

ไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PYROLYSIS OF PALM OIL FROM EMPTY FRUIT BUNCH USING COAL FLY ASH CATALYST



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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน
โดย	น.ส.กัณทิมา นิชะกิจ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ใหญ่ชีระนันท์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษชากร จารุศิริ)	

กัณฑ์มา นิยะกิจ : ไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่าน
 ลอยถ่านหิน. (PYROLYSIS OF PALM OIL FROM EMPTY FRUIT BUNCH USING COAL
 FLY ASH CATALYST) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ธราพงษ์ วิจิตรสานต์

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้
 ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านหิน (CFA) โดยปฏิกิริยาจะถูกดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ขนาด 70
 มิลลิลิตร และถ่านลอยถ่านหินถูกแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง การออกแบบ
 การทดลองเชิงแพททอเรียลสองระดับประกอบด้วย 4 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420-450
 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1-5 (โดยน้ำหนักของ
 น้ำมัน) และความดันไฮโดรเจน 1-5 บาร์ ถูกนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ค่าการตอบสนองที่ทำการ
 วิเคราะห์คือร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวและร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิง
 เหลว มีการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการตอบสนองและเพื่อหาภาวะที่เหมาะสม
 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้วิเคราะห์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น
 และเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ตามลำดับ ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม
 Design-Expert คืออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที
 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์ ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิง
 เหลวสูงสุดร้อยละ 87.98 โดยน้ำหนัก และสัดส่วนดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสูงสุดร้อยละ 42.19
 โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์ทางเคมีฟิสิกส์ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าความร้อน 40.18 เมกะจูล
 ต่อกรัม ไกล่เคียงกับน้ำมันดีเซล และค่าความเป็นกรด 0.20 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม
 ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำมันดีเซล เมื่อนำไปผ่านกระบวนการกลั่นแยกและทำให้บริสุทธิ์จะ
 สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6071906023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Full factorial design of experiment, Palm oil, Pyrolysis, Coal Fly Ash

Kuntima Niyakit : PYROLYSIS OF PALM OIL FROM EMPTY FRUIT BUNCH USING
COAL FLY ASH CATALYST. Advisor: Prof. THARAPONG VITIDSANT

This research aims to study pyrolysis of palm oil from empty fruit bunch using coal fly ash (CFA) catalyst. The reaction was carried out in a batch micro reactor of 70 ml. CFA was calcined at a temperature of 600 °C for 5 hours. The two-level factorial design of four factors such as reaction temperature of 420-450 °C, reaction time at 30-60 min, the amount of catalyst 1-5%wt (by weight of oil) and a hydrogen pressure of 1-5 bar was applied to this study. The responses analyzed were yield of liquid product and yield of diesel in the liquid product. Statistical analysis was performed to investigate influencing factors in the responses and to determine the optimum condition. The responses analyzed were yield of liquid product and yield of diesel in the liquid product. Statistical analysis was performed to investigate influencing factors in the responses and to determine the optimum condition. The compositions of the liquid product were analyzed by distillation simulation gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry respectively. The optimum condition from Design-Expert program shown that pyrolysis temperature of 420 °C, reaction time at 30 min, the amount of catalyst 1 %wt and a hydrogen pressure of 1 bar which gave the highest liquid fraction of 87.98 %wt and diesel fraction of 42.19 %wt. The physicochemical analysis from the liquid product obtained 40.18 MJ/kg of heating value that closes to the diesel and the acidity of 0.20 mg KOH/g which is in range of the standard value of diesel fuel. When passed a refining and purification process, it can be used with diesel engines.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ใหญ่ชีระนันท์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชากร จารุศิริ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความคิดเห็น รวมถึงแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบริษัท ทักษิณปาล์ม (2521) จำกัด ที่อนุเคราะห์น้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าที่ใช้ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) แม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ที่อนุเคราะห์ถ่านล้อย่านหินที่ใช้ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMATE) ที่อนุเคราะห์สนับสนุนทุนการศึกษาและทุนวิจัยในการพัฒนางานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณพสธร ชุนโอษฐ์ และนักวิทยาศาสตร์ผู้ดูแลและควบคุมห้องเครื่องมือของศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรีทุกท่าน ที่คอยรับฟังคำปรึกษา ให้คำแนะนำตลอดจนการช่วยเหลือทุกอย่างเกี่ยวกับการทำวิจัยด้วยความเต็มใจเสมอมา และภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

กราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ที่อบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบแต่บิดา-มารดา ครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านและผู้มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวนาม

กัณทิมา นิยะกิจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปีเตอร์เลียม.....	4
2.2 ผลงานจากชีวมวล.....	12
2.3 ปาล์มน้ำมัน.....	13
2.4 กระบวนการไพโรไลซิส.....	18
2.5 เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงดีเซล.....	20
2.6 การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน.....	22
2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	27
2.8 ถ้ำลอยถ่านหิน.....	29
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	36
3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	36

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานทดลองในงานวิจัยนี้	36
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	38
3.4 การดำเนินงานวิจัย.....	42
3.5 วิธีการทดลอง.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	45
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่า	45
4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	47
4.3 การไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน.....	50
4.4 ผลของตัวแปรที่ศึกษาต่อการไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน.....	60
4.5 ภาวะที่เหมาะสมของการไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหินโดยใช้โปรแกรม Design-Expert	67
4.6 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของเชื้อเพลิงเหลว	70
4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงเหลว	70
4.8 การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว	71
4.9 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจาก ทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน	72
4.10 ผลการทดลองกับงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุปผลการทดลอง	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	76
บรรณานุกรม.....	77
ภาคผนวก.....	83
ประวัติผู้เขียน.....	98

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2. 1 ตัวอย่างพาราฟินที่พบในน้ำมันดิบ.....	5
ภาพที่ 2. 2 ตัวอย่างแนฟทีนที่พบในน้ำมันดิบ.....	5
ภาพที่ 2. 3 ตัวอย่างแอโรมาติกที่พบในน้ำมันดิบ	6
ภาพที่ 2. 4 แนฟทีโน-แอโรแมติกที่พบในน้ำมันดิบ	6
ภาพที่ 2. 5 ตัวอย่างสารประกอบกำมะถันที่พบในน้ำมันดิบ.....	6
ภาพที่ 2. 6 ตัวอย่างสารประกอบไนโตรเจนที่พบในน้ำมันดิบ.....	7
ภาพที่ 2. 7 ตัวอย่างสารประกอบออกซิเจนที่พบในน้ำมันดิบ	8
ภาพที่ 2. 8 ตัวอย่างสารประกอบออร์แกโนเมทัลลิกในน้ำมันดิบ.....	9
ภาพที่ 2. 9 กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	22
ภาพที่ 2. 10 ภาพถ่ายถ่านหินจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด.....	30
ภาพที่ 3. 1 เตาอบอุณหภูมิสูง (Muffle furnace).....	36
ภาพที่ 3. 2 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กขนาด 70 มิลลิลิตร	37
ภาพที่ 3. 3 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล หม้อแปลงไฟฟ้าและเครื่องเขย่า	37
ภาพที่ 3. 4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น.....	39
ภาพที่ 3. 5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์	39
ภาพที่ 3. 6 เครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ.....	40
ภาพที่ 3. 7 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	40
ภาพที่ 3. 8 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน	41
ภาพที่ 3. 9 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	41
ภาพที่ 4. 1 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์.....	46

ภาพที่ 4. 2 รูปแบบ XRD ของ (ก) แก้วลอยถ่านหินก่อนแคลไซน์ (ข) แก้วลอยถ่านหินหลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อ \blacklozenge Quartz , \blacksquare Hematie, \square MgO, \blacktriangle CaO , \blacktriangledown CaCO₃ และ \bullet MgCO₃..... 48

ภาพที่ 4. 3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของแก้วลอยถ่านหิน (ก) แก้วลอยถ่านหินก่อนการแคลไซน์ (ข) แก้วลอยถ่านหินหลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 6,000 เท่า 49

ภาพที่ 4. 4 Normal probability plot ของส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว 53

ภาพที่ 4. 5 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว 53

ภาพที่ 4. 6 Normal probability plot ของส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว..... 58

ภาพที่ 4. 7 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว 58

ภาพที่ 4. 8 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์)..... 60

ภาพที่ 4. 9 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์)..... 61

ภาพที่ 4. 10 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยา (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์)..... 62

ภาพที่ 4. 11 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยา (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์)..... 62

ภาพที่ 4. 12 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์)..... 63

ภาพที่ 4. 13 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์).....	64
ภาพที่ 4. 14 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันไฮโดรเจน (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก).....	65
ภาพที่ 4. 15 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันไฮโดรเจน (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก).....	66
ภาพที่ 4. 16 กลไกของปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	67
ภาพที่ 4. 17 แผนภูมิสามมิติของภาวะที่เหมาะสมในการไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหินภายใต้ขอบเขตที่ศึกษา	69
ภาพที่ 4. 18 โครมาโทแกรมเปรียบเทียบขององค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าก่อนและหลังการไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหินเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์.....	72
ภาพที่ 4. 19 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหินด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวตรวจวัด FID ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์.....	74
ภาพที่ ข. 1 Two Level Factorial Design	89
ภาพที่ ข. 2 การกำหนดตัวแปรที่ศึกษา	90
ภาพที่ ข. 3 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง	90
ภาพที่ ข. 4 การทดลองที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม Design-Expert.....	91
ภาพที่ ข. 5 half normal plot	91
ภาพที่ ข. 6 ผลของการวิเคราะห์ตัวแปร.....	92
ภาพที่ ข. 7 การกำหนดค่าขอบเขตตัวแปรตอบสนองที่ต้องการหาภาวะที่เหมาะสม	92
ภาพที่ ข. 8 ผลการคำนวณภาวะที่เหมาะสม	93

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2. 1 องค์ประกอบของน้ำมันดิบตามน้ำหนัก.....	4
ตารางที่ 2. 2 องค์ประกอบ ลักษณะและการนำไปใช้ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดปาล์ม น้ำมันทางตรงและทางอ้อม.....	16
ตารางที่ 2. 3 ความแตกต่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์	28
ตารางที่ 2. 4 ส่วนผสมของเถ้าลอยจากการเผาไหม้ถ่านหิน.....	31
ตารางที่ 2. 5 การจัดประเภทเถ้าลอยถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM C618.....	32
ตารางที่ 2. 6 การจัดประเภทเถ้าลอยถ่านหินตามมาตรฐาน มอก 2135-2545 (TIS 2135) ของ ประเทศไทย	32
ตารางที่ 3. 1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าด้วย เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบกับแมสสเปกโตรมิเตอร์	39
ตารางที่ 3. 2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาคาร์โบไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลาย ปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน	43
ตารางที่ 3. 3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับเพื่อทำการศึกษาคาร์โบไลซิส ของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน	44
ตารางที่ 4. 1 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าตามคาบจุดเดือด.....	45
ตารางที่ 4. 2 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโคร มาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์	46
ตารางที่ 4. 3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหินด้วยเทคนิค XRF	47
ตารางที่ 4. 4 พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน	49
ตารางที่ 4. 5 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจาก ทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน	51
ตารางที่ 4. 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจาก.....	54

ตารางที่ 4. 7 ร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมัน ปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน	56
ตารางที่ 4. 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน.....	59
ตารางที่ 4. 9 ขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert จากการไพโรไลซิส ของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน	67
ตารางที่ 4. 10 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert จากการไพโรไลซิสของน้ำมัน ปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน	68
ตารางที่ 4. 11 ค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert กับค่าที่ได้จากการ ทดลอง	69
ตารางที่ 4. 12 ค่าความเป็นกรดของเชื้อเพลิงเหลว	70
ตารางที่ 4. 13 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงเหลว	71
ตารางที่ 4. 14 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter ของน้ำมันปาล์มจาก ทะลายปาล์มเปล่าก่อนและหลังการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน	71
ตารางที่ 4. 15 ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าโดยไม่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหินที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และ ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวตรวจวัด TCD.....	73
ตารางที่ 4. 16 ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหินด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวตรวจวัด FID.....	74
ตารางที่ 4. 17 ผลการทดลองและงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน	75
ตารางที่ ก. 1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการทดลองการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์ม จากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน	84
ตารางที่ ก. 2 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์ม จากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการ กลั่น	86

ตารางที่ ค. 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะลาย
ปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

..... 94



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานสำหรับการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม จำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณความต้องการใช้พลังงานของมนุษย์เพิ่มมากขึ้น แหล่งพลังงานหลักอย่างน้ำมันดิบซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดจึงมีราคาสูงขึ้น อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทำให้เกิดแก๊สเรือนกระจก ทำให้การพัฒนาพลังงานทางเลือกเข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในปัจจุบันเพื่อสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานและลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม [1]

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีพื้นที่ทางการเกษตรกว่าร้อยละ 43 ของพื้นที่ทั้งหมดหรือ 138 ล้านไร่ และกว่าร้อยละ 3.54 หรือ 4.88 ล้านไร่ มีการเพาะปลูกปาล์มน้ำมัน ดังนั้นหนึ่งในแหล่งพลังงานทางเลือกที่ควรส่งเสริมในประเทศไทยคือการผลิตไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมัน โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มก่อให้เกิดผลพลอยได้เป็นทะลายปาล์มเปล่าร้อยละ 32 หรือประมาณ 3.30 ล้านตันต่อปี [2] ซึ่งโดยปกติแล้วโรงงานจะนำทะลายปาล์มเปล่าไปผ่านกระบวนการเผาไหม้โดยตรงเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้แก่หม้อไอน้ำร่วมกับกังหันไอน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อผลิตทั้งไอน้ำและไฟฟ้าใช้ในโรงงาน แต่ในทะลายปาล์มเปล่ายังคงมีน้ำมันคงเหลืออยู่ ดังนั้นเพื่อเป็นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุดพบว่าสามารถคั้นน้ำมันจากทะลายปาล์มเปล่า (Empty fruit bunch) ออกมาได้อีกแต่น้ำมันดังกล่าวยังมีของเสียเจือปนอยู่ จึงไม่สามารถนำมาใช้งานกับเครื่องยนต์ได้โดยตรง จำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของโดยนำมาเปลี่ยนองค์ประกอบให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวดีเซล และลดปริมาณออกซิเจนด้วยกระบวนการตีคาร์บอกซิเลชันภายใต้กระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้เถ้าลอยถ่านหินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้ น้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่ามีคุณภาพใกล้เคียงกับดีเซลเชิงพาณิชย์ การไพโรไลซิสเป็นกระบวนการสลายตัวทางเคมีความร้อนภายใต้ภาวะที่อับออกซิเจนหรืออากาศ ซึ่งปัจจุบันได้รับความนิยมในการนำมาใช้เพื่อเปลี่ยนชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากสามารถใช้วัตถุดิบได้หลากหลาย ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการกำจัดน้ำออกหรือทำให้บริสุทธิ์ และหากมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalysis) ร่วมด้วย จะสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้โดยง่าย [3] นอกจากนี้เถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากโรงงาน ซึ่งเป็นของเสียที่ไม่มีมูลค่า สามารถหาได้ง่ายจากอุตสาหกรรมถ่านหินลิกไนต์ในประเทศไทยมีส่วนประกอบของโลหะออกไซด์หลายชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ 10-25% ไอรอน(III)ออกไซด์ 4-15% แคลเซียมออกไซด์ 10-40% แมกนีเซียมออกไซด์ 3-10% และอื่นๆ ซึ่งมีองค์ประกอบที่

คล้ายคลึงกับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงพาณิชย์ [4] จึงเกิดแนวคิดนำเถ้าลอยมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดต้นทุนในการผลิตของโรงงานไบโอดีเซลหรืออุตสาหกรรมปิโตรเลียมในอนาคต

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าภายใต้กระบวนการไพโรไลซิสโดยมีเถ้าลอยถ่านหินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลและสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าการกระจายตัวผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดที่ให้ร้อยละของดีเซลมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน
- 2) หาภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าการกระจายตัวผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดที่ให้ร้อยละของดีเซลมากที่สุด

1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องมือและเครื่องวิเคราะห์พร้อมทั้งตรวจสอบความพร้อมในการใช้งาน
- 3) วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าด้วยเทคนิคต่างๆ ดังต่อไปนี้
 - วิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์
 - วิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดที่ อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น
- 4) วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของเถ้าลอยถ่านหินด้วยเทคนิคต่างๆ ดังต่อไปนี้
 - วิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry
 - หาพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจากวิธีดูดซับแก๊สไนโตรเจน ด้วยเทคนิค BET
 - โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)
 - ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
- 5) ออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Design-Expert โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย

- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420-450 องศาเซลเซียส
 - เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที
 - ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาคิดเป็นร้อยละ 1-5 ต่อน้ำหนักของสารตั้งต้น
 - ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์
- ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ คำนวณร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่นเพื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือด
- 6) หาภาวะที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหินเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีสัดส่วนดีเซลมากที่สุด โดยใช้โปรแกรม Design-Expert
 - 7) วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส
 - วิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเทคนิคบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter)
 - วิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลว ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น
 - วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์
 - วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องไทเตรตแบบอัตโนมัติ
 - 8) สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ถ้ำลอยถ่านหินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าการกระจายตัวผลิตภัณฑ์ให้ร้อยละของดีเซลมากที่สุด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปิโตรเลียม

ปิโตรเลียม [5] มาจากคำในภาษาละติน 2 คำ คือ เพตรา แปลว่า หิน และ โอเลียม ซึ่งแปลว่า น้ำมัน รวมความแล้วหมายถึง น้ำมันที่ได้จากหิน ตามนิยาม ปิโตรเลียม หมายถึง สารไฮโดรคาร์บอน (CH) ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด คือ คาร์บอน (C) และ ไฮโดรเจน (H) โดยอาจมีธาตุโลหะชนิดอื่น เช่น กำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจน ฯลฯ ปนอยู่ด้วย ปิโตรเลียมเป็นได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว หรือ แก๊ส ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของปิโตรเลียมเองเป็นสำคัญ นอกจากนี้ความร้อน และความกดดันของสภาพแวดล้อมที่ปิโตรเลียมนั้นถูกกักเก็บ ก็มีผลในการกำหนดสถานะของปิโตรเลียม

ปิโตรเลียม แบ่งตามสถานะที่สำคัญได้ 2 ชนิด คือ น้ำมันดิบ (Oil) และ แก๊สธรรมชาติ (Natural Gases)

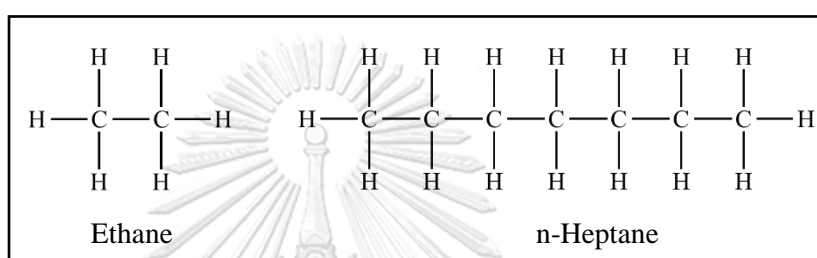
2.1.1 น้ำมันดิบ

น้ำมันดิบจากแหล่งต่างๆ อาจมีสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น มีลักษณะข้นเหนียวจนถึงหนักคล้ายยางมะตอย มีสีเหลือง เขียว น้ำตาลจนถึงดำ น้ำมันดิบมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ พาราฟิน (paraffins) แนฟทีน (naphthenes) และแอโรแมติก (aromatics) นอกจากนี้ อาจมีสารประกอบของกำมะถัน ไนโตรเจน และสารประกอบออกไซด์อื่นๆปนอยู่เล็กน้อยดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของน้ำมันดิบตามน้ำหนัก [6]

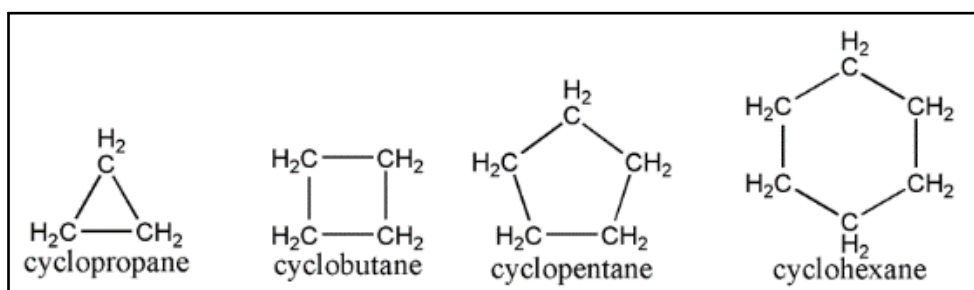
ธาตุ	พิสัยร้อยละ	ธาตุ	พิสัยร้อยละ
คาร์บอน	83-87	ออกซิเจน	0.05-1.5
ไฮโดรเจน	10-14	กำมะถัน	0.05-6.0
ไนโตรเจน	0.2-2	โลหะ	<0.1

- 1) พาราฟิน (paraffin) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ประกอบด้วย
- นอร์มัลพาราฟิน คือ พาราฟินแบบโซ่ตรง
 - ไอโซพาราฟิน คือ พาราฟินที่มีหมู่เมทิลต่ออยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2
 - พาราฟินแบบกิ่ง คือ พาราฟินที่มีกิ่งหรือสาขาแตกออกจากสายโซ่โมเลกุลหลัก ซึ่งมีหมู่แอลคิลต่ออยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งต่างๆ ที่ไม่ใช่ตำแหน่งที่ 2 และมักจะเป็นหมู่เมทิลมากกว่าหมู่แอลคิลอื่นๆ
- ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.1 [7]



ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างพาราฟินที่พบในน้ำมันดิบ

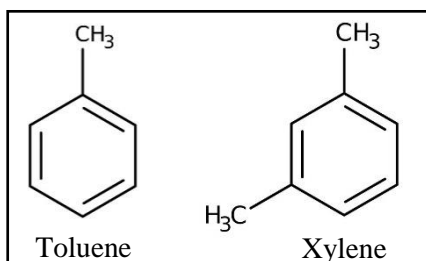
- 2) แนฟทีน (naphthenes) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงหรือเรียกว่า ไฮโคลแอลเคน แนฟทีนที่พบในปิโตรเลียมส่วนใหญ่เป็นวงขนาดห้าเหลี่ยม และหกเหลี่ยม ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.2 [8] แนฟทีนขนาดสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมค่อนข้างไวต่อปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากความเครียดของวงจึงมักเปลี่ยนเป็นสารอื่น แนฟทีนที่เป็นวงห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยมสามารถเปลี่ยนให้เป็นสารแอโรแมติกได้ โดยการทำให้ไฮโดรเจนหลุดออกจากโมเลกุล ในน้ำมันดิบจะมีแนฟทีนสูงถึงร้อยละ 50 จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูง



ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างแนฟทีนที่พบในน้ำมันดิบ

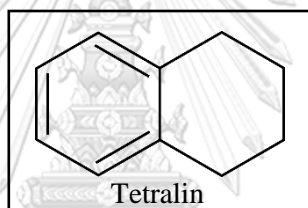
- 3) แอโรแมติก (aromatic) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงหกเหลี่ยม มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว เช่น เบนซีน เป็นต้น มักพบในส่วนกลั่นหนักก่อนุพันธ์ของเบนซีนได้แก่ โทลูอิน

และไซลีน มักพบมากที่สุดอยู่ในปิโตรเลียม สารที่มีวงแโรแมติกหลายวงแนบต่อกัน เช่น แนฟทาลีนและแอนทราซีน เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.3 [8]



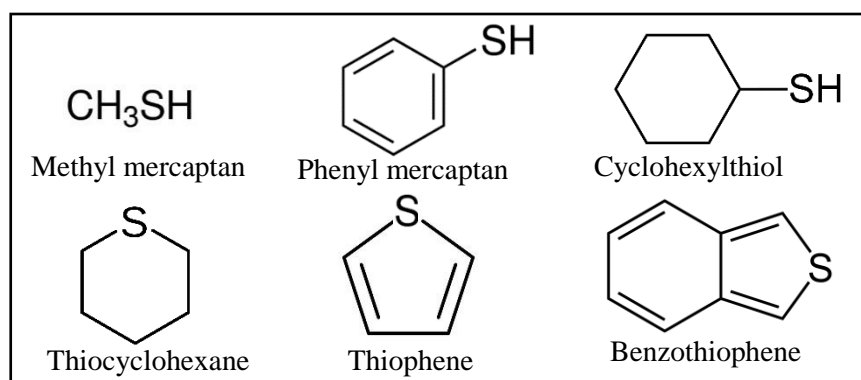
ภาพที่ 2. 3 ตัวอย่างแโรมาติกที่พบในน้ำมันดิบ

- 4) สารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างผสมระหว่างแนฟทีนและแโรแมติกเรียกว่า แนฟทีโน-แโรแมติก (naphtheno-aromatics) เช่น เตตระไฮโดรแนฟทาลีน (tetrahydronaphthalene) หรือเตตระลีน (tetralin) ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.4 [8]



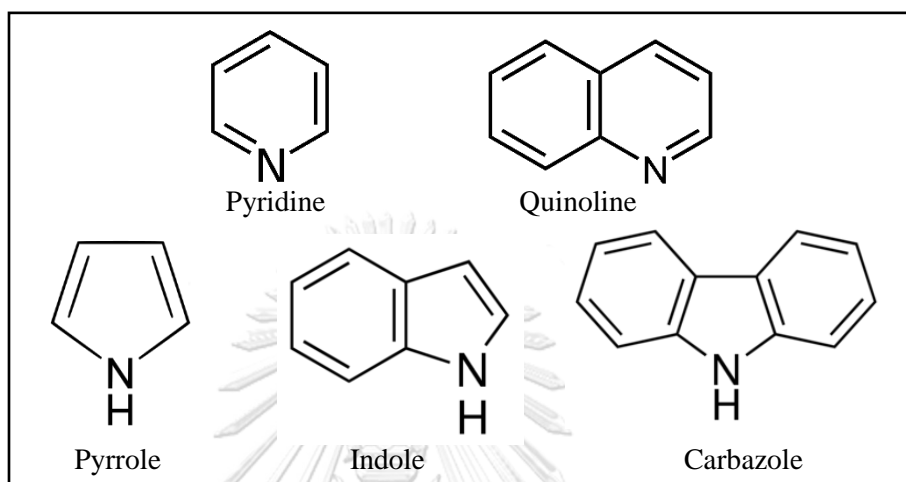
ภาพที่ 2. 4 แนฟทีโน-แโรแมติกที่พบในน้ำมันดิบ

