

ผลของการแคลไซน์โดโลไมต์ต่อไฟโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว



นางสาวฉัตรिता อ้อยใจ

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 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF DOLOMITE CALCINATION ON USED VEGETABLE OIL PYROLYSIS

Miss Chatthita Oichai



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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการแคลเซโนโดโลไมต์ต่อไฟโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว
โดย	นางสาวฉัตติดา อ้อยใจ
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวนศิริ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ ตั้งพสุธาตล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ)

ฉัตรทิศา อ้อยใจ : ผลของการแคลไซน์โดโลไมต์ต่อไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว (EFFECTS OF DOLOMITE CALCINATION ON USED VEGETABLE OIL PYROLYSIS) อ.ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.
ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ, 104 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ด้วยวิธีทางความร้อนเพื่อใช้ในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กแบบแบตช์ขนาด 70 มิลลิลิตร โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงตัวประกอบแบบแฟกทอเรียลสองระดับในการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน องค์ประกอบของน้ำมัน และค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ และใช้วิธีพื้นผิวการตอบสนองในการหาภาวะที่เหมาะสมที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุด โดยมีองค์ประกอบของแนฟตามากที่สุด กากน้ำมันน้อยที่สุด และมีค่าความเป็นกรดต่ำที่สุด

ผลการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดคือตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่เตรียมได้จากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีองค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์และมีพื้นที่ผิวมากที่สุด สำหรับภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ คือ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลา 60 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2.50 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชใช้แล้ว ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 55.01 โดยน้ำหนัก มีองค์ประกอบตามจุดเดือดเป็นแนฟทาร้อยละ 42.00 กากน้ำมันร้อยละ 8.00 และเมื่อทดสอบค่าความเป็นกรดพบว่ามีค่าความเป็นกรด 0.50 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม น้ำมัน

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2557 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5572401723 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: PYROLYSIS / USED VEGETABLE OIL / DOLOMITE

CHATTHITA OICHAJ: EFFECTS OF DOLOMITE CALCINATION ON USED VEGETABLE OIL PYROLYSIS. ADVISOR: PROF. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. PRASERT REUBROYCHAROEN, Ph.D., 104 pp.

The purpose of this study is to prepare a catalyst from natural dolomite via thermal treating for pyrolysis of used vegetable oil in a batch micro reactor of 70 ml. The two level factorial experimental design was performed to investigate the factor which has an effect on liquid yield, naphtha fraction in liquid product and acid value of liquid product. The response surface methodology was used to define the optimum condition as well as the highest yield of naphtha, the lowest yield of long residue and small amount of acidity.

The result show that the dolomite catalyst prepared from calcined dolomite at 800°C for 2 hours represents the lowest calcination temperature and the lowest calcination time to decomposition dolomite to MgO and CaO, and the dolomite catalyst in this condition gave the highest surface area that is suitable for use as catalyst on used vegetable oil pyrolysis. The optimum mathematical simulation shown that the condition reaction temperature of 450°C, initial hydrogen pressure of 1 bar, time of reaction at 60 minute and 2.50 %wt of dolomite catalyst gave 55.01 %wt of liquid yield, 42.00 % of naphtha and 8.00 % of long residue in liquid product and 0.50 mg KOH/g of acidity.

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Academic Year: 2014

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวศิริ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ ตั้งพสุธาตล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษชากร จารุศิริ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ ความคิดเห็น รวมถึงแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานชีวมวล อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี รวมถึงหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ภาควิชาเคมีเทคนิค และภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและกรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปีโตรเลียม.....	5
2.1.1 น้ำมันดิบ	5
2.1.2 แก๊สธรรมชาติ.....	9
2.2 พลังงานทดแทน.....	11
2.3 น้ำมันพืช.....	14
2.3.1 องค์ประกอบของน้ำมันพืช.....	15
2.3.2 น้ำมันพืชใช้แล้ว.....	17
2.4 กระบวนการไพโรไลซิส	18
2.5 การแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอน	19
2.5.1 การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน	19

2.5.2 การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา	21
2.5.3 การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมในปฏิกิริยา	23
2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา	24
2.6.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	24
2.6.2 การวิเคราะห์ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา.....	25
2.7 โดโลไมต์	29
2.7.1 สมบัติของโดโลไมต์	30
2.7.2 ลักษณะธรณีวิทยาแหล่งแร่	30
2.7.3 การกำเนิดของแร่.....	31
2.7.4 แหล่งแร่	31
2.7.5 การจำแนกชื่อของหินปูนและแร่โดโลไมต์	31
2.7.6 ประโยชน์ของโดโลไมต์.....	32
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	35
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง	35
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	37
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา	37
3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส	38
3.3 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	40
3.4 การดำเนินการวิจัย	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	46
4.1 สมบัติและองค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้ว	46
4.2 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	50

4.3 อิทธิพลของภาวะในการเตรียมโดโลไมต์สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว	56
4.4 อิทธิพลที่มีผลต่อการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์	64
4.5 ภาวะที่เหมาะสมของการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์โดยใช้โปรแกรม Design-Expert.....	78
4.6 องค์ประกอบธาตุ C H O ของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์	80
4.7 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์	81
4.8 ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์	82
4.9 ผลการทดลองกับงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน	83
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	86
5.1 สรุปผลการทดลอง	86
5.2 ข้อเสนอแนะ	87
รายการอ้างอิง	88
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก.....	92
ภาคผนวก ข.....	94
ภาคผนวก ค.....	96
ภาคผนวก ง.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	104

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ	16
ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการเตรียมโดโลไมต์สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	41
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษากาโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์	43
ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลสามระดับของการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว บนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์	43
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้วที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี- แมสสเปก.....	46
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชใช้แล้ว	47
ตารางที่ 4.3 ค่าความร้อนน้ำมันพืชใช้แล้วเทียบกับน้ำมันปาล์ม	48
ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้วตามคาบจุดเดือด.....	49
ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบของโดโลไมต์.....	50
ตารางที่ 4.6 พื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์.....	55
ตารางที่ 4.7 ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่ง ปฏิกิริยาจากโดโลไมต์.....	62
ตารางที่ 4.8 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่ง ปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดัน ไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์	64
ตารางที่ 4.9 ANOVA ของการวิเคราะห์หาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวจาก การไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์	66
ตารางที่ 4.10 ร้อยละของเนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่ง ปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดัน ไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์	67

ตารางที่ 4.11 ANOVA ของการวิเคราะห์หาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์ เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์	69
ตารางที่ 4.12 ค่าความเป็นกรดในผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่ง ปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดัน ไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์	70
ตารางที่ 4.13 ANOVA ของการวิเคราะห์หาตัวแปรที่มีผลต่อค่าความเป็นกรดในผลิตภัณฑ์เหลวที่ ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์.....	72
ตารางที่ 4.14 ขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert ของการ ไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์.....	78
ตารางที่ 4.15 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert ของการไพโรไลซิสน้ำมันพืช ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์	79
ตารางที่ 4.16 ค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert กับค่าที่ได้จาก การทดลอง	80
ตารางที่ 4.17 องค์ประกอบธาตุ C H O ของน้ำมันพืชใช้แล้ว	80
ตารางที่ 4.18 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่ง ปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทร มิเตอร์.....	82
ตารางที่ 4.19 ค่าความร้อนของน้ำมันพืชใช้แล้วก่อนและหลังการไพโรไลซิสบนตัวเร่งปฏิกิริยา จากโดโลไมต์.....	83
ตารางที่ 4.20 ภาวะและผลการทดลองกับงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกันที่ภาวะที่เหมาะสม	84
ตารางที่ 4.21 ภาวะและผลการทดลองกับงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกันที่ภาวะในการทดลอง ใกล้เคียงกัน	85
ตารางที่ ก. 1 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อศึกษาผลการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่ง ปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดัน ไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อย ละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชใช้แล้ว.....	92

ตารางที่ ก. 2 ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบทดลองแบบสามระดับของการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้ แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโตโลไมด์ ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศา เซลเซียสและความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์	93
ตารางที่ ค. 1 องค์ประกอบของสารตามคาบจุดเดือด	96



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 พาราฟินที่พบในน้ำมันดิบ	6
ภาพที่ 2.2 แนฟทีนที่พบในน้ำมันดิบ	6
ภาพที่ 2.3 แอโรแมติกที่พบในน้ำมันดิบ.....	7
ภาพที่ 2.4 แนฟทีโน-แอโรแมติกที่พบในน้ำมันดิบ	7
ภาพที่ 2.5 สารประกอบกำมะถันที่พบในน้ำมันดิบ	7
ภาพที่ 2.6 สารประกอบออกซิเจนที่พบในน้ำมันดิบ	8
ภาพที่ 2.7 สารประกอบไนโตรเจนที่พบในน้ำมันดิบ.....	8
ภาพที่ 2.8 สารประกอบออร์แกโนเมทัลลิกในน้ำมันดิบ	9
ภาพที่ 2.9 การเกิดไตรกลีเซอไรด์	15
ภาพที่ 2.10 การวัดพื้นที่ผิวโดยใช้วิธีการดูดซับแก๊สด้วยวิธี BET	26
ภาพที่ 2.11 กราฟเส้นตรงของสมการ BET.....	27
ภาพที่ 2.12 ส่วนประกอบของกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	28
ภาพที่ 2.13 ปรัชญาการณการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	29
ภาพที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กขนาด 70 มิลลิลิตร.....	35
ภาพที่ 3.2 ชุดทดลอง อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล หม้อแปลงไฟฟ้าและเครื่องเขย่า.....	36
ภาพที่ 3.3 ชุดกรองสุญญากาศ	36
ภาพที่ 3.4 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์	37
ภาพที่ 3.5 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์	37
ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน.....	38
ภาพที่ 3.7 เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป.....	38
ภาพที่ 3.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น	39

ภาพที่ 3.9 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์	39
ภาพที่ 3.10 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	40
ภาพที่ 3.11 เครื่องมือสำหรับวัดค่าความเป็นกรดของน้ำมัน	40
ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันพีซีใช้แล้วที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์.....	46
ภาพที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้ว	49
ภาพที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวของโพลีไมด์	51
ภาพที่ 4.4 XRD ของโพลีไมด์	53
ภาพที่ 4.5 รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโพลีไมด์ธรรมชาติและโพลีไมด์ที่แคลไซน์ที่ภาวะต่างๆ ที่กำลังขยาย 40,000 เท่า.....	54
ภาพที่ 4.6 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีไมด์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก..	57
ภาพที่ 4.7 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีไมด์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก..	57
ภาพที่ 4.8 ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นแอลเคนภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน	58
ภาพที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวตรวจวัดแบบ TCD	59
ภาพที่ 4.10 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เป็นเวลา 40 นาที.....	61
ภาพที่ 4.11 normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีไมด์.....	65
ภาพที่ 4.12 half normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีไมด์.....	65

ภาพที่ 4.13 normal plot of residuals ของร้อยละของเนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวจากการ
ไพโรไลซิสน้ำมันพีชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์..... 68

ภาพที่ 4.14 half normal plot ของร้อยละของเนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิส
น้ำมันพีชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์..... 68

ภาพที่ 4.15 normal plot of residuals ของค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการ
ไพโรไลซิสน้ำมันพีชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์..... 71

ภาพที่ 4.16 half normal plot ของค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส
น้ำมันพีชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์..... 71

ภาพที่ 4.17 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิส
น้ำมันพีชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก 73

ภาพที่ 4.18 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวจาก
การไพโรไลซิสน้ำมันพีชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศา
เซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก..... 73

ภาพที่ 4.19 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวจากการ
ไพโรไลซิสน้ำมันพีชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศา
เซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดย
น้ำหนัก 74

ภาพที่ 4.20 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส
น้ำมันพีชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที 75

ภาพที่ 4.21 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการ
ไพโรไลซิสน้ำมันพีชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศา
เซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที..... 76

ภาพที่ 4.22 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการ
ไพโรไลซิสน้ำมันพีชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศา
เซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที..... 76

ภาพที่ 4.23 แผนภูมิสามมิติของภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่ง ปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ภายใต้ขอบเขตที่ศึกษา.....	79
ภาพที่ 4.24 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่ง ปฏิกิริยาจากโดโลไมต์เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทร มิเตอร์.....	81
ภาพที่ ง.1 2 Level Factorial Design	99
ภาพที่ ง.2 การกำหนดตัวแปรที่ศึกษา.....	99
ภาพที่ ง.3 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง	100
ภาพที่ ง.4 การทดลองที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม Design-Expert	100
ภาพที่ ง.5 การวิเคราะห์ผล	101
ภาพที่ ง.6 half normal plot.....	101
ภาพที่ ง.7 ผลของการวิเคราะห์ตัวแปร	102
ภาพที่ ง.8 การกำหนดค่าขอบเขตตัวแปรตอบสนองที่ต้องการหาภาวะที่เหมาะสม.....	102
ภาพที่ ง.9 ผลการคำนวณภาวะที่เหมาะสม	103
ภาพที่ ง.10 แผนภูมิสามมิติของภาวะที่เหมาะสม	103

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น จากการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจโดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมการผลิตและคมนาคมขนส่ง พลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้ในปัจจุบันเป็นพลังงานที่ได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน แก๊สธรรมชาติและถ่านหิน เป็นที่ทราบกันว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลไม่สามารถผลิตขึ้นมาทดแทนได้ทันกับความต้องการในการใช้พลังงานที่มีมากขึ้น ทำให้การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลมีไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมองหาพลังงานทางเลือกชนิดใหม่มาทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอยู่เดิม พลังงานทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น พลังงานจากชีวมวล พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานนิวเคลียร์ และเชื้อเพลิงชีวภาพ

วัตถุดิบอีกประเภทหนึ่ง ที่ควรส่งเสริมให้นำไปผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ คือ น้ำมันพืชใช้แล้ว ประเทศไทยมีการบริโภคน้ำมันพืชกว่า 800,000 ตันต่อปี ประเมินกันว่าน่าจะมีน้ำมันพืชใช้แล้วเหลือมากกว่า 100 ล้านลิตรต่อปี[1] ในจำนวนนี้ส่วนหนึ่งนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบในการผลิตสบู่ หรือใช้ผสมเป็นอาหารสัตว์ ขณะที่บางส่วนถูกทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมบ้างก็ถูกลักลอบนำไปขายในราคาถูกเพื่อใช้ทอดซ้ำ ซึ่งน้ำมันพืชที่นำกลับมาใช้ซ้ำจะมีลักษณะที่เสื่อมสภาพทั้งทางกายภาพและทางเคมี ทั้งนี้ผู้ที่บริโภคอาหารที่ปรุงด้วยน้ำมันพืชดังกล่าวต่อเนื่องเป็นเวลานาน เซลล์ตับและไตจะถูกทำลาย รวมถึงอาจเป็นโรคมะเร็งได้อีกด้วย ดังนั้นการนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาใช้วัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ นอกจากจะเป็นประโยชน์ด้านพลังงานแล้ว ยังช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุขอีกด้วย ปัจจุบันได้มีการนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาผลิตเป็นไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน แต่มีข้อจำกัดคือวัตถุดิบที่ใช้ต้องปริมาณกรดไขมันอิสระและน้ำในปริมาณที่ต่ำ นอกจากนี้ขั้นตอนในการทำให้ผลิตภัณฑ์เป็นกลางและการทำให้ผลิตภัณฑ์มีความบริสุทธิ์จำเป็นต้องมีขั้นตอนการบำบัดซึ่งก่อให้เกิดน้ำเสียจำนวนมากและได้กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง กระบวนการไพโรไลซิสจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันพืชใช้แล้ว เนื่องจากสามารถใช้วัตถุดิบได้หลากหลายไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์หรือกำจัดน้ำ กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นการให้ความร้อนในภาวะอับอากาศหรือปราศจากออกซิเจน เมื่อน้ำมันพืชได้รับความร้อนโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) จะเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนและเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่ได้มีสมบัติ

ใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม นอกจากนี้หากมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมในกระบวนการไพโรไลซิสจะทำให้มีความจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์มากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมโดโลไมต์สำหรับใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว เนื่องจากโดโลไมต์เป็นแหล่งของแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้านี้อีก [2, 3] พบว่าแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและสามารถลดความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ด้วยวิธีทางความร้อนโดยการแคลไซน์ การสลายตัวทางความร้อนของโดโลไมต์จะทำให้โดโลไมต์มีคุณสมบัติทางเคมีกายภาพเปลี่ยนไป การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากโดโลไมต์จะได้แมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์เกิดขึ้นและลักษณะพื้นผิวของโดโลไมต์หลังจากการสลายตัวทางความร้อนทำให้โดโลไมต์มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ [4-6] และตัวเร่งปฏิกิริยา [7, 8]

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาผลของการแคลไซน์โดโลไมต์สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว
- 2) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องมือและเครื่องทดสอบพร้อมทั้งตรวจสอบความพร้อมในการใช้งาน
- 3) วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเทคนิคต่างๆ ดังต่อไปนี้
 - วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์
 - วิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชใช้แล้วตามวิธี AOCs 1993Ce2-66Ce1-62
 - วิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

- วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเทคนิค Thermo Gravimetric Analysis
- 4) วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของโพลีไมด์ด้วยเทคนิคต่างๆ ดังต่อไปนี้
 - วิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุองค์ประกอบของโพลีไมด์ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry
 - วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของโพลีไมด์ด้วยเทคนิค Thermo Gravimetric Analysis
- 5) เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีไมด์ โดยแคลไซน์โพลีไมด์ในเตาเผาอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิและเวลาที่ต้องการศึกษาและเก็บตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ในผู้ดูความขึ้นจนกว่าจะนำไปใช้งาน
- 6) วิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีไมด์ด้วยเทคนิคต่างๆ ดังต่อไปนี้
 - โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)
 - ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)
 - พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจากวิธีดูดซับแก๊สไนโตรเจนด้วยเทคนิค BET
- 7) ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว
 - 7.1) นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วภายใต้ภาวะต่าง ๆ ดังนี้
 - อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส
 - เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที
 - ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์
 - ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น
 - 7.2) คำนวณหาร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว ของแข็ง และแก๊ส
 - 7.3) นำผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่นเพื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆ วิเคราะห์ชนิดองค์ประกอบที่เกิดขึ้นอย่างละเอียดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์และวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด
 - 7.4) เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถเปลี่ยนน้ำมันพืชใช้แล้วไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีองค์ประกอบที่ดีที่สุด

- 8) ออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Design-expert โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ เวลาในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
- 9) ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ คำนวณร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่นเพื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆ
- 10) หาภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซ์น้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์เพื่อให้ได้สัดส่วนของเชื้อเพลิงเหลวมากที่สุดและมีองค์ประกอบดีที่สุดในโดยใช้โปรแกรม Design Expert
- 11) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณและผลที่ได้จากการทดลองจริง
- 12) สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ภาวะที่เหมาะสมในการแคลไซน์โคโลไมต์สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิส น้ำมันพีซีใช้แล้ว
- 2) ได้ภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจากโคโลไมต์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปิโตรเลียม

ปิโตรเลียม [9-12] มีรากศัพท์มาจากภาษาละติน 2 คำคือ เพทรา (petra) แปลว่า หิน กับ โอลิอุม (oleum) แปลว่า น้ำมัน รวมกันแล้วมีความหมายว่า น้ำมันที่ได้จากหิน ปิโตรเลียมเป็นสารผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและสารอินทรีย์หลายชนิดที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ปิโตรเลียมจะมี 2 สถานะ คือ แก๊สและของเหลว ปิโตรเลียมที่มีสถานะเป็นแก๊ส เรียกว่า แก๊สธรรมชาติ (natural gas) ปิโตรเลียมที่มีสถานะเป็นของเหลว เรียกว่า น้ำมันดิบ (crude oil)

ปิโตรเลียมเกิดจากการทับถมและสลายตัวของอินทรีย์สารจากพืชและสัตว์ที่คลุกเคล้าอยู่กับตะกอนในชั้นกรวดทรายและโคลนตมใต้พื้นดิน เมื่อเวลาผ่านไปนับล้านปีตะกอนเหล่านี้จะจมตัวลงเรื่อยๆ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก ถูกอัดแน่นด้วยความดันและความร้อนสูง รวมทั้งอยู่ในบริเวณที่มีปริมาณออกซิเจนจำกัด จึงสลายตัวเปลี่ยนสภาพเป็นน้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติแทรกอยู่ระหว่างชั้นหินที่มีรูพรุน ปิโตรเลียมจากแหล่งต่างกันจะมีปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนรวมทั้งปริมาณสารประกอบของกำมะถัน ไนโตรเจน และออกซิเจนแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของซากพืชและสัตว์ที่เป็นต้นกำเนิดของปิโตรเลียมนั้น รวมถึงอิทธิพลของแรงที่ทับถมอยู่บนตะกอน ปิโตรเลียมที่เกิดอยู่ในชั้นหินจะมีการเคลื่อนตัวออกไปตามรอยแตกและรูพรุนของหินไปสู่ที่มีระดับความลึกเล็กน้อยกว่าแล้วสะสมตัวอยู่ในโครงสร้างหินที่มีรูพรุน มีโพรงหรือรอยแตกในเนื้อหินที่สามารถให้ปิโตรเลียมสะสมตัวอยู่ได้ ด้านบนเป็นหินตะกอนหรือหินดินดานเนื้อแน่นละเอียดปิดกั้นไม่ให้ปิโตรเลียมไหลลอดออกไปได้ โครงสร้างปิดกั้นดังกล่าวนี้เรียกว่า แหล่งกักเก็บปิโตรเลียม

2.1.1 น้ำมันดิบ

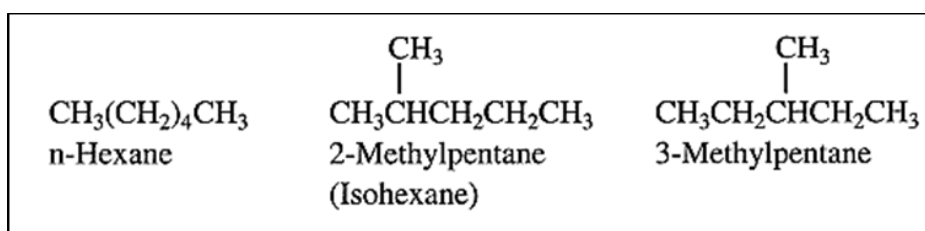
น้ำมันดิบจากแหล่งต่างๆ อาจมีสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน เช่น มีลักษณะขุ่นเหนียวจนถึงหนืดคล้ายยางมะตอย มีสีเหลือง เขียว น้ำตาลจนถึงดำ มีความหนาแน่น 0.79 - 0.97 น้ำมันดิบมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ พาราฟิน (paraffins) แนฟทีน (naphthenes) และแอโรแมติก (aromatics) นอกจากนี้ อาจมีสารประกอบของกำมะถัน ไนโตรเจน และสารประกอบออกไซด์อื่นๆปนอยู่เล็กน้อย

1. พาราฟิน (paraffins) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbons) หรือเรียกว่า แอลเคน (alkanes) ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.1 ประกอบด้วย

-นอร์มัลพาราฟิน (normal-paraffins) คือ พาราฟินแบบโซ่ตรง เช่น นอร์มัลเฮกเซน (n-Hexane)

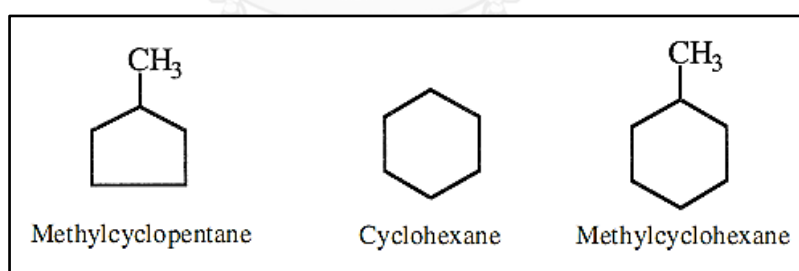
-ไอโซพาราฟิน (isoparaffins) คือ พาราฟินที่มีหมู่เมทิลต่ออยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 เช่น 2-เมทิลเพนเทน (2-Methylpentane) หรือ ไอโซเฮกเซน (Isohexane)

-พาราฟินแบบกิ่ง (branched paraffins) คือ พาราฟินที่มีกิ่งหรือสาขาแตกออกจากสายโซ่โมเลกุลหลักซึ่งมีหมู่แอลคิลต่ออยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งต่างๆ ที่ไม่ใช่ตำแหน่งที่ 2 และมักจะเป็นหมู่เมทิลมากกว่าหมู่แอลคิลอื่นๆ เช่น 3-เมทิลเพนเทน (3-Methylpentane)



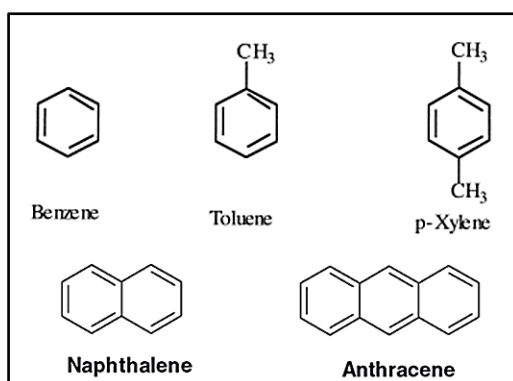
ภาพที่ 2.1 พาราฟินที่พบในน้ำมันดิบ[9]

2. แนฟทีน (naphthenes) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงหรือเรียกว่า ไซโคลแอลเคน (cycloalkanes) แนฟทีนที่พบในปิโตรเลียมส่วนใหญ่เป็นวงขนาดห้าเหลี่ยม และหกเหลี่ยม ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.2 แนฟทีนขนาดสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมค่อนข้างไวต่อปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากความเครียดของวงจึงมักเปลี่ยนเป็นสารอื่น แนฟทีนที่เป็นวงห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยมสามารถเปลี่ยนให้เป็นสารแอโรแมติกได้ โดยการทำให้ไฮโดรเจนหลุดออกจากโมเลกุล



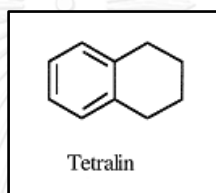
ภาพที่ 2.2 แนฟทีนที่พบในน้ำมันดิบ[9]

3. แอโรแมติก (aromatic) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงหกเหลี่ยม มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว เช่น เบนซีน (benzene) เป็นต้น มักพบในส่วนกลั่นหนัก เช่น แก๊สออยล์ น้ำมันหล่อลื่นและกากการกลั่น อนุพันธ์ของเบนซีนได้แก่ โทลูอีน (toluene) และไซลีน (xylene) มักพบมากที่สุดอยู่ในปิโตรเลียม สารที่มีวงแอโรแมติกหลายวงแนบต่อกัน เช่น แนฟทาลีน (naphalene) และแอนทราซีน (anthracene) เป็นต้น โครงสร้างของแอโรแมติกแสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แอโรแมติกที่พบในน้ำมันดิบ[9]

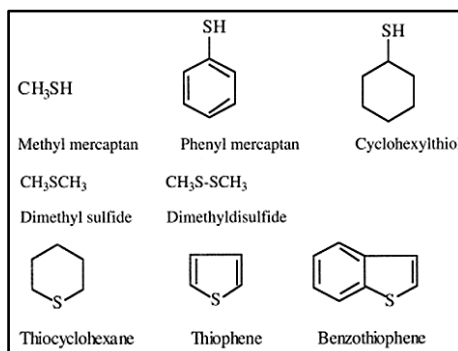
สารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างผสมระหว่าง แนฟทีนและแอโรแมติก เรียกว่า แนฟทีโน-แอโรแมติก (naphtheno-aromatics) เช่น เตตระไฮโดรแนฟทาลีน (tetrahydronaphthalene) หรือเตตระลีน (tetralin) ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 แนฟทีโน-แอโรแมติกที่พบในน้ำมันดิบ[9]

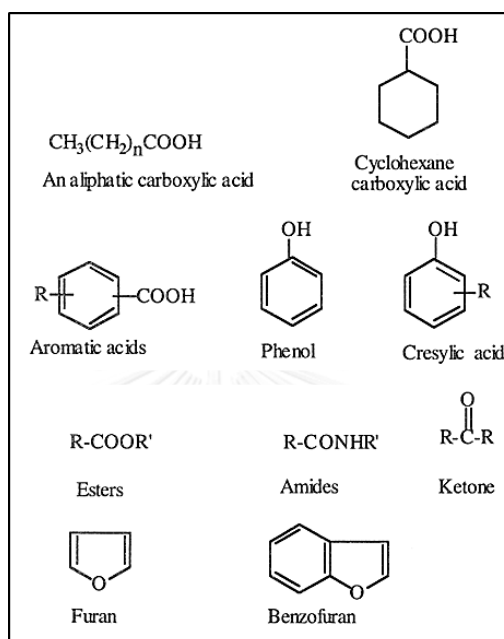
นอกจากสารไฮโดรคาร์บอน 3 ประเภทนี้แล้วยังมีสารเคมีอินทรีย์ที่มีธาตุอื่นอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลด้วย ได้แก่ กำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจน และโลหะต่างๆ

-สารประกอบกำมะถัน เป็นสารปนเปื้อนที่ตรวจพบในน้ำมันดิบมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 0.06-7.00 สารประกอบกำมะถันที่พบในปิโตรเลียมมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.5 ได้แก่ ไทออล ซัลไฟด์และไทโอฟิน สารประกอบกำมะถันทั้งหมดมีกลิ่นและมีฤทธิ์กัดกร่อนจะทำปฏิกิริยากับโลหะได้ ในช่วงการกลั่นที่จุดเดือด 150 องศาเซลเซียส มักมีองค์ประกอบของกำมะถันประเภทไทออลและที่จุดเดือดระหว่าง 150-250 องศาเซลเซียส มักเป็นพวกไทโอฟิน ถ้าช่วงจุดเดือดสูงขึ้นไปก็มักจะพบสารประเภทเบนโซไทโอฟิน



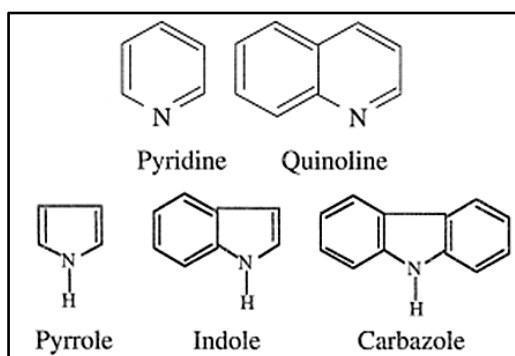
ภาพที่ 2.5 สารประกอบกำมะถันที่พบในน้ำมันดิบ[9]

