/default/files/%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99%20%E0%B8%8A%E0%B8%B5%E0%B8%A7%E0%B8%A1%E0%B8%A7%E0%B8%A5.pdf> [6 กันยายน 2558]
- [17] การเก็บเกี่ยวและการแปรรูปปาล์มน้ำมัน [Online]. Available from:
<http://www.oard8.go.th/information/kpi/palm/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%206.pdf> [9 กันยายน 2558]
- [18] อยุธยา, จ.ส.ณ. การใช้กากปาล์มน้ำมันเป็นอาหารโค-กระบือ [Online]. Available from:
<http://csic.diw.go.th:82/tccdiw/ref/research/T-45.pdf> [28 ตุลาคม 2558]
- [19] กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก [Online]. Available from: www.dpim.go.th/service/download?articleid=3499&F=6509 [5 สิงหาคม 2558]
- [20] จิตการคำ, ศ. น้ำมันจากขยะพลาสติกและยางรถยนต์เก่า [Online]. Available from:
http://www.cca.chula.ac.th/lecture_series/images/stories/pdf/sufficiency02.pdf [30 ตุลาคม 2558]

- [21] ผ่องนัยเลิศ, ส. การควบคุมเตาไฟโรไลซิสเพื่อกำจัดยางรถยนต์เก่าของสหกรณ์การเกษตร
วานรนิวาส จำกัด จังหวัดสกลนคร. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อม) คณะ
พัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, 2555.
- [22] จิตการคำ, ศ. จากขยะสู่น้ำมัน : เทคโนโลยีผลิตพลังงานทางเลือกที่ดูแลสิ่งแวดล้อม.
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [23] Haruki TANI, M.S., Hiroyuki HAGA, and Kaoru FUJIMOTO. Development of
Direct Production Process of Diesel Fuel from Vegetable Oils. Journal of the
Japan Institute of Energy 90 (2011): 466-470.
- [24] Acid Derivatives: Important Reactions [Online]. Available from:
<https://www.premedhq.com/acid-derivatives-important-reactions>
- [25] Haruki TANI, M.S., Hiroyuki HAGA, and Kaoru FUJIMOTO. Development of
Direct Production Process of Diesel Fuel from Vegetable Oils [Online]. 2011.
Available from: [http://www.hibd.net/data/Selective_Catalytic_Decarboxy-
Cracking_of_Triglyceride_to_Middle_Distillate_Hydrocarbon.pdf](http://www.hibd.net/data/Selective_Catalytic_Decarboxy-Cracking_of_Triglyceride_to_Middle_Distillate_Hydrocarbon.pdf) [25 กันยายน
2558]
- [26] ไชยเวช, ป. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [27] James H. Gary, G.E.H. Catalytic Hydrocracking and Hydroprocessing. NewYork,
1994.
- [28] Schobert, H.H. The Chemistry of Hydrocarbon fuel. NewYork, 1991.
- [29] เรืองพรวิสุทธิ, ว. เคมีพื้นผิวและปฏิกิริยาเร่ง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป, 2554.
- [30] จตุพร วิชาคุณ, น.ก. การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.
- [31] กรมทรัพยากรธรณี. โดโลไมต์ [Online]. Available from: <http://www.dmr.go.th/>
- [32] ประโยชน์ของโดโลไมต์ [Online]. Available from:
http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2528_108_17.pdf [2 กันยายน 2558]
- [33] อานาจสกุลฤทธิ์, ป. การวิเคราะห์คุณภาพของโดโลไมต์เพื่อเป็นสารปรับสภาพดินเปรี้ยว
[Online]. 2544. Available from:
http://library.dmr.go.th/library/DMR_Technical_Reports/2544/1442.pdf [18
กันยายน 2558]

- [34] The Rhombohedral Lattice [Online]. Available from: http://www.saylor.org/content/watkins_flattice/11rhomb.html [28 มกราคม 2558]
- [35] Stefaniak, E., Biliński, B., Dobrowolski, R., Staszczuk, P., and Wójcik, J. The influence of preparation conditions on adsorption properties and porosity of dolomite-based sorbents. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 208(1-3) (2002): 337-345.
- [36] Ooi, Y.-S., Zakaria, R., Mohamed, A.R., and Bhatia, S. Catalytic conversion of palm oil-based fatty acid mixture to liquid fuel. Biomass and Bioenergy 27(5) (2004): 477-484.
- [37] Xu, J., Jiang, J., Sun, Y., and Chen, J. Production of hydrocarbon fuels from pyrolysis of soybean oils using a basic catalyst. Bioresource Technology 101(24) (2010): 9803-9806.
- [38] Tani, H., Hasegawa, T., Shimouchi, M., Asami, K., and Fujimoto, K. Selective catalytic decarboxy-cracking of triglyceride to middle-distillate hydrocarbon. Catalysis Today 164(1) (2011): 410-414.
- [39] จีงเจริญพาณิชย์, เ. ไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วด้วยแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [40] นาดกรณกุล, จ. ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องของน้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [41] อยุธยา, ญ.ป.ณ. ไพโรไลซิสของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวบนแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [42] อ้อยใจ, ณ. ผลของการแคลไซน์ไดโลไมต์ต่อไพโรไลซิน้ำมันพืชใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [43] จีงโชคทะกะพิศุฐ, ช. การสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชา

- วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.
- [44] Yoosuk, B., Udomsap, P., and Puttasawat, B. Hydration–dehydration technique for property and activity improvement of calcined natural dolomite in heterogeneous biodiesel production: Structural transformation aspect. *Applied Catalysis A: General* 395(1–2) (2011): 87-94.
- [45] Sasaki, K., Qiu, X., Hosomomi, Y., Moriyama, S. and Hirajima. Effect of natural dolomite calcination temperature on sorption of borate onto calcined products. 171 (2013).
- [46] ทิพย์วงศ์, น. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2553.





ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการทดลองการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาโตโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

การทดลอง	Parameter				น้ำหนักสารตั้งต้นที่หายไป (กรัม)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ (กรัม)	ผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
	A	B	C	D			
1	380	3	50	30	794.80	291.45	36.67
2	380	3	50	30	678.90	243.39	35.85
3	460	3	50	30	879.70	587.20	66.75
4	460	3	50	30	848.80	514.67	60.64
5	380	9	50	30	1415.40	585.27	41.35
6	380	9	50	30	1345.80	581.65	43.22
7	460	9	50	30	1919.50	1259.00	65.59
8	460	9	50	30	2342.00	1543.85	65.92
9	380	3	150	30	714.00	255.03	35.72
10	380	3	150	30	786.50	259.55	33.00
11	460	3	150	30	945.30	533.93	56.48
12	460	3	150	30	921.80	503.95	54.67
13	380	9	150	30	1356.80	512.60	37.78
14	380	9	150	30	1478.90	522.35	35.32
15	460	9	150	30	2659.70	1618.35	60.85
16	460	9	150	30	1988.80	1301.27	65.43
17	380	3	50	60	767.40	220.78	28.77
18	380	3	50	60	874.70	241.68	27.63

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการทดลองการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