- 5) สารประกอบกำมะถัน หมายถึงสารประกอบที่มีธาตุกำมะถันเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุล สารประกอบกำมะถันเป็นสารที่ปนเปื้อนที่ตรวจพบในน้ำมันดิบมากที่สุด มีกลิ่นและมีฤทธิ์กัดกร่อน ทำปฏิกิริยากับโลหะได้ จึงจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมดก่อนนำไปใช้งาน ได้แก่ ไทออล ซัลไฟด์ และ ไทโอฟิน เป็นต้น แสดงในภาพที่ 2.5 [8]



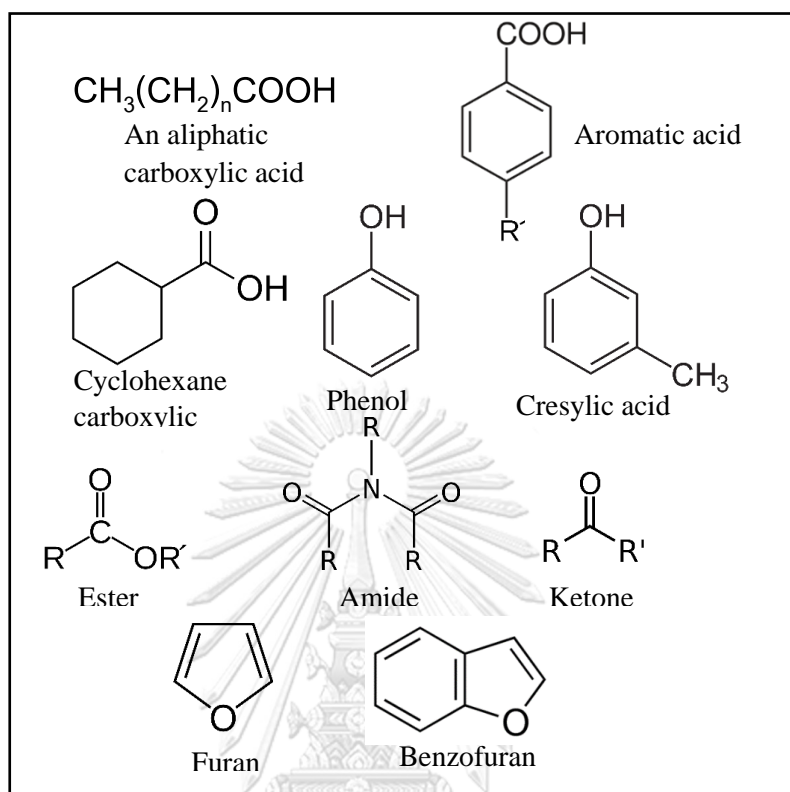
ภาพที่ 2. 5 ตัวอย่างสารประกอบกำมะถันที่พบในน้ำมันดิบ

- 6) สารประกอบไนโตรเจน หมายถึงสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุล มีปริมาณร้อยละ 0.1-2.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันดิบ ได้แก่ พิริดีน ควิโนลีน อินโดล พิโรล และ คาร์บาโซล สารประกอบของไนโตรเจนทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆเสื่อมสภาพเร็ว แสดงในภาพที่ 2.6 [8]



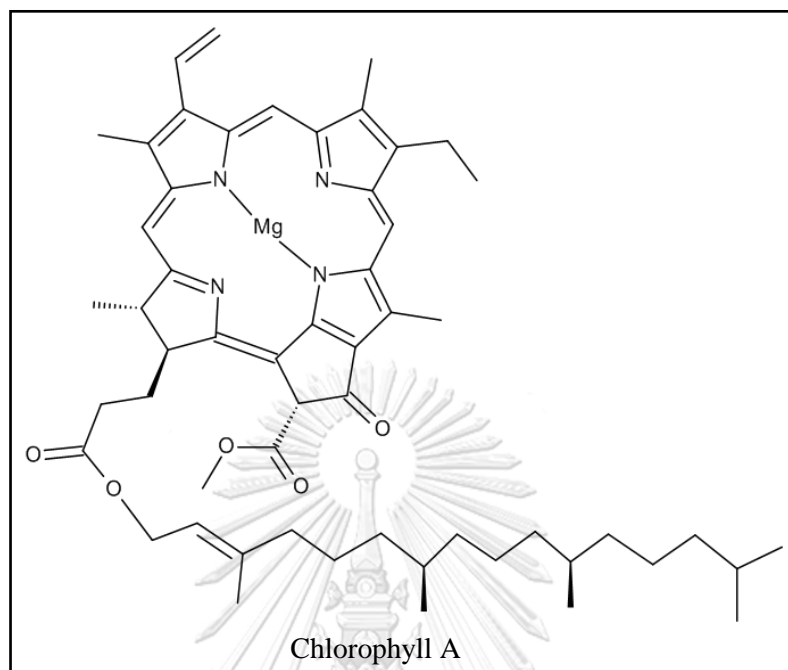
ภาพที่ 2. 6 ตัวอย่างสารประกอบไนโตรเจนที่พบในน้ำมันดิบ

- 7) สารประกอบออกซิเจน มักอยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ในน้ำมันดิบที่มีอายุการสะสมตัวน้อย พบอยู่ในปิโตรเลียมในช่วงร้อยละ 0.1-2.0 โดยน้ำหนัก กรดที่มีโครงสร้างเป็นวงพบมากจะมีจำนวนคาร์บอน 9-13 อะตอม เมื่อมีจำนวนอะตอมมากกว่า 14 อะตอมมักจะอยู่ในรูปวงสองวง บางครั้งอยู่ในรูปของแนฟทีโน-แอโรมาติก นอกจากนี้แล้วยังพบสารประกอบออกซิเจนในรูปของแอลกอฮอล์ ฟีนอล คีโตน เอสเทอร์ และแอนไฮไดรด์ แสดงในภาพที่ 2.7 [8]



ภาพที่ 2. 7 ตัวอย่างสารประกอบออกซิเจนที่พบในน้ำมันดิบ

- 8) สารประกอบออร์แกโนเมทัลลิก น้ำมันดิบส่วนมากมักมีโลหะปะปนอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนของพอร์ไฟริน (porphyrin) จึงเรียกว่า ปีโตรพอร์ไฟริน (petroporphyrins) มีโครงสร้างคล้ายกับคลอโรฟิลล์ โดยมีโลหะอื่นแทนที่แมกนีเซียมที่อยู่ตรงกลางของวงพอร์ไฟริน โลหะที่พบมากได้แก่ แวนเดียม และนิกเกิล ที่พบรองลงมาได้แก่ ทองแดง และเหล็ก หมู่แทนที่ที่อยู่รอบวงพอร์ไฟรินอาจแตกต่างจากคลอโรฟิลล์เล็กน้อย หรืออาจไม่มีหมู่แทนที่เลยที่บางตำแหน่ง สารประกอบเชิงซ้อนของพอร์ไฟรินแวนเดียมและนิกเกิลมีความเสถียรสูง และสามารถถลันแยกออกมาได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 2.8 [9]



ภาพที่ 2. 8 ตัวอย่างสารประกอบออร์แกโนเมทัลลิกในน้ำมันดิบ

2.1.2 แก๊สธรรมชาติ

แก๊สธรรมชาติ [10] คือ แก๊สชีวภาพชนิดหนึ่ง กำเนิดจากการทับถมของซากสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์เป็นเวลานานนับหลายล้านปี โดยซากพืชซากสัตว์เหล่านี้จะแปรสภาพเป็นแก๊สและน้ำมัน เนื่องจากความร้อนและความกดดันของผิวโลกและสะสมอยู่ในชั้นดินแก๊สธรรมชาติจึงจัดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่ง (มีสูตรทางเคมีเป็น C_nH_{2n+2}) โดยทั่ว ๆ ไปจะประกอบด้วยแก๊สมีเทน (Methane, CH_4) ประมาณ 70 % ขึ้นไป ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของแหล่งแก๊สธรรมชาติแต่ละแหล่งเป็นสำคัญ

ในแหล่งหรือบ่อแก๊สธรรมชาตินั้น เราอาจพบแก๊สธรรมชาติที่อยู่ในสถานะเป็นแก๊ส (Gas Phase) ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนที่เบา คือ มีคาร์บอนน้อย ตั้งแต่ (C_1 - C_4) หรือมีสถานะเป็นของเหลว (Liquid Phase) ที่ปะปนอยู่กับแก๊ส เนื่องจากมีส่วนประกอบของไฮโดรคาร์บอนชนิดหนัก (ตั้งแต่ C_5 ขึ้นไป) อยู่มากซึ่งจะอยู่ในสถานะใดนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (Temperature) และความดัน (Pressure) นอกจากนี้ เรายังอาจพบแก๊สธรรมชาติจากแหล่งเดียวกันกับน้ำมันดิบได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม แม้แก๊สธรรมชาติจากต่างแหล่งจะมีสัดส่วนองค์ประกอบของ

แก๊สไม่เหมือนกัน มีสถานะแตกต่างกันแต่ก็สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ใน 2 ลักษณะใหญ่ ๆ คือ ใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเคมี

โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกตามสมบัติทางเทคนิคได้ 4 ประเภท [11] ดังนี้

- 1) Sweet gas หมายถึง แก๊สที่มีปฏิกิริยาเป็นกลางต่อกระดาษ pH ที่เปียกน้ำ โดยมีแก๊สมีเทนเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักเบาที่สุด และอาจพบ อีเทน โพรเพน และเพนเทน ปะปนอยู่บ้าง
- 2) Sour gas หมายถึง แก๊สธรรมชาติที่มีกรดกำมะถันเจือปนอยู่สูง ทำให้เกิดสภาพที่เป็นกรดขึ้น สามารถตรวจสอบได้โดยใช้กระดาษ pH ที่เปียกน้ำ ถ้ามีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ปะปนอยู่สูง อาจทำให้แก๊สนั้นมีพิษได้ ดังนั้นจึงต้องกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนส่งไปยังที่อื่น
- 3) Dry gas หมายถึง แก๊สธรรมชาติที่ไม่มีส่วนผสมของแก๊สธรรมชาติเหลว (condensate) มีแต่แก๊สมีเทนเกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ ทำให้มีราคาสูงกว่าแก๊สธรรมชาติชนิดอื่นๆ
- 4) Wet gas หมายถึง แก๊สธรรมชาติที่มีส่วนผสมหลักเป็นพวกแก๊สธรรมชาติเหลว ได้แก่ โพรเพน บิวเทน เพนเทน และเฮกเซน แก๊สเหล่านี้จะกลายเป็นของเหลวได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูง ทำให้เกิดปัญหาในการขนส่ง

คุณสมบัติทั่วไปของแก๊สธรรมชาติ

- เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพชนิดหนึ่งเกิดจากการทับถมของซากสิ่งมีชีวิตนับล้านปี
- ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ปราศจากสารพิษ
- เบากว่าอากาศ (ความถ่วงจำเพาะ 0.5 - 0.8)
- มีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ
- ติดไฟ ช่วงการติดไฟที่ 5 - 15% ของปริมาตรในอากาศ
- เผาไหม้สมบูรณ์ ไม่มีเขม่า

แก๊สธรรมชาติที่พบในสถานะเป็นแก๊ส เมื่อผ่านการจัดสรรประกอบหรือสารปนเปื้อนที่ไม่ต้องการออกไปแล้ว ก็จะถูกส่งเข้าโรงแยกแก๊สได้ทันที แต่สำหรับแก๊สธรรมชาติที่พบจากแหล่งในสถานะที่เป็นของเหลวนั้น จะต้องผ่านการแยกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวที่หนัก ๆ (มีคาร์บอนตั้งแต่ C₂₀ ขึ้นไป) ออกมาก่อน โดยอาศัยการควบแน่น (Condense) ของเหลวที่ได้จากกระบวนการนี้ จึงมีชื่อเรียกว่า "คอนเดนเสท" (Condensate) ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันสำเร็จรูปสำหรับแก๊สธรรมชาติส่วนที่เหลือก็จะส่งเข้าโรงแยกแก๊สต่อไป

กระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ตามความเหมาะสม และให้เกิดคุณค่าทางเศรษฐกิจสูงสุด จะแตกต่างจากกระบวนการกลั่นน้ำมันที่เริ่มต้นการกลั่นด้วยการแยกองค์ประกอบน้ำมันส่วนที่เบาที่สุดออกมาก่อน ขณะที่การแยกแก๊สธรรมชาตินั้น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนส่วนที่หนักที่สุดจะถูกแยกออกเป็นลำดับแรก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากโรงแยกแปรสภาพแก๊สธรรมชาติ สามารถจำแนกตามลักษณะของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่แยกออก และนำไปใช้ประโยชน์ต่อกระบวนการผลิตอื่น ๆ ได้แก่

- 1) แก๊สโซลีนธรรมชาติ หรือ Natural Gasoline (NGL, C_5H_{12}) ประกอบด้วย แก๊สเพนเทน เฮกเซนและสารประกอบตัวอื่น ๆ ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ตั้งแต่ C_5H_{12} ขึ้นไป NGL จะนำมา กลั่นเป็นน้ำมันเบนซิน (Motor Gassoline) และสำหรับบางส่วนของแก๊สเพนเทน เฮกเซน และเฮปเทน รวมทั้งสารประกอบตัวอื่น ๆ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นของเหลวที่ระเหยได้เร็ว จะแยก ส่งให้กับโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเป็นวัตถุดิบสำหรับเป็นตัวทำละลายในการทดลองทาง เคมี หรืออุตสาหกรรมสีแล็กเกอร์ ทินเนอร์ อุตสาหกรรมยาง เป็นต้น
- 2) แก๊สปิโตรเลียมเหลว หรือ Liquefied Petroleum Gas (LPG, C_3+C_4) ประกอบด้วย แก๊สโพรเพนและบิวเทน เนื่องจากเป็นแก๊สที่ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้มในอุตสาหกรรม และครัวเรือน จึงถูกทำให้อยู่ในสภาพของเหลวบรรจุในถัง เพื่อความปลอดภัยในการใช้และขนส่ง นอกจากนี้ยังเป็นแก๊สที่มีผู้นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์และโรงงานอุตสาหกรรม ด้วย
- 3) แก๊สบิวเทน (Butane, C_4) สามารถแยกไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารเคมีและพลาสติก บางชนิด เช่น กระเป๋าเดินทาง อุปกรณ์การแพทย์ และยางรถยนต์ ฯลฯ (แต่ปัจจุบันยังไม่มี การแยกแก๊สบิวเทนออกมา)
- 4) แก๊สโพรเพน (Propane, C_3) บางส่วนจะถูกแยกออกมา เพื่อนำมาใช้ผลิตโพรพิลีนใน อุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้เช่นกัน เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเม็ดพลาสติก ที่เรียกว่า Polypropylene ใช้กับอุตสาหกรรมผลิตยางสังเคราะห์ แผ่นฟิล์ม ถุงร้อนใส่อาหาร หรือ กระสอบ เป็นต้น
- 5) แก๊สอีเทน (Ethane, C_2) จะส่งให้กับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เพื่อผลิตเอทิลีนที่เป็นวัตถุดิบใน การผลิตเม็ดพลาสติกชนิดต่าง ๆ รวมทั้งผลิตเอทิลแอลกอฮอล์ หรือเอทานอล ใช้ในการผลิต เครื่องดื่มแอลกอฮอล์หรือเป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมเคมีอื่น ๆ

- 6) แก๊สมีเทน (Methane, C_1) องค์ประกอบส่วนใหญ่ของแก๊สธรรมชาตินั้นกว่าครึ่งหนึ่งคือแก๊สมีเทนซึ่งนับแต่อดีตถึงปัจจุบันการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทยจะส่งแก๊สมีเทนให้แก่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิต ปูนซีเมนต์ เซรามิกและบางส่วนก็ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยเคมีเมทิลแอลกอฮอล์ หรือแอมโมเนียม

2.2 พลังงานจากชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) [12, 13] เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ และสามารถนำพลังงานที่กักเก็บไว้เหล่านั้นมาใช้ผลิตพลังงานได้ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานโดยธรรมชาติได้แก่ พืชและสัตว์ ปัจจุบันชีวมวลหมายรวมถึง พืช ต้นไม้ เศษวัสดุเหลือใช้ทั้งจากการแปรรูปและการเก็บเกี่ยว เช่น ชี้อ้อย เปลือกไม้ แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย ชังข้าวโพด เป็นต้น นอกจากนี้ยังหมายถึง มูลสัตว์ ของเสียอินทรีย์ ขยะและวัสดุเหลือใช้ทั้งจากชุมชนและจากภาคอุตสาหกรรม ในชีวมวลประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ไนโตรเจน ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปผลผลิตเป็นพลังงานได้ สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งการทำให้เป็นพลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า กระบวนการแปรรูปพลังงานชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่นๆ [14] มีดังนี้

- 1) การเผาไหม้โดยตรง (combustion) เมื่อนำชีวมวลมาเผา จะได้รับความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ตัวอย่างชีวมวลประเภทนี้คือ เศษวัสดุทางการเกษตร และเศษไม้
- 2) การผลิตแก๊ส (gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่าแก๊สชีวภาพ (biogas) มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ สามารถนำไปใช้กับกังหันแก๊ส (gas turbine)
- 3) การหมัก (fermentation) เป็นการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ ชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัว เกิดแก๊สชีวภาพ (biogas) ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า
- 4) การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช มีกระบวนการที่ใช้ผลิตดังนี้
 - กระบวนการทางชีวภาพ ทำการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ให้เป็นเอทานอล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน

- กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมัน จากนั้นนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการ transesterification เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล
- กระบวนการใช้ความร้อนสูง เช่นกระบวนการไพโรไลซิส เมื่อวัสดุทางการเกษตรได้รับความร้อนสูงในสภาพไร้ออกซิเจน จะเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวและแก๊สผสมกัน

ข้อดีในการใช้ชีวมวล [15]

- มีจำนวนมหาศาลเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม
- มีราคาต่ำ ทำให้เอน้ำที่ผลิตได้มีราคาต่ำกว่าที่ผลิตจากน้ำมันถึง 3 เท่า
- เป็นเชื้อเพลิงสะอาดไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม
- ภาครัฐและกองทุนระหว่างประเทศให้การสนับสนุนการใช้ชีวมวล

ข้อด้อยในการใช้ชีวมวล

- ถ้าต้องใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยจะมีค่าการลงทุนสูง
- ยังขาดงานวิจัยในการแปลงรูปพลังงานความร้อน
- การใช้ชีวมวลผลิตพลังงานยังมีประสิทธิภาพต่ำ

2.3 ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน (Oil palm) [16, 17] มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Elaeis guineensis* Jacq. เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่อยู่ในวงศ์ *Arecaceae* (Palmae) นับเป็นพืชวงศ์ใหญ่ที่สุด (รองจากหญ้า) ทั้งในแง่จำนวนของชนิด และปริมาณที่มีอยู่อย่างอุดมสมบูรณ์ จำแนกได้กว่า 210 สกุล ราว 3,800 ชนิด มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา ในประเทศไทยพบปลูกทั้งทางภาคใต้ และภาคตะวันออก

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ [18]

- 1) ราก ปาล์มน้ำมันมีระบบรากฝอย ปาล์มน้ำมันที่โตเต็มที่ ประกอบด้วย รากแรก สอง สาม และสี่ แตกแขนงออกมาตามลำดับ สานกันอย่างหนาแน่นระดับลึกลงดิน 30-50 เซนติเมตร
- 2) ลำต้น ปาล์มน้ำมันมีความสูงได้มากกว่า 30 เมตร และมีอายุยืนนานมากกว่า 100 ปี แต่การปลูกปาล์มน้ำมันทางการค้า ไม่ควรมีความสูงเกิน 15 – 18 เมตร หรืออายุประมาณ 25 ปี

- 3) ใบ ใบของปาล์มน้ำมันเป็นใบประกอบรูปขนนก (pinnate) แต่ละใบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแกนกลางที่มีใบย่อยอยู่ 2 ข้าง และส่วนก้านทางใบ แต่ละทางใบมีใบย่อย 100-160 คู่ แต่ละใบย่อยยาว 100-120 เซนติเมตร กว้าง 4-6 เซนติเมตร
- 4) ดอก ปาล์มน้ำมัน เป็นพืชผสมข้าม มีดอกเพศเมียและดอกเพศผู้แยกช่อดอกภายในต้นเดียวกัน (monoecious) เมื่อดอกเจริญเต็มที่ช่อดอกย่อยตัวผู้มีขนาดยาว 10-20 เซนติเมตร หนา 0.8-1.5 เซนติเมตร มีลักษณะคล้ายนิ้วมือ ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ช่อดอกจะพัฒนาเป็นช่อดอกเพศเมียเป็นส่วนใหญ่ ช่อดอกตัวเมียจะพัฒนาไปเป็นทะลายที่สุกแก่เต็มที่ สามารถเก็บเกี่ยวได้
- 5) ทะลาย ทะลายปาล์มน้ำมัน ประกอบด้วย ก้านทะลาย ช่อดอกย่อย และผล ในแต่ละทะลายมีปริมาณผล 45-70% ทะลายปาล์มน้ำมันเมื่อสุกเต็มที่จะมีน้ำหนักประมาณ 1-60 กิโลกรัม
- 6) ผล ผลปาล์มน้ำมันไม่มีก้านผล (sessile drup) รูปร่างมีหลายแบบ ทั้งแบบเรียวยาวแหลม รูปไข่ หรือรูปยาวรี ความยาวผลอยู่ระหว่าง 2-5 เซนติเมตร น้ำหนักผล 3-30 กรัม ผลปาล์มประกอบด้วยผิวเปลือกนอก (exocarp) ชั้นเปลือกนอก (mesocarp) เป็นเนื้อเยื่อเส้นใย สีส้มแดงเมื่อสุกและมีน้ำมันอยู่ในชั้นนี้

ลักษณะเด่นของปาล์มน้ำมัน [19]

- 1) เป็นพืชที่ปลูกได้จำกัดเฉพาะพื้นที่ในเขตพื้นที่ร้อนชื้นเท่านั้น ซึ่งภาคใต้เป็นพื้นที่ที่เหมาะสมที่สุด
- 2) เป็นพืชที่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมในประเทศไทยได้ดี
- 3) เป็นพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ ที่ให้ราคาถูกกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่น
- 4) เป็นพืชที่ให้พลังงานที่จำเป็นต่อการบริโภคและอุปโภคของประชากรในชีวิตประจำวัน
- 5) เป็นพืชที่ให้วัสดุพลอยได้จากทุกส่วนของต้นปาล์มที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้
- 6) เป็นพืชที่มีจำนวนต้นต่อพื้นที่ปลูกน้อย (ประมาณ 22 ต้นต่อไร่) ทำให้ง่ายต่อการจัดการด้านแรงงาน

- 7) เป็นพืชยืนต้นที่สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตทะเลาะได้ตลอดทั้งปี อายุการเก็บเกี่ยวมากกว่า 25 ปี จึงทำให้เกษตรกรและผู้ประกอบการโรงงานมีรายได้ต่อเนื่องตลอดทั้งปีและมีระยะ เวลาติดต่อกันนาน
- 8) เป็นพืชที่ทนทานต่อการเกิดภัยธรรมชาติ เช่น กรณีเกิดไฟไหม้สวน ปาล์มน้ำมันสามารถฟื้นฟูสภาพกลับมาเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ใหม่
- 9) เป็นพืชน้ำมันที่มีความสำคัญในอนาคต โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่น้ำมันเชื้อเพลิงธรรมชาติขาดแคลนหรือมีราคาสูงมากๆ อาจจะใช้ น้ำมันปาล์มมาเสริมทดแทนได้บางส่วน

2.3.1 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม

กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม [20] มีกระบวนการผลิต 4 ขั้นตอน คือ

- 1) การอบทะเลาะด้วยไอน้ำ (Sterilization) โดยการอบที่อุณหภูมิ 130 ถึง 135 องศาเซลเซียส ใช้ความดัน 2.5 ถึง 3 บาร์ ใช้ระยะเวลา 50 ถึง 75 นาที การอบทะเลาะจะช่วยหยุดปฏิกิริยาไลโปไลซิส ที่ก่อให้เกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์ม และช่วยให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มหลุดจากขั้วผลได้ง่าย
- 2) การแยกผล (Stripping) เป็นการส่งทะเลาะปาล์มเข้าเครื่องแยกผลปาล์มออกจากทะเลาะ สำหรับทะเลาะเปล่าจะถูกแยกออกไป จากนั้นนำผลปาล์มที่ได้ไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์ม เพื่อให้ส่วนเปลือกแยกออกจากเมล็ด
- 3) การสกัดน้ำมัน (Oil Extraction) อบโดยการนำส่วนเปลือกมาอบที่อุณหภูมิ 90 ถึง 100 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 20 ถึง 30 นาที หลังจากนั้นจึงผ่านเข้าเครื่องหีบแบบเกลียวอัดคู่ จะได้น้ำมันปาล์มดิบที่มีองค์ประกอบคือ น้ำมัน 66 เปอร์เซ็นต์ น้ำ 24 เปอร์เซ็นต์ และของแข็ง 10 เปอร์เซ็นต์
- 4) การทำความสะอาดน้ำมันปาล์มดิบ (Clarification) เป็นการนำน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จากการสกัด ส่งไปยังถังกรองเพื่อแยกน้ำและของแข็งออกจากกัน จากนั้นนำเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อทำความสะอาดอีกครั้ง ทำการไล่น้ำออกเพื่อทำให้ปาล์มแห้ง และส่งเข้าถังเก็บน้ำมันสำหรับรอการกลั่นหรือจำหน่ายต่อไป น้ำมันปาล์มดิบที่ได้ จะแยกเป็นสองส่วน คือ ส่วนบนจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีส้มแดง (Crude Palm Oil Olein) ปริมาณประมาณ 30 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนล่างมีลักษณะเป็นไขสีเหลืองส้ม (Crude Palm Oil Stearin) ปริมาณ

- ประมาณ 50 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกากผลปาล์มจะถูกนำมาแยกเส้นใยออกจากเมล็ด และนำเมล็ดที่ได้มาอบแห้งและทำความสะอาด จากนั้นนำเข้าสู่เครื่องกะเทาะเพื่อแยกกะลา
- 5) ออก และนำเมล็ดในมาอบแห้งโดยให้ความชื้นไม่เกิน 7 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นบรรจุลงใน
 - 6) กระสอบเพื่อรอจำหน่าย หรือหีบน้ำมันต่อไป สำหรับน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดใน
 - 7) ปาล์มที่ได้จากกระบวนการการสกัด สามารถส่งเข้าสู่โรงงานอุตสาหกรรมเพื่อทำให้บริสุทธิ์ หรือจะนำไปแยกส่วน(Fractionation)ก่อนก็ได้ซึ่งจะได้น้ำมันปาล์มที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน

โดยทั่วไปน้ำมันปาล์มดิบมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้ คือ

- 1) Glycerides ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์
- 2) Fatty Acids ประมาณ 3 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีองค์ประกอบของกรดไขมันอิ่มตัวต่อกรดไขมันไม่อิ่มตัว ในสัดส่วนประมาณ 50 ต่อ 50
- 3) Minor and Trace Component ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประกอบไปด้วย Phytonutrient ที่มีคุณค่าทางอาหารสูง และสารอื่นๆ เช่น Carotenoid, Tocopherols, Tocotrienols, Sterols, Triterperpene Alcohols, Phospholipids, Glycolipids, Terpenic Hydrocarbons, Waxes

2.3.2 ผลผลิตจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีผลผลิตในลักษณะต่างๆพร้อมคุณสมบัติ [19] แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2. 2 องค์ประกอบ ลักษณะและการนำไปใช้ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดปาล์ม น้ำมันทางตรงและทางอ้อม

องค์ประกอบ	ลักษณะ	คุณสมบัติ
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดปาล์มน้ำมันทางตรง		
1.Crude Palm Oil (CPO)	น้ำมันปาล์มดิบ มีลักษณะขุ่น สีส้ม ขุ่น ฅ อุณหภูมิปกติ	ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการกลั่น น้ำมันปาล์ม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ ต่อเนื่องอื่น ๆ
2.Crude Palm Kernel Oil (KO)	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม มีลักษณะกึ่ง ของเหลว สีเหลืองอบน้ำตาล ฅ อุณหภูมิปกติ	ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการกลั่น น้ำมันเมล็ดในปาล์ม เพื่อให้ได้ ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องอื่น ๆ

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) แสดงองค์ประกอบ ลักษณะและการนำไปใช้ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดปาล์มน้ำมันทางตรงและทางอ้อม

องค์ประกอบ	ลักษณะ	คุณสมบัติ
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดปาล์มน้ำมันทางอ้อม		
1.RBD palm Kernel Oil (RKO)	น้ำมันเมล็ดในปาล์มบริสุทธิ์ มีลักษณะกึ่งของเหลว สีเหลืองอ่อน หน อุ่น หน อุดมภูมิปกติ	ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตสบู่ อุตสาหกรรมอาหาร เช่น นมข้นหวาน ไอศกรีม เนยขาว ฯลฯ
2.RBD Palm Oil (RPO)	น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ มีลักษณะกึ่งของเหลว สีเหลืองอ่อน หน อุดมภูมิปกติ	ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหาร ที่เกี่ยวกับการทอดทุกชนิด รวมถึงการนำไปใช้ประกอบอาหารภายในครัวเรือน
3.RBD Palm Oil (ROL)	น้ำมันปาล์มโอเลอิน มีลักษณะใส สีเหลือง หน อุดมภูมิปกติ และไม่มีสิ่งเจือปน	ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหาร ที่เกี่ยวกับการทอดทุกชนิด เช่น ขนมขบเคี้ยว อาหารทอดสำเร็จรูป ฯลฯ
4.RBD Palm Stearin (PHST)	ไขปาล์มบริสุทธิ์ มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว หน อุดมภูมิปกติ	ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเนยเทียม เนยขาว ครีมฉาบหน้าขนม ฯลฯ รวมถึงอุตสาหกรรมผลิตสบู่โอเลโอเคมีคอล ฯลฯ
5.Palm Fatty Acid Distillate (PFAD)	กรดไขมันปาล์ม มีลักษณะเป็นของแข็งสีน้ำตาลอ่อน หน อุดมภูมิปกติ	ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตสบู่ อุตสาหกรรมโอเลโอเคมีคอล การผลิตวิตามิน E รวมถึงอุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซล
6. Palm Kernel Fatty Acid Distillate (KFAD)	กรดไขมันเมล็ดในปาล์ม มีลักษณะใสสีเหลือง หน อุดมภูมิปกติ	ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตสบู่ อุตสาหกรรมโอเลโอเคมีคอล รวมถึงอุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซล
7. Kernel Meal (KM)	กากเมล็ดในปาล์ม มีลักษณะเป็นเกล็ดละเอียด สีน้ำตาลอ่อน	ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัตว์ใหญ่

กากปาล์มน้ำมันที่ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบทั้งในส่วนของเส้นใย กะลาและทะลายเปล่านั้นสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เรียกว่า “ชีวมวล” พลังงานชีวมวลเป็นพลังงานที่สะสมอยู่ในพืช โดยพืชจะเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์มาเก็บไว้ในส่วนต่างๆ เช่น ต้นปาล์มน้ำมันจะสะสมพลังงานไว้ทุกส่วน ตั้งแต่ผลปาล์ม เส้นใย กะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า ดังนั้น เศษเหลือใช้ของต้นปาล์มน้ำมันจึงสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้พลังงานได้ เรียกว่า “พลังงานชีวมวล”

2.4 กระบวนการไพโรไลซิส

ไพโรไลซิส (Pyrolysis) [21] มาจากคำว่า Pyro ที่แปลว่า “ความร้อน” และ lysis ที่แปลว่า “แยกสลาย” ดังนั้น ไพโรไลซิส คือ การแยกสลายด้วยความร้อนในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการแตกตัวหรือสลายตัวของสารประกอบ หรือวัสดุต่างๆ ด้วยความร้อนปานกลาง ที่อุณหภูมิประมาณ 400 – 800 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน หรือมีออกซิเจนในปริมาณที่น้อยมาก โดยทั่วไปผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามสภาวะ คือ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ของเหลว (ซึ่งโดยทั่วไปมีคุณสมบัติคล้ายน้ำมัน) และของแข็ง (Char) เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ (Primary product) แต่โดยตัวกระบวนการไพโรไลซิสเองแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากที่สุด คือ ของเหลวหรือน้ำมัน คุณภาพของน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับตัวแปร [22, 23] ดังต่อไปนี้คือ

- 1) สภาวะที่ใช้ เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเร็วในการให้ความร้อน อุณหภูมิสุดท้าย เวลาที่ใช้ บรรยากาศในเครื่องปฏิกรณ์ และระบบการป้อน เป็นต้น
- 2) ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งมีผลต่ออัตราเร็วการให้ความร้อนและเวลาที่ใช้ในกระบวนการ
- 3) วัตถุดิบที่ป้อนเข้า เช่น ขนาด ชนิดและส่วนผสม ซึ่งแตกต่างกันไปตามประเภทแหล่งที่มา และอายุการใช้งานของวัตถุดิบนั้น เป็นต้น

ความร้อนที่ให้แก่กระบวนการไพโรไลซิส เป็นความร้อนทางอ้อมที่ให้แก่เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส แล้วถ่ายเทไปให้กับวัตถุที่อยู่ข้างใน ปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วย ขั้นแรก การสลายตัวของสารที่ระเหยง่ายออกจากวัตถุดิบ (Devolatilization) ขั้นที่สอง เป็นการแตกตัวของวัตถุดิบเอง โดยที่องค์ประกอบที่สามารถแตกตัวได้ที่สภาวะที่ใช้ก็จะแตกตัวออกมาเป็นโมเลกุลที่เล็กลง และเล็กลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่ให้หรืออุณหภูมิที่กำหนด จนกระทั่งเกิดการแตกตัวที่สมบูรณ์ของ

วัตถุดิบ โดยอุณหภูมิแต่ละชั้นแตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ แต่อย่างไรก็ตาม ถ้ามีการให้ความร้อนและเวลามากเกินไป สารที่ได้จากการแตกตัวของวัตถุดิบจะกลับมารวมตัวกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ หรือเป็นของแข็งชั้นเหนียวติดอยู่ตามอุปกรณ์ต่างๆ ได้ ก่อให้เกิดผลผลิตที่ด้อยคุณภาพ หรือก่อให้เกิดผลผลิตที่ทำให้ต้องหยุดการผลิตชั่วคราว เพื่อทำการซ่อมแซมอุปกรณ์ ดังนั้นภาวะที่ใช้ในการไพโรไลซิสจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ด้วย การเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสภายในเครื่องปฏิกรณ์นั้น สารผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่เป็นของเหลวและแก๊สนั้น ในตอนเริ่มต้นของปฏิกิริยาจะเกิดเป็นแก๊สทั้งหมดภายในเครื่องปฏิกรณ์ แต่เมื่อมีการลดอุณหภูมิของสารผลิตภัณฑ์ลงมาที่อุณหภูมิปกติจึงจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวออกมา ดังนั้นในกระบวนการไพโรไลซิสจึงต้องมีส่วนที่ลดความร้อนและควบแน่นผลิตภัณฑ์ของเหลวเพื่อใช้ในการแยกระหว่างแก๊สผลิตภัณฑ์และน้ำมันไพโรไลซิส ส่วนของแข็งที่เกิดระหว่างปฏิกิริยาจะใช้วิธีการแยกออกภายในเครื่องปฏิกรณ์จะติดออกมากับแก๊สผลิตภัณฑ์น้อยมาก และภายหลังจากการกลั่น ของแข็งที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสก็จะถูกแยกออกไปอย่างสมบูรณ์ การควบแน่นแก๊สที่เกิดขึ้นนั้นมีผลิตภัณฑ์สถานะแก๊สและของเหลวผสมกันอยู่ ซึ่งจะต้องทำการแยกผลิตภัณฑ์แก๊สและของเหลว ออกจากกัน การระบายความร้อนออกจากแก๊สโดยน้ำหล่อเย็นที่ใช้ อุณหภูมิอยู่ที่ 25-30 องศาเซลเซียส ถ้าแก๊สควบแน่นไม่สมบูรณ์ในแก๊สอาจจะมีส่วนประกอบของน้ำมันปนออกมาเล็กน้อย อีกผลิตภัณฑ์หนึ่งก็คือของเหลวซึ่งมีลักษณะคล้ายน้ำมันดิบนั้น นำไปกลั่นและปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป

ในบางครั้งอาจมีการเติมไฮโดรเจนหรือไอน้ำเข้าในกระบวนการไพโรไลซิสด้วย ทั้งเพื่อเปลี่ยนการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ และทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันมีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนจะเข้าไปรบกวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยออกซิเจนที่มีอยู่ในเนื้อของวัตถุดิบ การเติมน้ำในปริมาณไม่มากเกินไปเข้าไปเป็นตัวกลางในกระบวนการไพโรไลซิส จะทำให้ไปเพิ่มความดันให้กับกระบวนการ ทำให้วัตถุดิบเกิดเป็นของไหลได้ง่าย และทำให้ถ่านที่ได้จากกระบวนการมีค่าพื้นที่ผิวสูงขึ้น (ในกรณีที่ต้องการถ่านกัมมันต์ หรือถ่านดูดซับ) เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิส [13]

- 1) ของแข็งหรือชาร์ โดยทั่วไปมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก และมีค่าความร้อนอยู่ประมาณ 32 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม
- 2) ของเหลว เป็นของเหลวสีน้ำตาลหรือดำ ผลิตภัณฑ์ส่วนนี้ถูกเรียกได้หลากหลาย อาทิ น้ำมันชีวภาพหรือไบโอบอยล์ (bio-oil) น้ำมันทาร์ (tar) น้ำมันดิบชีวภาพ (bio-crude)

เป็นต้น โดยทั่วไปน้ำมันชีวภาพมักมีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 20-40 โดย น้ำหนัก น้ำหนัก และเป็นสารผสมที่ประกอบด้วยสารประกอบหลากหลายชนิดซึ่งเกิดขึ้น ระหว่างการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่อยู่ในโครงสร้างของ ชีวมวล

- 3) แก๊ส เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากทั้งการสลายตัวด้วยความร้อนทั้งขั้นต้นการสลายตัวขั้นที่สอง ซึ่งปลดปล่อยไอระเหยที่ไม่ควบแน่นที่อุณหภูมิห้อง (noncondensable gases) ผลิตภัณฑ์แก๊สโดยทั่วไปประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน อีเทน และเอทิลีน เป็นองค์ประกอบ และมีความร้อนต่ำประมาณ 10-15 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้พลังงานในลักษณะต่างๆ ได้

2.5 เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงดีเซล

ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้หลายวิธี [24] คือ การใช้โดยตรงและผสม กระบวนการแตกสลายเชิง ความร้อน (Pyrolysis) กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการทำ ปฏิกิริยากับเมทานอลในสถานะเหนือวิกฤต นอกจากนี้ยังมีการผลิตไบโอดีเซลด้วยกระบวนการ ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ในการผลิตไบโอดีเซลด้วย วิธีการผลิต ไบโอดีเซลดังกล่าวข้างต้นแสดงรายละเอียดดังนี้

- 1) การใช้โดยตรงและการผสม

การใช้โดยตรงคือ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชต่างๆ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมัน ถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันหมู ซึ่งสามารถนำเอามาใช้ได้เลยกับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมหรือผสมสารเคมีอื่นหรือไม่ต้องนำมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมัน ส่วนแบบ ผสมคือเป็นการผสมระหว่างน้ำมันพืช (หรือไขมันสัตว์) กับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซลหรือ อื่นๆ เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มากที่สุด เช่น โคโคดีเซลที่ ประจวบคีรีขันธ์ซึ่งเป็นการผสมระหว่างน้ำมันมะพร้าวกับน้ำมันก๊าด หรือที่เรียกปาล์มดีเซล

- 2) กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน

เป็นกระบวนการเปลี่ยนจากสารประกอบหนึ่งชนิดไปเป็นสารประกอบอื่นๆมากกว่าหนึ่งชนิด โดยใช้ความร้อนหรือใช้ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้จะต้องจำกัดปริมาณอากาศ

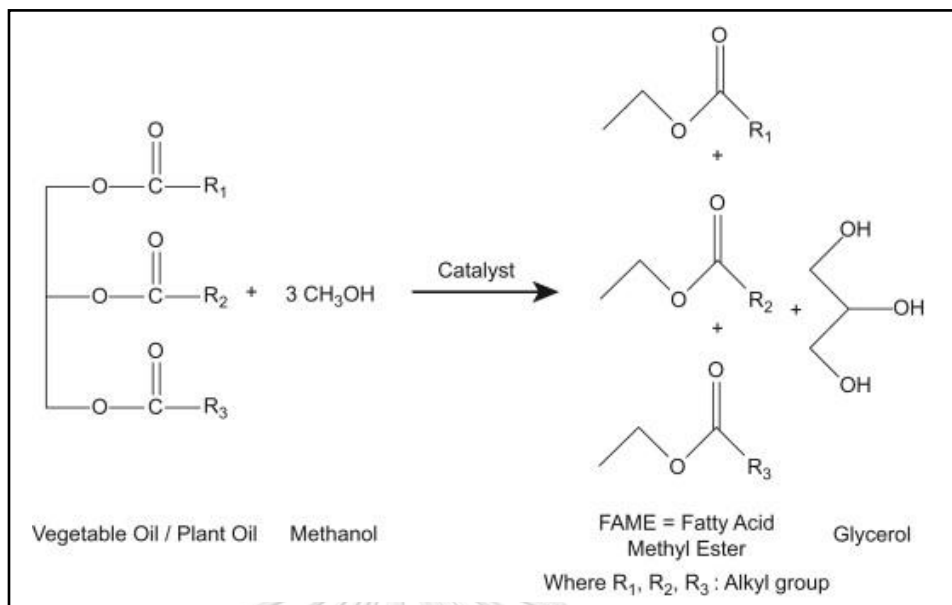
หรือออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการด้วยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการประมาณ 450-600 องศาเซลเซียส สารประกอบที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะถูกทำให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งกระบวนการนี้ยากที่จะกำหนดหรือควบคุมให้ได้ผลิตตามที่ต้องการเนื่องด้วยความหลากหลายทางปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ วัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสได้แก่ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ กรดไขมันธรรมชาติ (Natural Fatty Acid) และเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

3) การทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสภาวะเหนือวิกฤต

เป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งวิธีนี้เป็นกรนำเอาน้ำมันวัตถุดิบมาทำปฏิกิริยากับเมทานอลในสภาวะเหนือวิกฤต ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย พร้อมทั้งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมกล่าวคือ ไม่มีของเสียจากกระบวนการ แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะต้องใช้อุณหภูมิและความดันในระดับที่ค่อนข้างสูงประมาณ 512.2 เคลวิน และ 8.1 เมกะปาสคาลตามลำดับ เพื่อต้องทำให้ เมทานอลอยู่ในสภาวะเหนือวิกฤต

4) ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมสูงสุด เป็นการทำให้ปฏิกิริยาเคมีระหว่างไขมันหรือน้ำมัน (Triglyceride) กับแอลกอฮอล์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์ กรดไขมัน (fatty acid methyl ester, FAME) และกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงซึ่งยากต่อการกำจัด โดยมีตัวเร่งในปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น



ภาพที่ 2. 9 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

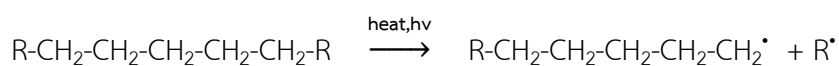
2.6 การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

การแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอน แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

2.6.1 การแตกตัวโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน [25-27]

เป็นกระบวนการแตกตัวทางความร้อนเพื่อเปลี่ยนโมเลกุลสารไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง หากใช้อุณหภูมิสูงเกินไป จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สมีจำนวนคาร์บอน 1-4 อะตอม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวด้วยความร้อน โมเลกุลจะมีกิ่งของโอเลฟิน (olefin) และ ไดโอเลฟิน (diolefin) ที่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากันเองได้ กระบวนการแตกตัวโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (free radical) แบบห่วงโซ่ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ดังนี้

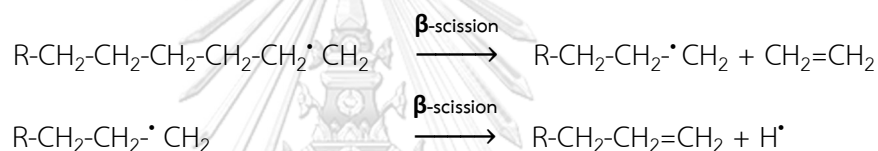
- 1) ขั้นเริ่มต้น (initiation step) คือขั้นที่เกิดอนุมูลอิสระ เนื่องจากความร้อนทำให้พันธะของสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนแตกออก ได้เป็นอนุมูลอิสระซึ่งจะไปทำปฏิกิริยาในขั้นต่อไป แสดงในสมการที่ 2.1



สมการที่ 2.1

- 2) ขั้นการแตกตัวอย่างต่อเนื่อง (propagation step) เป็นขั้นตอนที่เกิดการแตกตัวของพันธะที่เชื่อมระหว่างคาร์บอน 2 ตัว บริเวณตำแหน่งที่สองนับจากตรงคาร์บอนที่มีอิเล็กตรอนที่ยังไม่จับคู่อยู่ หรือตำแหน่งบีตา (β) การแตกตัวที่ตำแหน่งนี้ จะเกิดต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งโมเลกุลมีขนาดเล็กลง จนไม่สามารถจะแตกตัวได้อีกต่อไป แสดงในสมการที่ 2.2 เริ่มจากอนุมูลอิสระเข้าไปยังพันธะของคาร์บอนที่ตำแหน่ง β เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวที่ตำแหน่ง β (β -scission) เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่สั้นลงพร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระใหม่ขึ้น ส่งผลให้สายโซ่คาร์บอนไม่เสถียร ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลที่เล็กลงอาจจะกลับมารวมตัวได้ เป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ เรียกว่าปฏิกิริยาการถ่ายโอนสายโซ่ (chain transfer reactions) ซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนไฮโดรเจน (hydride transfer) จากสายโซ่หนึ่งไปยังอีกสายโซ่หนึ่ง

β -scission

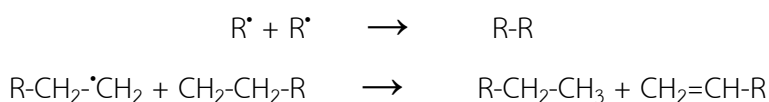


Chain transfer



สมการที่ 2.2

- 3) ขั้นหยุดปฏิกิริยา (termination step) เป็นขั้นที่อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากันเองเพื่อหยุดปฏิกิริยา เกิดขึ้นเมื่อมีการถ่ายโอนโปรตอนระหว่างอนุมูลอิสระสองตัว เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ได้เป็นสารประกอบชนิดอัลคีน โดยอาจเป็นโมเลกุลใหม่โมเลกุลเดียวหรือเกิดเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล แสดงในสมการที่ 2.3

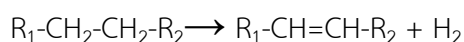


สมการที่ 2.3

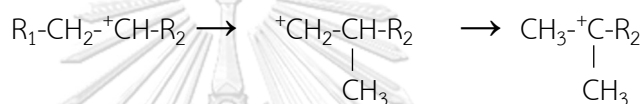
2.6.2 การแตกตัวโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา [26]

เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามาช่วยในการแตกพันธะสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประกอบด้วย

- 1) การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนเนียมไอออน (carbonium ion) เกิดจากโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรต์ไอออนที่มีประจุลบให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ทำให้คาร์บอนเนียมไอออนมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า แสดงในสมการที่ 2.4

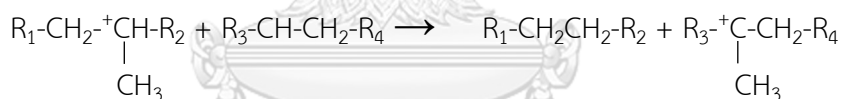


- 2) การเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลคาร์บอนเนียมไอออน เกิดจากหมู่เมทิลมีการเคลื่อนย้ายเพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีความเสถียรของคาร์บอนเนียมไอออน แสดงในสมการที่ 2.5



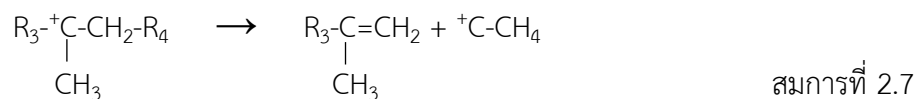
สมการที่ 2.5

ต่อจากนั้นจะเกิดการเคลื่อนย้ายไฮโดรต์ (hydride transfer) โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนเนียมไอออนกับโมเลกุลของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน แสดงในสมการที่ 2.6

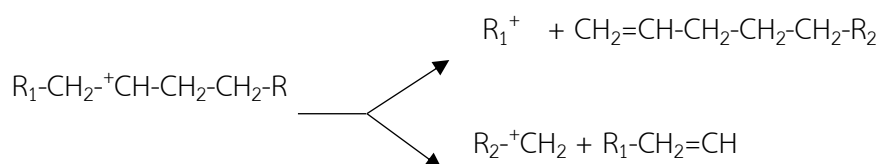


สมการที่ 2.6

สำหรับคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยาหรือการแตกตัวที่ตำแหน่ง β ที่นับจากจุดที่มีประจุบวก ซึ่งจะให้สารประกอบโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง โดยมักจะเป็น primary carbonium ion แสดงในสมการที่ 2.7

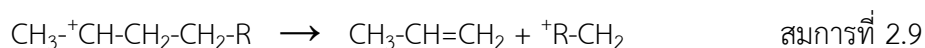


ในบางกรณีคาร์บอนเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 รูปแบบ เช่น ตัวอย่างของ secondary carbonium ion แสดงในสมการที่ 2.8



สมการที่ 2.8

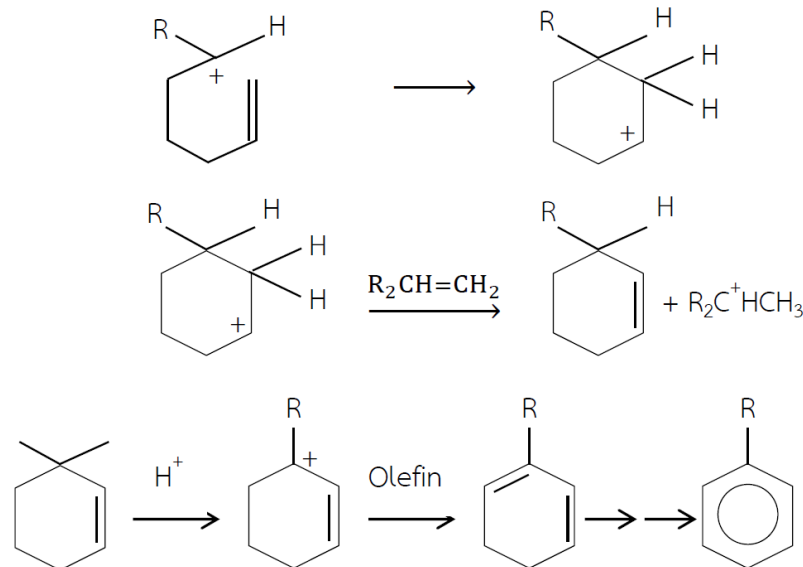
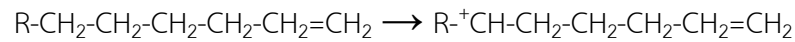
ถ้า $R_1 = H$ จะสามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว แสดงในสมการที่ 2.9



ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพีนซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนและจะอยู่ในรูปของคาร์บอนเนียมไอออน ซึ่งจะไม่สามารถเกิด β -scission ต่อไปได้อีก แสดงในสมการที่ 2.10



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



สมการที่ 2.11

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกพันธะโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยแก๊สที่มีโอเลฟินสูง เกิดเป็นวงเบนซินที่มีค่าออกเทนสูง เนื่องจากมีสารจากพวกอะโรแมติกและโอเลฟินมาก องค์ประกอบของน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กากน้ำมันชนิดใส และโค้ก (coke) ที่เกาะบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้พื้นที่ผิวรูพรุนและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงจนเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.6.3 การแตกตัวไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมในปฏิกิริยา [25]

การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นการรวมปฏิกิริยาเกี่ยวกับคาร์โบเนียมไอออนของกระบวนการการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ากับปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีกิ่งจำนวนมาก เกิดเป็นพาราฟินและแนฟทีน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีหน้าที่ช่วยในการแตกพันธะคาร์บอน-คาร์บอนของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและเติมไฮโดรเจน จึงมักประกอบด้วยสารพวกซิลิกา-อะลูมินา สำหรับการแตกตัวพร้อมด้วยโลหะร่วมกับการเติมไฮโดรเจน โลหะที่ใช้เป็นพวก Rare Earth ที่นิยมคือ Pt, Pd, W และ Ni โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มต้นจากการเกิดโอเลฟินขึ้นที่พื้นผิวส่วนที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโอเลฟินไปทำให้เกิดคาร์บอนเนียมไอออนตรงบริเวณที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจะเกิดการแตกตัวบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา

การเติมแก๊สไฮโดรเจนมีส่วนช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีพันธะอิมตัว นอกจากนี้การเติมแก๊สไฮโดรเจนบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกำจัดไค้กบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเป็นซิลิกา-อลูมินาธรรมชาติที่ไม่เป็นผลึก (amorphous) หรือเป็นประเภทผลึกมีซีโอไลท์ (zeolitic) ก็ได้ แบบหลังมีความไวต่อปฏิกิริยามากกว่าแบบแรก แต่ร้อยละผลได้หรือร้อยละการเลือกเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์จะตกเร็วกว่า การเลือกสารเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับว่าต้องการผลิตภัณฑ์แบบไหนมาก กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมนี้เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์สูง จำเป็นต้องมีการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิให้เหมาะสมเพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดไค้กบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและทำให้เกิดการเสื่อมสภาพหรือลดความสามารถเชิงตัวเร่งบนผิวโลหะออกไซด์ หรือทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหายรวมทั้งอาจไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา [28, 29] เป็นสารช่วยเร่งปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยอาจมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาด้วยหรือไม่ก็ได้เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาต้องมีปริมาณเท่าเดิมและมีคุณสมบัติเหมือนตอนเริ่มต้น การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้เป็นผลมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดพลังงานกระตุ้นหรือพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาให้ต่ำลง แต่จะไม่ทำให้พลังงานของปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้พลังงานก่อกัมมันต์มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับพลังงานของปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดเร็วขึ้น

2.7.1 การแบ่งชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

- 1) ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous Catalyst)
- 2) ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Catalyst)

ความแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด สามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2. 3 ความแตกต่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์และตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์	ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์
1) ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นอยู่ในสถานะเดียวกัน	1) ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นต่างสถานะและอยู่แยกกันโดยมีชั้นระหว่างสถานะแบ่ง
2) ตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งระบบ และสภาพการเคลื่อนที่จะเหมือนกับสารอื่นๆในระบบ	2) ตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายไม่สม่ำเสมอและสภาพการเคลื่อนที่ต่างจากสารอื่นๆในระบบ
3) ตัวเร่งปฏิกิริยากระทำการด้วยมวลสารของตัวเองและอัตราการเร่งปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา	3) ตัวเร่งปฏิกิริยากระทำการโดยอาศัยพื้นที่ผิวและอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับพื้นที่ผิวและความเข้มข้นของตัวเร่งที่ถูกดูดซับ

2.7.2 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญ ดังนี้

- 1) พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญมาก เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การเพิ่มพื้นที่ผิวทำได้ด้วยการลดขนาดของวัสดุให้เล็กลงจนเป็นผงละเอียด แต่วิธีนี้ทำได้ค่อนข้างยาก วิธีเพิ่มพื้นที่ผิวที่ดีที่สุดจึงได้แก่การทำวัสดุให้พรุนโดยทำให้เกิดโพรงเล็กๆ จำนวนมาก
- 2) ขนาดและจำนวนรูพรุน สามารถบอกปริมาณพื้นที่ผิวภายในของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพ่นที่ผิวภายในสูงจะมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่อย่างหนาแน่น ทำให้การกระจายตัวของตำแหน่งกัมมันต์สูง และขนาดของรูพรุนที่เลือกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับโมเลกุลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากตำแหน่งกัมมันต์ได้ดีที่สุด เนื่องจากขนาดของโพรงของตัวเร่งปฏิกิริยานี้ มีความสำคัญต่อความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขนาดของโพรงแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ
 - i) โพรงชนิดแมโครพอร์ (macropores) เป็นกลุ่มที่มีขนาดของโพรงใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร หรือมีรัศมีเฉลี่ยของโพรงใหญ่กว่า 25 นาโนเมตร

- ii) โพรซชนิดมีโซพอร์ (mesopores) เป็นกลุ่มที่มีขนาดของโพรซระหว่าง 2 และ 50 นาโนเมตร หรือมีรัศมีเฉลี่ยของโพรซระหว่าง 1 และ 25 นาโนเมตร
- iii) โพรซชนิดไมโครพอร์ (micropores) หรือโพรซระดับอะตอม เป็นกลุ่มที่มีขนาดของโพรซเล็กกว่า 2 นาโนเมตร หรือมีรัศมีเฉลี่ยของโพรซน้อยกว่า 1 นาโนเมตร

2.8 ถ้ำลอยถ่านหิน

ถ้ำลอยถ่านหิน [30] เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ รวมถึงการเผาไหม้ที่ใช้ถ่านหินในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้มีเถ้า และเถ้าที่เหลือมีสภาพเป็นถ้ำลอย (Fly ash) ปะปนไปพร้อมกับแก๊สเสียในรูปของเขม่าและควัน และเถ้าบางส่วนจะตกลงสู่ก้นเตาเผากลายเป็นเถ้าหนัก (Bottom ash) การแยกถ้ำลอยออกจากแก๊สเสียส่วนใหญ่โรงไฟฟ้าจะใช้เครื่องกำจัดมลพิษทางอากาศ เช่น เครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator : ESP) เครื่องดักฝุ่นแบบถุงกรอง (Fabric filter) และเครื่องแยกฝุ่นแบบไซโคลน (Cyclone separator) เป็นต้น เพื่อดักจับฝุ่นและถ้ำลอย หลังจากนั้นจะทำการนำถ้ำลอยที่ได้ไปเก็บรวบรวมและดำเนินการจัดการต่อไป ซึ่งถ้ำลอยถ่านหินจัดว่าเป็นของเสียอุตสาหกรรมที่มีความอันตราย ตามรหัส 10 01 02 HM ที่ต้องมีวิธีการเก็บรวบรวม และกำจัดโดยเฉพาะ โดยไม่สามารถนำไปเก็บรวบรวมและกำจัดร่วมกับของเสียทั่วไปได้ ทั้งนี้แหล่งกำเนิดหลักของถ้ำลอยถ่านหิน จากข้อมูลการขออนุญาตนำของเสียออกนอกบริเวณโรงงานอุตสาหกรรม ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ โรงงานผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปกำจัด โดยถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์ และนำกลับมาใช้ประโยชน์อีกด้วย แต่ก็มีบางส่วนถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบตามหลักสุขาภิบาล จากการศึกษาพบการจัดการถ้ำลอยถ่านหินของโรงไฟฟ้าในปัจจุบัน พบว่าโรงไฟฟ้าจะทำการรวบรวมถ้ำลอยที่ได้จากกระบวนการผลิตไว้ที่โรงงาน และทำการแจ้งปริมาณของถ้ำลอยที่ได้เพื่อขออนุญาตนำของเสียออกนอกโรงงานเพื่อกำจัด พร้อมส่งตัวอย่างทำการตรวจวิเคราะห์ความเป็นพิษ หลังจากนั้นจะมีผู้รับซื้อหรือบริหารจัดการถ้ำลายนำรถขนส่งเฉพาะมาที่โรงงาน

ปัจจุบันในประเทศไทยถ้ำลอยถ่านหินที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าส่วนใหญ่สามารถขายได้เกือบทั้งหมด ซึ่งส่วนใหญ่จะส่งไปที่โรงงานที่เกี่ยวข้องกับการผลิตปูนซีเมนต์ เนื่องจากถ้ำลอยถ่านหินนั้นสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนตามสัดส่วนที่กำหนดในการผลิตคอนกรีตได้ โดยราคาในการซื้อขายนั้นจะอยู่ที่ทางโรงไฟฟ้าและผู้ประกอบการเป็นผู้ตกลงซื้อขายถ้ำลอยเอง เนื่องจากทางโรงไฟฟ้าเป็นผู้ก่อกำเนิดของเสียและมีต้นทุนในการส่งไปกำจัด ส่วนทางผู้รับซื้อ

ถ่านลอมมีความต้องการได้ถ่านลอมไปเป็นวัตถุดิบในการผลิต พบว่าราคาซื้อขายถ่านลอมถ่านหินอยู่ที่ประมาณ 300 – 1000 บาทต่อตัน (ตามเกรดหรือคุณภาพของถ่านลอม)

2.8.1 ลักษณะและองค์ประกอบ

สมบัติทั่วไปถ่านลอมถ่านหินจะอยู่ในรูปอนุภาคผง มีรูปร่างทรงกลม มีทั้งที่เป็นแบบทรงแข็งตัน (Solid) และกลวง (Hollow) โดยส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) กลุ่มไฮโดรคาร์บอนในถ่านลอมจะเป็นอนุภาคเชิงมุม (angular particles) แสดงดังภาพที่ 2.10 ถ่านลอมถ่านหินที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินมีส่วนประกอบต่างๆที่สำคัญดังนี้

- 1) อนุภาคทรงกลมที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetic sphere) จะมีปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจากถ่านลอมถ่านหินทั้งหมด แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ สเฟียร์รูไรท์ (Spherulites) จะมีรูปร่างของอนุภาคทรงกลมที่มีสมบัติทางแม่เหล็ก มีสีดำ ซึ่งมีประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอนุภาคที่ไม่เป็นแม่เหล็ก คือมีโครงสร้างผลึกที่ไม่ใช่แมกนีไทต์ที่เป็นโครงสร้างออกตะฮีตรอน (Magnetite crystal) อนุภาคสเฟียร์รูไรท์จะมีสมบัติทางแม่เหล็กที่น้อยกว่าหากเทียบกับอนุภาคแมกนีไทต์ทั่วไป (Regular magnetite) อนุภาคสเฟียร์รูไรท์จะมีความเปราะ แตกหักได้ง่าย จึงสามารถนำไปบดแล้วนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้ ซึ่งอนุภาคนี้จะมาสามารถนำไปใช้ในการทำความสะอาดถ่านหิน (Coal cleaning)
- 2) คาร์บอน (Carbon) คาร์บอนที่เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Unburned carbon) ในถ่านลอมถ่านหินนั้นจะมีปริมาณร้อยละ 3 - 70 โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับการเผาไหม้ถ่านหินในแต่ละแหล่ง พื้นที่ผิวของความเข้มข้นคาร์บอนมีค่าประมาณ 11 ตารางเมตรต่อกรัม ในระหว่างการแยกนั้นจะทำให้เกิดการหายไปของน้ำหนักร้อยละ 18 และทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 160 ตารางเมตรต่อกรัม คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวน้อย (Low-surface-area carbon) จะสามารถนำไปใช้งานต่อได้ ที่นิยมนำไปใช้คือ การนำไปใช้ในกระบวนการดูดกลืนสารพิษจากเตาเผาขยะ (Waste incinerator) และปล่องควัน



ภาพที่ 2.10 ภาพถ่านลอมถ่านหินจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด [30]

สมบัติทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของถ่านหินนั้นๆ นอกจากนี้ ยังเกี่ยวข้องกับลักษณะการเก็บถ่านหิน ซึ่งส่งผลต่อค่าความชื้นของเถ้าลอยถ่านหิน และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากบรรยากาศที่ต่างกันในการเก็บเถ้าลอยถ่านหิน จากตารางที่ 2.4 [31] แสดงส่วนผสมทางเคมีของเถ้าลอยจากการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัส ถ่านหินซับบิทูมินัส และถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งพบว่าถ่านหิน ซับบิทูมินัสและลิกไนต์จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์และซัลเฟตที่มากกว่าถ่านหินบิทูมินัส แต่จะมีปริมาณ LOI (Loss of ignition) ที่น้อยกว่า ในบางครั้งเถ้าลอยจากถ่านหินที่เกิดขึ้นอาจจะมีองค์ประกอบบางอย่างหรือโลหะหนักที่มีความเป็นพิษปะปนอยู่ตามแหล่งที่มาเช่น อาร์ซีนิกหรือสารหนู (As) และ โครเมียม (Cr) เป็นต้น นอกจากนี้ตัวเถ้าลอยถ่านหินยังเป็นฝุ่นผงที่มีอนุภาคขนาดเล็กที่สามารถฟุ้งกระจายได้ อาจจะทำให้เกิดมลพิษทางอากาศที่ส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจได้ นอกจากนี้ถ้าทิ้งหรือฝังดินก็จะก่อให้เกิดปัญหาแก๊สดินและแหล่งน้ำใต้ดิน

ตารางที่ 2. 4 ส่วนผสมของเถ้าลอยจากการเผาไหม้ถ่านหิน

องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	บิทูมินัส	ซับบิทูมินัส	ลิกไนต์
SiO ₂	20-60	40-60	15-45
Al ₂ O ₃	5-35	20-30	10-25
Fe ₂ O ₃	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO ₃	0-4	0-2	0-10
Na ₂ O	0-4	0-2	0-6
K ₂ O	0-3	0-4	0-4
LOI	0-15	0-3	0-5

2.8.2 การแบ่งประเภทของเถ้าลอยถ่านหิน [32]

เถ้าลอยถ่านหินสามารถแบ่งประเภทได้ตามมาตรฐานต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น

1) แบ่งตาม ASTM

มาตรฐาน ASTM C618 "Specification for Fly ash and Raw or Calcined natural

pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete" ได้
จัดแยกประเภทของเถ้าลอยไว้ 2 ชนิดคือ Class F และ Class C ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2. 5 การจัดประเภทเถ้าลอยถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM C618

ลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	
	Class F	Class C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70	50
SO_3 , max%	5.0	5.0
Moisture content, max%	3.0	3.0
LOI, max%	6.0	6.0

โดย Class F มีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่า 70% โดยน้ำหนัก และ Class C มีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ระหว่าง 50-70% โดยน้ำหนัก เนื่องจากถ่านหินเป็นวัสดุธรรมชาติย่อมมีเนื้อที่ไม่สม่ำเสมอ การที่เถ้าปลิวจากแหล่งเดียวกันพบว่าเป็น Class C และ Class F เป็นเรื่องที่เป็นปกติ

- 2) แบ่งตาม มอก 2135-2545 (TIS 2135) ของประเทศไทย ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2. 6 การจัดประเภทเถ้าลอยถ่านหินตามมาตรฐาน มอก 2135-2545 (TIS 2135) ของประเทศไทย

สมบัติ	เกณฑ์ที่กำหนด			
	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		ชั้นคุณภาพ 3
		ชนิด ก	ชนิด ข	
SiO_2 , min%	30.0	30.0	30.0	30.0
CaO, %	-	< 10.0	≥ 10.0	-
SO_3 , max%	5.0	5.0	5.0	5.0
Moisture content, max%	3.0	3.0	2.0	3.0
LOI, max%	6.0	6.0	6.0	12.0

2.8.3 การนำไปใช้ประโยชน์

ปัจจุบันถ้ำลอยถ่านหินนิยมนำมาใช้เป็นสารผสมในคอนกรีตผสมเสร็จสำหรับงานก่อสร้าง และเป็นวัตถุดิบเสริมปูนซีเมนต์ในการผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น กระเบื้องมุงหลังคา, เสาค้ำ, ท่อ, พื้นสำเร็จรูป เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนผสมหลักในการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัด (roller-compacted concrete, RCC)

- 1) การนำไปทำผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง
- 2) การถมกลับ (backfill)
- 3) การอัดฉีด (grouting)
- 4) งานก่อสร้างถนน
- 5) งานก่อสร้างเขื่อน
- 6) งานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชัยพร จิงโชติกะพิศิฐ (2558) [33] ศึกษาการสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพเหลวจากการไพโรไลซิส น้ำมันจากทะเลสาบปลาบู่โดยใช้ไฮโดรไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ขนาด 70 มิลลิลิตร ใช้การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับ โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 420, 440 และ 460 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30, 45 และ 60 นาที ความดันแก๊สไฮโดรเจน 1, 3 และ 5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2, 3.5 และ 5 โดยน้ำหนักของน้ำมันปลาบู่จากทะเลสาบปลาบู่ 100 กรัม ภาวะที่เหมาะสมที่ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 67.10 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 460 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่นได้ผลได้ร้อยละของแนฟทา เคโรซีน ดีเซล และกาน้ำมันคือ 8.23, 17.12, 37.50 และ 4.25 โดยน้ำหนักตามลำดับ

Romero และคณะ (2016) [34] ศึกษาการดีออกซิเจนชั้นของน้ำมันพืชใช้แล้วและน้ำมันสุญ์ดำภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์และกึ่งต่อเนื่องโดยใช้แคลเซียมออกไซด์และไฮโดรทัลไซต์ที่ผ่านการบำบัด (MG70) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400

องศาเซลเซียส พบว่าในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์มีผลิตภัณฑ์เหลวเพียงส่วนเดียว (ผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวมากกว่าร้อยละ 80) มีสัดส่วนไฮโดรคาร์บอนที่สูง (ร้อยละ 83) ซึ่งให้ผลที่คล้ายกันทั้งสองตัวเร่งปฏิกิริยา ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องมีผลิตภัณฑ์เหลว 2 ส่วน (แยกโดยขั้นตอนการกลั่น) ได้แก่ ผลิตภัณฑ์มวลเบาและผลิตภัณฑ์มวลกลาง ประกอบด้วยสัดส่วนไฮโดรคาร์บอนระหว่างร้อยละ 72-80 และร้อยละ 85-88 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องเกิดได้ออกซิเจนชั้นของผลิตภัณฑ์มวลเบาที่แย่งเนื่องจากมีเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ต่ำ เมื่อผลิตภัณฑ์เหลวส่วนนี้ไปวิเคราะห์สมบัติเพื่อเปรียบเทียบกับสารตั้งต้นพบว่าปริมาณออกซิเจนที่ใกล้เคียงกันและมีปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิมิตัวต่ำกว่า

Chang และคณะ (2017) [35] ทำการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องของน้ำมันพืชใช้แล้วภายใต้ภาวะอุณหภูมิคงที่โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเม็ดซึ่งประกอบด้วยตัวประสาน (เบนโทไนต์) และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาได้แก่ $Al_2(SO_4)_3$, โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3), โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$), และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 450-550 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อทำการทดลองเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส (Na_2CO_3 , $NaOH$ และ CaO) สามารถผลิตน้ำมันไพโรไลซิสที่มีปริมาณกรดใกล้เคียงศูนย์ (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม) แต่มีเพียงแคลเซียมออกไซด์ที่ไม่พบผลิตภัณฑ์สมบัติเหมือนสบู่ จึงสรุปได้ว่าแคลเซียมออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเม็ดของแคลเซียมออกไซด์ช่วยลดกรดไขมันที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันพืชใช้แล้วให้เกิดเป็นแอลดีไฮด์และคีโตน เกิดแอมโรมาติกไฮโดรคาร์บอนต่ำ และมีกรดไขมันอิ่มตัวสูงกว่าน้ำมันพืชที่ไม่ผ่านการใช้งาน

Muthukumaran และคณะ (2015) [36] ศึกษาผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนจากน้ำมันต้นกระตังสำหรับใช้งานในเครื่องยนต์ดีเซล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ จากการศึกษาเถ้าลอยด้วย SEM และ EDS พบว่าเถ้าลอยประกอบด้วยอะลูมิเนียม ซิลิกา เหล็ก และออกซิเจน มีรูพรุนและพื้นที่ผิวเหมาะสมต่อกระบวนการแตกตัว โดยเมื่อนำน้ำมันต้นกระตังที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 25 ต่อ 75 ไปทดสอบการทำงานและการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลแบบลูกสูบเดียวพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับน้ำมันดีเซล

Fekadu และคณะ (2018) [1] ทำการศึกษาการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันพืชใช้แล้วเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องภายใต้บรรยากาศ

ไนโตรเจน เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ อุณหภูมิ 400, 425, 450, 475 และ 500 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 และ 120 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) ร้อยละ 1, 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนัก พบว่าที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ให้ผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสูงสุดคือร้อยละ 83.00 เมื่อนำไปวัดค่าความหนืด ความหนาแน่น และค่าความร้อนเพื่อเปรียบเทียบกับสารตั้งต้นก่อนทำการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าความหนืดมีค่าลดลงจาก 43.75 เป็น 3.55 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที ความหนาแน่นลดลงจาก 0.96 เป็น 0.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 38.9 เป็น 40.8 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

ญาดา ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา (2556) [37] ศึกษาการไพโรไลซิสน้ำมันปาล์มจากทะเลลายเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยออกแบบการทดลองแฟทอเรียลสองระดับ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสม โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380-440 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที ความดันไฮโดรเจน 1-5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่ได้ร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวมากที่สุดคือ 66.68 อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดันไฮโดรเจน 5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ได้ผลได้ร้อยละของ แนฟทา เคโรซีน ดีเซล และกากน้ำมันคือ 22.50, 17.50, 55.00 และ 5.00 โดยน้ำหนักตามลำดับ

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น พบว่าวัตถุดิบที่ใช้ในการแตกตัวจากไขมันพืช เช่น น้ำมันพืชใช้แล้ว น้ำมันปาล์ม น้ำมันต้นกระทิง เป็นต้น โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ แคลเซียมออกไซด์ ไฮโดรทัลไซต์ที่ผ่านการบำบัด เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ ซึ่งชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นโลหะออกไซด์ งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะเปลี่ยนน้ำมันปาล์มจากทะเลลายเปล่าเป็นเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนดีเซลสูง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านลอยถ่านหิน เนื่องจากมีองค์ประกอบของโลหะออกไซด์หลายชนิด เช่น เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี ราคาถูกและสามารถใช้งานได้เลย โดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์



ภาพที่ 3. 2 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กขนาด 70 มิลลิลิตร

- 3) ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัลทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ให้ความร้อนและตัดการจ่ายกระแสเมื่อได้อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ มีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิได้ในระดับ ± 10 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3. 3 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล หม้อแปลงไฟฟ้าและเครื่องเขย่า

- 4) อุปกรณ์ให้ความร้อนแรงดัน 230 โวลต์ กำลัง 350 วัตต์
- 5) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เป็นแบบเค (K-Type) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิโดยจะแสดงผลที่ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ
- 6) เครื่องเขย่าโดยมีมอเตอร์เป็นชุดกำลังขับเคลื่อนแกนหมุน สามารถปรับความเร็วรอบการเขย่าได้จากชุดควบคุมความเร็ว
- 7) ชุดกรองสูญญากาศ ประกอบด้วยชุดเครื่องแก้วต่อกับเครื่องปั๊มอากาศเพื่อทำการกรองแยกแบบสูญญากาศ เพื่อแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็งโดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว
- 8) เครื่องชั่งน้ำหนัก ชั่งได้ละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง

- 9) เครื่องชั่งน้ำหนัก ชั่งได้ละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 10) นาฬิกาจับเวลา
- 11) ตู้อบ
- 12) ถ้วยเผา (Crucible)
- 13) เครื่องแก้ว ประกอบด้วยปิเกตอร์ และขวดใส่สารตัวอย่าง

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 1) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (gas chromatography mass spectrometer, GC-MS) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890A โดยมีเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น GCMS5975C เป็นดีเทคเตอร์ ของบริษัท เอจีเลนต์ เทคโนโลยีส์ จำกัด (ประเทศไทย) โดยใช้ Capillary column จากบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น HP-5MS ขนาด 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร ซึ่งมี 100% Dimethylpolysiloxane ความหนา 0.25 ไมโครเมตร เป็นวัฏภาคนิ่ง (stationary phase) ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 350 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 3.4 ซึ่งใช้เทคนิคการแยกองค์ประกอบของสารผสมโดยอาศัยความแตกต่างของอัตราการเคลื่อนที่ของแต่ละองค์ประกอบของสารผสมบนเฟสคงที่ (Stationary phase) ภายใต้การพาของเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) โดยเฟสคงที่คือสารที่อยู่ภายในคอลัมน์ ส่วนเฟสเคลื่อนที่คือแก๊สฮีเลียม ซึ่งภายในคอลัมน์จะเกิดการแยกสารผสมโดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่อยู่ภายในและสารผสม จากนั้นโมเลกุลของสารเชิงเดี่ยวจะถูกพาเข้าสู่เครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ และได้รับพลังงานจากลำแสงอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่ค่า 70 อิเล็กตรอนโวลต์ เพื่อทำให้เกิดการแตกตัวอยู่ในรูปประจุ โดยจะมีรูปแบบการแตกตัวของแต่ละโมเลกุลมีลักษณะเฉพาะ เรียกว่า Mass spectrum โดยจะแสดงการแตกตัวในรูปของ mass-to-charge ratio (m/z) โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3. 4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 3. 1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์

Condition	Value
Gas Chromatography	Agilent Technologies 7890A
Column	HP-5MS (30 m x 0.25 mm x 0.25 μ m)
Detector	Mass Spectrometer
Dilution Solvent	CS ₂
Inject volume	0.1 μ L
Split ratio	15:1
Carrier gas (He) flow rate	1.0 mL/min
m/z Scan range	33-500
Detector Temperature (MS)	280 °C

- 2) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (distillation simulation gas chromatography, DGC) สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือด โดยใช้มาตรฐานการวิเคราะห์ตาม ASTM D2887 ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890A ของบริษัท เอจีเลนต์ เทคโนโลยีส์ จำกัด (ประเทศไทย) ใช้คอลัมน์ชนิด capillary จากบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น DB-1 ขนาด 10 เมตร x 0.53 มิลลิเมตร x 2.65 ไมโครเมตร และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (simulation distillation software) แสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3. 5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

- 3) เครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ รุ่น 848 Trinoplus ยี่ห้อ Metrohm แสดงในภาพที่ 3.6 อาศัยเทคนิคการไทเทรตโดยการวัดศักย์ไฟฟ้า สามารถใช้วิเคราะห์หาปริมาณสารตัวอย่างในการเกิดปฏิกิริยาแบบต่างๆกับสารละลายมาตรฐาน ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.001 โมลลาร์ เป็นสารละลายมาตรฐาน และอะซิโตน 50 มิลลิลิตร ในการไทเทรตกับสารตัวอย่างจำนวน 10.0 กรัม เพื่อวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว



ภาพที่ 3. 6 เครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ

- 4) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-5800 LV ยี่ห้อ JEOL แสดงในภาพที่ 3.7 ใช้วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถูกยิงไปบนตัวอย่าง จากนั้นอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะหลุดออกมาและถูกตรวจจับสัญญาณด้วยดีเทคเตอร์แปรผลเป็นภาพที่มีกำลังขยายต่างๆ



ภาพที่ 3. 7 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

- 5) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer) รุ่น D8 Discover ยี่ห้อ Bruker ใช้ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ชนิด $\text{Cu K}\alpha$ (ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.5406 อังสตรอม) แรงดันไฟฟ้า 40 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ อัตราการสแกน 0.01 ดีกรีต่อวินาที และมุม 2θ ในช่วง 5 ถึง 80° ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างของผลึกสารตัวอย่าง