-สารประกอบออกซิเจน มักอยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 1-30 อะตอม กรดที่มีโครงสร้างเป็นวงพบบ้างแต่ในปริมาณน้อย บางครั้งอยู่ในรูปของแนฟทีน-แอโรแมติก กรดที่มีโครงสร้างเป็นวงที่พบมากจะมีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 9-13 อะตอม เมื่อมีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 14 อะตอมมักอยู่ในรูปวงสองวง นอกจากนี้แล้วยังพบสารประกอบออกซิเจนในรูปของแอลกอฮอล์ ฟีนอล คีโตน เอสเทอร์ และแอนไฮไดรด์



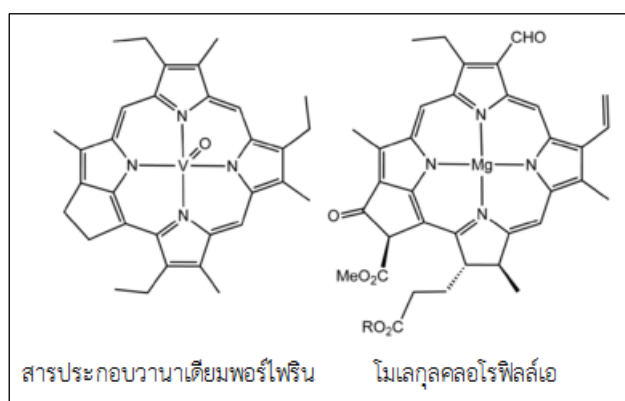
ภาพที่ 2.6 สารประกอบออกซิเจนที่พบในน้ำมันดิบ[9]

-สารประกอบไนโตรเจน หมายถึง สารประกอบที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุล ตรวจพบในน้ำมันดิบอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1-2.0 โดยน้ำหนัก สารประกอบไนโตรเจนส่วนใหญ่มีจุดเดือดสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆ เสื่อมสภาพเร็วและทำให้เกิดยางเหนียวในน้ำมัน ได้แก่ พิริดีน (pyridine) ควิโนลีน (quinoline) อินโดล (indole) ไพโรล (pyrrole) และคาร์บาโซล (carbazole) ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 สารประกอบไนโตรเจนที่พบในน้ำมันดิบ[9]

-สารประกอบออร์แกโนเมทัลลิก น้ำมันดิบส่วนมากมักมีโลหะปะปนอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนของพอร์ไฟริน (porphyrin) จึงเรียกว่า ปีโตรพอร์ไฟริน (petroporphyrins) ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับคลอโรฟิลล์ โดยมีโลหะอื่นแทนที่แมกนีเซียมที่อยู่ตรงกลางของวงพอร์ไฟริน โลหะที่พบมากได้แก่ แวนเดียม และนิกเกิล ที่พบรองลงมาได้แก่ ทองแดง และเหล็ก หมู่แทนที่ที่อยู่รอบวงพอร์ไฟรินอาจแตกต่างจากคลอโรฟิลล์เล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 2.8 หรืออาจไม่มีหมู่แทนที่เลยที่บางตำแหน่ง สารประกอบเชิงซ้อนของพอร์ไฟรินแวนเดียมและนิกเกิลมีความเสถียรสูง และสามารถกลั่นแยกออกมาได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2.8 สารประกอบออร์แกโนเมทัลลิกในน้ำมันดิบ[11]

2.1.2 แก๊สธรรมชาติ

แก๊สธรรมชาติ หมายถึง ของผสมไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว หรือ สารแอลเคน สารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวในธรรมชาติเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิและความดันปกติ ได้แก่ มีเทน (methane) อีเทน (ethane) โพรเพน (propane) และบิวเทน (butane)

แหล่งกำเนิดแก๊สธรรมชาติมี 2 ลักษณะคือ

1) แหล่งกักเก็บใต้ผิวดินเหมือนกับแหล่งกักเก็บน้ำมันดิบ ซึ่งนำขึ้นมาใช้ประโยชน์ได้โดยการขุดเจาะเช่นเดียวกับการขุดเจาะน้ำมันดิบ แก๊สธรรมชาติที่เกิดในลักษณะนี้ เรียกว่า นอนแอสโซซิเอเตดแก๊ส (non-associated gas)

2) แก๊สธรรมชาติที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขุดเจาะน้ำมันดิบ ซึ่งแก๊สธรรมชาติส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในลักษณะนี้ เนื่องจากแก๊สมิเทนและแก๊สไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลต่ำๆมักจะละลายอยู่ในน้ำมันดิบหรือของผสมของสารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงภายใต้ความดันสูง เมื่อน้ำมันดิบถูกนำขึ้นมาบนพื้นดินซึ่งมีความดันลดต่ำลงเท่ากับความดันบรรยากาศ สารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวตั้งแต่คาร์บอน 1-4 อะตอม จะคืนสภาพเป็นแก๊สเพราะสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้มีจุดเดือดต่ำ

กว่า 0 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ เรียกแก๊สธรรมชาติที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ว่า แอสโซซิเอเตดแก๊ส (associated gas)

องค์ประกอบของแก๊สธรรมชาติ

องค์ประกอบในแก๊สธรรมชาติแต่ละแหล่งจะแตกต่างกัน ถึงแม้จะเป็นแหล่งที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกันก็ตาม มีเทนเป็นองค์ประกอบที่มีปริมาณมากที่สุด สารไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นได้แก่ อีเทน โพรเพน และบิวเทน มักมีปริมาณน้อยกว่ามีเทนมาก แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1) แก๊สธรรมชาติแห้ง (dry or lean natural gas) เป็นแก๊สธรรมชาติที่มีองค์ประกอบอื่นนอกเหนือจากมีเทนปะปนอยู่จำนวนเล็กน้อย เมื่อนำแก๊สธรรมชาติแห้งมาอัดความดันที่อุณหภูมิปกติ จะไม่มีหรือเกือบไม่มีของเหลวเกิดขึ้นเลย โดยทั่วไปแก๊สธรรมชาติแห้งเมื่อแยกเอาแก๊สที่ไม่ใช่สารไฮโดรคาร์บอนออกแล้วจะมีมีเทนอยู่ประมาณร้อยละ 85-95 แก๊สธรรมชาติที่ได้จากแหล่งแก๊สธรรมชาติมักเป็นแก๊สธรรมชาติแห้ง

2) แก๊สธรรมชาติชื้น (wet or rich natural gas) เป็นแก๊สธรรมชาติที่มี อีเทน โพรเพน บิวเทน และเพนเทน ปริมาณมากปนอยู่ เมื่อนำมาอัดความดันที่อุณหภูมิห้องก็จะกลายเป็นของเหลวได้ แก๊สธรรมชาติชนิดนี้มีมีเทนน้อยกว่าร้อยละ 85 มักเป็นแก๊สธรรมชาติที่ได้จากแอสโซซิเอเตดแก๊ส

นอกจากสารไฮโดรคาร์บอนในแก๊สธรรมชาติยังประกอบด้วยแก๊สไนโตรเจน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และแก๊สฮีเลียม แก๊สธรรมชาติที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์ปนอยู่ในปริมาณที่สูง เรียกว่า แก๊สธรรมชาติก่ดกร่อน (sour natural gas) แก๊สธรรมชาติที่กำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว เรียกว่า แก๊สธรรมชาติไม่ก่ดกร่อน (sweet natural gas)

เราสามารถใช้อย่างไรจากแก๊สธรรมชาติได้ใน 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

1. ใช้เป็นเชื้อเพลิง เราสามารถใช้แก๊สธรรมชาติได้โดยตรง ด้วยการใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า หรือในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมสุกซ์ภัณฑ์ ฯลฯ หรือสามารถนำมาใช้ในระบบ Co-generation และใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ ที่เรียกว่า แก๊สธรรมชาติสำหรับยานยนต์ (Natural Gas for Vehicles: NGV)

2. ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ หลังผ่านกระบวนการแยกในโรงแยกแก๊ส เพราะในแก๊สธรรมชาติ มีสารประกอบที่เป็นประโยชน์อยู่มากมาย เมื่อนำมาผ่านกระบวนการแยกที่โรงแยกแก๊สแล้วก็จะได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆมาใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

-แก๊สมีเทน (C_1) : ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ในโรงงานอุตสาหกรรม และนำไปอัดใส่ถังด้วยความดันสูง เรียกว่าแก๊สธรรมชาติอัด สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ รู้จักกันในชื่อว่า "แก๊สธรรมชาติสำหรับยานยนต์" (Natural Gas for Vehicles : NGV)

-แก๊สอีเทน (C_2) : ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น สามารถนำไปใช้ผลิตเม็ดพลาสติก เส้นใยพลาสติกชนิดต่างๆ เพื่อนำไปใช้แปรรูปต่อไป

-แก๊สโพรเพน (C_3) และแก๊สบิวเทน (C_4) : แก๊สโพรเพนใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้นได้เช่นเดียวกัน และหากนำเอาแก๊สโพรเพนกับแก๊สบิวเทนมาผสมกัน อัดใส่ถังเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas - LPG) หรือที่เรียกว่าแก๊สหุงต้ม สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ และใช้ในการเชื่อมโลหะได้ รวมทั้งยังนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทได้อีกด้วย

-ไฮโดรคาร์บอนเหลว (Heavier Hydrocarbon) : อยู่ในสถานะที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ เมื่อผลิตขึ้นมาถึงปากบ่อนแทนผลิต สามารถแยกจากไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะเป็นแก๊สบนแทนผลิต เรียกว่า คอนเดนเสท (condensate) สามารถลำเลียงขนส่งโดยทางเรือหรือทางท่อ นำไปกลั่นเป็นน้ำมันสำเร็จรูปต่อไป

-แก๊สโซลีนธรรมชาติ : แม้ว่าจะมีการแยกคอนเดนเสทออกเมื่อทำการผลิตขึ้นมาถึงปากบ่อนแทนผลิตแล้ว แต่ก็ยังมีไฮโดรคาร์บอนเหลวบางส่วนหลุดไปกับไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะเป็นแก๊สเมื่อผ่านกระบวนการแยกจากโรงแยกแก๊สธรรมชาติแล้ว ไฮโดรคาร์บอนเหลวเหล่านี้ก็จะถูกแยกออกเรียกว่า แก๊สโซลีนธรรมชาติ หรือ NGL (natural gasoline) และส่งเข้าไปยังโรงกลั่นน้ำมัน เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์น้ำมันสำเร็จรูปได้เช่นเดียวกับ คอนเดนเสท และยังเป็นตัวทำละลายซึ่งนำไปใช้ในอุตสาหกรรมบางประเภทได้เช่นกัน

-แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ : เมื่อผ่านกระบวนการแยกแล้ว จะถูกนำไปทำให้อยู่ในสภาพของแข็ง เรียกว่าน้ำแข็งแห้ง นำไปใช้ในอุตสาหกรรมถนอมอาหาร อุตสาหกรรมน้ำอัดลมและเบียร์ ใช้ในการถนอมอาหารระหว่างการขนส่ง นำไปเป็น วัตถุดิบสำคัญในการทำแผ่นเทียม และนำไปใช้สร้างควีนในอุตสาหกรรมบันเทิง อาทิ การแสดงคอนเสิร์ต หรือ การถ่ายทำภาพยนตร์

2.2 พลังงานทดแทน

พลังงานทดแทน [13] หมายถึง พลังงานที่ใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิล เช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียม และ แก๊สธรรมชาติ ซึ่งปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์มหาศาลอันเป็นสาเหตุโลกร้อนตัวอย่าง พลังงานทดแทนที่สำคัญเช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานชีวมวล และเชื้อเพลิงชีวภาพ เป็นต้น ในปี 2555 ประเทศไทยใช้พลังงานทดแทนเพียงร้อยละ 18.2 ของพลังงานทั้งหมด เพิ่มขึ้นจากปีก่อนหน้าเพียงร้อยละ 1.8 โดยที่พลังงานแสงอาทิตย์และเชื้อเพลิงชีวภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 23 แต่ พลังงานจาก ฟืน ถ่าน แกลบ และวัสดุเหลือใช้ทางเกษตร โดย

นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงดั้งเดิม มีอัตราการลดลงร้อยละ 10 (อาจเป็นเพราะมวลชีวภาพดังกล่าวถูกแปรรูปไปเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพไปแล้ว)

พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานจากดวงอาทิตย์จัดเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญ เป็นพลังงานสะอาดไม่ทำปฏิกิริยาใดๆที่จะทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ เซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง ที่ถูกนำมาใช้ผลิตไฟฟ้า เนื่องจากสามารถเปลี่ยนเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ส่วนใหญ่เซลล์แสงอาทิตย์ทำมาจากสารกึ่งตัวนำพวกซิลิคอน มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึงร้อยละ 44 ในส่วนของประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร จึงได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ในเกณฑ์สูง พลังงานโดยเฉลี่ยซึ่งรับได้ทั่วประเทศประมาณ 4 ถึง 4.5 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน ประกอบด้วยพลังงานจากรังสีตรง (Direct Radiation) ประมาณร้อยละ 50 ส่วนที่เหลือเป็นพลังงานรังสีกระจาย (Diffused Radiation) ซึ่งเกิดจากละอองน้ำในบรรยากาศ (เมฆ) ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าบริเวณที่ห่างจากเส้นศูนย์สูตรออกไปทั้งแนวเหนือ-ใต้

พลังงานน้ำ พื้นผิวโลกถึงร้อยละ 70 ปกคลุมด้วยน้ำ ซึ่งมีความสำคัญยิ่งต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย น้ำเหล่านี้มีการเปลี่ยนสถานะและหมุนเวียนอยู่ตลอดเวลา ระหว่างผิวโลกและบรรยากาศอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเรียกว่า วัฏจักรของน้ำ น้ำที่กำลังเคลื่อนที่มีพลังงานสะสมอยู่มาก และมนุษย์รู้จักนำพลังงานนี้มาใช้หลายร้อยปีแล้ว เช่น ใช้หมุนกังหันน้ำ ปัจจุบันมีการนำพลังงานน้ำไปหมุนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า พลังงานที่ได้จากแหล่งน้ำที่รู้จักกันโดยทั่วไป คือ พลังงานน้ำตก พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง พลังงานคลื่น

พลังงานลม เป็นพลังงานธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ 2 ที่ ซึ่งสะอาดและบริสุทธิ์ใช้แล้วไม่มีวันหมดสิ้นไปจากโลก ได้รับความสนใจนำมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์อย่างกว้างขวาง ในขณะเดียวกัน กังหันลมก็เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำพลังงานลมมาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ โดยเฉพาะในการผลิตกระแสไฟฟ้า และในการสูบน้ำ ซึ่งได้ใช้งานกันมาแล้วอย่างแพร่หลาย พลังงานลมเกิดจากพลังงานจากดวงอาทิตย์ตกกระทบโลกทำให้อากาศร้อน และลอยตัวสูงขึ้น อากาศจากบริเวณอื่นซึ่งเย็นและหนาแน่นมากกว่าจึงเข้ามาแทนที่ การเคลื่อนที่ของอากาศเหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดลม และมีอิทธิพลต่อสภาพลมฟ้าอากาศในบางพื้นที่ของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งแนวฝั่งทะเลอันดามันและด้านทะเลจีน(อ่าวไทย) มีพลังงานลมที่อาจนำมาใช้ประโยชน์ในลักษณะพลังงานกล (กังหันสูบน้ำ กังหันผลิตไฟฟ้า) ศักยภาพของพลังงานลมที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้สำหรับประเทศไทย มีความเร็ว อยู่ระหว่าง 3 - 5 เมตรต่อวินาที และความเข้มพลังงานลมที่ประเมินไว้ได้อยู่ระหว่าง 20 - 50 วัตต์ต่อตารางเมตร

พลังงานความร้อนใต้พิภพ [14] เป็นการนำเอาพลังงานความร้อนที่อยู่ใต้ดินขึ้นมาใช้ ความร้อนดังกล่าวอยู่ในแกนกลางของโลกเกิดขึ้นมาตั้งแต่โลกกำเนิดขึ้น อุณหภูมิอาจสูงถึง 5000 องศาเซลเซียส ความร้อนดังกล่าวทำให้น้ำที่เก็บกักอยู่ในโพรงหิน ร้อนมีอุณหภูมิอาจสูงถึง 370 องศาเซลเซียส ความดันภายในโลก ดันน้ำขึ้นมาผิวดิน กลายเป็นไอลอยขึ้นไปบนชั้นบรรยากาศ แล้วตกลงมาเป็นฝนหรือหิมะ แล้วไหลกลับลงไปใต้ดินนำความร้อนขึ้นมาอีก พลังงานนี้จึงถูกเรียกว่า พลังงานหมุนเวียน เราสูบน้ำร้อนนี้ขึ้นมาใช้ให้ความอบอุ่นแก่บ้านเรือนในประเทศหนาว ละลายหิมะตามถนนหนทาง ปรงอาหาร ให้ความร้อนในเรือนกระจกเพื่อปลูกผักสวนครัว และการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า

พลังงานชีวมวล เป็นพลังงานที่ได้จากชีวมวลชนิดต่างๆ ซึ่งชีวมวล (biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ สารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่างๆ เช่น เศษไม้ ขยะหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยกระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ มีดังนี้คือ

1. การเผาไหม้โดยตรง (combustion) เป็นปฏิกิริยาการรวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็วพร้อมเกิดการลุกไหม้และคายความร้อน ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช่เชื้อเพลิงล้วนๆ แต่จะใช้อากาศแทนเนื่องจากอากาศมีออกซิเจนอยู่ร้อยละ 21 โดยปริมาตร หรือร้อยละ 23 โดยน้ำหนัก เมื่อนำชีวมวลมาเผา จะได้ความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ตัวอย่างชีวมวลประเภทนี้คือ เศษวัสดุทางการเกษตร และเศษไม้

2. การผลิตแก๊ส (gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่มีอยู่ในชีวมวลที่สำคัญกระบวนการหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงแบบ Thermal Conversion เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่า แก๊สชีวภาพ (biogas) มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน (CH_4) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สามารถนำไปใช้สำหรับกังหันแก๊ส (gas turbine)

3. การหมัก (fermentation) การผลิตแก๊สโดยการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) ชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัว เกิดแก๊สชีวภาพ (biogas) ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน (CH_4) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นหลัก แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้สามารถใช้ขยะอินทรีย์ชุมชน มูลสัตว์ น้ำเสียจากชุมชนหรืออุตสาหกรรมเกษตร เป็นแหล่งวัตถุดิบชีวมวลได้

4. การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช มีกระบวนการที่ใช้ผลิตดังนี้

กระบวนการทางชีวภาพ เป็นการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่างหวาน กากน้ำตาล และเศษลำต้นอ้อย ให้เป็นเอทานอล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน

กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยการสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมัน แล้วนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (trans esterification) เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล

กระบวนการใช้ความร้อนสูง เช่น กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงในสภาพไร้ออกซิเจน จะทำให้ชีวมวลเกิดการสลายตัว เป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวและแก๊สผสมกัน

พลังงานจากขยะ ขยะจากบ้านเรือนและกิจการต่างๆ เป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูง ขยะเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นมวลชีวภาพ เช่น กระดาษ เศษอาหาร และไม้ ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าที่ถูกออกแบบให้ใช้ขยะเป็นเชื้อเพลิงได้ โรงไฟฟ้าที่ใช้ขยะเป็นเชื้อเพลิง จะนำขยะมาเผาบนตะแกรง ความร้อนที่เกิดขึ้นใช้ต้มน้ำในหม้อน้ำจนกลายเป็นไอน้ำเดือด ซึ่งจะไปหมุนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (เหมือนกับโรงไฟฟ้าอื่นๆ) ที่ผ่านมารวบรวมขยะ คัดแยก และปรับปรุงคุณภาพ เพื่อนำขยะชนิดต่างๆ เข้าสู่การรีไซเคิลและนำกลับมาใช้ใหม่ แต่จะมีขยะอีกจำนวนที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้ แต่พอมิโรงงานไฟฟ้า ปัญหาดังกล่าวหมดไปเพราะขยะต่างๆ จะนำมาใช้เป็นขยะเชื้อเพลิง (Refuse Derived Fuel: RDF) เป็นขยะแห่งที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ให้เกิดค่าความร้อนสูง นับเป็นการสำรองพลังงานไว้ใช้ ซึ่งหัวใจหลักของพลังงานสะอาดอยู่ที่ความสามารถในการรวบรวมไว้ แบบประหยัด และปรับปรุงคุณภาพให้ได้ความร้อนที่นำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดจากนั้นเข้าสู่การปรับปรุงคุณภาพ เพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงทดแทนที่มีคุณภาพสูงด้วยเทคโนโลยีที่มีความปลอดภัยสูง ด้วยมาตรการการควบคุมมลพิษที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม ไฟฟ้าที่ได้จากเชื้อเพลิง RDF มีความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าถึง 1 เมกวัตต์ ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานได้ในชุมชนขนาดเล็กถึง 300 หลังคาเรือน นับเป็นพลังงานสะอาดที่มีค่าความร้อนสูง และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

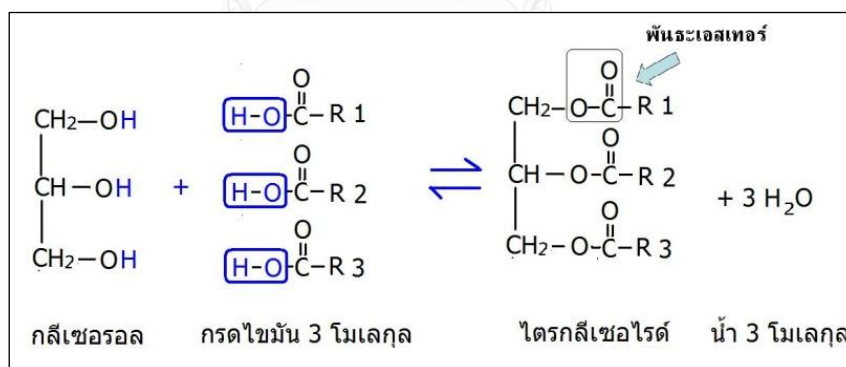
2.3 น้ำมันพืช

น้ำมันพืช (Vegetable Oil) [15-17] คือน้ำมันที่ผลิตได้จากพืชต่างๆ เช่น ถั่วลิสง ถั่วเหลือง เมล็ดทานตะวัน ดอกคำฝอย ปาล์มน้ำมัน มะพร้าว ละหุ่ง สบู่ดำ เมล็ดเรพ ฯลฯ โดยทั่วไปน้ำมันพืชเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) มีความหนืดสูงมีโครงสร้างเป็น C_3H_5 เชื่อมต่อกับกรด

ไขมันซึ่งมีองค์ประกอบชนิดต่างๆกันและมีปริมาณกรดไขมันอยู่ในโครงสร้างถึงร้อยละ 94-96 ของน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้น้ำมันพืชแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน

2.3.1 องค์ประกอบของน้ำมันพืช

องค์ประกอบหลักของน้ำมันพืช คือ กรดไขมัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated Fatty Acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acid) ในปริมาณสัดส่วนของกรดทั้งสองชนิดจะแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ทำให้คุณสมบัติของน้ำมันพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งกรดไขมันที่พบในน้ำมันพืชส่วนใหญ่จะเป็นกรดไขมันพวงไม่อิ่มตัว โดยทั่วไปกรดไขมันจะมีจำนวนคาร์บอนเป็นเลขคู่เสมอในโมเลกุล ซึ่งมีความยาวตั้งแต่ 12 ถึง 24 โมเลกุล แต่พบเป็นจำนวนมากจะมีจำนวนคาร์บอน 16 และ 18 โดยในธรรมชาติจะพบกรดไขมันในรูปอิสระในปริมาณเพียงเล็กน้อย ส่วนใหญ่จะพบในรูปเอซิลกลีเซอรอล (Acylglycerol) หรือไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของกรดไขมันกับกลีเซอรอล โดยที่กลีเซอรอลเป็นสารพวงแอลกอฮอล์ ที่มีหมู่ฟังก์ชัน $-OH$ จำนวน 3 หมู่ ถ้ากรดไขมันเพียงหนึ่งโมเลกุล ทำปฏิกิริยากับหมู่ $-OH$ ของกลีเซอรอล เรียกว่า โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride) ถ้ากรดไขมันสองโมเลกุล ทำปฏิกิริยาจะได้ ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride) และถ้ากรดไขมันสามโมเลกุลทำปฏิกิริยาจะได้ ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การเกิดไตรกลีเซอไรด์[16]

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ[17]

น้ำมันพืช	กรดไขมันอิ่มตัว					กรดไขมันไม่อิ่มตัว		
	Capric acid C10:0	Lauric acid C12:0	Myristic acid C14:0	Palmitic acid C16:0	Stearic acid C18:0	Oleic acid C18:1	Linoleic acid C18:2	Linolenic acid C18:3
น้ำมันมะพร้าว	6	47	18	9	3	6	2	-
น้ำมันข้าวโพด	-	-	-	11	2	28	58	1
น้ำมันเมล็ดนุ่น	-	-	1	22	3	19	54	1
น้ำมันมะกอก	-	-	-	13	3	71	10	1
น้ำมันปาล์ม	-	-	1	45	4	40	10	-
น้ำมันจากเนื้อปาล์ม	4	48	16	8	3	15	2	-
น้ำมันงา	-	-	-	9	4	41	45	-
น้ำมันถั่วเหลือง	-	-	-	11	4	24	54	7
น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน	-	-	-	7	5	19	68	1

2.3.2 น้ำมันพืชใช้แล้ว

น้ำมันพืชใช้แล้ว [1, 15, 18] เป็นวัตถุอันตรายประเภทหนึ่งที่ต้องส่งเสริมให้นำไปผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งนอกจากจะเป็นประโยชน์ด้านพลังงานแล้ว ยังช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข โดยในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา ทั่วโลกมีอัตราเฉลี่ยในการบริโภคน้ำมันพืชเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 4 ต่อปี ส่งผลให้ปัจจุบันมีการบริโภคน้ำมันพืชสูงกว่า 100 ล้านตันต่อปี เพราะวิถีการบริโภคที่หันมานิยมอาหารประเภทจานด่วน (Fast Food) ที่ปรุงด้วยการทอดมากขึ้น ผลที่ตามมา คือ มีน้ำมันพืชใช้แล้วจำนวนมากที่หลีกเลี่ยงจากการปรุงอาหารซึ่งจำเป็นต้องหาวิธีการจัดการ ไม่ว่าจะเป็นการกำจัด บำบัด หรือนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข

สำหรับประเทศไทยมีการบริโภคน้ำมันพืชกว่า 800,000 ตันต่อปี ประเมินกันว่าน่าจะมีน้ำมันพืชใช้แล้วเหลือมากกว่า 100 ล้านลิตรต่อปี ในจำนวนนี้ ส่วนหนึ่งนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบในการผลิตสบู่ หรือใช้ผสมเป็นอาหารสัตว์ ขณะที่บางส่วนถูกทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม บางก็ถูกลักลอบนำไปขายในราคาถูกเพื่อใช้ทอดซ้ำ ซึ่งน้ำมันพืชที่นำกลับมาใช้ซ้ำจะมีลักษณะที่เสื่อมสภาพทั้งทางกายภาพและทางเคมี ทั้งนี้ผู้ที่บริโภคอาหารที่ปรุงด้วยน้ำมันพืชดังกล่าวต่อเนื่องเป็นเวลานาน เซลล์ตับและไตจะถูกทำลาย รวมถึงอาจเป็นโรคมะเร็งได้อีกด้วย กลุ่มสารก่อมะเร็งเกิดขึ้นในน้ำมันทอดซ้ำ ได้แก่ Cyclic fatty acids, Aldehydic triglycerides, Triglyceride hydroperoxides, Aldehydes, Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) ยกตัวอย่างเช่น Malonedehyde (MDA) ทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังของหนูทดลองมีการเจริญเติบโตผิดปกติ ลำไส้ทำงานผิดปกติ ตับและไตโต โลหิตจาง วิตามินอีในเลือดและตับของหนูทดลองลดลง, 4-hydroxy-2-nonenol (HNE) มีพิษต่อเซลล์ทั้งก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ได้เช่นกัน เป็นต้น เมื่อคำนึงถึงปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันที่ใช้ทอดซ้ำ จากการสำรวจพบว่าหากเป็นการบริโภคในบ้านเรือนการใช้ น้ำมันทอดซ้ำ 2-3 ครั้งถือว่าค่อนข้างปลอดภัย ส่วนการบริโภคในร้านอาหารและอาหารจานด่วนทั้งหลายพบว่าค่อนข้างอันตรายต่อสุขภาพ เนื่องจากพบปริมาณสารโพลาร์มากกว่าร้อยละ 25 ดังนั้น การประเมินจากรูป รส กลิ่น สี ของน้ำมันทอดซ้ำ และปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันทอดซ้ำเป็นวิธีที่มีประโยชน์ที่จะช่วยชี้วัดว่าน้ำมันนั้นไม่ควรนำกลับมาใช้อีก กระทรวงสาธารณสุขจึงได้ออกประกาศกำหนดให้น้ำมันที่ใช้ทอดหรือประกอบเพื่อจำหน่าย ทั้งน้ำมันพืชและน้ำมันจากสัตว์ มีค่าสารโพลาร์ได้ไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก มีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 6 พฤศจิกายน 2547 หากพบไว้อยู่จะมีโทษปรับไม่เกิน 50,000 บาท ตามพระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ.2522

ปัจจุบันได้มีการนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาผลิตเป็นไบโอดีเซลผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน น้ำมันพืชใช้แล้วที่ได้นำมาใช้ทำไบโอดีเซลในการทดลองนั้น มาจากทั้งบ้านเรือน ร้านอาหาร ร้านอาหารต่าง ๆ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันมากในด้านคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพระหว่าง

น้ำมันพืชที่ยังไม่ได้ใช้กับน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ในน้ำมันพืชใช้แล้วอาจมีปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระมาก การทำให้น้ำระเหยออกไปและการทำให้น้ำมันมีความเป็นกลาง (drying and neutralization) จึงมีความจำเป็นก่อนที่จะนำไปเข้าสู่ขบวนการผลิตไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลมีข้อดีกว่าเชื้อเพลิงดีเซลจากปิโตรเลียมหลายด้านทั้งความปลอดภัยและการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ดังนี้

1. เป็นเชื้อเพลิงที่ถูกกลับนำมาใช้ใหม่และให้พลังงานได้
2. มีจุดวาบไฟ (flash point) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มติดไฟสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซลจากปิโตรเลียม ทำให้มีความปลอดภัยสูงกว่าในการขนส่งและเก็บรักษา
3. ลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ได้อย่างมาก
4. ไม่มีส่วนผสมของซัลเฟอร์ จึงช่วยลดการปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากเครื่องยนต์ดีเซลได้
5. ย่อยสลายตามธรรมชาติได้เร็วเหมือนน้ำตาล dextrose