การทดลอง	Parameter				น้ำหนักสารตั้งต้นที่หายไป (กรัม)	น้ำหนักผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ (กรัม)	ผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
	A	B	C	D			
19	460	3	50	60	888.20	487.36	54.87
20	460	3	50	60	889.40	514.67	52.81
21	380	9	50	60	1548.70	482.42	31.15
22	380	9	50	60	1443.80	427.94	29.64
23	460	9	50	60	2432.00	1525.64	62.73
24	460	9	50	60	2136.50	1295.36	60.63
25	380	3	150	60	797.70	207.00	25.95
26	380	3	150	60	764.30	212.32	27.78
27	460	3	150	60	911.90	463.06	50.78
28	460	3	150	60	965.30	506.30	52.45
29	380	9	150	60	1518.40	462.35	30.45
30	380	9	150	60	1463.20	432.45	28.94
31	460	9	150	60	2646.20	1553.31	58.71
32	460	9	150	60	2033.70	1213.31	59.66
33	420	6	100	45	889.40	381.26	42.87
34	420	6	100	45	1762.50	652.34	37.01
35	420	6	100	45	1459.30	579.20	39.69
36	420	6	100	45	1576.80	536.21	33.79
37	420	6	100	45	1639.90	670.06	40.86

ตารางที่ ก.2 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

การทดลอง	Parameter				องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	A	B	C	D	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล	กากน้ำมัน
1	380	3	50	30	3.75	13.75	66.25	16.25
2	380	3	50	30	5.63	19.37	60.00	15.00
3	460	3	50	30	15.00	20.00	59.38	5.62
4	460	3	50	30	10.00	20.00	58.75	11.25
5	380	9	50	30	18.13	21.87	58.75	1.25
6	380	9	50	30	9.38	29.37	58.00	3.25
7	460	9	50	30	13.75	16.25	57.50	12.50
8	460	9	50	30	12.50	17.50	55.00	15.00
9	380	3	150	30	3.13	10.63	60.00	26.24
10	380	3	150	30	3.18	10.00	59.00	27.82
11	460	3	150	30	13.75	19.38	59.38	7.49
12	460	3	150	30	18.75	21.25	56.25	3.75
13	380	9	150	30	18.75	26.25	52.50	2.50
14	380	9	150	30	21.25	23.75	50.00	5.00
15	460	9	150	30	11.56	20.13	47.50	20.81
16	460	9	150	30	9.46	21.87	47.50	21.17
17	380	3	50	60	3.75	14.38	73.13	8.74
18	380	3	50	60	5.00	16.31	75.57	3.12
19	460	3	50	60	5.00	16.88	68.12	10.00
20	460	3	50	60	5.63	18.12	67.50	8.75
21	380	9	50	60	3.75	14.38	72.50	9.37
22	380	9	50	60	5.00	18.75	71.25	5.00

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

การทดลอง	Parameter				องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	A	B	C	D	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล	กากน้ำมัน
23	460	9	50	60	17.49	13.19	66.25	3.07
24	460	9	50	60	17.50	13.17	66.00	3.33
25	380	3	150	60	4.37	14.38	71.25	10.00
26	380	3	150	60	3.75	13.75	70.00	12.50
27	460	3	150	60	6.88	21.88	66.25	4.99
28	460	3	150	60	14.38	20.62	60.63	4.37
29	380	9	150	60	7.65	15.25	61.88	15.22
30	380	9	150	60	8.57	16.62	61.25	13.56
31	460	9	150	60	13.75	21.25	61.25	3.75
32	460	9	150	60	13.75	21.13	58.25	6.87
33	420	6	100	45	10.00	35.63	49.38	4.99
34	420	6	100	45	10.00	35.63	48.75	5.62
35	420	6	100	45	10.00	36.88	49.13	3.99
36	420	6	100	45	10.00	35.63	50.62	3.75
37	420	6	100	45	9.38	36.27	48.73	5.62

ภาคผนวก ข.

การออกแบบการทดลองเชิงตัวประกอบแบบสองระดับ

และการใช้โปรแกรม Design Expert

การออกแบบการทดลองเชิงตัวประกอบแบบสองระดับ

การออกแบบเชิงตัวประกอบแบบสองระดับ นิยมใช้ในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งต้องการที่จะศึกษาผลรวมที่มีต่อผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วยสองระดับ แต่ละระดับเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรือเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และในสองระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ใน 1 เวกเตอร์ที่ปริมาตรสำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่าการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงแรกเมื่อมีปัจจัยหลายปัจจัยที่ต้องการจะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้ทำให้เกิดการทดลองลดจำนวนลงเพื่อที่สามารถศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ ดังนั้น จึงไม่น่าแปลกใจเลยที่การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้ลดน้อยลง เนื่องจากแต่ละปัจจัยของการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล ประกอบด้วย 2 ระดับ ผลตอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง ซึ่งสมมติฐานสามารถยอมรับได้สำหรับการทดลองเพื่อใช้ปัจจัยทำการศึกษาระบบ

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ ชนิดแรกคือการออกแบบที่ประกอบด้วย 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^2 ระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่ที่ “ต่ำ” และ “สูง” การทดลองรวมปัจจัยสำหรับการออกแบบสามารถแสดงผลของปัจจัยด้วยตัวอักษรลาตินตัวใหญ่ ดังนั้น A จะแทนผลของปัจจัย A, B แทนผลของปัจจัย B และ AB แทนอันตรกิริยาของปัจจัย AB ในการออกแบบ 2^2 ระดับต่ำและสูงจะแทนด้วยเครื่องหมาย + และ - บนแกน A และ B ตามดับ

การทดลองรวมปัจจัยทั้ง ปัจจัย สำหรับการออกแบบจะแทนด้วยตัวอักษรเล็ก จะเห็นได้ว่า 4 สำหรับระดับสูงของปัจจัยใดๆจะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็กของปัจจัยนั้น ในการทดลองรวมปัจจัยที่

เกิดขึ้น สำหรับระดับต่ำจะไม่ปรากฏตัวอักษรใดๆ ในการทดลองร่วมปัจจัย ดังนั้น สำหรับการออกแบบ 2^k ในที่นี้ a จะแทนการทดลองร่วมปัจจัยของปัจจัย A ที่ระดับสูงและ B ที่ระดับต่ำ, b แทน A ที่ระดับต่ำและ B ที่ระดับสูง ab แทนทั้ง ปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับสูง และ (1)แทนทั้ง ปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับต่ำ

สมการในการคำนวณ

Contrast เท่ากับผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment คูณกับสัมประสิทธิ์ (-1 หรือ +1) ของตัวแปรหรือปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

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

$$\text{Sum of Squares}_{AB\dots K} : SS_{AB\dots K} = 2 (\text{Contrast}_{AB\dots K})^2$$

$$\begin{aligned} \text{Total of sum of squares} : SS_T \\ = \frac{\sum_{i=1} \sum_{j=1} \sum_{k=1} y_{ijk}^2 - y^2 \dots}{N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mean of Square Error} : SSE \\ = SST - \text{sum Squares of Main Effect} \end{aligned}$$

$$\text{Mean of Square} : MS = \frac{\text{Sum of Square}}{\text{Degree of Freedom}}$$