- 6) เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน รุ่น ASAP2020 ยี่ห้อ Micromeritic ดังแสดงในภาพที่ 3.8 โดยปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับและความดันย่อยที่เปลี่ยนแปลงไปจะถูกบันทึกเพื่อสร้างเป็นไอโซเทิร์มของการดูดและการคายซับที่ความดันสัมพัทธ์ในช่วง 10^{-7} ถึง 1 โดยการคำนวณพื้นที่ผิวสามารถหาได้จากสมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ส่วนปริมาตรรูพรุนและการกระจายขนาดรูพรุนสามารถหาได้จากสมการของ Barret-Joyner-Halenda (BJH pore size distribution)



ภาพที่ 3. 8 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน

- 7) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) รุ่น 7820A ยี่ห้อ Agilent ดังแสดงในภาพที่ 3.9 ประกอบด้วยดีเทคเตอร์ Flame Ionization Detector (FID) และ Thermal Conductivity Detector (TCD) สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส



ภาพที่ 3. 9 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

3.4 การดำเนินงานวิจัย

- 1) วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าด้วยเทคนิคต่างๆ ดังต่อไปนี้
 - วิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์
 - วิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดที่ อุณหภูมิต่างๆด้วยเทคนิค แก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น
- 2) วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของถ้ำลอยถ่านหินด้วยเทคนิคต่างๆ ดังต่อไปนี้
 - วิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุขององค์ประกอบด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry
 - หาพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจากวิธีดูดซับแก๊สไนโตรเจน
 - โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)
 - ลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
- 3) ออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลสองระดับประสมกลาง โดยมีระดับของตัวแปร 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ (-1) ระดับสูง (1) และระดับกลาง (0) โดยมีตัวแปรที่จะศึกษา 4 ตัวแปร แสดงดังตารางที่ 3.2 และมีการทำซ้ำการทดลองของตัวแปรระดับกลาง 5 ครั้ง แสดงในตารางที่ 3.3 จากนั้นทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ คำนวณร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่นเพื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือด
- 4) วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส
 - วิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเทคนิคบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter)
 - วิเคราะห์หาสัดส่วนของเชื้อเพลิงเหลว ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น
 - วิเคราะห์หาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์
 - วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ
- 5) หาภาวะที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหินเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีสัดส่วนดีเซลมากที่สุด โดยใช้โปรแกรม Design-Expert

6) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณและผลที่ได้จากการทดลองจริง

ตารางที่ 3. 2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาคาร์โบไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน

ตัวแปร	สัญลักษณ์ ตัวแปร	ระดับต่ำ (-1)	ระดับกลาง (0)	ระดับสูง (1)
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	A	420	435	450
เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	B	30	45	60
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	C	1	3	5
ความดันไฮโดรเจน (บาร์)	D	1	3	5



ตารางที่ 3. 3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับเพื่อทำการศึกษาคาร์โบไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน

การทดลองที่	A	B	C	D
1	420	30	1	1
2	450	30	1	1
3	420	60	1	1
4	450	60	1	1
5	420	30	5	1
6	450	30	5	1
7	420	60	5	1
8	450	60	5	1
9	420	30	1	5
10	450	30	1	5
11	420	60	1	5
12	450	60	1	5
13	420	30	5	5
14	450	30	5	5
15	420	60	5	5
16	450	60	5	5
17	435	45	3	3
18	435	45	3	3
19	435	45	3	3
20	435	45	3	3
21	435	45	3	3

3.5 วิธีการทดลอง

- 1) ชั่งน้ำหนักน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่า 15 กรัมพร้อมกับเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียดตศนิยม 2 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนัก

- 2) ชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วชั่งน้ำหนักตามปริมาณที่ต้องการด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนัก
- 3) เติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่า จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักเครื่องชั่งแบบละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่งและบันทึกน้ำหนัก
- 4) ปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ให้เรียบร้อย แล้วนำเครื่องปฏิกรณ์ไปใส่อากาศที่อยู่ภายในออกโดยผ่านแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปอย่างช้าๆ แล้วปล่อยให้แก๊สไฮโดรเจนจนได้ความดันที่กำหนด ทำการตรวจสอบรอยรั่วของแก๊สตามข้อต่อของเครื่องปฏิกรณ์ หากปรากฏว่าไม่มีรอยรั่วของแก๊สไฮโดรเจนค่อยๆ หมุนวาล์วปิดเพื่อไม่ให้แก๊สออก
- 5) นำเครื่องปฏิกรณ์ต่อเข้ากับชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์และต่ออุปกรณ์ขดลวดความร้อนเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง และต่อเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์
- 6) ปรับกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าให้กับขดลวดให้ความร้อนและเปิดสวิตช์เครื่องเขย่า
- 7) เริ่มทำการจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์คงที่ตามที่กำหนด เมื่อครบเวลาที่ทำการปฏิกิริยาแล้ว นำฉนวนและขดลวดความร้อนออก รอจนอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้องจึงทำการปล่อยแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ออก
- 8) แยกผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวออกจากกากของแข็งโดยการกรองผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยอุปกรณ์การกรองแบบสุญญากาศ กระจายกรองที่ใช้ต้องเป็นแบบใยแก้ว แยกส่วนที่เป็นของเหลวเก็บไว้ในขวดแก้วเพื่อนำไปวิเคราะห์ ล้างเครื่องปฏิกรณ์ด้วยสารละลายโทลูอีน เช็ดทำความสะอาดด้วยกระดาษที่ชั่งน้ำหนักเตรียมไว้
- 9) นำส่วนที่เป็นของแข็งและกระดาษซับไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งเพื่อคำนวณหาร้อยละของการเปลี่ยนแปลงต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้เก้าถอยถ่านหินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ โดยศึกษาตัวแปรทั้งหมด 4 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันไฮโดรเจน เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิส ที่ให้ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์เป็นดีเซลมากที่สุดและมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่า

งานวิจัยนี้ใช้น้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าเป็นสารตั้งต้นในการไพโรไลซิส โดยมีการศึกษาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าดังต่อไปนี้

4.1.1 วิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

ตารางที่ 4. 1 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าตามคาบจุดเดือด

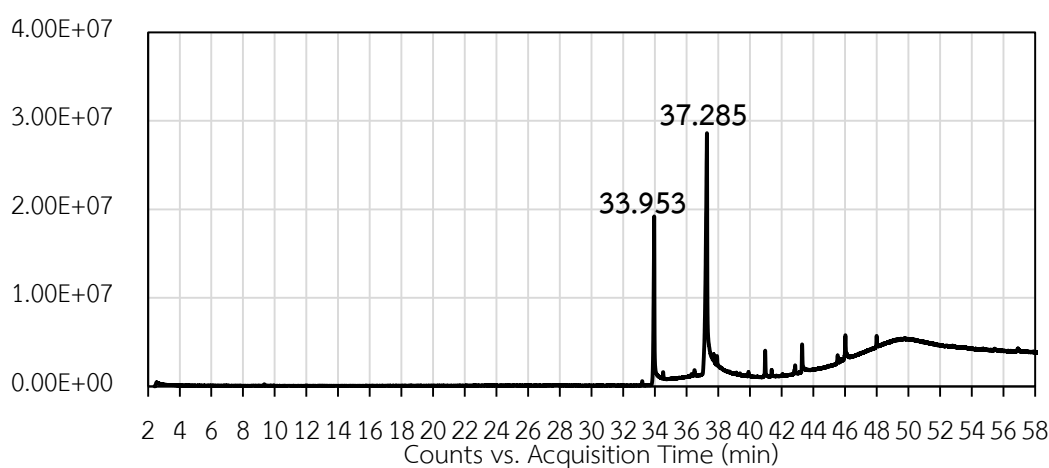
จุดเดือด (°C)	องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก(%wt)
IBP-200	แนฟทา (C ₅ - C ₁₂)	6.89
200-250	เคโรซีน (C ₁₂ - C ₁₅)	6.00
250-370	ดีเซล (C ₁₅ - C ₃₃)	27.11
370-FBP	กากน้ำมัน (>C ₃₃)	60.00

จากตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าตามคาบจุดเดือดที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatograph) ตามมาตรฐานของสมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน ASTM (American Society for Testing and Materials) โดยใช้มาตรฐานการวิเคราะห์ช่วงการกลั่นของน้ำมันปิโตรเลียมหมายเลข D2887 พบว่าน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่ามีองค์ประกอบหลักคือกากน้ำมันร้อยละ 60.00 โดยน้ำหนัก รองลงมาคือดีเซลร้อยละ 27.11 โดยน้ำหนัก และเคโรซีนและแนฟทาร้อยละ 6.00 และ 6.89 โดยน้ำหนักตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณกากน้ำมันซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลยาวสูงถึงร้อยละ 60.00 โดยน้ำหนัก น้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าจึงไม่

สามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยตรง จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพให้มีขนาดสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง สมบัติทางกายภาพและทางเคมีใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ ก่อนที่จะนำไปใช้กับเครื่องยนต์

4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ แสดงในภาพที่ 4.1 และตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4. 1 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 4. 2 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
33.953	n-Hexadecanoic acid	25.88
37.285	Oleic Acid	68.49
40.961	9-Octadecenamide, (Z)-	2.63
43.291	Hexadecanoic acid	3.00

จากภาพที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล้าเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ พบพีคหลักที่เด่นชัด 2 พีค ได้แก่ ที่เวลา 33.953 และ 37.285 นาที ซึ่งองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้ คือกรดไขมันปาล์มติก (Palmitic acid; C16:0) และกรดไขมันโอเลอิก (Oleic acid; C18:1) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.2.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน

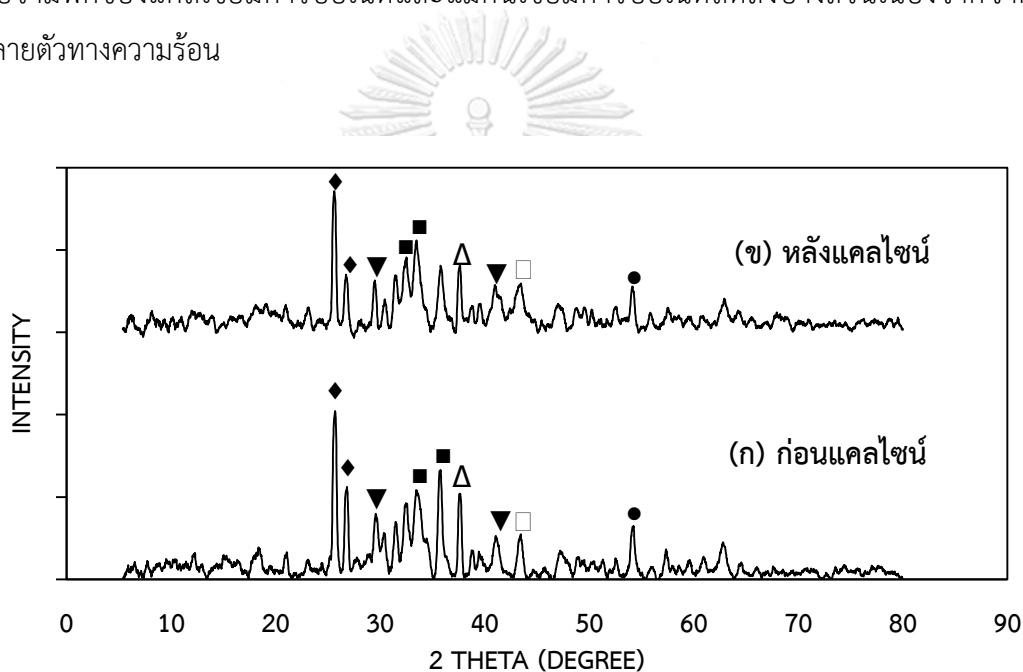
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหินด้วยเทคนิค XRF แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าองค์ประกอบหลักของเถ้าลอยถ่านหินประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ เพอริกออกไซด์ ร้อยละ 28.40, 23.40, 14.80 และ 12.60 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และมีองค์ประกอบรองคือ แมกนีเซียมออกไซด์และออกไซด์ของอัลคาไลในรูป Na_2O , K_2O และ SO_3 เมื่อจำแนกชนิดของเถ้าลอยถ่านหินตามมาตรฐาน ASTM C618 พบว่าเถ้าลอยถ่านหินในงานวิจัยชิ้นนี้มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเพอริกออกไซด์ อยู่ระหว่าง 50-70% และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง จึงจัดเป็นเถ้าลอยถ่านหินชนิด C

ตารางที่ 4. 3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหินด้วยเทคนิค XRF

Compound	Concentration (%weight)
SiO_2	28.40
CaO	23.40
Al_2O_3	14.80
Fe_2O_3	12.60
SO_3	3.98
MgO	2.59
K_2O	2.00
Na_2O	1.89
TiO_2	0.33
Others	10.01

4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าลอยถ่านหินก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าลอยถ่านหินก่อนและหลังแคลไซน์ด้วยเทคนิค XRD แสดงในภาพที่ 4.2 พบว่าเถ้าลอยถ่านหินก่อนการแคลไซน์ มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ เพอริกออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ในโครงสร้างผลึก สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิค XRF นอกจากนี้ยังพบแคลเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมคาร์บอเนตปนอยู่ เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่ามีพีคของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมคาร์บอเนตลดลงบางส่วนเนื่องจากจากการสลายตัวทางความร้อน

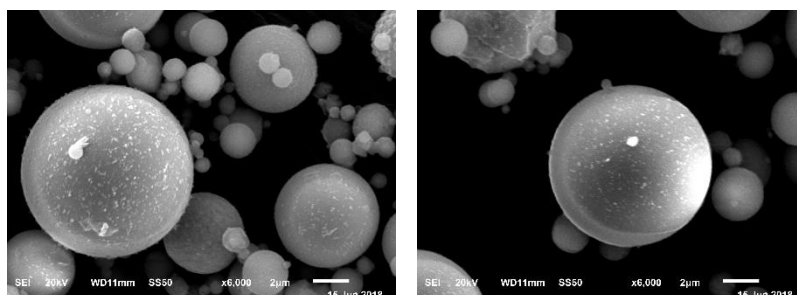


ภาพที่ 4. 2 รูปแบบ XRD ของ (ก) เถ้าลอยถ่านหินก่อนแคลไซน์ (ข) เถ้าลอยถ่านหินหลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อ \blacklozenge Quartz, \blacksquare Hematite, \square MgO, \triangle CaO, \blacktriangledown CaCO₃ และ \bullet MgCO₃

4.2.3 การวิเคราะห์สัญญาณวิทยาของเถ้าลอยถ่านหินก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

ภาพที่ 4.3 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของของเถ้าลอยถ่านหิน (ก) เถ้าลอยถ่านหินก่อนการแคลไซน์ (ข) เถ้าลอยถ่านหินหลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา

5 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 6,000 เท่า พบว่าถ้ำลอยถ้ำนหินที่ผ่านการแคลไซน์มีพื้นผิวที่ขรุขระน้อยกว่าถ้ำลอยถ้ำนหินก่อนการแคลไซน์



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4. 3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของถ้ำลอยถ้ำนหิน (ก) ถ้ำลอยถ้ำนหินก่อนการแคลไซน์ (ข) ถ้ำลอยถ้ำนหินหลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 6,000 เท่า

4.2.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ้ำนหิน

ตารางที่ 4. 4 พื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ้ำนหิน

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวรูพรุน (S_{BET}) (ตารางเมตรต่อกรัม)	ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุน (Pore size) (อังสตรอม)
ก่อนแคลไซน์	1.31	0.0065	17.1
หลังแคลไซน์	2.75	0.0012	27.1

จากตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ปริมาตรและขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ้ำนหินก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยเทคนิค Brunauer Emmett Teller (BET method) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ้ำนหินก่อนการแคลไซน์มีพื้นที่ผิว 1.31 ตารางเมตรต่อกรัม หลังจากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวรูพรุนเพิ่มขึ้นเป็น 2.75 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนลดลงจาก 0.0065 เป็น 0.0012 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมและขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 17.2 เป็น 27.1 อังสตรอม เนื่องจากการแคลไซน์ถ้ำลอยถ้ำนหินที่อุณหภูมิและเวลาดังกล่าวจะทำให้เกิดการสลายตัวของคาร์บอนและมลทินต่างๆ (impurity) ที่เกาะอยู่บริเวณผิวของถ้ำลอยถ้ำนหิน ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถใช้ถ้ำลอยถ้ำนหินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งเสริมการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีขึ้น

4.3 การไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน

4.3.1 การศึกษาอิทธิพลและตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นเหลวที่ได้จากการไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน

จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2^k) เพื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (A) เวลาในการทำปฏิกิริยา (B) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (C) และความดันไฮโดรเจน (D) ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน ผลของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวแสดงดังตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 66.00-88.67 โดยน้ำหนัก



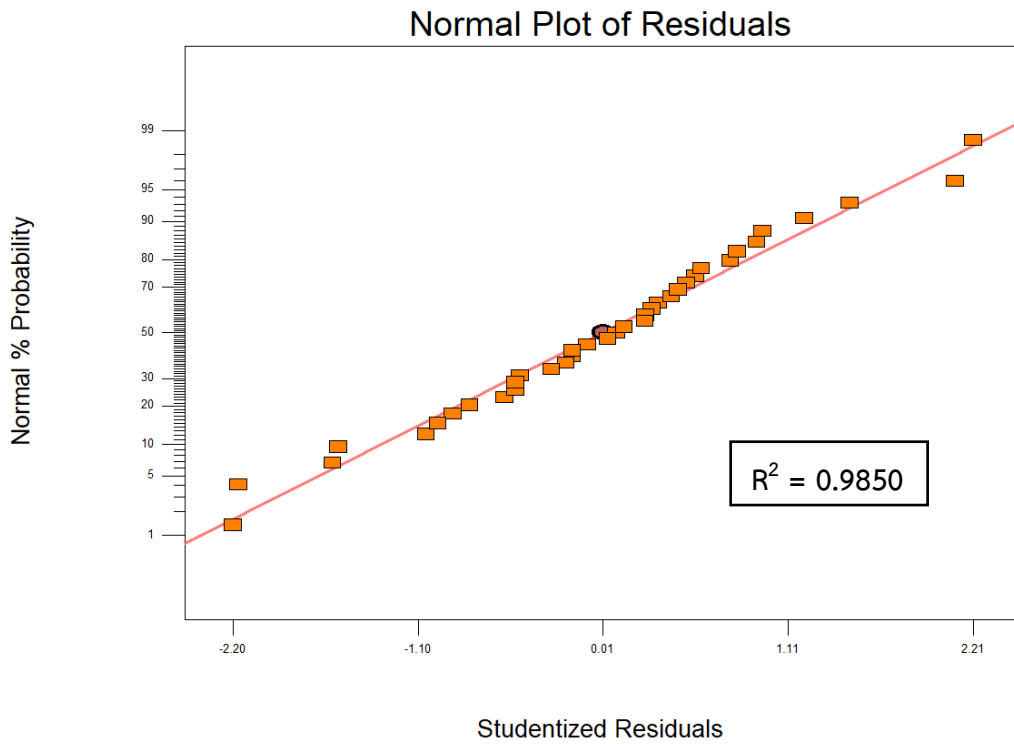
ตารางที่ 4. 5 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจาก ทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ ของผลิตภัณฑ์ เชื้อเพลิงเหลว (%wt)
	A (°C)	B (min)	C (%wt)	D (bar)	
1	420	30	1	1	88.00
2	420	30	1	1	88.67
3	450	30	1	1	75.00
4	450	30	1	1	75.33
5	420	60	1	1	85.67
6	420	60	1	1	86.00
7	450	60	1	1	68.67
8	450	60	1	1	67.67
9	420	30	5	1	83.33
10	420	30	5	1	83.33
11	450	30	5	1	68.33
12	450	30	5	1	70.00
13	420	60	5	1	80.33
14	420	60	5	1	79.00
15	450	60	5	1	69.00
16	450	60	5	1	70.00
17	420	30	1	5	85.00
18	420	30	1	5	87.07
19	450	30	1	5	73.33
20	450	30	1	5	73.67
21	420	60	1	5	87.00

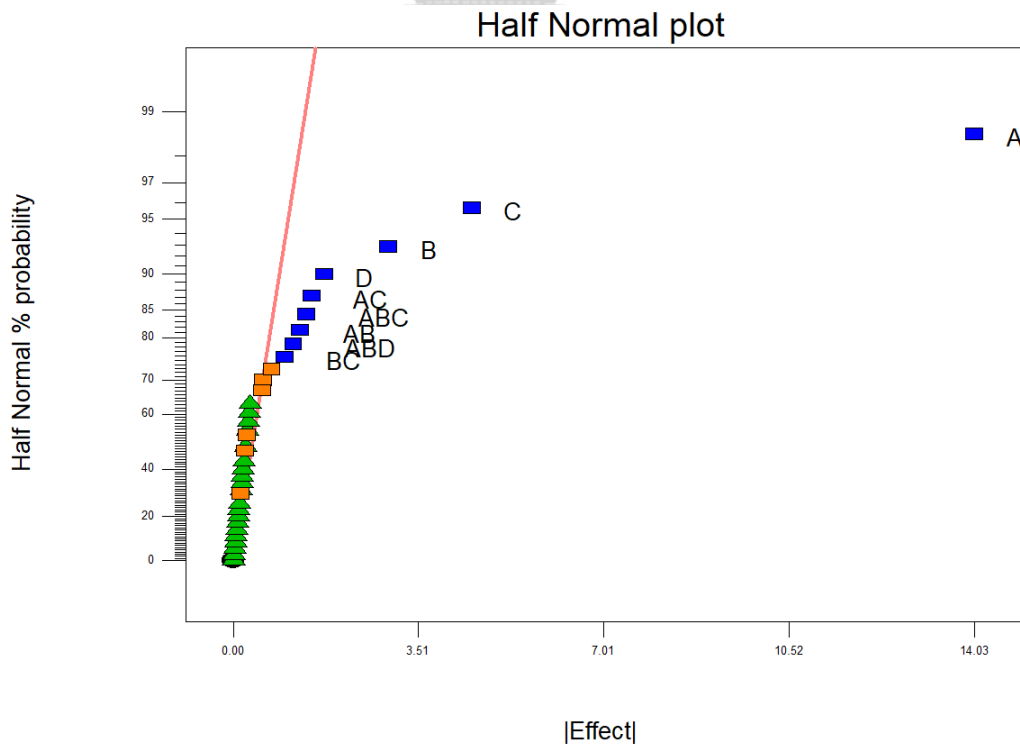
ตารางที่ 4. 5 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจาก ทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอยถ่านหิน

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ ของผลิตภัณฑ์ เชื้อเพลิงเหลว (%wt)
	A (°C)	B (min)	C (%wt)	D (bar)	
22	420	60	1	5	85.00
23	450	60	1	5	68.67
24	450	60	1	5	66.00
25	420	30	5	5	79.33
26	420	30	5	5	80.33
27	450	30	5	5	69.33
28	450	30	5	5	68.00
29	420	60	5	5	79.00
30	420	60	5	5	79.67
31	450	60	5	5	65.33
32	450	60	5	5	64.00
33	435	45	3	3	71.00
34	435	45	3	3	73.67
35	435	45	3	3	71.00
36	435	45	3	3	71.33
37	435	45	3	3	72.00

จากการนำข้อมูลการทดลองในตารางที่ 4.5 มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-Expert เพื่อศึกษาค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่างๆ จาก normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ของ ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว แสดงในภาพที่ 4.4 พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีค่า $R^2=0.9850$ แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปวิเคราะห์ทางสถิติต่อไปได้



ภาพที่ 4. 4 Normal probability plot ของส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว



ภาพที่ 4. 5 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

ตารางที่ 4. 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณ์ท์เชื้อเพลิงเหลวจาก การไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F value	Prob > F value
Model	1895.63	11	1895.63	143.46	< 0.0001
A	1573.61	1	1573.61	1310.01	< 0.0001
B	69.15	1	69.15	57.57	< 0.0001
C	163.99	1	163.99	136.52	< 0.0001
D	23.81	11	23.81	19.82	0.0002
AB	12.83	1	12.83	10.68	0.0033
AC	17.61	1	17.61	14.66	0.0008
AD	0.44	1	0.44	0.36	0.5520
BC	7.74	1	7.74	6.45	0.0180
BD	0.57	1	0.57	0.47	0.4986
ABC	15.46	1	15.46	12.87	0.00015
ABD	10.44	1	10.44	8.69	0.0070
Curvature	105.24	1	105.24	87.61	< 0.0001
Residual	28.83	24	1.20		
Lack of Fit	9.52	4	2.38	2.47	0.0781
Pure Error	19.31	20	0.97		
Cor Total	2029.69	36			

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.5 half normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณ์ท์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน ซึ่งแสดงถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณ์ท์เชื้อเพลิงเหลว โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจะเบี่ยงเบนจากข้อมูลอื่นที่อยู่บนเส้นตรง พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณ์ท์เชื้อเพลิงเหลวมากที่สุดคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (A) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (C) เวลาในการทำปฏิกิริยา (B) ความดันไฮโดรเจน (D) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (AC) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ABC) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและ

เวลาในการทำปฏิกิริยา (AB) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา และความดันไฮโดรเจน (ABD) และอันตรกิริยาระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (BC) ตามลำดับ เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าตัวแปรดังกล่าวมีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรดังกล่าวมีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านลอยถ่านหิน จากการคำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert พบว่าสมการที่บอกถึงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านลอยถ่านหินคือ

$$\text{Liquid yield} = +76.53 - 7.01A - 1.47B - 2.26C - 0.86D - 0.63AB + 0.74AC - 0.12AD + 0.49BC + 0.13BD + 0.69ABC - 0.57ABD$$

4.3.2 การศึกษาอิทธิพลและตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านลอยถ่านหิน

จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2^k) เพื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (A) เวลาในการทำปฏิกิริยา (B) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (C) และความดันไฮโดรเจน (D) ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านลอยถ่านหิน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ผลของร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวแสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งพบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 30.75-42.67 โดยน้ำหนัก