2.4 กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส(Pyrolysis) [19, 20] คือ กระบวนการแตกตัวหรือสลายตัวของสารประกอบหรือวัสดุต่างๆ ด้วยความร้อนขนาดปานกลาง ที่อุณหภูมิประมาณ 400-800 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน หรือมีออกซิเจนในปริมาณน้อยมาก โดยทั่วไปผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามสถานะคือ แก๊ส ของเหลว (ซึ่งโดยทั่วไปมีคุณลักษณะคล้ายน้ำมัน) และของแข็ง (char) เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ (Primary Products) อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ เช่น อุณหภูมิ อัตราเร็วในการให้ความร้อน เป็นต้น แต่โดยตัวกระบวนการไพโรไลซิสเองแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากที่สุด คือ ของเหลวหรือน้ำมัน ส่วนแก๊สที่ได้นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการไพโรไลซิส

ปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วย ขั้นแรก การสลายตัวของสารที่ระเหยง่ายออกจากวัตถุดิบ (devolatilization) ขั้นที่สอง เป็นการแตกตัวของวัตถุดิบเอง โดยที่องค์ประกอบที่สามารถแตกตัวได้ที่ภาวะที่ใช้ ก็จะแตกตัวออกมาเป็นโมเลกุลที่เล็กลง และเล็กลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่ใช้หรืออุณหภูมิที่กำหนด จนกระทั่งเกิดการแตกตัวที่สมบูรณ์ของวัตถุดิบ โดยอุณหภูมิในแต่ละขั้นแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ แต่อย่างไรก็ตามถ้ามีการให้ความร้อนและเวลายาวเกินไป สารที่ได้จากการแตกตัวของวัตถุดิบจะกลับมารวมตัวกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่อีกครั้งและได้ผลิตภัณฑ์ที่ด้อยคุณภาพจากกระบวนการ ดังนั้นภาวะที่ใช้ในการไพโรไลซิสจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของ

วัตถุดิบที่ใช้ด้วยการมีความรู้ที่ดีเกี่ยวกับวัตถุดิบที่ป้อนเข้าในกระบวนการ จะทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพในปริมาณที่สูง และไม่ก่อให้เกิดผลผลิตที่ไม่ต้องการ หรือก่อให้เกิดผลผลิตที่ทำให้ต้องหยุดการผลิตชั่วคราวเพื่อทำการซ่อมแซมอุปกรณ์

การเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสภายในเครื่องปฏิกรณ์นั้น สารผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่เป็นของเหลวและแก๊สนั้น ในตอนเริ่มต้นของปฏิกิริยาจะเกิดเป็นแก๊สทั้งหมดภายในเครื่องปฏิกรณ์ แต่เมื่อมีการลดอุณหภูมิของสารผลิตภัณฑ์ลงมาที่อุณหภูมิกัดจึงจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวออกมา ดังนั้นในกระบวนการไพโรไลซิสจึงต้องมีส่วนที่ลดความร้อนและควบแน่นผลิตภัณฑ์ของเหลวเพื่อใช้ในการแยกแอกจากแก๊สผลิตภัณฑ์และน้ำมันไพโรไลซิส ส่วนของแข็งที่เกิดระหว่างปฏิกิริยาจะใช้วิธีการแยกออกภายในเครื่องปฏิกรณ์จะติดออกมากับแก๊สผลิตภัณฑ์น้อยมากและภายหลังจากการกลั่น ของแข็งที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสก็จะถูกแยกออกไปอย่างสมบูรณ์ การควบแน่นแก๊สที่เกิดขึ้นนั้นมีผลิตภัณฑ์สถานะแก๊สและของเหลวผสมกันอยู่ ซึ่งจะต้องทำการแยกผลิตภัณฑ์แก๊สและของเหลวออกจากกัน การระบายความร้อนออกจากแก๊สโดยน้ำหล่อเย็นที่ใช้อุณหภูมิตั้งที่ 25-30 องศาเซลเซียส ถ้าแก๊สควบแน่นไม่สมบูรณ์ในแก๊สอาจจะมีส่วนประกอบของน้ำมันปนออกมาเล็กน้อย อีกผลิตภัณฑ์หนึ่งก็คือของเหลวซึ่งมีลักษณะคล้ายน้ำมันดิบนั้น นำไปกลั่นและปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป

ในบางครั้งอาจมีการเติมไฮโดรเจนหรือไอน้ำเข้าไปในกระบวนการไพโรไลซิสด้วย ทั้งนี้เพื่อเพิ่มการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์และบางครั้งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันมีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนจะเข้าไปรบกวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยออกซิเจนที่มีอยู่ในเนื้อของวัตถุดิบ การเติมน้ำในปริมาณไม่มากเกินไปเข้าไปเป็นตัวกลางในกระบวนการไพโรไลซิส จะทำให้ไปเพิ่มความดันให้กับกระบวนการ ทำให้วัตถุดิบเกิดเป็นของไหลได้ง่ายและทำให้ถ่านที่ได้จากกระบวนการมีค่าพื้นที่ผิวสูงขึ้น (ในกรณีที่ต้องการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ หรือถ่านดูดซับ) เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานั้นทำหน้าที่ช่วยในการแตกตัวของวัตถุดิบและช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเฉพาะเจาะจงมากยิ่งขึ้น

2.5 การแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอน

การแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอน [21-23] แบ่งออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

2.5.1 การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน

การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง หากมีการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงได้ดี จะสามารถทำให้การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิง

ที่ต้องการได้มากที่สุด แต่หากมีการให้ความร้อนมากเกินไป อาจทำให้การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมากเกินไป จนได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนภาวะแก๊ส C₁ - C₄ ซึ่งไม่ต้องการและไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนส่วนที่มีแชนโอเลฟิน (olefin) และไดโอเลฟิน (diolefin) อาจทำปฏิกิริยากันเองเนื่องจากมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

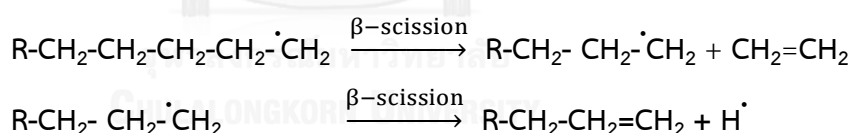
กระบวนการแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (free radical) แบบต่อเนื่องแบบลูกโซ่ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นเริ่มต้น (initiation step) เป็นขั้นตอนในการเกิดอนุมูลอิสระ เนื่องจากความร้อนทำให้เกิดการแตกพันธะของสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอน ได้เป็นอนุมูลอิสระซึ่งจะไปทำปฏิกิริยาในขั้นต่อไป ดังแสดงในสมการที่ 2.1

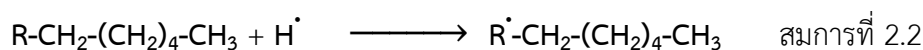


2. ขั้นการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (propagation step) เกิดจากอนุมูลอิสระทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง เกิดการเปลี่ยนรูปของไอโซเมอร์และมีการแตกพันธะเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่สายโซ่สั้นลงพร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้น นอกจากนี้อนุมูลอิสระอาจทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นเกิดเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นอีก ทำให้ได้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่สายโซ่สั้นลงต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.2

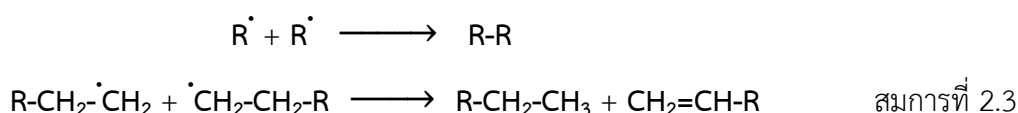
β -scission



Chain transfer



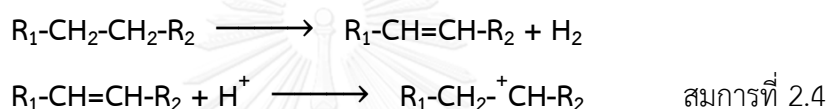
3. ขั้นหยุดปฏิกิริยา (termination step) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากันเองเพื่อหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่องเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจเกิดเป็นโมเลกุลใหม่โมเลกุลเดี่ยวหรือเกิดเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล ดังแสดงในสมการที่ 2.3



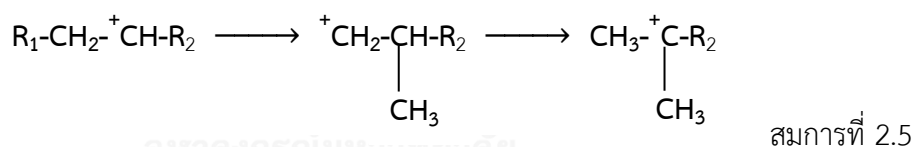
2.5.2 การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการสลายพันธะของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างตามที่ต้องการ กลไกของการแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย

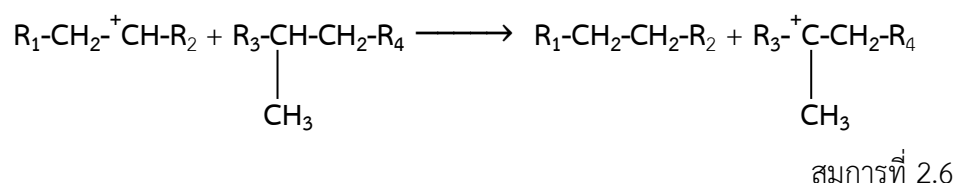
1. การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (dehydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอเนียมไอออน (carbonium ion) คือ การที่โมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรดีไอออน (hydride ion) ซึ่งมีประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดสูง ทำให้คาร์บอเนียมไอออนมีสภาพที่เป็นบวกทางไฟฟ้า โดยคาร์บอเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจะมีความเสถียรภาพแตกต่างกันออกไปตามโครงสร้างของไอออน ซึ่งโครงสร้างของไอออนแบบ tertiary ion จะมีเสถียรภาพที่มากกว่าแบบ secondary ion และแบบ primary ion ตามลำดับ ดังแสดงในสมการที่ 2.4



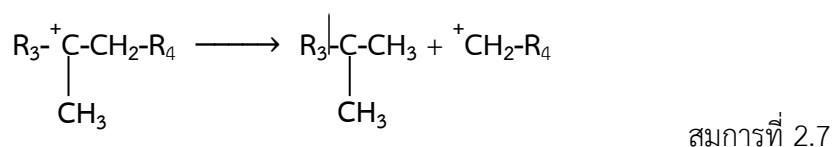
2. การเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลคาร์บอเนียมไอออน ซึ่งเกิดจากความเสถียรที่แตกต่างกันของโครงสร้างของคาร์บอเนียมไอออนแต่ละลักษณะ จึงเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลเพื่อให้ได้โครงสร้างของคาร์บอเนียมไอออนที่มีความเสถียร ดังแสดงในสมการที่ 2.5



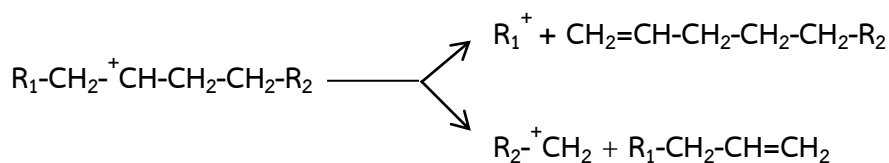
แล้วจึงเกิดการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ (hydride transfer) ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอเนียมไอออนกับโมเลกุลของสายโซ่สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังแสดงในสมการที่ 2.6



คาร์บอเนียมไอออนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยาหรือเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่ง β โดยนับจากจุดที่มีประจุบวก ทำให้ได้สารประกอบโอเลฟินและคาร์บอเนียมไอออนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงโดยส่วนมากมักเป็น primary carbonium ion ดังแสดงในสมการที่ 2.7

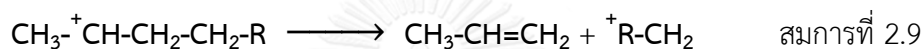


คาร์บอนเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้หลายลักษณะ เช่น ตัวอย่างของ secondary carbonium ion ดังแสดงในสมการที่ 2.8

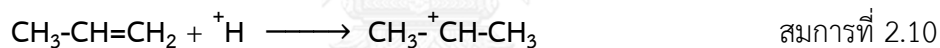


สมการที่ 2.8

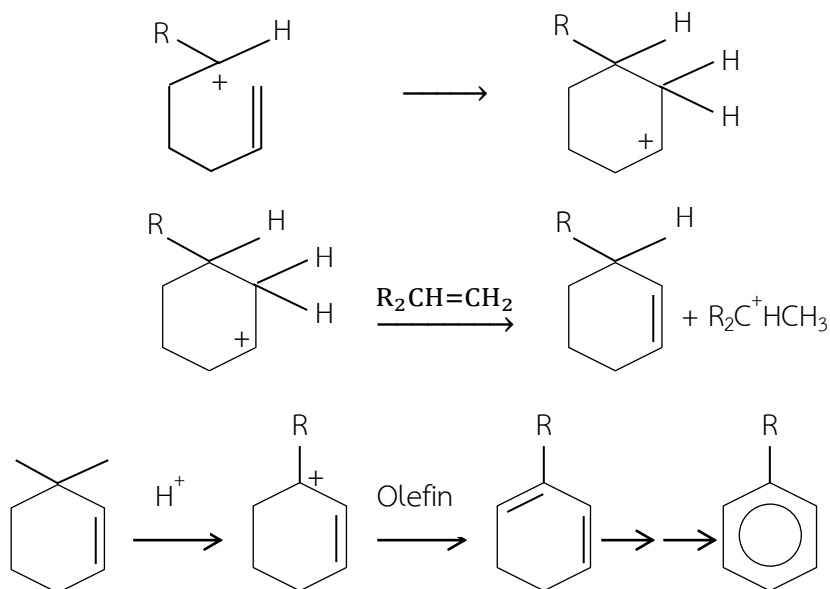
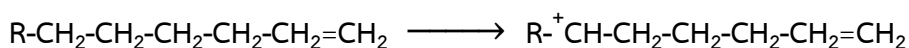
หาก R_1 เป็น H จะสามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว ดังแสดงในสมการที่ 2.9



ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ โพรพีน จะเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนและอยู่ในรูปคาร์บอนเนียมไอออนซึ่งไม่สามารถเกิด β -scission ต่อไปได้อีก ดังแสดงในสมการที่ 2.10



Isopropyl carbonium ion สามารถเกิดปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายไฮโดรด์กับโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นในระบบได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรเพน หรืออาจสูญเสียโปรตอนและได้โพรพีนเป็นผลิตภัณฑ์ สำหรับแอมโรแมติกซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา dehydrocyclization โดยโอเลฟินเกิดเป็นคาร์บอนเนียมไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยา β -scission ได้สารประกอบ olefin carbonium ion มีลักษณะเป็นวงแหวน จากนั้นเกิดปฏิกิริยากับโอเลฟินโดยเกิดการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ไอออนจากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ allylic carbonium ion ที่มีความเสถียรและรับโปรตรอนจาก cyclohexadine สุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะโรมาติก ดังแสดงในสมการที่ 2.11



สมการที่ 2.11

การแตกพันธะโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วย แก๊สที่มีโอเลฟินสูง เกิดเป็นวงเบนซีนที่มีค่าออกเทนสูง เนื่องจากมีสารจำพวกแอโรแมติกและโอเลฟินมาก ส่วนของกากน้ำมันและโค้ก (coke) จะเกาะอยู่บนบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้พื้นที่ผิวและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.5.3 การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมในปฏิกิริยา

กระบวนการนี้เป็นการรวมปฏิกิริยาเกี่ยวกับคาร์โบเนียมไอออนของกระบวนการการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ากับปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน ผลก็คือเกิดผลิตภัณฑ์ที่มีแขนแตกแขนงมาก ปฏิกิริยาของพาราฟิน และแนฟทีน เริ่มต้นจากการเกิดโอเลฟินขึ้นบริเวณที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว โอเลฟินก็จะไปทำให้เกิดคาร์โบเนียมไอออนที่บริเวณที่เป็นกรดต่อไป จากนั้นจะเกิดการแตกตัวแล้วก็จะถูกเติมไฮโดรเจนให้อิ่มตัวทันทีที่ปฏิกิริยาต่างๆเกิดขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นประเภททำหน้าที่สองอย่างคือ ทั้งแตกตัวและเติมไฮโดรเจน จึงมักประกอบด้วยสารพวกซิลิกา-อลูมินา สำหรับการแตกตัวพร้อมด้วยโลหะร่วมกับการเติมไฮโดรเจน โลหะที่ใช้เป็นพวก Rare Earth ที่นิยมคือ Pt, Pd, W และ Ni ปฏิกิริยาเกิดที่ตรงผิวโลหะเป็นการเติมไฮโดรเจน ซึ่งจะช่วยให้บริเวณที่มีฤทธิ์เป็นกรดสะอาดไปด้วย เพราะคอยเติมไฮโดรเจนกำจัดพวกที่จะ

ทำให้เกิดโค้กออกไป ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเป็นซิลิกา-อลูมินาธรรมชาติที่ไม่เป็นผลึก (amorphous) หรือเป็นประเภทผลึกมีซีโอไลท์ (zeolitic) ก็ได้ แบบหลังมีความไวต่อปฏิกิริยามากกว่าแบบแรก แต่ yield หรือ selectivity จะตกเร็วกว่า การเลือกสารเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับว่าต้องการผลิตภัณฑ์แบบไหนมาก

ปฏิกิริยาที่เกิดรวมแล้วจะเป็นประเภทคายความร้อนจึงทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์การออกแบบกระบวนการ จึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิเพิ่มนี้ให้ดีเพราะถ้าคุมไม่อยู่ อาจทำให้เกิดโค้กและตัวเร่งปฏิกิริยาเสียหรือถ้าสูงขึ้นมากทำให้ตัวเครื่องปฏิกรณ์เสียหายได้ จึงจำเป็นต้องมีการจัดส่งแก๊สย้อนกลับ การออกแบบของกระบวนการมีหลายอย่างต่างๆ กัน แล้วแต่วัตถุประสงค์และขึ้นอยู่กับกระบวนการ พร้อมกับปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ ความดันที่ใช้ในกระบวนการราว 1000-2500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ใช้อุณหภูมิใช้อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียสและใช้ไฮโดรเจน 2000 ลูกบาศก์ฟุตต่อบาร์เรล

2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) [24] คือ สารที่เพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นโดยที่ตัวมันเองไม่ถูกใช้อย่างถาวรในปฏิกิริยา แม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีส่วนร่วมในบางขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยา แต่สุดท้ายมันต้องเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปเดิมหลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุดแล้ว การทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยามักจะเกิดขึ้นโดยการเกิดพันธะเคมีกับสารตั้งต้นอย่างน้อยหนึ่งตัว

2.6.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งตามสถานะเทียบกับสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์มี 2 ประเภทคือ

1) ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalysts) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะสถานะเดียวกันกับสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจมีสถานะของเหลวหรือแก๊สก็ได้ ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิตที่เร่งด้วยเอนไซม์ และปฏิกิริยาในสารละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complex) หรือสารประกอบโคออร์ดิเนชัน (coordination compound) ของโลหะแทรนซิชัน ซึ่งโลหะแทรนซิชันมีแนวโน้มในการเกิดสารประกอบโคออร์ดิเนชันได้ง่าย เนื่องจากไอออนบวกของโลหะแทรนซิชันมีออร์บิทัล d ที่ว่างอยู่ จึงสามารถรับอิเล็กตรอนจากลิแกนด์ได้ ไอออนบวกมีขนาดเล็กจึงมีแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนจากลิแกนด์ได้ดี โลหะแทรนซิชันส่วนใหญ่มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่าทำให้เกิดสารประกอบได้หลายรูปแบบ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจน ทำให้ง่ายต่อการศึกษา เนื่องจากวิเคราะห์สารในขั้นตอนต่างๆ ในรูปสารละลายทำได้สะดวกด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี และการหาอุณหภูมิของปฏิกิริยาก็ทำให้ง่ายเช่นกัน ปฏิกิริยาเอกพันธ์ได้รับความสนใจมาก เนื่องจาก

ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่มีความสามารถในการเลือกทำปฏิกิริยาสูง และไวต่อปฏิกิริยา โดยเฉพาะปฏิกิริยาที่คายความร้อน แต่ก็มีข้อเสียคือ มักสลายตัวหรือเสียสภาพในภาวะที่ใช้ความร้อนหรือความดันสูงและการแยกสารผลิตภัณฑ์และตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากกันทำได้ยาก

2) ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalysts) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยา เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สหรือของเหลว การใช้ตัวเร่งแบบวิวิธพันธุ์พบได้ในอุตสาหกรรมหลายๆ อย่าง เช่น ปุ๋ย ผลิตภัณฑ์ยา เชื้อเพลิง เส้นใยสังเคราะห์ ตัวทำละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งนั้นมีความแข็งแรงเชิงกล ทนทานต่อความดันและอุณหภูมิสูง สามารถแยกออกจากสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นได้ง่าย ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นของเหลว สารตั้งต้นมักจะผสมอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ในภาวะที่ต้องการและการแยกผลิตภัณฑ์อาจทำได้โดยการกลั่น สำหรับสารตั้งต้นที่เป็นแก๊สนั้นสารตั้งต้นจะผ่านเข้าไปทางปลายข้างหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์ (reactor) และผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งอยู่บนเบด (bed) เกิดการดูดซับบนผิวหน้าของตัวเร่งก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาบนผิวหน้าซึ่ง อาจเป็นการจับตัวกันของสารตั้งต้นบนผิวหน้า หรือมีการเปลี่ยนโครงสร้าง แล้วสารผลิตภัณฑ์จะหลุดออกจากผิวหน้าผ่านออกมาจากปลายอีกด้านหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ องค์ประกอบว่องไวเพื่อช่วยให้ทำปฏิกิริยา (active component) และตัวรองรับ (support) หรือตัวพา (carrier) มักเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง เพื่อให้เกิดการง่ายต่อการกระจายตัวของสารว่องไวในการทำปฏิกิริยามากขึ้น แต่บางตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีเพียงสารว่องไวเพียงอย่างเดียว

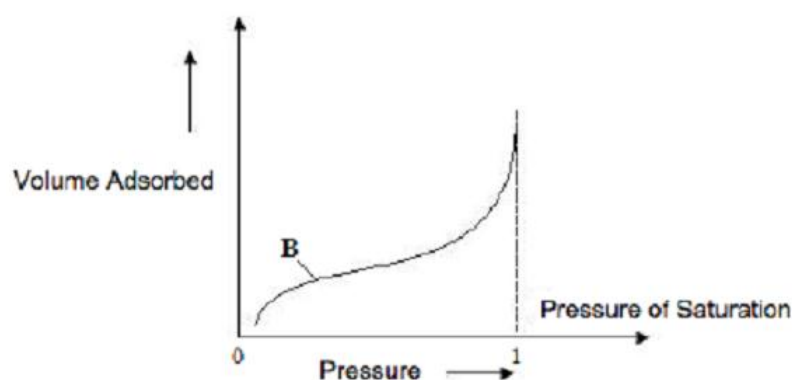
2.6.2 การวิเคราะห์ลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งทางกายภาพและเคมี เป็นสิ่งสำคัญในการอธิบายการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมตามความต้องการ นอกจากนี้การวิเคราะห์ลักษณะด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนโดยใช้วิธีบีอีที (BET) การศึกษาสัญญาณวิทยาดวงกลังจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการศึกษาโครงสร้างของผลึกและวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะทำให้เข้าใจเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนนำไปใช้งาน

1. การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน โดยใช้วิธีบีอีที (BET)

การวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน เป็นขั้นตอนหนึ่งของการศึกษาการเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากพื้นที่ผิวจะเป็นบริเวณที่ใช้วางองค์ประกอบกัมมันต์ที่จะใช้ในการช่วยเกิดปฏิกิริยา การวัดพื้นที่ผิวภายในของวัสดุที่มีความพรุนทำได้โดยการศึกษาการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สที่มีขนาดเล็ก เช่น อาร์กอน โดยใช้ประโยชน์จาก ไอโซเทิร์มของการดูดซับทางกายภาพ หรือวิธีบีอีที (BET ย่อมา

จาก Brunauer-Emmett-Teller Method) ที่อุณหภูมิของแก๊สเหลว (ในที่นี้เป็นอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวหรืออาร์กอนเหลว) ซึ่งขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ โดยจะหาจำนวนโมเลกุลที่ใช้เพื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวภายในได้ การดูดซับของแก๊สไนโตรเจนดังแสดงในภาพที่ 2.10 จะเกิดขึ้นเร็วในช่วงแรกโดยจะเพิ่มตามความดัน จนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนแปลง (ตำแหน่ง B) ซึ่งเส้นกราฟจะราบ แสดงถึงปรากฏการณ์ที่การดูดซับบนพื้นผิวเป็นแบบชั้นเดียว และเมื่อความดันย่อยของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว จะเกิดการควบแน่นของไนโตรเจนเหลวในรูพรุนทำให้ปริมาตรของการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



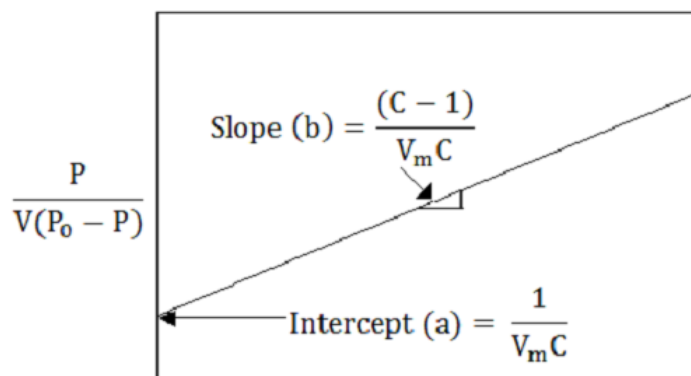
ภาพที่ 2.10 การวัดพื้นที่ผิวโดยใช้วิธีการดูดซับแก๊สด้วยวิธี BET [24]

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดันย่อยต่างๆ และปริมาตรที่ถูกดูดซับแล้วเกิดเป็นการดูดซับชั้นเดียว คือ สมการของบีอีที ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \quad \text{สมการที่ 2.12}$$

- เมื่อ
- P คือ ความดันย่อยของ N_2
 - P_0 คือ ความดันไออิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน ณ อุณหภูมิที่ศึกษา
 - V คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน P
 - V_m คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ทำให้เกิดเป็นการปกคลุมชั้นเดียว
 - C คือ ค่าคงที่

สมการที่ 2.12 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของกราฟเส้นตรง $Y = sx + b$ ได้ เมื่อให้ P/P_0 เป็น x และเทอมทางซ้ายเป็น Y ซึ่งจุดตัดแกน Y คือ ค่า b ซึ่งเท่ากับ $1/V_m C$ และความชัน s คือ $(C-1)/V_m$ ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ผลที่เชื่อถือได้จะอยู่ในช่วงที่มีค่า P/P_0 อยู่ระหว่าง 0.05 และ 0.3



ภาพที่ 2.11 กราฟเส้นตรงของสมการ BET [24]

เครื่องมือนี้สามารถใช้หาขนาดรูพรุนของวัสดุที่มีความพรุนซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 \AA ได้ ยกเว้นในกรณีที่ใช้ความดันสูงเพื่อให้แก๊สไนโตรเจนควบแน่นในรูพรุน ขั้นตอนประกอบด้วยการวัดปริมาตรที่ถูกดูดซับได้ ทั้งในขณะเพิ่มและลดค่า P/P_0 ที่ความดันสัมพัทธ์มีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งแสดงปริมาณการดูดซับเมื่อความดันเพิ่มขึ้น และการคายเมื่อความดันลดลง การควบแน่นจะเกิดขึ้นในรูพรุน สมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณคือสมการของเคลวิน (Kelvin) ดังแสดงในสมการที่ 2.13

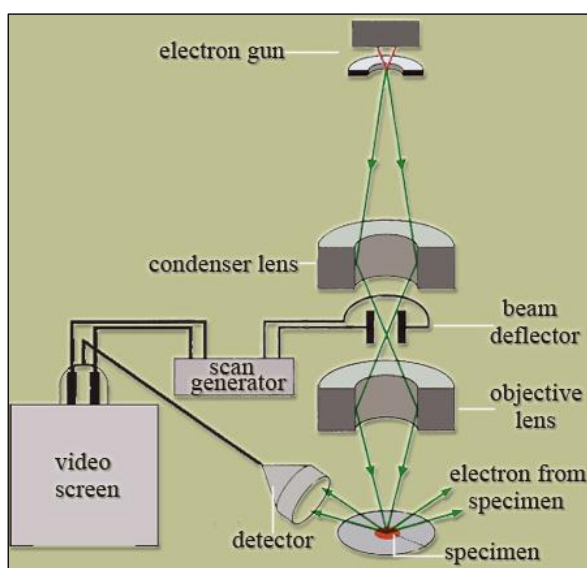
$$\ln(P/P_0) = -2\sigma V \cos\theta / rRT \quad \text{สมการที่ 2.13}$$

เมื่อ	σ	คือ ค่าความตึงผิว (Surface tension) ของไนโตรเจนเหลว
	θ	คือ มุมสัมผัส (Contact angle)
	V	คือ ปริมาตรเชิงโมลของไนโตรเจนเหลว
	r	คือ รัศมีของรูพรุน
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส
	T	คือ อุณหภูมิ
	P	คือ ค่าความดันที่วัดได้
	P_0	คือ ค่าความดันที่เกิดการอิ่มตัว

2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพที่ 2.12 เริ่มจากการผ่านลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่มีขนาดแคบไปบนผิวหน้าตัวอย่างแล้ววัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิหรืออิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับเทียบกับตำแหน่งของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ตำแหน่งของตัวอย่างจะทำให้เกิดคอนทราสต์ กล่าวคือส่วนของผิวหน้าที่หันไปทางตัวตรวจวัด จะสว่างกว่าส่วนของผิวหน้าที่อยู่ตรงข้ามกับตัวตรวจวัด อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ออกมาจากส่วนของผิวหน้ามักจะมีค่าพลังงานต่ำ

(ประมาณ 5-50 eV) อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับจากส่วนที่ลึกจากผิวหน้าจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะผิวหน้าและลักษณะของตัวอย่าง เนื่องจากธาตุหนักจะทำให้เกิดการกระเจิงได้ดีกว่า จึงปรากฏเป็นภาพที่สว่างกว่า