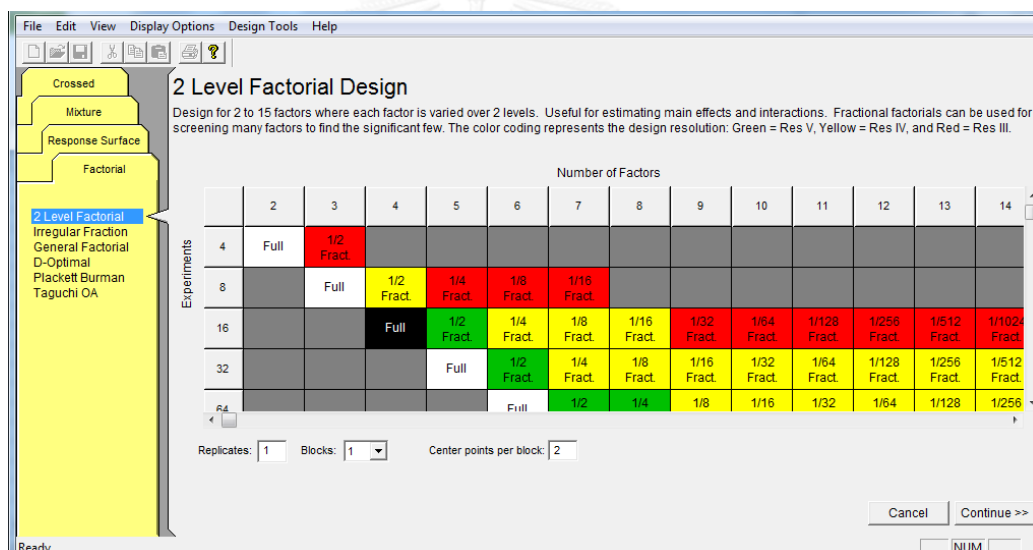
$$\begin{aligned} \% \text{ Normal probability} \\ = \frac{(\text{Cumulative frequency} - 0.5) \times 100}{\text{Total cumulative frequency}} \end{aligned}$$

$$F_0 = \frac{\text{Mean Square of Effect}}{\text{Mean Square of error}}$$

การใช้โปรแกรม Design Expert

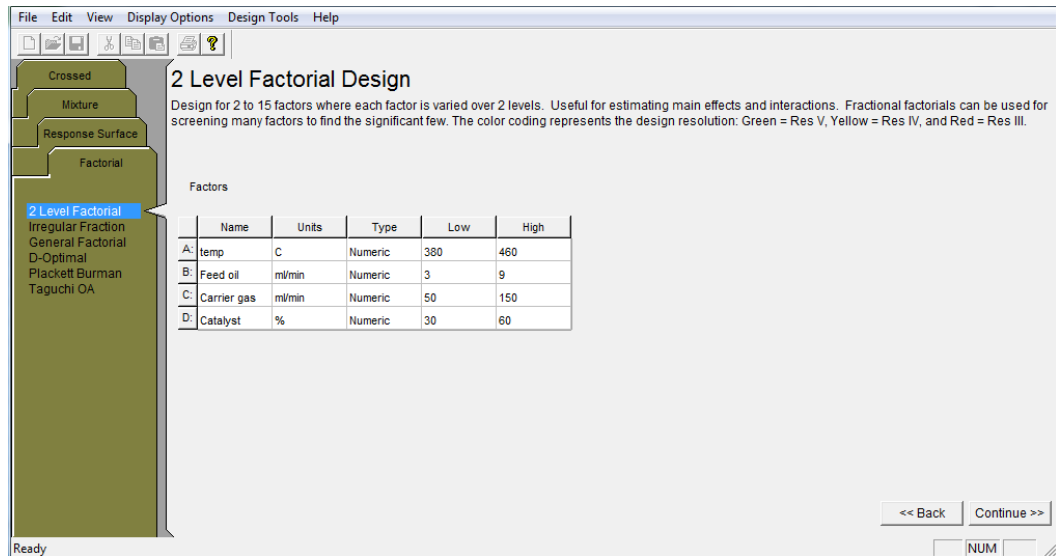
ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Design Expert รุ่น 7.0.0 โดยมีขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง จนถึงวิธีการคำนวณ ดังต่อไปนี้

1. วิธีการเลือกแบบจำลอง และการกำหนดตัวแปรเพื่อทำการออกแบบการทดลอง โดยการเข้าสู่โปรแกรม คลิกไปที่ file เลือก New Design แสดงดังภาพที่ ข.1 เลือกแบบจำลองตามตัวแปรที่ต้องการศึกษา ในที่นี้ ต้องการศึกษา 4 ตัวแปร ดังนั้นจึงเลือกแบบจำลองแบบ 2^4



ภาพที่ ข.1 แสดงตารางของ 2 Level Factorial Design

2. เลือกแบบจำลองตามตัวแปรที่ต้องการศึกษาแล้ว จะแสดงหน้าต่างดังภาพที่ ค.2 ให้ใส่ข้อมูลดังต่อไปนี้



ภาพที่ ข.2 การกำหนดตัวแปร

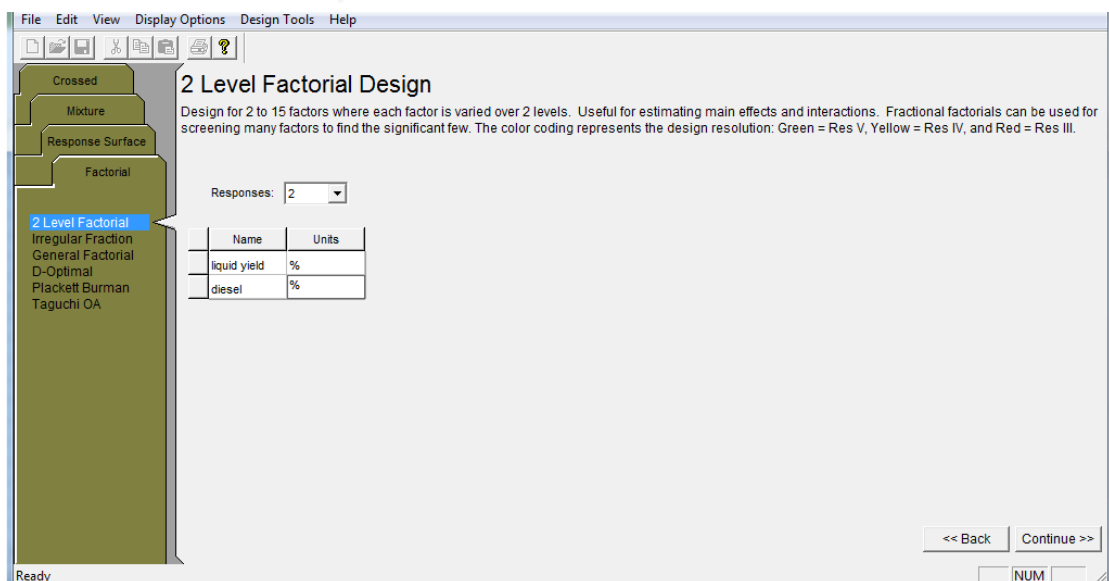
ที่ช่อง Name ให้ใส่ชื่อตัวแปร

ที่ช่อง Units ให้ใส่หน่วยของตัวแปร

ที่ช่อง Low ให้ใส่ค่าต่ำของตัวแปร

ที่ช่อง High ให้ใส่ค่าสูงของตัวแปร

จากนั้นกด Continue แสดงหน้าต่างดังภาพที่ ค.3 ทำการเลือกจำนวนตัวแปรตอบสนอง (response) และใส่ชื่อพร้อมทั้งหน่วยของตัวแปรตอบสนอง แล้วกด Continue