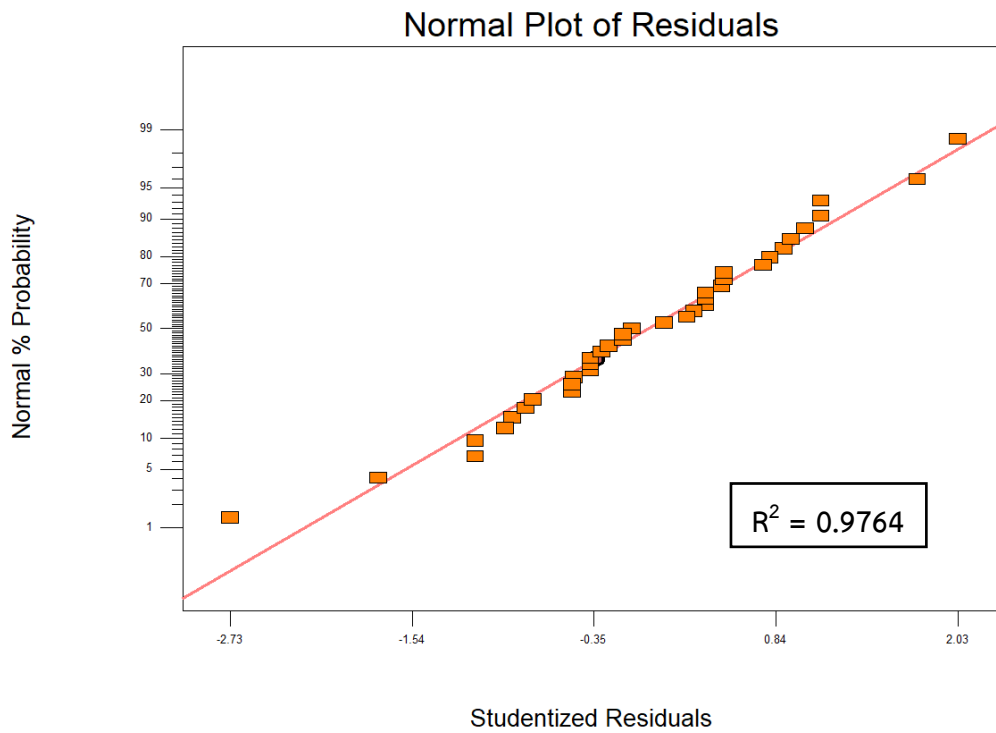
ตารางที่ 4. 7 ร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมัน
ปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอยถ่านหิน

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ ของดีเซล (%wt)
	A (°C)	B (min)	C (%wt)	D (bar)	
1	420	30	1	1	42.67
2	420	30	1	1	42.08
3	450	30	1	1	34.75
4	450	30	1	1	34.00
5	420	60	1	1	38.80
6	420	60	1	1	39.33
7	450	60	1	1	31.50
8	450	60	1	1	32.00
9	420	30	5	1	41.05
10	420	30	5	1	41.67
11	450	30	5	1	32.92
12	450	30	5	1	31.75
13	420	60	5	1	35.50
14	420	60	5	1	35.75
15	450	60	5	1	30.75
16	450	60	5	1	31.07
17	420	30	1	5	42.50
18	420	30	1	5	42.17
19	450	30	1	5	33.25
20	450	30	1	5	33.00
21	420	60	1	5	38.50

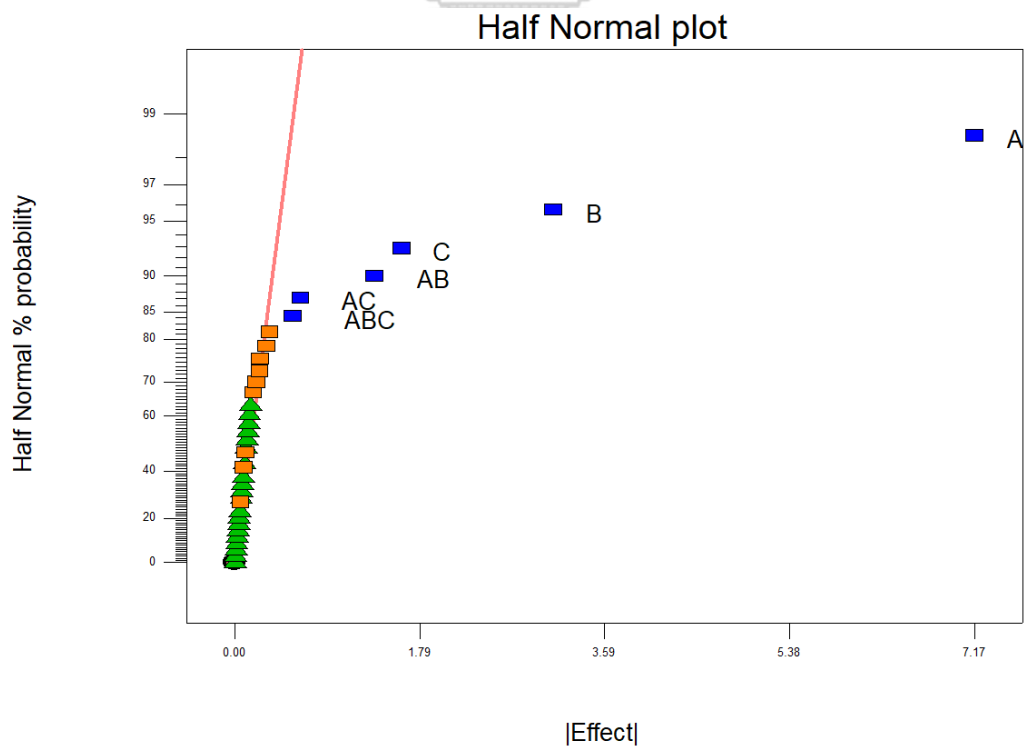
ตารางที่ 4.7 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของดีเซล (%wt)
	A (°C)	B (min)	C (%wt)	D (bar)	
22	420	60	1	5	38.25
23	450	60	1	5	31.75
24	450	60	1	5	31.55
25	420	30	5	5	40.83
26	420	30	5	5	40.08
27	450	30	5	5	32.60
28	450	30	5	5	32.53
29	420	60	5	5	35.75
30	420	60	5	5	35.58
31	450	60	5	5	31.33
32	450	60	5	5	31.00
33	435	45	3	3	38.25
34	435	45	3	3	36.25
35	435	45	3	3	37.33
36	435	45	3	3	37.33
37	435	45	3	3	37.83

จากการนำข้อมูลการทดลองในตารางที่ 4.7 มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-Expert เพื่อศึกษาค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่างๆ จาก normal plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว แสดงในภาพที่ 4.6 พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีค่า $R^2=0.9764$ แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปวิเคราะห์ทางสถิติต่อไปได้



ภาพที่ 4. 6 Normal probability plot ของส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว



ภาพที่ 4. 7 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

ตารางที่ 4. 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปลาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F value	Prob > F value
Model	529.58	6	88.26	199.72	< 0.0001
A	411.56	1	411.56	931.28	< 0.0001
B	76.38	1	76.38	172.84	< 0.0001
C	21.03	1	21.03	47.58	< 0.0001
AB	14.77	1	14.77	33.42	< 0.0001
AC	3.28	1	3.28	7.41	0.0108
ABC	2.57	1	2.57	5.80	0.0226
Curvature	16.91	1	16.91	38.26	< 0.0001
Residual	12.82	29	0.44		
Lack of Fit	3.48	9	0.39	0.83	0.5987
Pure Error	9.34	20	0.47		
Cor Total	559.31	36			

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.7 half normal probability plot ของร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปลาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน ซึ่งแสดงถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจะเบี่ยงเบนจากข้อมูลอื่นที่อยู่บนเส้นตรง พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวมากที่สุดคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (A) เวลาในการทำปฏิกิริยา (B) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (C) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและเวลาในการทำปฏิกิริยา (AB) และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ABC) ตามลำดับ เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าตัวแปรดังกล่าวมีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรดังกล่าวมีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปลาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน จากการคำนวณโดยโปรแกรม

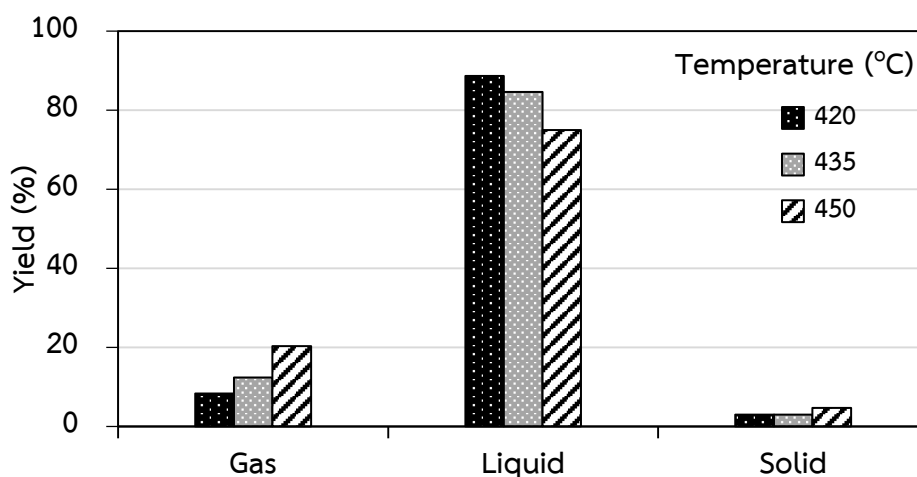
Design-Expert พบว่าสมการที่บอกถึงร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหินคือ

$$\text{Diesel} = + 35.82 - 3.59A - 1.55B - 0.81C + 0.68AB + 0.32AC + 0.28ABC$$

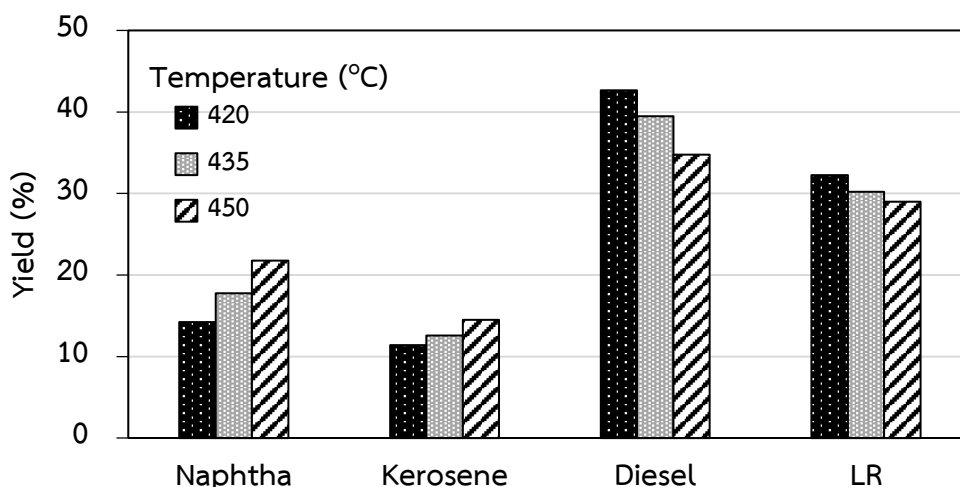
4.4 ผลของตัวแปรที่ศึกษาต่อการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน

เมื่อทำการวิเคราะห์การทดลองโดยวิธี ANOVA แล้ว ทำให้ทราบปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวและร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน จึงทำการศึกษาต่อว่าปัจจัยเหล่านั้นส่งผลอย่างไร โดยการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างค่าต่ำ-สูงของแต่ละปัจจัยดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าจากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน



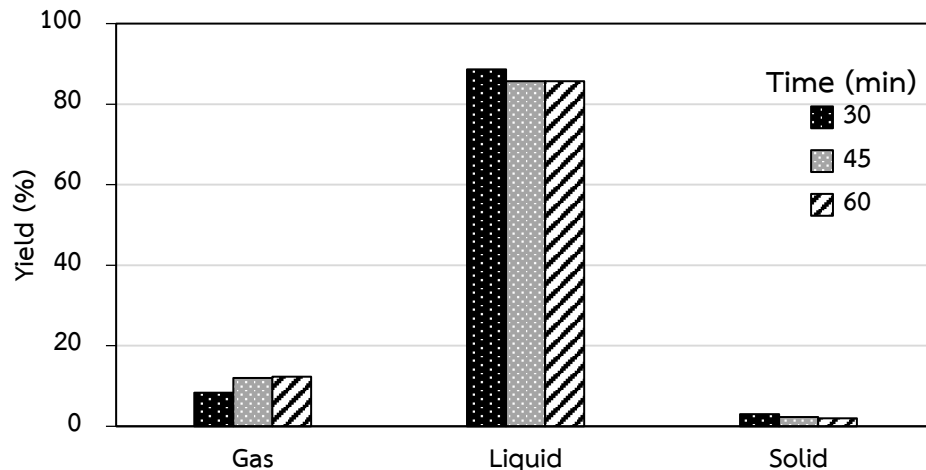
ภาพที่ 4. 8 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์)



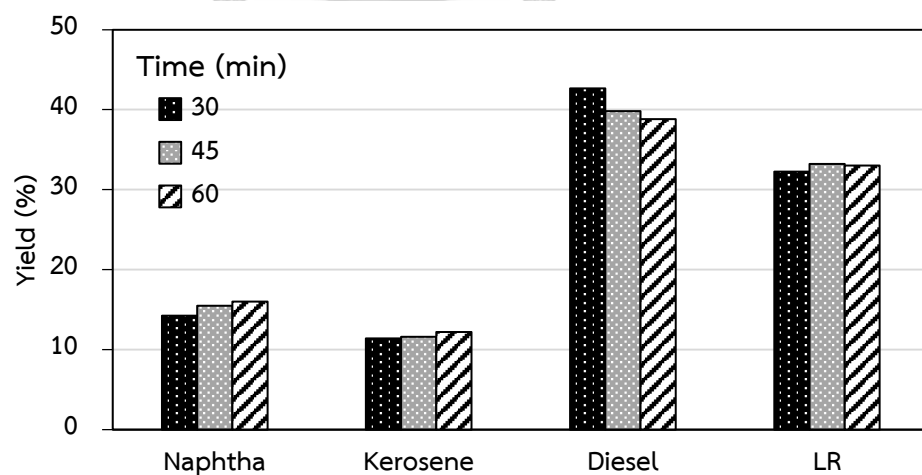
ภาพที่ 4. 9 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์)

จากภาพที่ 4.8 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น จะได้ผลิตภัณฑ์เหลวในปริมาณลดลง ในขณะที่เมื่อนำผลิตภัณฑ์เหลวไปวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดดังแสดงในภาพที่ 4.9 จะให้องค์ประกอบที่อยู่ในช่วงคาบจุดเดือดของดีเซลและปริมาณกาน้ำมันที่ลดลง จากแนวโน้มดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าในช่วงแรกของการแตกตัวเชิงความร้อน อุณหภูมิจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นไดกลีเซอไรด์และกรดไขมันในรูปของอนุمولอิสระ จากนั้นเมื่อให้อุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่องจึงเกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องที่ตำแหน่งบีตา (β) ไดกลีเซอไรด์จะแตกตัวไปเป็นมอนอกลิเซอไรด์ หลังจากนั้นอิทธิพลของอุณหภูมิจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและดีคาร์บอนิลเลชันของกรดไขมันและมอนอกลิเซอไรด์ เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนในรูปอนุمولอิสระ ซึ่งอาจจะเกิดการแตกตัวต่อไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางพร้อมกับเกิดอนุمولอิสระใหม่ หรือทำปฏิกิริยากับอนุمولอิสระกันเองเพื่อหยุดปฏิกิริยา เกิดเป็นสารประกอบชนิดแอลคีน ซึ่งการใช้อุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่สูงขึ้นจะส่งผลให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางจึงเกิดการแตกตัวเพิ่มขึ้น ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงจึงเกิดโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กและแก๊สไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก

4.4.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปาล์มจาก ทะลายปาล์มเปล่าจากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เถ้าลอยถ่านหิน



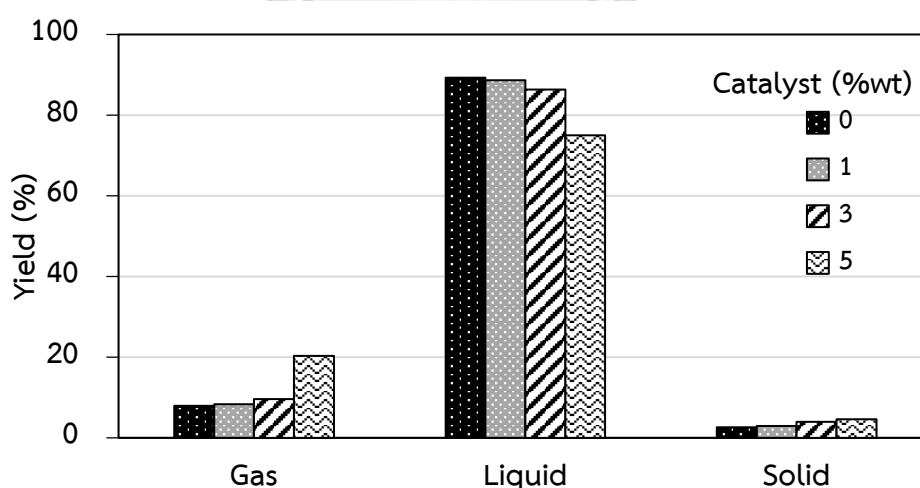
ภาพที่ 4. 10 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยา (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์)



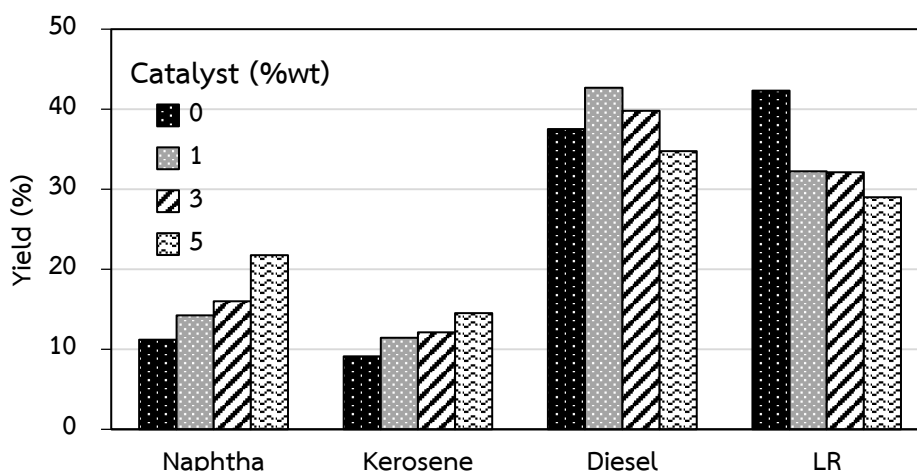
ภาพที่ 4. 11 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยา (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์)

จากภาพที่ 4.10 พบว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที เป็น 45 นาที จะได้ผลิตภัณฑ์เหลวลดลงจากร้อยละ 88.67 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 85.67 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มเวลาเป็น 60 นาที ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มีค่าร้อยละ 85.67 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าเท่ากับผลิตภัณฑ์เหลวที่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที เมื่อนำผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดดังแสดงในภาพที่ 4.11 พบว่าองค์ประกอบที่อยู่ในช่วงคาบจุดเดือดของดีเซลลดลง ในขณะที่ปริมาณของเนฟทา เคโรซีน และกาคาน้ำมันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากแนวโน้มดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้นทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fekadu และคณะ (2018) [1] เนื่องจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็กเกิดการแตกตัวต่อไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง และเกิดเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก นอกจากนี้เวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้โมเลกุลขนาดเล็กมีโอกาสรวมตัวเกิดเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น ดังนั้นเวลา 30 นาทีจึงเหมาะสมที่สุดในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนเพื่อได้ดีเซลสูงสุด

4.4.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าจากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน



ภาพที่ 4. 12 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์)

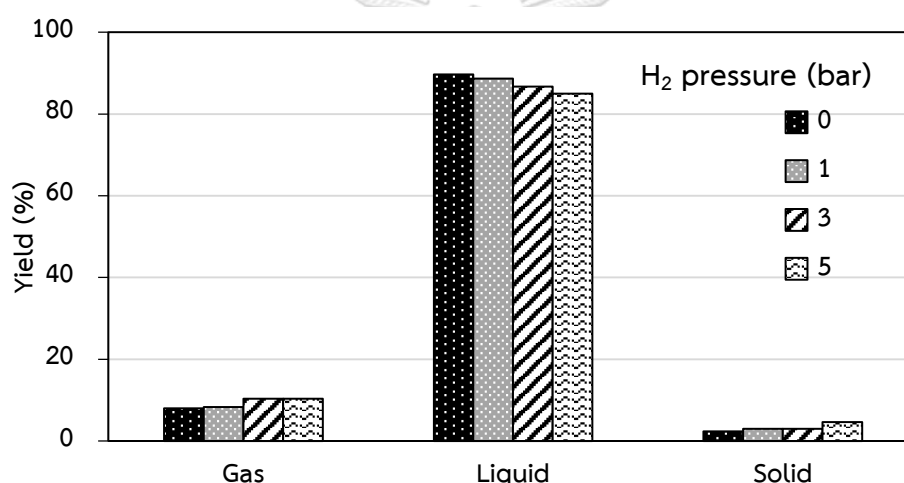


ภาพที่ 4. 13 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์)

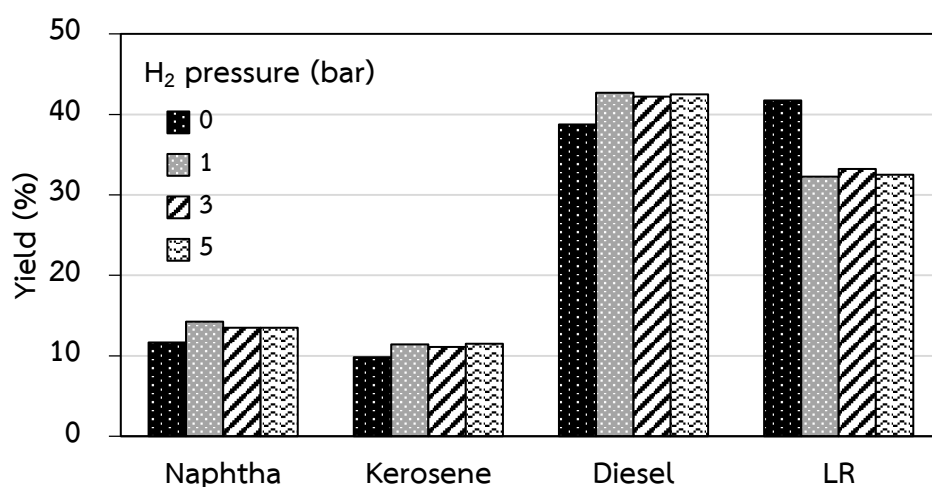
จากภาพที่ 4.12 และภาพที่ 4.13 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการไพโรไลซิสโดยไม่ใช้และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วยที่ภาวะเดียวกัน พบว่าการไพโรไลซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วยจะได้ผลิตภัณฑ์เหลวที่สูงกว่าเพียงเล็กน้อย ในขณะที่การไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วยมีปริมาณกากน้ำมันที่ลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในช่วงแรกของปฏิกิริยาอุณหภูมิจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเปลี่ยนน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าซึ่งมีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันจากไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นไดกลีเซอไรด์และมอนอกลิเซอไรด์ ความร้อนทำให้หมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิลเกิดการแตกสลายไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อปฏิกิริยายังดำเนินต่อไป บทบาทของความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำล่อยถ่านหินซึ่งมีองค์ประกอบของ CaO เข้ามามีบทบาทในการส่งเสริมการแตกสลายเชิงความร้อน ทำให้องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลาะปาล์มเปล่าที่เป็นสารระเหยได้เกิดการแตกสลาย (Devolatilization) นอกจากนี้บทบาทของพื้นที่ผิวรูพรุนและโลหะออกไซด์ที่ทำให้มีพื้นที่ก่อกัมมันต์ (Active site) สำหรับปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนและเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) ทำให้ผลิตภัณฑ์สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางเกิดความอิ่มตัว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Charusiri และคณะ (2017) [38] เมื่อทำการเปรียบเทียบการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น ขณะที่ผลิตภัณฑ์เหลวลดลง และเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์เหลวพบว่าปริมาณของ

ดีเซลและกาน้ำมันลดลง ในขณะที่ปริมาณแนฟทาและโครซีนเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่ก่อกัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น จึงส่งเสริมให้เกิดการแตกตัวทุติยภูมิ (Secondary Cracking) ทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนจึงเกิดการแตกตัวเพิ่มขึ้นผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและดีคาร์บอนิลเลชัน จึงเกิดผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก และแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจำนวนมาก

4.4.4 ผลของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าจากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน

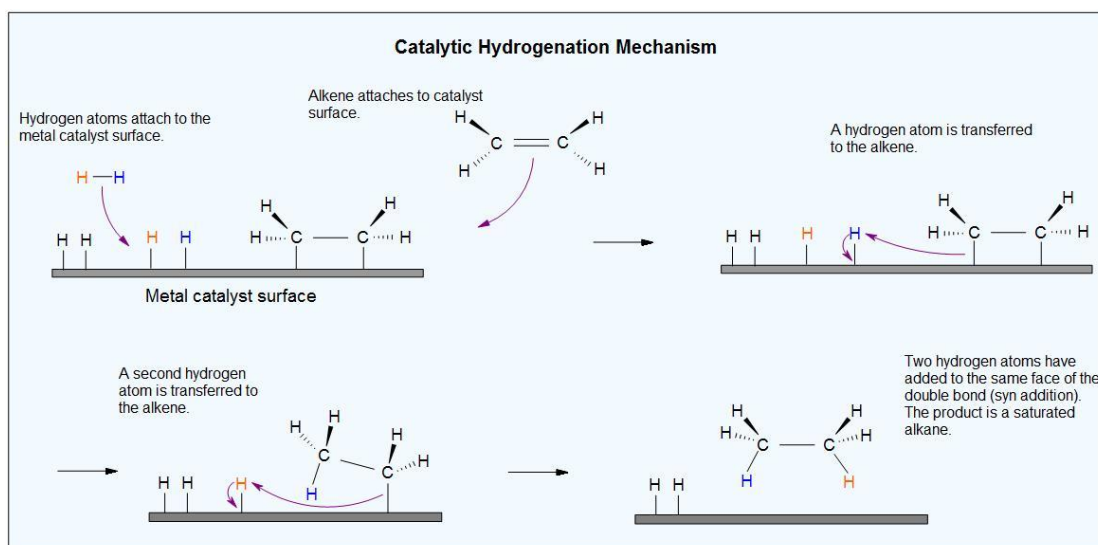


ภาพที่ 4. 14 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันไฮโดรเจน (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก)



ภาพที่ 4. 15 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันไฮโดรเจน (อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก)

จากภาพที่ 4.14 และ 4.15 เมื่อเปรียบระหว่างการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแก๊สไฮโดรเจน 1, 3 และ 5 บาร์ ตามลำดับ พบว่าผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มีค่าลดลงเล็กน้อย และองค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญซึ่งสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับแก๊สไฮโดรเจนและไม่ใช้แก๊สไฮโดรเจน พบว่าการเติมแก๊สไฮโดรเจนส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวลดลงเล็กน้อย ขณะที่ปริมาณกากน้ำมันลดลงและดีเซลเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าแก๊สไฮโดรเจนมีบทบาทต่อปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันและการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจน ทำให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่และขนาดกลาง จากปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจนไปเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง ซึ่งแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4. 16 กลไกของปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [39]