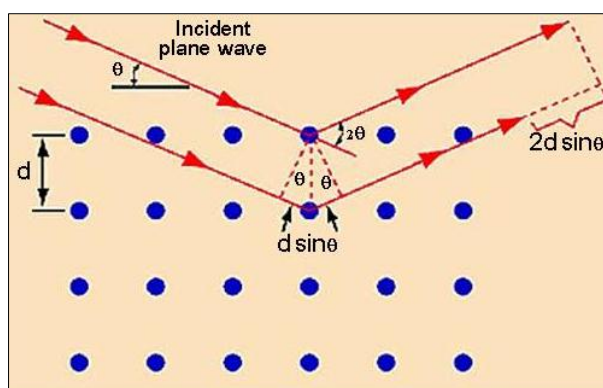
ภาพที่ 2.12 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) [25]

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 ที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะของแต่ละธาตุ อุปกรณ์เสริมแบบ EDX สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่า 11 ได้ ส่วนอุปกรณ์เสริมแบบ WDS สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่า 4 ได้ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ ซึ่งเป็นการวัดปริมาณของธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างซึ่งต้องเทียบกับสารมาตรฐาน สำหรับการวิเคราะห์ธาตุต้องเคลือบตัวอย่างด้วยคาร์บอน เนื่องจากเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ

3. การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกของแข็งในระดับอะตอม ซึ่งสามารถวิเคราะห์ชนิดของวัสดุได้เนื่องจากการเกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จะให้สเปกตรัมที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ สามารถบอกวิญญาคเชิงผลึกของวัสดุได้ว่ามีความเป็นผลึกหรือ

เป็นข้อสังเกต การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา วิวิธพันธ์เพราะสามารถบอกชนิดของสารที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งวัฏภาคของวัสดุได้ขนาดความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ อยู่ในช่วงเดียวกับระยะห่างระนาบอะตอมในผลึกของของแข็ง ซึ่งทำให้รังสีเอกซ์สามารถเกิดการเลี้ยวเบนได้แสดงดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์[26]

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ กับระยะห่างระหว่างระนาบผลึกและมุมตกกระทบสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.14

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad \text{สมการที่ 2.14}$$

สมการที่ 2.14 นี้เรียกว่า Bragg's Equation โดย

n คือ จำนวนเต็ม เรียกว่า อันดับของการสะท้อน (Order of reflection)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีที่ใช้

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

θ คือมุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบของผลึก

ถ้าเราสามารถวัดมุม 2θ ซึ่งเป็นมุมระหว่างรังสีที่เกิดการแทรกสอดกับรังสีตกกระทบ เราจะสามารถหาค่า d ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิดได้

2.7 โดโลไมต์

โดโลไมต์ (Dolomite) [27, 28] หรือเรียกว่า แคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Calcium Magnesium Carbonate : $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ซึ่งจะอยู่ร่วมกับแร่แคลไซต์ (CaCO_3) เสมอและจัดเป็น หินคาร์บอเนต (Carbonate rock) พบโดยทั่วไปในบริเวณที่มีหินชั้นหรือหินตะกอนและหินแปรใน หินปูนโดโลมิติก (Dolomitic limestone) หรือในหินอ่อนโดโลมิติก (Dolomitic Marble) มี ส่วนประกอบทางเคมี คือ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ โดยมี CaO 30.4% MgO 21.7% และ CO_2 47.9% โดย

ปกติโดโลไมต์จะมีสัดส่วนของ CaCO_3 ต่อ MgCO_3 ประมาณ 1:1 มีธาตุเจือปนที่พบอยู่เสมอ คือ เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) โคบอลต์ (Co) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn)

2.7.1 สมบัติของโดโลไมต์

สมบัติทางเคมี

1. ทำปฏิกิริยาในกรดเกลือเจือจางที่อุณหภูมิละลายได้ดีเกิดปฏิกิริยาเป็นฟองเล็กๆ
2. เป็นผงละลายน้ำให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) 9.0-10.71

สมบัติทางกายภาพ

1. สีขาว สีเหลือง สีชมพู สีเทาอมน้ำตาล ผิวมันใสเหมือนแก้ว
2. ความแข็งตามมาตรฐานของ Mohs' scale ประมาณ 3.5-4
3. ไม่โปร่งใสและทึบแสง
4. สีผงสีขาว
5. ความถ่วงจำเพาะ 2.82-2.95
6. ความพรุน 8.6

ลักษณะผลึก

ผลึกอยู่ในรูปผลึกหกเหลี่ยม (hexagonal) ปกติพบอยู่ในรูปขมเปี้ยกปูนหน้าผลึกโค้ง บางครั้งอาจจะโค้งเข้าหากันทำให้มีลักษณะคล้ายอานม้า (saddle-shaped) นอกจากนั้นอาจพบเป็นมวลเม็ดเนื้อหยาบอาจแสดงลักษณะเป็นแผ่นซ้อนกันหรืออาจพบเป็นผลึกเม็ดละเอียดอัดกันแน่น

2.7.2 ลักษณะธรณีวิทยาแหล่งแร่

แหล่งแร่โดโลไมต์ส่วนใหญ่จะเกิดอยู่ร่วมกับหินคาร์บอเนตเนื้อปูน โดยเฉพาะหินปูน ดังนั้นที่ ไหล่ก็ตามที่มีภูเขาหินปูนก็อาจจะมีแร่โดโลไมต์แทรกสลับอยู่ด้วย ลักษณะภูเขาหรือแอ่งของหิน โดโลไมต์ จะมีดินปนทราย หินกรวดมน (conglomerate) และกรวดเหลี่ยม (breccia) ปิดทับ มีสภาพร่วนซุย ซึ่งส่วนมากจะเกิดจากการผุกร่อนของหินประเภทปูนและมีธาตุแมกนีเซียม (Mg) มาก บางครั้งจะพบหินดินดานมารองรับดินตะกอนต่างๆ ที่กล่าวข้างต้นอยู่ และเมื่อพื้นชั้นของหินดินดาน (shale) ก็จะเป็นหินแปรประเภทหินอ่อนที่ปิดทับแร่โดโลไมต์ หรือบางครั้งจะพบแร่โดโลไมต์ที่ตกผลึก แล้วแทรกตัวตามช่องว่างรอยแตกหรือรอยแยก (joint) รอยเลื่อนชนิดปกติ (normal fault) ของการ วางตัวของชั้นหิน มีลักษณะเป็นมวลเม็ดเกาะกันแน่นมีเนื้อเป็นสีขาวเป็นส่วนใหญ่

2.7.3 การกำเนิดของแร่

แร่โดโลไมต์เกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ

1. ผลึกเล็กๆ ของแคลเซียมคาร์บอเนต มีการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างโดยแคลเซียมถูกแทนที่ด้วยแมกนีเซียม ในขณะที่ตะกอนคาร์บอเนตอยู่ในกระบวนการที่จะกลายสภาพเป็นหิน (digenetic replacement) ทำให้ผลึกเล็กๆ เหล่านี้กลายเป็นผลึกของแร่โดโลไมต์
2. แมกนีเซียมเข้ามาตัวเชื่อมระหว่างเม็ดตะกอน (fringe cement) แล้วคงตกค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างผลึกและตะกอนเหล่านั้นแล้วตกผลึกแข็งตัวกลายเป็นแมกนีเซียมคาร์บอเนตในกระบวนการเกิดโดโลมิไทเซชัน (dolomitization) ทั้งนี้ภาวะเหมาะสมของการเกิดแร่โดโลไมต์นั้น จะต้องมีความเข้มข้นของแมกนีเซียมในช่องว่างระหว่างตะกอน ความพรุน และความสามารถให้น้ำทะเลซึมผ่านได้ในชั้นตะกอนของผลึกหินปูน

2.7.4 แหล่งแร่

ในประเทศไทย นั้นพบอยู่ทั่วไปในทุกๆ ภาค ดังนี้

- ภาคกลาง : พบที่ นครสวรรค์ สระบุรี ลพบุรี กาญจนบุรี อุทัยธานี ราชบุรี เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์
- ภาคตะวันออก : พบที่ ชลบุรี จันทบุรี ระยอง ปราจีนบุรี
- ภาคเหนือ : พบที่ แม่ฮ่องสอน เชียงใหม่ ลำปาง เชียงราย แพร่ ลำพูน น่าน อุตรดิตถ์ ตาก กำแพงเพชร สุโขทัย เพชรบูรณ์
- ภาคใต้ : พบที่ ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช สงขลา พัทลุง ตรัง สตูล กระบี่

2.7.5 การจำแนกชื่อของหินปูนและแร่โดโลไมต์

เนื่องจากแร่โดโลไมต์จะพบร่วมกับหินปูนเสมอ ดังนั้นในทางการค้าจึงได้กำหนดปริมาณหรือเปอร์เซ็นต์ของแมกนีเซียมเพื่อจำแนกชื่อของหินปูนและโดโลไมต์ คือ

1. ไลม์สโตน (Limestone) จะมีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ต่ำกว่า 5%
2. โดโลมิติกไลม์สโตน (dolomitic limestone) จะมีแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ระหว่าง 5-18.5%
3. แร่โดโลไมต์ จะมีแมกนีเซียมออกไซด์ มากกว่า 18.5%

2.7.6 ประโยชน์ของโดโลไมต์

ประโยชน์ของโดโลไมต์ มีหลายประการ ดังนี้

1. เป็นหินคลุก (aggregate) สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างงานคอนกรีตและปูนซีเมนต์ทนต่อการขัดสี (abrasion) ทนต่อการผุสลายตัว มี roundness สูง แต่จะต้องไม่มีสารพวกดิน ดินดาน และไฟไรต์ ซึ่งจะเป็นตัวทำให้แร่โดโลไมต์เกิดสภาพเสื่อม
2. เป็นสารเชื้อ (flux) ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก เพื่อเป็นตัวดึงซิลิกาแมงกานีส (silica manganese) ให้กลายเป็นสารมลทิน (slag) ลอยขึ้นบนผิวของน้ำโลหะถลุง เป็นการแยกขจัดสารมลทิน
3. ใช้ในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกชนิดพิเศษ
4. ในอุตสาหกรรมการเกษตร ใช้ปรับความเป็นกรดเป็นด่างของดินหรือการแก้ดินเปรี้ยว และยัง เป็นปุ๋ยของพืชในขณะเดียวกัน โดยแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบของคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) เป็นตัวช่วยย่อยอาหารของพืช นอกจากนี้ใช้ปรับสภาพดินกันบ่อในบ่อเลี้ยง กุ้ง และในบ่อเลี้ยงปลา ให้เหมาะแก่การเลี้ยงสัตว์น้ำ ป้องกันการเกิดก๊าซไข่เน่า (H_2S)
5. ในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เช่น ซีโตรีตเทียม เกลือแมกนีเซียม
6. ใช้ในอุตสาหกรรมใยเทียม ผสมเส้นใยพลาสติกและส่วนผสมทำให้เซอร์ลากันความร้อน
7. ใช้ทำหินประดับ (dimension stone) เช่น โดโลหินขัดแต่งสีเหลี่ยมลูกเต๋า ทนต่อสภาพบรรยากาศโล่งแจ้ง ทนต่อการผุกร่อน (weathering) และไม่มีสารเจือปนที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยากับสภาพภายนอก ทำให้เกิดความคงทนและคงรูปของหิน บางครั้งก็ใช้เป็นหินเกล็ดประดับสวนและตู้ปลาซึ่งจะให้สีสันเป็นที่ดึงดูดใจอีกด้วย
8. ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ เป็นวัสดุทนความร้อน (refractory)
9. ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเป็นตัวฟอกขาวและวัสดุอุดเยื่อกระดาษ (filler)
10. ใช้เป็นสารกรองน้ำให้บริสุทธิ์ (filter)
11. ในอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ใช้ปรับสภาพความเป็นกรดและต่างในกระบวนการผลิต
12. ผลิตโลหะแมกนีเซียม (Magnesium metal)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Stefaniak และคณะ (2002) [5] ศึกษาผลของภาวะที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับจากโดโลไมต์ ต่อสมบัติการดูดซับและความพรุน ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิในการเตรียมที่ 600-800 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการเตรียม 2 และ 8 ชั่วโมง บรรยากาศในการเตรียมได้แก่ อากาศ

คาร์บอนไดออกไซด์ และอาร์กอน และปริมาณต่อการเตรียมในแต่ละครั้งที่ 30 และ 180 กรัม พบว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะทำให้โดโลไมต์เกิดการสลายตัวบางส่วนและเกิดเป็น แมกนีเซียมออกไซด์และแคลไซต์ ระยะเวลาและปริมาณการเตรียมตัวอย่างต่อครั้งที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ตัวดูดซับมีความพรุนลดลง ส่วนการเตรียมภายใต้บรรยากาศของอากาศ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สเฉื่อย พบว่าการเตรียมภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อยให้ความพรุนมากที่สุด สำหรับสมบัติด้านการดูดซับพบว่าระยะเวลาในการเตรียมตัวดูดซับที่นานเกินไปจะทำให้ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ส่วนบรรยากาศในการเตรียมมีผลน้อยมากต่อคุณสมบัติของตัวดูดซับ

Keiko และคณะ (2013) [4] ศึกษาผลของอุณหภูมิในการแคลไซน์โดโลไมต์ธรรมชาติต่อการดูดซับบอเรนโดยได้ศึกษาการเผาโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของอากาศและแก๊สอาร์กอน พบว่า $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ เกิดการเปลี่ยนรูปเป็น $\text{MgO}-\text{CaCO}_3$ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และ CaCO_3 เปลี่ยนรูปเป็น CaO ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพื้นผิวโดยโมลของ Ca/Mg ลดลงจาก 1.6 เป็น 0.6 เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส การเผาที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส ปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียม และพื้นผิวของแมกนีเซียมออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จะดูดซับได้ดีกว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการเผาภายใต้บรรยากาศของอาร์กอนจะดูดซับบอเรนได้ดีกว่าผลลัพธ์ที่เผาภายใต้บรรยากาศของอากาศ

Tani และคณะ (2011) [3] ศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของไตรกลีเซอไรด์ที่มีความจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ในช่วงดีเซล โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาคือ ซิลิกา ถ่านกัมมันต์ ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ที่ใช้แล้วและการเติมแมกนีเซียมออกไซด์ลงบนซิลิกาและถ่านกัมมันต์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 0.1 เมกะปาสคาลในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง และใช้แก๊สไนโตรเจนป้อนแก๊สตัวพา พบว่าการเติมแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 10 ลงบนถ่านกัมมันต์สามารถผลิตน้ำมันได้ร้อยละ 64.9 และน้ำมันที่ได้มีค่าความเป็นกรดต่ำที่สุด เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันในกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระทำให้ได้สารไฮโดรคาร์บอนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดลดลง

Xu และคณะ (2010) [2] ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนจากการไพโรไลซิสน้ำมันถั่วเหลืองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ได้แก่ โปแทสเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมออกไซด์ ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 480-520 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศ พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วย

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างมีค่าความเป็นกรดต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา อะลูมินา MCM-41 และไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของน้ำมันเป็นร้อยละ 3 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความเป็นกรดลดลง นอกจากนี้คุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลที่ได้จากการไพโรไลซิสมีค่าใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมและไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชัน

Niken และคณะ(2011) [29] ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) โดยใช้ซีโอไลต์ ZHM-5 ซีโอไลต์ Beta และซีโอไลต์ Y เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (400-500 องศาเซลเซียส) อัตราส่วนน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วต่อตัวเร่งปฏิกิริยา(6-14) และขนาดรูพรุนของของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน (0.54-0.80 nm) พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่ให้ร้อยละเปลี่ยนแปลงน้ำมันพืชใช้แล้วในช่วง 87.5-92.29 โดยน้ำหนัก แก๊สโซลีนร้อยละ 33.61-37.05 และเชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 46.1-53.4 คือที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 455-463 องศาเซลเซียส อัตราส่วนน้ำมันต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 6-7 ขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ที่ใช้ในปฏิกิริยา และซีโอไลต์ ZHM-5 ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสัดส่วนของแก๊สโซลีนสูงที่สุด

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมโดโลไมต์สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว เนื่องจากโดโลไมต์เป็นแหล่งของแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้านี [2-3] พบว่าแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และสามารถลดความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ด้วยวิธีทางความร้อนโดยการแคลไซน์ การสลายตัวทางความร้อนของโดโลไมต์จะทำให้โดโลไมต์มีคุณสมบัติทางเคมีกายภาพเปลี่ยนไป การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากโดโลไมต์จะได้แมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์เกิดขึ้นและลักษณะพื้นผิวของโดโลไมต์หลังจากการสลายตัวทางความร้อนทำให้โดโลไมต์มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ [4-6] และตัวเร่งปฏิกิริยา [7-8]

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีไมต์ สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการโฟโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วและศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการโฟโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์เพื่อให้ได้ร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวมากที่สุดและมืองค์ประกอบที่ดีที่สุด

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

1) เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle furnace) ให้อุณหภูมิสูงสุด 1200 องศาเซลเซียส มีปริมาตรขนาด 7 ลิตร ประตูเป็นแบบเปิดจากด้านล่างขึ้นด้านบน (Parallel upward opening) ช่วยป้องกันความร้อนภายในเตาให้กับผู้ใช้และมีระบบ Positive break safety switch ซึ่ง heater จะถูกตัดไฟอัตโนมัติเมื่อประตูเปิด

2) เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (Micro reactor) รูปทรงกระบอก ปริมาตร 70 มิลลิลิตร ทำจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม SS 316 โดยด้านบนมีชุดฝาปิดทำจากสแตนเลสเหนียวอย่างดี ประกอบด้วยชุดอุปกรณ์สำหรับอัดแก๊ส วาล์วนิรภัยสามารถทำการทดลองภายใต้ภาวะที่ทนความร้อนได้ถึง 500 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะพาสคัล และช่องใส่เทอร์โมคัปเพิลสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างทำการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กขนาด 70 มิลลิลิตร

3) ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัลทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ให้ความร้อนและตัดการจ่ายกระแสเมื่อได้อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ มีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิได้ในระดับ ± 10 องศาเซลเซียส

- 4) อุปกรณ์ให้ความร้อนแรงดัน 230 โวลต์ กำลัง 350 วัตต์
- 5) เทอร์โมคัพเพิล (Thermocouple) เป็นแบบเค (K-Type) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิโดยจะแสดงผลที่ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ
- 6) เครื่องเขย่าโดยมีมอเตอร์เป็นชุดกำลังขับเคลื่อนแกนหมุน สามารถปรับความเร็วรอบการเขย่าได้จากชุดควบคุมความเร็ว ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ชุดทดลอง อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล หม้อแปลงไฟฟ้าและเครื่องเขย่า

- 7) ชุดกรองสุญญากาศ ประกอบด้วยชุดเครื่องแก้วต่อกับเครื่องปั๊มอากาศเพื่อทำการกรองแยกแบบสุญญากาศ สำหรับแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็งโดยใช้กรองใยแก้วดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ชุดกรองสุญญากาศ

- 8) เครื่องซังน้ำหนัก ซังได้ละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 9) เครื่องซังน้ำหนัก ซังได้ละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 10) นาฬิกาจับเวลา
- 11) ตู้อบ
- 12) ถ้วยเผา (Crucible)
- 13) เครื่องแก้ว ประกอบด้วยปิ๊กเกอร์ และขวดใส่สารตัวอย่าง

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

1) เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometer) ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยเป็นรุ่น PE 2400 ยี่ห้อ Siemens ดังแสดงในภาพที่ 3.4 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง



ภาพที่ 3.4 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์

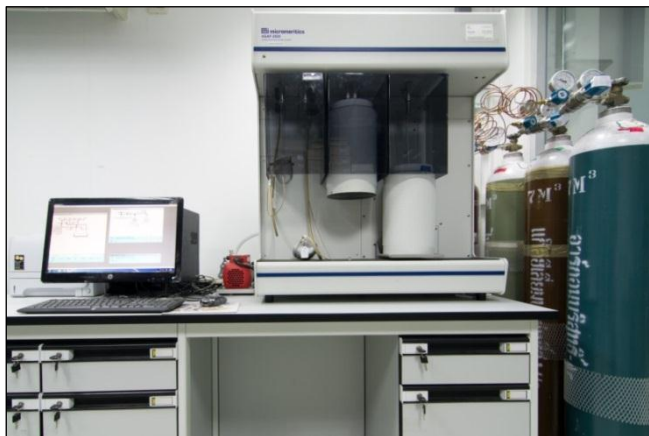
2) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer) ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยเป็นรุ่น D8 Discover ยี่ห้อ Bruker ดังแสดงในภาพที่ 3.5 เป็นเครื่องมือที่สามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ



ภาพที่ 3.5 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์

3) เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (Surface area and porosity analyzer) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นรุ่น ASAP2020 ยี่ห้อ Micromeritic ดังแสดงในภาพที่ 3.6 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของสารตัวอย่าง (surface area) ขนาดรูพรุน (pore diameter) และปริมาตรรูพรุน

(pore volume) ด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจนโดยอาศัยหลักการของวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET)



ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน

4) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นรุ่น JSM-5800 LV ยี่ห้อ JEOL ดังแสดงในภาพที่ 3.7 เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน (morphology) ของตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 3.7 เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส

1) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulation distillation Gas Chromatography Analyzer) ดังแสดงในภาพที่ 3.8 สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวตามคาบจุดเดือด โดยใช้มาตรฐานการวิเคราะห์ตาม ASTM D2887 ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890 ยี่ห้อ Agilent ซึ่งใช้คอลัมน์ชนิด capillary รุ่น DB-1 ขนาด 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร ซึ่งมี 100% Dimethylpolysiloxane หนา 0.25 ไมโครเมตรเป็น

วิภูภาคนี้ ซึ่งสามารถใช้ได้ ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 350 องศาเซลเซียสและซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulation distillation software)



ภาพที่ 3.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น

2) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas chromatography mass spectrometer, GC-MS) ยี่ห้อ Agilent ดังแสดงในภาพที่ 3.9 โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890 โดยมีเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น GCMS5975 เป็นดีเทคเตอร์ ซึ่งใช้ Capillary column รุ่น HP-5MS ขนาด 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร ซึ่งมี 100% Dimethylpolysiloxane หนา 0.25 ไมโครเมตรเป็นวิภูภาคนี้ ซึ่งสามารถใช้ได้ ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 350 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.9 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

3) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) รุ่น 7820A ยี่ห้อ Agilent ดังแสดงในภาพที่ 3.10 ประกอบด้วยดีเทคเตอร์ 2 ตัวคือ Flame Ionization Detector (FID) และ Thermal Conductivity Detector (TCD) สำหรับวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊ส



ภาพที่ 3.10 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

4) เครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ รุ่น 848 Trinoplus ยี่ห้อ Metrohm ดังแสดงในภาพที่ 3.11 สำหรับวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของของแข็งเพลิงเหลว



ภาพที่ 3.11 เครื่องมือสำหรับวัดค่าความเป็นกรดของน้ำมัน

3.3 สารตั้งต้นและสารเคมี

- 1) น้ำมันพืชใช้แล้ว
- 2) โดโลไมต์จากแหล่งกาญจนบุรี
- 3) แก๊สไฮโดรเจนความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99
- 4) โทลูอีน (Toluene) เกรดการค้า

3.4 การดำเนินการวิจัย

- 1) วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเทคนิคต่างๆ ดังต่อไปนี้

- วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์
- วิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชใช้แล้วตามวิธี AOCS1993Ce2-66Ce1-62
- วิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวในช่วงคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น
- วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเทคนิค Thermo Gravimetric Analysis

2) วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของโดโลไมต์ด้วยเทคนิคต่างๆ ดังต่อไปนี้

- วิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุองค์ประกอบของโดโลไมต์ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry
- วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของโดโลไมต์ด้วยเทคนิค Thermo Gravimetric Analysis

3) เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ โดยแคลไซน์โดโลไมต์ในเตาเผาอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิและเวลาที่ต้องการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.1 และเก็บตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ไว้ในตู้ดูดความชื้น จนกว่าจะนำไปใช้งาน

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการเตรียมโดโลไมต์สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิในการเผา (องศาเซลเซียส)	เวลาในการเผา (ชั่วโมง)
700 - 2	700	2
700 - 3	700	3
800 - 2	800	2
800 - 3	800	3
900 - 2	900	2
900 - 3	900	3
1000 - 2	1000	2
1000 - 3	1000	3

- 4) วิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ด้วยเทคนิคต่างๆ ดังต่อไปนี้
 - โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)
 - ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
 - พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจากวิธีดูดซับแก๊สไนโตรเจนด้วยเทคนิค BET
- 5) การศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว
 - 5.1) นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว ภายใต้ภาวะต่าง ๆ ดังนี้
 - อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส
 - เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที
 - ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์
 - ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น
 - 5.2) คำนวณหาร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว ของแข็ง และแก๊ส
 - 5.3) ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเชื้อเพลิงเหลวด้วยเทคนิคต่างๆดังนี้
 - วิเคราะห์หาสัดส่วนของเชื้อเพลิงเหลวตามมาตรฐาน ASTM D2887 ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น
 - วิเคราะห์หาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์
 - วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของเชื้อเพลิงเหลวตามมาตรฐาน ASTM D664 ด้วยเครื่องไทเตรตแบบอัตโนมัติ
 - 5.4) เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถเปลี่ยนน้ำมันพืชใช้แล้วไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีองค์ประกอบที่ดีที่สุด
- 6) การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลสามระดับ ได้แก่ ระดับสูง (+1) ระดับต่ำ (-1) และระดับกลาง (0) โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา 2 ตัวแปรคือ เวลาในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และการทดลองแบบแฟคทอเรียลสามระดับของการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาคาร์โบโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

ตัวแปร	ระดับ		
	ระดับต่ำ (-1)	ระดับกลาง(0)	ระดับสูง (+1)
A ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1	3	5
B เวลา (นาที)	30	45	60

ตารางที่ 3.3 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลสามระดับของการคาร์โบโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

ภาวะที่ใช้ทดลอง			
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)
450	1	1	30
450	1	1	45
450	1	1	60
450	1	3	30
450	1	3	45
450	1	3	45
450	1	3	45
450	1	3	45
450	1	3	45
450	1	3	60
450	1	5	30
450	1	5	45
450	1	5	60

- 7) ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเชื้อเพลิงเหลว โดย
 - วิเคราะห์หาสัดส่วนของเชื้อเพลิงเหลวตามมาตรฐาน ASTM D2887 ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น
 - วิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์
 - วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของเชื้อเพลิงเหลวตามมาตรฐาน ASTM D664 ด้วยเครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ
- 8) หากภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซ์น้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์เพื่อให้ได้สัดส่วนของเชื้อเพลิงเหลวมากที่สุดและมีองค์ประกอบที่ดีที่สุดโดยใช้โปรแกรม Design Expert (รุ่น 7.0.0)
- 9) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณและผลที่ได้จากการทดลองจริง

3.5 วิธีการทดลอง

- 1) ชั่งน้ำหนักน้ำมันพีซีแล้ว 20 กรัมพร้อมกับเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง บนตึกน้ำหนัก
- 2) ชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาจากโคโลไมต์ตามปริมาณที่ต้องการด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง บนตึกน้ำหนัก
- 3) เติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุน้ำหนักน้ำมันพีซีแล้ว จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักเครื่องชั่งแบบละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่งและบนตึกน้ำหนัก
- 4) ปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ให้เรียบร้อย แล้วนำเครื่องปฏิกรณ์ไปใส่อากาศที่อยู่ภายในออกโดยผ่านแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปอย่างช้าๆ แล้วอัดแก๊สไฮโดรเจนจนได้ความดันที่กำหนด โดยสังเกตความดันจากเกจวัดความดันที่ต่อระหว่างถังบรรจุแก๊สไฮโดรเจนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ทำการตรวจสอบรอยรั่วของแก๊สตามข้อต่อของเครื่องปฏิกรณ์ หากปรากฏว่าไม่มีรอยรั่วของแก๊สไฮโดรเจนค่อยๆ หมุนวาล์วปิดเพื่อไม่ให้แก๊สออก
- 5) นำเครื่องปฏิกรณ์ต่อเข้ากับชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์และต่ออุปกรณ์ขดลวดความร้อนแบบเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์แล้วหุ้มด้วยฉนวนทับเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง จากนั้นต่อเทอร์โมคัพเปิลเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์
- 6) ปรับกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าให้กับขดลวดให้ความร้อนและเปิดสวิตช์เครื่องเขย่า

7) เริ่มทำการจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์คงที่ตามที่กำหนด เมื่อครบเวลาที่ทำการปฏิบัติแล้ว นำฉนวนและขดลวดความร้อนออก รอจนอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้องจึงทำการปล่อยแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ออก

8) แยกผลิตภัณฑ์เหลวออกจากกากของแข็งโดยการกรองผลิตภัณฑ์เหลวด้วยอุปกรณ์การกรองแบบสุญญากาศ กระจกกรองที่ใช้ต้องเป็นแบบใยแก้ว แยกส่วนที่เป็นของเหลวเก็บไว้ในขวดแก้วเพื่อนำไปวิเคราะห์ ล้างเครื่องปฏิกรณ์ด้วยสารละลายโทลูอีน เช็ดทำความสะอาดด้วยกระดาษที่ขังน้ำหนักเตรียมไว้

9) นำส่วนที่เป็นของแข็งและกระดาษซับไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งเพื่อคำนวณหาร้อยละของการเปลี่ยนแปลงต่อไป



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

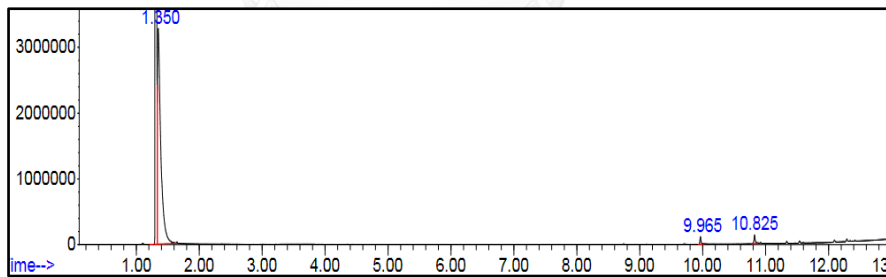
งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลการแคลไซน์โดโลไมต์ต่อไฟโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยได้ศึกษาปัจจัยของ อุณหภูมิในการแคลไซน์ เวลาในการแคลไซน์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และหาภาวะที่เหมาะสมในการไฟโรไลซิส น้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ เพื่อให้ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุด และมีสมบัติและองค์ประกอบทางเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับน้ำมัน

4.1 สมบัติและองค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้ว

งานวิจัยนี้ใช้น้ำมันพืชใช้แล้วเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการไฟโรไลซิส โดยมีการศึกษา วิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของน้ำมันพืชใช้แล้วดังต่อไปนี้

4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้วเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ แสดงในภาพที่ 4.1 และตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้วที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้วที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