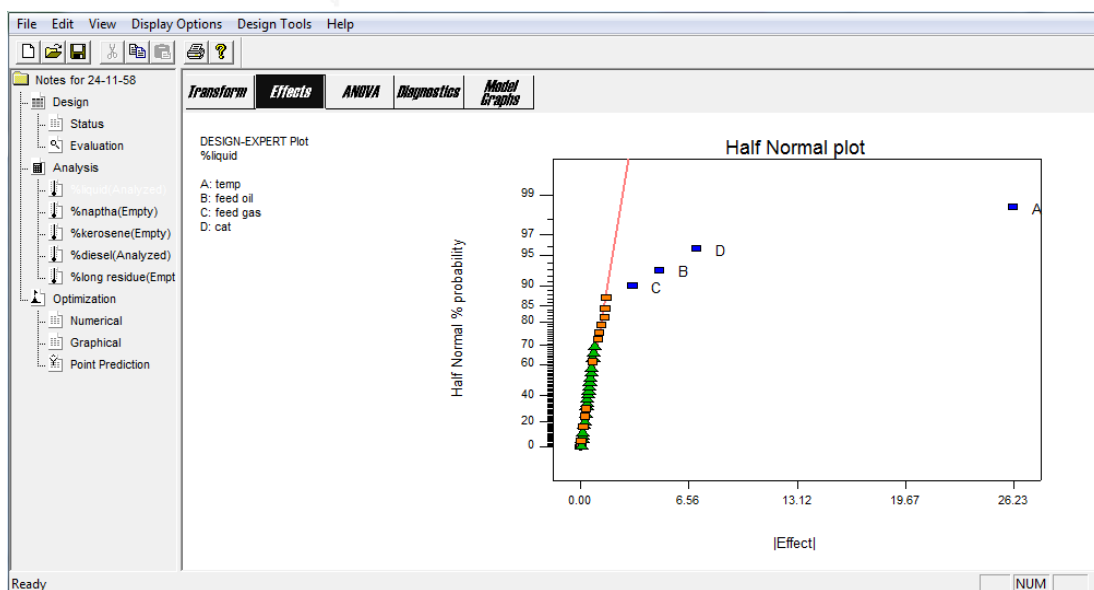
ภาพที่ ข.3 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง

3. โปรแกรมจะแสดงตาราง ดังที่แสดงภาพที่ ค.4 ซึ่งประกอบไปด้วยลำดับการทดลอง ค่าของตัวแปรในแต่ละการทดลองและช่องว่างเพื่อกำหนดค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทดลอง เมื่อทำการทดลองครบทุกการทดลองและกำหนดค่าของตัวแปรตอบสนองเรียบร้อยแล้ว ต่อไปจะทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง

Std	Run	Block	Factor 1 A: temp C	Factor 2 B: Feed oil ml/min	Factor 3 C: Carrier gas ml/min	Factor 4 D: Catalyst %	Response 1 liquid yield %	Response 2 diesel %
21	1	Block 1	380.00	9.00	50.00	60.00		
26	2	Block 1	380.00	3.00	150.00	60.00		
15	3	Block 1	460.00	9.00	150.00	30.00		
31	4	Block 1	460.00	9.00	150.00	60.00		
19	5	Block 1	460.00	3.00	50.00	60.00		
6	6	Block 1	380.00	9.00	50.00	30.00		
2	7	Block 1	380.00	3.00	50.00	30.00		
11	8	Block 1	460.00	3.00	150.00	30.00		
10	9	Block 1	380.00	3.00	150.00	30.00		
1	10	Block 1	380.00	3.00	50.00	30.00		
20	11	Block 1	460.00	3.00	50.00	60.00		
28	12	Block 1	460.00	3.00	150.00	60.00		
24	13	Block 1	460.00	9.00	50.00	60.00		
18	14	Block 1	380.00	3.00	50.00	60.00		
5	15	Block 1	380.00	9.00	50.00	30.00		
32	16	Block 1	460.00	9.00	150.00	60.00		
12	17	Block 1	460.00	3.00	150.00	30.00		
14	18	Block 1	380.00	9.00	150.00	30.00		

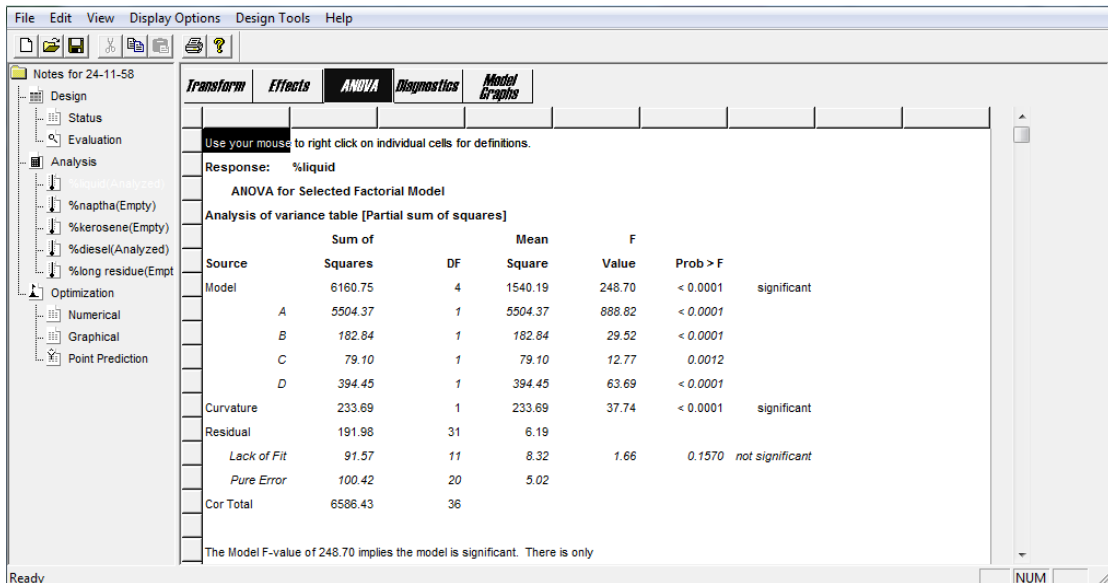
ภาพที่ ข.4 จำนวนการทดลองและค่าของตัวแปรแต่ละการทดลอง

4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง เริ่มจากเลือกตัวแปรตอบสนองที่ต้องการวิเคราะห์ที่แถบทางด้านซ้ายมือ และกด Effects ดังภาพที่ ค.5 ทำการเลือกจุดที่มีแนวโน้มออกจากเส้นตรง