4.5 ภาวะที่เหมาะสมของการไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหินโดยใช้โปรแกรม Design-Expert

ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหินด้วยโปรแกรม Design-Expert โดยขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมในการไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหินจากโปรแกรม Design-Expert แสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4. 9 ขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert จากการไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Unit
Temperature	Is in range	420.00	450.00	°C
Time	Is in range	30.00	60.00	minute
Amount of catalyst	Is in range	1.00	5.00	%wt
H ₂ pressure	Is in range	1.00	5.00	bar
Liquid yield	maximize	66.00	88.67	%wt
Diesel fraction	maximize	31.75	42.67	%wt

ในการหาภาวะที่เหมาะสมพิจารณาค่าการตอบสนอง 2 ค่าคือ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว และร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว โดยจะพิจารณาให้มีค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว และร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสูงที่สุด ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert แสดงในตารางที่ 4.10 คือ ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์ จะทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเท่ากับร้อยละ 87.98 โดยน้ำหนัก และร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเท่ากับร้อยละ 42.19 โดยน้ำหนัก สำหรับแผนภูมิสามมิติของภาวะที่เหมาะสมในการไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอยถ่านหินภายใต้ขอบเขตที่ศึกษาแสดงใน ภาพที่ 4.17

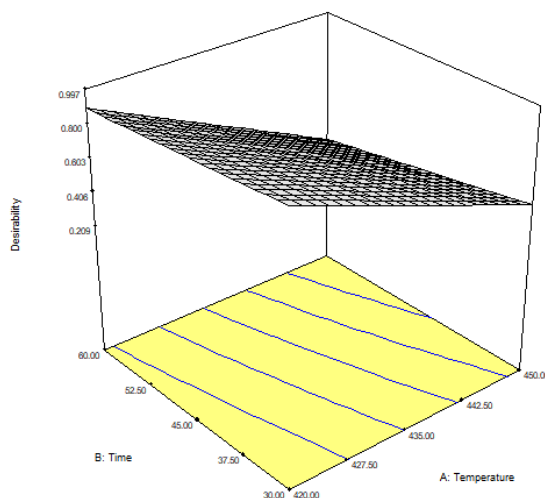
ตารางที่ 4. 10 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert จากการไฟโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอยถ่านหิน

ตัวแปร	ภาวะจากโปรแกรม
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	420.00
เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	31.70
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1.00
ความดันไฮโดรเจน (บาร์)	1.00
ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว	87.98
ร้อยละผลได้ของดีเซล	42.19

DESIGN-EXPERT Plot

Desirability
X = A: Temperature
Y = B: Time

Actual Factors
C: Catalyst = 1.01
D: H2 pressure = 1.03



ภาพที่ 4. 17 แผนภูมิสามมิติของภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอมถ่านหินภายใต้ขอบเขตที่ศึกษา

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert แล้วจึงนำมาทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมและค่าจากการทดลอง

ตารางที่ 4. 11 ค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert กับค่าที่ได้จากการทดลอง

ตัวแปร	ภาวะจากโปรแกรม	ภาวะจากการทดลองจริง
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	420.00	420.00
เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)	31.70	30.00
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1.00	1.00
ความดันไฮโดรเจน (บาร์)	1.00	1.00
ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว	87.98	88.34
ร้อยละผลได้ของดีเซล	42.19	42.38

ตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert กับค่าที่ได้จากการทดลองจริง พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม โดยได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการทดลองจริง

เท่ากับร้อยละ 88.34 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเท่ากับร้อยละ 42.38 โดยน้ำหนัก

4.6 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของเชื้อเพลิงเหลว

ตารางที่ 4. 12 ค่าความเป็นกรดของเชื้อเพลิงเหลว

น้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่า	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)
ก่อนการทดลอง	57.13
หลังการแตกตัวด้วยความร้อน	8.86
หลังการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน	0.20

จากตารางที่ 4.12 แสดงค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหินที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์ พบว่าน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าก่อนการไพโรไลซิสมีค่าความเป็นกรด 57.13 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน เมื่อผ่านการไพโรไลซิสโดยไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้มีค่าลดลงเหลือ 8.86 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน ซึ่งยังคงมีค่าสูงกว่ามาตรฐานน้ำมันดีเซลตามเกณฑ์ของกรมธุรกิจพลังงาน (ต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน) และเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหินลงไปพบว่าค่าความเป็นกรดมีค่าลดลงเท่ากับ 0.20 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมันซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ทั้งนี้เนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหินมีความเป็นเบสจึงทำให้ค่าความเป็นกรดลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang และคณะ (2017) [35] และ Romeo และคณะ (2016) [34] เมื่อใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิกได้เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตและสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงเหลว

องค์ประกอบธาตุ C H O ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4. 13 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงเหลว

น้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล้า	C	H	O
ก่อนการทดลอง	77.39	11.92	10.69
หลังการแตกตัวด้วยความร้อน	81.93	12.34	5.74
หลังการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอมเต๋านหิน	83.40	12.61	3.50

ตารางที่ 4.13 แสดงองค์ประกอบของธาตุ C H O พบว่าน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล้าก่อนการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอมเต๋านหินมีค่าออกซิเจนเท่ากับร้อยละ 10.69 หลังจากผ่านการไพโรไลซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอมเต๋านหิน พบว่าผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าออกซิเจนลดลงเหลือร้อยละ 5.74 และ 3.50 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณออกซิเจนที่ลดลงส่งผลโดยตรงต่อค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ทำให้มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้น ช่วยให้เกิดผลดีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ทั้งนี้เนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอมเต๋านหินซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์จะส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดไขมัน เพื่อกำจัดหมู่คาร์บอกซิลิกออกไปทำให้ปริมาณออกซิเจนมีค่าลดลง ซึ่งสามารถยืนยันการเกิดปฏิกิริยาได้จากการเก็บตัวอย่างแก๊สที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่ามีพีคของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ปรากฏขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.18

4.8 การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว

ตารางที่ 4. 14 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter ของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล้าก่อนและหลังการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอมเต๋านหิน

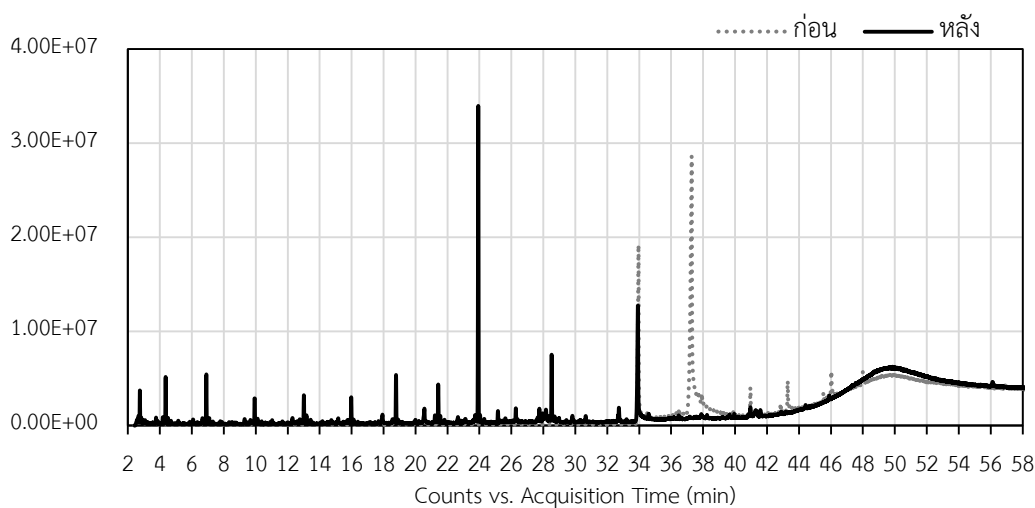
น้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล้า	ค่าความร้อน (MJ/kg)
ก่อนการทดลอง	38.42
หลังการแตกตัวด้วยความร้อน	39.56
หลังการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอมเต๋านหิน	40.18

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล้าก่อนและหลังการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอมเต๋านหินพบว่าค่าความร้อนของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล้าก่อนการไพโรไลซิสมีค่าเท่ากับ 38.42 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อผ่านการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอมเต๋านหินมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 40.18 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอมเต๋านหินช่วยเร่งปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

ชั้นของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าทำให้จัดออกซิเจนออกจากโมเลกุลของน้ำมันค่าความร้อนจึงสูงขึ้น

4.9 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ แสดงในภาพที่ 4.18 และตารางที่ 4.14



ภาพที่ 4. 18 โครมาโทแกรมเปรียบเทียบองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าก่อนและหลังการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

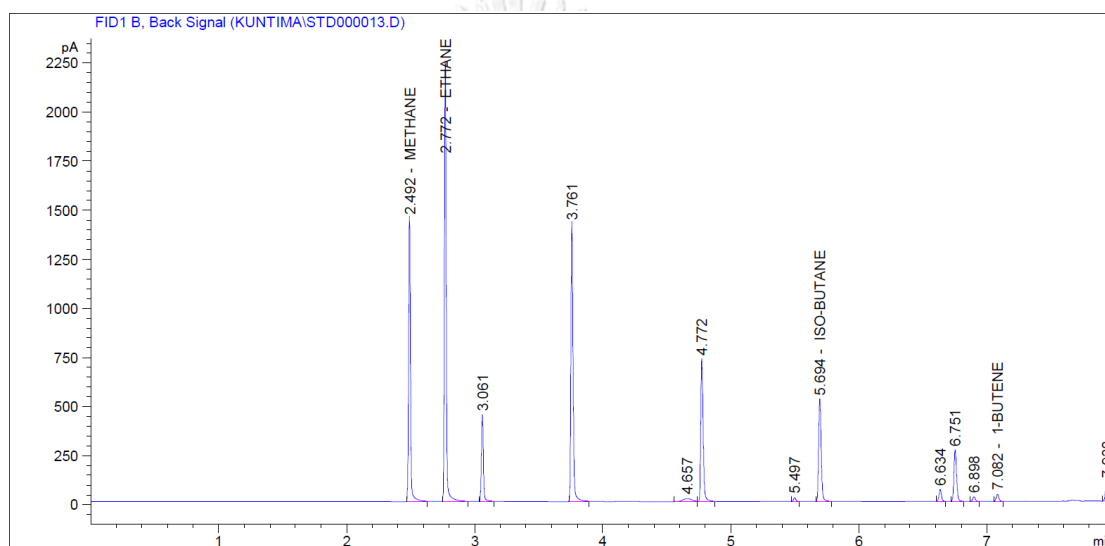
จากภาพที่ 4.18 แสดงโครมาโทแกรมเปรียบเทียบองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าก่อนและหลังการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ พบว่าน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าหลังการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่ได้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปล่าที่ไม่ผ่านการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน และเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ $C_7 - C_{18}$ (แสดงดังตารางที่ ค.1 ภาคผนวก ค) เนื่องจากอุณหภูมิมีบทบาทอย่างมากต่อการแตกตัวเชิงความร้อนของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ที่อยู่ในรูปของ

ไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นขนาดกลางและขนาดเล็ก จากการแตกตัวของหมู่เอสเทอร์ของไตรกลีเซอไรด์ได้เป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปเล่มีองค์ประกอบหลักของกรดไขมันปาล์มมิติก (palmitic acid; C16) และกรดไขมันโอเลอิก (oleic acid; C18) ซึ่งเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง จากนั้นเกิดการแตกตัวผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรคาร์บอน เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.15 ซึ่งแสดงจำนวนโมลของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปเล่โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วลดย่ำนหินด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวตรวจวัด TCD พบว่ามีองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ทั้ง 2 ภาวะ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าในการไพโรไลซิสเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันขึ้นจริง และเมื่อเปรียบเทียบจำนวนโมลของผลิตภัณฑ์แก๊สจากทั้ง 2 ภาวะ พบว่าเมื่อไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วลดย่ำนหินจำนวนโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น 0.12 มิลลิโมลหรือ 0.05 เท่า จากการไพโรไลซิสโดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา จำนวนโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น 5.04 มิลลิโมลหรือ 1.87 เท่า และจำนวนโมลของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น 7.27 มิลลิโมล หรือ 1.43 เท่า ซึ่งเป็นการยืนยันบทบาทของ CaO ที่ส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน และจำนวนโมลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แสดงให้เห็นว่า CaO มีบทบาทที่ส่งเสริมปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันมากกว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Teerayut [40]

ตารางที่ 4. 15 ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปเล่โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วลดย่ำนหินที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวตรวจวัด TCD

ผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละ)	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (มิลลิโมล/15 กรัม น้ำมัน)	ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (มิลลิโมล/15 กรัม น้ำมัน)
CO ₂	2.61	2.73
H ₂	5.07	12.34
CO	2.70	7.74

จากภาพที่ 4.19 ซึ่งแสดงโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอยถ่านหินด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวตรวจวัด FID พบว่าองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่ได้คือ มีเทน อีเทน ไอโซบิวเทน และ บิวเทน ตามลำดับ โดยพบอีเทนมากที่สุดถึงร้อยละ 31.28 ดังแสดงในตารางที่ 4.16 นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคนเนื่องจากการทดลองได้มีการอัดแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันและเกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจน จนเกิดการเติมไฮโดรเจนลงไปบนพันธะที่ไม่อิ่มตัว ทำให้สารไฮโดรคาร์บอนที่ได้มีความอิ่มตัวมากขึ้น



ภาพที่ 4. 19 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอยถ่านหินด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวตรวจวัด FID ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์

ตารางที่ 4. 16 ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอยถ่านหินด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวตรวจวัด FID

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
2.492	Methane	33.30
2.772	Ethane	49.44
5.694	Iso-butane	16.13
7.082	Butane	1.13

4.10 ผลการทดลองกับงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

เมื่อนำผลการทดลองของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา โดยเลือกใช้น้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าเป็นสารตั้งต้น ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์และตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบสหรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน พบภาวะที่เหมาะสมในการโฟโรไลซิสเพื่อได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าการกระจายตัวผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดที่ให้ร้อยละของดีเซลมากที่สุด และสมบัติของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ แสดงดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4. 17 ผลการทดลองและงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

การทดลอง	ญาติ (2556)	ชัยพร (2558)	งานวิจัยนี้
สารตั้งต้น	น้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่า	น้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่า	น้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่า
เครื่องปฏิกรณ์	แบบแบดซ์	แบบแบดซ์	แบบแบดซ์
ตัวเร่งปฏิกิริยา	MgO : Activated carbon	โดโลไมต์	ถ้ำลอยถ่านหิน
อุณหภูมิ (°C)	430	460	420
เวลา (min)	60	30	30
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (%wt)	5	5	1
ความดันไฮโดรเจน (bar)	5	1	1
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว (%wt)	66.88	67.10	87.98
ร้อยละผลได้ของดีเซล (%wt)	55.00	37.50	42.19
ค่าความร้อน (MJ/kg)	43.46	44.07	40.18
ค่าความเป็นกรด(mgKOH/g)	3.28	0.34	0.2

ญาติ ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา (2556) ใช้น้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าเป็นสารตั้งต้น และทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ แต่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันคืองานวิจัยของญาติใช้แมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่งานวิจัยนี้ใช้ถ้ำลอยถ่านหินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือแคลเซียมออกไซด์ จากการเปรียบเทียบภาวะที่เหมาะสมพบว่างานวิจัยนี้ใช้ภาวะที่ต่ำกว่าเพื่อได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าการกระจายตัว

ผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดที่ให้ร้อยละของดีเซลมากที่สุด คือที่อุณหภูมิ 420 เวลา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ซึ่งเป็นผลดีต่อต้นทุนการผลิต เนื่องจากมีการใช้พลังงานความร้อน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และแก๊สไฮโดรเจนที่ต่ำกว่า จึงส่งผลให้ต้นทุนในกระบวนการผลิตลดลง นอกจากนี้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลวของงานวิจัยนี้เพิ่มขึ้นจากงานวิจัยของญาติ คือจากร้อยละ 66.88 เป็น 87.98 โดยน้ำหนัก หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 31.55 มีค่าการกระจายตัวผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดที่ให้ร้อยละของดีเซลลดลงจากร้อยละ 55.00 เป็น 42.19 โดยน้ำหนัก หรือลดลงร้อยละ 23.29 แต่เมื่อพิจารณาโดยรวมพบว่ามีค่าร้อยละผลได้ของของผลิตภัณฑ์เหลวที่มีค่าการกระจายตัวผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดที่ให้ร้อยละของดีเซลใกล้เคียงกัน โดยงานวิจัยนี้ได้ค่าร้อยละ 37.11 ในขณะที่งานวิจัยของญาติได้ค่าร้อยละ 36.79 เมื่อพิจารณาค่าความร้อนและความเป็นกรดพบว่าจากงานวิจัยของญาติมีค่าสูงกว่าคือ 43.46 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และ 3.28 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าความเป็นกรดดังกล่าวสูงกว่าค่ามาตรฐานของไบโอดีเซลตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน (ต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม) ในขณะที่งานวิจัยนี้มีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าคือ 40.18 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม แต่มีค่าความเป็นกรด 0.2 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน ดังนั้นจากวิจัยนี้จึงมีผลที่ดีกว่าทั้งภาวะที่ใช้ในการไฟโรไลซิส ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวที่มีค่าการกระจายตัวผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดที่ให้ร้อยละของดีเซลและสมบัติของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้

ชัยพร จึงโชติกะพิศิฐ (2558) สารตั้งต้นที่ใช้คือน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่า และทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดซ์เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ แต่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันคืองานวิจัยของชัยพรใช้ไดโลไมต์ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือแมกนีเซียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการเปรียบเทียบภาวะที่เหมาะสมพบว่างานวิจัยนี้ใช้ภาวะที่ต่ำกว่าเพื่อได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าการกระจายตัวผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดที่ให้ร้อยละของดีเซลมากที่สุด ซึ่งเป็นผลดีต่อการลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลวของงานวิจัยนี้เพิ่มขึ้นจากงานวิจัยของชัยพรคือจากร้อยละ 67.10 เป็น 87.98 โดยน้ำหนัก หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 31.12 มีค่าการกระจายตัวผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดที่ให้ร้อยละของดีเซลที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันคือจากร้อยละ 37.50 เป็น 42.19 โดยน้ำหนัก หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.51 เมื่อพิจารณาโดยรวมพบว่างานวิจัยนี้มีค่าร้อยละผลได้ของของผลิตภัณฑ์เหลวที่มีค่าการกระจายตัวผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดที่ให้ร้อยละของดีเซลที่สูงกว่าคืองานวิจัยนี้ได้ค่าร้อยละ 37.11 ในขณะที่งานวิจัยของชัยพรได้ค่าร้อยละ 25.16 เมื่อพิจารณาค่า

ความร้อนและความเป็นกรดพบว่าจากงานวิจัยของซัยพรมีค่าสูงกว่า คือ 44.07 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม และ 0.34 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งให้เห็นว่าเถ้าลอยถ่านหินสามารถลดช่วยปริมาณสารประกอบอินทรีย์ที่มีธาตุออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (oxygenated compound) ได้มากกว่า ซึ่งค่าความเป็นกรดดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานเช่นเดียวกัน งานวิจัยนี้ จากผลข้างต้นชี้ให้เห็นว่างานวิจัยทั้งคู่มีค่าความเป็นกรดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ในขณะที่ค่าความร้อนของงานวิจัยซัยพรมีสูงกว่าแต่ค่าร้อยละผลได้ของของผลิตภัณฑ์เหลวที่มีค่าการกระจายตัวผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดที่ให้ร้อยละของดีเซลที่ต่ำกว่า ซึ่งจะต้องศึกษาความคุ้มค่าในการลงทุนเพิ่มเติมระหว่างค่าร้อยละผลได้ของของผลิตภัณฑ์เหลวที่มีค่าการกระจายตัวผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดที่ให้ร้อยละของดีเซลและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์เหลว จึงจะสามารถชี้ชัดได้ว่างานวิจัยชิ้นใดให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่ากัน



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านล้อย่านหิน เพื่อภาวะที่เหมาะสมที่ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีสัดส่วนของดีเซลมากที่สุด มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และเป็นข้อมูลในการออกแบบกระบวนการผลิตในเชิงพาณิชย์ โดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2^k) โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาทั้งหมด 4 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420-450 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้นำไปวิเคราะห์ด้วยโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น จากการนำผลการทดลองที่ได้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert พบว่าภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ จะได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 87.98 และร้อยละผลได้ของดีเซลในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 42.19 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าความร้อน 40.18 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความเป็นกรด 0.20 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
- 2) ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีองค์ประกอบของโลหะออกไซด์ชนิดอื่นๆ
- 3) ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากถ่านล้อย่านหินกับสารตั้งต้นชนิดอื่นที่มีความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ
- 4) ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านล้อย่านหินไม่เหมาะสมในการนำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากหลังสิ้นสุดปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาจะจับตัวกับกากน้ำมันที่ค้างค้างอยู่เกิดเป็นโค้กเกาะบริเวณผิวของเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้ยากต่อการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกเพื่อนำไปปรับปรุงคุณภาพและนำกลับมาใช้ใหม่

บรรณานุกรม

1. Wako, F.M., et al., *Catalytic cracking of waste cooking oil for biofuel production using zirconium oxide catalyst*. Industrial Crops and Products, 2018. 118: p. 282-289.
2. อัตราส่วนการเกิดชีวมวลต่อทะเลายปาล์มสด. [cited 2019 April 6]; Available from: <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/2529>.
3. พสธร ชุนโอษฐ์, การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มจากทะเลายปาล์มเปล่าบนโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง, in คณะวิทยาศาสตร์. 2558, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
4. Yao, Z., et al., *A comprehensive review on the applications of coal fly ash*. Earth-Science Reviews, 2015. 141: p. 105-121.
5. ศูนย์การเรียนรู้โลกและดาราศาสตร์. ปิโตรเลียม. [Online] [cited 2019 May 5]; Available from: <http://www.lesa.biz/earth/lithosphere/fuel/oil>.
6. องค์ประกอบของน้ำมันดิบตามน้ำหนัก. [Online] [cited 2019 May 6]; Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/ปิโตรเลียม>.
7. *Device for reducing toxic exhaust gases of diesel engines*. [Online] [cited 2019 May 6]; Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/f3/6e/ce/a1463ea96bf315/EP0954693B1.pdf>.
8. Matar, S., *Chemistry of Petrochemical Processes*. 1994, Texas.
9. *Chlorophyll A*. [Online] [cited 2019 May 7]; Available from: https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB5471362.htm.
10. ก๊าซธรรมชาติ. [Online] [cited 2019 May 6]; Available from: <https://www.deqp.go.th/knowledge/พล-งาน/มาร-จ-กประโยชน์-ของก-าธรรมชาติ-natural-gas-ก-นเถอะ/>.
11. ประเภทของแก๊สธรรมชาติ. [Online] [cited 2019 May 6]; Available from: <https://sites.google.com/site/mayurasrichan1/prapheth-khxng-kaes-thrrmchati>.
12. พลังงานชีวมวล. [online] [cited 2019 May 7]; Available from: <http://www.eppo.go.th/images/Power/renewable-energy/14.pdf>.
13. ประพันธ์ คูชลธรา and ศศิธร สรรพอคำ, พลังงานจากชีวมวลและวัสดุเหลือใช้. 2557: โรงพิมพ์แห่ง

- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
14. กระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ [Online] [cited 2019 May 7]; Available from: <http://ict.sci.psu.ac.th/web-sciweek-57/prize/m4-6/4/html/P-chiwamon.html>.
 15. ข้อดีและข้อด้อยในการใช้ชีวมวล. [Online] [cited 2019 May 7]; Available from: <https://www.dip.go.th/Portals/0/Thermal%20Energy%20Book/12เทคโนโลยีการจัดการพลังงานความร้อน.pdf>.
 16. ปาล์ม. [Online] [cited 2019 May 7]; Available from: [https://th.wikipedia.org/wiki/ปาล์ม_\(พืช\)](https://th.wikipedia.org/wiki/ปาล์ม_(พืช)).
 17. ปาล์มน้ำมัน. [Online] [cited 2019 May 7]; Available from: http://www.qsbg.org/Database/Botanic_Book%20full%20option/search_detail.asp?botanic_id=2409.
 18. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของปาล์มน้ำมัน. [Online] [cited 2019 May 7]; Available from: <http://www.cpiagrotech.com/knowledge-019/>.
 19. ลักษณะเด่นของปาล์มน้ำมัน. [Online] [cited 2019 May 7]; Available from: <http://punmai1.blogspot.com/>.
 20. กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม [Online] [cited 2019 May 7]; Available from: <http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/palm/used/01-02.php>.
 21. ไพโรไลซิสคืออะไร. [Online] [cited 2019 May 7]; Available from: http://www.ardi.cmu.ac.th/download/Pyrolysis_ERDI_CMU.pdf.
 22. สภาวะที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิส. [Online] [cited 2019 May 7]; Available from: <http://www.siampattana.com/index.php?lay=show&ac=article&id=539203276&Ntype=1>.
 23. ศศิธร จิตการคำ, จากขยะสู่น้ำมัน : เทคโนโลยีผลิตพลังงานทางเลือกที่ดูแล้วดีแล้วดี. 2551: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
 24. เทคนิคการผลิตไบโอดีเซล. [Online] [cited 2019 May 8]; Available from: http://www.biodiesel.rdi.ku.ac.th/index.php?option=com_content&view=article&id=12.
 25. Gary, J.H. and G.E. Handwerk, *Catalytic Hydrocracking and Hydroprocessing*. 1994, NewYork.