เวลา (retention time)	องค์ประกอบ
1.350	carbon disulfide (solvent)
9.965	n-hexadecanoic acid (palmitic acid)
10.825	9-octadecenoic acid (oleic acid)

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้วเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ประกอบด้วยพีค 3 พีค ได้แก่ ที่เวลา (retention time) 1.350, 9.965 และ 10.825 นาที ซึ่งองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้ คือ คาร์บอนไดซัลไฟด์ซึ่งเป็นตัวทำละลาย กรดไขมันปาล์มิติก (Palmitic acid, C16:0) และกรดไขมันโอเลอิก (Oleic acid : C18:1) ตามลำดับ น้ำมันพืชใช้แล้วที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากน้ำมันปาล์มจึงพบกรดไขมันปาล์มิติกและกรดไขมันโอเลอิกเป็นองค์ประกอบหลัก

4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชใช้แล้ว

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชใช้แล้ว

องค์ประกอบของกรดไขมัน	น้ำมันพืชใช้แล้ว (กรัม/100มิลลิกรัม)
Caprylic acid (C8:0)	0.04
Capric acid (C10:0)	0.02
Lauric acid (C12:0)	0.24
Myristic acid (C14:0)	0.82
Pentadecylic acid (C15:0)	0.04
Palmitic acid (C16:0)	41.07
Margaric acid (C17:0)	0.08
Stearic acid (C18:0)	3.85
Arachidic acid (C20:0)	0.30
Behenic acid (C22:0)	0.05
Tricosanoic acid (C23:0)	0.01
Lignoceric acid (C24:0)	0.06
<i>Total saturated fatty acid</i>	<i>46.58</i>
Palmitoleic acid (C16:1)	0.14
Oleic acid (C18:1)	43.8
Linoleic acid (C18:2)	8.59

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชใช้แล้ว

องค์ประกอบของกรดไขมัน	น้ำมันพืชใช้แล้ว (กรัม/100มิลลิกรัม)
Linolenic acid (C18:3)	0.12
Cardic acid (C20:1)	0.12
Nervonic acid (24:1)	0.05
<i>Total unsaturated fatty acid</i>	<i>52.82</i>
Unidentified peak	0.60

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชใช้แล้วตามวิธี AOCS 1993Ce2-66Ce1-62 แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าน้ำมันพืชใช้แล้วประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวร้อยละ 46.58 ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของกรดไขมันอิ่มตัวจะอยู่ในรูปกรดปาล์มิติก และมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ร้อยละ 52.82 ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวจะอยู่ในรูปกรดไขมันโอเลอิก ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ที่พบองค์ประกอบ กรดไขมันปาล์มิติก และกรดไขมันโอเลอิก เพียง 2 ชนิด ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันปาล์ม

4.1.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันพืชใช้แล้ว

ตารางที่ 4.3 ค่าความร้อนน้ำมันพืชใช้แล้วเทียบกับน้ำมันปาล์ม

ชนิดน้ำมัน	ค่าความร้อน (MJ/Kg)	ปริมาณกรดไขมันอิสระ	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)
น้ำมันปาล์ม [15]	39.550	-	-
น้ำมันพืชใช้แล้ว	39.027	1.23	2.69

ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันพืชใช้แล้วตามมาตรฐาน ASTM D2270 แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าค่าความร้อนของน้ำมันพืชใช้แล้วมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันปาล์มซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เมื่อวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D664 พบว่าน้ำมันพืชใช้แล้วมีค่าความเป็นกรด 2.69 mg KOH/g สูงกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงานคือต้องไม่สูงกว่า 0.5 mg KOH/g ยังไม่ควรนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง

เนื่องจากความเป็นกรดสูงอาจก่อให้เกิดการกัดกร่อน (corrosion) และทำให้เครื่องยนต์ได้รับความเสียหายได้

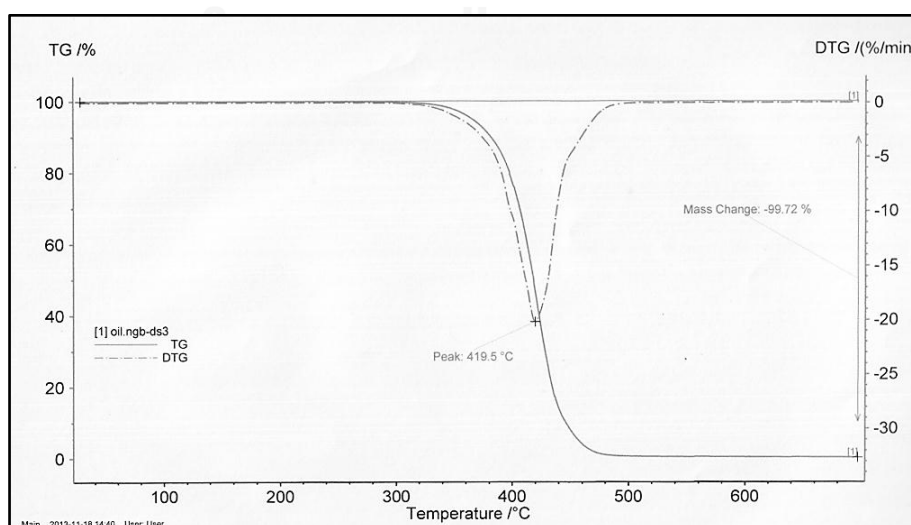
4.1.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันพีซีใช้แล้วตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของน้ำมันพีซีใช้แล้วตามคาบจุดเดือด

จุดเดือด(องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบ	ร้อยละองค์ประกอบ
IBP-200	แนฟทา(C ₅ -C ₁₂)	3.47
200-250	เคโรซีน(C ₁₂ -C ₁₅)	0.00
250-370	ดีเซล(C ₁₅ -C ₃₃)	29.07
370-FBP	กากน้ำมัน(>C ₃₃)	67.46

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันพีซีใช้แล้วตามคาบจุดเดือดแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าน้ำมันพีซีใช้แล้วประกอบด้วยกากน้ำมันมากที่สุด คือ ร้อยละ 67.46 และพบสัดส่วนของแนฟทาและดีเซลเพียงร้อยละ 3.47 และ 29.07 ตามลำดับ เนื่องจากยังมีกากน้ำมัน (long residue) จำนวนมากถึงร้อยละ 67.46 ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงสมบัติก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง

4.1.5 การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วด้วยเทคนิค Thermo Gravimetric Analysis (TGA)



ภาพที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้ว

ผลการวิเคราะห์น้ำมันพีชใช้แล้วด้วยเทคนิค TGA ดังภาพที่ 4.2 พบว่าในช่วงแรกจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส น้ำหนักของน้ำมันพีชใช้แล้วไม่มีการเปลี่ยนแปลง กราฟจึงมีลักษณะคงที่เป็นเส้นตรง แต่ช่วงอุณหภูมิ 400-450 องศาเซลเซียส เส้นกราฟมีลักษณะชัน น้ำหนักของน้ำมันพีชใช้แล้วมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการสลายตัวทางความร้อน โดยน้ำมันพีชใช้แล้วมีการสลายตัวมากที่สุดที่อุณหภูมิ 419.50 องศาเซลเซียส และสลายตัวร้อยละ 99.72 ที่อุณหภูมิ 449.90 องศาเซลเซียส หลังจากอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส กราฟเริ่มคงที่ ซึ่งหลักการของการทดลองไพโรไลซิสน้ำมันพีชใช้แล้วเป็นการให้ความร้อนในเตาแก้วเพื่อสลายพันธะของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวเป็นสถานะแก๊สและเกิดการควบแน่นของแก๊สไฮโดรคาร์บอนเล็กๆเป็นของเหลว ในการทำงานวิจัยนี้จึงเลือกทำการทดลองที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่น้ำมันพีชใช้แล้วมีการสลายตัวทั้งหมด

4.2 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

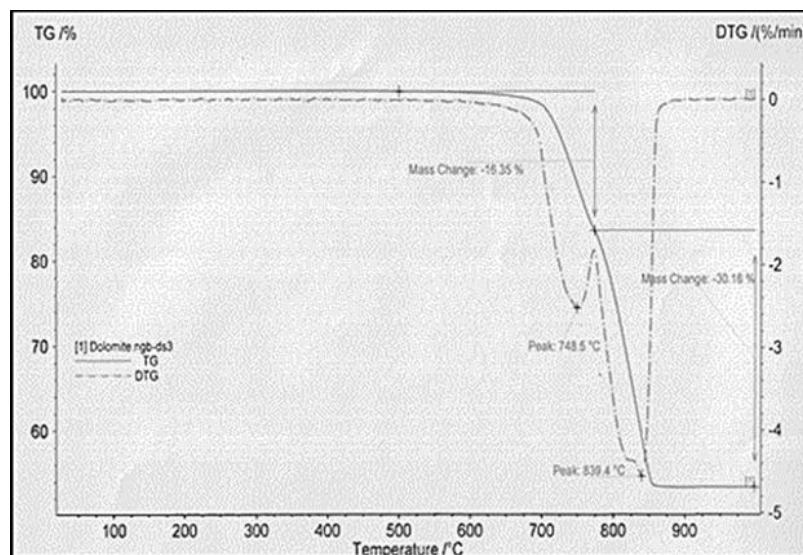
4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดโลไมต์ด้วยเทคนิค XRF

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดโลไมต์ด้วยเทคนิค XRF แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของโดโลไมต์ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 48.70 และแมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 12.08

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบของโดโลไมต์

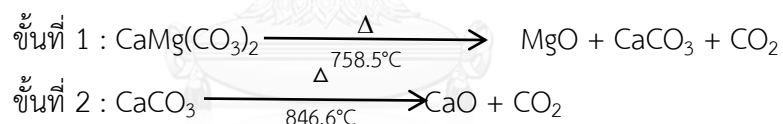
Compound	Concentration(%wt)
CaO	48.70
MgO	12.08
SiO ₂	0.30
Al ₂ O ₃	0.19
Te	0.12
Fe	0.11
Other	38.50

4.2.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิกการสลายตัวของโดโลไมต์ด้วยเทคนิค Thermo Gravimetric Analysis (TGA)



ภาพที่ 4.3 อุณหภูมิกการสลายตัวของโดโลไมต์

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิกการสลายตัวของโดโลไมต์ด้วยเทคนิค TGA แสดงในภาพที่ 4.3 พบว่าโดโลไมต์เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 2 ขั้นตอน คือ

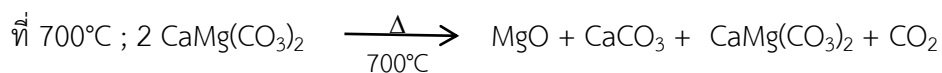


ขั้นที่ 1 ที่อุณหภูมิ 758.5 องศาเซลเซียส โดโลไมต์มีการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 16.35 ส่วนขั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิ 846.6 องศาเซลเซียส โดโลไมต์มีการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 30.16 หลังจากอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ไม่พบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของโดโลไมต์ แสดงผลได้จากกราฟคงที่เป็นเส้นตรง โดโลไมต์มีการสูญเสียน้ำหนักทั้งสิ้นร้อยละ 46.46 ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในองค์ประกอบของโดโลไมต์คือร้อยละ 47.9 โดยน้ำหนักตามทฤษฎี ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการแคลไซน์โดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 700-1000 องศาเซลเซียส เพื่อให้ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวของโดโลไมต์ทั้ง 2 ขั้นตอน

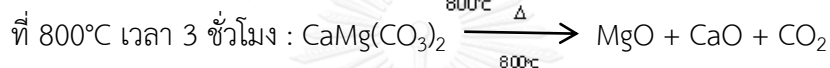
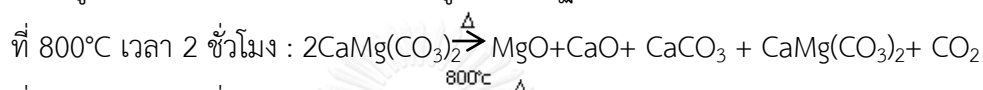
4.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของโดโลไมต์ก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยเทคนิค XRD

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของโดโลไมต์ก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยเทคนิค XRD แสดงในภาพที่ 4.4 พบว่าโดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์มีองค์ประกอบของแคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) หรือโดโลไมต์ และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) หรือแคลไซต์ เมื่อทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส รูปแบบ XRD มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยฟีกของโดโลไมต์มีความ

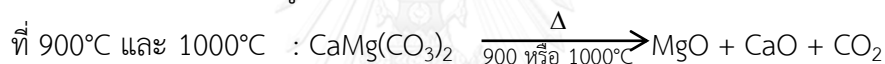
เข้มข้นลง และพบฟลักของแมกนีเซียมออกไซด์เกิดขึ้นแต่มีความเข้มข้นต่ำ ส่วนฟลักของแคลไซต์จะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและความเข้มข้นของฟลักแคลไซต์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการแคลไซน์จาก 2 ชั่วโมง เป็น 3 ชั่วโมง

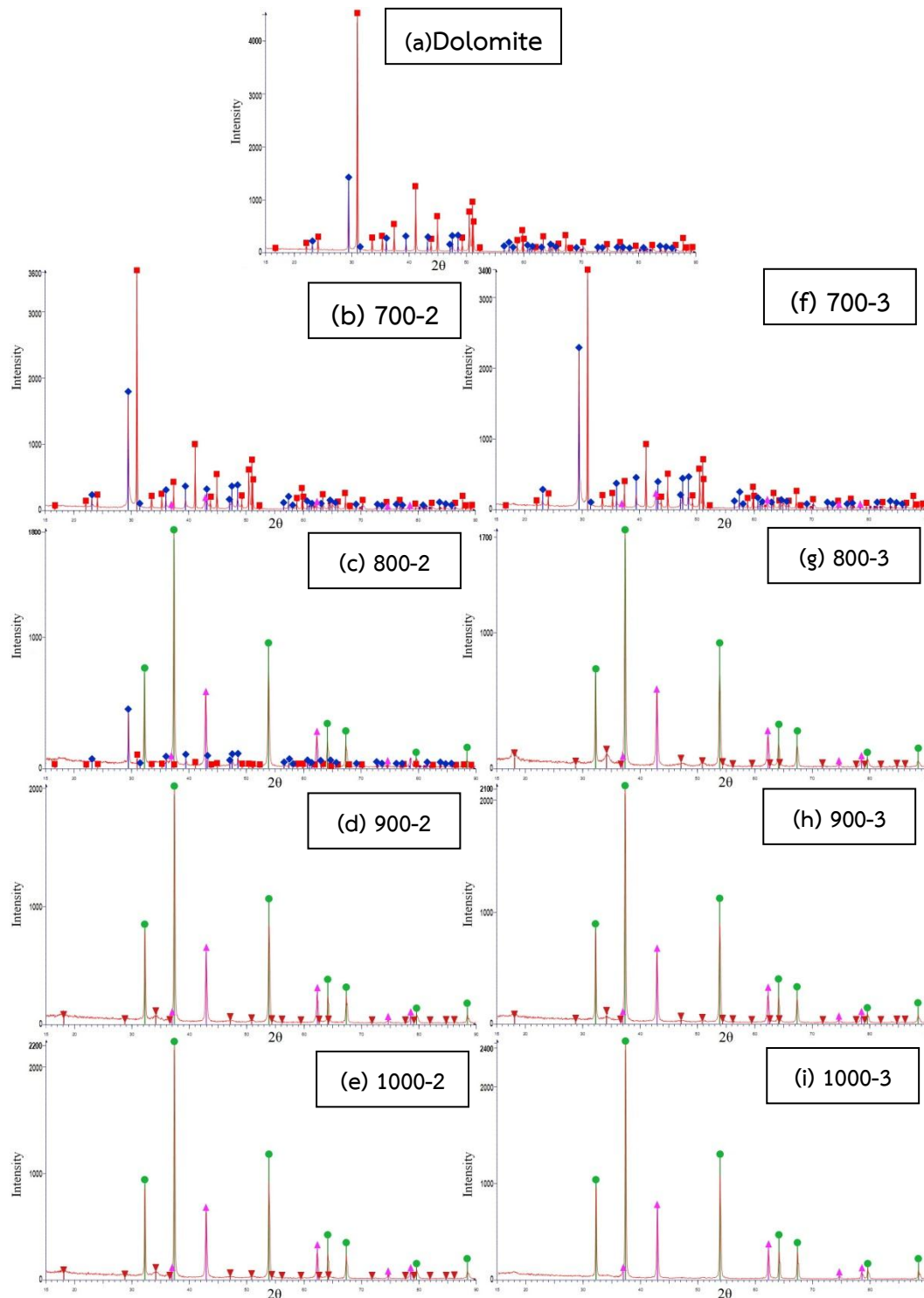


เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์ขึ้นเป็น 800 องศาเซลเซียส พบว่ามีฟลักของแคลเซียมออกไซด์เกิดขึ้นที่เวลาในการแคลไซน์ 2 ชั่วโมง พบฟลักของโดโลไมต์และแคลไซต์เล็กน้อย เมื่อเพิ่มเวลาในการแคลไซน์เป็น 3 ชั่วโมง ไม่ปรากฏฟลักโดโลไมต์และแคลไซต์ โดยปรากฏเฉพาะฟลักของแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ โดยพอจะอธิบายได้ว่าเมื่อเวลาแคลไซน์ผ่านไป 3 ชั่วโมง หมู่คาร์บอเนตถูกขจัดออกจากโดโลไมต์อย่างสมบูรณ์ผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอเนชัน



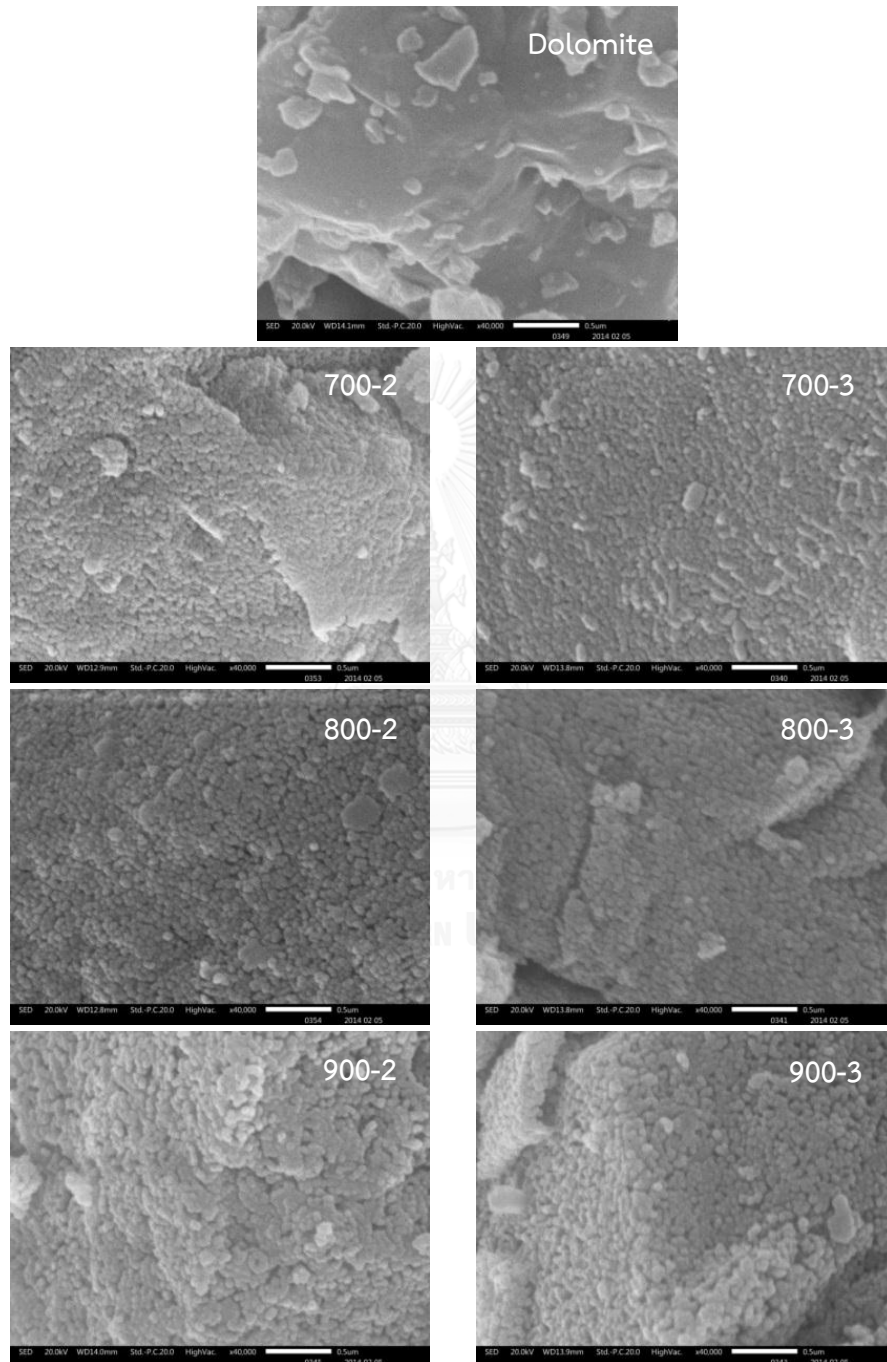
สำหรับการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสและ 1000 องศาเซลเซียส หมู่คาร์บอเนตถูกขจัดออกจากโดโลไมต์อย่างสมบูรณ์ตั้งแต่ที่เวลาในการแคลไซน์ 2 ชั่วโมง



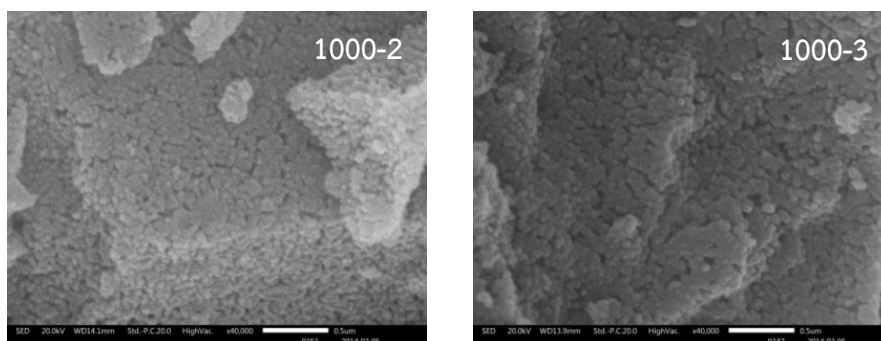


ภาพที่ 4.4 รูปแบบ XRD ของ(a)โดโลไมต์ธรรมชาติ ส่วน(b-i)คือโดโลไมต์ที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700-1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 และ 3 ชั่วโมง สัญลักษณ์ ■ โดโลไมต์ ◆ แคลไซต์ ▲ แมกนีเซียมออกไซด์ ● แคลเซียมออกไซด์ ▼ แคลเซียมไฮดรอกไซด์

4.2.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโดโลไมต์ก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



ภาพที่ 4.5 รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโดโลไมต์ธรรมชาติและโดโลไมต์ที่แคลไซน์ที่ภาวะต่างๆ ที่กำลังขยาย 40,000 เท่า



ภาพที่ 4.5 (ต่อ) รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโดโลไมต์ธรรมชาติ และโดโลไมต์ที่แคลไซน์ที่ภาวะต่างๆ ที่กำลังขยาย 40,000 เท่า

ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโดโลไมต์ก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 40,000 เท่า แสดงในภาพที่ 4.5 พบว่าโดโลไมต์ธรรมชาติ ก่อนการแคลไซน์มีพื้นผิวเรียบ ไม่มีรูพรุน หลังการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พื้นผิวของโดโลไมต์มีความขรุขระเพิ่มขึ้นและมีลักษณะของรูพรุนเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดการสลายตัวของ หมู่คาร์บอเนตในโดโลไมต์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแก๊สที่เกิดจากการสลายตัวนี้กระตุ้นให้เกิดรูพรุน

4.2.5 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรรูพรุนของโดโลไมต์ก่อนและหลังการแคลไซน์ ด้วยเทคนิค BET

ตารางที่ 4.6 พื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

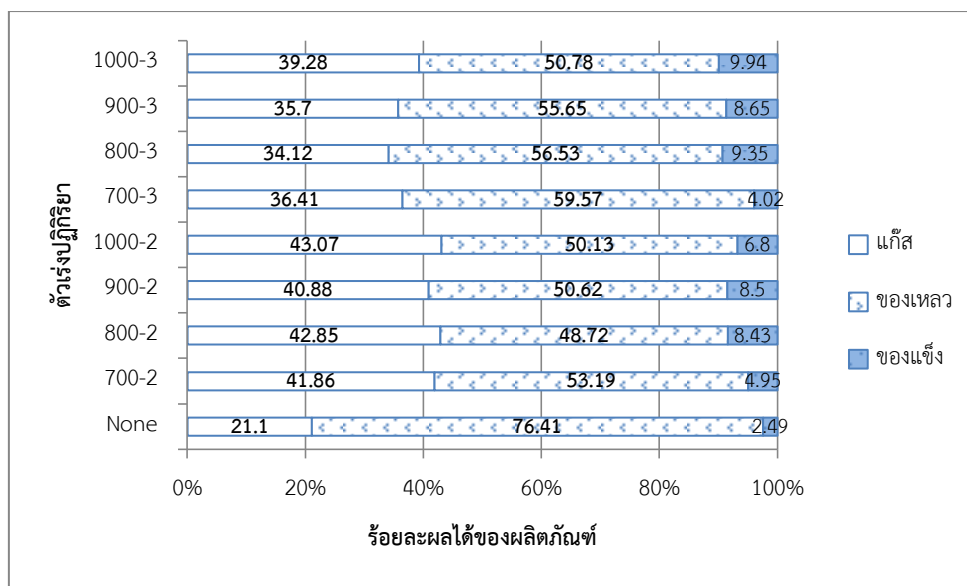
ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวทั้งหมด(S_{BET}) (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาตรรูพรุน(Pore volume) (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)	ขนาดรูพรุน(Pore size) (อังสตรอม)
โดโลไมต์	1.6252	-	-
700-2	2.4041	0.005795	96.4262
700-3	1.9860	0.007150	144.0137
800-2	18.1975	0.090077	197.9979
800-3	17.1381	0.082871	193.4195
900-2	16.2439	0.073218	180.2980
900-3	15.8789	0.069207	174.3357
1000-2	15.5450	0.061273	157.6652
1000-3	15.0758	0.048019	127.4066

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรรูพรุนของโพลีไมด์ก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยเทคนิค BET แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าโพลีไมด์ธรรมชาติมีพื้นที่ผิว 1.6252 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนไม่สามารถหาค่าได้ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโพลีไมด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่พบว่าโพลีไมด์ก่อนการแคลไซน์มีลักษณะพื้นที่ผิวที่เรียบ ไม่มีความขรุขระและไม่มีรูพรุน เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสทำให้โพลีไมด์มีพื้นที่มากขึ้นและมีรูพรุนเกิดขึ้น โพลีไมด์มีพื้นที่ผิวมากที่สุดที่เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการแคลไซน์จะทำให้โพลีไมด์มีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนมีค่าลดลงเนื่องจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานอาจทำให้โพลีไมด์เกิดการหดตัวทางความร้อน ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดพื้นที่ผิว รูพรุนและขนาดของรูพรุน นำมากำหนดเป็นปัจจัยที่ใช้ในการทดลองนี้ เนื่องจากขนาดของรูพรุนมีผลต่อการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันทำให้ได้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัวมากขึ้น เมื่อพิจารณาจากขนาดของรูพรุนและปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการแคลไซน์ช่วยให้ผลหินต่างๆ รวมถึงการจัดเรียงผลึกของโพลีไมด์มีความเป็นรูพรุนมากขึ้นและสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะส่งเสริมปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น แต่เมื่อพิจารณาจากขนาดของรูพรุนพบว่ามีความรูพรุน 96.42-197.99 อังสตรอม จัดว่าเป็น mesoporous

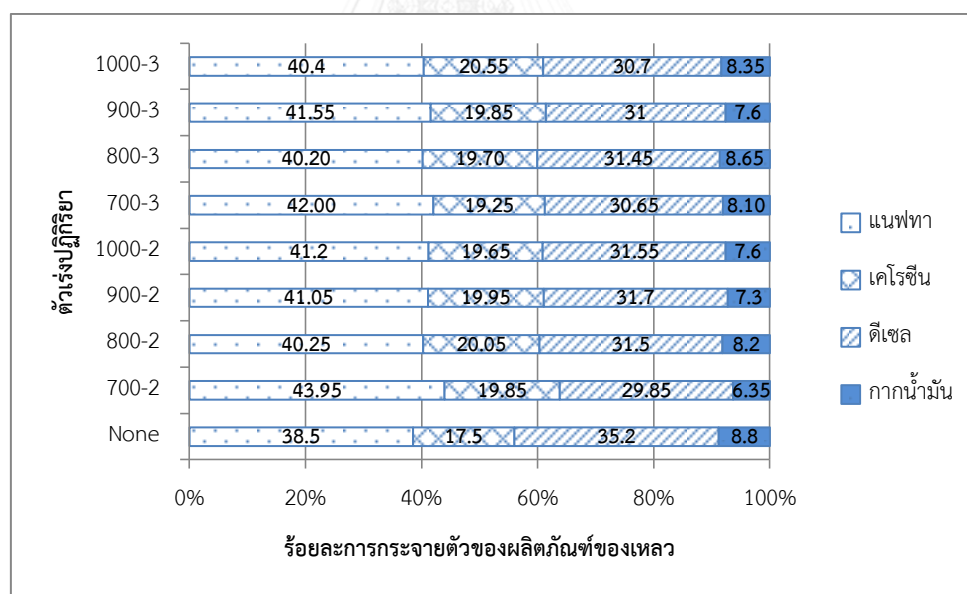
4.3 อิทธิพลของภาวะในการเตรียมโพลีไมด์สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว

4.3.1 อิทธิพลของภาวะในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีไมด์

การศึกษาอิทธิพลของภาวะในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีไมด์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที แสดงในภาพที่ 4.6 และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีไมด์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที แสดงในภาพที่ 4.7



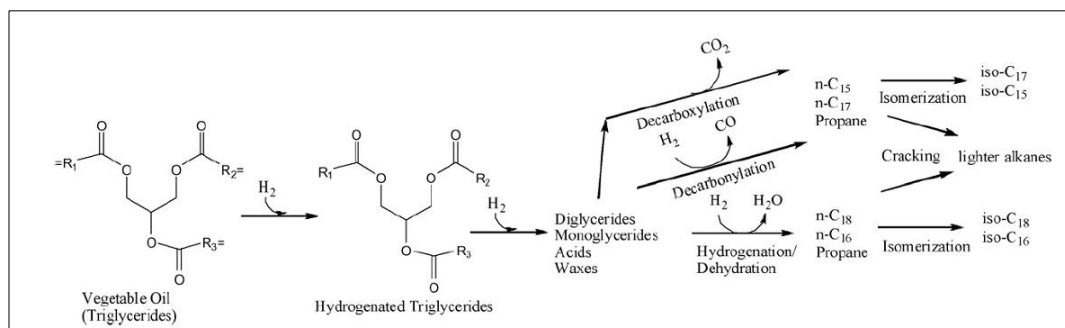
ภาพที่ 4.6 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