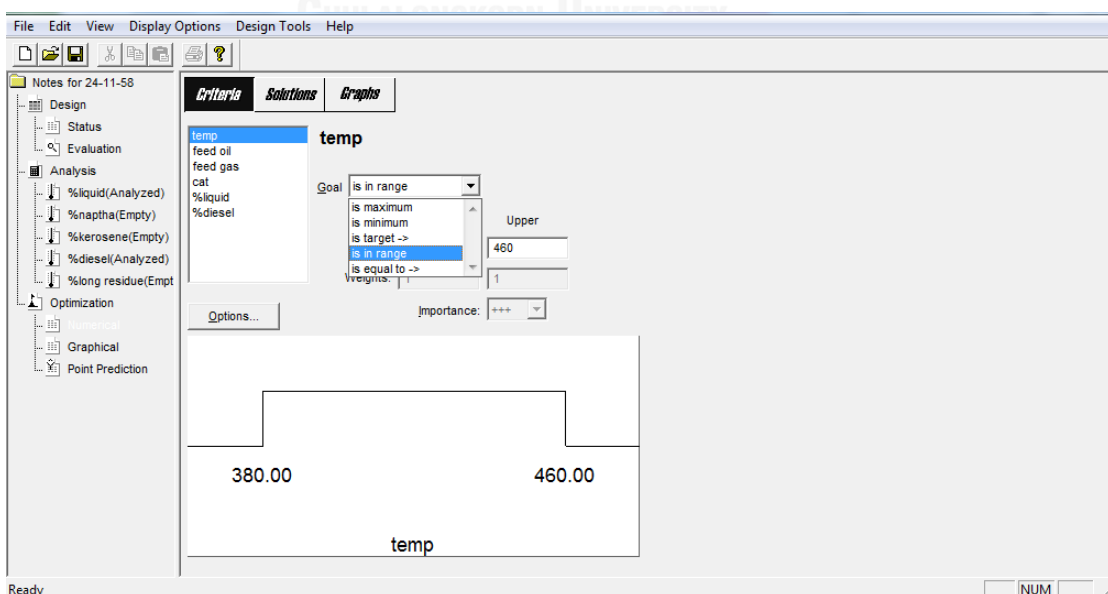
ภาพที่ ข.5 Half normal plot

5. กต ANOVA จะแสดงตาราง ดังรูปที่ ค.6 ซึ่งแสดงตาราง ANOVA ที่วิเคราะห์ได้ ทำการอ่านค่า และวิเคราะห์ผล



ภาพที่ ข.6 ANOVA ของการวิเคราะห์ตัวแปร

1. เมื่อทำการวิเคราะห์ครบทุกตัวแปรตอบสนองแล้ว จะทำการหาภาวะที่เหมาะสม โดยเลือก Numerical ด้านล่างคำว่า Optimization ตรงแถบด้านซ้ายมือ ดังที่แสดงภาพที่ ค.7 ทำการกำหนดค่าของตัวแปรตอบสนองที่ต้องการ เช่น เลือกให้มีค่าสูงสุด (maximum) จากนั้นกด Solution จะแสดงตารางที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาภาวะที่เหมาะสม ดังภาพที่ ค.8



ภาพที่ ข.7 การกำหนดตัวแปรตอบสนองที่ต้องการหาภาวะที่เหมาะสม

File Edit View Display Options Design Tools Help

Notes for 24-11-58

Design

Status

Evaluation

Analysis

%liquid(Analyzed)

%naptha(Empty)

%kerosene(Empty)

%diesel(Analyzed)

Solutions Tool

Report

Ramps

Histogram

Empt

Criteria Solutions Graphs

Solutions 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Constraints						
Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
temp	is in range	380	460	1	1	3
feed oil	is in range	3	9	1	1	3
feed gas	is in range	50	150	1	1	3
cat	is in range	30	60	1	1	3
%liquid	maximize	25.95	66.75	1	1	3
%diesel	maximize	47.5	75.57	1	1	3

Solutions							
Number	temp	feed oil	feed gas	cat	%liquid	%diesel	Desirability
1	460.00	8.42	50.00	60.00	59.3004	66.2688	0.739 Selected
2	459.94	7.75	50.00	60.00	58.7441	66.4636	0.737
3	459.91	6.99	50.00	60.00	58.1357	66.6786	0.734
4	460.00	6.93	50.00	60.00	58.1158	66.6892	0.734
5	460.00	6.55	50.04	60.00	57.8049	66.7974	0.733

Ready

NUM

ภาพที่ ข.8 การคำนวณภาวะที่เหมาะสม

ภาคผนวก ค.

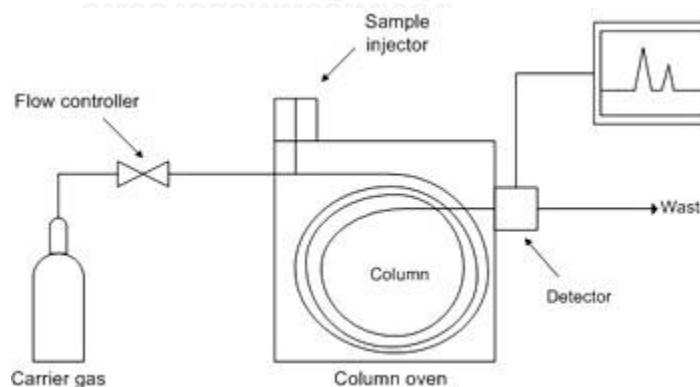
การหาค่าประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว

แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC)

แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคของการแยกทางโครมาโทกราฟี ซึ่งนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ทั้งในวงการอุตสาหกรรม การศึกษา การวิจัย เนื่องจากมีความสามารถแยกและวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีองค์ประกอบที่มีความซับซ้อนได้ มีความเฉพาะเจาะจงและความไวสูงและยังให้ผลที่เที่ยงตรงและรวดเร็ว การวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การใช้เฟสอยู่กับที่เป็นของแข็ง เรียกว่า “gas-solid chromatography” (GSC) และ การใช้เฟสอยู่กับที่เป็นของเหลว เรียกว่า “gas-liquid chromatography” (GLC) โดยเทคนิคของ GLC เป็นที่นิยมมากกว่า GSC

สารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ ดังนั้นวิธีการของ แก๊สโครมาโทกราฟีจึงไม่ใช่เทคนิคสำหรับการวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ เพราะสารประกอบอินทรีย์ไม่สามารถกลายเป็นไอได้ในที่ทำการทดลอง

เมื่อสารตัวอย่างถูกทำให้กลายเป็นไอที่ inlet แล้วจะถูกพาเข้าไปยังคอลัมน์ด้วยแก๊สตัวพา ซึ่งเป็นแก๊สเฉื่อย ใช้หลักการแยก “likes dissolve likes” วิธีแก๊สโครมาโทกราฟีสามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ การวิเคราะห์ทางคุณภาพสามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวอย่างได้จากการเทียบค่ารีเทนชันไทม์ (retention time) ส่วนประกอบมี ดังนี้



ภาพที่ ค.1 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

1. แก๊สที่ใช้ทำงานกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ มี 3 ชนิด คือ
 - 1.1 แก๊สเฉื่อย ได้แก่ ฮีเลียม อาร์กอน หรือไนโตรเจน ซึ่งใช้เป็นแก๊สพา (Carrier Gases) เพื่อ จะใช้พาไอของแก๊สตัวอย่างเข้าคอลัมน์

1.2 แก๊สไฮโดรเจนเพื่อใช้ใน Flame Ionization Detector (FID)

1.3 อากาศ เพื่อใช้ผสมกับไฮโดรเจนใน FID

2. Gas Traps และ Filters เป็นส่วนช่วยทำให้ระบบของแก๊สที่จะใช้งานสะอาดและบริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็น Cartridge คือ

2.1 Molecular Sieve Trap ใช้ดูดความชื้น

2.2 Oxygen Trap เป็นที่จับแก๊สออกซิเจน

2.3 Hydrocarbon Filter ใช้จับแก๊สไฮโดรคาร์บอนและไอของน้ำมันสำหรับ แก๊สตัวพาควรจะต้องผ่าน Filter อากาศควรจะต้องผ่าน Charcoal Filter

3. ตัวควบคุมอัตราการไหล (Flow Regulator) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สตัวพา

4. ส่วนที่ฉีดสารเข้าคอลัมน์ (Injection Port) ทำหน้าที่ฉีดสารเข้าคอลัมน์และให้ความร้อนให้สารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นเฟสไอ