26. Schobert, H.H., *The Chemistry of Hydrocarbon fuel*. 1991, NewYork.
27. ปราโมทย์ ไชยเวช, ปีเตอร์เลียมเทคโนโลยี. 2548: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
28. ตัวเร่งปฏิกิริยา. [Online] [cited 2019 May 8]; Available from: http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/t_chimsook/คม443-ตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม1p.pdf.
29. นพิตา หิฐชีระนันท์ and ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย, เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา CATALYST TECHNOLOGY. 2556: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
30. เทคโนโลยีรีไซเคิลเถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้า (Fly Ash) ด้วยการผลิตเป็นโลหะโฟม (Metal Foam). [Online] 2561 [cited 2019 May 9]; Available from: <http://www5.dpim.go.th/wp-content/uploads/2018/02/fly-ash-metal-foam-PDF.pdf>.
31. Dindi, A., et al., *Applications of fly ash for CO2 capture, utilization, and storage*. Journal of CO2 Utilization, 2019. 29: p. 82-102.
32. เถ้าลอย. [Online] [cited 2019 May 9]; Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%96%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%A2>
33. ชัยพร จิงโชติกะพิสิฐ, การสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโตโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ. 2558, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.
34. Romero, M.J., et al., *Deoxygenation of waste cooking oil and non-edible oil for the production of liquid hydrocarbon biofuels*. Waste Manag, 2016. 47(Pt A): p. 62-8.
35. Chang, J.-S., et al., *Low acid value bio-gasoline and bio-diesel made from waste cooking oils using a fast pyrolysis process*. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017. 73: p. 1-11.
36. Muthukumaran, N., et al., *Synthesis of cracked Calophyllum inophyllum oil using fly ash catalyst for diesel engine application*. Fuel, 2015. 155: p. 68-76.
37. ญาดา ปาลกะวงศ์ ณ ออยุธยา, ไพโรไลซิสของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวบนแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์, in ปีเตอร์เคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ 2557, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต หลักสูตรปีเตอร์เคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
38. Charusiri, W. and T. Vitidsant, *Response Surface Methodology Optimization of Biofuels Produced by Catalytic Pyrolysis of Residual Palm Oil from Empty Fruit*

- Bunch over Magnesium Oxide*. JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN, 2017. 50(9): p. 727-736.
39. *Catalytic Hydrogenation*. [Online] [cited 2019 June 23]; Available from: <https://chem.libretexts.org>.
40. Bunma, T. and P. Kuchonthara, *Synergistic study between CaO and MgO sorbents for hydrogen rich gas production from the pyrolysis-gasification of sugarcane leaves*. Process Safety and Environmental Protection, 2018. 118: p. 188-194.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.
ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก. 1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการทดลองการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วล่อยถ่านหิน

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (%wt)		
	A (°C)	B (min)	C (%wt)	D (bar)	แก๊ส	ของแข็ง	ของเหลว
1	420	30	1	1	9.33	2.67	88.00
2	420	30	1	1	8.33	3.00	88.67
3	450	30	1	1	20.33	4.67	75.00
4	450	30	1	1	19.67	5.00	75.33
5	420	60	1	1	12.33	2.00	85.67
6	420	60	1	1	11.67	2.33	86.00
7	450	60	1	1	25.00	7.33	68.67
8	450	60	1	1	24.67	6.67	67.67
9	420	30	5	1	7.00	9.67	83.33
10	420	30	5	1	6.67	10.00	83.33
11	450	30	5	1	23.00	8.67	68.33
12	450	30	5	1	22.33	7.67	70.00
13	420	60	5	1	12.00	7.67	80.33
14	420	60	5	1	12.33	8.67	79.00
15	450	60	5	1	24.33	6.67	69.00
16	450	60	5	1	22.00	8.00	70.00
17	420	30	1	5	10.33	4.67	85.00
18	420	30	1	5	9.33	3.60	87.07
19	450	30	1	5	23.33	3.33	73.33
20	450	30	1	5	22.33	4.00	73.67
21	420	60	1	5	10.33	2.67	87.00

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการทดลองการไพโรไลซิสของน้ำมัน
ปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน

การ ทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (%wt)		
	A (°C)	B (min)	C (%wt)	D (bar)	แก๊ส	ของแข็ง	ของเหลว
22	420	60	1	5	11.67	3.33	85.00
23	450	60	1	5	24.33	7.00	68.67
24	450	60	1	5	26.33	7.67	66.00
25	420	30	5	5	8.00	12.67	79.33
26	420	30	5	5	9.33	10.33	80.33
27	450	30	5	5	26.67	4.00	69.33
28	450	30	5	5	25.33	6.67	68.00
29	420	60	5	5	12.33	8.67	79.00
30	420	60	5	5	12.33	8.00	79.67
31	450	60	5	5	27.33	7.33	65.33
32	450	60	5	5	27.67	8.33	64.00
33	435	45	3	3	16.00	13.00	71.00
34	435	45	3	3	15.00	11.33	73.67
35	435	45	3	3	13.33	7.67	71.00
36	435	45	3	3	17.00	11.67	71.33
37	435	45	3	3	16.67	17.00	72.00

ตารางที่ ก. 2 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

การทดลอง	ตัวแปร				องค์ประกอบ(ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	A (°C)	B (min)	C (%wt)	D (bar)	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล	กากน้ำมัน
1	420	30	1	1	15.00	12.33	44.67	28.00
2	420	30	1	1	14.25	11.42	42.08	32.25
3	450	30	1	1	21.75	14.50	34.75	29.00
4	450	30	1	1	23.33	15.17	34.00	27.50
5	420	60	1	1	16.00	12.20	38.80	33.00
6	420	60	1	1	17.25	13.75	39.33	29.67
7	450	60	1	1	29.67	16.58	31.50	22.25
8	450	60	1	1	29.33	16.67	32.00	22.00
9	420	30	5	1	13.17	11.03	41.05	34.75
10	420	30	5	1	13.50	11.50	41.67	33.33
11	450	30	5	1	16.75	18.50	32.92	31.83
12	450	30	5	1	16.25	13.75	31.75	38.25
13	420	60	5	1	15.60	12.40	35.50	36.50
14	420	60	5	1	14.00	12.33	34.47	39.20
15	450	60	5	1	31.33	16.67	30.75	21.25
16	450	60	5	1	32.00	16.33	31.07	20.60
17	420	30	1	5	13.50	11.50	42.50	32.50
18	420	30	1	5	13.75	11.58	42.17	32.50
19	450	30	1	5	22.50	17.50	33.25	26.75
20	450	30	1	5	23.25	18.75	33.00	25.00
21	420	60	1	5	15.75	12.25	38.50	33.50

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองการไพโรไลซิสของน้ำมัน
ปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
จำลองการกลั่น

การทดลอง	ตัวแปร				องค์ประกอบ(ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	A (°C)	B (min)	C (%wt)	D (bar)	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล	กาก น้ำมัน
22	420	60	1	5	15.75	12.75	38.25	33.25
23	450	60	1	5	32.33	17.17	32.75	17.75
24	450	60	1	5	30.00	17.00	33.50	19.50
25	420	30	5	5	14.00	11.67	40.83	33.50
26	420	30	5	5	13.25	11.42	40.08	35.25
27	450	30	5	5	16.00	13.00	32.60	38.40
28	450	30	5	5	17.75	13.00	32.53	36.72
29	420	60	5	5	15.50	12.00	35.75	36.75
30	420	60	5	5	16.50	12.17	35.58	35.75
31	450	60	5	5	27.33	16.17	31.30	25.20
32	450	60	5	5	28.00	16.00	31.00	25.00
33	435	45	3	3	16.75	14.75	38.25	30.25
34	435	45	3	3	16.67	15.33	36.25	31.75
35	435	45	3	3	17.50	14.17	37.33	31.00
36	435	45	3	3	15.50	15.17	37.33	32.00
37	435	45	3	3	15.00	14.67	37.83	32.50

ภาคผนวก ข.

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลและการใช้โปรแกรม Design Expert

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design) หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ ได้แก่ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากอันตรกิริยาของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ เนื่องจากการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองทีละปัจจัย 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 เป็นการออกแบบการทดลองในกรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร คนงาน และใน 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 ซึ่งทำให้เราสามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและปัจจัยที่สนใจในลักษณะที่เป็นสมการแบบควอดราติกได้

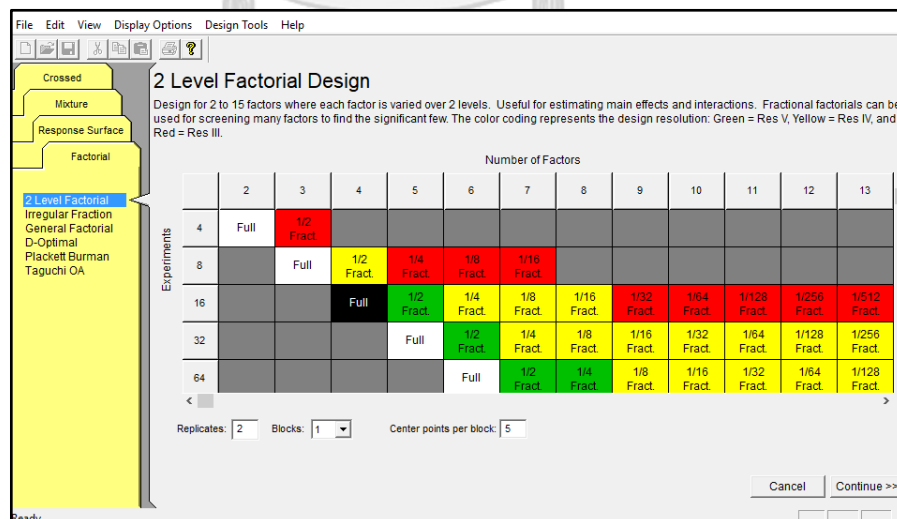
สมการในการคำนวณ

1. $Contrast_{AB...K} = (\text{ผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment}) \times \text{สัมประสิทธิ์ } (-1 \text{ หรือ } +1) \text{ ของตัวแปรหรือปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร}$
2. $Effect Estimate_{AB...K} = \frac{2(Contrast_{AB...K})}{n2^k}$
3. Sum of Square_{AB...K} : $SS_{AB...K} = 2(Contrast_{AB...K})^2$
4. Total of Sum of Squares : $SS_T = \frac{\sum_{i=1} \sum_{j=1} \sum_{k=1} y_{ijk}^2 - y^2}{N}$
5. Mean of Square Error : $SS_E = SS_T - \text{Sum Squares of Main Effect}$
6. Mean of Square : $MS = \frac{SS_{AB...K}}{\text{Degree of Freedom}}$
7. %Normal probability = $\frac{(\text{Cumulative frequency} - 0.5) \times 100}{\text{Total cumulative frequency}}$
8. $F_o = \frac{\text{Mean Square of Error}}{\text{Mean Square of error}}$

การใช้โปรแกรม Design Expert

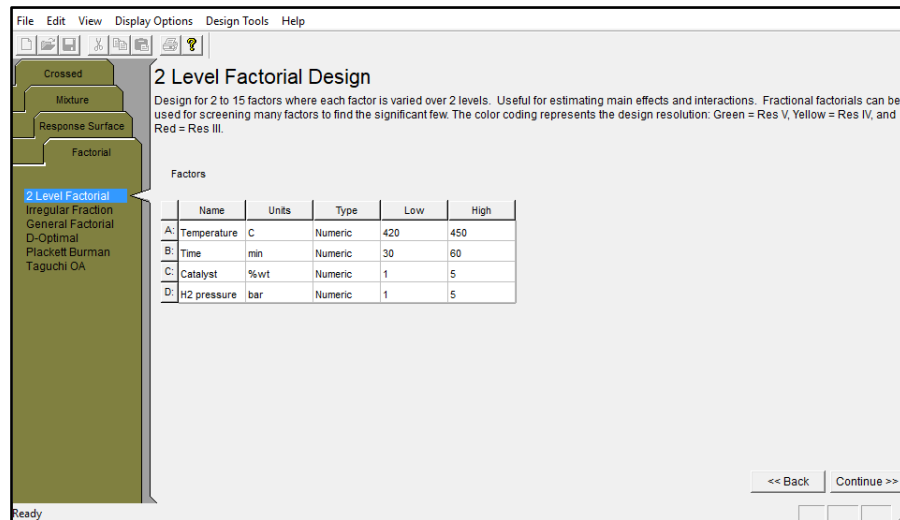
ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Design Expert รุ่น 6.0.0 โดยมีขั้นตอนในการออกแบบการทดลองจนถึงวิธีการคำนวณ ดังต่อไปนี้

- 1) เข้าสู่โปรแกรม คลิกไปที่ File แล้วไปที่ New Design จะแสดงดังภาพที่ ข.1



ภาพที่ ข. 1 Two Level Factorial Design

- 2) เลือกแบบจำลองตามตัวแปรที่ต้องการศึกษา ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษา 4 ตัวแปร ดังนั้นจึงเลือกที่ Number of Factors 4 เลือกที่ Full ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง เลือก Replicate -> 2 มีค่ากลาง 5 ค่า เลือก Center point per block -> 5 จากนั้นกด Continue จะแสดงดังภาพที่ ข.2



ภาพที่ ข. 2 การกำหนดตัวแปรที่ศึกษา

- 3) ใส่ข้อมูลลงในตารางในภาพที่ ข.2
 ที่ช่อง Name ให้ใส่ชื่อตัวแปรที่ศึกษา เช่น อุณหภูมิในการปฏิกิริยา -> Temperature
 ที่ช่อง Units ให้ใส่หน่วยของตัวแปรที่ศึกษา เช่น องศาเซลเซียส -> C
 ที่ช่อง Low ให้ใส่ขอบเขตต่ำสุดของตัวแปรที่ศึกษา
 ที่ช่อง High ให้ใส่ขอบเขตสูงสุดของตัวแปรที่ศึกษา
 จากนั้นกด Continue แสดงดังภาพที่ ข.3



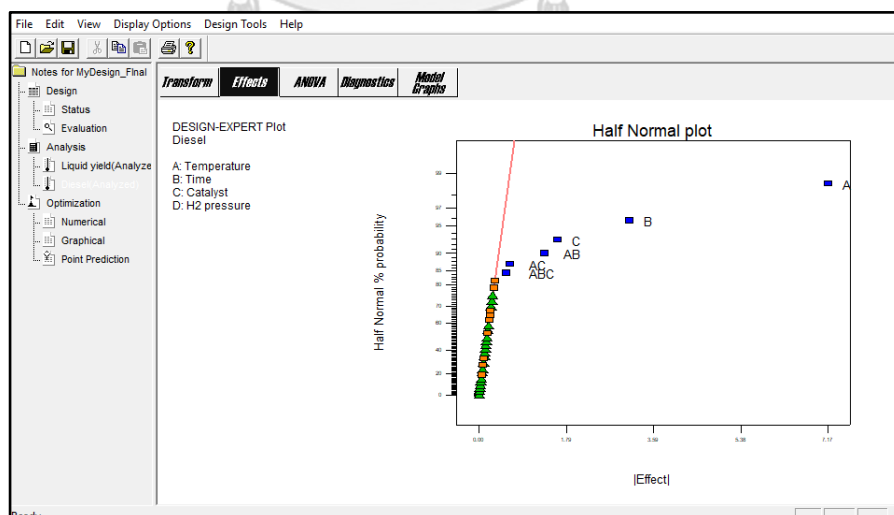
ภาพที่ ข. 3 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง

- 4) ทำการเลือกจำนวนตัวแปรตอบสนอง (Response) แล้วจึงใส่ชื่อของตัวแปรตอบสนองในช่อง Name และหน่วยของตัวแปรตอบสนองในช่อง Unites แล้วกด Continue
- 5) กรอกค่าที่ได้จากการทดลองในช่องของตัวแปรตอบสนอง จะแสดงดังภาพที่ ข.4

Std	Run	Block	Factor 1 A: Temperature C	Factor 2 B: Time min	Factor 3 C: Catalyst %wt	Factor 4 D: H2 pressure bar	Response 1 Liquid yield %wt	Response 2 Diesel %wt
28	1	Block 1	450.00	30.00	5.00	5.00	69.33	32.6
17	2	Block 1	420.00	30.00	1.00	5.00	85	42.5
20	3	Block 1	450.00	30.00	1.00	5.00	73.67	33
13	4	Block 1	420.00	60.00	5.00	1.00	79	35.75
4	5	Block 1	450.00	30.00	1.00	1.00	75	34.75
30	6	Block 1	420.00	60.00	5.00	5.00	79	35.75
23	7	Block 1	450.00	60.00	1.00	5.00	68.67	31.75
25	8	Block 1	420.00	30.00	5.00	5.00	79.33	40.83
16	9	Block 1	450.00	60.00	5.00	1.00	69	30.75
35	10	Block 1	435.00	45.00	3.00	3.00	71	38.25
18	11	Block 1	420.00	30.00	1.00	5.00	87.07	42.17
31	12	Block 1	450.00	60.00	5.00	5.00	65.33	31.33
7	13	Block 1	450.00	60.00	1.00	1.00	68.67	31.5
14	14	Block 1	420.00	60.00	5.00	1.00	80.33	35.5
27	15	Block 1	450.00	30.00	5.00	5.00	68	32.53
5	16	Block 1	420.00	60.00	1.00	1.00	85.67	38.8
24	17	Block 1	435.00	45.00	3.00	3.00	73.67	36.25
29	18	Block 1	420.00	60.00	5.00	5.00	79.67	35.58
15	19	Block 1	450.00	60.00	5.00	1.00	70	31.07

ภาพที่ ข. 4 การทดลองที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม Design-Expert

- 6) การวิเคราะห์ผลการทดลอง เริ่มจากเลือกตัวแปรตอบสนองที่ต้องการวิเคราะห์ที่แถบทางด้านซ้ายมือ และกด Effects ดังภาพที่ ข.5 ทำการเลือกจุดที่มีแนวโน้มออกจากเส้นตรง



ภาพที่ ข. 5 half normal plot

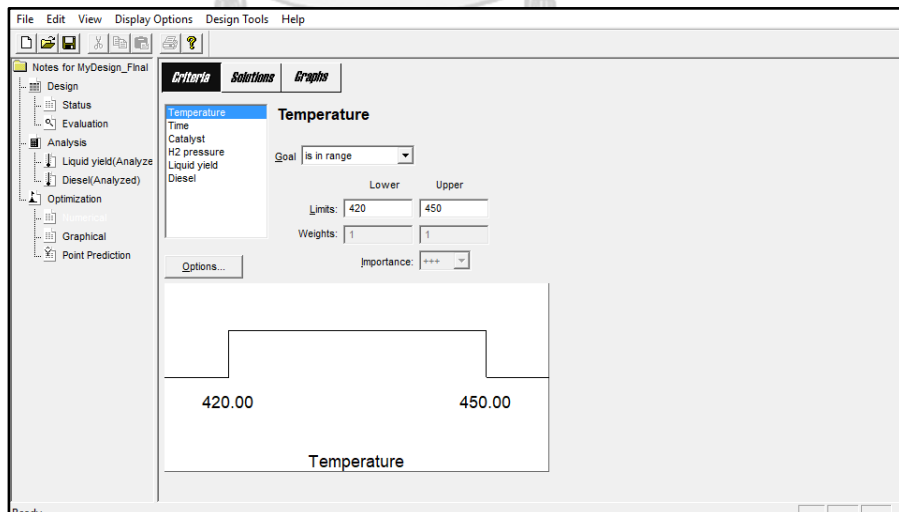
- 7) กด ANOVA จะแสดงตาราง ดังรูปที่ ข.6 ซึ่งแสดงตาราง ANOVA ที่วิเคราะห์ได้ ทำการอ่านค่า และวิเคราะห์ผล

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	530.07	7	75.72	172.02	< 0.0001	significant
A	411.56	1	411.56	934.92	< 0.0001	
B	76.38	1	76.38	173.52	< 0.0001	
C	21.03	1	21.03	47.77	< 0.0001	
AB	14.77	1	14.77	33.55	< 0.0001	
AC	3.28	1	3.28	7.44	0.0109	
BC	0.49	1	0.49	1.11	0.3004	
ABC	2.57	1	2.57	5.83	0.0226	
Curvature	16.91	1	16.91	38.41	< 0.0001	significant
Residual	12.33	28	0.44			
Lack of Fit	2.99	8	0.37	0.80	0.6095	not significant
Pure Error	9.34	20	0.47			
Cor Total	559.31	36				

The Model F-value of 172.02 implies the model is significant. There is only

ภาพที่ ข. 6 ผลของการวิเคราะห์ตัวแปร

- 8) ทำการวิเคราะห์ผล ให้ครบทุกตัวแปรตอบสนอง ตามข้อที่ 6-7
- 9) เมื่อวิเคราะห์ครบทุกตัวแปรตอบสนองแล้ว หากภาวะที่เหมาะสมโดยเลือก Numerical ตรงแถบ ด้านซ้ายมือด้านล่างคำว่า Optimization จะแสดงผลดังภาพที่ ข.7 ทำการกำหนดค่าของตัวแปรตอบสนองที่ต้องการ เช่น กำหนดให้มีค่าสูงสุด ในช่อง Goal ให้เลือก maximum จากนั้นกด Solution จะแสดงตารางที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาภาวะที่เหมาะสม ดังภาพที่ ข.8



ภาพที่ ข. 7 การกำหนดค่าขอบเขตตัวแปรตอบสนองที่ต้องการหาภาวะที่เหมาะสม

File Edit View Display Options Design Tools Help

Notes for R-R-4
 Design
 Status
 Evaluation
 Analysis
 Liquid(Analyzed)
 Diesel(Analyzed)
 Optimization
 Graphical
 Solutions Tool on
 Report
 Ramps
 Histogram

Criteria Solutions Graphs

Solutions 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Constraints		Lower	Upper	Lower	Upper		
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance	
Temperature	is in range	420	450	1	1	3	
Time	is in range	30	60	1	1	3	
Cat.	is in range	1	5	1	1	3	
H2	is in range	1	5	1	1	3	
Liquid	maximize	64	88.67	1	1	3	
Diesel	maximize	30.75	42.67	1	1	3	

Solutions							
Number	Temperature	Time	Cat.	H2	Liquid	Diesel	Desirability
1	420.00	30.02	1.00	1.15	88.5268	42.3717	0.985 Selected
2	420.20	30.00	1.00	1.80	87.9627	42.3117	0.971
3	420.85	30.57	1.00	1.00	88.1938	42.0867	0.966
4	420.00	30.00	1.93	1.01	87.3306	42.1393	0.951
5	420.06	30.11	1.96	1.00	87.2583	42.1028	0.948

Ready

ภาพที่ ข. 8 ผลการคำนวณภาวะที่เหมาะสม



ภาคผนวก ค.

องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์ม
จากทะเลาะปาล์มเปล่า

องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ แสดงดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค. 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจากทะเลาะปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
2.658	1-Heptene	0.42
2.745	Heptane	1.78
2.828	2-Heptene, (E)-	0.36
2.934	3-Hexene, 2-methyl-, (E)-	0.17
3.074	Cyclohexane, methyl-	0.20
3.758	Toluene	0.37
3.818	Cyclohexene, 3-methyl-	0.21
3.92	Butanoic acid	0.09
4.181	1-Octene	0.46
4.358	Octane	3.05
4.505	2-Octene, (E)-	0.36
4.69	3-Octene, (Z)-	0.20
5.151	Cyclohexane, ethyl-	0.25
5.869	Ethylbenzene	0.18
6.08	Ethinamate	0.43
6.349	Pentanoic acid	0.19
6.662	1-Nonene	0.42
6.723	p-Xylene	0.25
6.904	Nonane	3.48

ตารางที่ ค. 1 (ต่อ) องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจาก ทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถั่วลอยผ่านหิน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตร มิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
7.085	2-Nonene, (E)-	0.45
7.319	2-Nonene, (E)-	0.18
9.929	Decane	1.84
10.114	5-Decene, (E)-	0.42
10.371	5-Decene, (E)-	0.26
10.602	cis-p-mentha-1(7),8-dien-2-ol	0.28
10.692	p-Cymene	0.14
10.904	Cyclohexane, butyl-	0.20
11.028	Indane	0.40
11.674	Benzene, butyl-	0.25
11.999	Benzene, 1-methyl-2-propyl-	0.17
12.301	Heptanoic acid	0.78
12.596	1-Phenyl-1-butene	0.26
12.925	1-Decene, 5-methyl-	0.45
13.011	Undecane	2.18
13.178	1-Decene, 5-methyl-	0.66
13.438	1-Decene, 5-methyl-	0.33
14.043	Cyclohexane, pentyl-	0.12
14.175	1-Phenyl-1-butene	0.34
14.734	Benzene, pentyl-	0.33
15.028	Benzene, (1,2-dimethylpropyl)-	0.13
15.164	Octanoic acid	0.62
15.482	Naphthalene	0.24
15.735	Cyclododecane	0.26
15.878	Cyclododecane	0.40

ตารางที่ ค. 1 (ต่อ) องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจาก ทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเถ้าลอยถ่านหิน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตร มิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
15.976	Dodecane	1.93
16.128	Cyclododecane	0.31
16.388	Cyclododecane	0.17
17.684	Bicyclododeca-9,11-diene	0.27
17.933	Nonanoic acid	1.24
18.560	4-Nonene, 5-butyl-	0.34
18.685	4-Nonene, 5-butyl-	0.19
18.779	Tridecane	3.57
18.915	4-Nonene, 5-butyl-	0.31
19.085	Naphthalene, 2-methyl-	0.15
19.179	4-Nonene, 5-butyl-	0.14
19.927	Heptylcyclohexane	0.17
20.558	n-Decanoic acid	1.93
21.215	7-Tetradecene	0.75
21.423	Tetradecane	2.96
21.551	7-Tetradecene	0.60
21.812	5-Tetradecene, (Z)-	0.26
22.654	Cyclopentane, 1-butyl-2-pentyl-	0.82
23.126	Benzene, octyl-	0.52
23.927	Pentadecane	25.16
24.037	2-Methyl-Z-4-tetradecene	0.62
24.301	2-Methyl-Z-4-tetradecene	0.38
25.159	n-Nonylcyclohexane	1.05
26.277	Hexadecane	1.12
27.753	3-Heptadecene, (Z)-	0.99

ตารางที่ ค. 1 (ต่อ) องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวที่ได้จากไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มจาก ทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ้ำลอยถ่านหิน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตร มิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
28.165	8-Heptadecene	1.37
28.52	Heptadecane	5.07
29.82	Cyclohexane, undecyl-	0.86
32.728	2-Heptadecanone	1.35
33.208	Hexadecanoic acid, methyl ester	0.18
33.918	n-Hexadecanoic acid	17.01
34.590	3-Octadecanone	0.74
40.959	9-Octadecenamide, (Z)-	0.83

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวกัณทิมา นิยะกิจ
วัน เดือน ปี เกิด	4 กุมภาพันธ์ 2538
สถานที่เกิด	สุราษฎร์ธานี
วุฒิการศึกษา	ระดับปริญญาตรี ภาควิชาเคมีเทคนิค สาขาเคมีวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	26/2 ม.1 ต.ดอนสัก อ.ดอนสัก จ.สุราษฎร์ธานี
ผลงานตีพิมพ์	ได้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ชื่องาน Pure and Applied Chemistry International Conference 2019 โดยนำเสนอผลงานวิจัยใน รูปแบบโปสเตอร์และได้รับการตีพิมพ์งานวิจัยลงในบทความวิจัยของงาน ประชุมวิชาการในครั้งนี้ด้วย