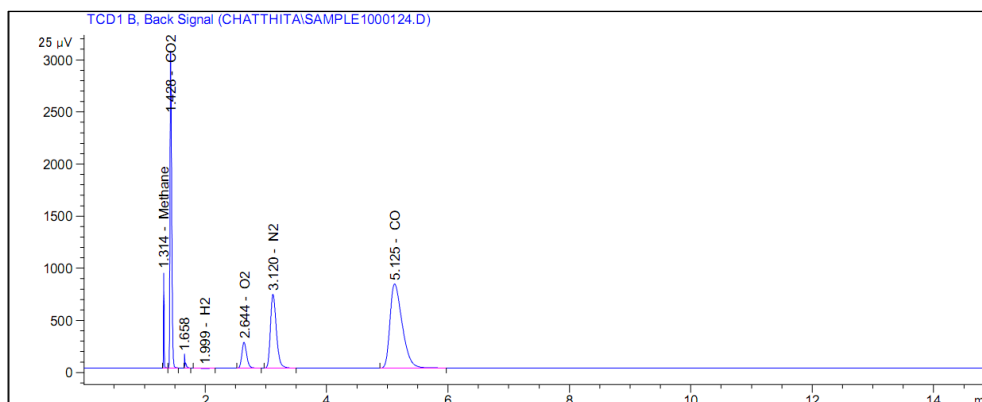
ภาพที่ 4.7 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ภาพที่ 4.6 แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1

บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีเมตต์ส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวลดลงและผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีเมตต์ประกอบด้วยของเหลวร้อยละ 48.73-59.57 โดยน้ำหนัก และแก๊สร้อยละ 34.12-42.15 โดยน้ำหนัก เมื่อไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 76.41 โดยน้ำหนัก และแก๊สร้อยละ 21.10 โดยน้ำหนัก และภาพที่ 4.7 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีเมตต์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีเมตต์จะทำให้ผลิตภัณฑ์เหลวมีองค์ประกอบเนฟทาเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส น้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีเมตต์ประกอบด้วยเนฟทาร์้อยละ 40.20-43.95 เมื่อไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้เนฟทาร์้อยละ 38.50 เนื่องจากอุณหภูมิมีบทบาทอย่างมากต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในรูปไตรกลีเซอไรด์ได้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง และเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันหรือปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้สารไฮโดรคาร์บอน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แสดงในภาพที่ 4.8 ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการเก็บตัวอย่างแก๊สที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ พบว่ามีพีคของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ปรากฏขึ้น แสดงในภาพที่ 4.9 จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเข้ามามีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและการเติมไฮโดรเจน ซึ่งเกิดบริเวณที่ผิวสัมผัสสุรพุนของตัวเร่งปฏิกิริยาโพลีเมตต์ โดยการเติมไฮโดรเจนทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางที่มีความอิ่มตัวมากขึ้นและเมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยาดำเนินต่อไป อิทธิพลของอุณหภูมียังมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวด้วยความร้อนทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางแตกตัวต่อไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กและแก๊สไฮโดรคาร์บอนตามลำดับ



ภาพที่ 4.8 ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นแอลเคนภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน [30]

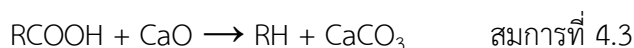
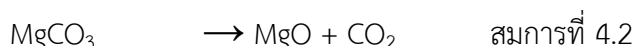
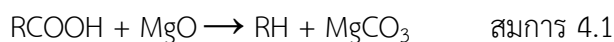


ภาพที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพีชใช้แล้วด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวตรวจวัดแบบ TCD

อิทธิพลของอุณหภูมิในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพีชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ พบว่าเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในเฟสเดียวกันคือ เฟสที่ประกอบด้วยโดโลไมต์ แคลไซต์และแมกนีเซียมออกไซด์ หรือเฟสที่ประกอบด้วยแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพีชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการแคลไซน์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการแคลไซน์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณออกไซด์มีสัดส่วนเพิ่มขึ้น ในขณะที่หมู่คาร์บอนเนตในโดโลไมต์ลดลง ปริมาณสัดส่วนที่ว่างไว้ต่อการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอซิเลชันเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากปฏิกิริยาจึงเพิ่มขึ้น

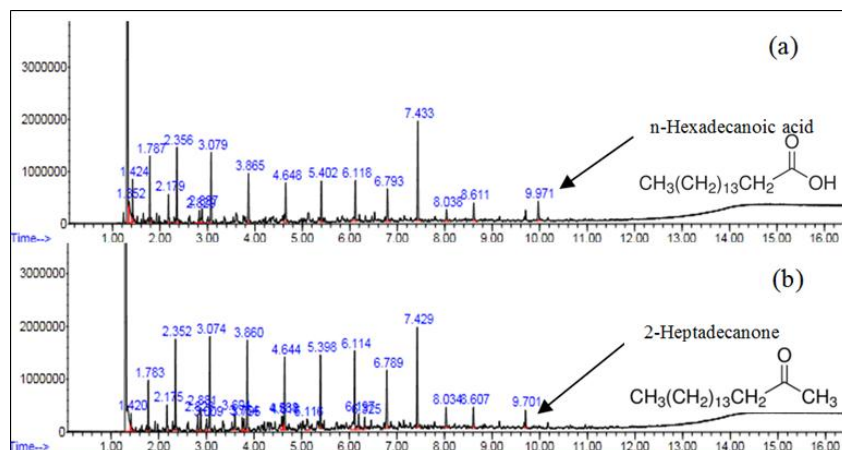
อิทธิพลของเวลาในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพีชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ พบว่าที่อุณหภูมิในการแคลไซน์เดียวกัน เวลาในการแคลไซน์ที่เพิ่มขึ้นผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ลดลง เนื่องจากตัวเร่งที่เตรียมที่เวลาในการแคลไซน์ 3 ชั่วโมง มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากกว่าตัวเร่งที่เตรียมที่เวลาในการแคลไซน์ 2 ชั่วโมง ซึ่งแคลเซียมออกไซด์เมื่อเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอซิเลชันจะได้สารไฮโดรคาร์บอนและแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งค่อนข้างเสถียร จึงยากที่จะกลับมาอยู่ในรูปของออกไซด์ใหม่อีกครั้ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นน้อยลง ทำให้ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดีคาร์บอซิเลชันมีปริมาณลดลง สังเกตได้จากผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่การแคลไซน์ที่ตั้งแต่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป ตัวเร่งปฏิกิริยามีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ส่งผลให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tani และคณะ(2011) โดยแมกนีเซียมออกไซด์ส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอซิเลชัน โดยแมกนีเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอซิลิกจะได้สารไฮโดรคาร์บอนและแมกนีเซียมคาร์บอเนตแสดงในสมการ 4.1 โดยแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่

เกิดขึ้นจะสลายตัวกลับมาอยู่ในรูปของออกไซด์ใหม่อีกครั้งหนึ่ง ภายใต้ภาวะปฏิกิริยาเดียวกัน (อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์) แสดงในสมการที่ 4.2 เมื่อใช้แคลเซียมออกไซด์แทน แมกนีเซียมออกไซด์จะได้แคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งค่อนข้างเสถียรแสดงในสมการที่ 4.3



เมื่อทำการทดลองโดยใช้วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิและเวลาต่างกันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดของผลิตภัณฑ์น้ำมัน เหนือจากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีแล้วที่ให้ความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่แตกต่างกับการใช้ปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนอย่างสิ้นเชิง โดยพบว่าร้อยละการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียวให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางจำนวนมาก โดยอธิบายได้จากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงในการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีแล้วทำให้อุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อการแตกสลายพันธะของไตรกลีเซอไรด์ซึ่งประกอบด้วยหมู่คาร์บอนิลและหมู่ไฮดรอกซีของกรดคาร์บอกซิลิก เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงเกิดการแตกพันธะไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิมิมีผลต่อการแตกตัวด้วยความร้อน เมื่อยังได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิมีบทบาทอย่างมากต่อปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนเกิดการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นขนาดเล็กและแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กต่อไป ในขณะที่การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ แม้ว่าในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว อุณหภูมิจะมีผลอย่างมากต่อการสลายพันธะของไตรกลีเซอไรด์ แต่การที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวสัมผัสและมีพื้นที่ผิวรูพรุนจำนวนมากจึงเป็นการส่งเสริมปฏิกิริยาการถ่ายโอนและการเติมไฮโดรเจนที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ไปยังโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง ทำให้มีความอึดตัวมากขึ้น จึงพบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีแล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ให้ร้อยละการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดเป็นแนพทาสูงกว่าการแตกตัวด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียวและพบว่ากากน้ำมัน (long residue) มีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญจึงพออธิบายได้ว่า บทบาทของการแตกตัวด้วยความร้อนและการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการแตกตัวสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ไปเป็นขนาดกลางและขนาดเล็กตามลำดับ รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีนชันช่วยให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีความอึดตัวมากขึ้นด้วย

4.3.2 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์



ภาพที่ 4.10 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เป็นเวลา 40 นาที (a) ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (b) ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชใช้แล้ว

เมื่อนำผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เป็นเวลา 40 นาที ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ จะได้โครมาโทแกรมดังภาพที่ 4.10 ซึ่งผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้การไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะพบองค์ประกอบของ n-hexadecanoic acid ซึ่งเป็นกรดไขมันพาล์มิติก ในขณะที่ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้การไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ไม่พบองค์ประกอบของกรดไขมันดังกล่าวในผลิตภัณฑ์เหลวเป็นการยืนยันว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดไขมัน เนื่องจากในช่วงแรกการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์เป็นกรดไขมัน จากนั้นความร้อนจะช่วยสลายพันธะกรดไขมันผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันหรือปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้สารไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่การแตกตัวด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะสลายพันธะของกรดไขมันได้ทั้งหมดจึงพบกรดไขมันพาล์มิติกในผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้การไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวทางความร้อนจะเกิดขึ้นพร้อมกับการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโดยบทบาทของตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ซึ่งประกอบด้วยแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์จะส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดไขมัน ทำให้กรดไขมันสลายตัวได้มากขึ้น จึงไม่พบองค์ประกอบของกรดไขมันในผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ สำหรับการพบองค์ประกอบของ 2-Heptadecanone นั้นอาจเกิดจากการแตกตัวที่ไม่สมบูรณ์ของกรดไขมัน นอกจากการแตกตัวด้วย

ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน กรดไขมันที่เกิดขึ้นอาจเกิดการแตกตัวแบบ γ -hydrogen transfer ซึ่งเป็นการแตกตัวของกรดคาร์บอกซิลิกแบบ γ -hydrogen อาจเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นเมทิลคีโตนได้เช่นกัน แต่เมทิลคีโตนที่เกิดขึ้นสามารถแตกตัวต่อได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอลเคนหรือแอลคีนและคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยอุณหภูมิมีบทบาทอย่างมากต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในรูปไตรกลีเซอไรต์ได้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง และเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันหรือปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้สารไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการเก็บตัวอย่างแก๊สที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่ามีพีคของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ปรากฏขึ้น จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเข้ามามีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและการเติมไฮโดรเจน ซึ่งเกิดบริเวณที่ผิวสัมผัสรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน โดยการเติมไฮโดรเจนทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางที่มีความอิ่มตัวมากขึ้นและเมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยาดำเนินต่อไป อิทธิพลของอุณหภูมิยังมีผลต่อการแตกตัวด้วยความร้อนทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางแตกตัวต่อไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กและแก๊สไฮโดรคาร์บอนตามลำดับ

4.3.3 ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว

ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากดีโอไซด์ แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากดีโอไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)
ไม่เติม	49.57
700-2	0.65
700-3	1.64
800-2	0.13
800-3	0.31
900-2	0.11
900-3	0.29
1000-2	0.08
1000-3	0.09

เมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรดในตารางที่ 4.7 พบว่าค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์มีค่าต่ำกว่าค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเมื่อของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์เกิดการแตกตัวด้วยความร้อนจะได้กรดไขมัน จากนั้นความร้อนจะช่วยสลายพันธะกรดไขมันผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันหรือปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้สารไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวทางความร้อนจะเกิดขึ้นพร้อมกับการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโดยบทบาทของตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ซึ่งประกอบด้วยแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์จะส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดไขมัน ทำให้กรดไขมันสลายตัวได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่พบพิกของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ในผลิตภัณฑ์แก๊สและผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ที่ไม่พบองค์ประกอบของกรดไขมันปาล์มติกในผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ จึงทำให้ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์มีค่าต่ำกว่าค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และจากงานวิจัยก่อนหน้า [2,3] พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสเช่น MgO CaO และ CaCO₃ สามารถลดค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวได้ เนื่องจากการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิจะมีผลอย่างมากต่อการสลายพันธะของไตรกลีเซอไรด์ การที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีองค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์จะส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดไขมันได้สารไฮโดรคาร์บอนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และจากการที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวสัมผัสและมีพื้นที่ผิวรูพรุนจำนวนมากจึงเป็นการส่งเสริมปฏิกิริยาการถ่ายโอนและการเติมไฮโดรเจนที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง ทำให้มีความอึดตัวมากขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากการการแคลไซน์ที่เวลา 2 ชั่วโมงสามารถลดค่าความเป็นกรดได้ดีกว่าการแคลไซน์ที่เวลา 3 ชั่วโมง เนื่องจากการแคลไซน์ที่เวลา 3 ชั่วโมงมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์มากกว่าตัวเร่งที่เตรียมที่เวลาในการแคลไซน์ 2 ชั่วโมง ซึ่งแคลเซียมออกไซด์เมื่อเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันจะได้สารไฮโดรคาร์บอนและแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งค่อนข้างเสถียร จึงยากที่จะกลับมาอยู่ในรูปของออกไซด์ใหม่อีกครั้ง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากการแคลไซน์ที่เวลา 2 ชั่วโมงจึงมีความสามารถในการทำปฏิกิริยามากกว่า ค่าความเป็นกรดจึงต่ำกว่า สำหรับอุณหภูมิในเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสไม่เพียงพอที่จะเตรียมโดโลไมต์สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิดังกล่าวมีแมกนีเซียมเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยและพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซลตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงานค่าความเป็นกรดต้องไม่

สูงกว่า 0.5 mg KOH/g ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพียงพอที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว

4.4 อิทธิพลที่มีผลต่อการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

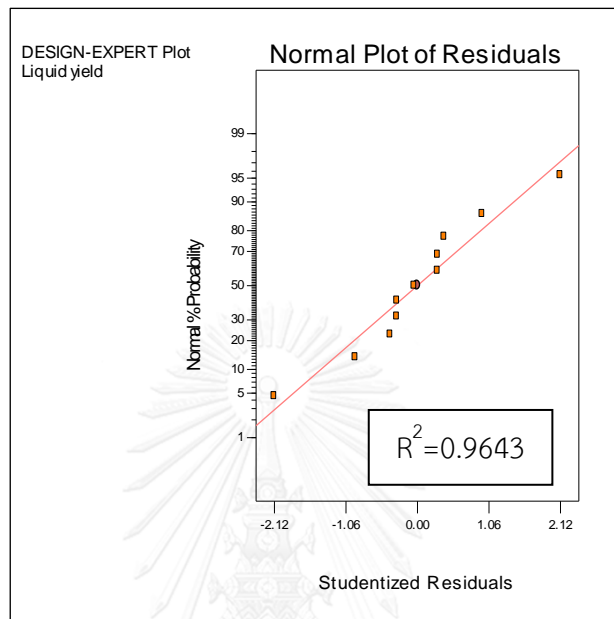
4.4.1 อิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

การออกแบบการทดลองแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียลเพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาในการทำปฏิกิริยา มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 11 ทดลอง ผลของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวอยู่ในช่วงร้อยละ 38.08-69.03 โดยน้ำหนัก

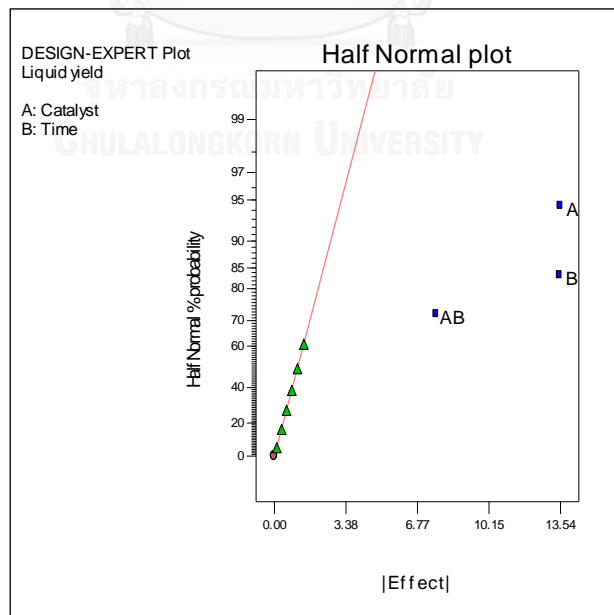
ตารางที่ 4.8 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

การทดลอง	ตัวแปร		ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
	A-ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	B-เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	
1	1	30	68.06
2	1	30	69.03
3	1	60	62.06
4	1	60	63.35
5	5	30	62.18
6	5	30	63.16
7	5	60	38.08
8	5	60	44.93
9	3	45	59.16
10	3	45	54.95
11	3	45	57.58

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.8 มาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่างๆโดยใช้โปรแกรม Design-Expert จาก normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวแสดงในภาพที่ 4.11 พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีค่า $R^2=0.9643$ แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปวิเคราะห์ทางสถิติต่อไปได้



ภาพที่ 4.11 normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์



ภาพที่ 4.12 half normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

ตารางที่ 4.9 ANOVA ของการวิเคราะห์หาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	848.59	3	282.86	54.03	< 0.0001
A-Catalyst	366.53	1	366.53	70.01	0.0002
B-Time	364.64	1	364.64	69.64	0.0002
AB	117.43	1	117.43	22.43	0.0032
Curvature	10.49	1	10.49	2	0.2066
Pure Error	31.41	6	5.24		

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.12 half normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ซึ่งแสดงถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลว โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจะเบี่ยงเบนจากข้อมูลอื่นที่อยู่บนเส้นตรง พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุดคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (A) เวลาในการทำปฏิกิริยา (B) และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาในการทำปฏิกิริยา (AB) ตามลำดับ เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert ดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าตัวแปรดังกล่าวมีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรดังกล่าวมีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวของการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์จากการคำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert พบว่าสมการที่บอกถึงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์คือ

$$\text{Liquid yield} = +58.86 - 6.77A - 6.75B - 3.83AB$$

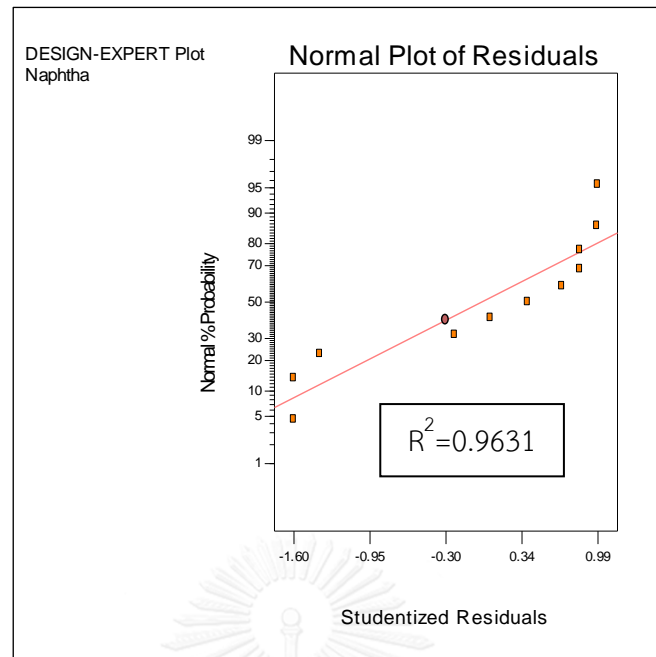
4.4.2 อิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

การออกแบบการทดลองแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียลเพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลต่อร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาในการทำปฏิกิริยา มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 11 ทดลอง ผลของร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวอยู่ในช่วงร้อยละ 32-48 โดยน้ำหนัก

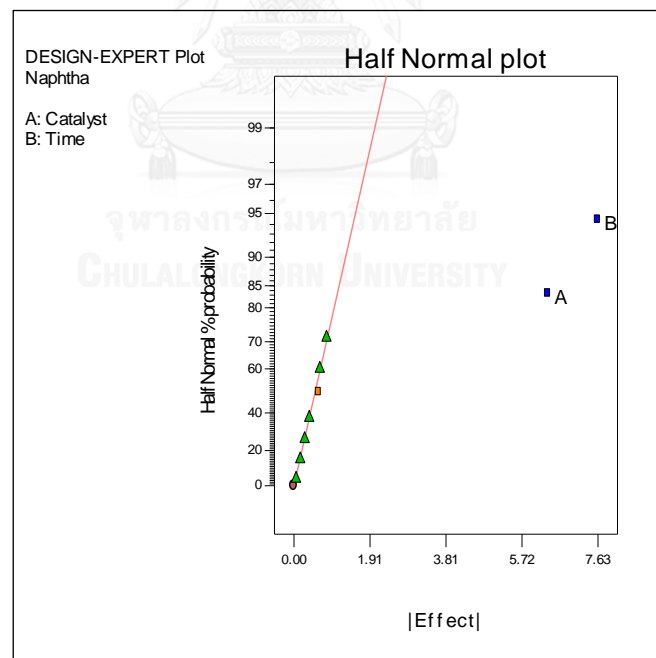
ตารางที่ 4.10 ร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

การทดลอง	ตัวแปร		ร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
	A-ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	B-เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	
1	1	30	34.0
2	1	30	32.0
3	1	60	41.0
4	1	60	41.5
5	5	30	39.5
6	5	30	40.5
7	5	60	48.0
8	5	60	46.0
9	3	45	39.5
10	3	45	41.5
11	3	45	41.0

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.10 มาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่างๆโดยใช้โปรแกรม Design-Expert จาก normal plot of residuals ของร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวแสดงในภาพที่ 4.13 พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีค่า $R^2=0.9631$ แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปวิเคราะห์ทางสถิติต่อไปได้



ภาพที่ 4.13 normal plot of residuals ของร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์



ภาพที่ 4.14 half normal plot ของร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

ตารางที่ 4.11 ANOVA ของการวิเคราะห์หาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	197.56	2	98.78	91.31	< 0.0001
A-Catalyst	81.28	1	81.28	75.13	< 0.0001
B-Time	116.28	1	116.28	107.48	< 0.0001
Curvature	0.27	1	0.27	0.25	0.6304
Residual	7.57	7	1.08		
Pure Error	6.79	6	1.13		

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.14 half normal probability plot ของร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ซึ่งแสดงถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลว โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจะเบี่ยงเบนจากข้อมูลอื่นที่อยู่บนเส้นตรง พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุดคือ เวลาในการทำปฏิกิริยา(B) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา(A) ตามลำดับ เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert ดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าตัวแปรดังกล่าวมีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรดังกล่าวมีอิทธิพลต่อร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิส น้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ จากการคำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert พบว่าสมการที่บอกถึงร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์คือ

$$\text{Naphtha} = +40.31 + 3.19A + 3.81B$$

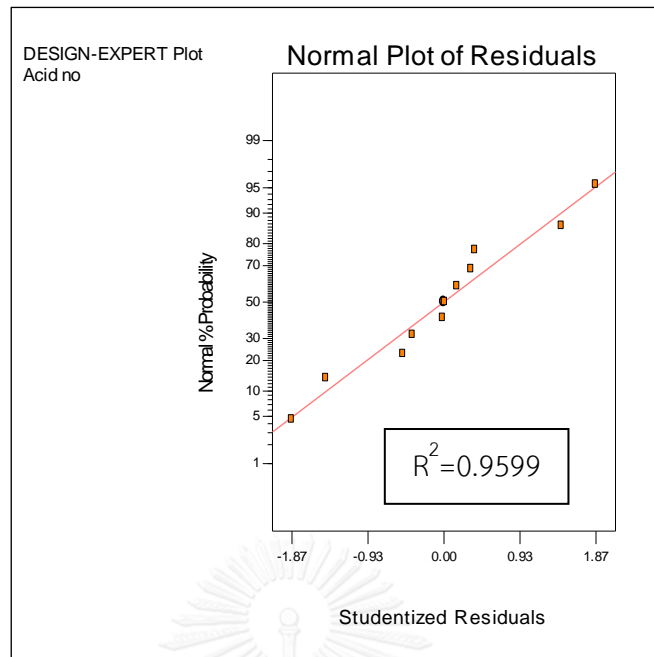
4.4.3 อิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

การออกแบบการทดลองแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียลเพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลาในการทำปฏิกิริยา มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 11 ทดลอง ผลของค่าความเป็นกรดในผลิตภัณฑ์เหลวแสดงดังในตารางที่ 4.12 พบว่าค่าความเป็นกรดในผลิตภัณฑ์เหลวอยู่ในช่วง 7.28-0.11 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

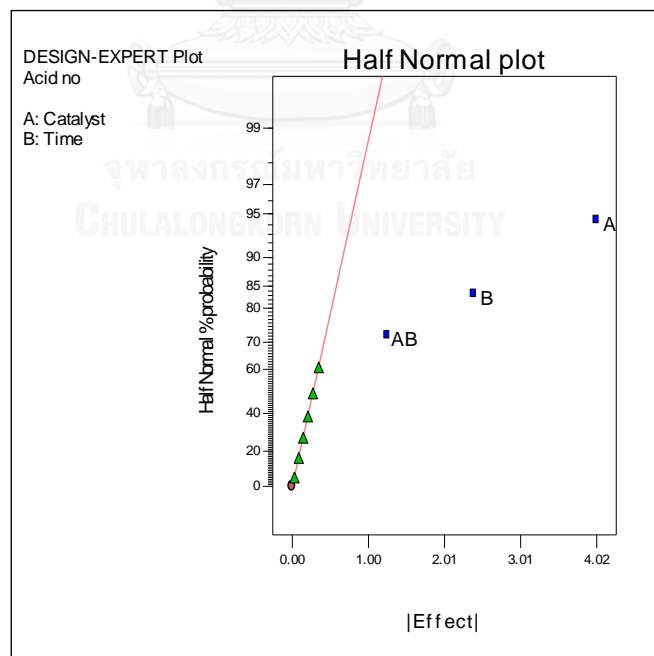
ตารางที่ 4.12 ค่าความเป็นกรดในผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

การทดลอง	ตัวแปร		ค่าความเป็นกรดในผลิตภัณฑ์เหลว (mg KOH/g)
	A-ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	B-เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	
1	1	30	7.28
2	1	30	5.77
3	1	60	3.46
4	1	60	2.29
5	5	30	1.10
6	5	30	1.41
7	5	60	0.11
8	5	60	0.12
9	3	45	0.96
10	3	45	0.57
11	3	45	0.88

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.12 มาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่างๆโดยใช้โปรแกรม Design-Expert จาก normal plot of residuals ของค่าความเป็นกรดในผลิตภัณฑ์เหลว แสดงในภาพที่ 4.15 พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีค่า $R^2=0.9599$ แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปวิเคราะห์ทางสถิติต่อไปได้



ภาพที่ 4.15 normal plot of residuals ของค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์



ภาพที่ 4.16 half normal plot ของค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

ตารางที่ 4.13 ANOVA ของการวิเคราะห์หาตัวแปรที่มีผลต่อค่าความเป็นกรดในผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

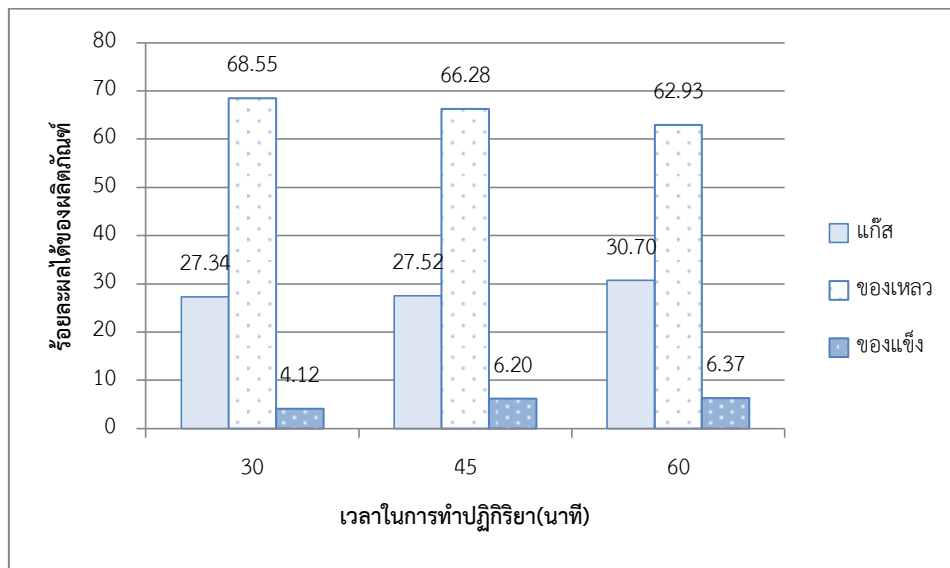
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	46.86	3	15.62	47.88	0.0001
A-Catalyst	32.24	1	32.24	98.82	< 0.0001
B-Time	11.47	1	11.47	35.16	0.001
AB	3.15	1	3.15	9.66	0.0209
Curvature	7.79	1	7.79	23.87	0.0028
Pure Error	1.96	6	0.33		
Cor Total	56.61	10			

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.16 half normal probability plot ของค่าความเป็นกรดในผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ซึ่งแสดงถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความเป็นกรดในผลิตภัณฑ์เหลว โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจะเบี่ยงเบนจากข้อมูลอื่นที่อยู่บนเส้นตรง พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความเป็นกรดในผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุดคือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (A) เวลาในการทำปฏิกิริยา (B) และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและเวลา (AB) ตามลำดับ เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert ดังแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่าตัวแปรดังกล่าวมีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรดังกล่าวมีอิทธิพลต่อค่าความเป็นกรดในผลิตภัณฑ์เหลวของการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์จากการคำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert พบว่าสมการที่บอกถึงค่าความเป็นกรดในผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์คือ