5. คอลัมน์ (Column) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแยกสารซึ่งสำคัญที่สุด นิยมใช้คอลัมน์ที่ทำจากทองแดง นิกเกิล หรือเหล็กกล้าไร้สนิม อาจอยู่ในรูป U Tube ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 1-2 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง (Inner Diameter) 3-6 มม. นอกจากนี้ยังมีคอลัมน์ชนิดขนาดเล็ก (Capillary Column) ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มม. แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

5.1 Wall-Coated Open Tubular (WCOT) คอลัมน์ที่มีเฟสหยุดนิ่งเป็นของเหลวเคลือบเป็นฟิล์ม บางๆ (0.1-1 ไมครอน) อยู่ที่ผนังด้านใน ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 10-100 เมตร

5.2 Support Coated Open Tubular (SCOT) คอลัมน์ที่มีตัวรองรับ หรือเมทริกซ์บรรจุอยู่ภายใน ความยาวของคอลัมน์ ประมาณ 10-100 เมตร

5.3 Micropacked Column คอลัมน์ขนาดเล็ก มีความยาวประมาณ 0.7-1.0 เมตร

6. Flame Ionization Detector (FID) สารที่ผ่านจากคอลัมน์จะถูกเผาโดยเปลวไฟ (Flame) ทำให้แตกตัวเป็นไอออน ภายในตัวตรวจวัดมี ขั้ว ไฟฟ้า (Electrode) ที่จะจับกับไอออนซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น

การพิจารณาว่าควรเลือกใช้ดีเทคเตอร์ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารและความไวของดีเทคเตอร์ ดีเทคเตอร์แต่ละชนิดเหมาะสมสำหรับวิเคราะห์สารแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน ต้องเลือกใช้ให้ตรงตามความสามารถของมัน อย่างไรก็ตามเราสามารถสรุปได้ว่า ดีเทคเตอร์ที่ดีต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ

1. เสียงรบกวนที่เกิดขึ้นควรมีน้อยมาก (Low noise level)
2. มีความไวสูง (High sensitivity) และควรไวต่อไอของสารทุกชนิด
3. มีความรู้สึกต่อสารอย่างรวดเร็ว แม่นว่ามีปริมาณน้อย (Rapid response) ในการอีลูทสารออกจากคอลัมน์ สารที่ออกจากคอลัมน์จะค่อยๆ ออกมาทีละน้อยจนถึงมาก แล้วลดน้อยลงอีกทำให้เกิดเป็นพีค ดังนั้นดีเทคเตอร์ต้องรู้สึกหรือติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารได้ดี จึงจะทำให้เกิดพีคและการแยกขึ้นได้
4. ผลที่ได้จากเครื่องดีเทคเตอร์จะต้องเหมือนกันทุกครั้งเมื่อใช้สารตัวอย่างชนิดเดียวกัน (high reproducibility)
5. ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงความดันของก๊าซตัวพา หรืออุณหภูมิ และไม่เกิดปฏิกิริยาต่อก๊าซตัวพา
6. ไม่ทำลายหรือเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งมีความสำคัญมาก ถ้าต้องการเก็บสารที่แยกได้นี้ไปทำการวิเคราะห์ต่อไป
7. ราคาถูก

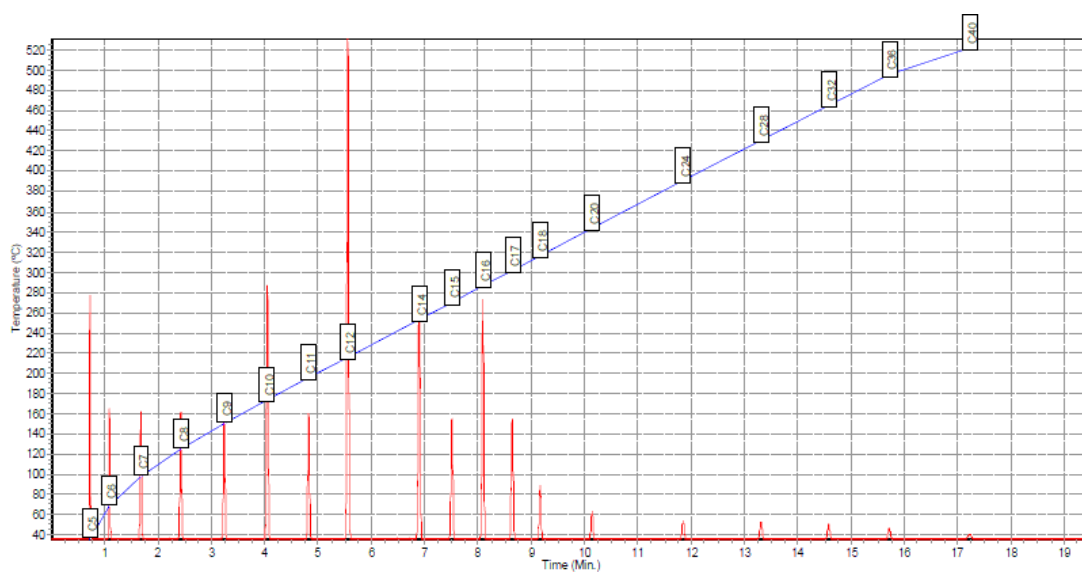
ยังไม่มีดีเทคเตอร์ชนิดใดที่มีคุณสมบัติครบถ้วนทุกข้อความที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นการเลือกใช้ควรพิจารณาดีเทคเตอร์ที่มีคุณสมบัติที่ดีที่มากที่สุด ซึ่งนิยมใช้กัน 2 ชนิด คือ TCD และ FID

ข้อควรระวังในการใช้งานเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

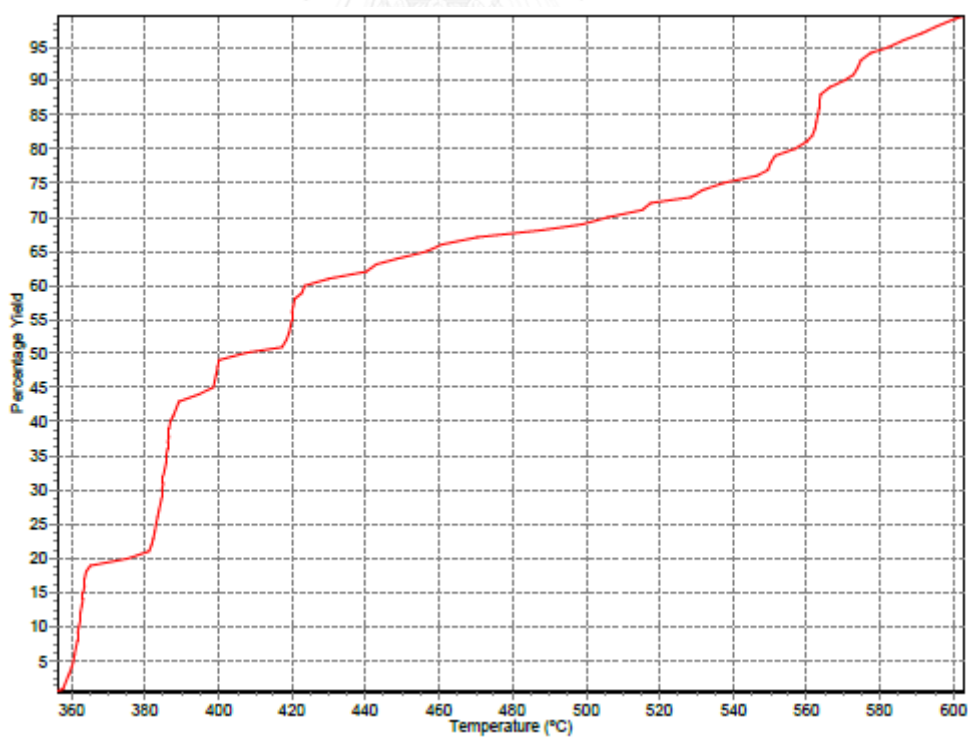
1. ตรวจสอบระบบการต่อท่อแก๊สทั้งแก๊สพาและแก๊สที่ใช้กับเครื่องตรวจวัดให้ถูกต้อง
2. อย่าปล่อยให้ Septum รั่วเพราะจะทำให้เครื่องไม่พร้อมใช้งาน
3. ตั้งอุณหภูมิของ Inlet, Detector ให้เหมาะสมกับคอลัมน์ที่ใช้
4. เลือกคอลัมน์ให้เหมาะสมกับชนิดสารตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์
5. การฉีดสารตัวอย่างควรแทงเข็มลง และขึ้นให้ตรง และระวังอย่าให้เข็มที่ใช้ฉีดหักงอ
6. ควรรออุณหภูมิให้ต่ำกว่า 60 องศาจึงทำการปิดเครื่องได้

กราฟแสดงการกระจายตัวตามจุดเดือด

โครมาโทแกรมที่ได้จากการกลั่นแยกสารด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีจะเปลี่ยนเป็นกราฟกระจายตัวตามคาบจุดเดือด (Boiling Point Distribution Plot) ด้วยโปรแกรมจำลองการกลั่นเทียบกับโครมาโทแกรมของสารมาตรฐานตาม ASTM D2887 และโครมาโทแกรม ดังแสดงในรูปที่ ฉ.1 และ ฉ.2



ภาพที่ ค.2 โครมาโทแกรมจากการแยกองค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของเชื้อเพลิงเหลวจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



ภาพที่ ค.3 แผนภูมิจำลองการกลั่น

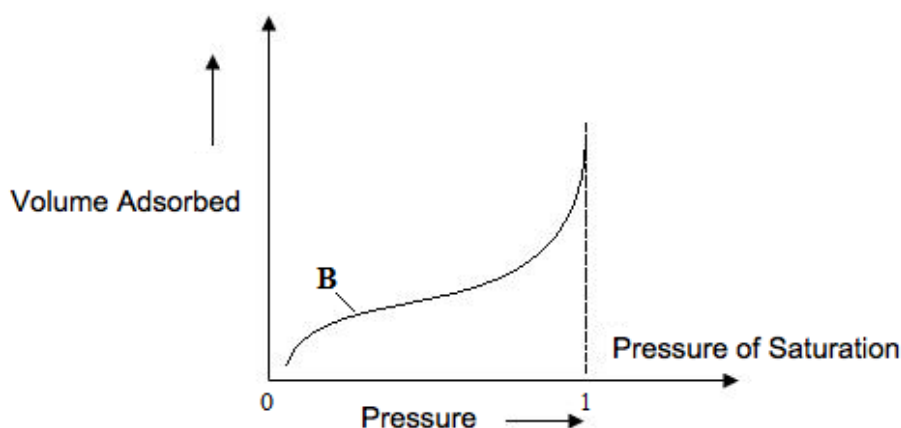
ภาคผนวก ง.

การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งทางกายภาพและเคมี เป็นสิ่งสำคัญในการอธิบายการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะช่วยในการออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมตามความต้องการ จะทำให้เข้าใจเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนนำไปใช้งาน

1. การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน โดยใช้วิธีบีอีที (BET)

การวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน เป็นขั้นตอนหนึ่งของการศึกษาการเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากพื้นที่ผิวจะเป็นบริเวณที่ใช้วางองค์ประกอบกัมมันต์ที่จะใช้ในการช่วยเกิดปฏิกิริยา การวัดพื้นที่ผิวภายในของวัสดุที่มีความพรุนทำได้โดยการศึกษาการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สที่มีขนาดเล็ก เช่น อาร์กอน โดยใช้ประโยชน์จาก ไอโซเทิร์มของการดูดซับทางกายภาพ หรือวิธีบีอีที (BET ย่อมาจาก Brunauer-Emmett-Teller Method) ที่อุณหภูมิของแก๊สเหลว ซึ่งขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ โดยจะหาจำนวนโมเลกุลที่ใช้เพื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวภายในได้ การดูดซับของแก๊สไนโตรเจน ดังแสดงในภาพที่ ง.1 จะเกิดขึ้นเร็วในช่วงแรกโดยจะเพิ่มตามความดัน จนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนแปลง (ตำแหน่ง B) ซึ่งเส้นกราฟจะราบ แสดงถึงปรากฏการณ์ที่การดูดซับบนพื้นผิวเป็นแบบชั้นเดียว และเมื่อความดันย่อยของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจนเกินจุดที่เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว จะเกิดการควบแน่นของไนโตรเจนเหลวในรูพรุนทำให้ปริมาตรของการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



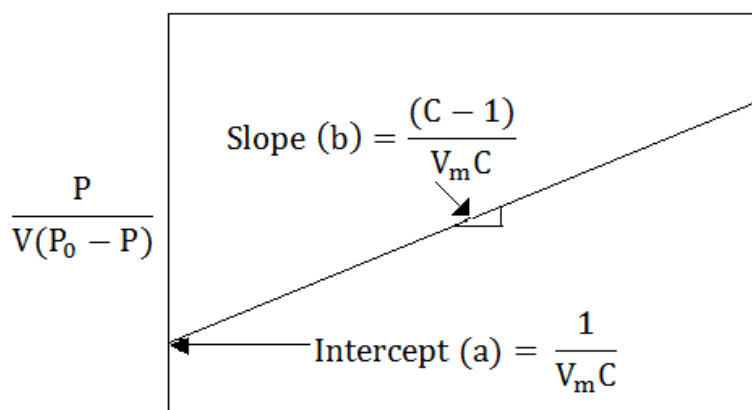
ภาพที่ ง.1 กราฟการวัดพื้นที่ผิวด้วยวิธีบีอีที

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดันย่อยต่าง ๆ และปริมาตรที่ถูกดูดซับแล้วเกิดเป็นการดูดซับชั้นเดียว คือ สมการของบีอีที เป็นไปตามสมการที่ ง.1

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \quad \text{สมการที่ ง.1}$$

เมื่อ P คือ ความดันย่อยของก๊าซที่ถูกดูดซับ, P_0 คือ ความดันไออิ่มตัวของก๊าซที่ถูกดูดซับ ณ อุณหภูมิที่ศึกษา, V คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน P , V_m คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ทำให้เกิดเป็นการปกคลุมชั้นเดียว และ C คือ ค่าคงที่