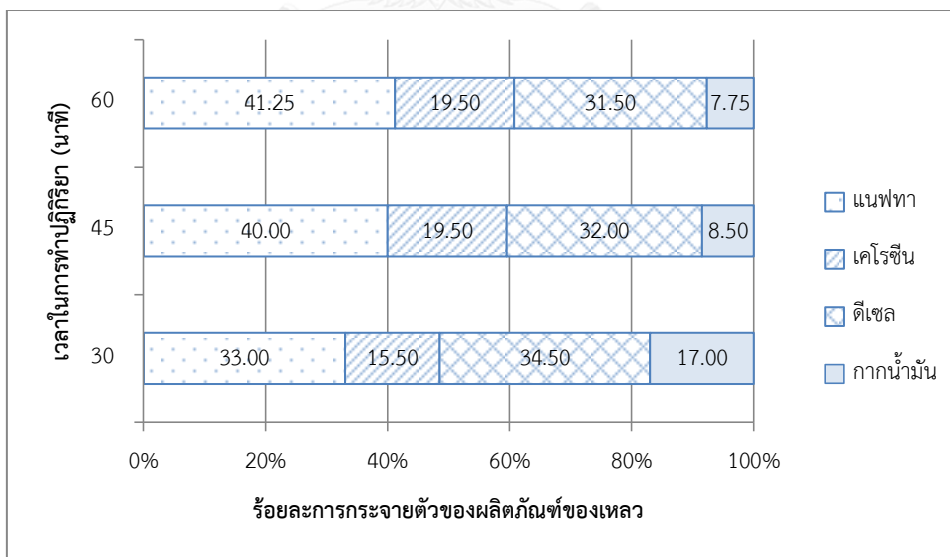
$$\text{Acid no.} = +2.69 - 2.01A - 1.20B + 0.63AB$$

4.4.4 อิทธิพลของเวลาที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

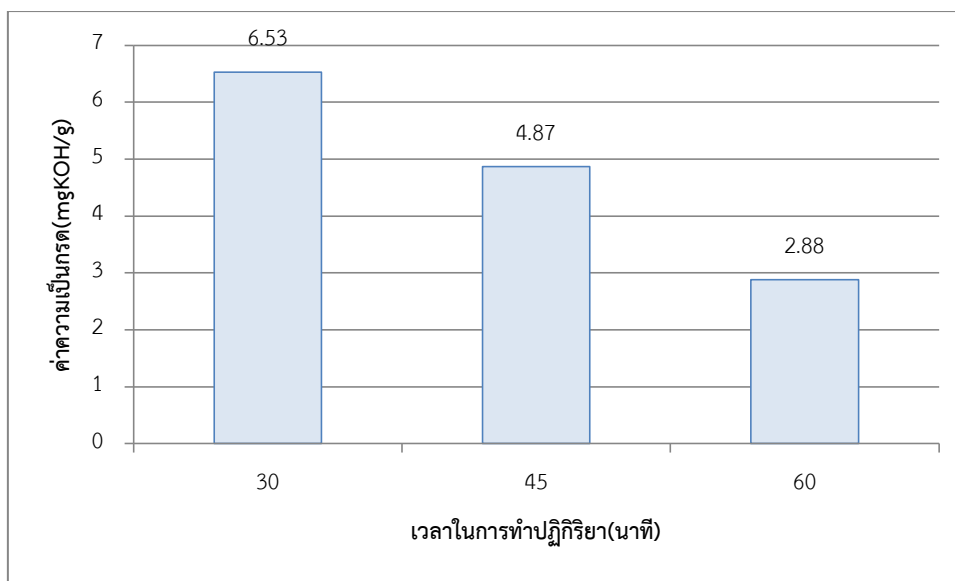
การศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที



ภาพที่ 4.17 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลผลิตน้ำมันจากการไพโรไลซิส น้ำมันพีซใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 1 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.18 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิส น้ำมันพีซใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



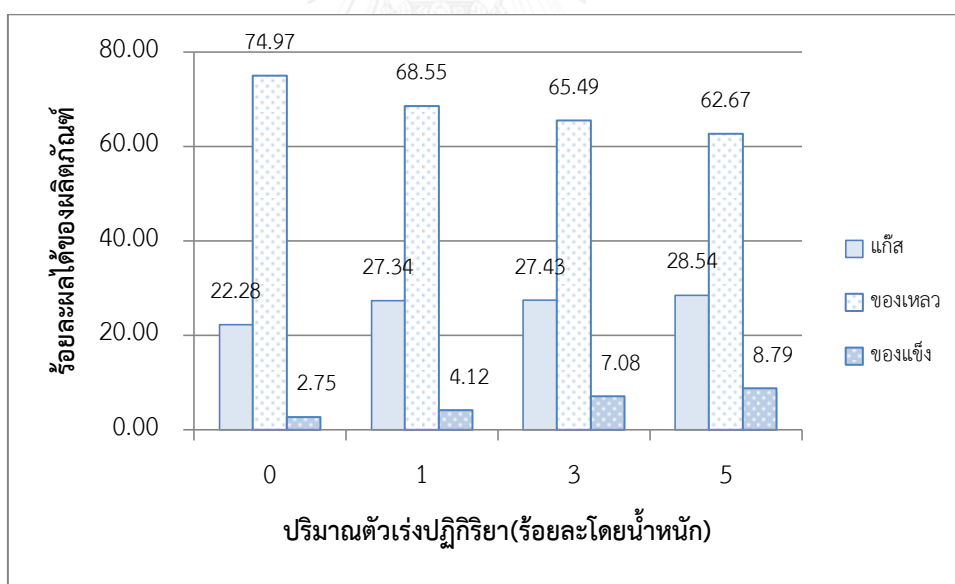
ภาพที่ 4.19 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

ภาพที่ 4.17 แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เมื่อเปลี่ยนแปลงจากเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 30-60 นาที โดยน้ำหนัก พบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงจากร้อยละ 68.55 เป็นร้อยละ 62.93 โดยน้ำหนัก ในขณะที่แก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 27.34 เป็นร้อยละ 30.70 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ในช่วงแรก อุณหภูมิมีบทบาทอย่างมากต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในรูปไตรกลีเซอไรด์ได้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง และเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันได้สารไฮโดรคาร์บอน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการเก็บตัวอย่างแก๊สที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่ามีพีกของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ปรากฏขึ้น จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเข้ามามีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและการเติมไฮโดรเจน ซึ่งเกิดบริเวณที่ผิวสัมผัสรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ โดยการเติมไฮโดรเจนทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางที่มีความอึดตัวมากขึ้นและเมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยาดำเนินต่อไป อิทธิพลของอุณหภูมียังมีผลต่อการแตกตัวด้วยความร้อนทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางแตกตัวต่อไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กและแก๊สไฮโดรคาร์บอนตามลำดับ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงและผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 4.18 แสดงการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไล

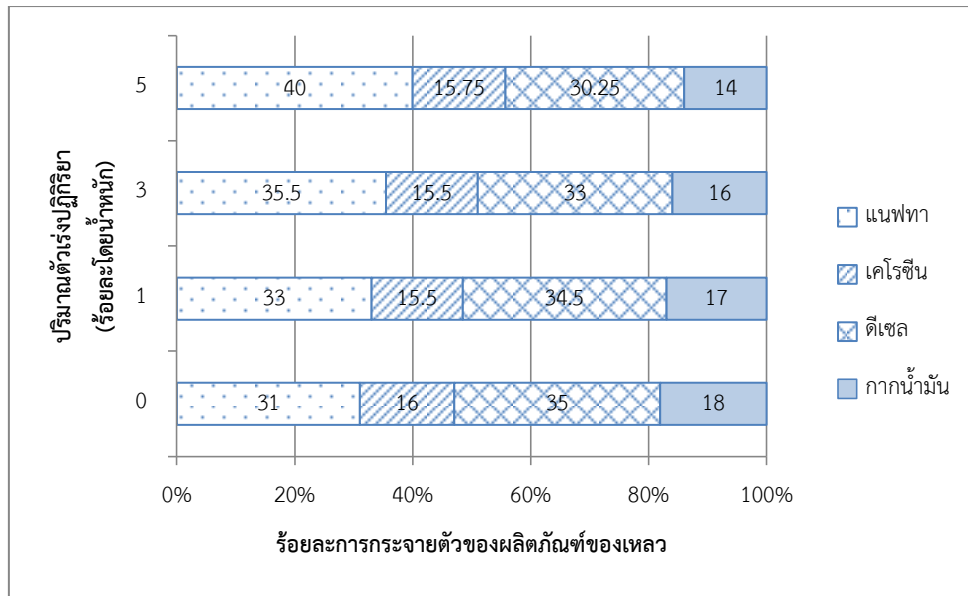
ชีสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาจาก 30-60 นาที พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นกากน้ำมันมีปริมาณลดลงแต่แนวพามีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที เป็น 60 นาที ภาพที่ 4.19 แสดงค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 30-60 นาที พบว่าค่าความเป็นกรดลดลงจาก 6.53 เป็น 2.88 โดยระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้นทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยาได้นานขึ้น การสลายพันธะของกรดไขมันผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสามารถเกิดได้มากขึ้นส่งผลให้ค่าความเป็นกรดจึงลดลง

4.4.5 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

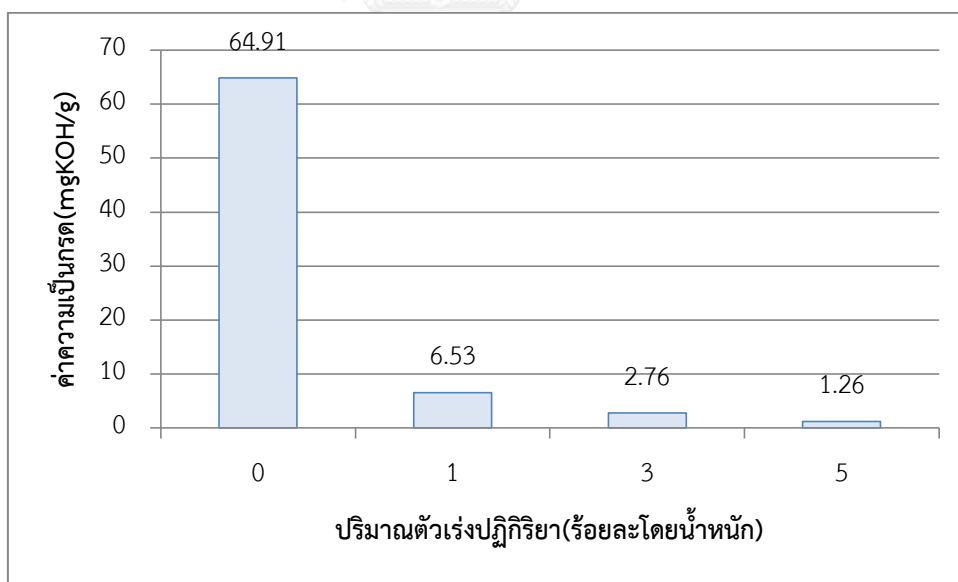
การศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส น้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และตัวปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0-5 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.20 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



ภาพที่ 4.21 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที



ภาพที่ 4.22 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที

ภาพที่ 4.20 แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 0-5 โดยน้ำหนัก พบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงจากร้อยละ 74.97 เป็นร้อยละ 62.67 โดยน้ำหนัก ในขณะที่แก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 22.28 เป็นร้อยละ 28.54 โดยน้ำหนัก ภาพที่ 4.21 แสดงการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์เมื่อเปลี่ยนแปลงตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 0-5 โดยน้ำหนัก พบว่ากากน้ำมันลดลงจากร้อยละ 18 เป็น 14 และแฉะเพิ่มจากร้อยละ 31 เป็น 40 และภาพที่ 4.22 แสดงค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์เมื่อเปลี่ยนแปลงตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 0-5 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความเป็นกรดลดลงจาก 64.91 เป็น 1.26 ซึ่งสามารถอธิบายได้จาก ในช่วงแรกการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์เป็นกรดไขมันและสารไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง นอกจากนี้ความร้อนจะช่วยสลายพันธะกรดไขมันผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันหรือปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้สารสารไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวทางความร้อนจะเกิดขึ้นพร้อมกับการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา บทบาทของตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ซึ่งประกอบด้วยแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์จะส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดไขมันได้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดการส่งเสริมปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนจากการที่โดโลไมต์มีพื้นที่ผิวรูพรุนจำนวนมาก โดยภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนจะเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้กับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ขนาดกลางได้ดี และเกิดความอิ่มตัวมากขึ้น เมื่อยังให้ความร้อนและปฏิกิริยายังดำเนินต่อไปอิทธิพลของความร้อนจะทำให้การแตกตัวของสายโซ่ขนาดกลางไปเป็นขนาดเล็กได้ต่อไป เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันมากขึ้นเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นและค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวลดลง นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันร่วมด้วยจึงส่งผลต่อการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นขนาดเล็กและแก๊สไฮโดรคาร์บอนทำให้ปริมาณแฉะและผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น

4.5 ภาวะที่เหมาะสมของการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์โดยใช้โปรแกรม Design-Expert

ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ด้วยโปรแกรม Design-Expert โดยขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์จากโปรแกรม Design-Expert แสดงในตารางที่ 4.14

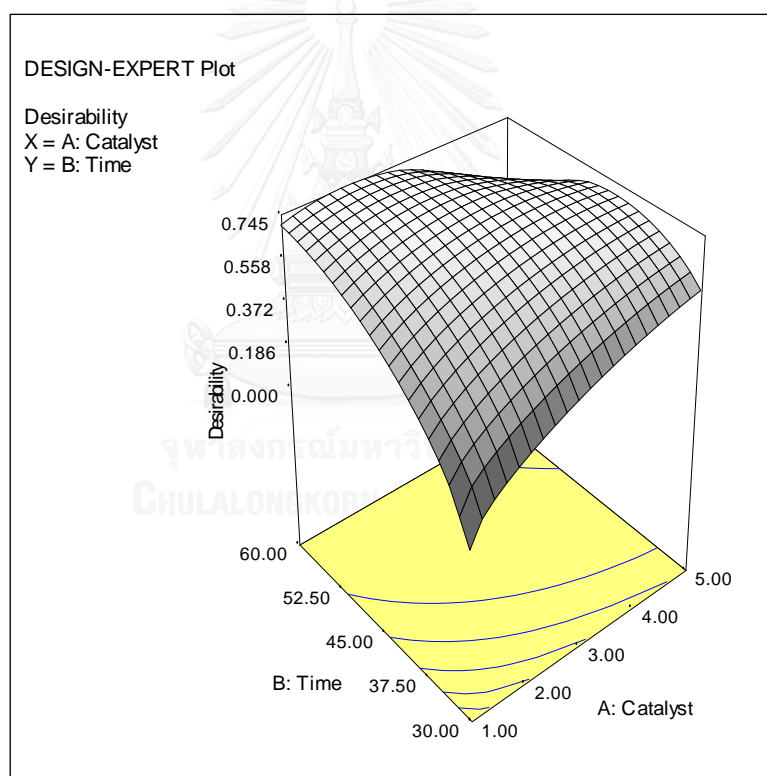
ตารางที่ 4.14 ขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert ของการไพโรไลซิส น้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Unit
Catalyst	is in range	1.00	5.00	%wt
Time	is in range	30.00	60.00	minute
Liquid yield	maximize	41.51	68.55	%wt
Naphtha	maximize	33.00	47.00	%wt
Long residue	minimize	7.00	17.00	%wt
Acid no	minimize	0.12	6.53	mg KOH/g

ในการหาภาวะที่เหมาะสมพิจารณาค่าการตอบสนอง 4 ค่าคือ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลว ร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลว ร้อยละของกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์เหลวและค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลว โดยจะพิจารณาให้มีค่าร้อยละผลิตภัณฑ์เหลวและร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวสูงที่สุด ส่วนร้อยละของกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์เหลวและค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวพิจารณาให้ได้ค่าต่ำที่สุด ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert แสดงในตารางที่ 4.15 คือ ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2.41 โดยน้ำหนักและเวลาในการทำปฏิกิริยา 56.21 นาที จะทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวเท่ากับร้อยละ 55.34 โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวเท่ากับร้อยละ 42.44 ค่าร้อยละของกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์เหลวเท่ากับร้อยละ 7.01 และค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวเท่ากับ 0.86 มิลลิลิตรโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม สำหรับแผนภูมิสามมิติของภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ภายใต้ขอบเขตที่ศึกษาแสดงในภาพที่ 4.23

ตารางที่ 4.15 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert ของการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

ตัวแปร	ภาวะจากโปรแกรม
ตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.41
เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	56.21
ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	55.34
ร้อยละของแนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	42.44
ร้อยละของกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์เหลว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	7.01
ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลว (มิลลิลิตร KOH ต่อกรัม)	0.86



ภาพที่ 4.23 แผนภูมิสามมิติของภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ภายใต้ขอบเขตที่ศึกษา

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรมแล้วจึงนำมาทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมและค่าจากการทดลอง

ตารางที่ 4.16 ค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert กับค่าที่ได้จากการทดลอง

ตัวแปร	ภาวะจากโปรแกรม	ผลจากการทดลอง
ตัวเร่งปฏิกิริยา(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.41	2.50
เวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที)	56.21	60.00
ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	55.34	55.01
ร้อยละของเนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลว(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	42.44	42.00
ร้อยละของกาน้ำมันในผลิตภัณฑ์เหลว(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	7.01	8.00
ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลว(มิลลิกรัม KOHต่อกรัม)	0.86	0.50

ตารางที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert กับค่าที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม โดยได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวจากการทดลองจริงเท่ากับร้อยละ 55.01 โดยน้ำหนัก ร้อยละของเนฟทาในผลิตภัณฑ์เหลวเท่ากับร้อยละ 42.00 ค่าร้อยละของกาน้ำมันในผลิตภัณฑ์เหลวเท่ากับร้อยละ 8.00 และค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลวเท่ากับ 0.50 มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

4.6 องค์ประกอบธาตุ C H O ของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

องค์ประกอบธาตุ C H O ของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ แสดงดังตารางที่ 4.17

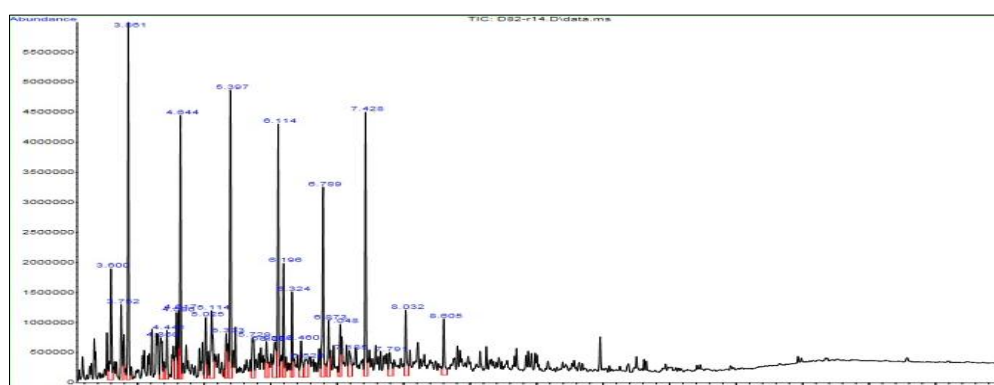
ตารางที่ 4.17 องค์ประกอบธาตุ C H O ของน้ำมันพีซีใช้แล้ว

น้ำมันพีซีใช้แล้ว	C	H	O
ก่อนการทดลอง	76.04	11.31	12.65
หลังการแตกตัวด้วยความร้อน	84.29	12.00	3.71
หลังการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์	85.91	11.52	2.57

ตารางที่ 4.17 แสดงองค์ประกอบของธาตุ C H O พบว่าน้ำมันพืชใช้แล้วก่อนการไพโรไลซิสบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์มีค่าออกซิเจนเท่ากับร้อยละ 12.65 หลังจากผ่านการไพโรไลซิสบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์พบว่าผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มีค่าออกซิเจนลดลงเหลือร้อยละ 2.57 เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ซึ่งประกอบด้วยแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์จะส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดไขมัน การกำจัดหมู่คาร์บอกซิลิกออกไปทำให้ปริมาณออกซิเจนมีค่าลดลง ในช่วงแรกอุณหภูมิมีบทบาทอย่างมากต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในรูปไตรกลีเซอไรด์ได้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง และเกิดปฏิกิริยาการขจัดคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการเก็บตัวอย่างแก๊สที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่ามีพีกของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ปรากฏขึ้น จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเข้ามามีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาการถ่ายโอนการเติมไฮโดรเจนซึ่งเกิดบริเวณที่ผิวสัมผัสสรุปรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ โดยการเติมไฮโดรเจนทำให้เกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางที่มีความอิ่มตัวมากขึ้น

4.7 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ แสดงในภาพที่ 4.24 และตารางที่ 4.18



ภาพที่ 4.24 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 4.18 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

พีค	องค์ประกอบ	สูตรเคมี
3.861	Decane	C ₁₀ H ₂₂
4.644	Undecane	C ₁₁ H ₂₄
5.397	Dodecane	C ₁₂ H ₂₆
6.114	Tridecane	C ₁₃ H ₂₈
6.789	Tetradecane	C ₁₄ H ₃₀
7.428	Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂
8.032	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄
8.605	Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆

ตารางที่ 4.18 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ พบว่ามีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ C₁₀-C₁₇ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ซึ่งประกอบด้วยแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์จะส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดไขมัน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันปาล์มิติก (C 16:0) และกรดไขมันโอเลอิก (C 18:1) ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและเกิดการแตกตัวต่อไปโดยอิทธิพลจากอุณหภูมิทำให้ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคนเนื่องจากการทดลองได้มีการอัดแก๊สไฮโดรเจนซึ่งแก๊สไฮโดรเจนจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันและเกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจน จนเกิดการเติมไฮโดรเจนลงไปบนพันธะที่ไม่อิ่มตัว ทำให้สารไฮโดรคาร์บอนที่ได้มีความอิ่มตัวมากขึ้น

4.8 ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ที่ได้จากการวิเคราะห์เครื่อง Bomb Calorimeter แสดงในตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ค่าความร้อนของน้ำมันพืชใช้แล้วก่อนและหลังการไพโรไลซิสบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์

น้ำมันพืชใช้แล้ว	ค่าความร้อน (MJ/Kg)
ก่อนการทดลอง	39.027
หลังการแตกตัวด้วยความร้อน	40.425
หลังการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์	43.316

ตารางที่ 4.19 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันพืชใช้แล้วก่อนและหลังการไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ พบว่าค่าความร้อนของน้ำมันพืชใช้แล้วก่อนการไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์มีค่าเท่ากับ 39.027 MJ/Kg เมื่อผ่านการการไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 43.316 MJ/Kg ปริมาณออกซิเจนที่หายไปเนื่องจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่อึดตัวมากขึ้นทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น

4.9 ผลการทดลองกับงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

ธนาทิพย์ ศรีสุวรรณ (2554) ศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันตุงเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 390-440 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2.5-10 โดยน้ำหนักของน้ำมันตุง พบว่าภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันตุงบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ คือ ที่อุณหภูมิ 402 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2.50 โดยน้ำหนักของน้ำมันตุง ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 38.83 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวมีปริมาณแฉะร้อยละ 21.43 โดยน้ำหนัก ส่วนภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันตุงบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ คือ ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 38 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2.50 โดยน้ำหนักของน้ำมันตุง ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 37.55 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวมีปริมาณแฉะร้อยละ 19.16 โดยน้ำหนัก

นิทัศน์ วงศ์สวัสดิ์ (2554) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยทำการศึกษาที่

อุณหภูมิ 390-440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 2-5 กรัมต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ที่อุณหภูมิ 424 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 2.21 กรัมต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 32.26 โดยน้ำหนัก มีปริมาณแฉพทาร์ร้อยละ 11.54 ส่วนภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ที่อุณหภูมิ 422 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 2.9 กรัมต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 31.19 โดยน้ำหนัก มีปริมาณแฉพทาร์ร้อยละ 12.16

ตารางที่ 4.20 ภาวะและผลการทดลองกับงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกันที่ภาวะที่เหมาะสม

การทดลอง	ธนาทิพย์ ศรีสุวรรณ (2554)		นิทัศน์ วงศ์สวัสดิ์ (2554)		งานวิจัยนี้
	น้ำมันตุง	น้ำมันตุง	น้ำมันพืช ใช้แล้ว	น้ำมันพืช ใช้แล้ว	
สารตั้งต้น					น้ำมันพืช ใช้แล้ว
ตัวเร่งปฏิกิริยา	แคลเซียม ออกไซด์ ร้อยละ 2.5	แมกนีเซียม ออกไซด์ ร้อยละ 2.5	แคลเซียม ออกไซด์ ร้อยละ 1	แมกนีเซียม ออกไซด์ ร้อยละ 5	โดโลไมต์ ร้อยละ 2.5
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	440	402	424	422	450
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น	1	1	-	-	1
เวลาในการทำปฏิกิริยา	38	30	-	-	60
ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลว	37.55	38.83	32.26	31.19	55.01
ผลิตภัณฑ์แฉพทา	19.16	21.43	11.54	12.16	23.10

ตารางที่ 4.20 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกันที่ภาวะที่เหมาะสม พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิจิพันธ์ชนิดเบสเหมือนกัน ที่ภาวะที่เหมาะสมงานวิจัยนี้ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลวมากกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน ส่วนปริมาณผลิตภัณฑ์แฉพทาที่ได้จากงานวิจัยนี้สูงกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้เล็กน้อยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เท่ากัน และทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กแบบแบตช์เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.21 ภาวะและผลการทดลองกับงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกันที่ภาวะในการทดลองใกล้เคียงกัน

การทดลอง	ธนาทิพย์ ศรีสุวรรณ (2554)		นิทัศน์ วงศ์สวัสดิ์ (2554)		งานวิจัยนี้
	น้ำมันตุง	น้ำมันตุง	น้ำมันพีช ใช้แล้ว	น้ำมันพีช ใช้แล้ว	
สารตั้งต้น					
ตัวเร่งปฏิกิริยา	แคลเซียม ออกไซด์ ร้อยละ 2.5	แมกนีเซียม ออกไซด์ ร้อยละ 2.5	แคลเซียม ออกไซด์ ร้อยละ 5	แมกนีเซียม ออกไซด์ ร้อยละ 5	โดโลไมต์ ร้อยละ 2.5
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	440	440	440	440	450
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น	1	1	-	-	1
เวลาในการทำปฏิกิริยา	30	30	-	-	60
ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลว	35.25	36.16	35.16	36.08	55.01
ผลิตภัณฑ์แนฟทา	17.58	22.57	14.58	17.10	23.10
ค่าความเป็นกรด	1.13	0.45	6.4	5.1	0.50

ตารางที่ 4.21 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกันที่ภาวะในการทดลองใกล้เคียงกัน พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสเหมือนกันและอุณหภูมิในการทดลองใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยก่อนหน้าที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เท่ากันพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความเป็นกรดและปริมาณแนฟทาใกล้เคียงกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากแมกนีเซียม เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยก่อนหน้าที่ใช้ไขมันพีชใช้แล้วเป็นสารตั้งต้นเช่นเดียวกันพบว่างานวิจัยนี้ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลวและผลิตภัณฑ์แนฟทาสูงกว่าและค่าความเป็นกรดต่ำกว่า

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิส น้ำมันพืชใช้แล้วและหาภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุด มีแนวพหาคเป็นองค์ประกอบมากที่สุด กากน้ำมันน้อยที่สุด และมีค่าความเป็นกรดต่ำที่สุด

5.1.1 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRD พบว่าโดโลไมต์ธรรมชาติมี $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ เป็นองค์ประกอบ เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นต้นไปจะพบองค์ประกอบของ MgO และพบองค์ประกอบของ CaO ที่อุณหภูมิในการแคลไซน์ 800 องศาเซลเซียส เมื่อวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าการแคลไซน์โดโลไมต์ที่ภาวะต่างๆจะทำให้พื้นผิวมีความขรุขระและมีความพรุนเพิ่มขึ้น เมื่อวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค BET พบว่าการแคลไซน์จะทำให้โดโลไมต์พื้นผิวและมีความพรุนเพิ่มขึ้น ส่วนการแคลไซน์ที่อุณหภูมิในการแคลไซน์ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีพื้นที่ผิวมากที่สุด

5.1.2 เมื่อนำผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์จะไม่พบองค์ประกอบของหมู่คาร์บอกซิลิกในผลิตภัณฑ์เหลวเป็นการยืนยันว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ส่งเสริมปฏิกิริยาดิคาร์บอกซิเลชันผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ยังมีค่าความเป็นกรดต่ำกว่าผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียสสามารถลดค่าความเป็นกรดในเชื้อเพลิงเหลวได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800-1000 องศาเซลเซียสจะมีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมต่อการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา คือ การแคลไซน์โดโลไมต์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

5.1.3 การคำนวณและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Design-Expert พบว่าภาวะที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุด มีองค์ประกอบของแนวพหามากที่สุด กากน้ำมันน้อยที่สุด และผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มีค่าความเป็นกรดต่ำที่สุด คือ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2.50 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชใช้แล้ว เมื่อนำภาวะที่ได้จากการคำนวณมาทำการ

ทดลองผลิตภัณฑ์ที่ได้ให้ผลิตภัณฑ์เหลวร้อยละ 55.01 โดยมีองค์ประกอบของแฉพาะร้อยละ 42.00 และกากน้ำมันร้อยละ 8.00 ของผลิตภัณฑ์เหลวและผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ค่าความเป็นกรด 0.50 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อกรัมไขมัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ศึกษาความสามารถในการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่
- 5.2.2 ศึกษาต่อโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
- 5.2.3 ศึกษาการนำเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ไปใช้กับเครื่องยนต์ชนิดต่างๆ
- 5.2.4 ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากโพลีเมอร์กับน้ำมันพืชชนิดอื่นที่มีความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ



รายการอ้างอิง

1. วัตถุดิบที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล. Available from: <https://blog.eduzones.com/tenny/3670>.
2. Xu, J., et al., *Production of hydrocarbon fuels from pyrolysis of soybean oils using a basic catalyst*. Bioresour Technol, 2010. **101**(24): p. 9803-6.
3. Tani, H., et al., *Selective catalytic decarboxy-cracking of triglyceride to middle-distillate hydrocarbon*. Catalysis Today, 2011. **164**: p. 410-414.
4. Keiko, S., et al., *Effect of natural dolomite calcination temperature on sorption of borate onto calcite products*. Microporous and Mesoporous Material, 2013. **171**: p. 1-8.
5. Stefaniak, E., et al., *The influence of preparation conditions on adsorption properties and porosity of dolomite-based sorbents*. Colloids and Surfaces, 2002. **1**(208): p. 337-345.
6. Staszczuk, P., et al., *Investigations on the adsorption properties and porosity of natural and thermally treated dolomite samples*. Powder Technology, 1997. **92**(1): p. 253-257.
7. Oguuzhan, I., *Dolomite as Heterogeneous catalyst for transesterification of canola oil*. Fuel Processing Technology, 2011. **92**: p. 452-455.
8. Ngamcharussrivichai, C., W. Wiwatnimit, and S. Wangnoi, *Modified dolomites as catalysts for palm kernel oil transesterification*. Molecular Catalysis A: Chemical, 2007. **276**: p. 24-33.
9. Matar, S., *Chemistry of Petrochemical Processes*. 1994, Texas.
10. แก๊สธรรมชาติ. Available from: <http://th.wikipedia.org/wiki/แก๊สธรรมชาติ>.
11. การเกิดปิโตรเลียม. Available from: <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1589-การเกิดปิโตรเลียม>.
12. ศุภวรรณ ต้นตยานนท์, ปิโตรเคมี. 2535, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
13. พลังงานทดแทน. Available from: <http://th.wikipedia.org/wiki/พลังงานทดแทน>.
14. พลังงานความร้อนใต้พิภพ. Available from: <http://th.wikipedia.org/wiki/พลังงานความร้อนใต้พิภพ>.