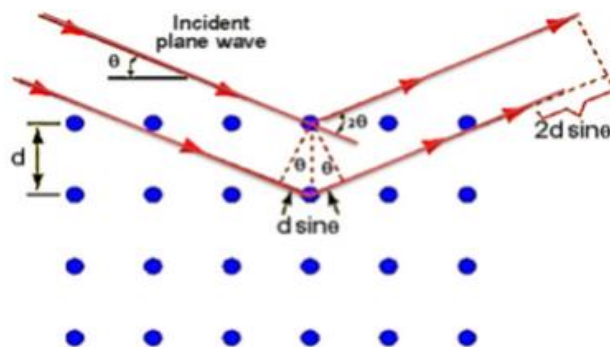
สมการที่ ง.1 นี้เขียนในรูปของกราฟเส้นตรง $y = a + bx$ เมื่อ x เป็น P/P_0 , y เป็น $P/V(P_0 - P)$, a คือจุดตัดแกน y เป็น $1/V_m C$ และ b คือความชัน เป็น $(C-1)/V_m C$ แสดงในภาพที่ ง.2



ภาพที่ ง.2 กราฟเส้นตรงของสมการบีอีที

2. การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกของแข็งในระดับอะตอม ซึ่งสามารถวิเคราะห์ชนิดของวัสดุได้เนื่องจากการเกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จะให้สเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ สามารถบอกวิญภาคเชิงผลึกของวัสดุได้ว่ามีความเป็นผลึกหรือเป็นอสัณฐาน เป็นเทคนิค powder X-ray diffraction การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์เพราะสามารถบอกชนิดของสารที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งวิญภาคของวัสดุได้ ขนาดความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ อยู่ในช่วงเดียวกับระยะห่างระหว่างอะตอมในผลึกของของแข็ง ซึ่งทำให้รังสีเอกซ์สามารถเกิดการเลี้ยวเบนได้ แสดงในภาพที่ ง.3



ภาพที่ ง.3 ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ กับระยะห่างระหว่างระนาบผลึกและมุมตกกระทบสามารถเขียนได้ดังสมการที่ ง.2 เรียกสมการนี้ว่า Bragg's Equation

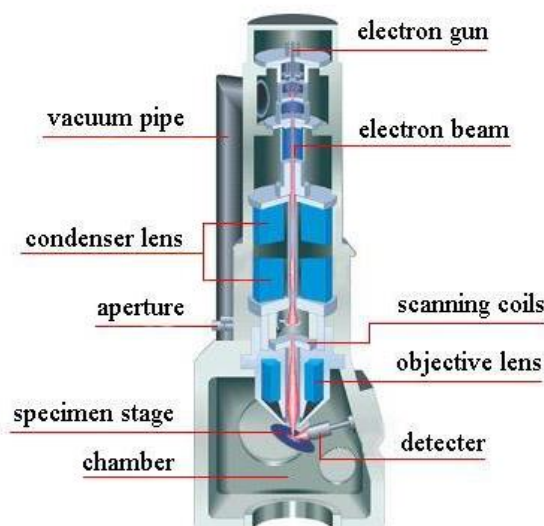
$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad \text{สมการที่ ง.2}$$

เมื่อ n คือ จำนวนเต็ม เรียกว่า อันดับของการสะท้อน (Order of reflection) λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีที่ใช้ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก θ คือมุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบของผลึก ถ้าเราสามารถวัดมุม 2θ ซึ่งเป็นมุมระหว่างรังสีที่เกิดการแทรกสอดกับรังสีตกกระทบ เราจะสามารถหาค่า d ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิดได้

3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

ภาพที่ ง.4 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยหลักการทำงานเริ่มจากอิเล็กตรอนจะถูกสร้างจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบปืนอิเล็กตรอน (electron gun) จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสให้เข้มข้นและเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงโดยเลนส์รวมแสง (condenser lens) ทำให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดและความเข้มเหมาะสมกับตัวอย่าง เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดที่สุดที่กำลังขยายที่ต้องการ จากนั้นจะถูกโฟกัสให้ตกลงบนผิวตัวอย่าง โดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ซึ่งอิเล็กตรอนที่ตกลงบนผิวตัวอย่างเป็นจุดที่เล็กมาก ขดลวดสำหรับการส่องกราด (scanning coil) จะควบคุมการกวาดของลำอิเล็กตรอนให้กวาดจากซ้ายไปขวา บังคับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนในแนวนอนและแกนตั้งบนระนาบของตัวอย่างที่เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่ผิวตัวอย่างที่อิเล็กตรอนตกใส่ จะเกิดสัญญาณอิเล็กตรอนขึ้นหลายรูปแบบซึ่งคล้ายกับการที่แสงตกกระทบวัตถุ และสะท้อนออกจากผิววัตถุ ถ้าผิวตัวอย่างเรียบก็จะให้สัญญาณสะท้อนอิเล็กตรอนได้ดี แต่ถ้าผิวตัวอย่างเป็นหลุมลึกก็จะไม่ให้สัญญาณหรือให้ได้น้อย สามารถรับสัญญาณได้โดยใช้ตัวตรวจวัด

อิเล็กทรอนิกส์ (detector) ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณภาพ โดยจะเก็บสัญญาณภาพแต่ละจุดจากปลายอิเล็กทรอนิกส์ ปรากฏเป็นภาพบนจอภาพ



ภาพที่ ง.4 แผนภาพองค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

อุปกรณ์เสริมของเครื่อง SEM ได้แก่ เครื่องวิเคราะห์ธาตุซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Electron microprobe analysis (EMA) หรือ Electron probe microanalysis (EPMA) หรือ Energy dispersive analysis of X-rays (EDAX หรือ EDX) และแบบ Wavelength dispersive analysis of X-rays (WDX) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ในเชิงคุณภาพ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของสารตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์พลังงานของ Characteristic X-ray ที่เกิดขึ้น เนื่องจากค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะของแต่ละธาตุ อุปกรณ์เสริมแบบ EDX สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่า 11 ได้ ส่วนอุปกรณ์เสริมแบบ WDS สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่า 4 ได้ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ ซึ่งเป็นการวัดปริมาณของธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างซึ่งต้องเทียบกับสารมาตรฐาน สำหรับการวิเคราะห์ธาตุต้องเคลือบตัวอย่างด้วยคาร์บอน เนื่องจากเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นตัวอย่างที่นำไฟฟ้าได้ ต้องทำให้แห้งด้วยการอบเพื่อไล่ความชื้น หากตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าต้องนำมาเคลือบเพื่อให้นำไฟฟ้า โดยมักใช้ทองเป็นโลหะเคลือบ การเคลือบจะช่วยลดการสะสมของประจุและเพิ่มปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิเมื่อเคลือบด้วยโลหะ

ที่ปลดปล่อยอิเล็กทรอนิกส์ทุกชนิดได้ดี ตัวอย่างที่เคลือบแล้วจะนำเข้าสู่ตัวเครื่องและดูอากาศออก
ก่อนที่จะเคลื่อนที่เข้าไปบนที่วางตัวอย่างซึ่งเป็นตำแหน่งที่ยังอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพสธร ชุนโอษฐ์ เกิดเมื่อวันที่ 2 มิถุนายน 2529 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนเทศบาล 4 (เพาะชำ) ชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสุนารีวิทยา 2 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เข้าศึกษาต่อในระดับวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต หลักสูตรปิโตรเคมี และวิทยาศาสตรฟอติเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2558 ได้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการ The 25th Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference (TICHE2015) พัทยา โดยนำเสนอผลงานวิจัยในรูปแบบปากเปล่า และได้รับการตีพิมพ์งานวิจัยลงในบทความวิจัยของงานประชุมวิชาการในครั้งนี้ด้วย