15. นคร ทิพย์วรงค์, เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. 2553, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
16. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานพนธ์. ไตรกลีเซอไรด์. Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1001/triglyceride-ไตรกลีเซอไรด์>.
17. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานพนธ์. กรดไขมัน. Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0800/fatty-acid-กรดไขมัน>.
18. ภัยน้ำมันทอดซ้ำ. Available from: https://drive.google.com/file/d/0B3_o8_Szl2ieV0tRUjVneldyeDA/edit?pli=1.
19. จตุรงค์ เหลาแหลม. กระบวนการ *Pyrolysis* ของการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากขยะพลาสติก. Available from: [http://www.deqp.go.th/website/20/images/stories/file/Toxic/jaturongl/jaturongl%205\(1\).pdf](http://www.deqp.go.th/website/20/images/stories/file/Toxic/jaturongl/jaturongl%205(1).pdf).
20. ศิริรัตน์ จิตการคำ, จากขยะสู่น้ำมัน เทคโนโลยีผลิตพลังงานทางเลือกที่ดูแลสิ่งแวดล้อม. 2551, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
21. Gary, J.H. and G.H. Handwerk, *Catalytic Hydrocracking and Hydroprocessing*. 1994, NewYork: Marcel Dekker.
22. Harold, H.S., *The Chemistry of Hydrocarbon fuel*. 1991, NewYork.
23. ปราโมทย์ ไชยเวช, ปีโตรเลียมเทคโนโลยี. 2548, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
24. จตุพร วิทยาคูณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานและการประยุกต์. 2547, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
25. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน. Available from: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>.
26. *X-ray Diffractometer (XRD)*. Available from: http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm.
27. ภัคดี ทรงเจริญ และคณะ. แร่โดโลไมต์(Dolomite)เพื่อประชาชน. Available from: http://library.dmr.go.th/library/DMR_Technical_Reports/2547/5102.pdf.
28. ทวีลักษณ์ อ้นองอาจ และ สอิ่ง จักษุศิลา. การใช้ประโยชน์หินปูน โดโลไมต์ และปูนไลม์. Available from: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2544_49_155_p12-16.pdf.
29. Niken, T., R.M. Abdul, and B. Subhash, *Production of biofuel from waste cooking palm oil using nanocrystalline zeolite as catalyst: Process optimization studies*. Bioresource Technology, 2011. **102**: p. 10686-10694.

30. Baoxiang, P. *Transformation of triglycerides and fatty acids into biofuels*
Available from: <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1094853/1094853.pdf>.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ ก. 1 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อศึกษาผลการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโตโลไมต์ ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชใช้แล้ว

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์			ร้อยละการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดของผลิตภัณฑ์เหลว				ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลว (mg KOH/g)
	แก๊ส	ของแข็ง	ของเหลว	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล	กากน้ำมัน	
ไม่เติม	21.10	2.49	76.41	38.5	17.5	35.2	8.8	49.57
700-2	40.78	4.95	54.27	44.3	19.7	29.5	6.5	0.74
700-2	42.94	4.95	52.11	43.6	20.0	30.2	6.2	0.56
800-2	42.48	8.40	49.12	40.5	19.9	31.5	8.1	0.14
800-2	43.22	8.46	48.32	40.0	20.2	31.5	8.3	0.12
900-2	40.26	7.55	52.19	40.2	20.5	32.2	7.1	0.12
900-2	41.50	9.45	49.05	41.9	19.4	31.2	7.5	0.10
1000-2	42.08	6.30	51.62	40.0	20.0	32.0	8.0	0.08
1000-2	44.06	7.30	48.64	42.4	19.3	31.1	7.2	0.08
700-3	37.94	4.20	57.86	43.0	19.1	30.1	7.8	1.42
700-3	34.88	3.84	61.28	41.0	19.4	31.2	8.4	1.86
800-3	35.90	10.40	53.70	40.0	19.8	31.6	8.6	0.34
800-3	32.34	8.30	59.36	40.4	19.6	31.3	8.7	0.28
900-3	34.20	8.00	57.80	42.0	20.0	30.4	7.6	0.31
900-3	37.20	9.30	53.50	41.1	19.7	31.6	7.6	0.27
1000-3	38.71	10.54	50.75	40.0	20.2	31.4	8.4	0.10
1000-3	39.85	9.34	50.81	40.8	20.9	30.0	8.3	0.08

ตารางที่ ก. 2 ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบทดลองแบบสามระดับของการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว บนตัวเร่งปฏิกิริยาจากโดโลไมต์ ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียสและความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

ตัวแปรที่ศึกษา		ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์			ร้อยละการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดของผลิตภัณฑ์เหลว				ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เหลว(mg KOH/g)
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา(%wt)	เวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที)	แก๊ส	ของแข็ง	ของเหลว	เนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล	กาน้ำมัน	
1	30	27.44	4.50	68.06	34.0	15.0	34.0	17.0	7.28
1	30	27.23	3.74	69.03	32.0	16.0	35.0	17.0	5.77
1	45	27.52	6.20	66.28	39.5	19.5	32.5	8.5	4.87
1	60	31.25	6.24	62.51	41.0	19.5	31.5	8.0	3.46
1	60	30.15	6.50	63.35	41.5	19.5	31.5	7.5	2.29
5	30	30.04	7.78	62.18	39.5	16.0	31.0	13.5	1.10
5	30	27.04	9.80	63.16	40.5	15.5	29.5	14.5	1.41
5	45	40.76	10.89	48.35	43.0	19.0	30.0	8.0	0.15
5	60	49.83	12.09	38.08	48.0	19.5	26.0	6.5	0.11
5	60	43.85	11.22	44.93	46.0	19.5	27.0	7.5	0.12
3	30	27.43	7.08	65.49	35.5	15.5	33.0	16.0	2.76
3	45	33.70	7.84	58.46	39.5	19.5	33.0	8.0	0.96
3	45	35.15	8.05	56.80	40.5	19.0	32.0	8.5	0.70
3	45	34.00	8.33	57.67	40.0	19.0	33.0	8.0	0.91
3	45	35.75	9.30	54.95	41.5	19.0	32.0	7.5	0.57
3	45	34.50	7.92	57.58	41.0	19.0	32.0	8.0	0.88
3	60	41.02	9.74	49.24	43.0	20.0	29.5	7.5	0.32

ภาคผนวก ข.

การคำนวณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง

การคำนวณ

1. การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส (Yg)} = \frac{w_b - w_a}{w_b} \times 100$$

2. การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง (Ys)} = \frac{W_{Pa} - W_{Pb} - W_c}{W_b} \times 100$$

3. การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลว

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลว (Yl)} = 100 - Yg - Ys$$

เมื่อ w_b คือ น้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์ก่อนทำการทดลอง

w_a คือ น้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์หลังจากปล่อยแก๊ส

W_{Pb} คือ น้ำหนักกระดาษกรองและกระดาษที่ซูดก่อนทำการทดลอง

W_{Pa} คือ น้ำหนักกระดาษกรองและกระดาษที่ซูดหลังทำการทดลอง

W_c คือ น้ำหนักตัวแรงปฏิกิริยาที่ใช้

4. การคำนวณผลิตภัณฑ์แฉฟทา

$$\text{ผลิตภัณฑ์แฉฟทา} = \frac{Yl \times \text{ร้อยละแฉฟทาในผลิตภัณฑ์เหลว}}{100}$$

5. การคำนวณผลิตภัณฑ์เคโรซีน

$$\text{ผลิตภัณฑ์เคโรซีน} = \frac{Yl \times \text{ร้อยละเคโรซีนในผลิตภัณฑ์เหลว}}{100}$$

6. การคำนวณผลิตภัณฑ์ดีเซล

$$\text{ผลิตภัณฑ์ดีเซล} = \frac{YI \times \text{ร้อยละดีเซลในผลิตภัณฑ์เหลว}}{100}$$

7. การคำนวณผลิตภัณฑ์กากน้ำมัน

$$\text{ผลิตภัณฑ์กากน้ำมัน} = \frac{YI \times \text{ร้อยละกากน้ำมันในผลิตภัณฑ์เหลว}}{100}$$



ภาคผนวก ค.

การวิเคราะห์การกระจายขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์เหลวตามคาบจุดเดือด

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เหลวด้วยเครื่อง Simulated distillation gas chromatography ตามมาตรฐาน ASTM D2887 เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันตามคาบจุดเดื่อนั้น ใช้ดีเทคเตอร์แบบ FID และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น และวิเคราะห์ตามคาบจุดเดือดของแต่ละสารดังแสดงในตาราง ค 1

ตารางที่ ค. 1 องค์ประกอบของสารตามคาบจุดเดือด

จุดเดือด(องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบ
IBP-200	Naphtha
200-250	Kerosene
250-350	Light gas oil
350-370	Gas oil
370-FBP	Long residue

ภาคผนวก ง.

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลและการใช้โปรแกรม Design Expert

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล(Experiment of Factorial Design) หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลอง นั้น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ ได้แก่ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากอันตรกิริยาของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ เนื่องจากเป็นการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองทีละปัจจัย และทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยอื่นได้ รวมทั้งทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้ซึ่งการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ได้แก่

1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลชนิดที่ง่ายที่สุด จะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย เช่น ปัจจัย A และมีปัจจัย B โดยปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ ส่วนปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งในแต่ละเรพลิเคตของการทดลองจะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ $a \times b$ การทดลองและโดยปกติจะมีจำนวนเรพลิเคตทั้งหมด n ครั้ง

2 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^k เป็นการออกแบบการทดลองในกรณีมีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร คนงานและใน 2 ระดับที่กล่าวนี้จะแทนด้วยระดับสูงและต่ำของปัจจัยหนึ่ง ๆ ใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น 2^k ข้อมูล การออกแบบการทดลองแบบนี้มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้

3 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ หรือการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3^k หมายถึง การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ ระดับกลางและระดับสูง ซึ่งสัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามอาจจะใช้ตัวเลข -1, 0 และ 1 ตามลำดับ สังเกตว่าการทดลองแบบนี้จะมีระดับที่สามของปัจจัยเพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง ซึ่งทำให้เราสามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบ และปัจจัยที่สนใจในลักษณะที่เป็นสมการแบบควอดราติกได้

สูตรในการคำนวณ

1. $\text{Contrast}_{AB\dots K} = (\text{ผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment}) \times \text{สัมประสิทธิ์} (-1 \text{ หรือ } +1) \text{ ของตัวแปรหรือปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร}$
2. $\text{Effect Estimate}_{AB\dots K} = \frac{2(\text{Contrast}_{AB\dots K})}{n2^k}$
3. $\text{Sum of Squares}_{AB\dots K} : SS_{AB\dots K} = 2(\text{Contrast}_{AB\dots K})^2$
4. $\text{Total of sum of squares} : SS_T = \frac{\sum_{i=1} \sum_{j=1} \sum_{k=1} y_{ijk}^2 - y^2 \dots}{N}$
8. $\text{Mean of Square Error} : SSE = SS_T - \text{Sum Squares of Main Effect}$
9. $\text{Mean of Square} : MS = \frac{SS_{AB\dots K}}{\text{Degree of Freedom}}$
10. $\% \text{ Normal probability} = \frac{(\text{Cumulative frequency} - 0.5) \times 100}{\text{Total cumulative frequency}}$
11. $F_0 = \frac{\text{Mean Square of Effect}}{\text{Mean Square of error}}$

การใช้โปรแกรม Design Expert

การใช้โปรแกรม Design Expert รุ่น 7.0.0 มีขั้นตอนในการออกแบบการทดลองและคำนวณผล ดังต่อไปนี้

1. เข้าสู่โปรแกรม คลิกไปที่ File แล้วไปที่ New Design จะแสดงดังภาพที่ ง.1

CA\Program Files\DX6Trial\DATA\MyDesign.dx6 - Design-Expert 6.0.10

File Edit View Display Options Design Tools Help

Crossed
Mixture
Response Surface
Factorial

2 Level Factorial
Irregular Fraction
General Factorial
D-Optimal
Plackett Burman
Taguchi OA

2 Level Factorial Design

Design for 2 to 15 factors where each factor is varied over 2 levels. Useful for estimating main effects and interactions. Fractional factorials can be used for screening ma coding represents the design resolution: Green = Res V, Yellow = Res IV, and Red = Res III.

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

Replicates: Blocks: Center points per block:

ภาพที่ ง.1 2 Level Factorial Design

2. เลือกแบบจำลองตามตัวแปรที่ต้องการศึกษา ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษา 2 ตัวแปร ดังนั้นจึงเลือกที่ Number of Factors 2 เลือกที่ Full กด Continue จะแสดงดังภาพที่ ง.2

CA\Program Files\DX6Trial\DATA\MyDesign.dx6 - Design-Expert 6.0.10

File Edit View Display Options Design Tools Help

Crossed
Mixture
Response Surface
Factorial

2 Level Factorial
Irregular Fraction
General Factorial
D-Optimal
Plackett Burman
Taguchi OA

2 Level Factorial Design

Design for 2 to 15 factors where each factor is varied over 2 levels. Useful for estimating main effects and interactions. Fractional factorials can be used for screening ma coding represents the design resolution: Green = Res V, Yellow = Res IV, and Red = Res III.

Factors

	Name	Units	Type	Low	High
A:	A		Numeric	-1	1
B:	B		Numeric	-1	1

ภาพที่ ง.2 การกำหนดตัวแปรที่ศึกษา

3. ใส่ข้อมูลลงในตารางในภาพที่ ง.2

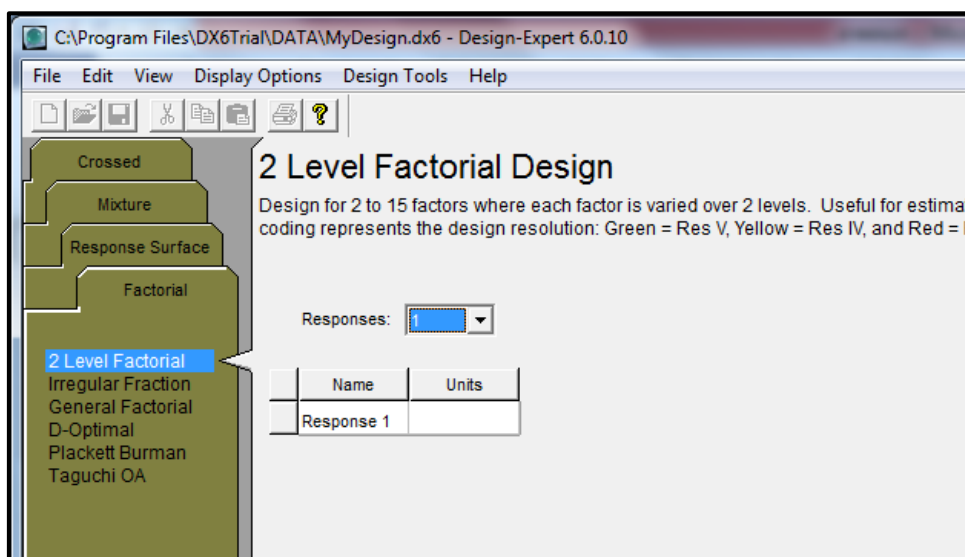
ที่ช่อง Name ให้ใส่ชื่อตัวแปรที่ศึกษา เช่น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา->Catalyst

ที่ช่อง Units ให้ใส่หน่วยของตัวแปรที่ศึกษา เช่น %

ที่ช่อง Low ให้ใส่ขอบเขตต่ำสุดของตัวแปรที่ศึกษา

ที่ช่อง High ให้ใส่ขอบเขตสูงสุดของตัวแปรที่ศึกษา

จากนั้นกด Continue แสดงดังภาพที่ ง.3



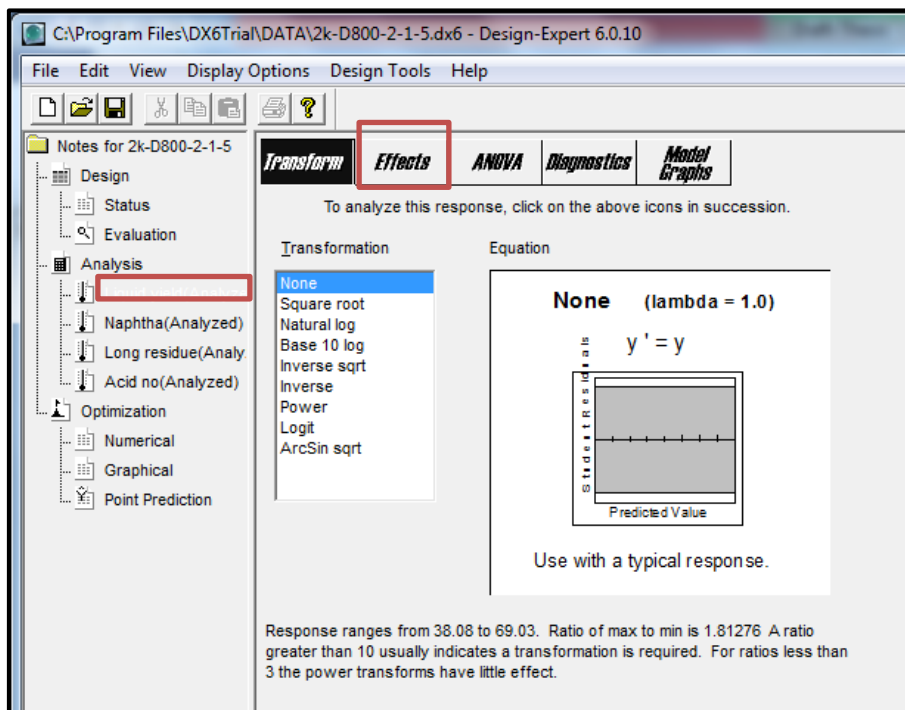
ภาพที่ ง.3 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง

4. ทำการเลือกจำนวนตัวแปรตอบสนอง (Response) แล้วจึงใส่ชื่อของตัวแปรตอบสนองในช่อง Name และหน่วยของตัวแปรตอบสนองในช่อง Unites แล้วกด Continue แล้วรอกค่าที่ได้จากการทดลองในช่องของตัวแปรตอบสนอง จะแสดงดังภาพที่ ง.4

Std	Run	Block	Factor 1 A: Catalyst %wt	Factor 2 B: Time min	Response 1 Liquid yield %wt	Response 2 Naphtha %	Response 3 Long residue %	Response 4 Acid no mg KOH/g
9	1	Block 1	3.00	45.00	59.16	39.5	8	0.96
7	2	Block 1	5.00	60.00	38.08	48	6.5	0.11
1	3	Block 1	1.00	30.00	68.06	34	17	7.28
4	4	Block 1	5.00	30.00	63.16	40.5	14.5	1.41
10	5	Block 1	3.00	45.00	54.95	41.5	7.5	0.57
2	6	Block 1	1.00	30.00	69.03	32	17	5.77
6	7	Block 1	1.00	60.00	62.06	41	8	3.46
3	8	Block 1	5.00	30.00	62.18	39.5	13.5	1.1
8	9	Block 1	5.00	60.00	44.93	46	7.5	0.12
5	10	Block 1	1.00	60.00	63.35	41.5	7.5	2.29
11	11	Block 1	3.00	45.00	57.58	41	8	0.88

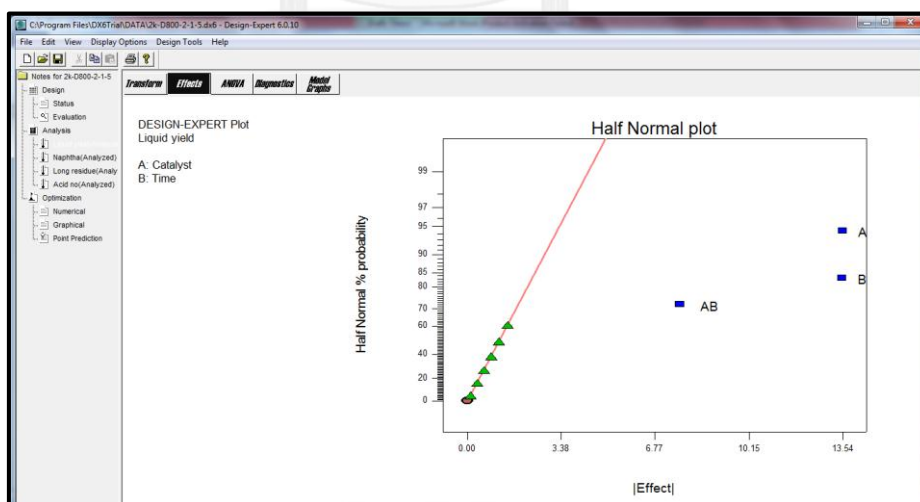
ภาพที่ ง.4 การทดลองที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม Design-Expert

5. การวิเคราะห์ผลการทดลอง เริ่มจากเลือกตัวแปรตอบสนองที่ต้องการวิเคราะห์ที่แถบทางด้านซ้ายมือ และเลือก Effects ดังแสดงในภาพที่ ๓.5



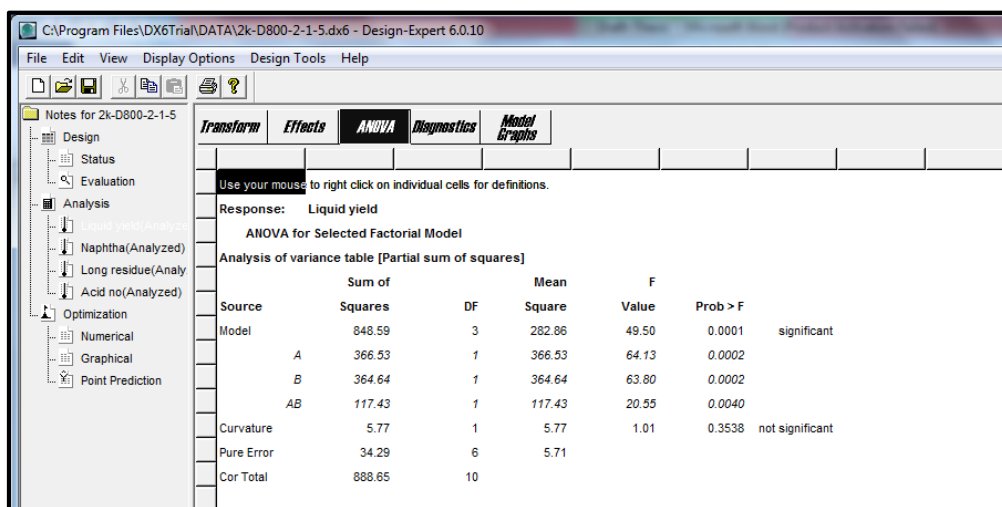
ภาพที่ ๓.5 การวิเคราะห์ผล

6. เมื่อเลือก Effects จะแสดงผลดังในภาพที่ ๓.6 ทำการเลือกจุดที่มีแนวโน้มออกจากเส้นตรง



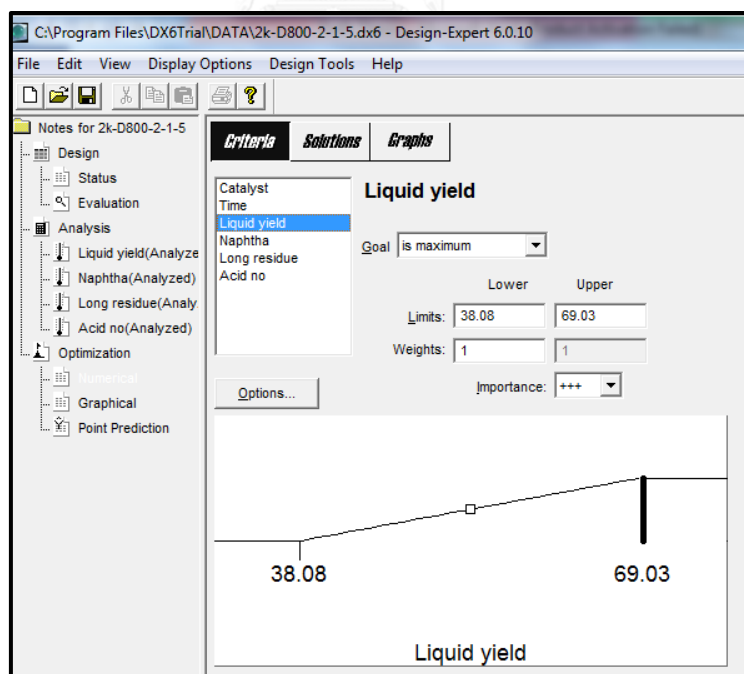
ภาพที่ ๓.6 half normal plot

7. เลือก ANOVA จะแสดงผลดังภาพที่ ง.7 ซึ่งแสดง ANOVA ที่วิเคราะห์ได้



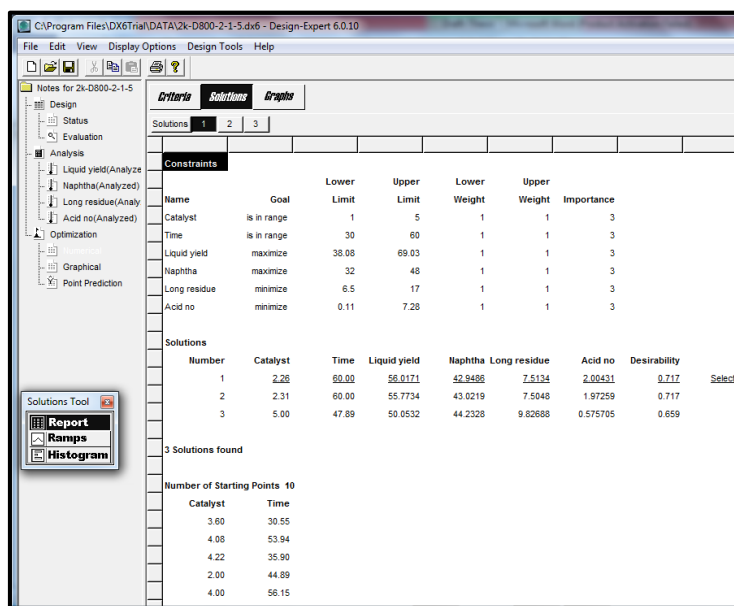
ภาพที่ ง.7 ผลของการวิเคราะห์ตัวแปร

8. ทำการวิเคราะห์ผล ให้ครบทุกตัวแปรตอบสนอง ตามข้อที่ 6-7
9. เมื่อวิเคราะห์ครบทุกตัวแปรตอบสนองแล้ว หาภาวะที่เหมาะสมโดยเลือก Numerical ตรงแถบด้านซ้ายมือ จะแสดงผลดังภาพที่ ง.8 ทำการกำหนดค่าของตัวแปรตอบสนองที่ต้องการ เช่น กำหนดให้มีค่าสูงสุด ในช่อง Goal ให้เลือก maximum



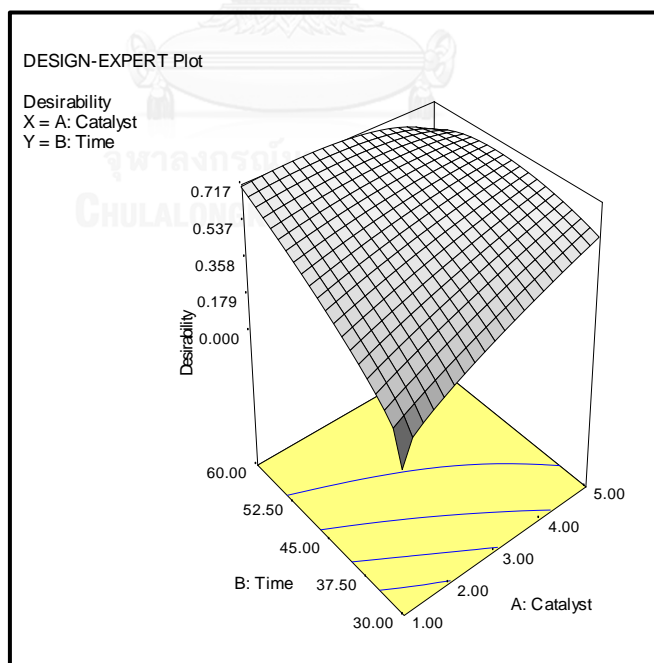
ภาพที่ ง.8 การกำหนดค่าขอบเขตตัวแปรตอบสนองที่ต้องการหาภาวะที่เหมาะสม

10. เลือก Solution จะแสดงผลที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาภาวะที่เหมาะสม ดังภาพที่ ง.9



ภาพที่ ง.9 ผลการคำนวณภาวะที่เหมาะสม

11. หากต้องการการแสดงผลเป็นแบบแผนภูมิสามมิติ สามารถทำได้โดยไปเลือกที่ Graphs แล้วคลิกที่ View ตรงแถบ menu bar และเลือก 3D Plot โปรแกรมก็จะเปลี่ยนการแสดงผลเป็นแบบแผนภูมิสามมิติตามที่ต้องการ ดังแสดงในภาพที่ ง.10



ภาพที่ ง.10 แผนภูมิสามมิติของภาวะที่เหมาะสม

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวฉัตรทิศา อ้อยใจ เกิดเมื่อวันที่ 14 มีนาคม 2529 ที่จังหวัดน่าน สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2557 ได้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ชื่องาน The 5th research symposium on petrochemical and materials technology and The 20th PPC symposium on petroleum, petrochemicals and polymers 2014 โดยนำเสนอผลงานวิจัยในรูปแบบโปสเตอร์และได้รับการตีพิมพ์งานวิจัยลงในบทความวิจัยของงานประชุมวิชาการในครั้งนี้นี้ด้วย

